

Aus dem Centrum für Muskuloskeletale Chirurgie  
der Medizinischen Fakultät Charité – Universitätsmedizin Berlin

DISSERTATION

Das Ligamentum patellofemorale mediale –  
Insertionsentwicklung und Beziehung zur Wachstumsfuge

zur Erlangung des akademischen Grades  
Doctor medicinae (Dr. med.)

vorgelegt der Medizinischen Fakultät  
Charité – Universitätsmedizin Berlin

von

Philipp Utermann

aus Kiel

Datum der Promotion: 05.03.2021



Meinen Eltern in großer Dankbarkeit für die Liebe und Unterstützung  
auf meinem bisherigen Lebensweg gewidmet.



# Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	5
Abbildungsverzeichnis .....	8
Tabellenverzeichnis .....	12
Grafikverzeichnis .....	12
Abkürzungsverzeichnis .....	13
1. Zusammenfassung .....	15
2. Einleitung .....	19
2.1 Die patellofemorale Instabilität .....	19
2.1.1 Entstehung und Verlauf .....	19
2.1.2 Epidemiologie und Prädispositionen .....	19
2.2 Das patellofemorale Gelenk – Anatomie, Pathoanatomie und Biomechanik .....	20
2.2.1 Die statischen Faktoren – die Gelenkflächen-, Achs- und Torsionsgeometrie .....	21
2.2.2 Die aktiven Faktoren – der Musculus quadriceps femoris .....	22
2.2.3 Die passiven Faktoren – der Kapselbandapparat .....	22
2.2.4 Das Zusammenspiel der Faktoren .....	23
2.3 Diagnostik .....	26
2.4 Therapie .....	27
2.4.1 Behandlungsoptionen .....	27
2.4.2 Die MPFL-Rekonstruktion .....	28
2.5 Die Morphologie der MPFL-Ruptur .....	31
2.5.1 Verletzungstypen des MPFLs .....	31
2.5.2 Einfluss der Insertionsentwicklung auf die Bandstabilität .....	31
2.6 Die Lagebeziehung der femoralen MPFL-Insertion zur Wachstumsfuge .....	35

2.7 Fragestellungen .....	37
2.7.1 Die Lagebeziehung zwischen femoraler MPFL-Insertion und distaler Femurepiphysenfuge.....	37
2.7.2 Insertionsanatomie und -entwicklung des MPFLs .....	37
3. Material und Methodik .....	38
3.1 Studiendesign .....	38
3.2 Die Präparate .....	38
3.3 Die radiologische Untersuchung .....	39
3.3.1 Markierung der Bandansätze .....	39
3.3.2 Aufnahme der Röntgenbilder.....	40
3.3.3 Die radiologische Auswertung .....	42
3.3.3.1 Qualität .....	42
3.3.3.2 Auswertung der Insertionslokalisation.....	47
3.4 Die histologische Untersuchung.....	50
3.4.1 PMMA-Einbettung und anschließende Wiederauflösung .....	50
3.4.2 Paraffineinbettung .....	52
3.4.3 Färbung nach Masson-Goldner-Trichrom.....	52
3.4.4 Mikroskopie und histologische Auswertung.....	53
4. Ergebnisse.....	55
4.1 Die radiologische Auswertung.....	55
4.1.1 Qualität .....	55
4.1.2 Die Lagebeziehung der femoralen MPFL-Insertion zur distalen Femurepiphysenfuge.....	56
4.2 Histologie .....	63
4.2.1 Qualität .....	63
4.2.2 Die patellare MPFL-Insertion.....	63
4.2.2.1 Histologischer Aufbau der Insertion und ihrer Umgebung.....	63

4.2.2.2 Die Entwicklung der patellaren MPFL-Insertion .....	69
4.2.3 Die femorale MPFL-Insertion.....	82
4.2.3.1 Histologischer Aufbau der Insertion und ihrer Umgebung.....	82
4.2.3.2 Die Entwicklung der femoralen MPFL-Insertion .....	84
5. Diskussion .....	86
5.1 Histologie .....	86
5.1.1 Ergebniszusammenfassung .....	86
5.1.2 Aufbau der MPFL-Insertionen unter Berücksichtigung bekannter histologischer und biomechanischer Aspekte .....	86
5.1.3 Die Insertionsentwicklung in Relation zu bekannten histologischen und biomechanischen Aspekten.....	88
5.1.4 Der Einfluss der Entwicklung auf den MPFL-Läsionsort.....	90
5.1.5 Der Einfluss des MPFL-Läsionsortes auf den Behandlungserfolg.....	92
5.2 Die Lagebeziehung zwischen femoraler MPFL-Insertion und Wachstumsfuge ...	93
5.3. Einschränkungen der Studie .....	97
5.3.1 Die histologische Untersuchung .....	97
5.3.2 Die radiologische Untersuchung.....	98
5.4 Ausblick.....	100
5.5 Fazit.....	102
6. Literaturverzeichnis .....	105
7. Materialverzeichnis.....	116
Eidesstattliche Versicherung .....	119
Curriculum Vitae .....	121
Danksagung .....	123

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung eines rechten Kniegelenks; Ansicht von ventromedial .....	20
Abbildung 2: Sulcus trochleae femoris und Patella eines rechten Kniegelenks; Ansicht von distal .....	20
Abbildung 3: Der Q-Winkel .....	24
Abbildung 4: Der Tuberositas-tibiae-trochleae-groove-Abstand (TTTG) .....	25
Abbildung 5: Die MPFL-Rekonstruktion.....	29
Abbildung 6: Der Schöttle-Punkt.....	30
Abbildung 7: Schematische Darstellung einer periostal-fibrösen Insertion .....	32
Abbildung 8: Schematische Darstellung einer fibrokartilaginären Insertion .....	33
Abbildung 9: Schematische Darstellung einer in der Entwicklung befindlichen Insertion .....	34
Abbildung 10: Linksseitiges Präparat des 9-jährigen Jungen, Ansicht von medial .....	39
Abbildung 11: Linksseitiges Präparat des 9-jährigen Jungen, Ansicht von lateral .....	40
Abbildung 12: Rechtsseitiges Präparat des 9-jährigen Jungen .....	40
Abbildung 13: Präparat im Röntgengerät .....	41
Abbildung 14: Rechtsseitiges Präparat beim 9-jährigen Jungen, a.p. ....	43
Abbildung 15: Rechtsseitiges Präparat beim 9-jährigen Jungen, lateral.....	43
Abbildung 16: Rechtsseitiges Präparat beim 9-jährigen Jungen, axial .....	43
Abbildung 17: Rechtsseitiges Präparat des 8-jährigen Jungen, a.p. ....	44
Abbildung 18: Rechtsseitiges Präparat des 8-jährigen Jungen, lateral.....	44
Abbildung 19: Linksseitiges Präparat beim jüngsten Kind, a.p. ....	45

Abbildung 20: Linksseitiges Präparat beim jüngsten Kind, lateral .....	45
Abbildung 21: Linksseitiges Präparat beim jüngsten Kind, axial.....	45
Abbildung 22: Rechtsseitiges Präparat beim 12-jährigen Mädchen, a.p. ....	46
Abbildung 23: Rechtsseitiges Präparat beim 12-jährigen Mädchen, lateral.....	46
Abbildung 24: Rechtsseitiges Präparat beim 12-jährigen Mädchen, axial .....	46
Abbildung 25: Linksseitiges Präparat des 5-jährigen Jungen, axial.....	48
Abbildung 26: Rechtsseitiges Kniegelenk eines Kindes, a.p. ....	49
Abbildung 27: Aufgespanntes Präparat im Einbettungsglas .....	51
Abbildung 28: Präparat eingebettet in nicht vollständig ausgehärtetem PMMA.....	51
Abbildung 29: Linksseitige femorale Insertion des jüngsten Kindes, ca. x10.....	53
Abbildung 30: Rechtsseitiges Präparat des 9-jährigen Jungen, a.p. ....	58
Abbildung 31: Rechtsseitiges Präparat des 9-jährigen Jungen, lateral.....	58
Abbildung 32: Linksseitige femorale MPFL-Insertion des 9-jährigen Jungen, a.p. ....	59
Abbildung 33: Linksseitige femorale MPFL-Insertion des 9-jährigen Jungen, lateral.....	59
Abbildung 34: Linksseitige femorale MPFL-Insertion des 7-jährigen Jungen, a.p. ....	59
Abbildung 35: Linksseitige femorale MPFL-Insertion des 7-jährigen Jungen, lateral.....	60
Abbildung 36: Linksseitige femorale MPFL-Insertion des 8-jährigen Jungen, a.p. ....	60
Abbildung 37: Linksseitige femorale MPFL-Insertion des 8-jährigen Jungen, lateral.....	60
Abbildung 38: Rechtsseitige femorale MPFL-Insertion des 8-jährigen Jungen, a.p.....	61
Abbildung 39: Rechtsseitige femorale MPFL-Insertion des 8-jährigen Jungen, lateral..	61
Abbildung 40: Linksseitige femorale MPFL-Insertion des jüngsten Kindes, a.p.....	61

Abbildung 41: Linksseitige femorale MPFL-Insertion des jüngsten Kindes, lateral.....	62
Abbildung 42: Rechtsseitige femorale MPFL-Insertion des jüngsten Kindes, a.p.....	62
Abbildung 43: Rechtsseitige femorale MPFL-Insertion des jüngsten Kindes, lateral .....	62
Abbildung 44: Rechte patellare MPFL-Insertion des 8-jährigen Jungen, ca. x30 .....	64
Abbildung 45: Rechte Patellavorderseite des 9-jährigen Jungen, ca. x50 .....	65
Abbildung 46: Linke patellare MPFL-Insertion des 7-jährigen Jungen, ca. x50 .....	66
Abbildung 47: Rechte patellare MPFL-Insertion des 8-jährigen Jungen, ca x110 .....	67
Abbildung 48: Rechte patellare MPFL-Insertion des 7-jährigen Jungen, ca. x140 .....	67
Abbildung 49: Fibrokartilaginärer Anteil der rechten patellaren MPFL-Insertion beim 9-jährigen Jungen, ca. x60.....	68
Abbildung 50: Rechtsseitiger profunder medialer Kapsel-Band-Apparat und Patellarrückfläche beim 9-jährigen Jungen, ca. x30 .....	69
Abbildung 51: Rechtsseitige mediale Patellakante beim 8-jährigen Jungen, ca. x25 ....	70
Abbildung 52: Rechtsseitige mediale Patellakante des 7-jährigen Jungen, ca. x15 .....	72
Abbildung 53: Rechtsseitige patellare MPFL-Insertion des 7-jährigen Jungen, ca. x230 .....	73
Abbildung 54: Linksseitige patellare MPFL-Insertion des 7-jährigen Jungen, ca. x200.	74
Abbildung 55: Linksseitige patellare MPFL-Insertion beim 8-jährigen Jungen, oberflächlicher fibrokartilaginärer Insertionsbereich, ca. x185.....	74
Abbildung 56: Linksseitige patellare MPFL-Insertion des 8-jährigen Jungen, profunder fibrokartilaginärer Insertionsbereich, ca. x225 .....	75
Abbildung 57: Rechtsseitige mediale Patellakante des 9-jährigen Jungen, ca. x15 .....	76
Abbildung 58: Rechtsseitiger fibrokartilaginärer MPFL-Insertionsbereich, profunder Anteil, beim 9-jährigen Jungen, ca. x240.....	77

Abbildung 59: Rechtsseitiger fibrocartilaginärer MPFL-Insertionsbereich, oberflächlicher Anteil, beim 9-jährigen Jungen, ca. x240.....	77
Abbildung 60: Rechtsseitige mediale Patella des 12-jährigen Mädchens, ca. x20 .....	78
Abbildung 61: Rechtsseitiger fibrocartilaginärer MPFL-Insertionsbereich des 12-jährigen Mädchens, ca. x120 .....	79
Abbildung 62: Rechtsseitiger fibrocartilaginärer MPFL-Insertionsbereich des 12-jährigen Mädchens, ca. x240 .....	80
Abbildung 63: Linksseitige patellare MPFL-Insertion des 12-jährigen Mädchens, ca. x50 .....	81
Abbildung 64: Rechtsseitige femorale MPFL-Insertion des 8-jährigen Jungen, ca. x30	83
Abbildung 65: Rechtsseitige femorale MPFL-Insertion des jüngsten Kindes, ca. x30 ...	83
Abbildung 66: Linksseitige femorale MPFL-Insertion des 5-jährigen Jungen, ca. x10...	84
Abbildung 67: Rechtsseitige femorale MPFL-Insertion des 9-jährigen Jungen, ca. x15	84
Abbildung 68: Rechtsseitige femorale MPFL-Insertion des 12-jährigen Mädchens, ca. x15 .....	85
Abbildung 69: Rechtsseitige femorale MPFL- Insertion des 12-jährigen Mädchens, ca. x100.....	85
Abbildung 70: Polarisierter lichtmikroskopischer Aufnahme einer reifen fibrocartilaginären Insertion.....	89
Abbildung 71: Seitliches Durchleuchtungsbild, MPFL-Rekonstruktion bei einem Heranwachsenden.....	94
Abbildung 72: a.p. Durchleuchtungsbild, MPFL-Rekonstruktion bei einem Heranwachsenden.....	94

## **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1: Auflistung zu Alter und Geschlecht der Kinder sowie Seitenangabe der vorliegenden Präparate .....	39
Tabelle 2: Qualitative Einteilung der Präparate hinsichtlich ihres Wachstumsfugenanschnitts.....	55
Tabelle 3: Lagebeziehung und Distanz zwischen femoralem MPFL-Insertionszentrum und distaler Femurepiphysenfuge bzw. theoretischem Wachstumsfugenzentrum bei den Präparaten mit vollständigem Wachstumsfugenanschnitt .....	57
Tabelle 4: Distanz und Lagebeziehung zwischen femoralem MPFL-Insertionszentrum und proximalem Rand der distalen Femurepiphysenfuge bei den Präparaten mit partiellem Wachstumsfugenanschnitt .....	57
Tabelle 5: Schrittabfolge der Entwässerung vor PMMA-Einbettung .....	116
Tabelle 6: Entwässerungs- und Infiltrationsprotokoll der Paraffin-Einbettung.....	116
Tabelle 7: Darstellung der vor der Färbung durchlaufenden Entparaffinisierung und Rehydrierung.....	117
Tabelle 8: Schrittabfolge der Einfärbung nach Masson-Goldner-Trichrom .....	117

## **Grafikverzeichnis**

Grafik 1: Knochenkernentwicklung und Insertionsfaserknorpelentwicklung an der patellaren MPFL-Insertion .....	71
---	----

## Abkürzungsverzeichnis

<b>Abkürzung</b>	<b>ausgeschriebene Form</b>
a.p.	anterior-posterior
Abb.	Abbildung
al.	alii / aliae / alia
B	Knochen
bspw.	beispielsweise
bzw.	beziehungsweise
EDTA	Ethylendiamintetraessigsäure
F	Fibroblasten
FI	fibröse Insertion
FK	Faserknorpel
FKI	fibrocartilaginäre Insertion
HK	hyaliner Knorpel
K	Gelenkkapsel
KFK	kalzifizierter Faserknorpel
LK	lateraler Kondylus
MCL	mediales Kollateralband
MK	medialer Kondylus
MPFL	mediales patellofemorales Ligament
OFI	ossär-fibröse Insertion
OZ	Ossifikationszentrum
P	Perichondrium / Periost
PFI	periostal-fibröse Insertion
PI	profunde Insertionsanteile
PMMA	Polymethylmethacrylat
RPG	retropatellare Gelenkfläche
SB	prägnante straffe Bindegewebsstrukturen
SI	superficiales Insertionsanteile
Tab.	Tabelle
TF	tiefe Beinfaszie
TTTG	Tuberositas-tibiae-trochlea-groove-Abstand
u. a.	unter anderem

UFK	unkalzifizierter Faserknorpel
VKB	vorderes Kreuzband
VM	Musculus vastus medialis
VMO	Musculus vastus medialis obliquus

# 1. Zusammenfassung

## Einleitung:

Bei der Rekonstruktion des Ligamentum patellofemorale mediale (MPFL) ist es essenziell, den femoralen Bohrkanal anatomiegerecht zu platzieren. Bei Heranwachsenden muss zudem die nahe gelegene distale Femurepiphysenfuge geschont werden.

Die femorale MPFL-Insertion wird als überwiegend distal gelegen beschrieben. Allerdings ist die bisherige Studienzahl an anatomischen Präparaten klein. Insbesondere die Frage, inwiefern sich die femorale Insertion in Abhängigkeit vom Alter proximalisiert, wird nicht einheitlich beantwortet.

Die Häufigkeitsverteilung der verschiedenen MPFL-Läsionsorte scheint sich zwischen Heranwachsenden und Erwachsenen zu unterscheiden. Dies könnte durch die Insertionsentwicklung bedingt sein. Entsprechende histologische Untersuchungen des MPFLs lassen sich jedoch bisher in der Literatur nicht finden.

Diese Arbeit sollte anhand humaner kindlicher Präparate einerseits radiologisch die anatomische Beziehung zwischen femoraler Insertion und Wachstumsfuge und andererseits histologisch Aufbau und Entwicklung beider Insertionen darstellen.

## Material und Methodik:

Es standen 11 Präparate aus MPFL mit insertionsnahen Patella- und Femuranteilen von 6 Kindern bis zum 13. Lebensjahr zur Verfügung.

Nach Markierung des femoralen Insertionszentrums wurden die Präparate geröntgt.

Anschließend wurden histologische Paraffinschnitte angefertigt, nach Masson-Goldner-Trichrom gefärbt und lichtmikroskopisch untersucht.

## Ergebnisse:

Radiologisch konnten 7 Präparate von 4 Kindern ausgewertet werden. Bei 5 (71,4 %) lag die femorale Insertion distal, bei 2 (28,6 %) etwa auf Höhe und bei keinem (0 %) proximal der Wachstumsfuge.

Patellar zeigte sich die Entwicklung einer größtenteils fibrokartilaginären, femoral die einer rein periostal-fibrösen Insertion.

Als Folge enchondraler Ossifikation wies die Knochenanlage beider Insertionen beim ältesten Kind keine relevanten Mengen hyalinen Knorpels mehr auf. Patellar begann sich eine Kortikalis zu entwickeln, eine kortiko-kartilaginäre Verzahnung mit der Insertion zeigte sich jedoch noch nicht.

## **Diskussion:**

Diese Arbeit legt nahe, dass die femorale Insertion zumeist distal der Wachstumsfuge liegt. Eine relative Insertionsproximalisierung bei älteren Kindern konnte nicht beobachtet werden.

Weiterhin wurden erstmals Aufbau und Entwicklung der physiologischen MPFL-Insertionen histologisch untersucht. Die Arbeit liefert somit substanziell neue Erkenntnisse, auf welcher strukturellen Grundlage MPFL-Verletzungen resultieren.

An einer fibrokartilaginären Insertion gilt der hyaline Knorpel während der Entwicklung als Schwachstelle und die kortiko-kartilaginäre Verzahnung ist für die Insertionsstabilität elementar.

Daher erklärt die Arbeit ein gehäuftes Auftreten patellarer MPFL-Läsionen bei Heranwachsenden, welches in der Literatur beschrieben wurde, schlüssig. Diese Läsionen scheinen gut auf eine konservative Behandlung anzusprechen.

## **Abstract**

### **Introduction**

When reconstruction of the patellofemoral ligament (MPFL) is performed it is essential to place the femoral drill hole anatomically. In addition, in adolescents the close-by distal femoral physis must not be injured.

The femoral MPFL attachment has been described as being located predominantly distal. However, there had only been a few studies analysing anatomical specimens so far. In particular, the question how the attachment could move proximal related to age has not been answered conclusively.

Comparing adolescents and adults, differences in distribution of MPFL lesion sites seem to exist. This could be due to attachment development, however, there cannot be found corresponding histological studies on the MPFL in literature.

Analysing human specimens of children, the aim of this study was to demonstrate the anatomical relationship between the femoral attachment and the physis radiologically as well as structure and development of both attachments histologically.

### **Materials and Methods:**

11 specimens of 6 children until the age of 12 years, consisting of MPFL with adjacent parts of patella and femur, were available.

After marking the center of the femoral attachment the specimens were x-rayed.

Finally, histological paraffin sections stained with Masson-Goldner trichrome were prepared and analysed using light microscopy.

**Results:**

7 specimens of 4 children could be analysed radiologically. On 5 (71,4 %) the femoral attachment was distal, on 2 (28,6 %) approximately on the same height and on none of them (0 %) proximal to the physis.

The development of a mainly fibrocartilaginous patellar and a purely periosteal fibrous femoral attachment was observed.

Due to enchondral ossification, the bone system on both attachments of the oldest child contained no relevant amount of hyaline cartilage anymore.

Patellarly cortical bone began to develop, however, a cortical cartilaginous interlocking to the attachment could not be seen yet.

**Discussion:**

This study suggests that the femoral attachment is predominantly located distal to the physis. A relative proximalization in older children could not be observed.

Furthermore, for the first time structure and development of the physiological MPFL attachments were analysed histologically providing substantially new knowledge on which structural basis MPFL lesions occur.

At a fibrocartilaginous attachment hyaline cartilage is regarded to be a failure point during development and the cortical cartilaginary interlocking is fundamental for attachment stability.

Therefore, this study conclusively explains frequent occurrence of patellar MPFL lesions in adolescents, that has been described in literature. Those lesions seem to respond favourably to conservative treatment.



## **2. Einleitung**

### **2.1 Die patellofemorale Instabilität**

#### **2.1.1 Entstehung und Verlauf**

Die patellofemorale Instabilität tritt in einer großen Abhängigkeit von vorbestehenden anatomischen Risikofaktoren auf <sup>1</sup>. Die Patella luxiert dabei nach lateral <sup>2</sup>.

Die traumatische Patellaerstluxation ereignet sich häufig im Rahmen sportlicher Aktivität <sup>3,4</sup>. Hiervon abzugrenzen sind habituelle Patellaluxationen, die sich zumeist bereits in der frühen Kindheit zeigen <sup>5</sup>.

Zu 93 % weist das Kniegelenk während des Traumas eine Flexions- und Valgusstellung auf, in 7 % der Fälle ist ein Kniegelenksanprall ursächlich <sup>3</sup>.

Es resultieren nahezu immer Hämarthros sowie relevante Schädigungen des medialen patellofemorales Ligaments (MPFL) (Abb. 1) <sup>3,6,7</sup>. MPFL-Läsionen sind prädisponierend für weitere Instabilitätsereignisse <sup>8-10</sup>.

Bereits nach Erstluxation weisen bis zu 78 % der Patienten Schädigungen des Gelenkknorpels auf, 20 % in einer Größe von über 1 cm<sup>2</sup> <sup>3,4,11,12</sup>. Insbesondere die mediale Patellafacette und der laterale Femurkondylus sind dabei gefährdet <sup>4</sup>.

Nach konservativer Behandlung erleiden zwischen 20 % und 71 % der Patienten eine Relaxation <sup>11,13,14</sup>. Eine chronische patellofemorale Instabilität mit rezidivierenden (Sub-) Luxationsereignissen, eingeschränkter Gelenkfunktion, Knorpelschäden oder patellofemorales Schmerzen kann sich entwickeln <sup>3,11,13,15,16</sup>.

Die Lebensqualität sowie die Teilnahme an Sport- und Freizeitaktivitäten sind eingeschränkt <sup>11</sup>.

Am Ende kann die fortgeschrittene patellofemorale Arthrose stehen <sup>17</sup>.

#### **2.1.2 Epidemiologie und Prädispositionen**

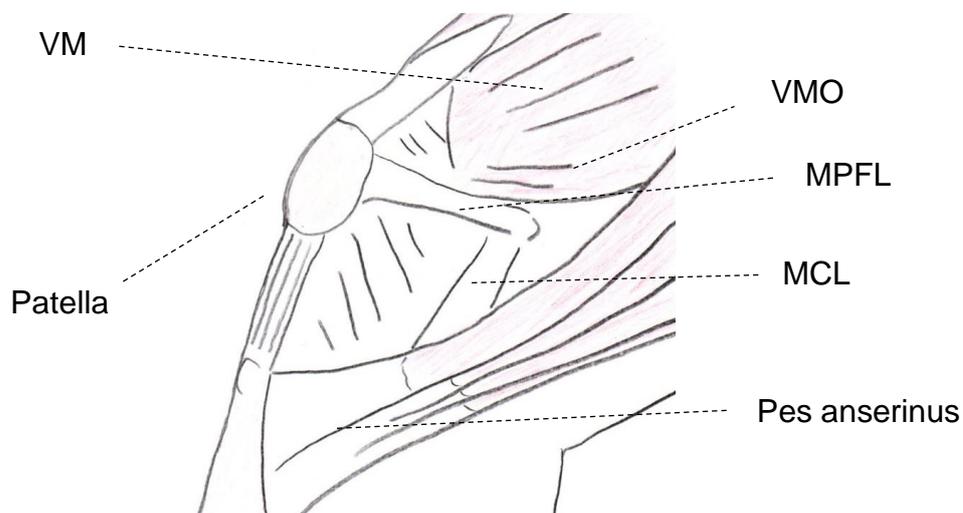
Die Entwicklung einer patellofemorales Instabilität beginnt mehrheitlich bereits bei jungen Patienten <sup>18,19</sup>. Die Inzidenz der Erstluxation liegt bei den 10- bis 17-jährigen bei 29/100.000 pro Jahr verglichen mit 5,8/100.000 in der Gesamtbevölkerung <sup>19</sup>.

Als prädisponierend gelten u. a. sportliche Aktivität und ein höheres Körpergewicht <sup>3,20</sup>. Mögliche Risiken für Relaxationen stellen eine positive Familienanamnese, Hyperlaxizität, eine Erstluxation vor dem 15. Lebensjahr sowie kontralaterale Instabilitätsereignisse dar <sup>13,21</sup>.

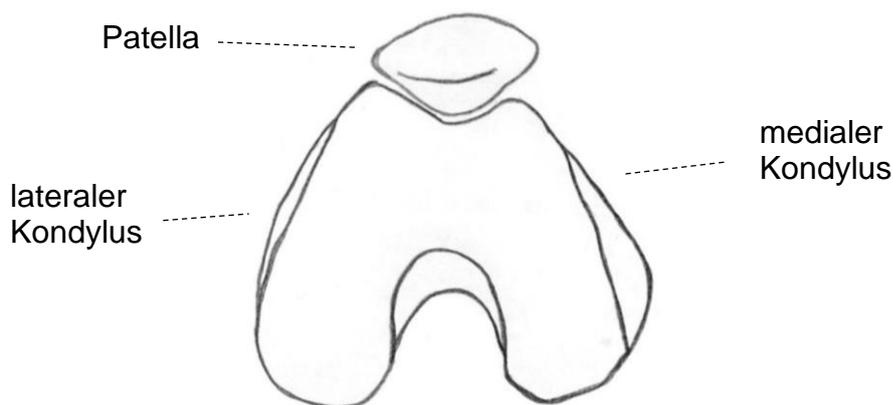
In den meisten Fällen stehen Patellaluxationen in Zusammenhang mit anatomischen Risikofaktoren, die Instabilitätsereignisse begünstigen und im Rahmen des folgenden Abschnitts näher beschrieben werden <sup>1,11,20,22</sup>.

## 2.2 Das patellofemorale Gelenk – Anatomie, Pathoanatomie und Biomechanik

Die Biomechanik des patellofemorales Gelenks wird durch statische bzw. knöcherne, aktive und passive Faktoren bestimmt (Abb. 1, 2) <sup>15</sup>.



**Abbildung 1: Schematische Darstellung eines rechten Kniegelenks; Ansicht von ventromedial**  
MCL mediales Kollateralband; MPFL mediales patellofemorales Ligament; VM Musculus vastus medialis; VMO Musculus vastus medialis obliquus



**Abbildung 2: Sulcus trochleae femoris und Patella eines rechten Kniegelenks; Ansicht von distal**

### **2.2.1 Die statischen Faktoren – die Gelenkflächen-, Achs- und Torsionsgeometrie**

Im patellofemorale Gelenk artikuliert die Trochlea femoris mit der retropatellaren Gelenkfläche (Abb. 2) <sup>15,23,24</sup>. Retropatellar werden die mediale und laterale Gelenkflächenfacette durch einen vertikalen First getrennt, dessen Winkel (Facettenwinkel) im anatomischen Normalzustand ca.  $130^\circ \pm 10^\circ$  beträgt <sup>24</sup>.

Die retropatellare Gelenkflächenform lässt sich nach Wiberg in 3 Typen unterteilen, formspezifische Assoziationen mit einer patellofemorale Instabilität konnten für diese jedoch nicht nachgewiesen werden <sup>23,25</sup>.

Im axialen Röntgenbild von Gesunden weist die Trochlea femoris einen Winkel von durchschnittlich  $130^\circ$  auf <sup>1</sup>.

Die Trochleadysplasie stellt den bedeutendsten Risikofaktor der patellofemorale Instabilität dar, sie kann bei 68 % bis 96 % der Patienten nachgewiesen werden <sup>1,11,22</sup>.

Dejour et al. teilten sie anhand radiologischer Kriterien in 4 Grade ein.

Axial betrachtet kann dabei ein leicht abgeflachter Sulcus (Grad A) von einem flachen oder konvexen unterschieden werden (Grad B). Die höheren Schweregrade weisen eine Facettenasymmetrie mit konvexem lateralen und hypoplastischem medialen Kondylus auf (Grad C), ggf. auch mit zusätzlicher vertikal verlaufender Gelenkflächenkomponente und Spornbildung (Grad D) <sup>26</sup>.

Insbesondere der Winkel des superioren Gelenkflächenrandes ist für die Patellaführung bedeutend <sup>23</sup>. Bei vorliegender Dysplasie nimmt er nach Salzmänn et al. MR-radiologisch von durchschnittlich  $156^\circ$  (Grad A) bis auf  $169^\circ$  (Grad C) zu, bei einer Grad D-Dysplasie maßen sie ihn aufgrund der Konvexität mit Spornbildung nicht <sup>26,27</sup>.

Eine suffiziente knöcherner Patellaführung durch die Trochlea ist in solchen Fällen nicht möglich, wodurch das Auftreten von Instabilitätsereignissen erheblich begünstigt wird <sup>1,23,28</sup>.

Die Trochleaanatomie beeinflusst die Biomechanik des patellofemorale Gelenkes komplex. So konnte bei Patienten mit patellofemorale Arthrose und Trochleadysplasie eine vergrößerte Innenrotation der Trochlea nachgewiesen werden <sup>29</sup>. Zudem sind im Falle einer abgeflachten lateralen Trochleafacette auch die laterale patellare Verkippung (Patella-Tilt) und Translation (Patella-Shift) vergrößert <sup>28</sup>.

Biomechanisch bedeutend sind auch die Achs- und Torsionsverhältnisse der unteren Extremität <sup>30</sup>.

Die Mikulicz-Linie verläuft zwischen der Mitte des Femurkopfes und der Mitte der Malleolengabel. Sie entspricht der mechanischen Tragachse der unteren Extremität. Im anatomischen Normalzustand kreuzt sie den femorotibialen Gelenkspalt im Bereich der Eminentia intercondylaris. Bei einem Genu valgum liegt das Kniegelenk zur Mikulicz-Linie medialisiert, bei einem Genu varum lateralisiert <sup>24</sup>.

Ein Genu valgum stellt einen Risikofaktor für die patellofemorale Instabilität dar und konnte zu 77 % bei Patienten mit zurückliegenden Patellaluxationen, jedoch nur zu 23 % in einer Kontrollgruppe nachgewiesen werden <sup>30</sup>.

Beim gesunden Erwachsenen wird die physiologische Antetorsion des distalen Femurs gegenüber dem Schenkelhals mit durchschnittlich 10° bis 13° angegeben, nach kaudal schließt sich eine Innenrotation der proximalen Tibia von ca. 6° an <sup>24,30,31</sup>. Die Tibia selbst ist in ihrem Verlauf in asymptomatischen Kniegelenken um durchschnittlich 25° bis 35° nach außen torquiert <sup>1,30</sup>.

Patienten mit patellofemorale Instabilität weisen eine vergrößerte femorale Antetorsion von teils mehr als 30° auf; inwiefern die tibiale Torsion Risikofaktoren beinhalten könnte, beantwortet die Literatur hingegen weniger eindeutig <sup>1,30,32,33</sup>.

## **2.2.2 Die aktiven Faktoren – der Musculus quadriceps femoris**

Die aktive bzw. muskuläre Gelenkführung wird in erster Linie durch den Musculus quadriceps femoris bestimmt <sup>15,24</sup>.

Der Musculus vastus medialis obliquus (VMO) stellt den distalen Anteil des Musculus vastus medialis (VM) dar und verläuft in einem Winkel von 49° zur Femurachse in Richtung superomedialer Patellakante <sup>9</sup>. Ihm wird im Allgemeinen die größte Bedeutung bezüglich der muskulären Patellamedialisierung zugesprochen, wobei es jedoch strittig ist, inwiefern die aktiven Faktoren diesbezüglich überhaupt einen relevanten Einfluss ausüben <sup>8,34,35</sup>.

## **2.2.3 Die passiven Faktoren – der Kapselbandapparat**

Der mediale Kapselbandapparat stellt ein komplexes Bindegewebsnetzwerk mit verschiedenen Bandverstärkungen und individuell unterschiedlichem Ausprägungsgrad dar <sup>8–10,36–38</sup>. Über Fixierungen an der medialen Patellakante wirkt es einer Patellalateralisation entgegen <sup>8–10,36,38</sup>.

Warren et al. unterteilten ihn in 3 übereinander liegende Schichten. Die oberflächliche 1. Schicht stellt die Fascia cruris dar <sup>36</sup>.

Die mittlere 2. Schicht beinhaltet als wichtige Bandverstärkung das MPFL, die 3. und tiefste Schicht stellt die eigentliche Gelenkkapsel dar <sup>9,36</sup>. Die 1. und 2. Schicht verwachsen 1 bis 2 cm ventral des medialen Kollateralbandes (MCL) miteinander <sup>10,36</sup>.

Das MPFL trägt mit Kraftanteilen zwischen ca. 50 % und 60 % mit Abstand am stärksten zur passiv medialisierenden Patellaführung zwischen 0° und 30° Flexion bei <sup>8-10,38</sup>.

Sein kraniokaudaler Durchmesser weitet sich im Bandverlauf fächerförmig aus. An der femoralen Insertion beträgt er durchschnittlich zwischen ca. 15 mm und 17 mm, patellar zwischen ca. 25 mm und 28 mm <sup>10,37</sup>.

Die substanzielle Beschaffenheit des MPFLs ist jedoch sehr unterschiedlich. In manchen Kniegelenken präsentiert es sich als kräftige Bandstruktur, in anderen ist es teils nicht nachweisbar <sup>9,10,36,37,39</sup>.

Seine Variabilität und unscharfe Abgrenzbarkeit zu benachbarten Weichteilstrukturen spiegelt sich auch in variierenden Beschreibungen der Bandanatomie wider <sup>9,10,36,37,40,41</sup>. Patellar inseriert das MPFL in erster Linie entlang der proximalen Abschnitte der medialen Patellakante <sup>9,37,41</sup>.

Als exakte Lokalisation der femoralen MPFL-Insertion werden am häufigsten der mediale Femurepikondylus und das 12,6 mm proximal und 8,3 mm posterior davon gelegene Tuberculum adductorium genannt, jedoch auch das MCL und dessen femoraler Insertionsbereich <sup>9,10,36,37,40,41</sup>. LaPrade et al. lokalisierten die femorale MPFL-Insertion 1,9 mm anterior und 3,8 mm distal des Tuberculum adductoriums <sup>41</sup>.

Der proximale Rand des MPFLs weist Verwachsungen zum Musculus vastus medialis obliquus und intermedius auf, die distalen MPFL-Anteile stehen über das mediale Retinakulum auch mit der Patellasehne in Verbindung <sup>9,10,37,39,40</sup>.

Auch der laterale Kapselbandapparat trägt sowohl zur lateralen als auch zur medialen Patellastabilität bei <sup>42</sup>.

#### **2.2.4 Das Zusammenspiel der Faktoren**

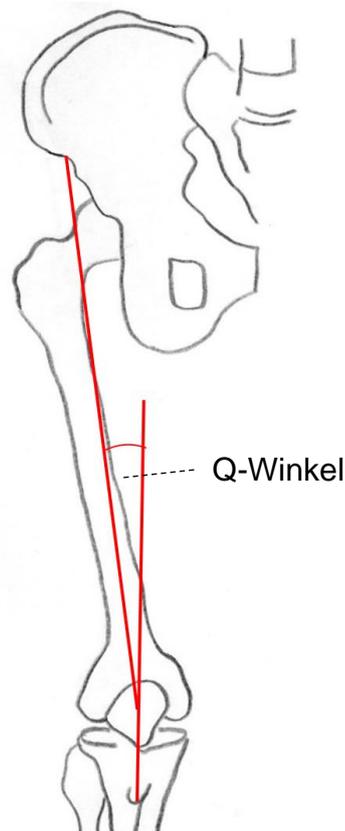
Die Patella leitet die Kraft des Musculus quadriceps femoris über die Patellasehne auf die Tuberositas tibiae fort <sup>24</sup>.

Die Zugrichtung des Muskels bildet hierbei mit dem Patellasehnenverlauf im Patellazentrum den nach kranial geöffneten Q-Winkel, der MR-radiologisch gemessen durchschnittlich ca. 6,5° beträgt und zu einer Lateralisation der Patella bei aktiver Streckung führt (Abb. 3) <sup>43,44</sup>.

Die Größe des Q-Winkels korreliert positiv mit der des Tuberositas-tibiae-trochlea-groove-Abstands (TTTG) (Abb. 4) <sup>1,45</sup>. Dieser wird in 2 übereinanderprojizierten axialen Schnittbildern bestimmt und stellt den lateralen Abstand vom Mittelpunkt der Tuberositas tibiae zu dem tiefsten Punkt des Sulcus trochleae dar <sup>1</sup>.

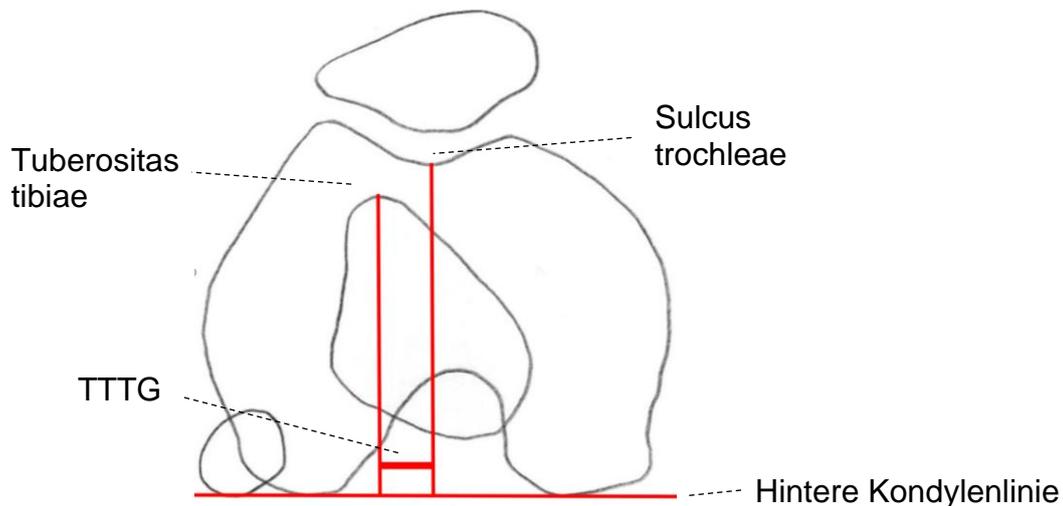
Werte >15 mm bis 20 mm gelten als pathologisch und als Risikofaktor der patellofemorale Instabilität, so wurde bei 56 % der betroffenen Patienten, jedoch nur bei 3,5 % einer Kontrollgruppe ein TTTG >20 mm nachgewiesen <sup>1,46,47</sup>.

Der Tuberositas-tibiae-posterior-cruciate-ligament-Abstand (TT-PCL), der den lateralen Versatz der Tuberositas tibiae gegenüber der tibialen Insertion des hinteren Kreuzbandes beschreibt, gilt verglichen zum TTTG als weniger aussagekräftig hinsichtlich dem Vorliegen einer patellaren Instabilität <sup>1,48,49</sup>.



**Abbildung 3: Der Q-Winkel**

Der Q-Winkel repräsentiert den Winkel zwischen dem Kraftvektor des Musculus quadriceps femoris, dargestellt durch die Linie von der Spina iliaca anterior superior zum Patellazentrum, und der Verlaufsrichtung der Patellasehne, dargestellt durch die Linie von der Tuberositas tibiae durch das Patellazentrum <sup>44</sup>.



**Abbildung 4: Der Tuberositas-tibiae-trochleae-groove-Abstand (TTTG)**

Der TTTG stellt den lateralen Abstand zwischen dem tiefsten Punkt des Sulcus trochleae und der Tuberositas tibiae in zwei übereinander projizierten Schnittbildern dar. Als Referenz wird die hintere Kondylenlinie herangezogen <sup>1</sup>.

Um eine physiologische Biomechanik zu gewährleisten, müssen hauptsächlich passive und statische medialisierende Faktoren der Patellalateralisation entsprechend entgegenwirken <sup>1,9,10,38,50–52</sup>.

In strecknaher Gelenkstellung sind in erster Linie die passiven Faktoren relevant, da die Patella bis zu einer Flexion von ca. 10° bis 20° proximal der Trochlea femoris steht <sup>8–10,38,53,54</sup>. Wie beschrieben übernimmt das MPFL hierbei den größten stabilisierenden Anteil <sup>8–10,38</sup>. Bei höheren Beugegraden wird die Patella im anatomischen Normalzustand dann zunehmend sicher durch die Trochlea geführt <sup>1,53–55</sup>.

Bei 24 % bis 86 % der Patienten mit patellofemoraler Instabilität konnte eine Patella alta nachgewiesen werden <sup>1,11,20,22</sup>. Die knöcherne Führung der Patella tritt dann erst ab einer höheren Flexion ein, was Instabilitätsereignisse begünstigt <sup>23,55–58</sup>.

Physiologisch steht die Patella in Streckstellung um durchschnittlich 10° entlang ihrer longitudinalen Achse nach außen verkippt (Patella-Tilt) <sup>1</sup>.

Im Rahmen der Knieflexion bis 90° erfährt sie u. a. insgesamt eine Zunahme des lateralen Tilts, eine letztliche Außenrotation von 1,4° um die sagittale Achse sowie eine mediolaterale Translation (Patella-Shift) <sup>8</sup>.

Patella-Tilt und Patella-Shift sind bei Patienten mit patellofemoraler Instabilität signifikant vergrößert <sup>1,59</sup>. Sie betragen am gestreckten Kniegelenk durchschnittlich 22,7° (Patella-

Tilt) und 20,5 % des interepikondylären Abstands (Patella-Shift) verglichen mit 6,8° und 9,5 % bei Gesunden<sup>59</sup>. Dejour et al. fanden einen Tilt von über 20° bei 83 % ihrer Patienten mit patellofemorale Instabilität, jedoch nur bei 3 % in einer Kontrollgruppe<sup>1</sup>. Allerdings korrelieren Tilt und Shift negativ mit dem Anstieg der lateralen Trochleafacette und sind bei vorliegender MPFL-Schädigung insbesondere in strecknaher Gelenkstellung vergrößert<sup>8,15,28</sup>. Sie werden somit vorrangig als Ausdruck einer Instabilität und nicht als deren Risikofaktor gewertet<sup>15</sup>.

## 2.3 Diagnostik

Im Rahmen der Anamnese sollten u. a. Informationen über Schmerzzustände, Anzahl und Art der Instabilitätsereignisse sowie familiäre Häufungen gesammelt werden<sup>13,15,21,23,60</sup>.

Zur klinischen Beurteilung des medialen Weichteilapparates kann die Patella bei 20° bis 30° flektiert gelagertem Kniegelenk vom Untersucher lateralisiert werden<sup>15,34,47</sup>. Eine Verschieblichkeit um mehr als die Hälfte ihrer Breite weist auf eine Schädigung hin<sup>34</sup>. Eine resultierende Abwehrspannung des Patienten wird als positiver Apprehension-Test gewertet<sup>15,34,47</sup>. Hinweis auf eine insuffiziente knöchernen Patellaführung kann eine vermehrte laterale Verschieblichkeit ab 30° bis 40° Flexion bieten<sup>34</sup>.

Verschiedene klinische Scores können zur Einschätzung der Kniegelenksfunktion herangezogen werden<sup>61–63</sup>. So lassen sich bspw. subjektiv wahrgenommene Beschwerden und funktionelle Einschränkungen im Rahmen patellofemorale Pathologien durch den Kujala-Score bewerten, dessen Testergebnis sich aus 13 zu beantwortenden Fragen zusammensetzt und bestenfalls bei 100 Punkten liegen kann<sup>61</sup>.

Die Magnetresonanztomographie (MRT) stellt in der Diagnostik der patellofemorale Instabilität das wichtigste bildgebende Verfahren dar. Neben der Trochleadysplasie lassen sich hiermit u. a. Hämarthros, osteochondrale Läsionen und Bone Bruises, Patella-Tilt und -Shift, Verletzungen der Weichteilführung sowie BegleitleSIONen bspw. der Menisken oder des vorderen Kreuzbandes (VKB) beurteilen<sup>3,11,15,26,28,34,64</sup>. Die Torsions- und Rotationsverhältnisse sowie der TTTG können in der Schnittbildgebung ebenfalls ausgemessen werden<sup>1,30,32,34</sup>.

Anhand konventioneller Röntgenaufnahmen lassen sich bspw. der Patellahöhenstand oder die Achsverhältnisse der unteren Extremität beurteilen, sie haben jedoch insgesamt an Bedeutung verloren <sup>1,15,26,57,65,66</sup>.

Arthroskopien ermöglichen zwar eine sensitivere und exaktere Diagnostik patellanaher Weichteilschädigungen als ein MRT, die femorale MPFL-Insertion kann hingegen aufgrund ihrer extraartikulären Lage nicht direkt beurteilt werden <sup>12,67</sup>.

## **2.4 Therapie**

### **2.4.1 Behandlungsoptionen**

In der Literatur finden sich konträre Angaben ab wann operativ behandelt werden sollte <sup>14,16,68–70</sup>. Ein initial konservatives Vorgehen ist grundsätzlich insbesondere dann sinnvoll, wenn der patellofemorale Schmerz die hauptsächliche Beschwerde darstellt, die Instabilität nur gering ausgeprägt ist und relevante anatomische Risikofaktoren sowie Knorpelschäden nicht bestehen <sup>15,34,70</sup>.

Sie kann die Behandlung in der bewegungslimitierten Kniegelenksorthese mit initialer Teilbelastung oder auch die Versorgung mit patellazentrierenden Orthesen, Bandagen und Tapes beinhalten <sup>15,71</sup>. Die medialisierende Muskulatur sollte gekräftigt, die lateralisierenden Weichteile gedehnt werden <sup>15</sup>.

Das Reluxationsrisiko nach primär konservativer Behandlung wird in der Literatur mit 20 % bis 71 % beziffert <sup>11,13,14,71,72</sup>.

Die operative Behandlung der patellofemorale Instabilität richtet sich insbesondere nach den vorliegenden anatomischen Risikofaktoren, bereits eingetretenen Knorpelschäden und der Schwere der Symptomatik <sup>15,32,46,51,52,73,74</sup>. Verfahren können isoliert oder unterschiedlich miteinander kombiniert eingesetzt werden <sup>15,22,32,46,51,52,60,73–77</sup>. Auch vor einem offenen Eingriff, sollte dabei eine diagnostische Arthroskopie erfolgen <sup>15,32,73</sup>.

Das Verfahrensspektrum ist groß und kann hier nur angerissen dargestellt werden <sup>16,22,32,46,52,60,71–82</sup>.

Es existieren zahlreiche Beschreibungen für arthroskopische und offene Weichteileingriffe, die der Wiederherstellung der medialisierenden Patellaführung bei akuter und chronischer patellofemorale Instabilität dienen und insbesondere beim Fehlen ausgeprägter anatomischer Risikofaktoren Therapieoptionen darstellen <sup>16,22,34,52,60,71–73,75–77,79–81</sup>.

Ziele sind vor allem die Raffung des medialen Retinakulums oder die spezifische Reparatur einer MPFL-Läsion durch Nähte und Insertionsrefixationen<sup>16,22,52,60,71–73,75,76,79</sup>. Ebenso können die patellanahen Anteile des Vastus medialis durch Lateralisierung und Distalisierung auf die Patellavorderseite gerafft werden<sup>75,77</sup>.

In Abhängigkeit vom Verfahren und der anatomischen Grundkonstitution variiert die Reluxationsrate zwischen 0 % und 46 %<sup>16,22,46,52,60,71–73,75–77,79,81</sup>.

Bei einer Trochleadysplasie Grad C oder D nach Dejour sollte bei ausgewachsenen Patienten auch die Indikation zur Trochleoplastik geprüft werden<sup>26,83</sup>. Hierbei wird typischerweise die Gelenkfläche zusammen mit einer dünnen Knochenlamelle abgelöst und nach subchondraler Vertiefung des Sulcus wieder refixiert<sup>82</sup>. Die Reluxationsraten sind mit 2 % niedrig und der Kujala-Score verbessert sich durchschnittlich von 53,8 auf 74 Punkte<sup>84</sup>. Die Gesamtkomplikationsrate wird allerdings mit 40 % angegeben und beinhaltet eine postoperative Schmerzzunahme bei 11 % und ein Defizit der Gelenkbeweglichkeit bei 6,7 % der Patienten<sup>84</sup>.

Ein medialisierender Versatz der Tuberositas tibiae gilt bei einem TTTG > 20 mm als indiziert<sup>51,52</sup>.

Die Rate postoperativer Instabilitätsereignisse liegt bei 7 %, weitere Komplikationen treten bei 6,2 % der Patienten auf, wobei die Wundinfektion die häufigste darstellt<sup>85</sup>.

Bei einer femoralen Antetorsion > 25 ° ist eine suprakondyläre Derotationsosteotomie in Erwägung zu ziehen<sup>32,86</sup>.

Endoprothetische Verfahren stehen letztlich bei einer bereits fortgeschrittenen Arthrose zur Verfügung<sup>15,17,29</sup>.

#### **2.4.2 Die MPFL-Rekonstruktion**

Die MPFL-Rekonstruktion stellt mit Reluxationsraten zwischen 0 % und 3,2 % das suffizienteste Verfahren dar, das die mediale Weichteilschädigung kausal adressiert<sup>46,50–52</sup>. Aktive Patienten kehren zu 85 % postoperativ zum Sport zurück<sup>51</sup>. Der Kujala-Score verbessert sich postoperativ signifikant von durchschnittlich 53,3 auf 80,9 Punkte<sup>50</sup>.

Sie ist im Allgemeinen bei chronischer patellofemoraler Instabilität indiziert, wird bei erhöhtem Risiko für rezidivierende Instabilitätsereignisse jedoch auch bereits nach Erstluxation empfohlen<sup>21,46,50–52</sup>. Liegen entsprechende anatomische Deformitäten vor, kann sie mit Verfahren wie einer Trochleoplastik, einem Versatz der Tuberositas tibiae oder Umstellungsosteotomien kombiniert werden<sup>21,32,51,52,74</sup>.

Abgesehen von dynamischen Verfahren haben die multiplen beschriebenen Operationstechniken das Ziel einer der Anatomie entsprechenden Insertionspositionierung gemein, wobei dem femoralen Ansatz eine besondere Bedeutung zukommt <sup>15,21,32,41,46,50–52,78,86–89</sup>.

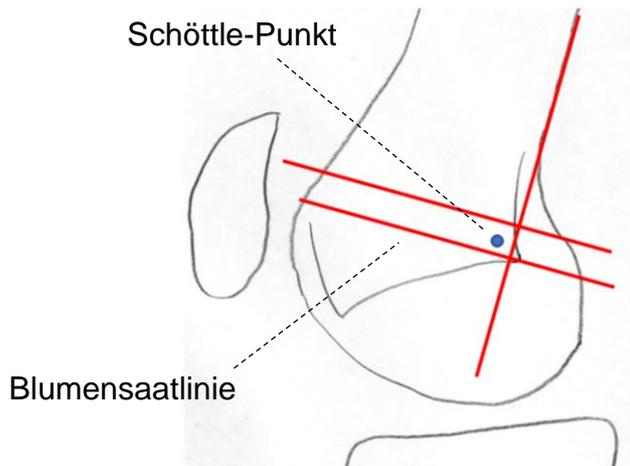
In erster Linie wird die Gracilis- oder Semitendinosussehne als autologes Transplantat verwendet (Abb. 5), eine Rekonstruktion mittels Quadricepssehne ist ebenfalls möglich <sup>15,21,32,46,50–52,78,89</sup>.

Es wird zwischen Einzelbündeltechniken mit einem und Doppelbündeltechniken mit zwei patellaren Fixationspunkten (Abb. 5) unterschieden, wobei letztere der MPFL-Anatomie näherkommen und mit niedrigeren Reluxationsraten, besseren klinischen Scores sowie einem geringeren Risiko für Patellafrakturen einhergehen <sup>10,89,90</sup>. Femoral erfolgt die Fixation jeweils an einem Punkt <sup>89</sup>.



**Abbildung 5: Die MPFL-Rekonstruktion**

Schematische Darstellung einer Rekonstruktion in Doppelbündeltechnik mit einem femoralen und zwei patellaren Fixationspunkten (© A. Schmeling, A. Weiler / KARL STORZ SE & Co. KG, Tuttlingen).



**Abbildung 6: Der Schöttle-Punkt**

Der Schöttle-Punkt wird im streng seitlichen Strahlengang bestimmt und befindet sich 1,3 mm ventral des verlängerten hinteren Femurkortex, 2,5 mm distal des hinteren Ursprungs des medialen Femurkondylus und proximal des hinteren Punktes der Blumensaatlinie. Er entspricht der anatomischen femoralen MPFL-Insertion (Schöttle et al. 2007 <sup>87</sup>).

Im Folgenden sind Schritte eines typischen Doppelbündel-Verfahrens aufgeführt:

Über eine Hautinzision wird eine ca. 15 bis 20 mm lange knöcherne Mulde an der superomedialen Patellakante geschaffen. An ihren Enden werden 2 Fadenanker befestigt, die das zuvor entnommene Sehnentransplantat im mittleren Drittel fixieren <sup>15</sup>.

Nach einer kleinen weiteren Hautinzision distal an der Innenseite des medialen Femurkondylus werden die freien Sehnenenden zwischen der 2. und 3. Schicht des Kapselbandapparates von patellar nach femoral durchgezogen <sup>15,36,51</sup>.

Unter Durchleuchtung im streng seitlichen Strahlengang wird der Schöttle-Punkt (Abb. 6) bestimmt, der der anatomischen femoralen MPFL-Insertion entspricht <sup>15,78,87</sup>.

An diesem werden die freien Transplantatenden in einem Bohrkanal mittels Interferenzschraube bei 20° bis 30° flektiertem Kniegelenk fixiert <sup>15,51</sup>.

Bezüglich des Transplantates ist zu beachten, dass bereits die Reißfestigkeit einer Gracilissehne mehr als das 4-fache der des nativen MPFLs beträgt <sup>91,92</sup>.

Neben einer zu großen Transplantatspannung wurde insbesondere eine Fehlpositionierung des femoralen Bohrkanals als relevanter technischer Verfahrensfehler identifiziert <sup>86,93</sup>. Sie kann u. a. mit patellofemorale Schmerzen, einem Flexionsdefizit und Reinstabilitäten einhergehen <sup>86,93</sup>.

Zur Sicherung des Behandlungserfolges ist eine möglichst anatomische MPFL-Rekonstruktion daher von großer Bedeutung <sup>86,93</sup>.

## **2.5 Die Morphologie der MPFL-Ruptur**

### **2.5.1 Verletzungstypen des MPFLs**

Grundsätzlich kann zwischen femoralen, patellaren, intraligamentären und kombinierten MPFL-Verletzungen unterschieden werden <sup>7,64,94</sup>.

Nomura et al. unterteilten chronische MPFL-Verletzungen anhand intraoperativer Beobachtungen bei 45 Patienten in solche mit gelöster femoraler Insertion (Typ 1), Narbenbildung (Typ 2, häufigster Typ) und nicht vorhandene ligamentäre Kontinuität bzw. Nachweisbarkeit (Typ 3) <sup>6</sup>.

Die akute femorale MPFL-Verletzung stellt typischerweise eine Avulsion dar, bei der sich die Fixierung der tiefen Bandanteile vom Knochen löst, die Bandoberfläche jedoch intakt erscheint <sup>6,95</sup>.

Patellar unterschieden Sillanpää et al. rein ligamentäre MPFL-Schädigungen (P0) von knöchernen Verletzungen ohne (P1) bzw. mit retropatellarer Gelenkflächenbeteiligung (P2) <sup>96</sup>.

Der kraniokaudale MPFL-Durchmesser nimmt von patellar nach femoral ab <sup>10,37</sup>. Akute intraligamentäre Verletzungen wurden dementsprechend hauptsächlich nahe der femoralen Insertion beobachtet <sup>6</sup>.

Mehrere klinische Studien kamen zu dem Ergebnis, dass sich der Läsionsort des MPFLs nach Patellaluxation signifikant auf das resultierende Instabilitätsrisiko auswirkt <sup>97–99</sup>. Dieses wäre für die Therapieplanung von großer Bedeutung.

### **2.5.2 Einfluss der Insertionsentwicklung auf die Bandstabilität**

Die bisherige Literatur bietet Anhalt dafür, dass sich die Häufigkeitsverteilung der verschiedenen MPFL-Rupturlokalisationen bei heranwachsenden und erwachsenen Patienten erheblich unterscheidet <sup>4,7,12,64,94,98,100,101</sup>.

Grundsätzlich vergrößert sich die Bandstabilität im Laufe der Entwicklung, wobei insbesondere diesbezügliche Zunahmen in Abhängigkeit zur Insertionsausreifung beobachtet wurden <sup>102–105</sup>. Auch Verschiebungen hinsichtlich prädisponierter ligamentärer Schädigungsorte wurden in diesem Zusammenhang beschrieben <sup>104–106</sup>.

Obwohl noch nicht spezifisch untersucht, ist somit davon auszugehen, dass die Verteilungsveränderung unter den MPFL-Läsionsorten ebenfalls durch die Bandentwicklung beeinflusst wird <sup>4,7,12,64,94,98,100–106</sup>.

Aufgrund ihres prinzipiell gleichen histologischen Aufbaus unterscheidet die Literatur nicht streng zwischen Band- und Sehneninsertionen <sup>107,108</sup>.

Nach Benjamin und Ralphs können grundsätzlich fibröse (FI) und fibrocartilaginäre Insertionen (FKI) voneinander abgegrenzt werden <sup>107</sup>.

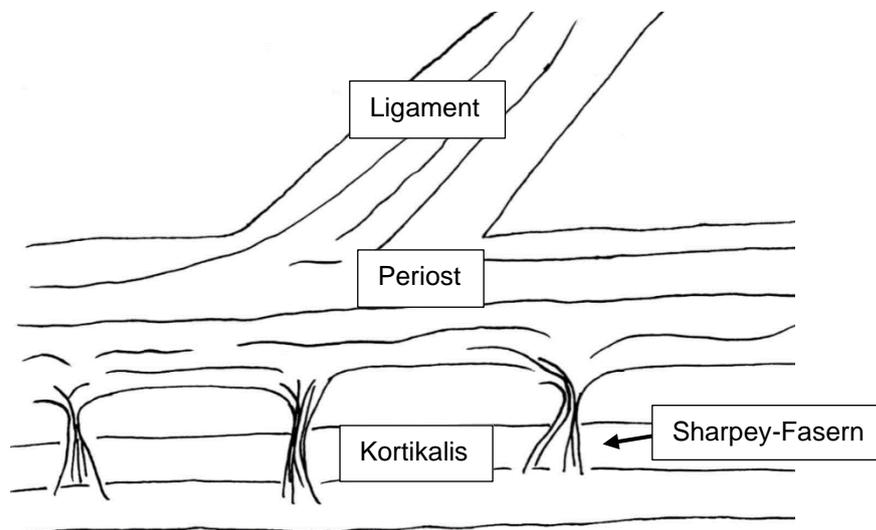
### 1. Die fibröse Insertion (FI)

Entsprechend der Nomenklatur unterscheidet sich die fibröse von der fibrocartilaginären Insertion durch das Fehlen relevanter Faserknorpelanteile (Abb. 7, 8) <sup>107,108</sup>.

Bänder und Sehnen sind aus parallelfaserigem, straffem Bindegewebe aufgebaut <sup>107,109</sup>. Zwischen den Kollagenfasern, die vorwiegend aus Kollagen Typ I bestehen, liegen länglich geformte und reihig angeordnete Fibroblasten <sup>109–111</sup>. Die strukturelle Ausrichtung entspricht dabei dem Verlauf der wirkenden Zugkraft <sup>109–112</sup>.

Benjamin et al. empfehlen die Unterscheidung zwischen einer periostal-fibrösen Insertion (PFI, Abb. 7), bei der das Band in das mit dem Knochen verwachsene Periost einstrahlt, und einer direkt im Knochen verankerten ossär-fibrösen Insertion (OFI). Letztere weist im Ansatzbereich kein Periost auf <sup>108</sup>.

Bei ausgereiften fibrösen Insertionen wird die Ansatzfixierung durch Sharpey-Fasern – Bindegewebsstränge, die sich in den Knochen fortsetzen, – unterstützt (Abb. 7) <sup>106,109</sup>.



**Abbildung 7: Schematische Darstellung einer periostal-fibrösen Insertion**

Das Band strahlt in das Periost ein, das wiederum mit dem darunter gelegenen Knochen verbunden ist. Sharpey-Fasern verstärken diese Verbindung.

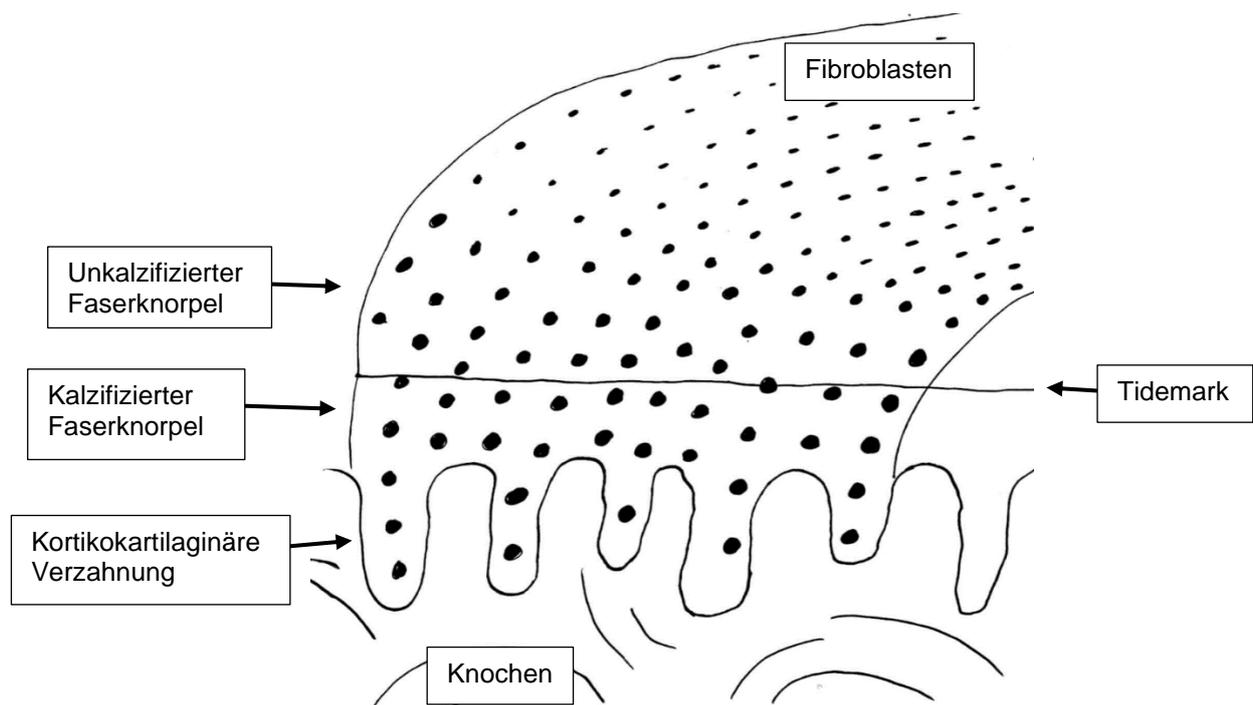
## 2. Die fibrokartilaginäre Insertion (FKI)

An einer FKI sind Sehnen und Bänder über eine ebenfalls longitudinal angeordnete Schicht aus unkalifiziertem (UFK) und eine weitere aus kalifiziertem Faserknorpel (KFK) direkt mit dem Knochen verbunden (Abb. 8) <sup>107,108,113</sup>. Wie die OFI weist auch die FKI kein Periost im Ansatzbereich auf <sup>107,108,113</sup>.

Faserknorpel verbindet die Zugfestigkeit des straffen Bindegewebes mit der Druckelastizität des Knorpels <sup>109</sup>.

Als ursächlich für die Faserknorpelentwicklung werden Kompressionskräfte im Gewebe angesehen, die durch Insertionsbiegebelastung und -bewegung an der Knochenoberfläche entstehen <sup>103,111,114,115</sup>.

Die relativ ebene Grenze zwischen UFK und KFK wird als Tidemark bezeichnet (Abb. 8) <sup>108,113</sup>. KFK und Knochen sind bei einer ausgereiften Insertion ineinander verzahnt (Abb. 8, 70), wobei dieser Verzahnung eine besondere Bedeutung hinsichtlich der Insertionsstabilität zugesprochen wird <sup>113,116</sup>.



### **Abbildung 8: Schematische Darstellung einer fibrokartilaginären Insertion**

Das Band setzt sich über eine Schicht aus unkalifiziertem und kalifiziertem Faserknorpel in den Knochen fort. Die longitudinale Zell- und Kollagenanordnung bleibt dabei auch in den Knorpelschichten erhalten. Die Tidemark stellt den relativ eben verlaufenden Übergang von unkalifiziertem zu kalifiziertem Faserknorpel dar.

Der strukturellen Verzahnung zwischen kalifiziertem Faserknorpel und Knochen wird eine wichtige Rolle hinsichtlich der Insertionsstabilität zugesprochen.

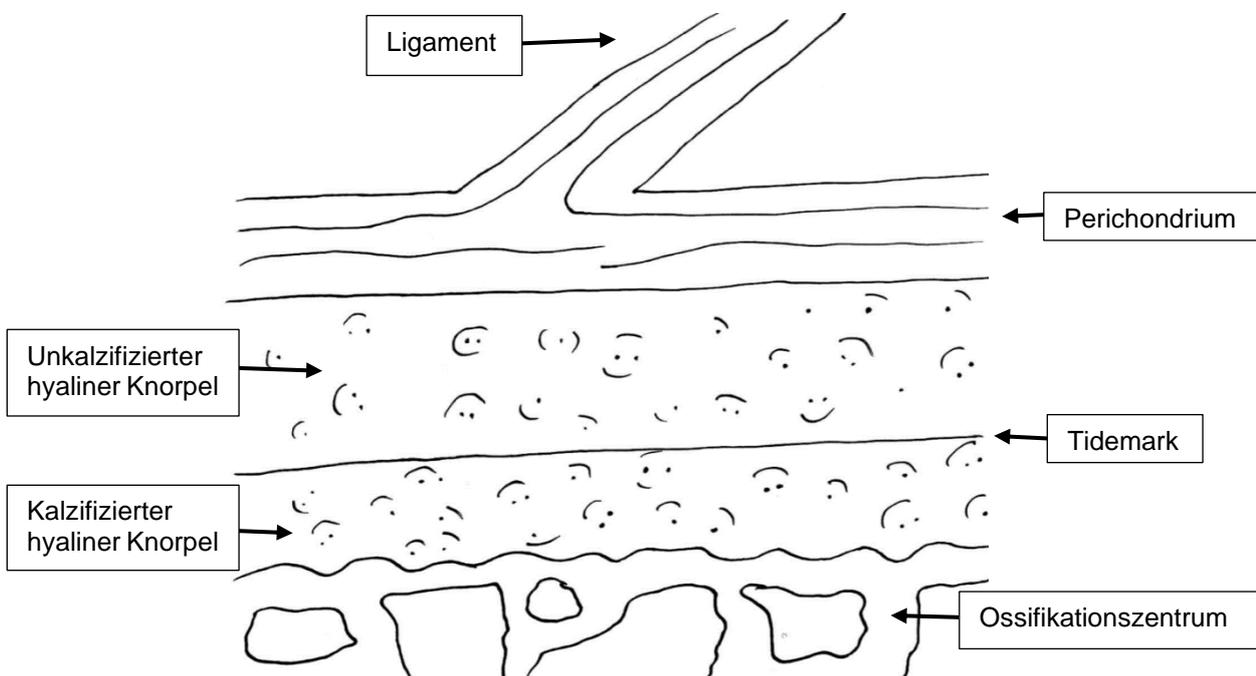
Nach der Nomenklatur von Knese und Biermann entspricht eine fibröse Insertion einem diaphysären-periostalen Ansatz und eine fibrocartilaginäre einem chondralen-apophysären <sup>107,108,117,118</sup>.

Nach Woo et al. können fibrocartilaginäre Insertionen mit direkten und fibröse mit indirekten Ansätzen gleichgesetzt werden <sup>107,108,119</sup>.

### 3. Die Insertionsentwicklung

Die Epiphysen der Röhrenknochen bestehen in ihrer frühen Entwicklung aus einem Primordialskelett hyalinen Knorpels, dessen Oberfläche mit Ausnahme der Gelenkflächen grundsätzlich von Perichondrium umgeben ist <sup>109,112</sup>.

Bänder inserieren hier beim Heranwachsenden zunächst am hyalinen Knorpel der Knochenanlage bzw. an seinem Perichondrium (Abb. 9) <sup>103,112</sup>. Perichondrium oder Periost können auch an einer OFI und FKI anfangs noch vorhanden sein <sup>106,112</sup>. Mit zunehmender Entwicklung wird das hyaline Primordialskelett aus der Tiefe durch enchondrale Ossifikation erodiert (Abb. 9) <sup>103,109,112</sup>.



**Abbildung 9: Schematische Darstellung einer in der Entwicklung befindlichen Insertion**

Die Erosion des hyalinen Knorpels durch das Ossifikationszentrum beginnt in der Tiefe und schreitet in Richtung Oberfläche fort. Auch der hyaline Knorpel weist eine oberflächliche unkalzifizierte und eine profunde kalzifizierte Schicht auf.

Die strukturelle Entwicklung einer Insertion endet jedoch nicht mit der vollständigen Erosion des hyalinen Knorpels. Auch die Insertion selbst kann von ihrer Innenseite her

zunächst weiter knöchern ersetzt und an ihrer Außenseite neu gebildet werden <sup>103</sup>. Zudem bildet sich der Durchmesser des Periosts bei Heranwachsenden progredient zurück <sup>112</sup>. Der neu entstehende Knochen weist primär eine Geflechtstruktur auf, welche im weiteren Verlauf in Lamellenknochen umgebaut wird <sup>109</sup>.

#### 4. Die Insertionshistologie des MPFLs

Über die Insertionshistologie des MPFLs ist wenig bekannt.

Inoue et al. fertigten Gewebeschnitte von 2 femoralen MPFL-Avulsionen an und untersuchten diese lichtmikroskopisch. Sie unterteilten die Insertion histologisch in eine weitestgehend intakt erscheinende oberflächliche Schicht mit lamellenförmiger Kollagenanordnung und eine von Granulationsgewebe durchsetzte tiefere. Einen Insertionsfaserknorpel erwähnten sie nicht <sup>95</sup>.

Obwohl nicht explizit aufgeführt, entspricht die Beschreibung am ehesten einer PFI.

Gezielte Untersuchungen der patellaren Insertion oder der Insertionsentwicklung des MPFLs konnten der Literatur nicht entnommen werden.

Kenntnisse über den histologischen Insertionsaufbau und seine Entwicklung sind aber sehr wichtig, um zu verstehen, auf welchen strukturellen Grundlagen sich eine MPFL-Verletzung entwickelt.

## **2.6 Die Lagebeziehung der femoralen MPFL-Insertion zur Wachstumsfuge**

Bei Heranwachsenden sind die operativen Behandlungsmöglichkeiten limitiert. Knöcherne Eingriffe wie der Versatz der Tuberositas tibiae oder die Trochleoplastik sind vor Abschluss des Wachstums kontraindiziert <sup>15,83</sup>.

Wenn isolierte Weichteileingriffe versagt haben oder die Weichteilschädigung für ihren Einsatz zu weit fortgeschritten ist, stellt die MPFL-Rekonstruktion ein relaxationsarmes und grundsätzlich sicheres Verfahren dar, das auch im Wachstumsalter eingesetzt werden kann <sup>46,51,52,60,69,78</sup>.

Um der Entwicklung von Achsfehlstellungen vorzubeugen, ist bei Patienten im Wachstumsalter darauf zu achten, dass beim Setzen des femoralen Bohrkanals die nahegelegene distale Femurepiphysenfuge nicht verletzt wird <sup>78,120</sup>. Diese trägt nahezu

70 % zum Längenwachstum des Femurs bei und schließt sich bei Mädchen im Alter zwischen 14 und 16 Jahren, bei Jungen im Alter zwischen 16 und 18 <sup>121</sup>. Als geeigneter Sicherheitsabstand werden 5 mm angegeben <sup>78</sup>.

Um der erläuterten Bedeutung einer möglichst anatomischen Rekonstruktion gerecht zu werden, stellt sich daher die Frage, ob der femorale BohrkanaI proximal oder distal der Wachstumsfuge platziert werden sollte.

Die Mehrzahl der bisherigen Studien kam zu dem Ergebnis, dass sich die anatomische MPFL-Insertion zumeist distal der Wachstumsfuge befindet <sup>7,78,122–127</sup>.

Einige Studien ermittelten mit teils unterschiedlichen Resultaten die Lagebeziehung zwischen femoraler Insertion und Wachstumsfuge lediglich durch radiologische Berechnungen <sup>78,122,128</sup>. Dabei wurde insbesondere der Schöttle-Punkt bestimmt, dessen Analyse jedoch auf eine anatomische Studie an Kniegelenken von Erwachsenen zurückzuführen ist <sup>87</sup>.

Weitere Studien untersuchten die Lage der femoralen MPFL-Insertion bzw. der nahegelegenen Insertion des medialen Kollateralbandes (MCL) in Relation zur Wachstumsfuge mittels MRT <sup>7,123,129</sup>.

Edmonds et al. kamen zum Ergebnis, dass die femorale MPFL-Insertion bei jüngeren Kindern im MRT vornehmlich distal, ab dem Alter von 7 Jahren jedoch auf gleicher Höhe oder proximal der Wachstumsfuge erscheint <sup>129</sup>. In der bisher größten Studie an anatomischen Präparaten beobachteten Shea et al., die 36 kindliche Kniegelenke untersuchten, eine solche altersabhängige Verschiebung ebenfalls <sup>126</sup>.

Zwei weitere anatomische Studien kamen hingegen zum Ergebnis, dass sich das Zentrum der femoralen MPFL-Insertion auch bei älteren Kindern mehrheitlich distal des medialen Wachstumsfugenrandes befindet <sup>125,127</sup>.

Das MPFL weist hinsichtlich seiner Anatomie eine große Variabilität auf <sup>9,10,37,124</sup>. Viele anatomische Studien haben sich insbesondere mit der exakten Bestimmung der femoralen Insertionslokalisation auseinandergesetzt, teilweise mit divergierenden Ergebnissen <sup>9,10,36,37,40,41</sup>.

Auch die bisherige Literatur hinsichtlich der Lagebeziehung zwischen femoraler MPFL-Insertion und distaler Wachstumsfuge zeigt teils diskrepante Erkenntnisse <sup>7,78,122–129</sup>.

Überwiegend wird eine distale Insertionslage beschrieben, insbesondere, inwiefern sich diese jedoch mit zunehmendem Alter proximalisiert, verbleibt unklar<sup>7,78,122–129</sup>.

## **2.7 Fragestellungen**

Das Ziel dieser Arbeit war es anhand von Präparaten, die Kindern unterschiedlichen Alters entstammten und MPFL sowie insertionsnahe Patella- und Femuranteile beinhalteten, folgende Aspekte zu untersuchen:

### **2.7.1 Die Lagebeziehung zwischen femoraler MPFL-Insertion und distaler Femurepiphysenfuge**

Da im Rahmen einer MPFL-Rekonstruktion eine möglichst anatomiegerechte Positionierung des femoralen Bohrkanals essenziell ist und die nahegelegene Epiphysenfuge bei Heranwachsenden nicht verletzt werden darf, stellt sich folgende Frage:

In welcher Lagebeziehung steht die femorale MPFL-Insertion zur distalen Femurepiphysenfuge?

Sie sollte im Rahmen einer Röntgenuntersuchung der Präparate beantwortet werden.

### **2.7.2 Insertionsanatomie und -entwicklung des MPFLs**

Die Insertionsentwicklung beeinflusst die Bandstabilität entscheidend und kann zu Verschiebungen des prädisponierten ligamentären Schädigungsortes führen.

Der jeweilige MPFL-Läsionsort scheint einen signifikanten Einfluss auf das Risiko zukünftiger Instabilitätsereignisse zu haben. Zudem deutet die Literatur darauf hin, dass sich die Häufigkeitsverteilung der verschiedenen MPFL-Rupturlokalisationen in Abhängigkeit vom Alter verändert.

Im Rahmen dieser Arbeit sollte eine histologische Untersuchung zu neuen Erkenntnissen über die Insertionsanatomie und -entwicklung des MPFLs führen.

Der Fokus lag dabei insbesondere auf folgenden Fragestellungen:

1. Welche Arten von Insertionen weist das MPFL femoral und patellar auf und wie sind sie strukturell aufgebaut?
2. Lassen sich in Abhängigkeit vom Entwicklungsstand prädisponierte Läsionsorte des MPFLs in der histologischen Analyse nachvollziehen?

### **3. Material und Methodik**

#### **3.1 Studiendesign**

Elf humane Präparate von 6 Kindern bestehend aus MPFL sowie insertionsnahen Patella- und Femuranteilen wurden radiologisch und histologisch untersucht.

Es erfolgte eine Markierung der MPFL-Insertionen und eine Durchleuchtung der Präparate in einem geschlossenen Röntgensystem.

Anschließend wurden histologische Dünnschnitte der Insertionen angefertigt, nach Masson-Goldner-Trichrom gefärbt und lichtmikroskopisch untersucht.

Der Versuchsaufbau ermöglichte

1. die Darstellung der Lagebeziehung zwischen femoralem Bandansatz und distaler Femurepiphysenfuge
2. die Beschreibung der generellen patellaren und femoralen Insertionshistologie und ihrer Entwicklung beim Heranwachsenden.

#### **3.2 Die Präparate**

Die 11 Präparate entstammten insgesamt 6 verstorbenen Kindern.

Sie wurden an der Medizinischen Hochschule Hannover entnommen, fixiert und mit Bewilligung der ansässigen Ethikkommission (1) für diese Arbeit zur Verfügung gestellt.

Die Präparate beinhalteten in erster Linie das präparierte MPFL einschließlich insertionsnahen Patella- und Femuranteilen (Abb. 10, 11).

Die Alters-, Geschlechts- und Seitenangaben der Präparate sind in Tabelle 1 (Tab. 1) aufgeführt.

Bezüglich des jüngsten Kindes lagen keine Geschlechts- und spezifischen Altersangaben vor. Dass die Oberfläche seiner distalen Femurepiphyse noch keine Ossifikation und der distale knöcherne Metaphysenrand im Gegensatz zu den anderen Präparaten mit Wachstumsfugenanschnitt eine rundliche Form aufwies, wurde als Zeichen eines niedrigen Lebensalters gewertet (Abb. 19-21).

Unter Berücksichtigung von radiologischen Vergleichsbildern verschiedener Altersstufen wurde davon ausgegangen, dass das Kind höchstens 3 Jahre alt war <sup>130</sup>.

---

<sup>1</sup> Ethikkommission der Medizinischen Hochschule Hannover, Antrags-Nr. 2555-2015

Alters- und Geschlechtsangaben der Kinder	Seite	
	links	rechts
Jüngstes Kind, genaues Alter und Geschlecht unbekannt	x	x
5-jähriger Junge	x	-
7-jähriger Junge	x	x
8-jähriger Junge	x	x
9-jähriger Junge	x	x
12-jähriges Mädchen	x	x

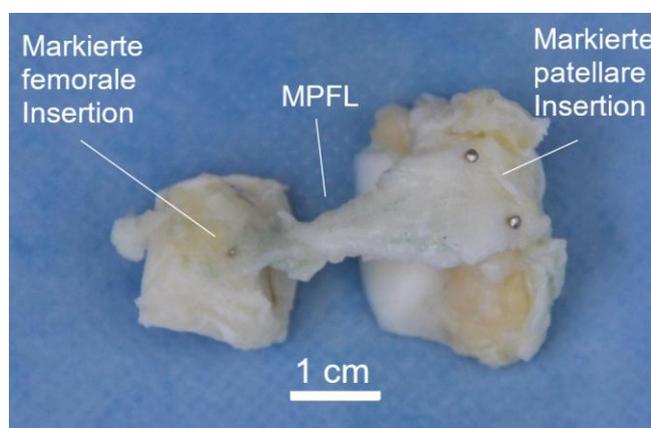
**Tabelle 1: Auflistung von Alter und Geschlecht der Kinder sowie Seitenangabe der vorliegenden Präparate**

x vorliegendes Präparat; - kein vorliegendes Präparat

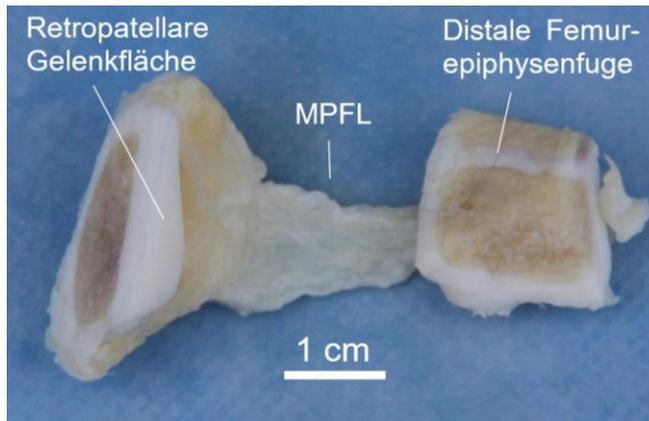
### 3.3 Die radiologische Untersuchung

#### 3.3.1 Markierung der Bandansätze

Um einen adäquaten Orientierungspunkt zu schaffen, wurden handelsübliche Stecknadeln am Kopfende auf wenige Millimeter gekürzt und die Stecknadelköpfe möglichst zentral auf dem augenscheinlichen femoralen Insertionszentrum platziert (Abb. 10). Mit 2 weiteren Stecknadelköpfen erfolgte die Markierung des oberen und unteren Randes der patellaren MPFL-Insertion (Abb. 10).



**Abbildung 10: Linksseitiges Präparat des 9-jährigen Jungen, Ansicht von medial**



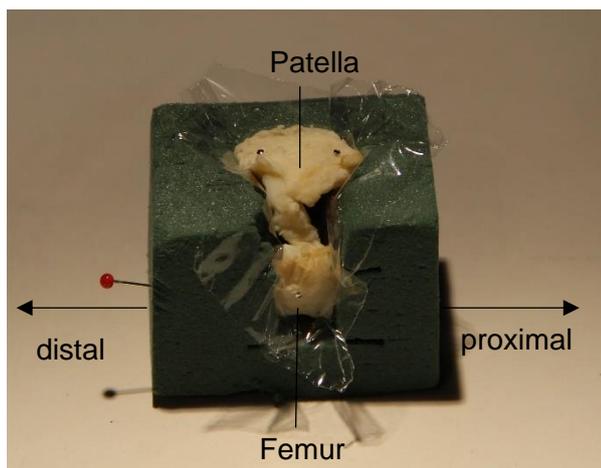
**Abbildung 11: Linksseitiges Präparat des 9-jährigen Jungen, Ansicht von lateral**

### 3.3.2 Aufnahme der Röntgenbilder

Die Bestandteile der Präparate wurden auf ausgeschnittenen Steckmoosblöcken so fixiert, dass ihre Positionierung zueinander in etwa dem anatomischen Normalzustand entsprach (Abb. 12).

Zudem wurde der femorale Knochenblock so ausgerichtet, dass die Wachstumsfuge sowohl im anterior-posterioren (a.p.), als auch im lateralen Strahlengang möglichst vollständig einsehbar erschien.

Zum Schutz der Präparate wurde Klarsichtfolie verwendet, zur Orientierung im Röntgenbild wurde jede Steckmoosvorrichtung distal mit einer ungekürzten Nadel markiert (Abb. 12).



**Abbildung 12: Rechtsseitiges Präparat des 9-jährigen Jungen**

Die Bestandteile der Präparate sind auf dem Steckmoos in etwa entsprechend ihrer anatomischen Lage zueinander positioniert. Zur Orientierung im Röntgenbild erfolgte die Markierung des Steckmoosblocks distal mit einer ungekürzten Nadel.

Die Anfertigung der Röntgenbilder erfolgte in einem geschlossenen Röntgensystem (2) auf Standard-Röntgenkassetten (3) mit einer Belichtungszeit von 20 Sekunden und einer Spannungsstärke von 35 kV (Abb. 13).

Diese Grundeinstellung ermöglichte neben der Knochen- häufig auch eine gute Darstellung der MPFL-Weichteilkontur (Abb. 14-16). Alle Präparate wurden im a.p., lateralen und axialen Strahlengang durchleuchtet.



**Abbildung 13: Präparat im Röntgengerät**

---

2 Faxitron® MX-20, Faxitron X-Ray Corporation, IL 60069, USA

3 DirectView, Eastman Kodak Company, Rochester, NY 14650, USA

### **3.3.3 Die radiologische Auswertung**

#### **3.3.3.1 Qualität**

Die Präparate ließen sich qualitativ in 3 Gruppen einteilen:

##### 1. Präparate mit einem vollständigen Wachstumsfugenanschnitt

Die Kriterien wurden erfüllt, wenn epiphysärer und metaphysärer Knochen mit dazwischen gelegentlichem Wachstumsfugenspalt zweifelsfrei identifiziert werden konnten (Abb. 14-16).

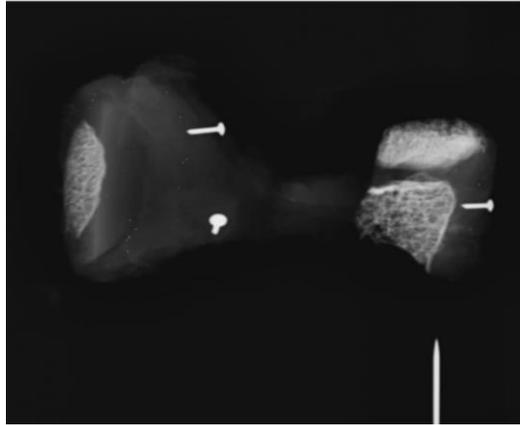
Wenn die Wachstumsfuge im a.p. oder im lateralen Strahlengang relevante knöcherne Überlagerungen aufwies, wurde die radiologische Untersuchung des Präparates mit dem Ziel einer Verbesserung mindestens einmal wiederholt (Abb. 17, 18).

##### 2. Präparate mit einem partiellen Wachstumsfugenanschnitt

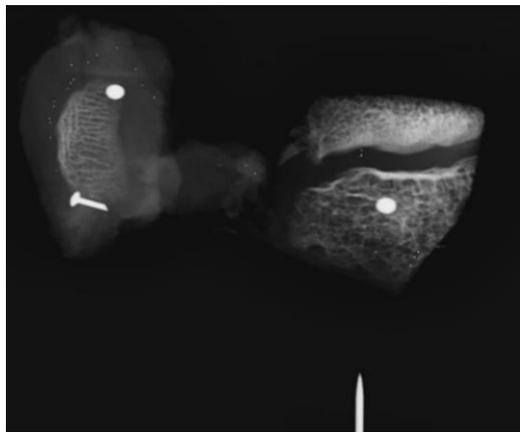
Wenn der metaphysär, jedoch nicht der epiphysär an die Wachstumsfuge grenzende Knochen angeschnitten war, wurde dies als partieller Wachstumsfugenanschnitt bezeichnet. Diese Präparate wurden ebenfalls für die Auswertung berücksichtigt (Abb. 19-21).

##### 3. Präparate ohne sichtbaren Wachstumsfugenanschnitt

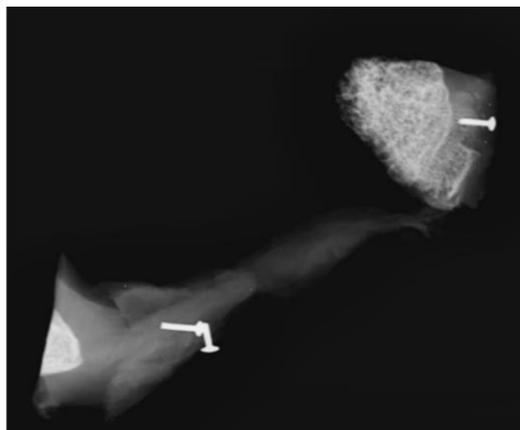
Präparate, auf denen ein Wachstumsfugenanschnitt nicht sichtbar war oder nicht sicher als ein solcher identifiziert werden konnte, wurden nicht für die Auswertung berücksichtigt (Abb. 22-24).



**Abbildung 14: Rechtsseitiges Präparat beim 9-jährigen Jungen, a.p.**



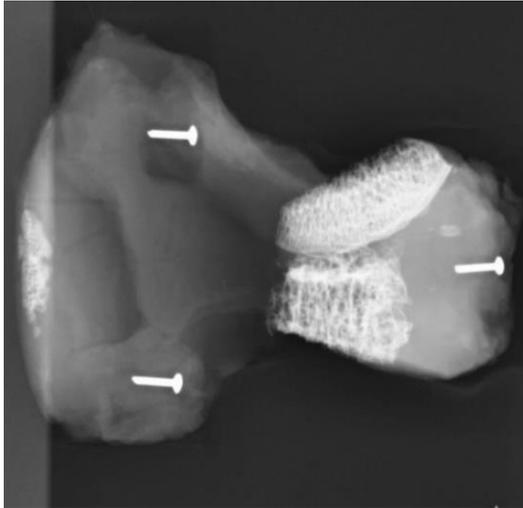
**Abbildung 15: Rechtsseitiges Präparat beim 9-jährigen Jungen, lateral**



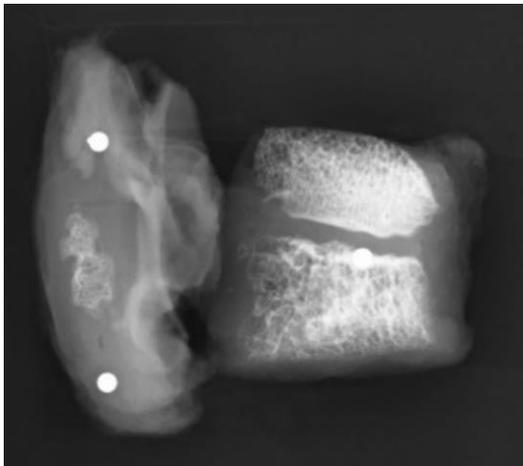
**Abbildung 16: Rechtsseitiges Präparat beim 9-jährigen Jungen, axial**

**Abbildungen 14-16**

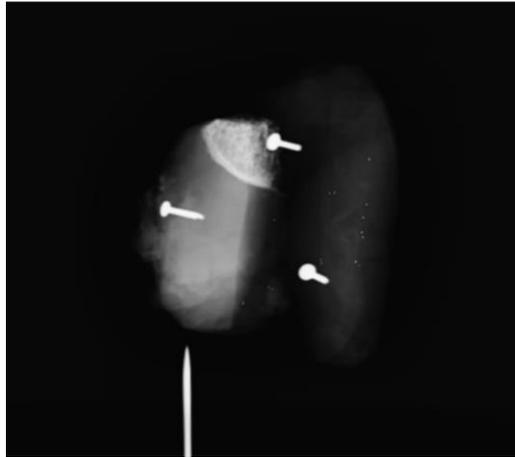
Links im Bild ist jeweils der ossäre Knochenkern des medialen Patellapols zu sehen, rechts der insertionsnahe femorale Bereich. Die femorale MPFL-Insertion ist zentral mit einem Stecknadelkopf markiert, die patellare mit 2 Stecknadelköpfen im Bereich des proximalen und distalen Insertionspols.



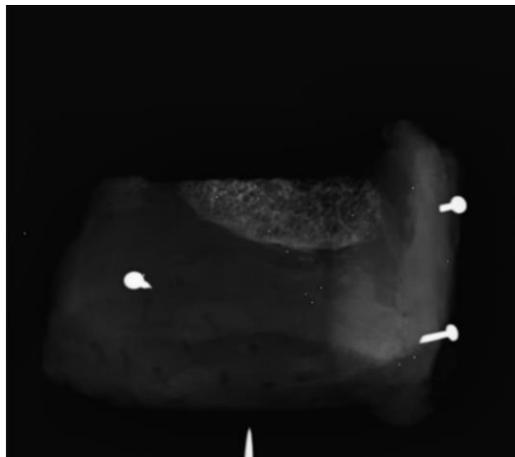
**Abbildung 17: Rechtsseitiges Präparat des 8-jährigen Jungen, a.p.**  
Die Wachstumsfuge ist nicht vollständig einsehbar.



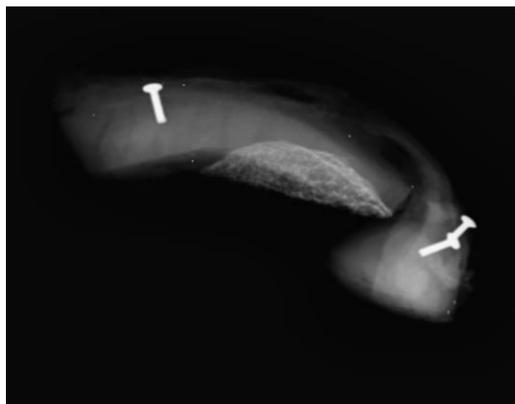
**Abbildung 18: Rechtsseitiges Präparat des 8-jährigen Jungen, lateral**  
Die Wachstumsfuge ist hier vollständig einsehbar.



**Abbildung 19: Linksseitiges Präparat beim jüngsten Kind, a.p.**



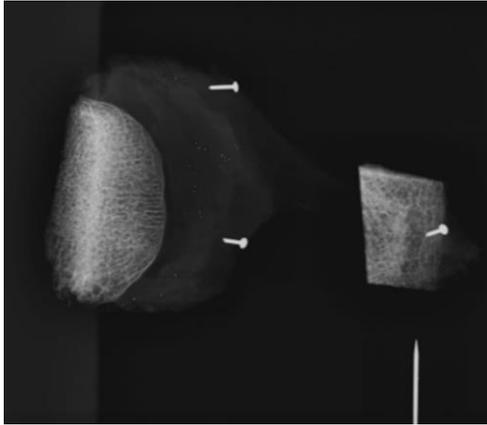
**Abbildung 20: Linksseitiges Präparat beim jüngsten Kind, lateral**



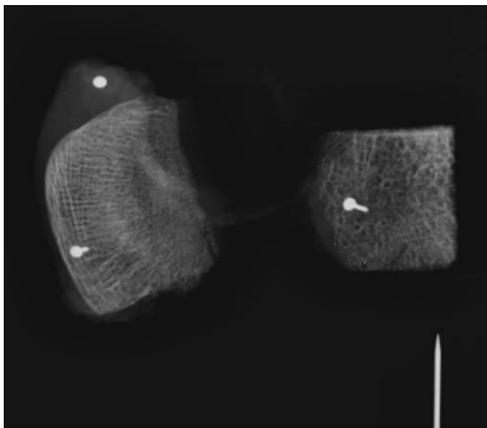
**Abbildung 21: Linksseitiges Präparat beim jüngsten Kind, axial**

**Abbildungen 19-21**

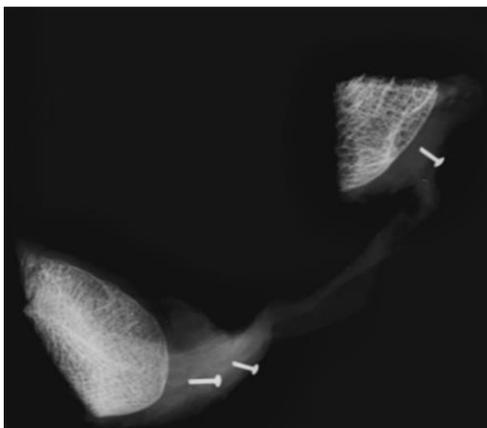
Links im Bild ist jeweils der metaphysäre Knochen proximal der Wachstumsfuge erkennbar, femoral-epiphysärer sowie patellarer Knochen ist nicht abgebildet.



**Abbildung 22: Rechtsseitiges Präparat beim 12-jährigen Mädchen, a.p.**



**Abbildung 23: Rechtsseitiges Präparat beim 12-jährigen Mädchen, lateral**



**Abbildung 24: Rechtsseitiges Präparat beim 12-jährigen Mädchen, axial**

**Abbildungen 22-24**

Rechts im Bild ist jeweils die markierte femorale Insertion dargestellt, ein Anschnitt der Epiphysenfuge ist nicht identifizierbar.

### 3.3.3.2 Auswertung der Insertionslokalisierung

Die gewonnenen a.p. und lateralen Aufnahmen aller auswertbaren Präparate wurden mittels des Programmes STARC Objektverwaltung (4) ausgemessen.

Zum Festlegen des Maßstabs wurde in jeder Aufnahme der maximale Durchmesser des abgebildeten femoralen Stecknadelkopfes bestimmt (dünne rote Linie; Abb. 30-43).

Als Orientierungshilfe für seine Konstruktion wurde in hoher Bildvergrößerung (ca. x70) ein Kreis (transparent, gelb) eingezeichnet, der den Stecknadelkopf an seinen beiden am weitesten auseinanderliegenden Punkten tangierte. Der Mittelpunkt des maximalen Stecknadelkopfdurchmessers stellte im Rahmen der Auswertung das femorale Insertionszentrum dar.

Der als Vergleichswert herangezogene durchschnittliche reale Stecknadelkopfdurchmesser betrug 1,54 mm (5).

#### 1. Präparate mit vollständigem Wachstumsfugenanschnitt

In der a.p. und lateralen Projektion wurde bei diesen Präparaten am oberen und unteren Wachstumsfugenrand jeweils eine Linie (rot, transparent) frei eingezeichnet, die den entsprechenden Wachstumsfugenrandverlauf in etwa mitteln sollte (Abb. 30-39). Mittig zwischen diesen beiden wurde eine weitere Linie (rot, deckend) gezogen, die als theoretisches Wachstumsfugenzentrum bezeichnet wurde (Abb. 30-39).

In den a.p.-Aufnahmen wurde eine weitere Linie (hellblau, transparent) eingezeichnet, die den Verlauf der medialen knöchernen Femuroberfläche widerspiegeln sollte, und auf ihr eine Senkrechte (ebenfalls hellblau, transparent) zum femoralen Insertionszentrum gezogen (Abb. 30, 32, 34, 36, 38). Der Schnittpunkt beider hellblauen Linien wurde als ossärer Bezugspunkt der femoralen MPFL-Insertion bezeichnet.

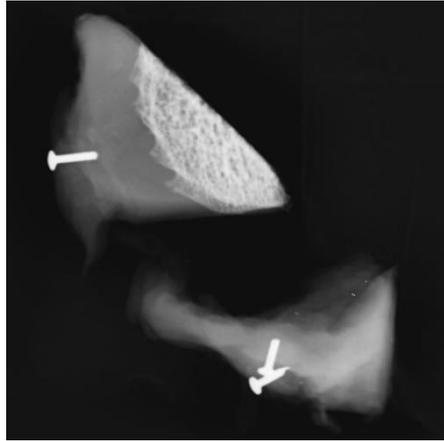
Die Konstruktion dieses Punktes erfolgte aus folgendem Grund:

Die oberflächlich eingebrachte femorale Insertionsmarkierung lag aufgrund des kräftigen Perichondriums und des hyalinen Knorpels des Prämordialskeletts bei den jüngeren Präparaten in einem gewissen Abstand zum Knochenkern (Abb. 25).

---

4 Version 6.29.02, STARC medical GmbH, 30916 Isernhagen

5 Durchschnittswert von 10 ausgemessenen Stecknadelköpfen des verwendeten Typs mit Hilfe eines Digital-Messschiebers (DIN 862, Messgenauigkeit 0,03 mm, TÜV-zertifiziert nach DIN EN ISO 9001: 2008, MIB Messzeuge GmbH, 34286 Spangenberg)



**Abbildung 25: Linksseitiges Präparat des 5-jährigen Jungen, axial**

Die links im Bild gelegene femorale Insertionsmarkierung befindet sich aufgrund des kräftigen Weichteilmantels in einem erheblichen Abstand zum Knochenkern.

Die femorale distale Femurepiphysenfuge verläuft im a.p. Strahlengang nicht plan, sondern zum medialen und lateralen Rand hin ansteigend <sup>78,122</sup>. Der femorale Knochenblock der Präparate war wiederum jeweils relativ klein. Es war somit davon auszugehen, dass er in erster Linie den ansteigenden medialen Wachstumsfugenrand beinhaltete. Eine Verlängerung des randständigen Wachstumsfugenverlaufs durch den Weichteilmantel hätte die femorale Insertion daher in Relation zu weit distal erscheinen lassen können (Abb. 26). Auch intraoperativ wird sich zudem beim Setzen des femoralen Bohrkanals radiologisch an den knöchernen Strukturen orientiert <sup>32,74,78,87</sup>.

Für alle Aufnahmen wurde tabellarisch festgehalten, ob das Insertionszentrum – bzw. in den a.p.-Aufnahmen sein ossärer Bezugspunkt – proximal, distal oder auf Wachstumsfugenhöhe erschien. Zudem wurde die jeweilige proximale bzw. distale Distanz zum theoretischen Wachstumsfugenzentrum (gelbe Linie) gemessen (Abb. 30-39).



**Abbildung 26: Rechtsseitiges Kniegelenk eines Kindes, a.p.**

Der zur Demonstration eingefügte weiße Punkt soll hier ein Insertionszentrum darstellen. Durch den Anstieg der Wachstumsfuge zum medialen Rand hin scheint sich die im Weichteilmantel gelegene Insertionsmarkierung bei isolierter Betrachtung des Präparates (weiß gestrichelt umrandet) weiter distal zu befinden, als es ihrer eigentlichen Lagebeziehung zur Wachstumsfuge entspricht. Im Präparat verläuft das theoretische Wachstumsfugenzentrum (kontinuierliche rote Linie) mittig zwischen den Verlaufslinien des oberen und unteren Wachstumsfugenrandes (jeweils gestrichelte rote Linie). Der ossäre Bezugspunkt des markierten Insertionszentrums stellt den Schnittpunkt zwischen dem gemittelten Verlauf der medialen knöchernen Femuroberfläche und seiner Senkrechten zum Insertionszentrum (jeweils blaue Linie) dar. Er liegt hier proximal des theoretischen Wachstumsfugenzentrums.

## 2. Präparate mit partiellem Wachstumsfugenanschnitt

Bei den Präparaten mit partiellem Wachstumsfugenanschnitt wurde in der a.p. und lateralen Projektion eine Linie (rot, gedeckt) frei eingezeichnet, die den Verlauf des metaphysären Wachstumsfugenrandes möglichst mitteln sollte (Abb. 40-43).

Die Ermittlung des femoralen Insertionszentrums und des Maßstabs erfolgte wie bei den Präparaten mit vollständigem Wachstumsfugenanschnitt. Von der Konstruktion eines ossären Bezugspunktes wurde aufgrund des fehlenden epiphysären Knochens als Referenz abgesehen.

Für alle Aufnahmen wurde tabellarisch festgehalten, ob das Insertionszentrum proximal oder distal der Linie des metaphysären Wachstumsfugenrandes lag und in welchem Abstand es sich zu dieser befand (gelbe Linie; Abb. 40-43).

## 3.4 Die histologische Untersuchung

### 3.4.1 PMMA-Einbettung und anschließende Wiederauflösung

Der histologische Abschnitt der Studie begann mit dem Versuch einer Kunststoffeinbettung mittels Polymethylmethacrylat (PMMA; 6). Im Gegensatz zu einer Paraffineinbettung müssen kalzifizierte Strukturen hierbei nicht entkalkt werden und lassen sich so lichtmikroskopisch gut beurteilen, weitere Vorteile stellen u. a. eine höhere Auflösbarkeit und weniger Artefakte dar <sup>131</sup>.

Nach initialem Auswaschen der Präparate erfolgte zunächst die Entwässerung (7) der Präparate über insgesamt 49 Tage.

Die Präparate wurden an zuvor angefertigten Gerüsten aus Draht und Kork so aufgespannt, dass das MPFL und beide Insertionen eine möglichst große gemeinsame transversale Schnittebene bildeten (Abb. 27).

Kork wurde unter der Annahme verwendet, dass es fest genug sei, um die Präparate über den Einbettungszeitraum in der gewünschten Position zu fixieren und darüber hinaus nach Kunststoffinfiltration gut aushärten würde. Letzteres erwies sich im weiteren Verlauf als unzutreffend. Anschließend erfolgte eine übliche PMMA-Einbettung (6).

---

6 Technovit 9100®, Heraeus Kulzer GmbH, 61273 Wehrheim  
7 Durchführung siehe Materialverzeichnis



**Abbildung 27: Aufgespanntes Präparat im Einbettungsglas**

Der anschließende Versuch 6  $\mu\text{m}$  dicke Gewebeschnitte am Mikrotom (8) anzufertigen verlief frustan. Das MPFL und die Korkplatten waren in den meisten Präparaten nicht gut infiltriert und ausgehärtet, in den anderen Präparaten zerbrachen die Gewebeschnitte direkt im Rahmen des Schneidevorgangs (Abb. 28). Die Einbettungen wurden daraufhin aufgelöst (9).



**Abbildung 28: Präparat eingebettet in nicht vollständig ausgehärtetem PMMA**

Es zeigen sich Blasen- und Filmbildungen nicht ausgehärteten PMMAs entlang des Präparats und der Korkplatten.

---

8 Mikrotom Leica SM 2500 S, Leica Biosystems Nussloch GmbH, 69226 Nussloch  
9 Auflösung in 2-Methoxyethylacetat über ca. 4 Wochen unter zweimal wöchentlichen Lösungswechseln

### 3.4.2 Paraffineinbettung

Als Ersatz wurde eine Paraffineinbettung (10) durchgeführt. Diese im Rahmen lichtmikroskopischer Untersuchungen am weitesten verbreitete Einbettungsart setzt bei Knochenbestandteilen allerdings eine Entkalkung voraus, weshalb sich kalzifizierte Strukturen nur eingeschränkt beurteilen lassen <sup>131</sup>.

Nach der Entkalkung über ca. 6 Wochen in Ethylendiamintetraessigsäure (EDTA; 11) erfolgte über 3 Tage eine herkömmliche Entwässerung und Paraffineinbettung (10). Letztlich wurde hierbei durch Erhitzen auf 58°C verflüssigtes Paraffin in Formen gegossen und die Präparate in diesen erneut so positioniert, dass MPFL und beide Insertionen eine möglichst große gemeinsame transversale Schnittebene bildeten. Die Einbettungen härteten über 20 min auf der Kühlplatte aus.

Anschließend wurden 4 µm dicke, transversale Gewebeschnitte gewonnen. Hinsichtlich der Qualität der Gewebeschnitte erwies sich dabei manuelles Schneiden (12) gegenüber automatischen Vorgängen als überlegen.

Die Schnitte wurden solange verworfen, bis sich jeweils der Insertionsbereich in der Schnittebene befand. Insbesondere bei den älteren Präparaten erfolgte vorwiegend die Spaltung der Präparate im MPFL-Verlauf und eine erneute separate Einbettung beider Insertionen, da sich die nun kleineren Gewebeschnitte ohne Informationsverlust im Ansatzbereich besser erhalten ließen.

### 3.4.3 Färbung nach Masson-Goldner-Trichrom

Die Gewebeschnitte wurden auf Objektträgern (13) fixiert und nach Durchlaufen einer absteigenden Alkoholreihe (14) nach Masson-Goldner-Trichrom (15) gefärbt.

Neben Zellkernen und Zytoplasma werden durch sie auch Kollagenfasern betont dargestellt <sup>109</sup>. Zellkerne erscheinen nach der Färbung braun-schwarz, mineralisierter Knochen blau, Osteoid, Zytoplasma und Muskulatur jeweils rot, Erythrozyten orange-gelb und Bindegewebe sowie saure Muzine grün <sup>109,132,133</sup>.

---

<sup>10</sup> Leica Paraplast Plus, McCormick Scientific, Leica Biosystems Nussloch GmbH, 69226 Nussloch; Durchführung siehe Materialverzeichnis

<sup>11</sup> Entkalker soft, Carl Roth GmbH + Co. KG, 76185 Karlsruhe; Inkubation bei 37°C, EDTA- Wechsel zweimal wöchentlich

<sup>12</sup> Mikrotom Leica RM 2125, Leica Biosystems Nussloch GmbH, 69226 Nussloch

<sup>13</sup> HistoBond, Paul Marienfeld GmbH & Co. KG, 97922 Lauda Königshofen

<sup>14</sup> Durchführung siehe Materialverzeichnis

<sup>15</sup> Durchführung siehe Materialverzeichnis

### 3.4.4 Mikroskopie und histologische Auswertung

Die gefärbten Gewebedünnschnitte wurden unter dem Lichtmikroskop (16) in einer 12,5-, 25-, 50-, 100- und 200-fachen visuellen Gesamtvergrößerung ohne Polarisation betrachtet. Die Bildaufnahmen erfolgten mit dem Programm AxioVision (17).

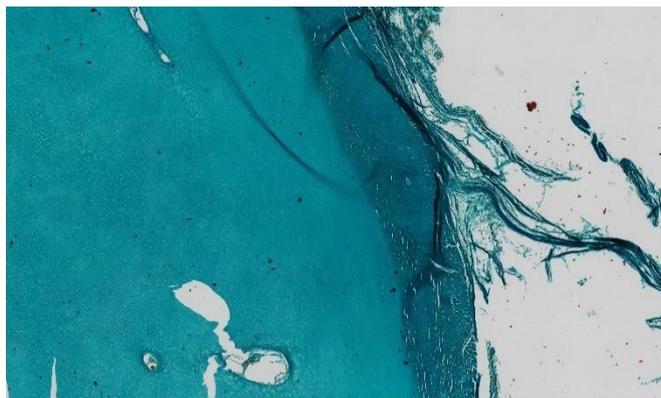
Zunächst wurde eine qualitative Bestandsaufnahme durchgeführt.

Um für die Auswertung berücksichtigt zu werden, mussten die Präparate adäquat in der transversalen Ebene geschnitten worden sein und die Gewebeschichtung von der Oberfläche zur Tiefe hin sicher nachvollzogen werden können.

Die komplizierte histologische Methodik und vorangegangene radiologische Untersuchung hatten zu vermehrter Artefaktbildung geführt. Präparate, deren Gewebeschnitte relevante Einschränkungen hinsichtlich der Insertionsbeurteilbarkeit aufwiesen, wurden als solche identifiziert (Abb. 29).

Sie wurden auf Übereinstimmungen zu den besser erhaltenen Gewebeschnitten hin untersucht, jedoch nicht in die eigentliche histologische Insertionsauswertung miteinbezogen.

Eine Ausnahme stellte die Beurteilung hinsichtlich des Ossifikationszentrums und des periossären Weichteilmantels dar, die auch an diesen Präparaten sicher möglich war.



**Abbildung 29: Linksseitige femorale Insertion des jüngsten Kindes, ca. x10**

Die Insertionsstruktur ist erheblich ausgedünnt, es bestehen nur noch wenige intakte Faserverläufe. Eine Insertionsbeurteilung isoliert anhand dieses Gewebeschnitts ist daher nicht sicher möglich.

Aufgrund der geringen Fallzahl erfolgte die Auswertung rein deskriptiv.

Da der Paraffineinbettung eine Entkalkung der Präparate voranging, wurde auf eine nähere Differenzierung kalzifizierter Strukturen, insbesondere auch die Unterscheidung von unkalzifiziertem und kalzifiziertem Knorpel, verzichtet.

Die Auswertung der histologischen Dünnschnitte begann mit der Beschreibung ihres grundsätzlichen Aufbaus. Von besonderem Interesse war hierbei die Beurteilung der MPFL-Insertionen hinsichtlich ihrer Insertionsart und strukturell unterschiedlicher Insertionsbereiche sowie die Identifikation auffälliger zellulärer und kollagenärer Strukturausrichtungen.

Anschließend wurden die Gewebeschnitte hinsichtlich der altersabhängigen Entwicklung untersucht.

Die fortschreitende Ossifikation und die sich damit ändernde biomechanische Belastung wird als kausaler Einflussfaktor der Insertionsentwicklung erachtet <sup>103,111,114,115</sup>.

Die älteren Präparate, deren Gewebeschnitte ein Ossifikationszentrum aufwiesen, wurden daher hinsichtlich dessen Größe und seines Abstands zur Oberfläche der Knochenanlage zueinander in Relation gesetzt.

Hiernach wurde auf den gleichen histologischen Schnitten der Stand der Insertionsentwicklung beurteilt. Veränderungen der histologischen Schichtabfolge im Insertionsbereich wurden ebenso beschrieben wie relevante Anteilsveränderungen einzelner Schichten zueinander. Auch prägnante Veränderungen der Zelldichte, der Zellgröße und der Kollagenstruktur wurden identifiziert.

Patellar wurde die Entwicklung des Insertionsfaserknorpels und des Knochenkerns in Relation zum Kindesalter graphisch dargestellt (Grafik 1, S. 58). Das Alter des jüngsten Kindes wurde hierfür auf 2 Jahre geschätzt.

Hinsichtlich des Faserknorpels wurde hierbei beschrieben, ob sich eine nicht sicher abgrenzbare, eine dünne oder eine kräftige Faserknorpelschicht beim jeweiligen Kind zeigte. In Bezug auf den Stand der Ossifikation wurden die Größenanteile des Knochenkerns und des hyalinen Knorpels an der patellaren Knochenanlage orientierend in ein Verhältnis zueinander gesetzt. Es wurde unterschieden, ob eine der beiden Gewebearten im Insertionsbereich ausschließlich vorhanden war, der anderen erheblich überwog oder beide ähnliche Größenanteile aufwiesen.

## 4. Ergebnisse

### 4.1 Die radiologische Auswertung

#### 4.1.1 Qualität

Es lagen insgesamt 11 Präparate von 6 Kindern vor (Tab. 2).

5 Präparate von 3 Kindern wiesen einen vollständigen Wachstumsfugenanschnitt auf (Abb. 30-39). In der lateralen Projektion gelang es bei allen und in der a.p. Projektion bei 4 von 5 Präparaten die Wachstumsfuge ohne relevante Überlagerungen zwischen metaphysärem und epiphysärem Knochen darzustellen. Bei der rechtsseitigen a.p.-Aufnahme des 8-jährigen Jungen konnte dies nicht erreicht werden (Abb. 38).

An beiden Präparaten des jüngsten Kindes zeigte sich ein partieller Wachstumsfugenanschnitt (Abb. 40-43).

3 Präparate beinhalteten einen kontinuierlichen femoralen Knochenblock ohne Wachstumsfugenanschnitt (Abb. 22-24). Das rechtsseitige Präparat des 7-jährigen Jungen wies zwar am proximalen Pol des femoralen Knochenblocks hyalinen Knorpel auf, dieser konnte jedoch nicht sicher als Epiphysenfugenanschnitt identifiziert werden.

Diese 4 Präparate wurden nicht berücksichtigt.

Somit ließen sich 7 Präparate von 4 Kindern radiologisch auswerten (Tab. 2).

Kind	Seite	Art des Wachstumsfugenanschnitts			Präparat auswertbar (ja/nein)
		vollständig	partiell	ohne	
jüngstes Kind	links		x		ja
	rechts		x		ja
5-jähriger Junge	links			x	nein
	rechts	-	-	-	-
7-jähriger Junge	links	x			ja
	rechts			x	nein
8-jähriger Junge	links	x			ja
	rechts	x			ja
9-jähriger Junge	links	x			ja
	rechts	x			ja
12-jähriges Mädchen	links			x	nein
	rechts			x	nein

**Tabelle 2: Qualitative Einteilung der Präparate hinsichtlich ihres Wachstumsfugenanschnitts**  
x Art des Wachstumsfugenanschnitts; - kein vorhandenes Präparat

#### **4.1.2 Die Lagebeziehung der femoralen MPFL-Insertion zur distalen Femurepiphysefuge**

An beiden Präparaten des 9-jährigen Jungen (Abb. 30-33) sowie beim linksseitigen Präparat des 7-jährigen Jungen (Abb. 34, 35) lag das femorale MPFL-Insertionszentrum in beiden Strahlengängen eindeutig distal der Wachstumsfuge (Tab. 3). Bei letzterem war die Distanz mit 8,9 mm im a.p. und 7 mm im lateralen Strahlengang zwischen Insertions- und theoretischem Wachstumsfugenzentrum dabei am größten.

Beide Insertionszentren des 8-jährigen erschienen jeweils in einem Strahlengang unmittelbar proximal und in dem anderen distal zum theoretischen Wachstumsfugenzentrum gelegen (Abb. 36-39). Rechtsseitig befand es sich a.p. 1,1 mm oberhalb und somit unter allen Aufnahmen am weitesten proximal (Abb. 38).

An beiden Präparaten des jüngsten Kindes (Abb. 40-43) lag das femorale Insertionszentrum im a.p. und im lateralen Strahlengang eindeutig distal des proximalen Wachstumsfugenrandes mit Distanzen zwischen 4,8 mm und 6,5 mm (Tab. 4).

Zusammenfassend hätte somit bei 5 Präparaten (71,4 %) von 3 Kindern eine femorale Bohrkanalplatzierung distal der Wachstumsfuge der Anatomie entsprochen.

Die beiden Präparate (28,6 %) des 8-Jährigen lassen diesbezüglich keine eindeutige Aussage zu.

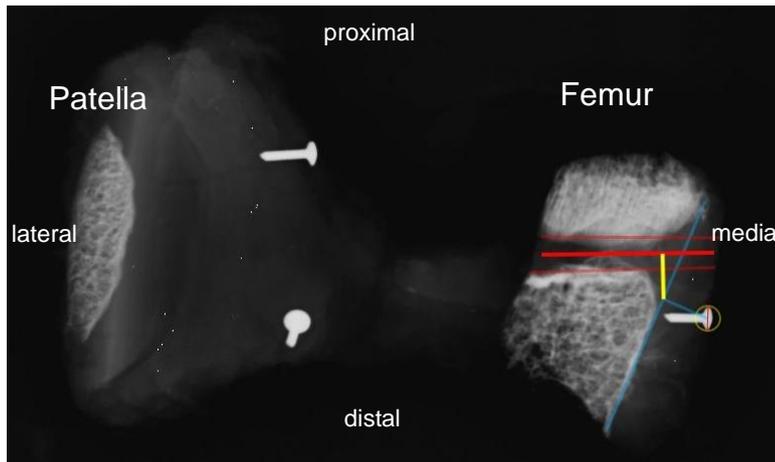
Eine aus anatomischer Sicht zu präferierende proximale Bohrkanalplatzierung konnte für kein Präparat (0 %) nachgewiesen werden.

Kind	Seite	Lagebeziehung des Insertionszentrums zur Wachstumsfuge		Distanz und Lagebeziehung des Insertionszentrums zum theoretischen Wachstumsfugenzentrum	
		Strahlengang		Strahlengang	
		a.p.	lateral	a.p.	lateral
7-jähriger Junge	links	distal	distal	8,9 mm distal	7 mm distal
8-jähriger Junge	links	auf Wachstumsfugenhöhe	auf Wachstumsfugenhöhe	0,1 mm distal	0,6 mm proximal
	rechts	auf Wachstumsfugenhöhe	distal	1,1 mm proximal	1,4 mm distal
9-jähriger Junge	links	distal	distal	5,6 mm distal	4,3 mm distal
	rechts	distal	distal	3,0 mm distal	4,6 mm distal

**Tabelle 3: Lagebeziehung und Distanz zwischen femoralem MPFL-Insertionszentrum und distaler Femurepiphysefuge bzw. theoretischem Wachstumsfugenzentrum bei den Präparaten mit vollständigem Wachstumsfugenanschnitt**

Kind	Seite	Distanz und Lagebeziehung des Insertionszentrums zum proximalen Wachstumsfugenrand	
		Strahlengang	
		a.p.	lateral
jüngstes Kind	links	4,8 mm distal	6,0 mm distal
	rechts	6,0 mm distal	6,5 mm distal

**Tabelle 4: Lagebeziehung und Distanz zwischen femoralem MPFL-Insertionszentrum und proximalem Rand der distalen Femurepiphysefuge bei den Präparaten mit partiellem Wachstumsfugenanschnitt**



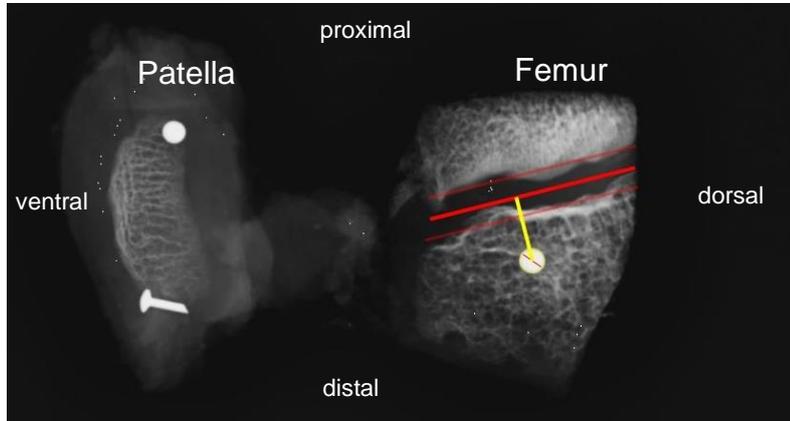
**Abbildung 30: Rechtsseitiges Präparat des 9-jährigen Jungen, a.p.**

Am oberen und unteren Wachstumsfugenrand ist jeweils eine Linie eingezeichnet, die dessen Verlauf in etwa mitteln sollte (transparente rote Linien). Mittig zwischen diesen befindet sich das theoretische Wachstumsfugenzentrum (kräftige rote Linie).

Der ossäre Bezugspunkt stellt den Schnittpunkt vom gemittelten Verlauf der medialen knöchernen Femuroberfläche und seiner Senkrechten (jeweils transparente blaue Linie) zum markierten femoralen MPFL-Insertionszentrum dar. Er befindet sich in der Abbildung distal der Wachstumsfuge.

Die Distanz zwischen theoretischem Wachstumsfugenzentrum und ossärem Bezugspunkt wurde gemessen (gelbe Linie). Sie beträgt hier 3,0 mm.

Der maximale Durchmesser des Stecknadelkopfes (feine rote Linie) wurde zur Maßstabsberechnung herangezogen. Für seine Darstellung wurde als Orientierungshilfe ein Kreis (gelb, transparent) eingezeichnet, der den Stecknadelkopf an seinen am weitesten voneinander entfernten Punkten tangierte.

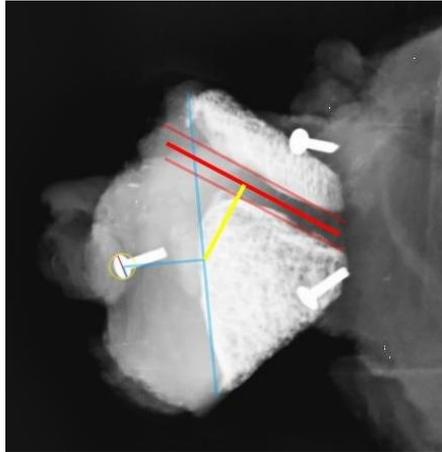


**Abbildung 31: Rechtsseitiges Präparat des 9-jährigen Jungen, lateral**

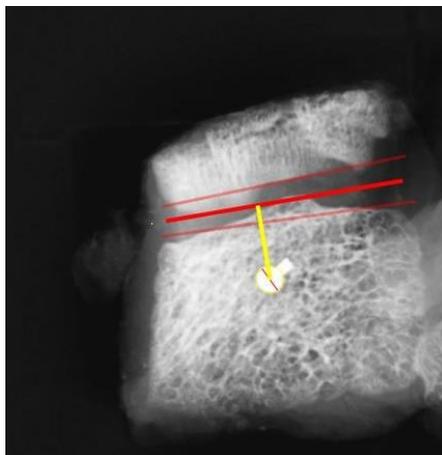
Am oberen und unteren Wachstumsfugenrand ist jeweils eine Linie eingezeichnet, die dessen Verlauf in etwa mitteln sollte (jeweils transparente rote Linie). Mittig zwischen diesen befindet sich das theoretische Wachstumsfugenzentrum (kräftige rote Linie).

Es wurde die Distanz vom theoretischen Wachstumsfugenzentrum zum femoralen MPFL-Insertionszentrum gemessen (gelbe Linie). Letzteres befindet sich hier 4,6 mm distal.

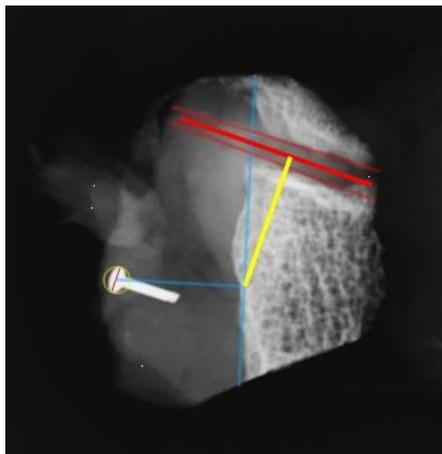
Der maximale Durchmesser des Stecknadelkopfes (feine rote Linie) wurde zur Maßstabsberechnung herangezogen. Für seine Darstellung wurde als Orientierungshilfe ein Kreis (gelb, transparent) eingezeichnet, der den Stecknadelkopf an seinen am weitesten voneinander entfernten Punkten tangierte. Er ist auf dieser Aufnahme kaum sichtbar.



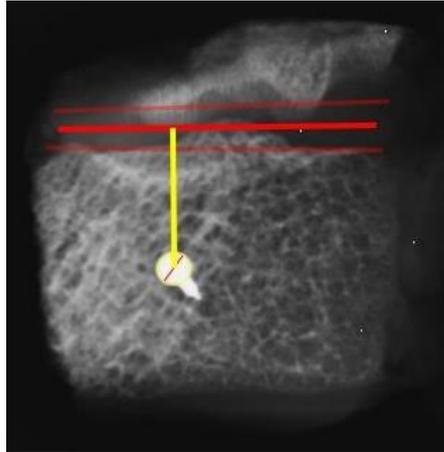
**Abbildung 32: Linksseitige femorale MPFL-Insertion des 9-jährigen Jungen, a.p.**



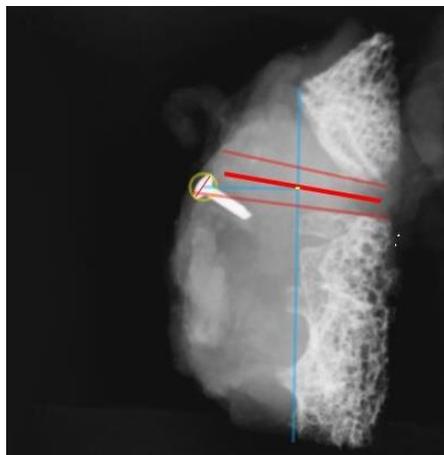
**Abbildung 33: Linksseitige femorale MPFL-Insertion des 9-jährigen Jungen, lateral**



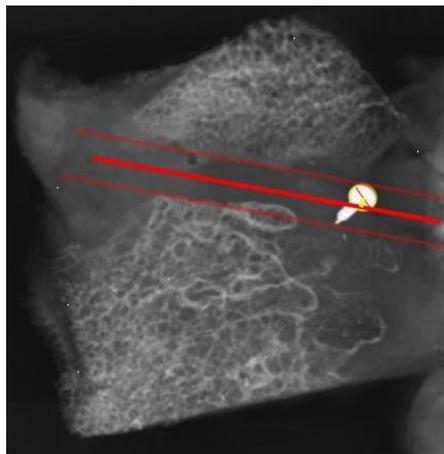
**Abbildung 34: Linksseitige femorale MPFL-Insertion des 7-jährigen Jungen, a.p.**



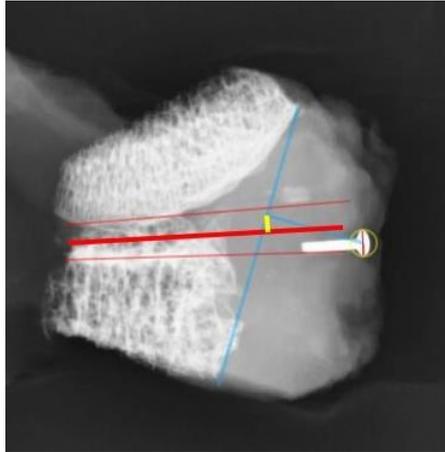
**Abbildung 35: Linksseitige femorale MPFL-Insertion des 7-jährigen Jungen, lateral**



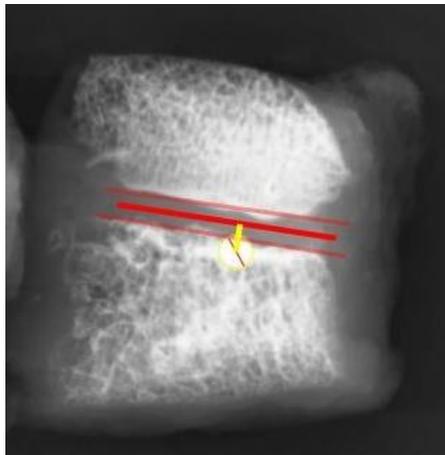
**Abbildung 36: Linksseitige femorale MPFL-Insertion des 8-jährigen Jungen, a.p.**



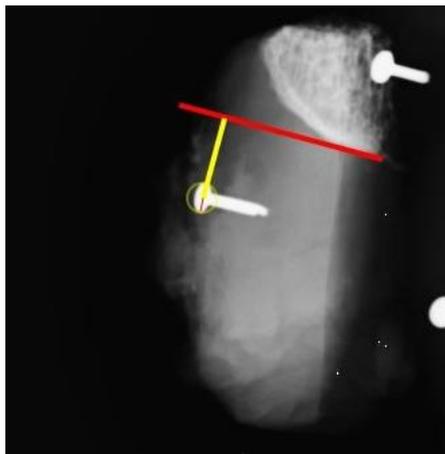
**Abbildung 37: Linksseitige femorale MPFL-Insertion des 8-jährigen Jungen, lateral**



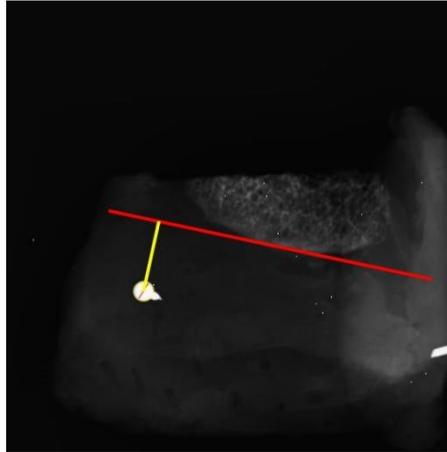
**Abbildung 38: Rechtsseitige femorale MPFL-Insertion des 8-jährigen Jungen, a.p.**



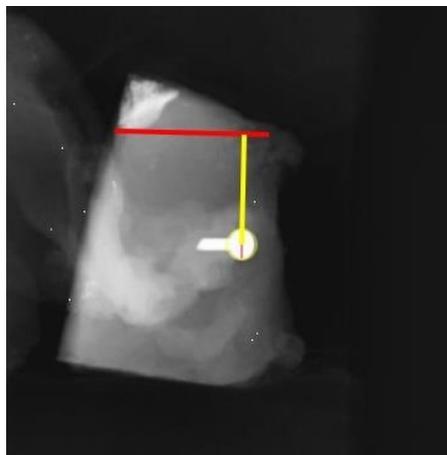
**Abbildung 39: Rechtsseitige femorale MPFL-Insertion des 8-jährigen Jungen, lateral**



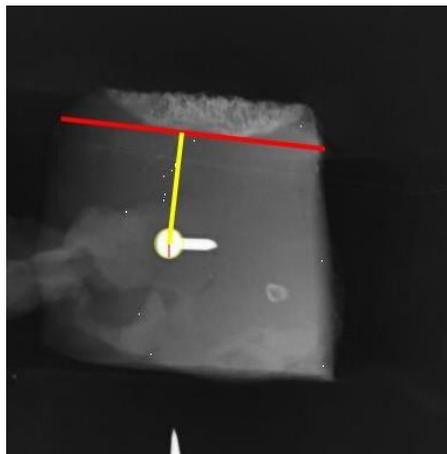
**Abbildung 40: Linksseitige femorale MPFL-Insertion des jüngsten Kindes, a.p.**



**Abbildung 41: Linksseitige femorale MPFL-Insertion des jüngsten Kindes, lateral**



**Abbildung 42: Rechtsseitige femorale MPFL-Insertion des jüngsten Kindes, a.p.**



**Abbildung 43: Rechtsseitige femorale MPFL-Insertion des jüngsten Kindes, lateral**

## **4.2 Histologie**

### **4.2.1 Qualität**

Von den 11 Präparaten waren 10 adäquat transversal geschnitten.

Bei dem linksseitigen Präparat des 9-jährigen Jungen war dies, am ehesten durch eine Fehlpositionierung während der Einbettung bedingt, nicht der Fall. Seine Insertionen wurden daher nicht in die histologische Auswertung miteinbezogen.

Patellar wiesen von den 10 verbliebenen Präparaten 8 eine gut erhaltene Insertion auf und wurden im Rahmen der Auswertung berücksichtigt. An den beiden patellaren Ansätzen des jüngsten Kindes zeigten sich hingegen erhebliche Artefaktbildungen.

Femoral bestanden größere qualitative Einschränkungen. 6 Insertionen waren hier gut beurteilbar und wurden berücksichtigt, 4 (die linksseitigen Insertionen des jüngsten Kindes, des 7-jährigen Jungen und 12-jährigen Mädchens sowie die rechtsseitige Insertion des 9-jährigen Jungen) wiesen relevante Artefakte auf (Abb. 29).

Alle auswertbaren Präparate zeigten gut vereinbare Erkenntnisse bezüglich des sich entwickelnden patellaren und femoralen Insertionsaufbaus.

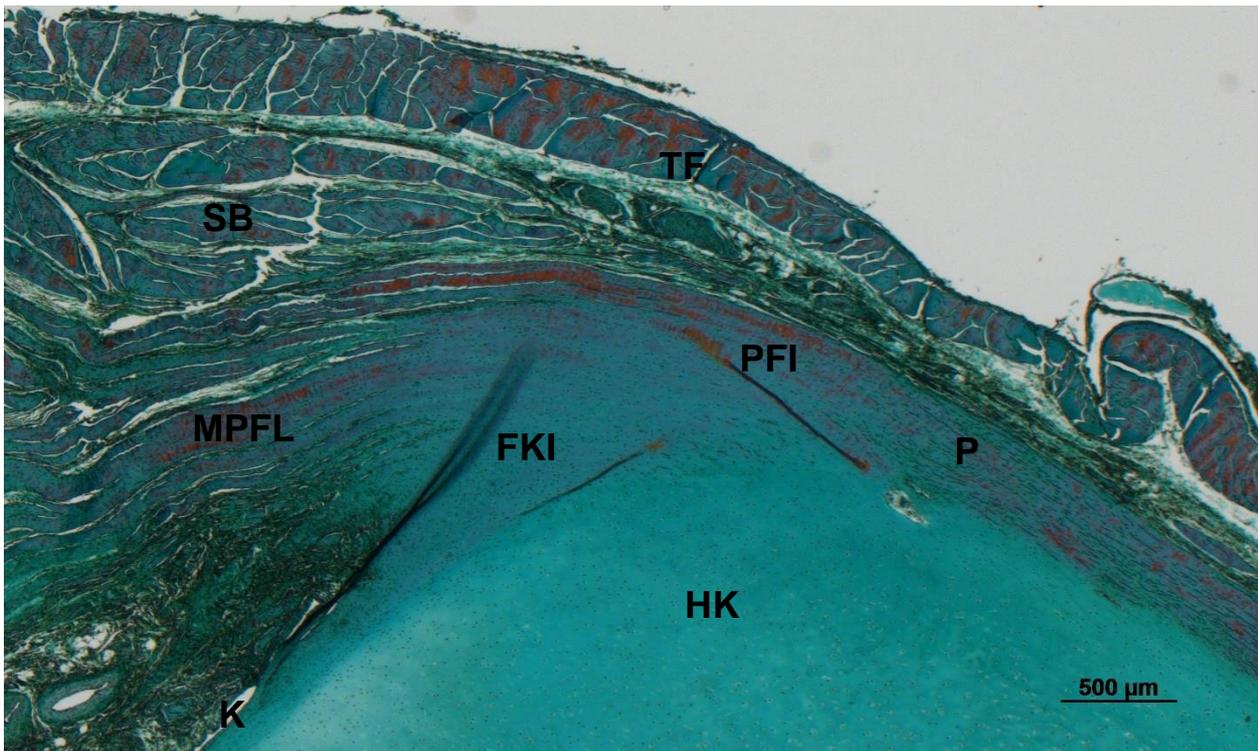
Auch ließen sich die Beobachtungen an den Insertionen mit relevanten qualitativen Einschränkungen grundsätzlich gut mit denen der besser erhaltenen vereinbaren.

### **4.2.2 Die patellare MPFL-Insertion**

#### **4.2.2.1 Histologischer Aufbau der Insertion und ihrer Umgebung**

Alle auswertbaren Präparate wiesen patellar eine große Homogenität hinsichtlich des grundsätzlichen Insertionsaufbaus auf. Dieser ist als Übersicht in Abb. 44 dargestellt.

Als wichtigste Beobachtung zeigte sich patellar eine überwiegend fibrocartilaginäre Insertion (FKI), die oberflächlichen Bandanteile setzten sich jedoch in das präpatellare Periost bzw. Perichondrium fort und entsprachen somit einer sich entwickelnden periostal-fibrösen Insertion (PFI).



**Abbildung 44: Rechte patellare MPFL-Insertion des 8-jährigen Jungen, ca. x30**

Dargestellt wird der grundsätzliche Aufbau des medialen Kapselbandapparates am Übergang zur medialen Patellakante. Zu diesem Entwicklungsstand zeigt sich insertionsnah noch keine Ossifikation.

Oberflächlich legt sich die tiefe Beinfaszie (TF) an die Patellavorderseite an. Es folgt eine inhomogene Bindegewebsschicht, die medial ebenfalls prägnante straffe Bindegewebsstrukturen (SB) beinhaltet.

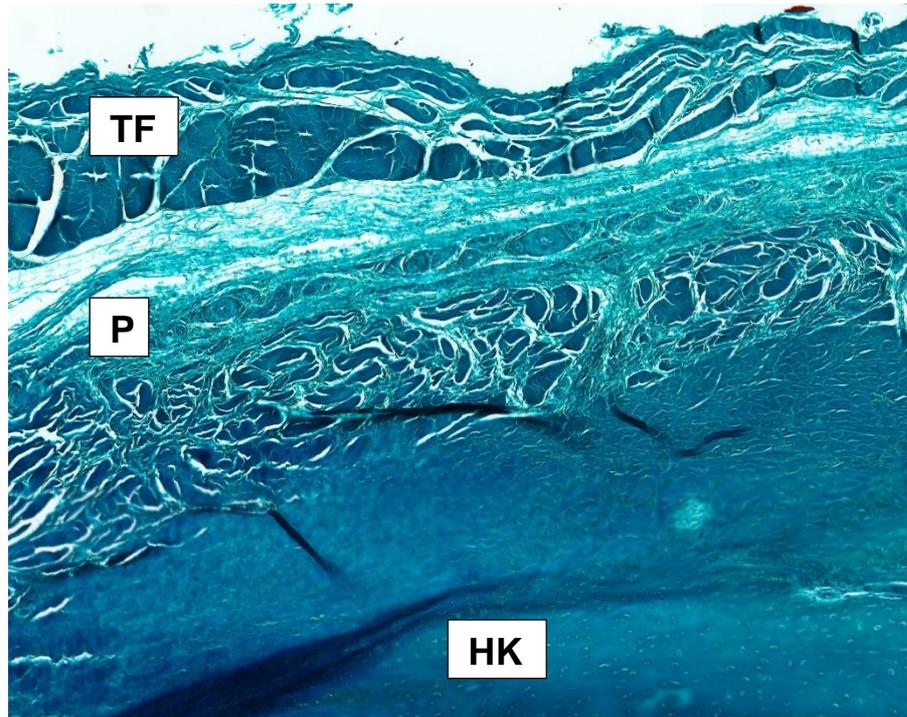
An diese Schicht schließt sich zur Tiefe hin das MPFL an. Sein oberflächlicher Insertionsanteil setzt sich in das präpatellare Perichondrium (P) fort und entspricht somit einer sich entwickelnden periostal-fibrösen Insertion (PFI).

Die tiefer gelegenen Anteile strahlen hingegen direkt in den hyalinen Knorpel der patellaren Knochenanlage (HK) ein. Hier entwickelt sich eine fibrocartilaginäre Insertion (FKI).

Profund zum MPFL folgt eine von reichlich Gefäßen durchsetzte Bindegewebsschicht, die u. a. auch Fettzellen beinhaltet und auf ihrer Unterseite wiederum von der hier nur zu erahnen Gelenkkapsel (K) begrenzt wird.

Mehrheitlich konnten an den Präparaten Anschnitte der tiefen Beinfaszie identifiziert werden, die als oberflächlichste Schicht des medialen Kapselbandapparates in Richtung der Patella lief und sich deren Vorderseite anlegte ohne mit ihr fest verwachsen zu sein (Abb. 44, 45). Weitestgehend artefaktfrei war die Faszie allerdings nur beim rechtsseitigen Präparat des 8-jährigen Jungen erhalten (Abb. 44).

Insbesondere unmittelbar medial der Patellakante zeigten sich bei 4 Präparaten (beidseitig beim 7- und beim 8-jährigen Jungen) zusätzlich ausgeprägte straffe Bindegewebsstrukturen in der darunter gelegenen inhomogenen Zwischenschicht, die MPFL und tiefe Beinfaszie voneinander trennte (Abb. 44, 46).



**Abbildung 45: Rechte Patellavorderseite des 9-jährigen Jungen, ca. x50**

Die tiefe Beinfaszie (TF) legt sich oberflächlich an die Patella an, ohne mit ihrem Perichondrium (P) fest verwachsen zu sein. Am unteren Bildrand zeigt sich hyaliner Knorpel der patellaren Knochenanlage (HK).

In allen Präparaten schloss sich zur Tiefe hin das straffe parallele Bindegewebe des MPFLs an (Abb. 44, 46, 51, 52, 57, 60, 63).

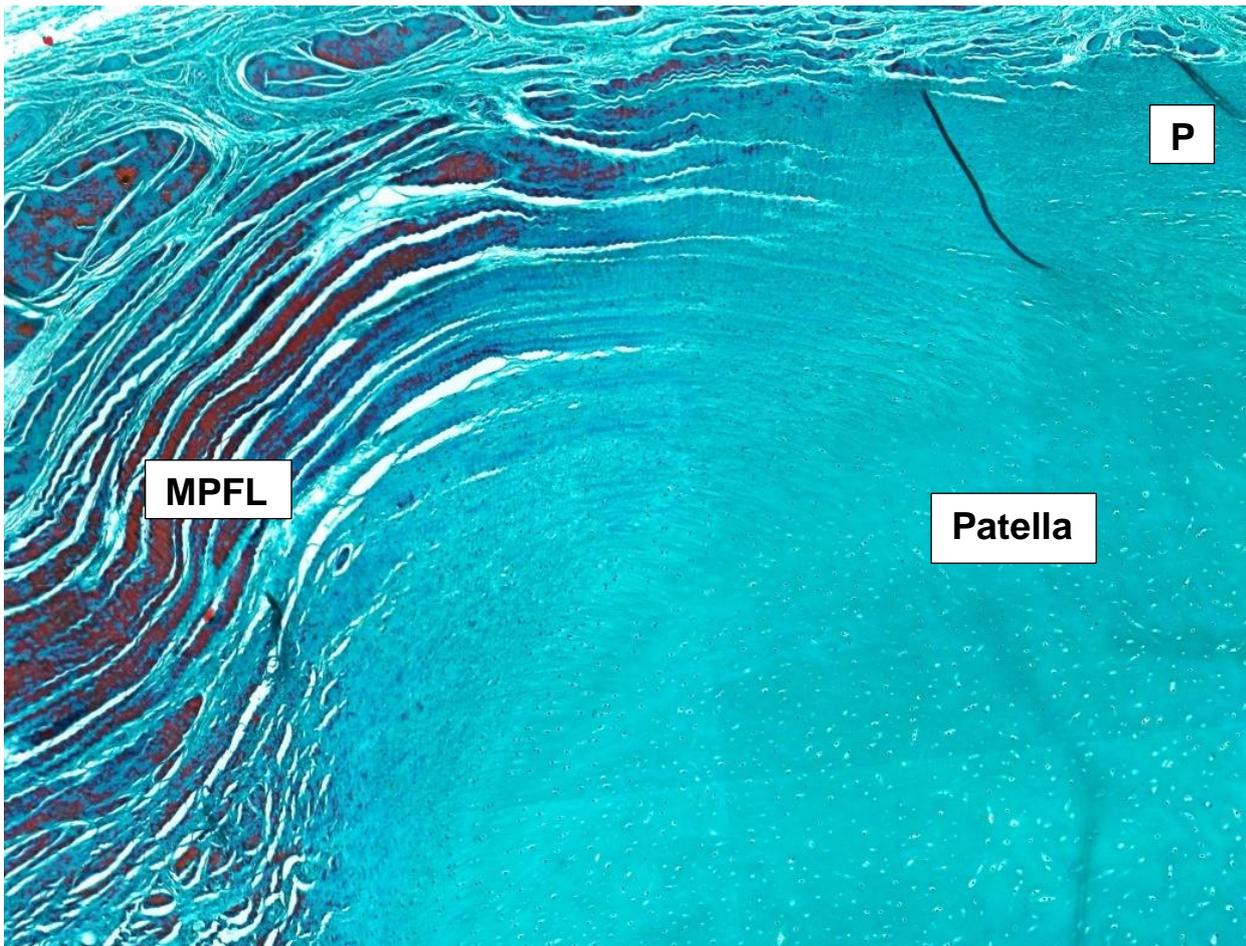
Entsprechend der ligamentären Zugrichtung erschien seine Insertionsstruktur jeweils von mediodorsal an die Patella heranlaufend und sich dann zu dieser hin bogenförmig beugend (Abb. 44, 46, 49).

Strukturell ließen sich 2 Insertionsanteile voneinander abgrenzen:

Der **oberflächliche Bandanteil** verlief tangential in Richtung des präpatellaren Perichondriums bzw. des Periosts und strahlte seitlich in jenes ein (Abb. 44, 46-48, 51, 52, 60). Dies entsprach somit einer in der Entwicklung befindlichen PFI. Nur am linksseitigen Präparat des 8-jährigen Jungen, dessen patellarer Anschnitt sehr klein war, ließ sich dieser oberflächliche Insertionsbereich nicht nachvollziehen.

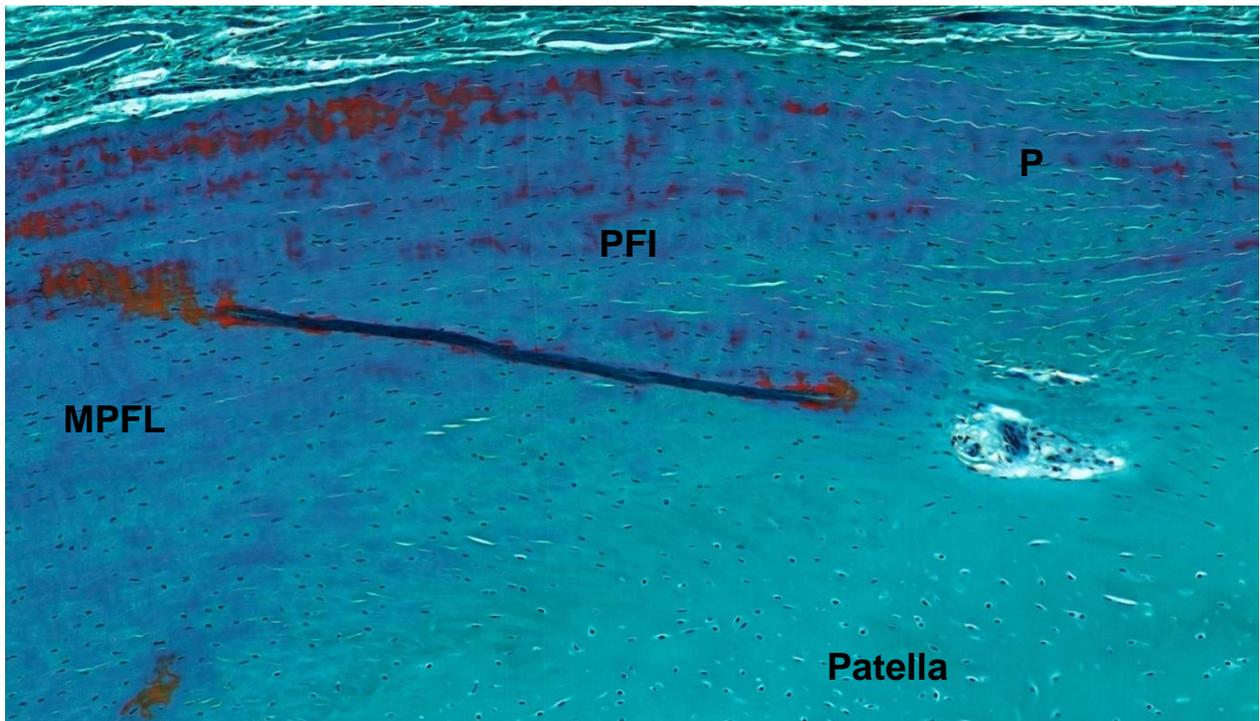
Der **tiefer gelegene Bandanteil** inserierte hingegen je nach Entwicklungsstand direkt im hyalinen Knorpel bzw. Knochen der medialen Patellakante (Abb. 44, 46, 48, 49, 52-59, 61, 63). Wie im Folgenden unter 4.2.2.2 beschrieben wies dieser tiefer gelegene Insertionsanteil mit zunehmendem Alter eine Faserknorpelschicht auf. Somit entsprach dieser Bereich einer sich entwickelnden fibrocartilaginären Insertion (FKI).

Der fibrocartilaginäre Insertionsbereich erschien in der Transversalebene zumeist erkennbar größer als der periostal-fibröse, nur beim rechtsseitigen Präparat des 12-jährigen Mädchens ließ sich kein relevanter Größenunterschied beobachten, beim linksseitigen Präparat des 8-jährigen Jungen konnte wiederum aufgrund des nur kleinen patellaren Anschnitts keine sichere Aussage getroffen werden (Abb. 44, 46, 51, 52, 57).



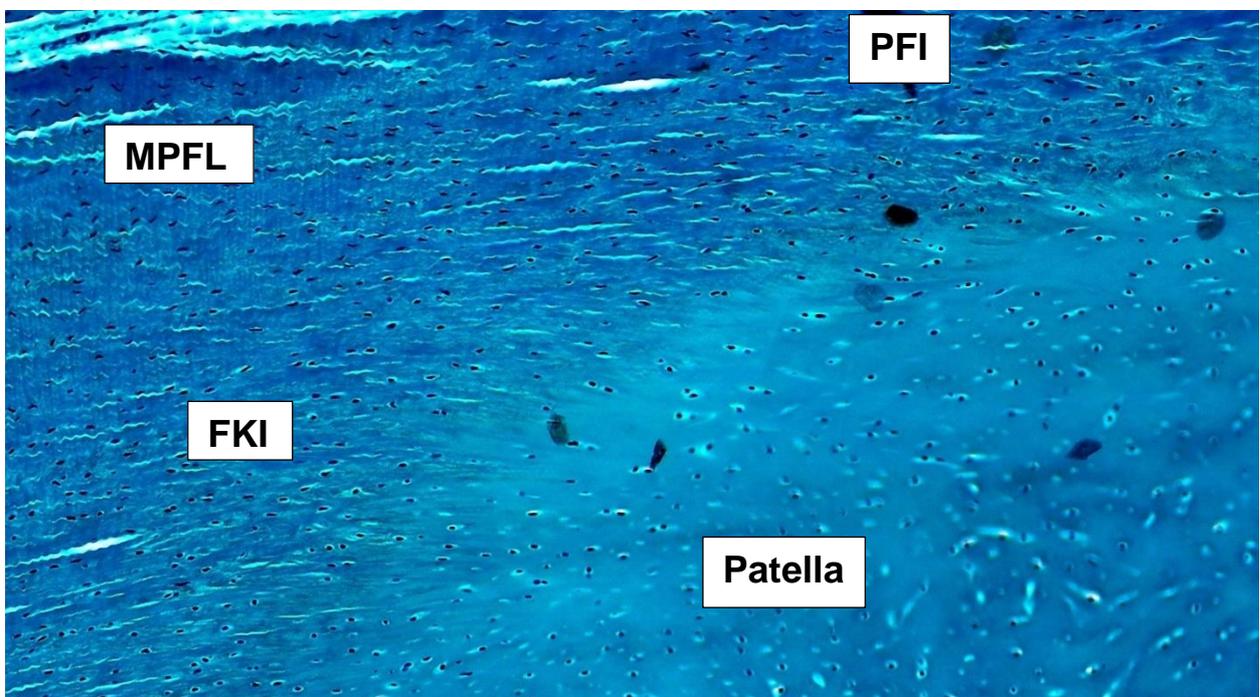
**Abbildung 46: Linke patellare MPFL-Insertion des 7-jährigen Jungen, ca. x50**

Das MPFL zieht von mediodorsal an die Patella heran. Die oberflächlichen Insertionsanteile setzen sich in das Perichondrium (P) fort. Die tiefer gelegenen Anteile strahlen hingegen direkt in die mediale Patellakante ein, die zu diesem Entwicklungsstand noch aus hyalinem Knorpel besteht. Am oberen Bildrand ist die inhomogene Bindegewebsschicht angeschnitten, die MPFL und tiefe Beinfaszie voneinander trennt. Sie weist hier unmittelbar medial der Patellakante auch kräftige Komponenten straffen kollagenen Bindegewebes auf.



**Abbildung 47: Rechte patellare MPFL-Insertion des 8-jährigen Jungen, ca. x110**

Abgebildet sind in erster Linie die oberflächlichen Anteile des MPFLs, die sich unmittelbar in das präpatellare Perichondrium (P) bzw. mit fortgeschrittener Entwicklung in das Periost fortsetzen. Dies entspricht der Entwicklung eines periostal-fibrösen Insertionsbereichs (PFI).

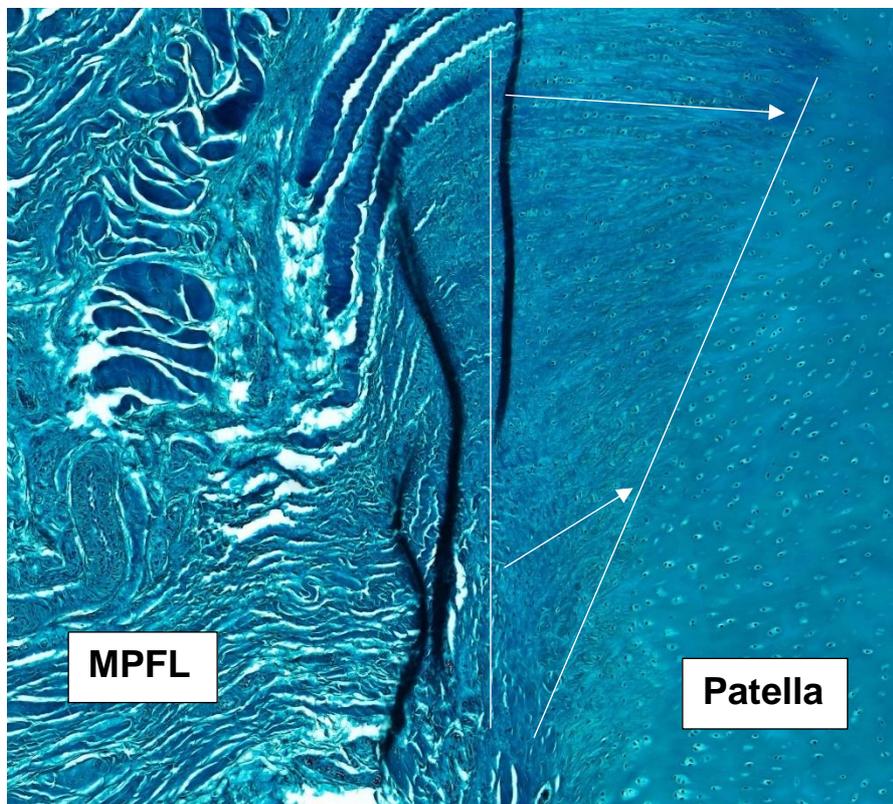


**Abbildung 48: Rechte patellare MPFL-Insertion des 7-jährigen Jungen, ca. x140**

Sowohl die oberflächlichen Bandanteile des MPFLs, die sich in das präpatellare Perichondrium fortsetzen (PFI), als auch die tiefer gelegenen, die direkt in die mediale Patellakante einstrahlen (FKI), sind sichtbar.

Bei 6 Präparaten war die Struktur der FKI oberflächlich am Übergang von Patellavorderseite zur medialen Kante kräftiger ausgeprägt als in der Tiefe (Abb. 46, 49, 55, 56, 58, 59), bei 2 Präparaten (linksseitig beim 5-jährigen und rechtsseitig beim 7-jährigen Jungen) konnten diesbezüglich keine sicheren Strukturunterschiede beobachtet werden (Abb. 53).

An 7 Präparaten ließ sich beobachten, dass die longitudinale Strukturausrichtung an der FKI oberflächlich eher flach in Richtung Patellazentrum zeigte, während sie sich zur Tiefe hin entsprechend der Bandzugrichtung zunehmend nach ventrolateral aufrichtete (Abb. 46, 49). Beim rechtsseitigen Präparat des 7-jährigen Jungen konnte dies nicht sicher nachvollzogen werden (Abb. 53).



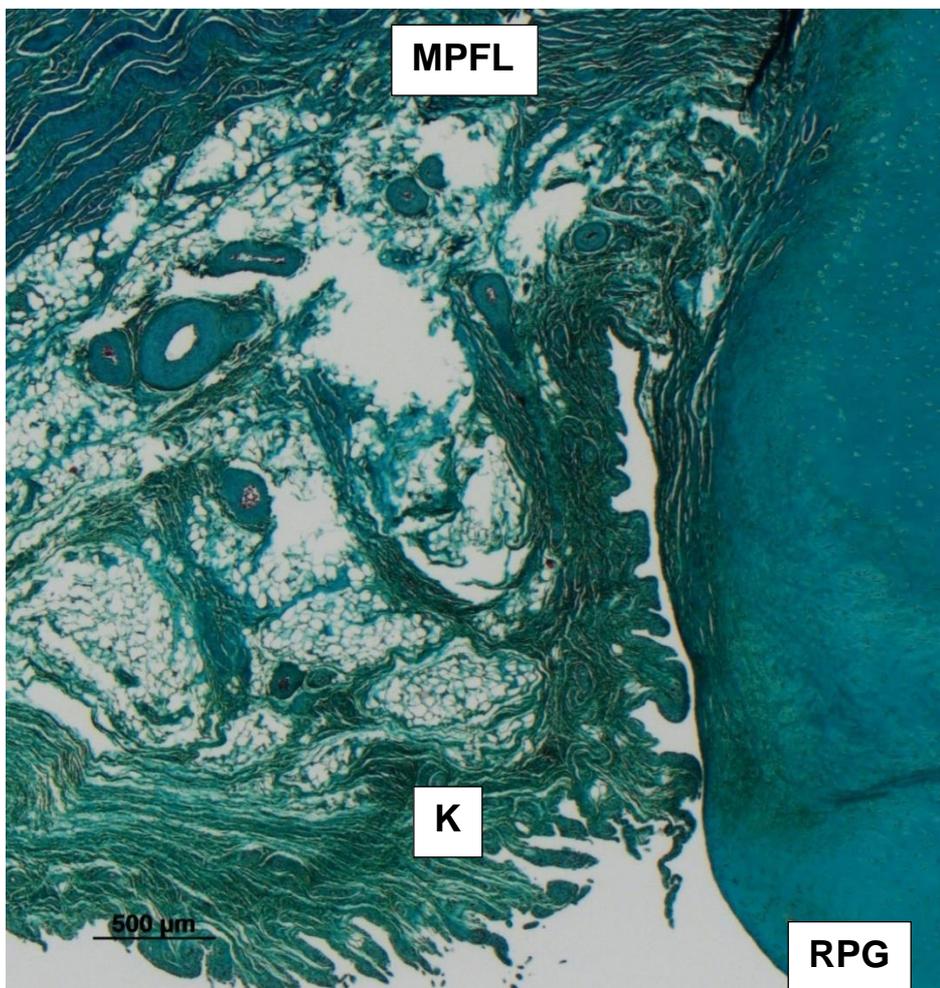
**Abbildung 49: Fibrokartilaginärer Anteil der rechten patellaren MPFL-Insertion beim 9-jährigen Jungen, ca. x60**

*Fibrokartilaginärer Anteil der rechten patellaren MPFL-Insertion beim 9-jährigen Jungen, ca. x60*

Die strukturelle Ausrichtung von Zellen und Kollagen (weiße Pfeile) richtet sich von der Oberfläche zur Tiefe hin auf und entspricht somit zunehmend der ligamentären Zugrichtung. Gleichzeitig nimmt der Durchmesser der Insertionsfasernschicht (von weißen Linien umfasst) zur Tiefe hin ab.

In der Tiefe endete die MPFL-Insertion bei allen Präparaten etwas oberflächlich zum patellaren Ansatz der Gelenkkapsel, deren synoviale Intima sich in Richtung retropatellarer Gelenkfläche anlegte (Abb. 44, 50-52, 57, 60).

Die subintimale Gewebeschicht war in unmittelbarer Insertionsnähe relativ schmal, gewann dann mit etwas Abstand zur Patella jedoch erheblich an Volumen. Ihr inhomogenes Erscheinungsbild beinhaltete neben einem verhältnismäßig geringeren Anteil kollagenen Bindegewebes auch reichlich Fettzellen und war von vielen Gefäßen durchzogen (Abb. 50, 52, 57, 60).



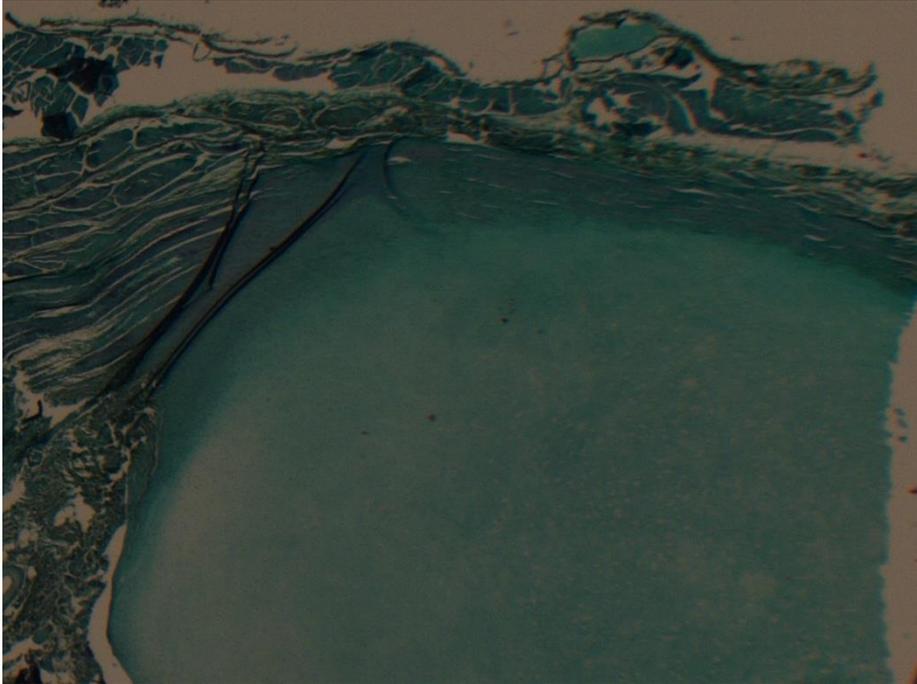
**Abbildung 50: Rechtsseitiger tiefer medialer Kapsel-Band-Apparat und Patellarrückfläche beim 9-jährigen Jungen, ca. x30**

In der Tiefe endet die patellare MPFL-Insertion etwas oberflächlich zum patellaren Ansatz der Gelenkkapsel (K), welche sich in Richtung retropatellarer Gelenkfläche (RPG) anlegt. Die inhomogene Subintima beinhaltet reichlich Gefäße und Fettzellen. Sie nimmt mit etwas Abstand zur Patella erheblich an Volumen zu.

#### **4.2.2.2 Die Entwicklung der patellaren MPFL-Insertion**

Als wichtigste Beobachtungen hinsichtlich der Entwicklung der patellaren MPFL-Insertion zeigten sich zusammenfassend eine zunehmende Erosion des hyalinen Knorpels durch die voranschreitende Ossifikation sowie eine wachsende Schicht an Insertionsfaserknorpel, die letztlich direkt an das Ossifikationszentrum grenzte (Grafik 1).

Beim jüngsten Kind sowie beim 5- und 8-jährigen bestand der gesamte Anschnitt der patellaren Knochenanlage noch aus hyalinem Knorpel (Abbildung 51). Bei letzterem beinhaltete jedoch das linksseitige Präparat nur einen sehr kleinen Anteil der Patella.

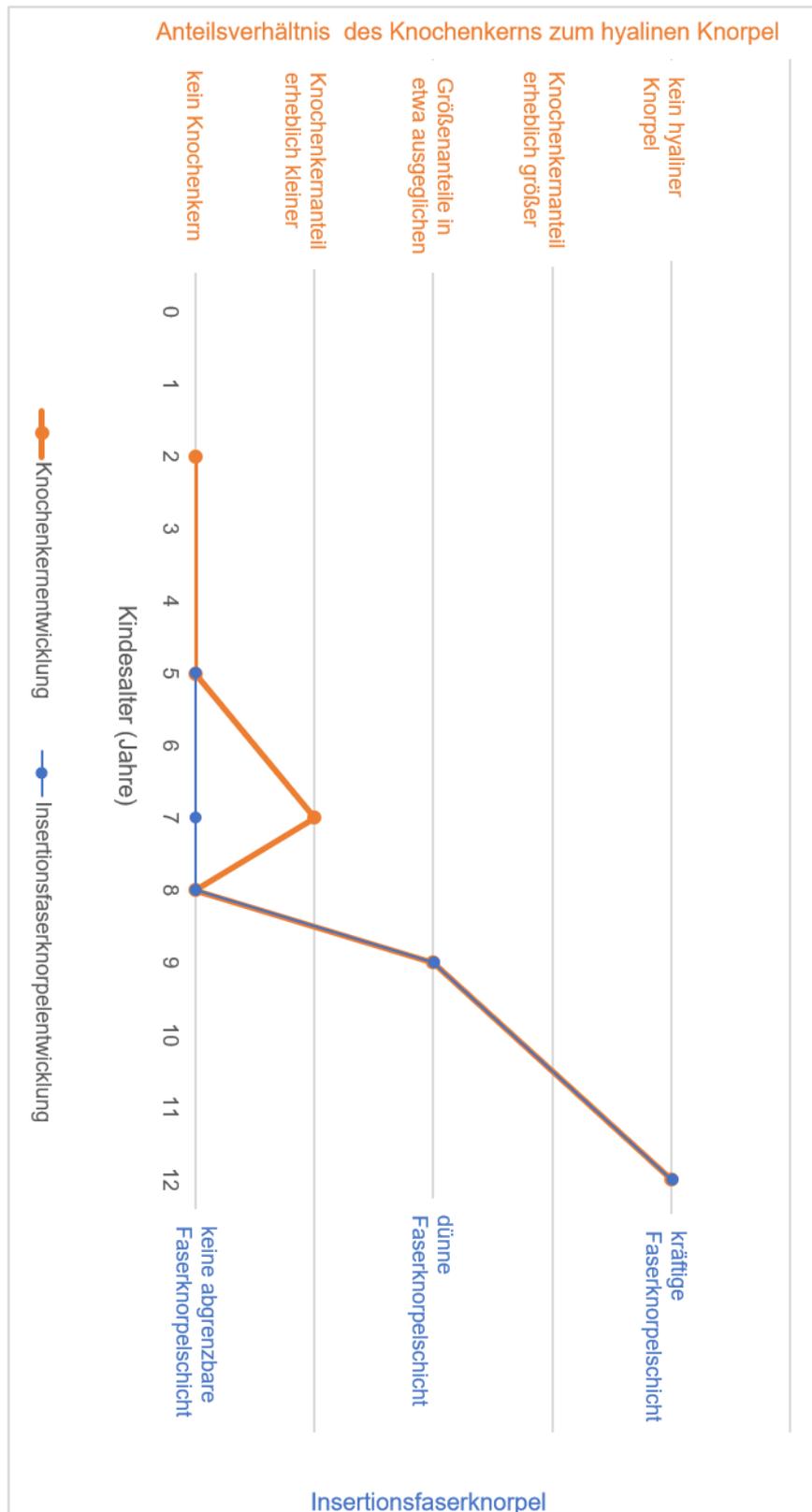


**Abbildung 51: Rechtsseitige mediale Patellakante beim 8-jährigen Jungen, ca. x25**

Der patellare Anschnitt besteht noch vollständig aus hyalinem Knorpel, ein Ossifikationszentrum ist nicht sichtbar.

Bei den Präparaten der 7-, 9- und 12-jährigen Kinder waren hingegen patellar Ossifikationszentren sichtbar, die mit dem Alter an Größe zunahmen.

Beim 7-jährigen Jungen war der ossifizierte Anteil am Präparat noch sehr klein und nur im Patellazentrum sichtbar, der hyaline Knorpel überwog bei weitem (Abb. 52).



**Grafik 1: Knochenkernentwicklung und Insertionsfaserknorpelentwicklung an der patellaren MPFL-Insertion**

Das Alter des jüngsten Kindes wurde auf 2 Jahre geschätzt. Bei dem 7-Jährigen waren bereits Ossifikationszentren sichtbar, beim 8-Jährigen hingegen nicht. Diesbezüglich muss berücksichtigt werden, dass die patellaren Anschnitte der Präparate unterschiedliche Größen aufwiesen.

Der Abstand zwischen Ossifikationszentrum und medialer Patellakante bzw. patellarer Vorderseite war erheblich.

Bei den jüngeren Kindern im Alter zwischen 5 und 8 Jahren erschien der Insertionsaufbau wie folgt:

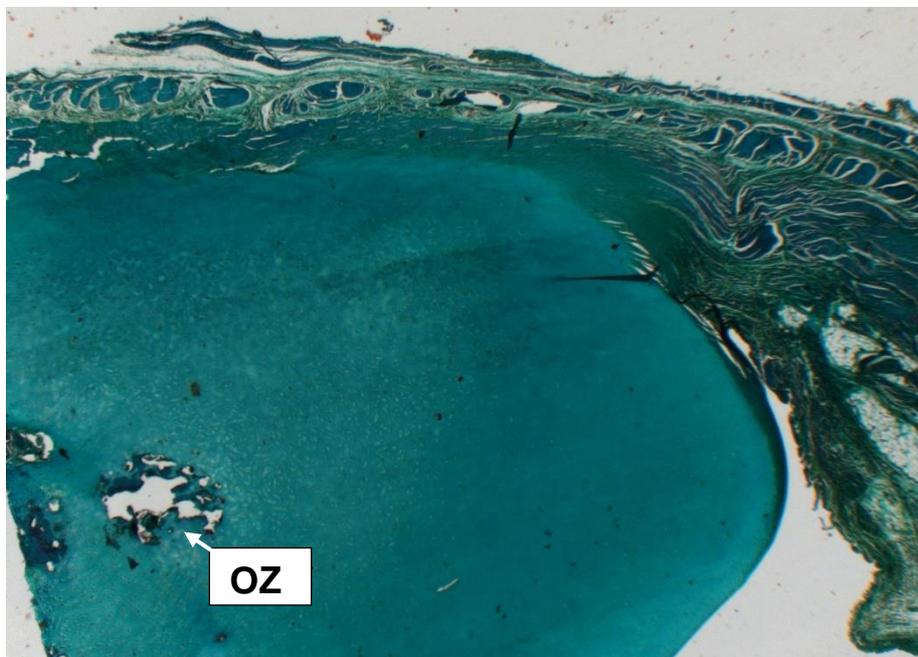
Der oberflächliche MPFL-Anteil inserierte im präpatellaren Perichondrium (Abb. 44, 47, 48, 51, 52).

Am profunden, direkt an dem hyalinen Patellaknorpel inserierenden Bereich ließ sich nur über wenige Zellschichten hinweg eine größere Anzahl an Faserknorpelzellen identifizieren (Abb. 53-56).

Innerhalb des fibrocartilaginären Insertionsbereichs schienen sie dabei verhältnismäßig vermehrt in den kräftigeren oberflächlichen Anteilen vorzuliegen (Abb. 55, 56).

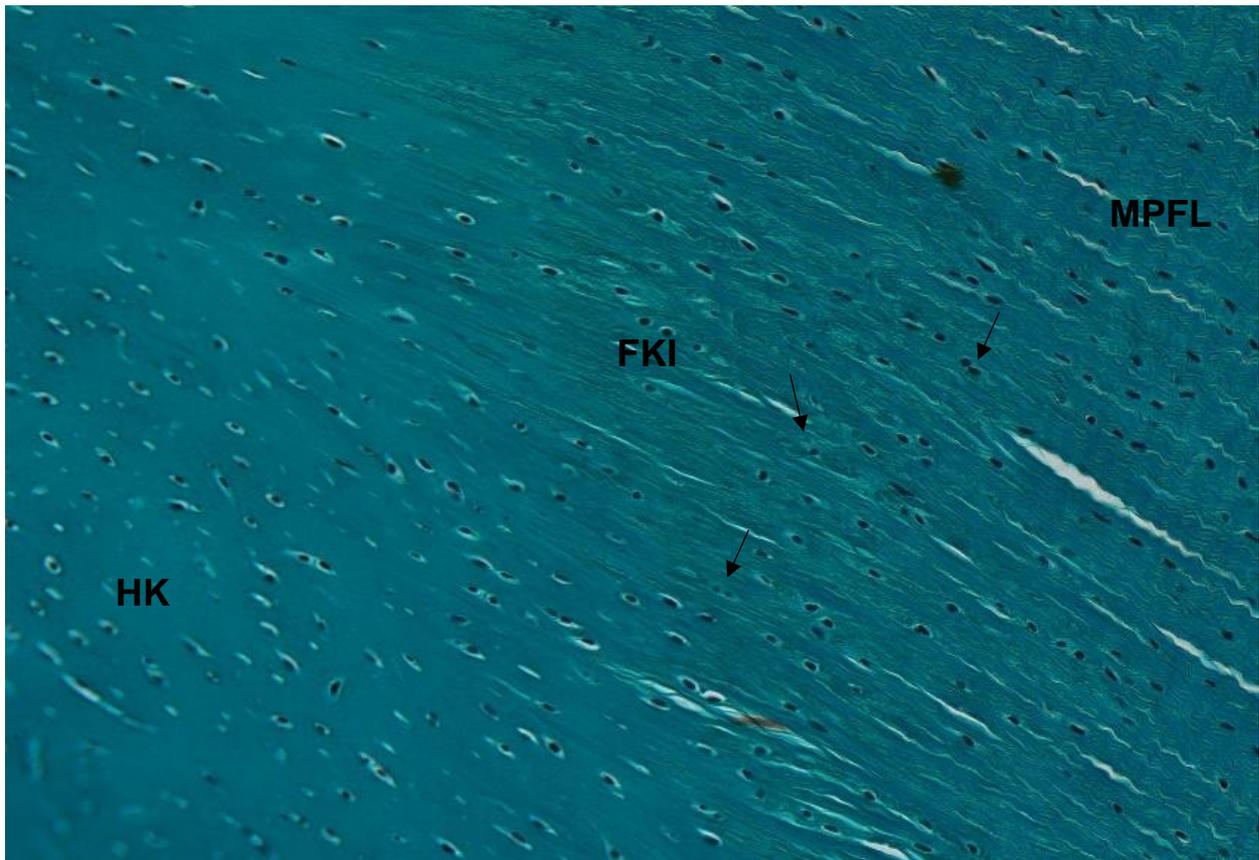
Eine sicher abgrenzbare eigentliche Faserknorpelschicht zeigte sich lichtmikroskopisch jedoch nicht (Abb. 53-56).

Die Größe der Faserknorpelzellen unterschied sich zumeist nicht wesentlich von der der ligamentären Fibroblasten. Die Kollagenstruktur in direkter Insertionsnähe wirkte relativ fein und parallel angeordnet. Sie wies ebenfalls keine erheblichen Diskrepanzen zu der im Band auf (Abb. 53, 54).



**Abbildung 52: Rechtsseitige mediale Patellakante des 7-jährigen Jungen, ca. x15**

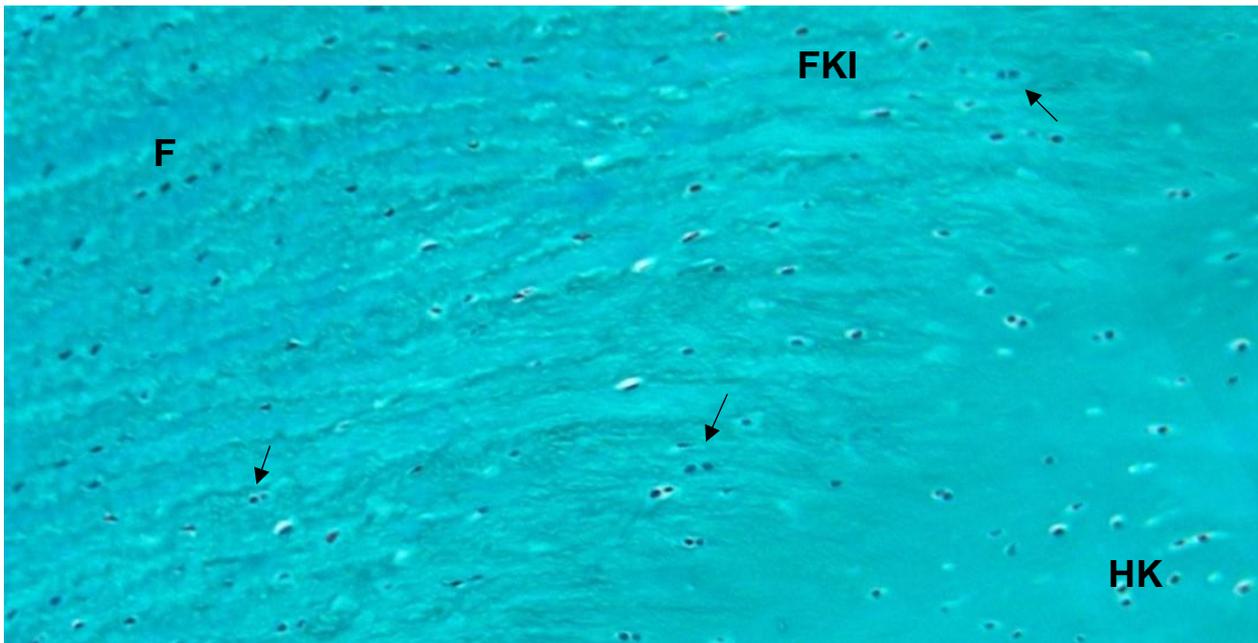
In der Tiefe der Patella entwickelt sich bereits ein Ossifikationszentrum (OZ). Der hyaline Knorpel überwiegt jedoch noch bei weitem. Sowohl an der medialen Kante als auch an der Vorderseite der Patella besteht noch ein erheblicher Abstand zwischen Knochen und Oberfläche.



**Abbildung 53: Rechtsseitige patellare MPFL-Insertion des 7-jährigen Jungen, ca. x230**

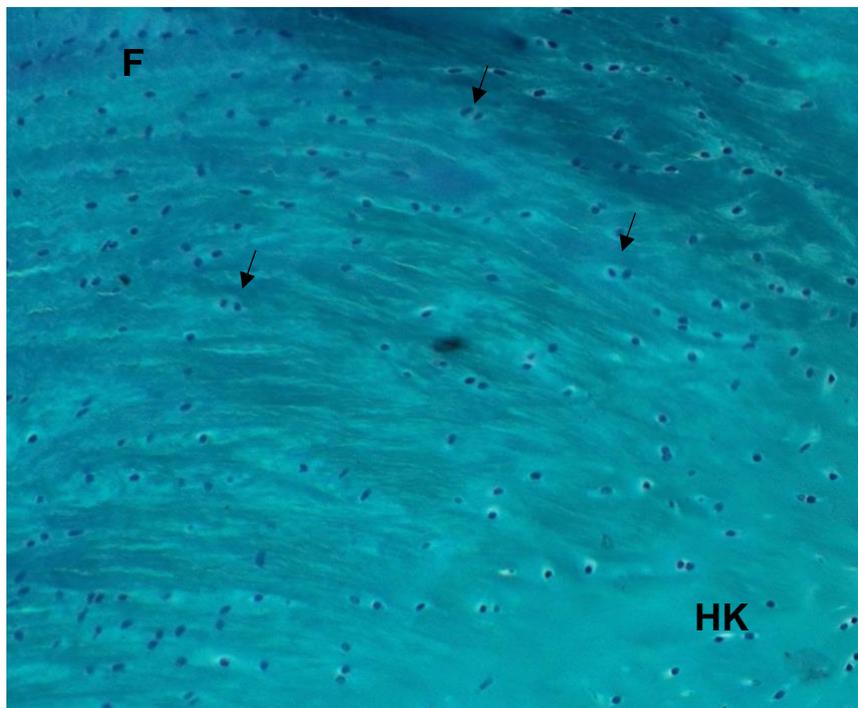
Dargestellt ist der sich entwickelnde fibrocartilaginäre Insertionsbereich (FKI). MPFL und der hyaline Knorpel (HK) der Patella sind scharf voneinander abgegrenzt. Nur in einem schmalen Übergangsbereich sind vermehrt Faserknorpelzellen (Pfeile als Beispiele) vorhanden. Diese unterscheiden sich von den Fibroblasten des Bandes durch einen den Zellkern umgebenden Knorpelhof sowie teils durch die Bildung mehrzelliger Chondrone. Ihre Größe unterscheidet sich hier nicht wesentlich von der der Fibroblasten. Eine wesentlich abgrenzbare Faserknorpelschicht lässt sich lichtmikroskopisch nicht sicher identifizieren. Die kollagenäre Strukturbeschaffenheit im hier abgebildeten Bandverlauf unterscheidet sich lichtmikroskopisch nicht erheblich von der an der FKI.

Anders als bei den meisten weiteren Präparaten wiesen die oberflächlichen und tiefen Abschnitte der FKI beim 7-jährigen Jungen rechtsseitig im direkten Vergleich zueinander keine relevanten Unterschiede hinsichtlich der strukturellen Ausprägung und Ausrichtung auf.



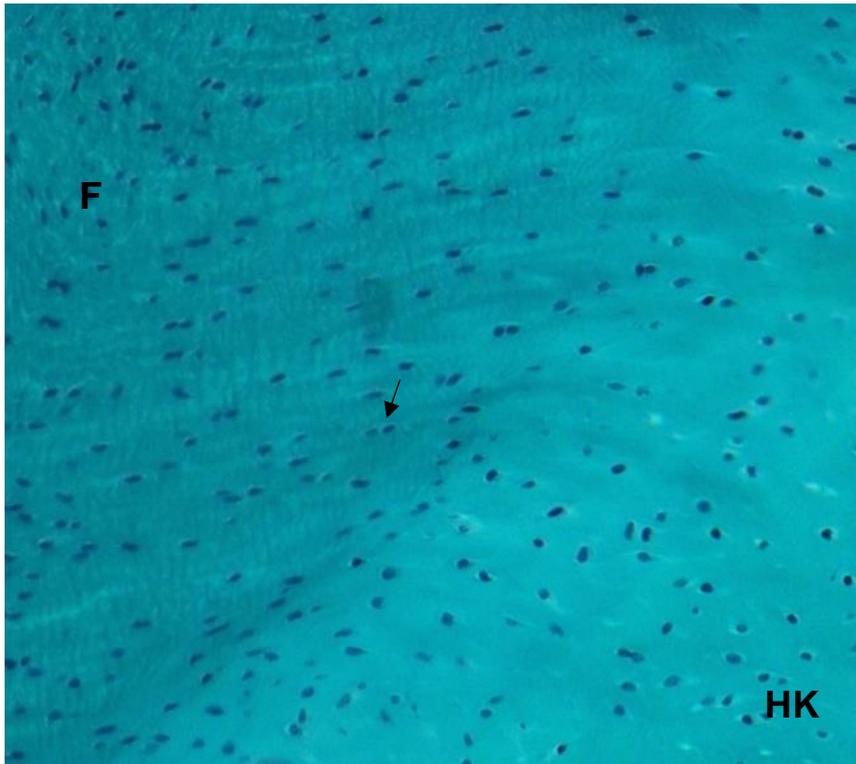
**Abbildung 54: Linksseitige patellare MPFL-Insertion des 7-jährigen Jungen, ca. x200**

Es lassen sich lichtmikroskopisch nur vereinzelte Faserknorpelzellen (Pfeile als Beispiele) im sich entwickelnden fibrokartilaginären Insertionsbereich (FKI) sicher identifizieren. Am rechten Bildrand ist der hyaline Knorpel (HK) der Patella zu sehen, am linken die Fibroblasten (F) des MPFLs. Die Kollagenfasern erscheinen im Insertionsbereich relativ fein, ihre Grenze zum hyalinen Knorpel ist eben. Insgesamt unterscheiden sich Bandverlauf und Insertionsbereich hinsichtlich der Kollagenstruktur nicht wesentlich voneinander.



**Abbildung 55: Linksseitige patellare MPFL-Insertion beim 8-jährigen Jungen, oberflächlicher fibrokartilaginärer Insertionsbereich, ca. x185**

Oberflächlich, also unmittelbar unterhalb des sich entwickelnden periostal-fibrösen Ansatzbereichs, sind am Übergang zwischen den Fibroblasten (F) des Bandes und dem hyalinen Knorpel (HK) bereits einige Faserknorpelzellen (Pfeile als Beispiele) sichtbar. Teils befinden sich diese auch schon in einem gewissen Abstand zum hyalinen Knorpel.

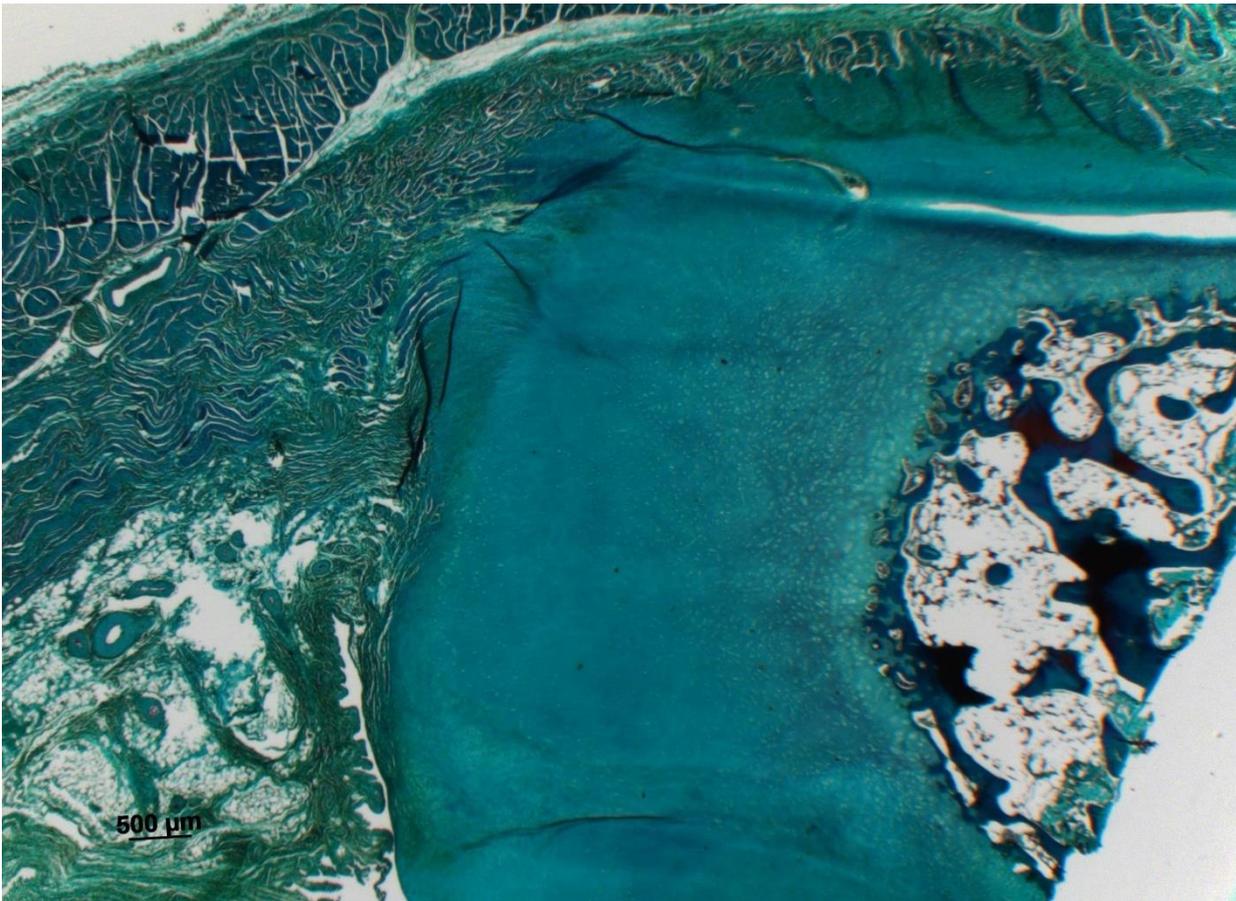


**Abbildung 56: Linksseitige patellare MPFL-Insertion des 8-jährigen Jungen, profunder fibrocartilaginärer Insertionsbereich, ca. x225**

Im Gegensatz zu Abb. 55 wirkt die Kollagenstruktur in den tieferen Schichten des fibrocartilaginären Insertionsbereichs beim gleichen Präparat strukturell noch feiner. Es sind weniger Faserknorpelzellen (Pfeil als Beispiel) sichtbar.

Beim 9-Jährigen war die patellare Ossifikation weiter fortgeschritten (Abb. 57).

Das Ossifikationszentrum erschien im Vergleich zum 7-Jährigen erheblich größer. Der Anteil des hyalinen Knorpels im Präparat hatte zu Gunsten des Ossifikationszentrums abgenommen. Trotzdem bestand weiterhin nach medial und zur Patellavorderseite hin eine kräftige hyaline Knorpelschicht.

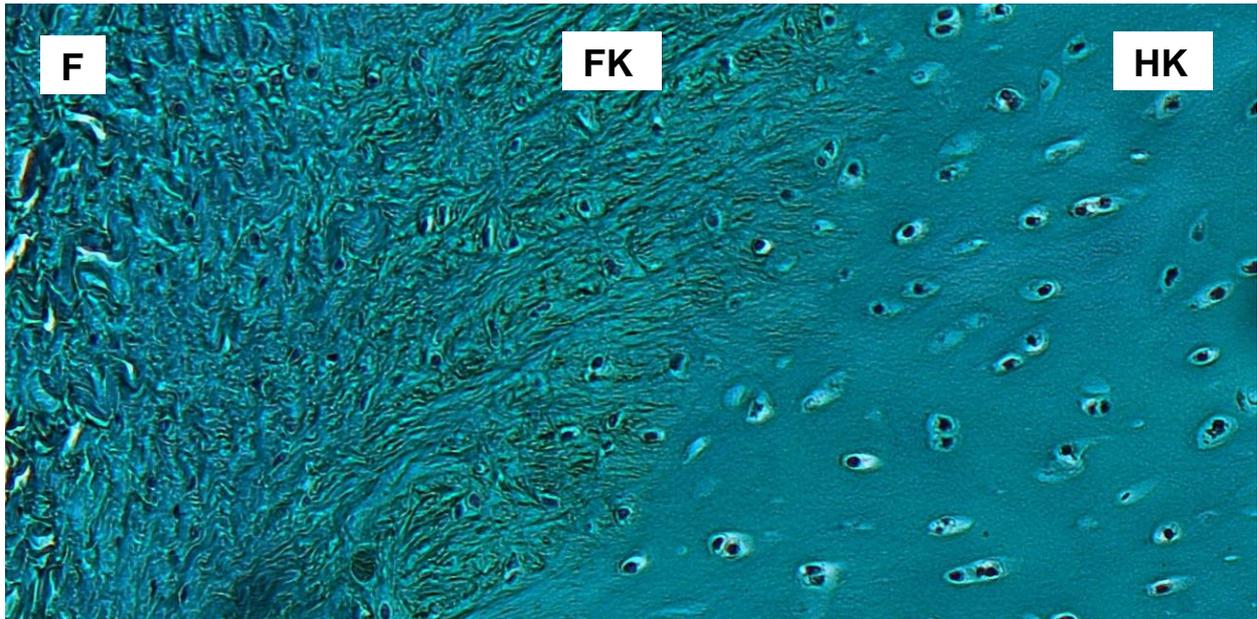


**Abbildung 57: Rechtsseitige mediale Patellakante des 9-jährigen Jungen, ca. x15**

Der Anteil des hyalinen Knorpels nimmt zu Gunsten des Ossifikationszentrums ab. Der Abstand zwischen Ossifikationszentrum und Patellaoberfläche ist insbesondere an der medialen Kante, jedoch auch an der Vorderseite noch erheblich.

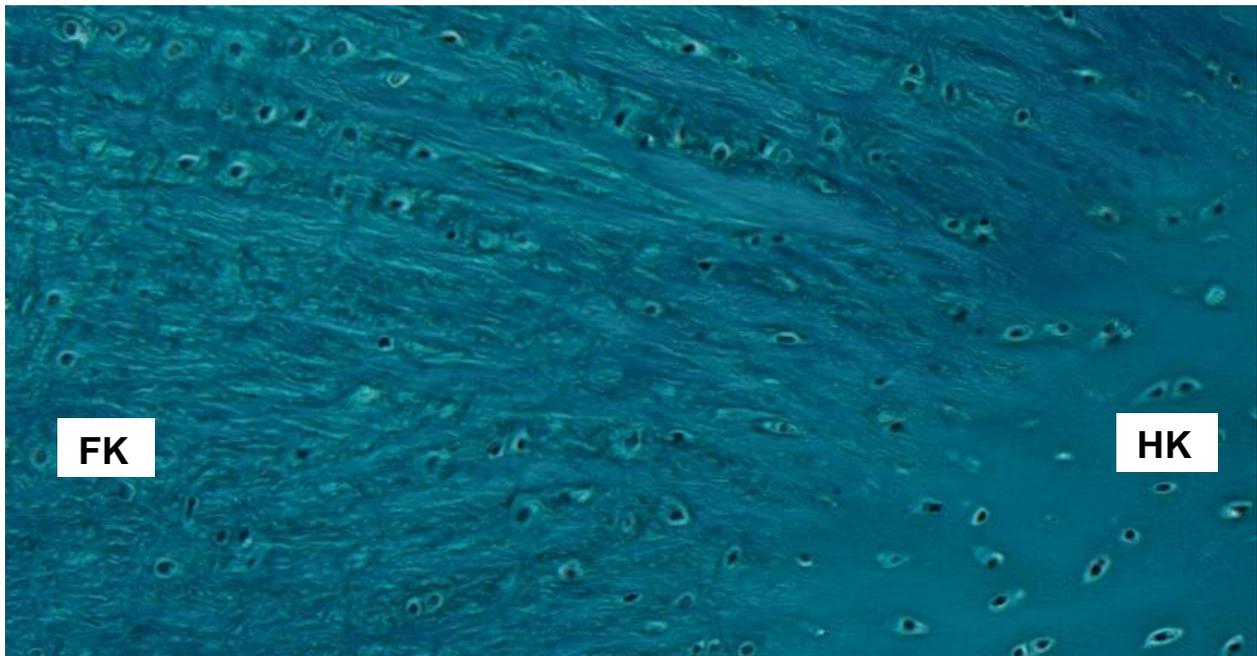
Die oberflächlichen Bandanteile inserierten weiterhin im präpatellaren Perichondrium (Abb. 57).

An der FKI hatte sich eine nun gut abgrenzbare Faserknorpelschicht ausgebildet, welche ebenfalls in ihrem oberflächlichen Abschnitt kräftiger ausgeprägt erschien als in der Tiefe (Abb. 49, 58, 59). Die Chondrone des Faserknorpels und auch des angrenzenden hyalinen Knorpels hatten an Größe sichtbar zugenommen (Abb. 53, 54, 58, 59).



**Abbildung 58: Rechtsseitiger fibrocartilaginärer MPFL-Insertionsbereich, profunder Anteil, beim 9-jährigen Jungen, ca. x240**

Zwischen den Fibroblasten (F) des MPFLs und dem hyalinen Knorpel (HK) hat sich eine nun gut sichtbare Schicht aus Faserknorpel (FK) entwickelt, die in dem hier abgebildeten tiefen Insertionsanteil noch verhältnismäßig schwächer ausgeprägt ist. Die Chondrone des FK und des angrenzenden HK haben an Größe zugenommen.



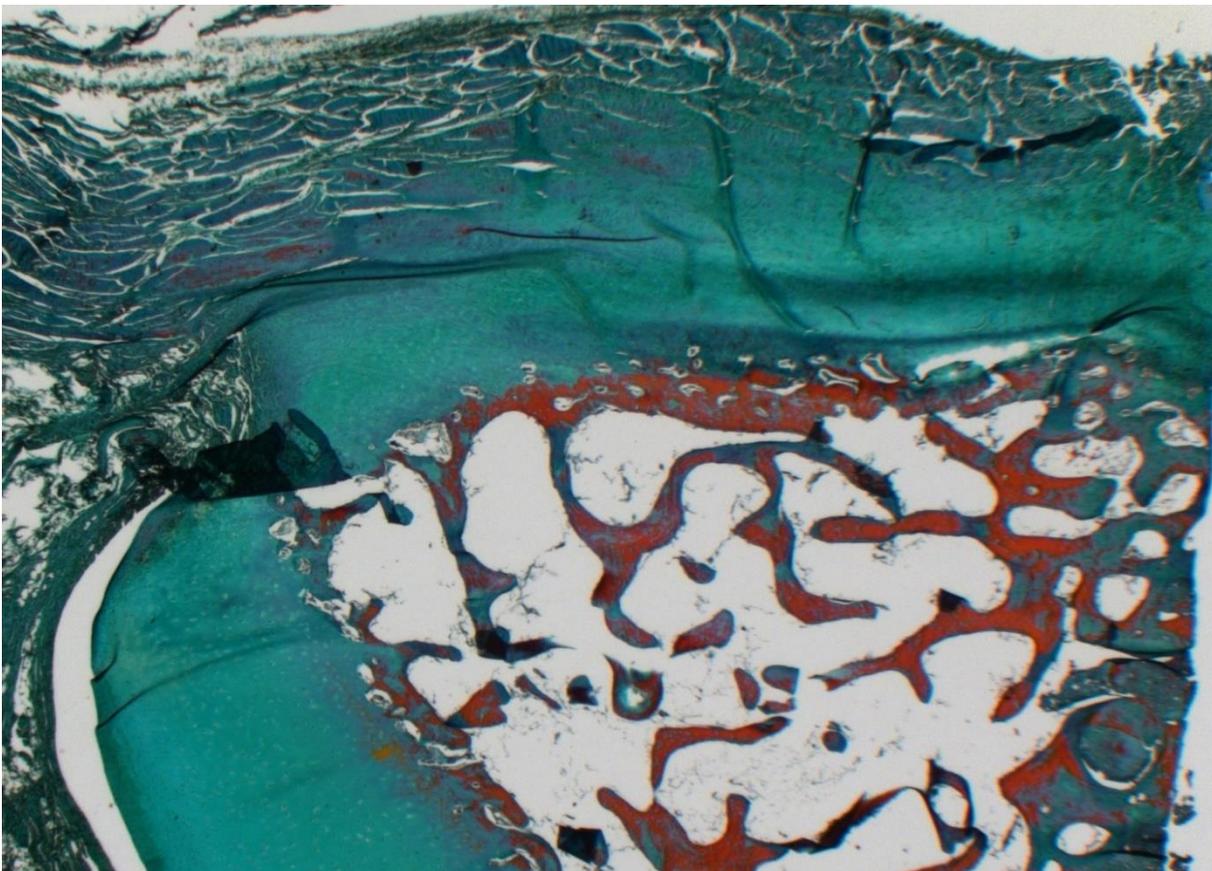
**Abbildung 59: Rechtsseitiger fibrocartilaginärer MPFL-Insertionsbereich, oberflächlicher Anteil, beim 9-jährigen Jungen, ca. x240**

Auch beim 9-jährigen Jungen erscheint der fibrocartilaginäre Insertionsbereich an seiner Oberfläche kräftiger ausgeprägt. Hier ist die Faserknorpelschicht (FK) am Übergang zum hyalinen Knorpel (HK) bereits besonders prägnant.

Beim 12-jährigen Mädchen hatte sich das Ossifikationszentrum bis weit in Richtung der Patellavorderseite und der medialen Patellakante vergrößert. Es trennte nun Patellavorder- und rückseite sichtbar voneinander (Abb. 60).

Hyaliner Knorpel war in erster Linie nur noch an und teils auch nahe der retropatellaren Gelenkfläche sichtbar, der präpatellare Weichteilmantel entsprach somit nun einem Periost (Abb. 60-63).

Der bereits entstandene Knochen wies größtenteils eine Trabekelstruktur auf. Insbesondere an der Patellavorderseite zeigte sich jedoch nun auch eine etwas prägnantere kompakte Oberfläche als Hinweis auf eine sich entwickelnde Kortikalis, die sich allerdings in Richtung medialer Patellakante nicht mehr eindeutig nachvollziehen ließ (Abb. 60).



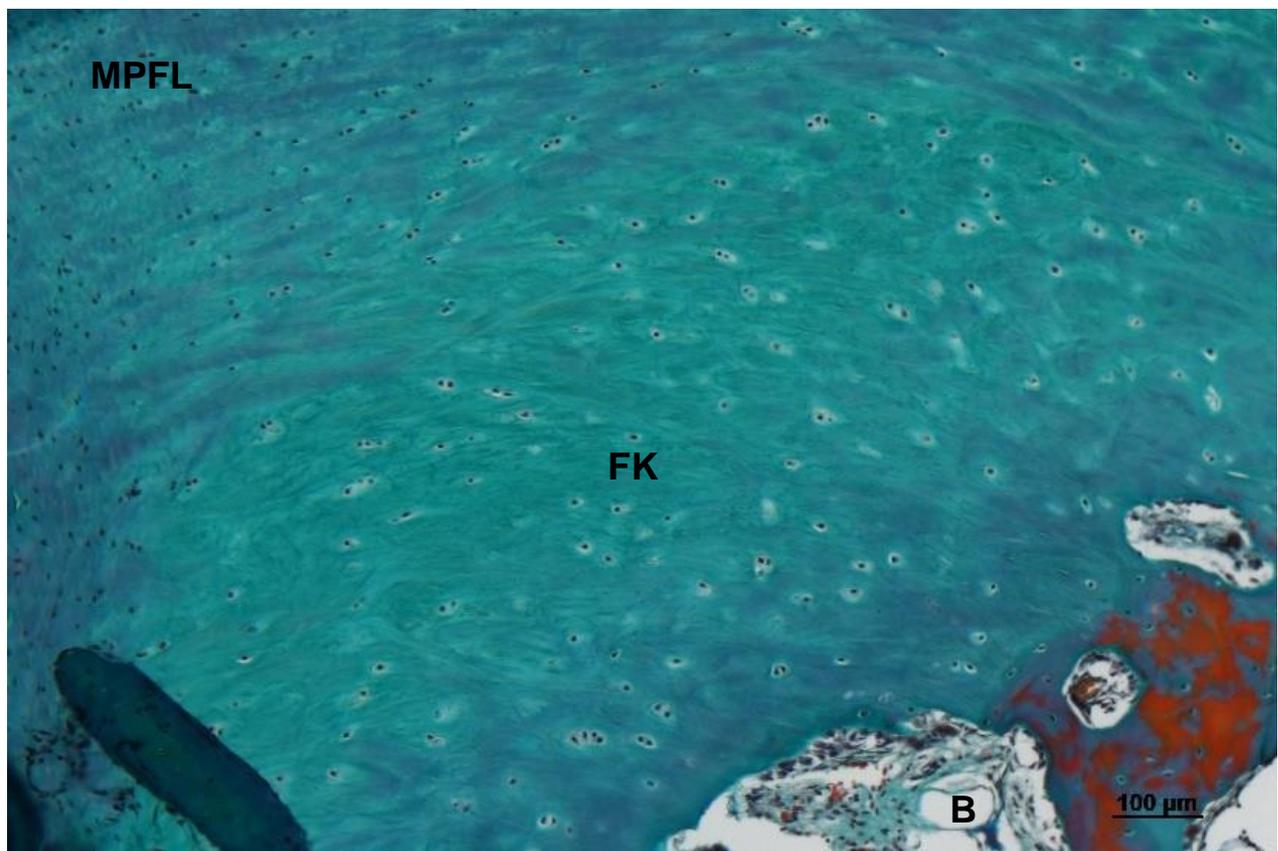
**Abbildung 60: Rechtsseitige mediale Patella des 12-jährigen Mädchens, ca. x20**

Das Ossifikationszentrum ist bis weit zur Patellaoberfläche hin vorgedrungen und grenzt Patellavorder- und rückseite nun deutlich voneinander ab. Bereits auf dieser Übersichtsaufnahme ist zu erahnen, dass hyaliner Knorpel hier in erster Linie nur noch im Bereich der retropatellaren Gelenkfläche existiert. Die Patellavorderseite wird nun von einem kräftigen Periost bedeckt. Der bereits entstandene Knochen weist größtenteils eine Trabekelstruktur auf, an der Vorderseite scheint sich jedoch auch eine dünne Kortikalis zu bilden, die sich in Richtung medialer Patellakante nicht mehr eindeutig nachvollziehen lässt.

Wie bei den jüngeren Präparaten wies das MPFL weiterhin zwei abgrenzbare Insertionsbereiche auf. Die oberflächlichen Anteile des Bandes inserierten in das nun entstandene Periost (Abb. 60, 63).

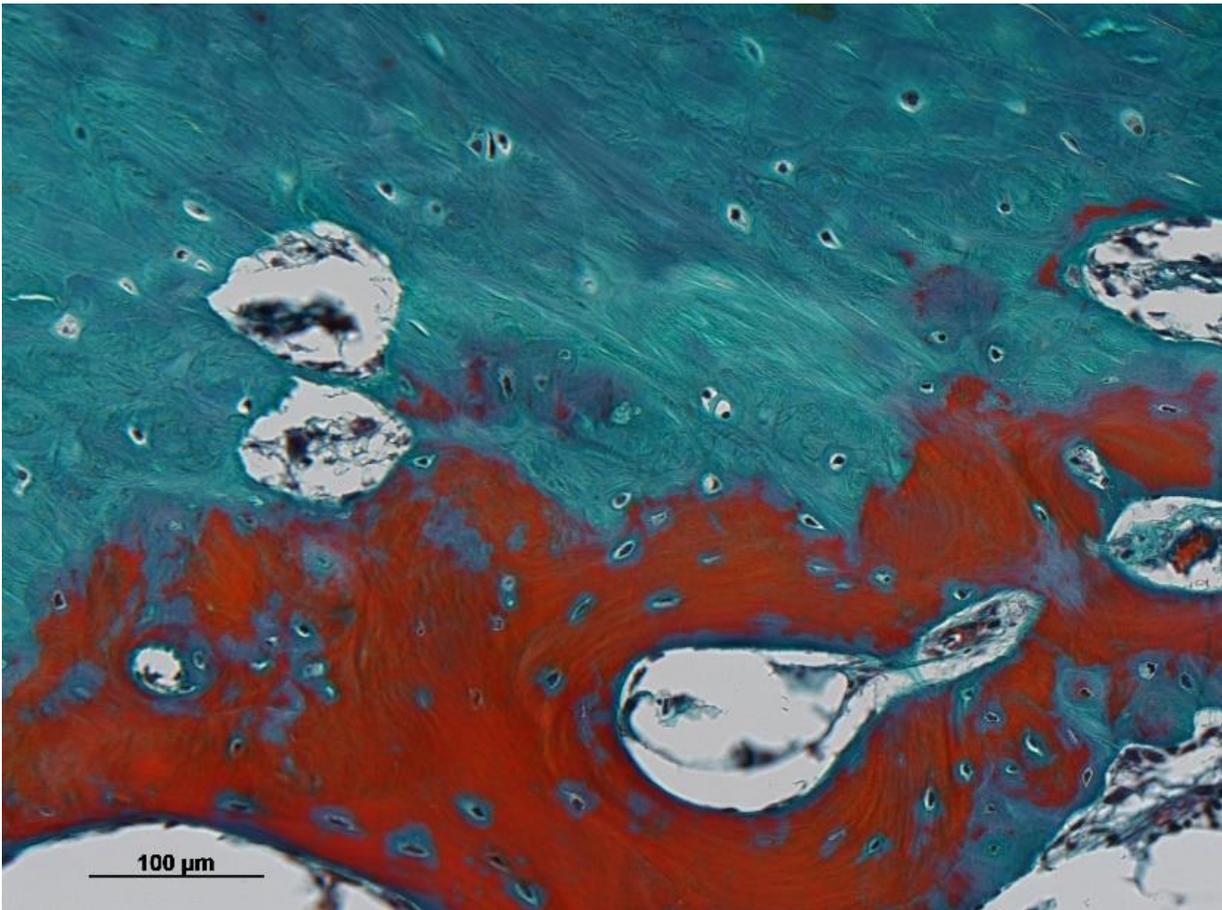
Die Faserknorpelschicht der FKI hatte erheblich an Durchmesser zugenommen und war nun an beiden Kniegelenken zu großen Teilen direkt in der medialen Vorderseite des patellaren Knochens verankert (Abb. 60-63). Qualitativ zeigte sich somit abgesehen von der noch nicht voll ausgebildeten Kortikalis die Schichtung einer ausgereiften FKI.

Insgesamt wies die Insertion weiterhin eine bogige, auf das Patellazentrum zulaufende Struktur auf (Abb. 61). Die Zelldichte des Faserknorpels hatte verglichen zum 9-jährigen Jungen weiter ab- und der Anteil sichtbarer Kollagenfaserstränge zwischen den Faserknorpelzellen zugenommen (Abb. 58, 59, 61, 62).



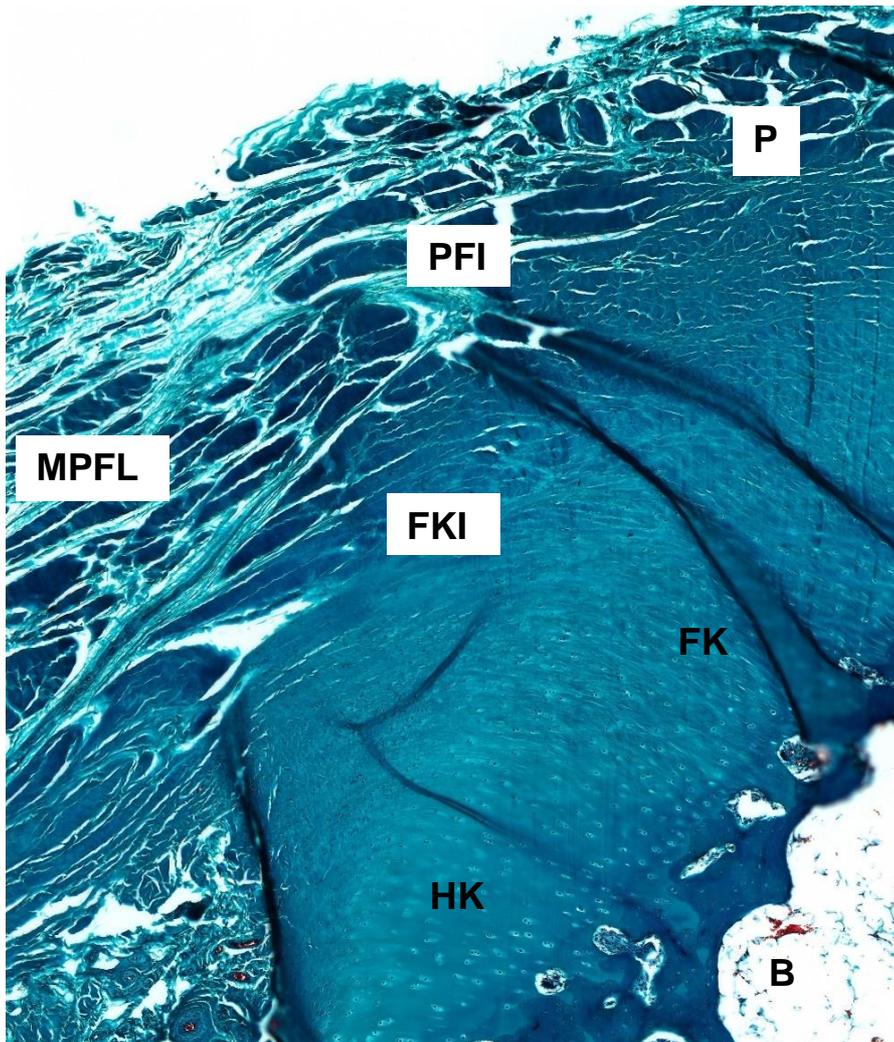
**Abbildung 61: Rechtsseitiger fibrocartilaginärer MPFL-Insertionsbereich des 12-jährigen Mädchens, ca. x120**

Die Ausläufer des Bandes mit seinen Fibroblasten setzen sich über eine nun kräftige Schicht aus Faserknorpel (FK) direkt bis zum Knochen (B) fort. Eine durchgehende Kortikalis ist im Bereich der medialen Patellakante noch nicht sichtbar, ansonsten entspricht die Schichtung einer ausgereiften fibrocartilaginären Insertion. Hyaliner Knorpel zeigt sich nicht mehr. Die bogenförmige Insertionsstruktur ist weiterhin vorhanden. Der Kollagenanteil im FK hat zu-, die Zelldichte abgenommen.



**Abbildung 62: Rechtsseitiger fibrokartilaginärer MPFL-Insertionsbereich des 12-jährigen Mädchens, ca. x240**

Der Insertionsfaserknorpel grenzt nun direkt an den Knochen. Die Zelldichte hat im Vergleich zum Faserknorpel beim 9-jährigen abgenommen. Zwischen den Zellen liegen nun reichlich Kollagenstränge.



**Abbildung 63: Linksseitige patellare MPFL-Insertion des 12-jährigen Mädchens, ca. x50**

Während der oberflächliche Anteil des MPFLs (PFI) seitlich in das Periost (P) einstrahlt, sind die tieferen Anteile (FKI) über eine kräftige Faserknorpelschicht (FK) nun direkt im Knochen (B) verankert. Nahe der retropatellaren Gelenkfläche ist noch hyaliner Knorpel (HK) sichtbar.

## **4.2.3 Die femorale MPFL-Insertion**

### **4.2.3.1 Histologischer Aufbau der Insertion und ihrer Umgebung**

Grundsätzlich wies die femorale Insertion eine erhebliche Variabilität hinsichtlich ihres Ausprägungsgrades auf. Insbesondere bei den älteren Kindern erschien sie nur fein (Abb. 68), bei den jüngeren hingegen teilweise erheblich kräftiger (Abb. 66).

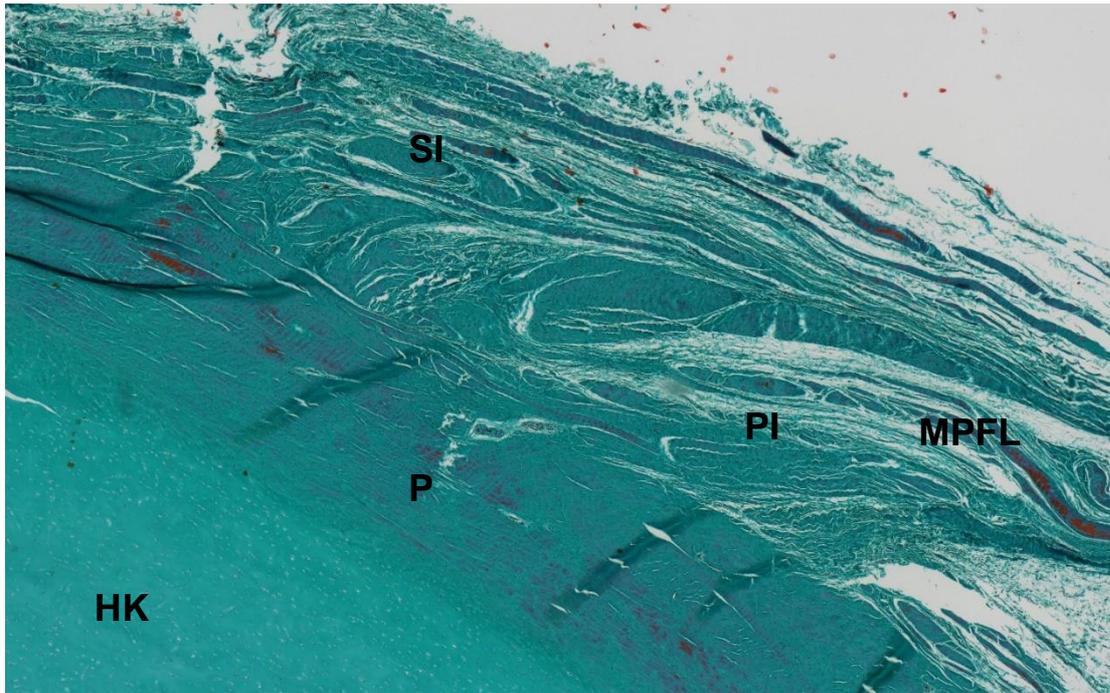
An der Oberfläche der femoralen Knochenanlage befand sich auf allen Präparaten eine durchgehende Schicht aus Perichondrium bzw. Periost. Das Band inserierte in dieser Schicht und nicht direkt an der femoralen Knochenanlage. Es zeigte sich somit die Entwicklung einer PFI (Abb. 64-66, 68).

Von den 6 hinsichtlich ihrer femoralen Insertion auswertbaren Präparaten konnte bei 5 folgender Aufbau beobachtet werden:

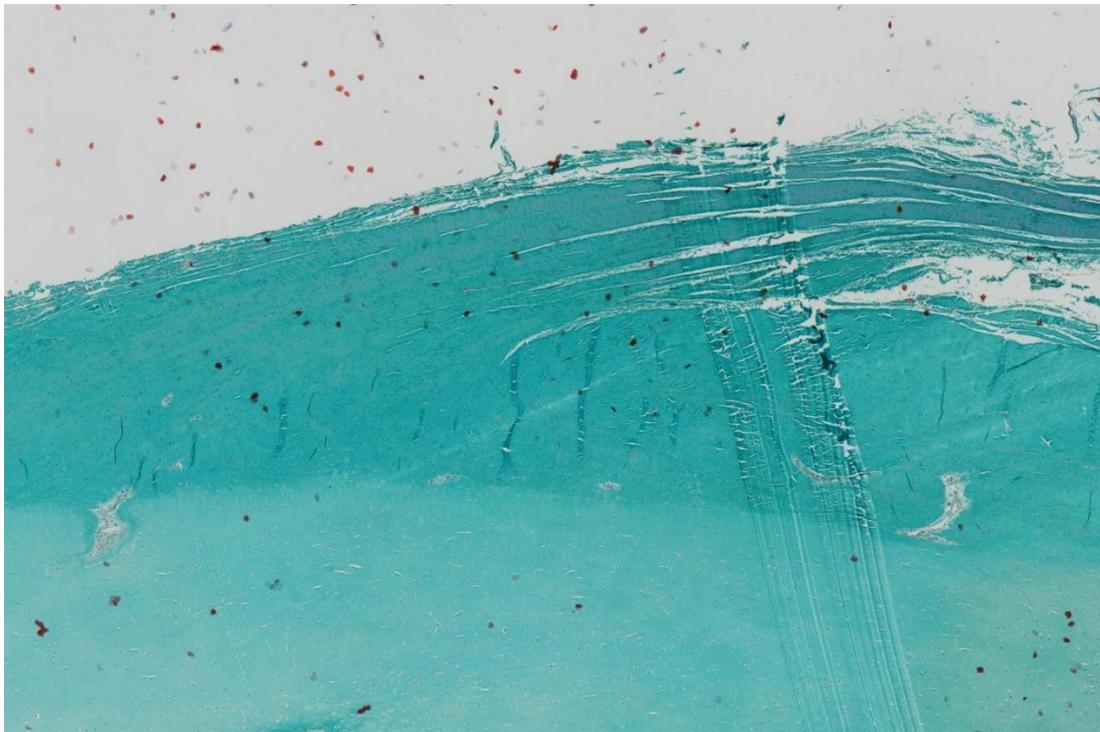
Das MPFL zog von ventrolateral in Richtung Femur. Seine oberflächlichsten Schichten legten sich tangential an den perioossären Weichteilmantel an und verliefen mit diesem weiter nach dorsal. Die tiefer gelegenen Schichten strahlten lokal unmittelbar im Ansatzbereich in den Weichteilmantel ein (Abb. 64, 65).

Am linksseitigen Präparat des 5-jährigen Jungen konnten sich tangential anlegende, oberflächliche Insertionsanteile aufgrund lokaler Artefakte im sonst gut erhaltenen Gewebeschnitt nicht sicher identifizieren lassen.

Keines der Präparate wies im Bereich der femoralen MPFL-Insertion relevante Mengen an Faserknorpelzellen auf.



**Abbildung 64: Rechtsseitige femorale MPFL-Insertion des 8-jährigen Jungen, ca. x30**  
 Die superficialen Insertionsanteile des MPFLs (SI) legen sich nach dorsal tangential dem Perichondrium (P) an. Die profunden (PI) strahlen im eigentlichen Insertionsbereich lokal ein. Der hyaline Knorpel (HK) der Knochenanlage ist ebenfalls angeschnitten.



**Abbildung 65: Rechtsseitige femorale MPFL-Insertion des jüngsten Kindes, ca. x30**  
 Auch hier legen sich die oberflächlichen Bandanteile tangential an das Perichondrium an, die tiefer gelegenen strahlen hingegen eher lokal im Ansatzbereich ein.

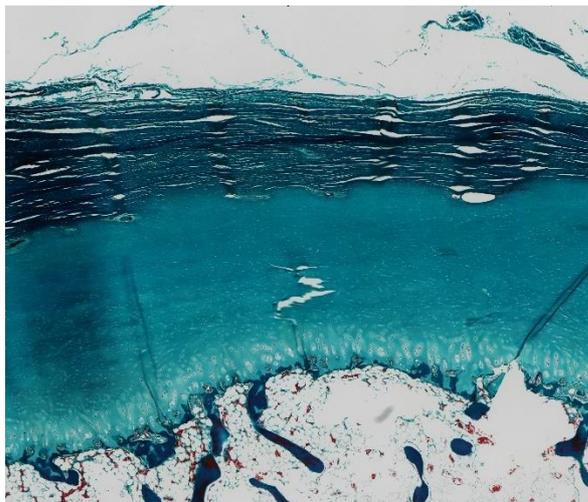
#### 4.2.3.2 Die Entwicklung der femoralen MPFL-Insertion

Femoral war bereits beim linksseitigen Präparat des 5-Jährigen das Ossifikationszentrum sichtbar (Abb. 66). Auch beim rechtsseitigen Präparat des 9-jährigen Jungen zeigte sich im Bereich der femoralen Insertion, die nach der histologischen Einbettung nahezu vollständig degeneriert erschien, eine kaum dünner gewordene Schicht an hyalinem Knorpel (Abb. 67). Wie patellar waren beim 12-jährigen Mädchen auch femoral im Insertionsbereich keine relevanten Mengen hyalinen Knorpels mehr sichtbar (Abb. 68, 69). Der entstandene Knochen wies eine Trabekelstruktur auf, eine prägnantere kompakte Knochenoberfläche ließ sich noch nicht nachvollziehen (Abb. 68, 69).



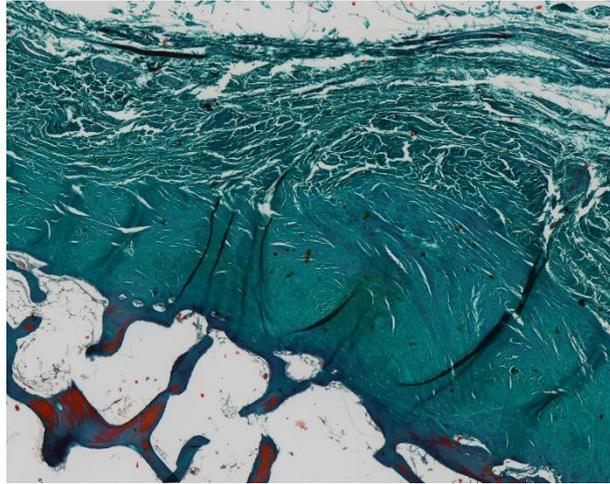
**Abbildung 66: Linksseitige femorale MPFL-Insertion des 5-jährigen Jungen, ca. x10**

Es zeigt sich noch eine kräftige Schicht aus hyalinem Knorpel zwischen femoraler Insertion und Ossifikationszentrum.

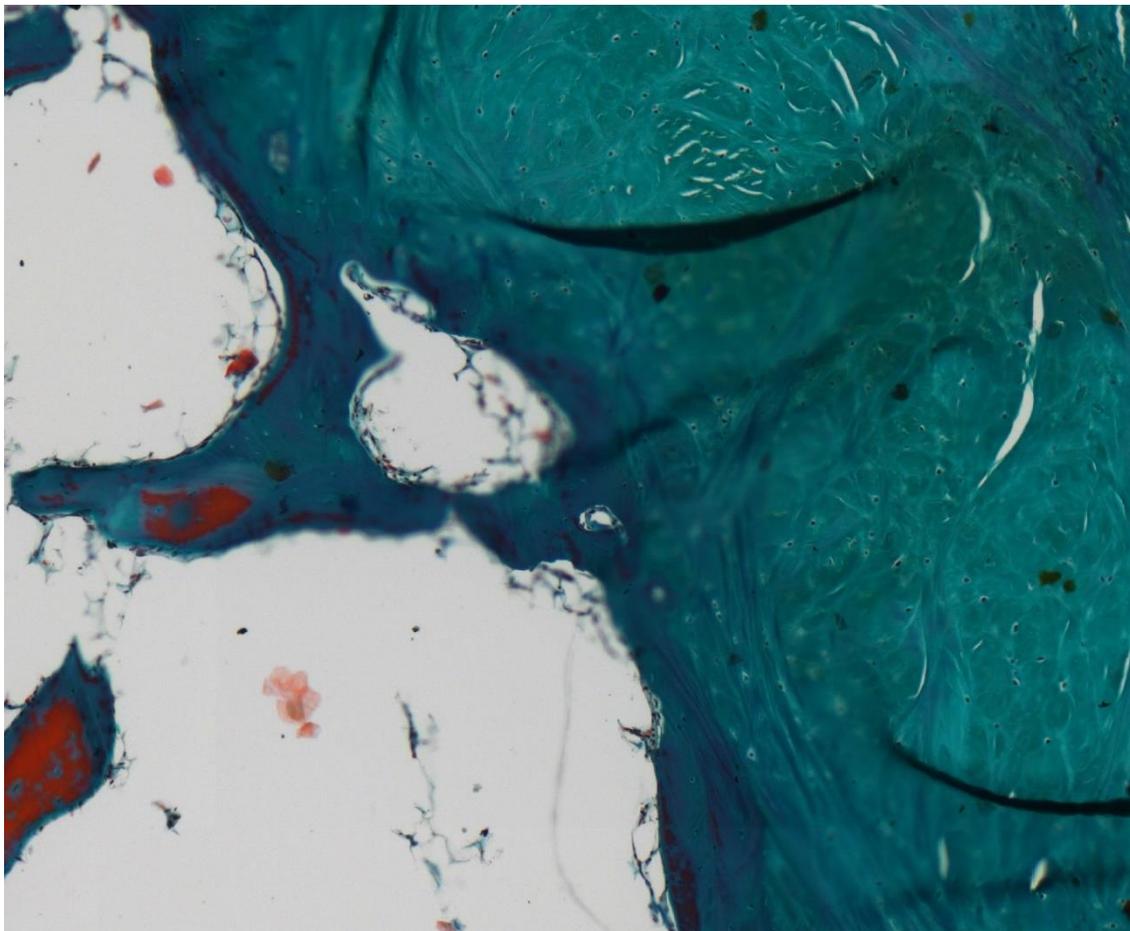


**Abbildung 67: Rechtsseitige femorale MPFL-Insertion des 9-jährigen Jungen, ca. x15**

Die eigentliche Insertion ist hier nach der histologischen Einbettung so gut wie vollständig degeneriert. Die hyaline Knorpelschicht hat in ihrem Durchmesser verglichen mit der des 5-jährigen Jungen nur leicht abgenommen.



**Abbildung 68: Rechtsseitige femorale MPFL-Insertion des 12-jährigen Mädchens, ca. x15**  
 Hyaliner Knorpel ist im Insertionsbereich nicht mehr vorhanden. Der Bandansatz steht in direktem Kontakt zum Ossifikationszentrum.



**Abbildung 69: Rechtsseitige femorale MPFL- Insertion des 12-jährigen Mädchens, ca. x100**  
 Das straffe kollagene Bindegewebe des perioossären Weichteilmantels grenzt nun im Insertionsbereich direkt an den Knochen, der noch keine relevante kompakte Oberfläche aufweist.

## **5. Diskussion**

### **5.1 Histologie**

#### **5.1.1 Ergebniszusammenfassung**

Patellar wurde an 8 auswertbaren Präparaten der Aufbau und die Entwicklung der hauptsächlich fibrocartilaginären MPFL-Insertion bis zum 13. Lebensjahr dokumentiert. Der oberflächliche Ansatzbereich entwickelte sich periostal-fibrös.

Bei dem mit 9 Jahren zweitältesten Kind sowie allen jüngeren wies die Patella im gesamten Insertionsbereich noch hyalinen Knorpel auf. Bei dem 12-jährigen Mädchen war die Ossifikation erheblich vorangeschritten, die Insertionsfasernknorpelschicht hatte vielfach an Durchmesser gewonnen und stand nun in direktem Kontakt zum Knochen.

Femoral zeigten 6 auswertbare Präparate die Entwicklung einer rein periostal-fibrösen Insertion. Wie patellar wurde der hyaline Knorpel des Prämordialskeletts von der Tiefe zunehmend knöchern erodiert und war bei dem 12-jährigen Mädchen im Insertionsbereich vollständig verschwunden.

#### **5.1.2 Aufbau der MPFL-Insertionen unter Berücksichtigung bekannter histologischer und biomechanischer Aspekte**

Nach aktueller Kenntnis beschreibt diese Arbeit erstmals histologisch den Aufbau der patellaren und die Entwicklung beider MPFL-Insertionen.

Neben neuen Erkenntnissen zur Insertionshistologie trägt sie zum Verständnis verschiedener MPFL-Verletzungstypen und ihrer Abhängigkeit vom Entwicklungsstand bei.

##### **1. Die patellare Insertion**

Es ist bekannt, dass eine FKI an ihrer Oberfläche typischerweise rein fibröse Anteile aufweist <sup>108,134</sup>. Auch wenn der oberflächliche periostal-fibröse Anteil der patellaren MPFL-Insertion weniger kräftig als die tiefer gelegene FKI erschien, so hatte er doch eine Größe, die eigenständig erwähnt werden sollte.

Grundsätzlich wird einer ausgereiften FKI große biomechanische Belastbarkeit zugesprochen. So übernimmt am humanen VKB das fibrocartilaginäre proximale

Zentrum der femoralen Insertion 66 % bis 84 % des Widerstandes entgegen einer Tibiaventralisierung, der fibröse hintere Anteil hingegen nur 11 % bis 15 %<sup>135,136</sup>.

Wie bereits beschrieben wird die Entwicklung einer FKI hauptsächlich mit Kompressionskräften im ansatznahen Gewebe, die bspw. aus Biegebelastungen resultieren, in Zusammenhang gebracht<sup>103,107,111,114,115</sup>. Sie bewirken die Ausbildung chondrogener Merkmale wie z. B. einer Hochregulation des Transkriptionsfaktors Sox9<sup>114,115</sup>.

Allgemein gelten dabei die Annahmen, dass die von Schicht zu Schicht abnehmende Gewebeelastizität der FKI auf diese Weise vor punktuellen Stresskonzentrationen am Übergang vom Hart- zum Weichteilgewebe schützt und der Schichtdurchmesser des Insertionsfaserknorpels positiv mit der auf den Ansatz wirkenden Biegebelastung bzw. Bewegung korreliert<sup>103,107,109,113,134</sup>.

Der gezeigte patellare MPFL-Insertionsaufbau erscheint in Hinblick auf die zu erwartende biomechanische Belastung schlüssig:

Der Bandverlauf von mediodorsal in Richtung medialer Patellakante lässt eine Biegebelastung erwarten. Die beobachtete bogenförmige Strukturausrichtung an der FKI sollte ein histologisches Korrelat zu dieser darstellen (Abb. 46, 49).

Die strukturelle Beugung an der FKI schien zudem zur Oberfläche hin zuzunehmen. Entsprechend der hiermit zu erwartenden größeren Biegebelastung wirkte auch der Faserknorpel oberflächlich kräftiger ausgeprägt (Abb. 49).

Die PFI sollte aufgrund ihres Ansatzes am perioossären Weichteilmantel hingegen naturgemäß keiner erheblichen Biegebelastung ausgesetzt sein.

Nebenbefundlich wiesen mehrere Präparate oberflächlich zum MPFL zusätzliche prägnant ausgeprägte straffe Bindegewebskomponenten auf (Abb. 44). Sie könnten Verbindungen darstellen, die patellanah zwischen dem proximalen MPFL und dem Vastus medialis obliquus bzw. dem Vastus intermedius beschrieben wurden<sup>9,39</sup>.

Auch bei den Präparaten des 12 Jahre alten Mädchens ist nicht von einem Abschluss der Insertionsentwicklung auszugehen.

Perichondrium bzw. Periost ist bei Heranwachsenden grundsätzlich noch erheblich kräftiger ausgeprägt<sup>112,121</sup>.

Im Zusammenhang mit seiner Rückbildung beschrieben histologische Tierstudien auch Umstrukturierungen ligamentärer Insertionen. So kann sowohl die fibrocartilaginäre femorale als auch die ossär-fibröse tibiale Insertion des MCLs in der Entwicklung zunächst im Perichondrium inserieren <sup>106,112</sup>.

Es lässt sich anhand der untersuchten Präparate weder abschließend beurteilen in welchem Größenverhältnis die beiden patellaren Insertionsanteile des MPFLs bei Erwachsenen zueinander stehen, noch, ob die PFI in ihrer hier gezeigten Form überhaupt fortbesteht. Dass ihr relativer Anteil gemessen an der Gesamtgröße der patellaren MPFL-Insertion weiter zunimmt, ist hingegen nicht zu erwarten <sup>106,112,121</sup>.

## 2. Die femorale Insertion

Die femoral beobachtete Entwicklung einer PFI ist mit den Beschreibungen von Inoue et al. vereinbar, die Hämatoxylin-Eosin-gefärbte Gewebedünnschnitte von 2 akuten femoralen MPFL-Avulsionsrupturen untersuchten <sup>95</sup>.

Sie unterschieden einen lamellären oberflächlichen von einem tiefen Insertionsanteil. Letzterer stellte jeweils den hauptsächlichen Schädigungsort dar. Die Existenz von Faserknorpel oder prägnanten Kollagenstrukturen beschrieben sie nicht. Trotz des Fehlens spezifischer Angaben ist somit am ehesten vom Vorliegen einer PFI auszugehen <sup>95,108</sup>.

Diese Insertionsart wird in der Literatur als prädisponierende Schwachstelle eines Bandes beschrieben <sup>104–106,108</sup>.

### **5.1.3 Die Insertionsentwicklung in Relation zu bekannten histologischen und biomechanischen Aspekten**

Wie beschrieben nimmt die ligamentäre Stabilität während der Entwicklung progredient zu und wird dabei insbesondere durch die Insertionsausreifung erheblich beeinflusst <sup>102–106</sup>.

Es erscheint schlüssig, dass hyaliner Knorpel, der sich strukturell erheblich vom Faserknorpel unterscheidet, eine Schwachstelle an einer durch Biegebelastung beanspruchten FKI darstellt <sup>103,107,109,118</sup>.

Rattenstudien an der femoralen FKI des MCLs zeigten, dass die vollständige Erosion des hyalinen Knorpels im Ansatzbereich zu einem Zeitpunkt auftritt, an dem das Band erheblich an Kraft gewinnt <sup>102,103</sup>.

Bei heranwachsenden Kaninchen stellt die periostal-fibröse tibiale Insertion den häufigsten ligamentären Läsionsort dar. Sie reift während der Entwicklung zu einer ossär-fibrösen Insertion aus. Rupturen treten dann typischerweise im Bandverlauf auf <sup>104-106,108</sup>.

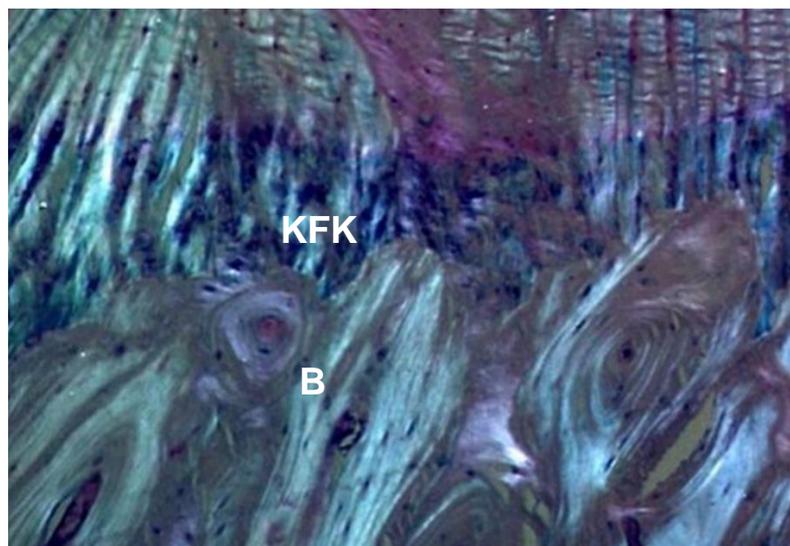
In dieser Arbeit grenzte der Faserknorpel der patellaren FKI bei dem 12-jährigen Mädchen direkt an den Knochen. Trotzdem ist bei ihm nicht von einer abgeschlossenen Insertionsentwicklung auszugehen.

Auch Insertionsfaserknorpel wird während der Entwicklung zunächst von der Tiefe durch den Knochenkern erodiert und auf der Bandseite aufgrund zunehmender Kompressionsbelastung des ansatznahen Bandgewebes neu gebildet <sup>103,114,115</sup>.

An einer ausgereiften FKI besteht zwischen kalzifiziertem Knorpel und der Kortikalis eine regelrechte Verzahnung (Abb. 70), der eine besondere Rolle hinsichtlich der Insertionsfestigkeit zugesprochen wird <sup>113,116,135,136</sup>.

Ab einem Alter von 10 Jahren entwickelt sich an der Patella eine dünne Kortikalis <sup>121</sup>.

Passend hierzu wies die Vorderseite der Patella beim 12-jährigen Mädchen anders als die jüngeren Kinder schon eine zu größeren Teilen durchgehende kompakte Oberfläche auf, deren Verlauf sich Richtung medialer Patellakante jedoch zunehmend schlechter nachvollziehen ließ (Abb. 57, 60, 61). Eine relevante strukturelle Verzahnung zwischen Insertionsfaserknorpel und Knochen war noch nicht sichtbar (Abb. 60-63).



**Abbildung 70: Polarisierte lichtmikroskopische Aufnahme einer reifen fibrocartilaginären Insertion**  
Der kalzifizierte Insertionsfaserknorpel (KFK) ist mit der Kortikalis des darunter gelegenen Knochens (B) strukturell verzahnt. (Zur Verfügung gestellt mit freundlicher Genehmigung von Prof. Dr. A. Weiler)

So ist zu vermuten, dass die vollständige Erosion des hyalinen Knorpels an der patellaren MPFL-Insertion des 12-jährigen Mädchens histologisch den Beginn einer Stabilitätszunahme widerspiegelt, insbesondere die zu erwartende weitere Entwicklung der Kortikalis und einer kortiko-fibrokartilaginären Verzahnung sollten diese im Verlauf jedoch weiter vergrößern <sup>102,103,116,135,136</sup>.

Wie bereits erwähnt können auch ossär-fibröse oder fibrokartilaginäre Ansätze in der Entwicklung zunächst im periostären Weichteilmantel inserieren <sup>106,112</sup>.

Ein diesbezügliches weiteres Ausreifen erscheint jedoch in Bezug auf die femorale MPFL-Insertion unwahrscheinlich.

Der Bandverlauf des MPFLs lässt in erster Linie eine Zugbelastung des femoralen Ansatzes vermuten, was für eine FKI untypisch wäre <sup>7,107,111,114,115</sup>. Zudem hätte spätestens die vollständige Erosion des hyalinen Knorpels zu einer sichtbaren Faserknorpelbildung führen sollen <sup>103</sup>.

Gegen die Entwicklung zu einem fest im Knochen verankerten ossär-fibrösen Ansatz spricht das typische femorale Läsionsmuster mit einer Avulsion des tief gelegenen Insertionsbereichs und intakter Insertionsoberfläche <sup>6,95</sup>.

Auch führen Patellaluxationen an der femoralen Insertion im Gegensatz zur patellaren gewöhnlich nicht zu knöchernen Ausrissen <sup>11</sup>.

Der femorale Knochen wies bei dem 12-jährigen Mädchen zwar eine zu größeren Teilen kontinuierliche, jedoch sehr fein ausgeprägte Oberfläche auf, die Entwicklung einer eigentlichen Kortikalis war noch nicht nachzuvollziehen (Abb. 68, 69). Inwiefern bspw. in der Kortikalis verankerte Sharpey-Fasern die ausgereifte Insertion noch einmal verstärken, kann anhand der Präparate somit nicht beurteilt werden <sup>106,109</sup>.

#### **5.1.4 Der Einfluss der Entwicklung auf den MPFL-Läsionsort**

Die beschriebene histologische Insertionsentwicklung lässt folgendes erwarten:

Die patellare MPFL-Insertion sollte einen prädisponierten Schädigungsort darstellen bis sie sich im Rahmen ihrer Entwicklung durch Erosion des hyalinen Knorpels und die Ausbildung einer kortiko-kartilaginären Verzahnung an die wirkende Biegebelastung strukturell angepasst hat <sup>102,103,113,116,135,136</sup>.

Insbesondere, da die femorale MPFL-Insertion periostal-fibrös aufgebaut und ihr kraniokaudaler Insertionsdurchmesser verglichen zur patellaren kleiner ist, sollte eine

steigende Belastbarkeit des patellaren Ansatzes wiederum zu einer relativen Zunahme femoraler Insertionsläsionen bei älteren Patienten mit Patellaerstluxation führen<sup>10,37,95,102–106</sup>.

Die Mehrzahl bisheriger Studien bestätigt diese Aspekte<sup>4,7,12,64,94,98,100,101,137–141</sup>.

Patientenpopulationen mit einem Durchschnittsalter von 20 Jahren oder älter wiesen mehrheitlich bevorzugt femorale MPFL-Schädigungen auf mit Häufigkeitsangaben zwischen 56 % und 87 %<sup>98,101,137–139</sup>. Andere Studien beschrieben bei Patientenpopulationen mit einem Durchschnittsalter von mindestens 18 Jahren am häufigsten intraligamentäre Läsionen des medialen Retinakulums bzw. des MPFLs, wobei letztere ebenfalls hauptsächlich in relativer Femurnähe auftreten<sup>6,140,141</sup>.

Elias et al. diagnostizierten bei ihren Patienten mit einem Durchschnittsalter von 20 Jahren am häufigsten patellare Rupturen des medialen Kapselbandapparates (76 %) <sup>142</sup>. Allerdings könnte in dieser inhomogenen Studienpopulation mit einer Altersspanne von 9 bis 57 Jahren auch ein hoher Anteil von Patienten im Wachstumsalter untersucht worden sein.

Ergebnisse junger Studienpopulationen zeigten hingegen ein anderes Bild<sup>4,7,12,64,94,100,139</sup>.

Askenberger et al. untersuchten 74 Patienten mit einem Durchschnittsalter von 13,1 Jahren nach Patellaerstluxation prospektiv<sup>12</sup>. MR-radiologisch zeigten sich bei 95 %, arthroskopisch sogar bei 99 % patellare MPFL-Schädigungen.

Zaidi et al. beobachteten in einer vergleichbaren Altersgruppe bei 73 % patellare Läsionen des medialen Kapselbandapparates und nur bei 15 % Rupturen des femoralen MPFL-Ansatzes<sup>4</sup>. Weitere Studien identifizierten ebenfalls die patellare MPFL-Insertion als den prädisponierten Schädigungsort bei jungen Patienten<sup>7,94,100</sup>.

Felus und Kowalczyk beobachteten bei 50 Minderjährigen nach Patellaerstluxation mit 66 % am häufigsten patellare MPFL-Läsionen. Diese traten zudem signifikant häufiger bei Studienteilnehmern mit noch offenen, als bei denen mit geschlossenen kniegelenksnahen Wachstumsfugen auf<sup>94</sup>. Tompkins et al. diagnostizierten ebenfalls isolierte Verletzungen der patellaren MPFL-Insertion signifikant häufiger vor Wachstumsfugenschluss<sup>64</sup>.

Balcarek et al. beschrieben nach Erstluxation im Alter zwischen 11 und 15 Jahren zwar zumeist femorale MPFL-Verletzungen, allerdings traten auch bei diesen Patienten mehr patellare MPFL-Schädigungen (45 %) verglichen zur erwachsenen Kontrollgruppe (24 %) auf <sup>139</sup>.

Knöcherne und kartilaginäre Insertionsausrisse sind typische Verletzungen bei Heranwachsenden <sup>121,143,144</sup>. Junge Patienten weisen nach Patellaluxation zu 21 % bis 51 % knöcherne Avulsionen der Patella auf <sup>11,12,18</sup>.

Während in der aktuellen Arbeit der hyaline Knorpel der jüngeren Kinder eine strukturelle Schwachstelle darstellen sollte, scheint das 12-jährige Mädchen aufgrund der bestehenden aber noch nicht ausgereiften Faserknorpel-Knochenverbindung für ossäre Ausrisse prädisponiert <sup>102,103,107,109,113,116,118</sup>.

Die Ausbildung einer kortiko-kartilaginären Verzahnung im Rahmen der weiteren Entwicklung sollte dieses Risiko wieder senken <sup>113,116,135,136</sup>. Andererseits könnte die weniger kräftige Verbindung Heranwachsende auch vor Avulsionen größerer Knochenfragmente mit retropatellarer Gelenkflächenbeteiligung schützen. Sillanpää et al. wiesen diese bei ausgewachsenen Patienten mit patellarer MPFL-Verletzung in über 20 % der Fälle nach <sup>96</sup>.

Ein Einfluss anatomischer Risikofaktoren auf den Schädigungsort und das Schädigungsausmaß des MPFLs konnte durch Tompkins et al. nicht beobachtet werden <sup>64</sup>.

### **5.1.5 Der Einfluss des MPFL-Läsionsortes auf den Behandlungserfolg**

Ob bzw. in welchen Fällen die patellofemorale Stabilität bereits nach traumatischer Erstluxation operativ versorgt werden sollte, wird in der Literatur nicht einheitlich beantwortet <sup>11,14,16,68,69,71,96–98,145</sup>.

Mehrere Studien kamen zu dem Ergebnis, dass der Schädigungsort des MPFLs das resultierende Instabilitätsrisiko signifikant beeinflusst <sup>97–99</sup>. Dieses wäre für die Therapieplanung von essenzieller Bedeutung.

Nahe der Patella ist das MPFL über eine Strecke von 20,3 mm mit Fasern des M. vastus medialis obliquus verwachsen <sup>146</sup>.

Kang et al. zeigten an 85 konservativ behandelten Patienten, dass MPFL-Verletzungen in diesem Bereich mit einem signifikant niedrigeren Risiko für Folgeinstabilitäten (15,2 %

zu 38,5 %) und einem höheren Kujala-Score (91,1 zu 82,6) einhergingen als weiter femoral gelegene Schädigungen <sup>97</sup>.

Sie führten ihre Ergebnisse auf den stabilisierenden Effekt durch die Verwachsung zum M. vastus medialis obliquus, den in Richtung Patella zunehmenden kraniokaudalen MPFL-Durchmesser sowie die patellanahe Schichtverwachsung des medialen Kapselbandapparates zurück <sup>10,36,37,97,146</sup>.

Dies entspricht auch den Beobachtungen von Sillanpää et al., die eine besondere Risikoerhöhung für Folgeinstabilitäten nach konservativ behandelten femoralen MPFL-Avulsionen beschrieben <sup>98</sup>. Innerhalb eines durchschnittlichen Follow-ups von 7 Jahren nach traumatischer Patellaerstluxation erlitten 32 % dieser Patienten eine Reluxation. Nach patellanahen MPFL-Verletzungen zeigte sich eine Reluxationsrate von 0 % und nach intraligamentären von 9 %.

Zhang et al. beobachteten in einer prospektiven Arbeit in einem Zeitraum von 5 Jahren nach konservativ behandelter Patellaerstluxation eine Rezidivrate von 17 % nach isoliert erlittener patellarer MPFL-Läsion sowie von 38,5 % und 42,3 % nach femoraler bzw. kombinierter Bandverletzung <sup>99</sup>. Die ligamentären Läsionsorte beim Zweitereignis entsprachen dabei denen beim primären Trauma.

Auch wenn die bisherige Studienlage schwach ist, legt sie nahe, dass isolierte patellare MPFL-Schädigungen nach Patellaerstluxation gut auf eine konservative Behandlung ansprechen <sup>97-99</sup>. Wie beschrieben wurden diese gehäuft bei jungen Patienten beobachtet <sup>64,94</sup>. Bei einer femoralen MPFL-Verletzung sollte hingegen bereits nach Erstluxation eine operative Versorgung in Betracht gezogen werden <sup>97-99</sup>.

Die aktuelle Arbeit erklärt die altersabhängigen Verschiebungen der MPFL-Läsionsprädispositionen auf histologischer Ebene schlüssig.

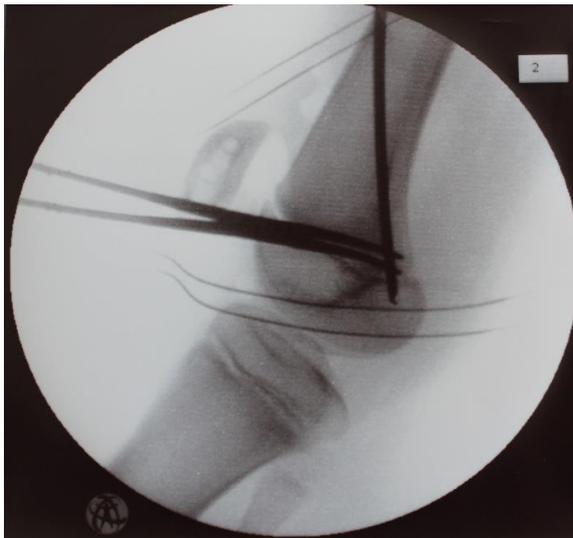
Sie stellt einen zusätzlichen Hinweis dafür dar, dass – unter Berücksichtigung des individuellen anatomischen Risikoprofils – insbesondere bei jüngeren Patienten tendenziell häufiger der Erfolg einer konservativen Therapie zu erwarten ist <sup>64,69,94,97,98</sup>.

## **5.2 Die Lagebeziehung zwischen femoraler MPFL-Insertion und Wachstumsfuge**

Die Kenntnis der Lagebeziehung zwischen femoraler MPFL-Insertion und distaler Femurepiphysenfuge ist im Rahmen einer MPFL-Rekonstruktion bei Kindern von essenzieller Bedeutung. Einerseits müssen Verletzungen der Wachstumsfugen

vermieden werden, andererseits ist eine möglichst anatomische Rekonstruktion für das operative Outcome sehr wichtig <sup>78,86</sup>.

Zusammenfassend hätte im Rahmen der aktuellen Arbeit bei 5 Präparaten (71,4 %) eine femorale Bohrkanalplatzierung distal der Wachstumsfuge der Anatomie entsprochen. Bei 2 Präparaten (28,6 %) lag die Insertion ungefähr auf Wachstumshöhe. Bei keinem Präparat (0 %) ließ sich die zweifelsfreie Überlegenheit einer proximalen Bohrkanalplatzierung feststellen. Der femorale Bohrkanal sollte demnach grundsätzlich distal platziert werden (Abb. 71, 72).



**Abbildung 71: Seitliches Durchleuchtungsbild, MPFL-Rekonstruktion bei einem Heranwachsenden**

Dargestellt wird die Eintrittspunktbestimmung des femoralen Bohrkanals distal zur Wachstumsfuge.  
(Zur Verfügung gestellt mit freundlicher Genehmigung von Prof. Dr. A. Weiler)



**Abbildung 72: a.p. Durchleuchtungsbild, MPFL-Rekonstruktion bei einem Heranwachsenden**

Der femorale Bohrkanal wird distal zur Wachstumsfuge platziert.  
(Zur Verfügung gestellt mit freundlicher Genehmigung von Prof. Dr. A. Weiler)

Auch bei den 4 diesbezüglich nicht ausgewerteten Präparaten ohne Wachstumsfugenanschnitt scheint es wahrscheinlich, dass die Insertionen distal lagen. Das markierte Insertionszentrum befand sich bei diesen 4 Präparaten jeweils relativ mittig auf dem femoralen Knochenblock (Abb. 22, 23), also nie unmittelbar oberhalb der Wachstumsfuge.

Im Falle einer proximalen Lage hätte daher jeweils eine erhebliche anatomische Diskrepanz zu den ausgewerteten Präparaten bestehen müssen. Insbesondere bei dem rechtsseitigen Präparat des 7-jährigen Jungen, an dessen Gegenseite sich die MPFL-Insertion von allen Präparaten am weitesten distal gelegen zeigte (Abb. 34, 35), scheint dieses unwahrscheinlich.

Auch kamen Shea et al. zu dem Ergebnis, dass die Distanz zwischen dem Zentrum der femoralen MPFL-Insertion und der Wachstumsfuge im Falle einer proximalen Lage nur durchschnittlich 3,3 mm beträgt <sup>125</sup>.

Die Mehrzahl bisheriger Studien kam zu grundsätzlich ähnlichen Beobachtungen <sup>7,78,122-125,127</sup>.

Shea et al. markierten den Schöttle-Punkt auf 20 streng seitlich angefertigten Röntgenbildern kindlicher Kniegelenke. In sämtlichen Bildern befand sich der Punkt proximal der Wachstumsfuge. Zu kritisieren ist jedoch, dass die a.p.-Ebene nicht berücksichtigt wurde <sup>78,87,122,128</sup>.

Nelitz et al. zeigten mittels Durchleuchtung, dass der Schöttle-Punkt im lateralen Strahlengang zwar proximal der Wachstumsfuge erscheint, nach Wechsel auf die a.p.-Ebene jedoch erkennbar distal des medialen Wachstumsfugenrandes liegt <sup>78,87</sup>. Die verfälschte Insertionsdarstellung im lateralen Strahlengang begründeten sie mit dem konkaven, zum Rande hin ansteigenden Wachstumsfugenverlauf in der frontalen Ebene. Eine weitere Studie kam zu dem Ergebnis, dass, wenn man den Schöttle-Punkt auf die a.p. Ebene projizierte, dieser durchschnittlich 6,4 mm distal des medialen Wachstumsfugenrandes lag <sup>87,122</sup>.

Der Schöttle-Punkt stellt allerdings nur eine Berechnung der femoralen Insertion dar. Seine Analyse ist zudem auf eine anatomische Studie an skelettal ausgewachsenen Kniegelenken zurückzuführen <sup>87</sup>.

Kepler et al. werteten 43 kindliche Kniegelenke MR-radiologisch aus. Die femorale MPFL-Insertion befand sich in ihrer Studie durchschnittlich 5 mm distal der

Wachstumsfuge <sup>7</sup>. In jeweils 7 % der Fälle lag sie jedoch auf gleicher Höhe oder sogar proximal. Es ist jedoch zu diskutieren, inwiefern die MR-radiologische Darstellung der variablen femoralen Insertionsanatomie gerecht wird <sup>36,37</sup>. So ließen sich der Studie keine Hinweise entnehmen, dass der kraniokaudale Insertionsdurchmesser berücksichtigt wurde, der bei Erwachsenen 10 mm bis 20 mm beträgt und somit erheblich größer ist als der MR-radiologisch angegebene durchschnittliche Abstand zur Wachstumsfuge <sup>7,10</sup>.

In einer kleinen anatomischen Studie untersuchten Shea et al. 6 Präparate von 5 Kindern computertomographisch <sup>124</sup>. Bei 5 Präparaten lag das Insertionszentrum distal und bei einem auf Höhe der Wachstumsfuge. Nur von einem Kind lagen beidseitige Präparate vor. Im Seitenvergleich fand sich hier rechts ein um 4,2 mm kleinerer Abstand zwischen Insertionszentrum und Wachstumsfuge und ein mit 10,9 mm mehr als doppelt so großer Insertionsdurchmesser.

Es wurden zwar anatomische Unterschiede zwischen den MPFLs eines Individuums beschrieben, die relativ großen Ergebnisdiskrepanzen könnten jedoch auch auf Ungenauigkeiten bei der Präparation oder Markierung hinweisen <sup>37</sup>.

In der aktuellen Arbeit wies der Abstand zwischen Insertions- und Wachstumsfugenzentrum bei den 3 Kindern, deren Präparate beidseitig ausgewertet werden konnten, im Seitenvergleich eine große Übereinstimmung auf. Die größte Diskrepanz bestand bei den a.p.-Aufnahmen des 9-jährigen Jungen mit 2,6 mm (Tab. 3, 4, S. 46).

Edmonds et al. werteten 132 Kniegelenke im Alter zwischen 4 und 18 Jahren MR-radiologisch aus und beobachteten, dass die femorale MPFL-Insertion bei jüngeren Kindern vornehmlich distal, ab dem Alter von 7 Jahren jedoch auf gleicher Höhe oder proximal der Wachstumsfuge lag <sup>129</sup>.

Shea et al. untersuchten 36 anatomische Präparate kindlicher Kniegelenke im Alter zwischen 2 und 11 Jahren <sup>126</sup>. Von ihnen wiesen 23 eine distal gelegene femorale Insertion auf. Bei Kindern bis zu einem Alter von 6 Jahren befand sich das Insertionszentrum durchschnittlich 4,7 mm distal, bei solchen mit einem Alter von mindestens 7 Jahren jedoch 0,8 mm proximal der Wachstumsfuge und weiter anterior gelegen. Dementsprechend empfahlen sie bei älteren Kindern auch eine vergleichsweise dezent proximalere und ventralere Transplantatfixierung.

Dies widerspricht den Beobachtungen der aktuellen Arbeit. Hier lag das Zentrum der femoralen MPFL-Insertion beim jüngsten Kind, beim 7-Jährigen und beim 9-Jährigen

distal der Wachstumsfuge, beim 8-Jährigen ungefähr auf Wachstumsfughöhe. Somit lässt sich – soweit anhand dieser geringen Fallzahl beurteilbar – zumindest kein Anhalt für eine altersabhängige Proximalisierung der femoralen MPFL-Insertion ableiten.

Farrow et al. untersuchten 16 kindliche Präparate im Alter zwischen 10 und 15 Jahren und kamen ebenfalls zur Erkenntnis, dass sich die femorale Insertion bei allen distal des medialen Wachstumsfugenrandes befand<sup>127</sup>.

In einer weiteren Studie an 15 Präparaten im Alter zwischen 7 und 11 Jahren beobachteten auch Shea et al., dass das Zentrum der femoralen MPFL-Insertion bei 11 distal und nur bei 4 proximal der Wachstumsfuge lag<sup>125</sup>.

### **5.3. Einschränkungen der Studie**

#### **5.3.1 Die histologische Untersuchung**

Der histologische Abschnitt weist einige qualitative Einschränkungen auf.

Es ist eine Seltenheit, dass kindliche humane Präparate für wissenschaftliche Untersuchungen zur Verfügung gestellt werden. Dieses beinhaltet einen besonderen Aspekt dieser Arbeit, der zusätzlich ihre geringe Fallzahl erklärt.

Es lagen 11 Präparate von 6 Kindern bis zum 13. Lebensjahr vor. Die aufwendige histologische Aufarbeitung und vorherige radiologische Auswertung hatte zu vermehrter Artefaktbildung geführt, ein Präparat wurde zudem nicht in der richtigen Ebene geschnitten. Qualitativ bedingt konnten so letztlich patellar 8 und femoral 6 Präparate vollständig histologisch ausgewertet werden.

Geschlecht und exaktes Alter des jüngsten Kindes waren nicht bekannt.

Neben der geringen Fallzahl bestand auch ein großer Altersabstand, insbesondere zwischen den beiden ältesten Kindern – dem 9-jährigen Jungen und dem 12-jährigen Mädchen. Die genannten Altersangaben sollten hinsichtlich des Standes der Insertionsentwicklung daher nur als orientierend gewertet werden. Darüber hinaus muss berücksichtigt werden, dass der Bewegungsapparat bei Mädchen früher ausreift<sup>121</sup>. Die histologische Auswertung erfolgte auch deshalb rein deskriptiv und ohne absolute Größenangaben.

Wie beschrieben weist die patellare MPFL-Insertion bei Erwachsenen einen kraniokaudalen Durchmesser von durchschnittlich 25 mm bis 28 mm, die femorale einen von 15 mm bis 17 mm auf<sup>10,37</sup>.

Das Ziel war es, möglichst gut erhaltene Horizontalschnitte zu gewinnen, unabhängig davon, ob diese aus dem gleichen kraniokaudalen Insertionsabschnitt stammten.

Es ist bekannt, dass sich bei Insertionen die Randbereiche von dem Zentrum strukturell unterscheiden können <sup>108,134</sup>. Der wesentliche Einfluss der mechanischen Beanspruchung auf die Insertionsmorphologie wurde bereits beschrieben <sup>103,107,111,114,115,135,136</sup>. Die Zugrichtung des MPFLs legt nahe, dass die Belastung entlang des gesamten patellaren und femoralen kraniokaudalen Insertionsdurchmessers jeweils relativ ähnlich ausgeprägt ist <sup>7</sup>. Somit sollte sich auch die Histomorphologie entlang der Insertionen nicht sehr stark unterscheiden.

Die Gewebedünnschnitte der femoralen Insertion wiesen gegenüber der patellaren insgesamt größere qualitative Einschränkungen auf. Mögliche Erklärungen hierfür sind, dass die femorale Insertion im direkten Vergleich schwächer ausgeprägt erschien (Abb. 10, 11, 16) und die FKI patellar im Rahmen des Schneidevorgangs eine größere strukturelle Stabilität gewährleisten könnte als die PFI femoral. Trotzdem ließen sich auch femoral zweifelsfrei die Insertionsart und die grundsätzliche Insertionsentwicklung bis zum 13. Lebensjahr nachvollziehen.

Die abschließende Anfertigung entkalkter Paraffinschnitte führte zu einem Informationsverlust bezüglich kalzifizierter Strukturen. Insbesondere war so das Verhältnis zwischen kalzifiziertem und nicht kalzifiziertem Faserknorpel an der patellaren Insertion nicht sicher beurteilbar.

In diesem Zusammenhang sollte jedoch berücksichtigt werden, dass detailliertere Strukturbeschreibungen bezogen auf definierte Entwicklungsstände die Aussagekraft der Präparate – insbesondere in Anbetracht der geringen Anzahl, teils großer Altersintervalle und einer nicht abgeschlossen dargestellten Insertionsentwicklung – überschritten hätten.

Das wesentliche histologische Ziel dieser Arbeit war es, die generelle Insertionsentwicklung zu beurteilen und hierdurch mögliche prädisponierte Schädigungsorte des MPFLs abzuleiten. Diesbezüglich liefert die Arbeit neue Gedanken.

### **5.3.2 Die radiologische Untersuchung**

Bezüglich der radiologischen Untersuchung ist ebenfalls als Kritikpunkt zunächst die geringe Fallzahl zu erwähnen. Von den 11 Präparaten konnten lediglich 7 radiologisch

ausgewertet werden, da bei 4 Präparaten kein Wachstumsfugenanschnitt gegeben war. Die beiden Präparate des jüngsten Kindes wiesen zudem nur den metaphysären knöchernen Wachstumsfugenrand auf.

Ein jeweils größerer femoraler Knochenblock hätte einen Wachstumsfugenanschnitt bei den nicht auswertbaren Präparaten ermöglicht bzw. bei dem jüngsten Kind ergänzt.

Bereits in der Methodik wurde zudem die Gefahr einer verfälschten Insertionsdarstellung aufgeführt, die die konkave Wachstumsfugenform in Verbindung mit dem kräftigen, den Knochen umgebenden Weichteilmantel bei Heranwachsenden aufweist (Abb. 25, 26) <sup>78,112,122</sup>.

Ein größerer femoraler Anschnitt hätte diese Konkavität entsprechend abgebildet. Die relative Lage der Insertion zur Wachstumsfuge wäre dann anschaulicher dargestellt worden.

Wie in der Methodik beschrieben, ist davon auszugehen, dass die Röntgenaufnahmen der Präparate jeweils hauptsächlich den ansteigenden Wachstumsfugenrand abbildeten. Im a.p.-Strahlengang wurde daher der knöcherne Bezugspunkt konstruiert, um eine fälschlich zu weit distal erscheinende Insertionsabbildung zu vermeiden (Abb. 26).

Als Referenzpunkt für die Distanzbestimmung wurde das theoretische Wachstumsfugenzentrum konstruiert. Es erlaubte die klare Unterscheidung zwischen einer proximalen und distalen Insertionslage, die für die Planung einer möglichst anatomiegerechten MPFL-Rekonstruktion benötigt wird.

Zudem sollte es zu einer gewissen Mittelung von Ungenauigkeiten führen, die zu erwarten sind, wenn in einem kleinen knöchernen Anschnitt die teils unebenen Wachstumsfugenränder anhand frei eingezeichneter Linien nachvollzogen werden.

Bei den beiden Präparaten des jüngsten Kindes war die Konstruktion des theoretischen Wachstumsfugenzentrums nicht möglich, da der epiphysäre Knochen jeweils bei der früheren Entnahme nicht angeschnitten worden war. Es konnte daher nur die Lagebeziehung zwischen Insertionszentrum und proximalem Wachstumsfugenrand beschrieben werden.

Die Markierung erfolgte jeweils zentral in dem am kräftigsten erscheinenden Insertionsbereich. Dieser sollte dem biomechanischen Zentrum der Insertion

nahekommen. In Größenordnungen von wenigen Millimetern stößt die Genauigkeit der Arbeit verfahrenstechnisch jedoch an ihre Grenzen.

Die mit Abstand größte Diskrepanz zwischen der a.p.- und der lateralen Aufnahme eines Präparates zeigte sich bei dem 8-jährigen Jungen rechtsseitig mit 2,5 mm. Bei den übrigen Präparaten lag sie bei maximal 1,3 mm. Es handelte sich zugleich um das einzige Präparat, bei dem der Wachstumsfugenspalt in der a.p.-Aufnahme nicht vollständig einsehbar war (Abb. 38). Die höhere Diskrepanz könnte daher durch eine nicht optimale Positionierung während der Durchleuchtung begünstigt worden sein.

Wie bereits beschrieben wiesen auch die 3 Kinder mit beidseits auswertbaren Präparaten im Seitenvergleich eine große Übereinstimmung hinsichtlich des Abstands zwischen Insertions- und Wachstumsfugenzentrum auf. Die größte Diskrepanz bestand bei den a.p.-Aufnahmen des 9-jährigen Jungen mit 2,6 mm. Dieser verhältnismäßig kleine Wert kann als ein Hinweis auf eine anatomiegerechte Markierung gewertet werden <sup>124</sup>.

## 5.4 Ausblick

Im Rahmen der aktuellen Arbeit konnte erstmals die Insertionsentwicklung des MPFLs histologisch dargestellt werden. Wie beschrieben konnte die Mehrzahl bisheriger Studien eine Verschiebung gehäufte patellarer MPFL-Läsionen bei Heranwachsenden in Richtung femoraler Läsionen bei Erwachsenen beobachten <sup>4,7,12,64,94,98,137-139</sup>.

Diese Verschiebung lässt sich durch die neuen Erkenntnisse zur MPFL-Insertionsentwicklung schlüssig erklären.

Da jedoch auch bei dem ältesten Kind dieser Arbeit nicht von einem Abschluss der Entwicklung auszugehen ist, wären weitere histologische Untersuchungen an skelettal ausgewachsenen Präparaten wünschenswert. So könnte insbesondere die patellar am Entwicklungsende zu erwartende kortiko-kartilaginäre Verzahnung einen Anhalt für die abschließend bestehende Insertionsfestigkeit bieten.

Durch elektronenmikroskopische Untersuchungen, wie sie bspw. am humanen vorderen Kreuzband durchgeführt wurden, könnten so detaillierte strukturelle Insertionsbeschreibungen erfolgen und relevante Größen exakt ausgemessen werden <sup>135</sup>.

Mountney et al. beobachteten an 10 Leichen, dass das MPFL Erwachsener durchschnittlich bei einer Spannung von 208 N reißt <sup>91</sup>.

Eine vergleichbare Studie an Heranwachsenden in unterschiedlichen Entwicklungsstadien könnte unter Berücksichtigung des jeweiligen MPFL-Schädigungsortes die Schlüsse aus den histologischen Beobachtungen der aktuellen Arbeit überprüfen.

Die Realisierung einer derart umfangreichen Studie an humanen Präparaten ist jedoch nur schwierig umzusetzen. Zur Diskussion steht daher ebenfalls, inwiefern Tierstudien hinsichtlich des MPFLs übertragbare Ergebnisse liefern könnten <sup>102-106</sup>.

Wie beschrieben ist die Patellaerstluxation eine typische Verletzung Heranwachsender und die ligamentäre Belastbarkeit vergrößert sich grundsätzlich während der Entwicklung kontinuierlich <sup>19,102,104,105</sup>. Für das MPFL zeigt die aktuelle Arbeit erstmals histologische Korrelate einer solchen Belastbarkeitszunahme. Es stellt sich daher die Frage, ob die MPFL-Entwicklung zu der Risikoreduktion einer Patellaerstluxation bei Erwachsenen relevant beiträgt <sup>19</sup>.

Dieses ist schwer abzuschätzen, da das Auftreten patellofemoraler Instabilitätsereignisse in starker Abhängigkeit zu dem individuellen anatomischen Risikoprofil steht <sup>1,147,148</sup>.

Bei ausgeprägten anatomischen Risikofaktoren wäre ein frühzeitiges Auftreten patellofemoraler Instabilitätsereignisse zu erwarten.

Balcarek et al. konnten dieses allerdings nicht bestätigen <sup>139</sup>. In ihrer Studie wiesen Jugendliche mit einem Durchschnittsalter von 14,2 Jahren bei Patellaerstluxation verglichen zu erwachsenen Kontrollpatienten, die ebenfalls das erste Instabilitätsereignis erlitten hatten, keinen signifikanten Ausprägungsunterschied hinsichtlich einer Trochleadysplasie auf.

Epidemiologische Studien, die das altersabhängige Auftreten traumatischer Patellaerstluxationen unter Berücksichtigung des individuellen anatomischen Risikoprofils untersuchen, könnten einen möglichen Einfluss der MPFL-Entwicklung auf das patellofemorale Instabilitätsrisiko näher ergründen.

Drei Studien kamen zu dem Schluss, dass patellare MPFL-Verletzungen erheblich besser auf eine konservative Therapie ansprechen als weiter femoral gelegene <sup>97-99</sup>. Die guten Ergebnisse, die mehrere Studien durch raffende Weichteileingriffe bei intaktem femoralen MPFL-Ansatz aufwiesen, können ebenfalls als Hinweis auf dessen Bedeutung für ein geringeres Instabilitätsrisiko gewertet werden <sup>47,77,80</sup>.

Wie beschrieben legen sowohl die meisten bisherigen klinischen Studien als auch die neuen Beobachtungen zur histologischen Insertionsentwicklung nahe, dass patellare MPFL-Rupturen übermäßig häufig bei Heranwachsenden auftreten<sup>4,7,12,64,94,98,137–139</sup>. Sie sprechen dafür, insbesondere bei diesen Patienten primär eine konservative Behandlung in Erwägung zu ziehen.

Weitere Studien sind erforderlich, um den Einfluss des MPFL-Schädigungsortes auf die zukünftige Stabilität näher zu untersuchen und die bisherigen Ergebnisse zu überprüfen.

Auch die Lagebeziehung zwischen femoraler MPFL-Insertion und distaler Femurepiphysenfuge sollte durch anatomische Studien weiter untersucht werden. Insbesondere die Frage, inwiefern sich diese in Abhängigkeit vom Alter verändert, scheint nicht abschließend geklärt. Eine zunehmende relative Insertionsproximalisierung, wie von anderen Autoren beschrieben, konnte in der aktuellen Arbeit nicht bestätigt werden<sup>126,129</sup>.

## **5.5 Fazit**

Diese Arbeit stellt nach ausführlicher Literaturrecherche eine von wenigen dar, in der Untersuchungen zur patellofemorale Instabilität anhand humaner, im Wachstum befindlicher Präparate durchgeführt werden konnten.

Sie beinhaltet eine Auswertung anatomischer Präparate zur Lagebeziehung zwischen femoraler MPFL-Insertion und distaler Femurepiphysenfuge und bestätigt, dass sich die Insertion überwiegend distal der Wachstumsfuge befindet. Eine relative Proximalisierung der Insertion bei älteren Kindern, wie von anderen Autoren beschrieben, konnte hingegen nicht beobachtet werden.

Da eine anatomiegerechte Platzierung des femoralen Bohrkanals für den Behandlungserfolg einer MPFL-Rekonstruktion essenziell ist, sollte auch diese vor Wachstumsfugenschluss demnach distal erfolgen.

Zudem wurden im Rahmen dieser Arbeit erstmals die physiologischen MPFL-Insertionen und ihre Entwicklung histologisch untersucht.

Sie liefert somit grundlegend neue Erkenntnisse, auf welcher strukturellen Grundlage eine MPFL-Verletzung resultiert. Die unterschiedlich prädisponierten Läsionsorte des

MPFLs bei Kindern und Erwachsenen, wie bisherige Studien sie überwiegend beschrieben, lassen sich durch die histologischen Beobachtungen schlüssig erklären. Da die Literatur nahelegt, dass der Schädigungsort des MPFLs sich auf das Behandlungsergebnis auswirkt, sollten diese Erkenntnisse auch in der Therapieplanung berücksichtigt werden.



## 6. Literaturverzeichnis

1. Dejour H, Walch G, Nove-Josserand L, Guier C. Factors of patellar instability: an anatomic radiographic study. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 1994; 2: 19–26.
2. Harrasser N, von Eisenhart-Rothe R, Gollwitzer H, Toepfer A, Salzmann M, Berger N, Knebel C, Margraf J, Banke I, Schauwecker J, Imhoff AB, Biberthaler P, Grüttner B, Huber-Wagner S. Untere Extremität. In: Harrasser N, von Eisenhart-Rothe R, Biberthaler P (eds) *Facharztwissen Orthopädie und Unfallchirurgie*. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2016, pp. 367–620.
3. Sillanpää P, Mattila VM, Iivonen T, Visuri T, Pihlajamäki H. Incidence and risk factors of acute traumatic primary patellar dislocation. *Med Sci Sports Exerc* 2008; 40: 606–611.
4. Zaidi A, Babyn P, Astori I, White L, Doria A, Cole W. MRI of traumatic patellar dislocation in children. *Pediatr Radiol* 2006; 36: 1163–1170.
5. Batra S, Arora S. Habitual dislocation of patella: a review. *J Clin Orthop Trauma* 2014; 5: 245–251.
6. Nomura E. Classification of lesions of the medial patello-femoral ligament in patellar dislocation. *Int Orthop* 1999; 23: 260–263.
7. Kepler CK, Bogner EA, Hammoud S, Malcolmson G, Potter HG, Green DW. Zone of injury of the medial patellofemoral ligament after acute patellar dislocation in children and adolescents. *Am J Sports Med* 2011; 39: 1444–1449.
8. Philippot R, Boyer B, Testa R, Farizon F, Moyon B. The role of the medial ligamentous structures on patellar tracking during knee flexion. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2012; 20: 331–336.
9. Conlan T, Garth WP, Lemons JE. Evaluation of the medial soft-tissue restraints of the extensor mechanism of the knee. *J Bone Joint Surg Am* 1993; 75: 682–693.
10. Panagiotopoulos E, Strzelczyk P, Herrmann M, Scuderi G. Cadaveric study on static medial patellar stabilizers: the dynamizing role of the vastus medialis obliquus on medial patellofemoral ligament. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2006; 14: 7–12.
11. Moström EB, Mikkelsen C, Weidenhielm L, Janarv P-M. Long-term follow-up of nonoperatively and operatively treated acute primary patellar dislocation in skeletally immature patients. *ScientificWorldJournal* 2014; 473281.
12. Askenberger M, Arendt EA, Ekström W, Voss U, Finnbogason T, Janarv P-M. Medial patellofemoral ligament injuries in children with first-time lateral patellar dislocations. *Am J Sports Med* 2015; 44: 152–158.
13. Palmu S, Kallio PE, Donell ST, Helenius I, Nietosvaara Y. Acute patellar dislocation in children and adolescents: a randomized clinical trial. *J Bone Joint Surg Am* 2008; 90: 463–470.

14. Christiansen SE, Jakobsen BW, Lund B, Lind M. Isolated repair of the medial patellofemoral ligament in primary dislocation of the patella: a prospective randomized study. *Arthroscopy* 2008; 24: 881–887.
15. Schmeling A. *Aktuelle Aspekte der patellofemorale Instabilität. 23. Jahresausgabe der SFA Arthroskopie Aktuell*. Tuttlingen: Stiftung zur Förderung der Arthroskopie, 2010.
16. Halbrecht JL. Arthroscopic patella realignment: an all-inside technique. *Arthroscopy* 2001; 17: 940–945.
17. Sanders TL, Pareek A, Johnson NR, Stuart MJ, Dahm DL, Krych AJ. Patellofemoral arthritis after lateral patellar dislocation: a matched population-based analysis. *Am J Sports Med* 2017; 45: 1012–1017.
18. Nietosvaara Y, Aalto K, Kallio PE. Acute patellar dislocation in children: incidence and associated osteochondral fractures. *J Pediatr Orthop* 1994; 14: 513–515.
19. Fithian DC, Paxton EW, Stone ML, Silva P, Davis DK, Elias DA, White LM. Epidemiology and natural history of acute patellar dislocation. *Am J Sports Med* 2004; 32: 1114–1121.
20. Atkin DM, Fithian DC, Marangi KS, Stone ML, Dobson BE, Mendelsohn C. Characteristics of patients with primary acute lateral patellar dislocation and their recovery within the first 6 months of injury. *Am J Sports Med* 2000; 28: 472–479.
21. Feucht MJ, Hinterwimmer S. Rekonstruktion des medialen patellofemorale Ligaments. In: Imhoff AB, Feucht MJ (eds) *Atlas sportorthopädisch-sporttraumatologische Operationen*. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2013, pp. 255–60.
22. Arendt EA, Moeller A, Agel J. Clinical outcomes of medial patellofemoral ligament repair in recurrent (chronic) lateral patella dislocations. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2011; 19: 1909–1914.
23. Monk AP, Doll HA, Gibbons CLMH, Ostlere S, Beard DJ, Gill HS, Murray DW. The pathoanatomy of patellofemoral subluxation. *J Bone Joint Surg Br* 2011; 93-B: 1341–1347.
24. Schünke M, Schulte E, Schumacher U. Untere Extremität. In: *Lernatlas der Anatomie. Allgemeine Anatomie und Bewegungssystem*. Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG, 2007, pp. 401–564.
25. Wiberg G. Roentgenographs and anatomic studies on the femoropatellar joint: with special reference to chondromalacia patellae. *Acta Orthop Scand* 1941; 12: 319–410.
26. Dejour D, Reynaud P, Lecoultre B. Douleurs et instabilité rotulienne. Essai de classification. *Med Hyg* 1998; 56: 1466–1471.
27. Salzmann GM, Weber TS, Spang JT, Imhoff AB, Schöttle PB. Comparison of native axial radiographs with axial MR imaging for determination of the trochlear morphology in patients with trochlear dysplasia. *Arch Orthop Trauma Surg* 2010; 130: 335–340.
28. Teng H-L, Chen Yu-Jen, Powers CM. Predictors of patellar alignment during weight bearing: an examination of patellar height and trochlear geometry. *The Knee* 2014; 21: 142–146.

29. Mofidi A, Veravalli K, Jinnah RH, Poehling GG. Association and impact of patellofemoral dysplasia on patellofemoral arthropathy and arthroplasty. *The Knee* 2014; 21: 509–513.
30. Diederichs G, Köhlitz T, Kornaropoulos E, Heller MO, Vollnberg B, Scheffler S. Magnetic resonance imaging analysis of rotational alignment in patients with patellar dislocations. *Am J Sports Med* 2013; 41: 51–57.
31. Schneider B, Laubenberger J, Jemlich S, Groene K, Weber HM, Langer M. Measurement of femoral antetorsion and tibial torsion by magnetic resonance imaging. *Br J Radiol* 1997; 70: 575–579.
32. Nelitz M, Dreyhaupt J, Williams SRM, Dornacher D. Combined supracondylar femoral derotation osteotomy and patellofemoral ligament reconstruction for recurrent patellar dislocation and severe femoral anteversion syndrome: surgical technique and clinical outcome. *Int Orthop* 2015; 39: 2355–2362.
33. Takagi S, Sato T, Watanabe S, Tanifuji O, Mochizuki T, Omori G, Endo N. Alignment in the transverse plane, but not sagittal or coronal plane, affects the risk of recurrent patella dislocation. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2018; 26: 2891–2898.
34. Petersen PDW, Forkel P, Achtnich A. Chronische patellofemorale Instabilität. *Unfallchirurg* 2012; 115: 397–409.
35. Liu LS, Zheng ZZ, Yuan HS. Significance of diffusion tensor imaging of vastus medialis oblique in recurrent patellar dislocation. *Chin Med J (Engl)* 2017; 130: 642–646.
36. Warren LF, Marshall JL. The supporting structures and layers on the medial side of the knee: an anatomical analysis. *J Bone Joint Surg Am* 1979; 61: 56–62.
37. Aragão JA, Reis FP, de Vasconcelos DP, Feitosa VLC, Nunes MAP. Metric measurements and attachment levels of the medial patellofemoral ligament: an anatomical study in cadavers. *Clinics (Sao Paulo)* 2008; 63: 541–544.
38. Desio SM, Burks RT, Bachus KN. Soft tissue restraints to lateral patellar translation in the human knee. *Am J Sports Med* 1998; 26: 59–65.
39. Feller JA, Feagin JA, Garrett WE. The medial patellofemoral ligament revisited: an anatomical study. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 1993; 1: 184–186.
40. Mochizuki T, Nimura A, Tateishi T, Yamaguchi K, Muneta T, Akita K. Anatomic study of the attachment of the medial patellofemoral ligament and its characteristic relationships to the vastus intermedius. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2012; 21: 305–310.
41. LaPrade RF, Engebretsen AH, Ly TV, Johansen S, Wentorf FA, Engebretsen L. The anatomy of the medial part of the knee. *J Bone Joint Surg Am* 2007; 89: 2000–2010.
42. Merican AM, Kondo E, Amis AA. The effect on patellofemoral joint stability of selective cutting of lateral retinacular and capsular structures. *J Biomech* 2009; 42: 291–296.
43. Brattström H. Shape of the intercondylar groove normally and in recurrent dislocation of patella: a clinical and x-ray anatomical investigation. *Acta Orthop Scand Suppl* 1964; 68: 1–148.

44. Freedman BR, Brindle TJ, Sheehan FT. Re-evaluating the functional implications of the Q-angle and its relationship to in-vivo patellofemoral kinematics. *Clin Biomech (Bristol, Avon)* 2014; 29: 1139–1145.
45. Dickschas J, Harrer J, Bayer T, Schwitulla J, Strecker W. Correlation of the tibial tuberosity-trochlear groove distance with the Q-angle. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2016; 24: 915–920.
46. Zhao J, Huangfu X, He Y. The role of medial retinaculum plication versus medial patellofemoral ligament reconstruction in combined procedures for recurrent patellar instability in adults. *Am J Sports Med* 2012; 40: 1355–1364.
47. Ma LF, Wang F, Chen BC, Wang CH, Zhou JW, Wang HY. Medial retinaculum plasty versus medial patellofemoral ligament reconstruction for recurrent patellar instability in adults: a randomized controlled trial. *Arthroscopy* 2013; 29: 891–897.
48. Brady JM, Rosencrans AS, Shubin Stein BE. Use of TT-PCL versus TT-TG. *Curr Rev Musculoskelet Med* 2018; 11: 261–265.
49. Clifton B, Richter DL, Tandberg D, Ferguson M, Treme G. Evaluation of the tibial tubercle to posterior cruciate ligament distance in a pediatric patient population. *J Pediatr Orthop* 2017; 37: e388–e393.
50. Valkering KP, Rajeev A, Caplan N, Tuinebreijer WE, Kader DF. An evaluation of the effectiveness of medial patellofemoral ligament reconstruction using an anatomical tunnel site. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2017; 25: 3206–3212.
51. Krych AJ, O'Malley MP, Johnson NR, Mohan R, Hewett TE, Stuart MJ, Dahm DL. Functional testing and return to sport following stabilization surgery for recurrent lateral patellar instability in competitive athletes. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2018; 26: 711–718.
52. Dragoo JL, Nguyen M, Gatewood CT, Taunton JD, Young S. Medial patellofemoral ligament repair versus reconstruction for recurrent patellar instability: two-year results of an algorithm-based approach. *Orthop J Sports Med* 2017; 5: DOI: 10.1177/2325967116689465.
53. Amis AA, Firer P, Mountney J, Senavongse W, Thomas NP. Anatomy and biomechanics of the medial patellofemoral ligament. *The Knee* 2003; 10: 215–220.
54. Fulkerson JP, Buuck DA. Arthroscopy of the patellofemoral joint. In: Fulkerson JP (ed) *Disorders of the patellofemoral joint*. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins, 2004, pp. 107–128.
55. Luyckx T, Didden K, Vandenuecker H, Labey L, Innocenti B, Bellemans J. Is there a biomechanical explanation for anterior knee pain in patients with patella alta? *J Bone Joint Surg Br* 2009; 91: 344–350.
56. Tecklenburg K, Dejour D, Hoser C, Fink C. Bony and cartilaginous anatomy of the patellofemoral joint. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2006; 14: 235–240.

57. Insall JMD, Goldberg VMD, Salvati EMD. Recurrent dislocation and the high-riding patella. *Clin Orthop Relat Res* 1972; 88: 67–69.
58. Grelsamer RP, Meadows S. The modified Insall-Salvati ratio for assessment of patellar height. *Clin Orthop Relat Res* 1992; 282: 170–176.
59. Yamada Y, Toritsuka Y, Nakamura N, Horibe S, Sugamoto K, Yoshikawa H, Shino K. Correlation of 3D shift and 3D tilt of the patella in patients with recurrent dislocation of the patella and healthy volunteers: an in vivo analysis based on 3-dimensional computer models. *Am J Sports Med* 2017; 45: 3111–3118.
60. Camp CL, Krych AJ, Dahm DL, Levy BA, Stuart MJ. Medial patellofemoral ligament repair for recurrent patellar dislocation. *Am J Sports Med* 2010; 38: 2248–2254.
61. Kujala UM, Jaakkola LH, Koskinen SK, Taimela S, Hurme M, Nelimarkka O. Scoring of patellofemoral disorders. *Arthroscopy* 1993; 9: 159–163.
62. Tegner Y, Lysholm J. Rating systems in the evaluation of knee ligament injuries. *Clin Orthop Relat Res* 1985; 198: 43–49.
63. Lysholm J, Gillquist J. Evaluation of knee ligament surgery results with special emphasis on use of a scoring scale. *Am J Sports Med* 1982; 10: 150–154.
64. Tompkins MA, Rohr SR, Agel J, Arendt EA. Anatomic patellar instability risk factors in primary lateral patellar dislocations do not predict injury patterns: an MRI-based study. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2018; 26: 677–684.
65. Hinterwimmer S, Graichen H, Vogl TJ, Abolmaali N. An MRI-based technique for assessment of lower extremity deformities-reproducibility, accuracy, and clinical application. *Eur Radiol* 2008; 18: 1497–1505.
66. Insall J, Salvati E. Patella position in the normal knee joint. *Radiology* 1971; 101: 101–104.
67. Balcarek P, Walde TA, Frosch S, Schüttrumpf JP, Wachowski MM, Stürmer KM. MRI but not arthroscopy accurately diagnoses femoral MPFL injury in first-time patellar dislocations. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2012; 20: 1575–1580.
68. Saccomanno MF, Sircana G, Fodale M, Donati F, Milano G. Surgical versus conservative treatment of primary patellar dislocation. A systematic review and meta-analysis. *Int Orthop* 2016; 40: 2277–2287.
69. Vavken P, Wimmer MD, Camathias C, Quidde J, Valderrabano V, Pagenstert G. Treating patella instability in skeletally immature patients. *Arthroscopy* 2013; 29: 1410–1422.
70. Buchner M, Baudendistel B, Sabo D, Schmitt H. Acute traumatic primary patellar dislocation: long-term results comparing conservative and surgical treatment. *Clin J Sport Med* 2005; 15: 62–66.
71. Petri M, Liodakis E, Hofmeister M, Despang FJ, Maier M, Balcarek P, Voigt C, Haasper C, Zeichen J, Stengel D, Krettek C, Frosch KH, Lill H, Jagodzinski M. Operative vs conservative treatment of traumatic patellar dislocation: results of a prospective randomized controlled clinical trial. *Arch Orthop Trauma Surg* 2013; 133: 209–213.

72. Camanho GL, Viegas A de C, Bitar AC, Demange MK, Hernandez AJ. Conservative versus surgical treatment for repair of the medial patellofemoral ligament in acute dislocations of the patella. *Arthroscopy* 2009; 25: 620–625.
73. Tompkins M, Kuenze CM, Diduch DR, Miller MD, Milewski MD, Hart JP. Clinical and functional outcomes following primary repair versus reconstruction of the medial patellofemoral ligament for recurrent patellar instability. *J Sports Med (Hindawi Publ Corp)* 2014; DOI: 10.1155/2014/702358.
74. Nelitz M, Dreyhaupt J, Lippacher S. Combined trochleoplasty and medial patellofemoral ligament reconstruction for recurrent patellar dislocations in severe trochlear dysplasia: a minimum 2-year follow-up study. *Am J Sports Med* 2013; 41: 1005–1012.
75. Zhao J, Huangfu X, He Y, Liu W. Recurrent patellar dislocation in adolescents: medial retinaculum plication versus vastus medialis plasty. *Am J Sports Med* 2012; 40: 123–132.
76. Mariani PP, Liguori L, Cerullo G, Iannella G, Floris L. Arthroscopic patellar reinsertion of the MPFL in acute patellar dislocations. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2011; 19: 628–633.
77. Nam EK, Karzel RP. Mini-open medial reefing and arthroscopic lateral release for the treatment of recurrent patellar dislocation: a medium-term follow-up. *Am J Sports Med* 2005; 33: 220–230.
78. Nelitz M, Reichel H, Dornacher D, Lippacher S. Anatomical reconstruction of the medial patellofemoral ligament in children with open growth-plates. *Arch Orthop Trauma Surg* 2012; 132: 1647–1651.
79. Barkatali BM, Lea M, Aster A, Marynissen H. Arthroscopic medial capsular plication using the suture anchor technique. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2014; 22: 2513–2517.
80. Tom A, Fulkerson JP. Restoration of native medial patellofemoral ligament support after patella dislocation. *Sports Med Arthrosc Rev* 2007; 15: 68–71.
81. Lee J-J, Lee S-J, Won Y-G, Choi C-H. Lateral release and medial plication for recurrent patella dislocation. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2012; 20: 2438–2444.
82. von Knoch F, Böhm T, Bürgi ML, von Knoch M, Bereiter H. Trochleaplasty for recurrent patellar dislocation in association with trochlear dysplasia. *J Bone Joint Surg Br* 2006; 88-B: 1331–1335.
83. Meidinger G, Hinterwimmer S. Trochleaplastik. In: Imhoff AB, Feucht MJ (eds) *Atlas sportorthopädisch-sporttraumatologische Operationen*. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2013, pp. 260–261.
84. Longo UG, Vincenzo C, Mannering N, Ciuffreda M, Salvatore G, Berton A, Denaro V. Trochleoplasty techniques provide good clinical results in patients with trochlear dysplasia. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2018; 26: 2640–2658.
85. Longo UG, Rizzello G, Ciuffreda M, Loppini M, Baldari A, Maffulli N, Denaro V. Elmslie-Trillat, Maquet, Fulkerson, Roux Goldthwait, and other distal realignment procedures for

- the management of patellar dislocation: systematic review and quantitative synthesis of the literature. *Arthroscopy* 2016; 32: 929–943.
86. Nelitz M, Williams RS, Lippacher S, Reichel H, Dornacher D. Analysis of failure and clinical outcome after unsuccessful medial patellofemoral ligament reconstruction in young patients. *Int Orthop* 2014; 38: 2265–2272.
  87. Schöttle PB, Schmeling A, Rosenstiel N, Weiler A. Radiographic landmarks for femoral tunnel placement in medial patellofemoral ligament reconstruction. *Am J Sports Med* 2007; 35: 801–804.
  88. Kiran KR, Srikanth IM, Chinnusamy L, Deepti K. Dynamic medial patellofemoral ligament reconstruction in recurrent patellar instability: a surgical technique. *Indian J Orthop* 2015; 49: 630–6.
  89. Wang C, Ma L, Zhou J, Ji G, Wang H, Wang F, Wang J. Double-bundle anatomical versus single-bundle isometric medial patellofemoral ligament reconstruction for patellar dislocation. *Int Orthop* 2013; 37: 617–624.
  90. Placella G, Speziali A, Sebastiani E, Morello S, Tei MM, Cerulli G. Biomechanical evaluation of medial patello-femoral ligament reconstruction: comparison between a double-bundle converging tunnels technique versus a single-bundle technique. *Musculoskelet Surg* 2016; 100: 103–107.
  91. Mountney J, Senavongse W, Amis AA, Thomas NP. Tensile strength of the medial patellofemoral ligament before and after repair or reconstruction. *J Bone Joint Surg Br* 2005; 87: 36–40.
  92. Hamner DL, Brown CH, Steiner ME, Hecker AT, Hayes WC. Hamstring tendon grafts for reconstruction of the anterior cruciate ligament: biomechanical evaluation of the use of multiple strands and tensioning techniques. *J Bone Joint Surg Am* 1999; 81: 549–557.
  93. Parikh SN, Nathan ST, Wall EJ, Eismann EA. Complications of medial patellofemoral ligament reconstruction in young patients. *Am J Sports Med* 2013; 41: 1030–1038.
  94. Felus J, Kowalczyk B. Age-related differences in medial patellofemoral ligament injury patterns in traumatic patellar dislocation: case series of 50 surgically treated children and adolescents. *Am J Sports Med* 2012; 40: 2357–2364.
  95. Inoue M, Nomura E, Sugiura H, Kobayashi S. Histological findings of avulsion tear-type medial patellofemoral ligament injury in acute patellar dislocation. *J Clin Pathol* 2007; 60: 1068–1069.
  96. Sillanpää PJ, Salonen E, Pihlajamäki H, Mäenpää HM. Medial patellofemoral ligament avulsion injury at the patella: classification and clinical outcome. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2014; 22: 2414–2418.
  97. Kang HJ, Wang F, Chen BC, Zhang YZ, Ma L. Non-surgical treatment for acute patellar dislocation with special emphasis on the MPFL injury patterns. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2013; 21: 325–331.

98. Sillanpää PJ, Peltola E, Mattila VM, Kiuru M, Visuri T, Pihlajamäki H. Femoral avulsion of the medial patellofemoral ligament after primary traumatic patellar dislocation predicts subsequent instability in men. *Am J Sports Med* 2009; 37: 1513–1521.
99. Zhang G, Zhu H, Li E, Shi H, Liu W, Zheng L, Bai Z, Ding H. The correlation between the injury patterns of the medial patellofemoral ligament in an acute first-time lateral patellar dislocation on MR imaging and the incidence of a second-time lateral patellar dislocation. *Korean J Radiol* 2018; 19: 292–300.
100. Seeley M, Bowman KF, Walsh C, Sabb BJ, Vanderhave KL. Magnetic resonance imaging of acute patellar dislocation in children: patterns of injury and risk factors for recurrence. *J Pediatr Orthop* 2012; 32: 145–155.
101. Sillanpää PJ, Mäenpää HM, Mattila VM, Visuri T, Pihlajamäki H. Arthroscopic surgery for primary traumatic patellar dislocation: a prospective, nonrandomized study comparing patients treated with and without acute arthroscopic stabilization with a median 7-year follow-up. *Am J Sports Med* 2008; 36: 2301–2309.
102. Tipton CM, Matthes RD, Martin RK. Influence of age and sex on the strength of bone-ligament junctions in knee joints of rats. *J Bone Joint Surg Am* 1978; 60: 230–234.
103. Gao J, Messner K, Ralphs JR, Benjamin M. An immunohistochemical study of enthesis development in the medial collateral ligament of the rat knee joint. *Anat Embryol (Berl)* 1996; 194: 399–406.
104. Woo SL-Y, Orlando CA, Gomez MA, Frank CB, Akeson WH. Tensile properties of the medial collateral ligament as a function of age. *J Orthop Res* 1986; 4: 133–141.
105. Lam T, Shrive N, Frank C. Variations in rupture site and surface strains at failure in the maturing rabbit medial collateral ligament. *J Biomech Eng* 1995; 117: 455–461.
106. Matyas JR, Bodie D, Andersen M, Frank CB. The development morphology of a “periosteal” ligament insertion: growth and maturation of the tibial insertion of the rabbit medial collateral ligament. *J Orthop Res* 1990; 8: 412–424.
107. Benjamin M, Ralphs JR. Functional and developmental anatomy of tendons and ligaments. In: Gordon SL, Fine LJ, Blair SJ (eds) *Repetitive motion disorders of the upper extremity*. Rosemont, IL: American Academy of Orthopaedic Surgeons, 1995, pp. 185–204.
108. Benjamin M, Kumai T, Milz S, Boszczyk BM, Boszczyk AA, Ralphs JR. The skeletal attachment of tendons - tendon ‘entheses’. *Comp Biochem Physiol A Mol Integr Physiol* 2002; 133: 931–945.
109. Lüllmann-Rauch R. *Taschenlehrbuch Histologie*. 2nd ed. Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG, 2006.
110. Smith L, Xia Y, Galatz LM, Genin GM, Thomopoulos S. Tissue-engineering strategies for the tendon/ligament-to-bone insertion. *Connect Tissue Res* 2012; 53: 95–105.
111. Matyas JR, Anton MG, Shrive NG, Frank CB. Stress governs tissue phenotype at the femoral insertion of the rabbit MCL. *J Biomech* 1995; 28: 147–157.

112. Wei X, Messner K. The postnatal development of the insertions of the medial collateral ligament in the rat knee. *Anat Embryol (Berl)* 1996; 193: 53–59.
113. Gao J, Messner K. Quantitative comparison of soft tissue-bone interface at chondral ligament insertions in the rabbit knee joint. *J Anat* 1996; 188: 367–373.
114. Thomopoulos S, Das R, Birman V, Smith L, Ku K, Elson EL, Pryse KM, Marquez JP, Genin GM. Fibrocartilage tissue engineering: the role of the stress environment on cell morphology and matrix expression. *Tissue Eng Part A* 2010; 17: 1039–1053.
115. Li KW, Lindsey DP, Wagner DR, Giori NJ, Schurman DJ, Goodman SB, Smith RL, Carter DR, Beaupre GS. Gene regulation ex vivo within a wrap-around tendon. *Tissue Eng* 2006; 12: 2611–2618.
116. Milz S, Rufai A, Buettner A, Putz R, Ralphs JR, Benjamin M. Three-dimensional reconstructions of the Achilles tendon insertion in man. *J Anat* 2002; 200: 145–152.
117. Biermann H. Die Knochenbildung im Bereich periostaler-diaphysärer Sehnen- und Bandansätze. *Z Zellforsch Mikrosk Anat* 1957; 46: 635–671.
118. Knese K-H, Biermann H. Die Knochenbildung an Sehnen- und Bandansätzen im Bereich ursprünglich chondraler Apophysen. *Z Zellforsch Mikrosk Anat* 1958; 49: 142–187.
119. Woo S, Maynard J, Butler D. Ligament, tendon and joint capsule insertion to bone. In: Woo S, Buckwalter J (eds) *Injury and repair of the musculoskeletal soft tissues*. Illinois: American Academy of Orthopaedic Surgeons, 1988, pp. 133–166.
120. Koman JD, Sanders JO. Valgus deformity after reconstruction of the anterior cruciate ligament in a skeletally immature patient: a case report. *J Bone Joint Surg Am* 1999; 81: 711–715.
121. Ogden JA, Hensinger RN, McCollough NC. *Skeletal injury in the child*. 3rd ed. New York: Springer-Verlag, 2000.
122. Nelitz M, Dornacher D, Dreyhaupt J, Reichel H, Lippacher S. The relation of the distal femoral physis and the medial patellofemoral ligament. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2011; 19: 2067–2071.
123. Ladd PE, Laor T, Emery KH, Salisbury SR, Parikh SN. Medial collateral ligament of the knee on magnetic resonance imaging: does the site of the femoral origin change at different patient ages in children and young adults? *J Pediatr Orthop* 2010; 30: 224–230.
124. Shea KG, Polousky JD, Jacobs JC, Ganley TJ, Aoki SK, Grimm NL, Parikh SN. The relationship of the femoral physis and the medial patellofemoral ligament in children: a cadaveric study. *J Pediatr Orthop* 2014; 34: 808–813.
125. Shea KG, Styhl AC, Jacobs JC, Ganley TJ, Milewski MD, Cannamela PC, Anderson AF, Polousky JD. The relationship of the femoral physis and the medial patellofemoral ligament in children: a cadaveric study. *Am J Sports Med* 2016; 44: 2833–2837.

126. Shea KG, Martinson WD, Cannamela PC, Richmond CG, Fabricant PD, Anderson AF, Polousky JD, Ganley TJ. Variation in the medial patellofemoral ligament origin in the skeletally immature knee: an anatomic study. *Am J Sports Med* 2018; 46: 363–369.
127. Farrow LD, Alentado VJ, Abdulnabi Z, Gilmore A, Liu RW. The relationship of the medial patellofemoral ligament attachment to the distal femoral physis. *Am J Sports Med* 2014; 42: 2214–2218.
128. Shea KG, Grimm NL, Belzer J, Burks RT, Pfeiffer R. The relation of the femoral physis and the medial patellofemoral ligament. *Arthroscopy* 2010; 26: 1083–1087.
129. Edmonds EW, Bathen M, Bastrom TP. Normal parameters of the skeletally immature knee: developmental changes on magnetic resonance imaging. *J Pediatr Orthop* 2015; 35: 712–720.
130. Pedbone Knie/Oberschenkel. *OrthoRad*, <http://www.idr.med.uni-erlangen.de/orthorad/orthorad/pedbone/pedbone-knie-oberschenkel> (accessed 7 April 2020).
131. Mulisch M, Welsch U, Büchl-Zimmermann S, Dänhardt-Pfeiffer S, Nixdorf-Bergweiler B, Riedelsheimer B. Präparationsmethoden. In: Mulisch M, Welsch U (eds) *Romeis - Mikroskopische Technik*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 2010, pp. 39–180.
132. Welsch U, Riedelsheimer B. Färbungen. In: Mulisch M, Welsch U (eds) *Romeis - Mikroskopische Technik*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 2010, pp. 181–298.
133. Lehmann G. Systemische Osteopathien. In: Krenn V, Rüter W (eds) *Pathologie des Bewegungsapparates*. Berlin, Boston: Walter de Gruyter GmbH & Co. KG, 2011, pp. 253–280.
134. Evans EJ, Benjamin M, Pemberton DJ. Fibrocartilage in the attachment zones of the quadriceps tendon and patellar ligament of man. *J Anat* 1990; 171: 155–162.
135. Moulton SG, Steineman BD, Donahue TLH, Fontboté CA, Cram TR, LaPrade RF. Direct versus indirect ACL femoral attachment fibres and their implications on ACL graft placement. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2017; 25: 165–171.
136. Kawaguchi Y, Kondo E, Takeda R, Akita K, Yasuda K, Amis AA. The role of fibers in the femoral attachment of the anterior cruciate ligament in resisting tibial displacement. *Arthroscopy* 2015; 31: 435–444.
137. Weber-Spickschen TS, Spang J, Kohn L, Imhoff AB, Schöttle PB. The relationship between trochlear dysplasia and medial patellofemoral ligament rupture location after patellar dislocation: an MRI evaluation. *Knee* 2011; 18: 185–188.
138. Sallay PI, Poggi J, Speer KP, Garrett WE. Acute dislocation of the patella: a correlative pathoanatomic study. *Am J Sports Med* 1996; 24: 52–60.
139. Balcarek P, Walde TA, Frosch S, Schüttrumpf JP, Wachowski MM, Stürmer KM, Frosch K-H. Patellar dislocations in children, adolescents and adults: a comparative MRI study of medial patellofemoral ligament injury patterns and trochlear groove anatomy. *Eur J Radiol* 2011; 79: 415–420.

140. Kirsch MD, Fitzgerald SW, Friedman H, Rogers LF. Transient lateral patellar dislocation: diagnosis with MR imaging. *Am J Roentgenol* 1993; 161: 109–113.
141. Nomura E, Horiuchi Y, Inoue M. Correlation of MR imaging findings and open exploration of medial patellofemoral ligament injuries in acute patellar dislocations. *Knee* 2002; 9: 139–143.
142. Elias DA, White LM, Fithian DC. Acute lateral patellar dislocation at MR imaging: injury patterns of medial patellar soft-tissue restraints and osteochondral injuries of the inferomedial patella. *Radiology* 2002; 225: 736–743.
143. Grogan DPMD, Carey TPMD, Leffers DMD, Ogden JAMD. Avulsion fractures of the patella. *J Pediatr Orthop* 1990; 10: 721–730.
144. Bruijn JD, Sanders RJ, Jansen BR. Ossification in the patellar tendon and patella alta following sports injuries in children. Complications of sleeve fractures after conservative treatment. *Arch Orthop Trauma Surg* 1993; 112: 157–158.
145. Cheng B, Wu X, Ge H, Qing Sun Y, Zhang Q. Operative versus conservative treatment for patellar dislocation: a meta-analysis of 7 randomized controlled trials. *Diagn Pathol* 2014; 9: 60.
146. Nomura E, Inoue M, Osada N. Anatomical analysis of the medial patellofemoral ligament of the knee, especially the femoral attachment. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2005; 13: 510–515.
147. Christensen TC, Sanders TL, Pareek A, Mohan R, Dahm DL, Krych AJ. Risk factors and time to recurrent ipsilateral and contralateral patellar dislocations. *Am J Sports Med* 2017; 45: 2105–2110.
148. Höhne S, Gerlach K, Irlenbusch L, Schulz M, Kunze C, Finke R. Patella dislocation in children and adolescents. *Z Orthop Unfall* 2017; 155: 169–176.

## 7. Materialverzeichnis

7

Lösung	Anzahl der Durchgänge	Konzentration	Inkubationsdauer (Tage)
Ethanol	1x	70 %	3
Ethanol	1x	80 %	3
Ethanol	1x	80 %	7
Ethanol	2x	96 %	7
Ethanol	3x	100 %	7
Xylol	1x	100 %	1

**Tabelle 5: Schrittabfolge der Entwässerung vor PMMA-Einbettung**

Nach jedem Alkoholwechsel erfolgte eine 10-minütige Evakuierung der Proben im Entwässerungsautomaten (Leica TP 1020, Leica Biosystems Nussloch GmbH, 69226 Nussloch, ca. - 400 mbar).

10

Lösung	Anzahl der Durchgänge	Konzentration	Inkubationsdauer (Stunden)
Ethanol	1x	70 %	8
Ethanol	1x	80 %	5
Ethanol	1x	80 %	4
Ethanol	1x	96 %	8
Ethanol	1x	96 %	10
Ethanol	3x	100 %	10
Xylol	2x	100 %	1,5
Paraffin	2x	100 %	2

**Tabelle 6: Entwässerungs- und Infiltrationsprotokoll der Paraffin-Einbettung**

Die Inkubation erfolgte im Entwässerungsautomaten (Leica TP 1020, Leica Biosystems Nussloch GmbH, 69226 Nussloch).

14

Lösung	Konzentration	Anzahl der Durchgänge	Inkubationszeit (Minuten)
Xylol	100 %	2x	10
Ethanol	100 %	1x	2
Ethanol	96 %	1x	2
Ethanol	80 %	1x	2
Ethanol	70 %	1x	2
Aqua dest.	100 %	1x	2

**Tabelle 7: Darstellung der vor der Färbung durchlaufenden Entparaffinisierung und Rehydrierung**

15

1. Weigert´s Eisenhämatoxylin A und B, gleicheilig, Infiltration über 15 min <i>Eisenhämatoxylin Weigert A (2E-032) und B (2E-052), Waldeck GmbH &amp; Co. KG, 48161 Münster</i>
2. Spülung in Wasser über 10 min
3. Säurefuchsin-Ponceau, Infiltration über 5 min <i>Ponceau Fuchsin Masson (2C-149), Waldeck GmbH &amp; Co. KG, 48161 Münster</i>
4. Spülung in Essigsäure (1 %)
5. Ca. 4 % Phosphormolybdänsäure / 2 % Orange G, Differenzierung über 15 s bis 5 min bis zur vollständigen Bindegewebsentfärbung <i>Phosphormolybdänsäure-Hydrat (1.00532) und Orange G (1.15925), Merck KGaA, 64293 Darmstadt</i>
6. Spülung in Essigsäure (1 %)
7. Lichtgrün (0,1 %) in Essigsäure (0,2 %), Infiltration über 5 min <i>Lichtgrün SF (1B 211), Waldeck GmbH &amp; Co. KG, 48161 Münster</i>
8. Spülung in Essigsäure (1 %)
9. dreimalige Spülung in Ethanol (100 %)
10. zweimalige Spülung in Xylol (100 %) über je 2 min
11. Eindeckung <i>Vitro-Clud, R. Langenbrinck GmbH, 79312 Emmendingen</i>

**Tabelle 8: Schrittabfolge der Einfärbung nach Masson-Goldner-Trichrom**



## Eidesstattliche Versicherung

„Ich, Philipp Utermann, versichere an Eides statt durch meine eigenhändige Unterschrift, dass ich die vorgelegte Dissertation mit dem Thema: ‚Das Ligamentum patellofemorale mediale – Insertionsentwicklung und Beziehung zur Wachstumsfuge‘ (englisch: ‚The medial patellofemoral ligament – attachment development and relationship to the physis‘) selbstständig und ohne nicht offengelegte Hilfe Dritter verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel genutzt habe.

Alle Stellen, die wörtlich oder dem Sinne nach auf Publikationen oder Vorträgen anderer Autoren/innen beruhen, sind als solche in korrekter Zitierung kenntlich gemacht. Die Abschnitte zu Methodik (insbesondere praktische Arbeiten, Laborbestimmungen, statistische Aufarbeitung) und Resultaten (insbesondere Abbildungen, Graphiken und Tabellen) werden von mir verantwortet.

[Für den Fall, dass Sie die Forschung für Ihre Promotion ganz oder teilweise in Gruppenarbeit durchgeführt haben:] Ich versichere ferner, dass ich die in Zusammenarbeit mit anderen Personen generierten Daten, Datenauswertungen und Schlussfolgerungen korrekt gekennzeichnet und meinen eigenen Beitrag sowie die Beiträge anderer Personen korrekt kenntlich gemacht habe (siehe Anteilserklärung). Texte oder Textteile, die gemeinsam mit anderen erstellt oder verwendet wurden, habe ich korrekt kenntlich gemacht.

Meine Anteile an etwaigen Publikationen zu dieser Dissertation entsprechen denen, die in der untenstehenden gemeinsamen Erklärung mit dem/der Erstbetreuer/in, angegeben sind. Für sämtliche im Rahmen der Dissertation entstandenen Publikationen wurden die Richtlinien des ICMJE (International Committee of Medical Journal Editors; [www.icmje.org](http://www.icmje.org)) zur Autorenschaft eingehalten. Ich erkläre ferner, dass ich mich zur Einhaltung der Satzung der Charité – Universitätsmedizin Berlin zur Sicherung Guter Wissenschaftlicher Praxis verpflichte.

Weiterhin versichere ich, dass ich diese Dissertation weder in gleicher noch in ähnlicher Form bereits an einer anderen Fakultät eingereicht habe.

Die Bedeutung dieser eidesstattlichen Versicherung und die strafrechtlichen Folgen einer unwahren eidesstattlichen Versicherung (§§156, 161 des Strafgesetzbuches) sind mir bekannt und bewusst.“

-----  
Ort, Datum

-----  
Unterschrift



## **Curriculum Vitae**

Mein Lebenslauf wird aus datenschutzrechtlichen Gründen in der elektronischen Version meiner Arbeit nicht veröffentlicht.



## **Danksagung**

Zunächst möchte ich ganz herzlich Herrn Prof. Dr. med. Andreas Weiler danken, der das Zustandekommen dieser Arbeit realisierte und mir das Promotionsthema überließ.

In diesem Zusammenhang danke ich ebenfalls ausdrücklich der Medizinischen Hochschule Hannover, die die untersuchten Präparate zur Verfügung stellte.

Mein besonderer Dank hinsichtlich der Betreuung gilt weiterhin Herrn Dr. med. Tobias Jung, der die Arbeit mit seinem wissenschaftlichen Rat begleitete und dessen positiv-konstruktive Unterstützung mir eine große Hilfe war.

Ich danke außerdem dem Julius Wolff Institut unter Leitung von Herrn Prof. Dr.-Ing. Georg Duda, das die Durchführung der Arbeit apparativ-technisch ermöglichte. Ganz besonders ist hier Frau Marzena Princ zu erwähnen, die mich im Rahmen der umfangreichen histologischen Methodik jederzeit geduldig und mit großem persönlichem Einsatz unterstützte.

Weiterhin gilt mein Dank Frau Dr. med. vet. Tanja Schmidt für die Einführung und die freundliche Hilfe hinsichtlich der Anfertigung der Röntgenaufnahmen.