Vergleich von Quadrizeps- und Hamstringsehnen-Transplantaten nach vorderer Kreuzband-Rekonstruktion hinsichtlich klinischer, kraftbezogener und neuromuskulärer Ergebnisse

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Medizin (Dr. med.)

an der

Medizinischen Fakultät der Universität Hamburg.

vorgelegt von

Benjamin Fabien Casper Forquignon

aus Hamburg

2026

Betreuer:in / Gutachter:in der Dissertation: Prof. Dr. Götz H. Welsch

Gutachter:in der Dissertation: Prof. Dr. Götz H. Welsch

Vorsitz der Prüfungskommission: Prof. Dr. Martin Gosau

Mitglied der Prüfungskommission: Prof. Dr. Monika Pötter-Nerger

Mitglied der Prüfungskommission: PD Dr. Konrad Mader

Datum der mündlichen Prüfung: 28.10.2026

Inhaltsverzeichnis

1. Darstellung der Publikation 4
   1.1 Einleitung 4
   1.2 Methodik 6
      1.2.1 Studienaufbau und Kollektiv 6
      1.2.2 Isometrische Muskelkraft 7
      1.2.3 Neuromuskuläre Aktivität 7
      1.2.4 Klinische Untersuchung und Fragebögen 8
      1.2.5 Statistik 8
   1.3 Ergebnisse 9
      1.3.1 Patientencharakteristika 9
      1.3.2 Isometrische Muskelkraft 9
      1.3.3 Neuromuskuläre Aktivität 10
      1.3.4 Klinische Untersuchung und Fragebögen 10
   1.4 Diskussion 10
2. Artikel 15
3. Zusammenfassung 27
4. Literaturverzeichnis 28
5. Abkürzungsverzeichnis 35
6. Erklärung des Eigenanteils 36
7. Eidesstattliche Versicherung 37
8. Danksagung 38

1. Darstellung der Publikation

Diese publikationsbasierte Dissertation wurde auf der Arbeit „Impact of hamstring versus quadriceps tendon graft on thigh muscle strength and surface electromyography activity after anterior cruciate ligament reconstruction“ aufgebaut, die im Journal *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy* (KSSTA) veröffentlicht wurde und ein Peer-Review-Verfahren durchlaufen hat. Der Verfasser dieser Dissertation ist Erstautor der Publikation.

1.1 Einleitung

Rupturen des vorderen Kreuzbandes (VKB) gehören mit einer Inzidenz von 46 pro 100.000 Personen pro Jahr in Deutschland zu den häufigsten Kniegelenksverletzungen (Domnick et al. 2017). Sie entstehen meist kontaktlos durch einen kombinierten Valgus- und Rotationsmechanismus bei geringer Kniegelenksflexion (Boden und Sheehan 2022). Funktionell begrenzt das VKB die anteriore Tibia-Translation (Willinger et al. 2023), entsprechend zeigen sich bei einer Ruptur in der körperlichen Untersuchung ein positiver vorderer Schubladen-, Lachman- und Pivot-Shift-Test (Musahl und Karlsson 2019). Eine Röntgenuntersuchung und gegebenenfalls Computertomografie (CT) dienen dem Ausschluss einer knöchernen Läsion, wohingegen die Magnetresonanztomografie (MRT) den diagnostischen Goldstandard zur Beurteilung intraartikulärer Bandstrukturen darstellt (Musahl und Karlsson 2019). Ein konservatives Vorgehen ist grundsätzlich möglich und wird aktuell vor allem bei niedrigem Funktionsanspruch, höherem Lebensalter und Kontraindikationen für eine operative Versorgung empfohlen (Kohn et al. 2020, Papaleontiou et al. 2024). Zur Wiederherstellung von Stabilität und Funktion gilt eine operative Rekonstruktion als Goldstandard (Krause et al. 2018). Dazu können in einzelnen Fällen banderhaltende Methoden wie die primäre Naht mit oder ohne Augmentation erwogen werden (Wu et al. 2022). Das Standardverfahren ist die anatomisch arthroskopische Kreuzbandersatzplastik mittels autologer Sehnentransplantate (Brophy und Lowry 2023). Zu den etablierten autologen Transplantatoptionen zählen die Hamstringsehne (HT), also die Sehne des M. semitendinosus, gegebenenfalls in Kombination mit der Sehne des M. gracilis, die Quadrizepssehne (QT) und die Patellarsehne (PT).

Die Wahl des Transplantats erfolgt unter Berücksichtigung von Alter (Bowman et al. 2021), ausgeübter Sportart und Aktivitätsniveau (Nuelle 2025), individueller Präferenz (Belk und McCarty 2020), Begleiterkrankungen und der jeweiligen spezifischen Vor- und Nachteile der verfügbaren Transplantatoptionen (Chen et al. 2025). Das HT-Transplantat erlaubt eine einfache und schnelle Entnahme und zeigt eine geringe Morbidität an der Entnahmestelle auf (Rechter et al. 2024). Es kann allerdings eine reduzierte Beugekraft im operierten Knie auftreten, was sich auch nach 18 Jahren noch nachweisen lässt (Popovic et al. 2024). Das QT-Transplantat ist biomechanisch vorteilhaft und weist eine niedrige Entnahmemorbidität auf (Arnold et al. 2021, Servant 2024). Als potenzielle Nachteile gelten persistierende Defizite der Quadrizepskraft sowie bei Verwendung eines

knöchernen Blocks ein erhöhtes Risiko patellofemoraler Beschwerden oder, selten, von Patellafrakturen (Servant 2024). Das PT-Transplantat weist niedrige Versagensraten sowie hohe Return-to-Sport-Raten auf (Hasan et al. 2026), nimmt aber aufgrund höherer Entnahmestellenmorbidität und postoperativ auftretender Schmerzen an Bedeutung ab (Kunze et al. 2023). Mit der zunehmenden klinischen Verbreitung des QT-Transplantats (Heffron et al. 2019) besteht ein wachsender Bedarf an direkten Vergleichen zwischen QT und HT. Entsprechend ist die vorliegende Arbeit auf diese beiden Transplantatoptionen fokussiert.

Sowohl das HT-, als auch das QT-Transplantat bieten hervorragende klinische Ergebnisse (Johnston et al. 2022, Raj et al. 2024, Lind et al. 2020, Todor et al. 2019, Khiang Tan et al. 2021, Magnussen et al. 2011, Grassi et al. 2022). Eine eindeutige Überlegenheit eines Transplantats gegenüber dem anderen konnte bislang nicht gezeigt werden (Young et al. 2025, Raj et al. 2024, Grassi et al. 2022). Eine differenzierte Analyse postoperativer funktioneller Parameter kann zusätzliche Entscheidungskriterien für die Transplantatwahl liefern. Dabei kommt der Messung der Kniebeuge- und Kniestreckkraft besondere Bedeutung zu, da die Muskelkraft einen etablierten Parameter zur Beurteilung der postoperativen Erholung darstellt (Horstmann et al. 2020). Eine ausreichende und symmetrische Kraft ist in der Literatur mit einer besseren funktionellen Leistungsfähigkeit und einem reduzierten Risiko für erneute Knieverletzungen assoziiert (Grindem et al. 2016, Schmitt et al. 2012). Zur Erfassung der Muskelkraft wird unter anderem die isometrische Kraftmessung eingesetzt. Sie erlaubt eine standardisierte und reproduzierbare Bestimmung der maximalen Muskelkraft (Beere et al. 2022) und korreliert signifikant mit funktionellen Parametern wie patientenberichteten Fragebögen und Return-to-Sport-Kriterien, was ihre klinische Relevanz im postoperativen Follow-up unterstreicht (Zwolski et al. 2015). In diesem Zusammenhang beschreiben Vorarbeiten transplantatspezifische Kraftdefizite mit persistierender Schwächung des Quadrizeps nach QT-Entnahme sowie der Hamstrings nach HT-Entnahme (Young et al. 2025, Kim et al. 2016, Lisee et al. 2019, Kohn et al. 2020, Burks et al. 2005, Keays et al. 2001).

Die Muskelkraft erlaubt jedoch keine differenzierte Aussage über die zugrunde liegende neuromuskuläre Aktivierung der beteiligten Muskulatur. So können kompensatorische Aktivierungsmuster trotz ausreichender Kraftwerte bestehen bleiben (Paredes et al. 2025), die durch reine Kraftmessungen nicht erfasst werden. Persistierende neuromuskuläre Adaptationen können dabei Konsequenzen für die Gelenkmechanik (Zandiyeh et al. 2023) und das Bewegungsmuster (Blackburn et al. 2019) haben. Zur Darstellung der neuromuskulären Aktivierung und Koordination der Quadrizeps- und Hamstringmuskulatur ist die Oberflächen-Elektromyografie (sEMG) das etablierte nicht-invasive Verfahren (Hatamzadeh et al. 2023). Das sEMG bietet auch die Möglichkeit, individuelle Therapieprogramme gezielt anzupassen, indem spezifische Muskelgruppen identifiziert werden, die ein fokussiertes Training benötigen (Li et al. 2020, Cui et al. 2023). Die sEMG-Aktivität nach VKB-Rekonstruktion wird üblicherweise während des Gangs (Schagemann et al. 2021,

Arundale et al. 2015) oder dynamischer Aufgaben (Briem et al. 2023, Georgoulis et al. 2023) gemessen. Studien mit direktem Vergleich von HT- und QT-Transplantaten sind dabei selten. Schagemann et al. untersuchten als eine der wenigen Arbeiten die neuromuskuläre Aktivität nach HT- versus QT-Transplantation und zeigten keinen Unterschied nach mindestens 2 Jahren postoperativ, außer einer erhöhten Aktivität im M. vastus medialis obliquus in der QT-Gruppe (Schagemann et al. 2021). Diese Analyse bezog sich allerdings auf Gangparameter. Unklar bleibt bislang, wie sich die sEMG-Aktivität während maximaler isometrischer Kontraktion nach VKB-Rekonstruktion darstellt, insbesondere im Hinblick auf transplantatspezifische Unterschiede zwischen HT- und QT-Transplantation. Die Erfassung der sEMG-Aktivität während maximaler isometrischer Kontraktion bietet dabei den Vorteil einer hohen Reproduzierbarkeit und verbessert die Vergleichbarkeit neuromuskulärer Aktivierung zwischen Individuen (Huseth et al. 2020).

Vor diesem wissenschaftlichen Hintergrund wurde die vorliegende Dissertationsstudie konzipiert. Ziel war es, Unterschiede zwischen QT- und HT-Transplantaten hinsichtlich klinischer Ergebnisse, isometrischer Muskelkraft und gleichzeitiger sEMG-Aktivität im mittelfristigen postoperativen Verlauf zu untersuchen.

Die Hypothese der Studie war, dass sich die beiden Transplantate hinsichtlich der klinischen Ergebnisse nicht unterscheiden, jedoch Unterschiede in der Muskelkraft und sEMG-Aktivität bestehen.

1.2 Methodik

1.2.1 Studienaufbau und Kollektiv

Die Studie wurde als prospektive Querschnittsstudie konzipiert, um funktionelle Parameter nach abgeschlossener Rehabilitation zu erfassen. Es wurden Patienten nach VKB-Rekonstruktion mittels HT- (n = 36) oder QT-Transplantat (n = 24) mit einer Follow-up-Zeit von mindestens einem Jahr eingeschlossen. Ausgeschlossen wurden unter anderem Personen mit begleitenden Verletzungen des hinteren Kreuzbandes, vorausgegangenen Knieoperationen und früheren VKB-Rupturen.

Über einen Zeitraum von 22 Monaten wurden insgesamt 210 potenzielle Studienteilnehmende anhand der Operationsdokumentation identifiziert und kontaktiert. Nach Anwendung der Ein- und Ausschlusskriterien sowie unter Berücksichtigung der Teilnahmebereitschaft konnten 60 Personen in die Studie eingeschlossen werden. Die Rekrutierung erfolgte aus dem Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf und dem BG-Klinikum Hamburg, wobei ersteres überwiegend HT-Transplantate und das letztere überwiegend QT-Transplantate verwendete.

Alle Teilnehmenden absolvierten eine einmalige 45–60-minütige Untersuchung. Diese bestand zunächst aus zwei Messphasen (Kniestreckung und -beugung), während derer gleichzeitig sEMG- und isometrische Kraftdaten erhoben wurden. Anschließend wurden die klinischen Tests und Fragebögen durchgeführt. Ergänzend wurden demografische und anthropometrische Basisdaten erhoben, darunter Geschlecht, Alter, Körpergröße, Körpergewicht und Body-Mass-Index (BMI) sowie die Follow-up-Dauer.

1.2.2 Isometrische Muskelkraft

Die isometrische Kraft in Kniebeugung und -streckung wurde mittels Kraftmessmaschine (Diers Myoline, Schlangenbad, Deutschland; Pietsch et al. 2021) bei standardisierter Patientenposition erfasst: Becken fixiert, Hände vor der Brust verschränkt und Knie in 90°-Flexion. Für die Kniebeugung und -streckung erfolgte ein identisches Protokoll mit zwei maximalen Kontraktionen von 10 Sekunden, getrennt durch 20 Sekunden Pause. Die operierte und die nicht-operierte Seite wurden simultan gemessen.

Zur Auswertung wurden der Limb-Symmetry-Index (LSI) sowie die normalisierte absolute Kraft für intraindividuelle Seitenvergleiche und Vergleiche zwischen den Transplantatgruppen herangezogen. Der LSI berechnet sich als operiertes/nicht-operiertes Bein × 100 (Kotsifaki et al. 2023). Die Normalisierung erfolgte anhand des Körpergewichts, da die absolute Maximalkraft durch die Körpermasse beeinflusst wird (Ossendorff et al. 2024). Der Hamstring-Quadrizeps-Index wurde als Verhältnis von normierter Kniebeuge- zu Kniestreckkraft × 100 berechnet (Aagaard et al. 1998).

1.2.3 Neuromuskuläre Aktivität

Die Muskelaktivität wurde mittels Velamed Noraxon Ultium EMG-System erfasst. Analysiert wurden M. vastus medialis, M. vastus lateralis, M. semitendinosus und M. biceps femoris. Die Elektrodenplatzierung erfolgte gemäß *Surface Electromyography for the Non-Invasive Assessment of Muscles* (SENIAM)-Richtlinien. Die Haut wurde alkoholdesinfiziert und bei Bedarf rasiert.

Die Auswertung erfolgte mit der Noraxon-MR3-Software. Zur Signalverarbeitung wurden die sEMG-Rohdaten zunächst mit einem FIR-Bandpassfilter (Finite Impulse Response; 80–250 Hz, Lanczos-Filter) bearbeitet, anschließend vollwellengleichgerichtet und schließlich mittels RMS-Algorithmus (Root Mean Square) mit einem gleitenden 50-ms-Fenster geglättet.

In sEMG-Studien ist es üblich, die Muskelaktivität auf die maximale willkürliche Kontraktion (maximum voluntary contraction = MVC) zu normieren, um interindividuelle Unterschiede vergleichbar zu machen. Eine methodische Herausforderung bestand darin, dass die MVC-Messung identisch mit der eigentlichen sEMG-Aufzeichnung war. Um dennoch eine zuverlässige Normalisierung zu ermöglichen, wurde folgendes Verfahren angewandt: Zur Bestimmung des

individuellen MVC wurde über das gesamte 20-Sekunden-Signal hinweg ein gleitendes 500 ms-Fenster (Konrad 2005) gelegt; der höchste gemittelte RMS-Wert diente als Referenzwert. Alle sEMG-Daten wurden auf diesen MVC normiert und als prozentuale Aktivierung (%MVC) dargestellt.

Für die Auswertung wurden Unterschiede zwischen den beiden Transplantatgruppen auf der operierten Seite sowie intraindividuelle Vergleiche zwischen der operierten und nicht-operierten Seite analysiert.

1.2.4 Klinische Untersuchung und Fragebögen

An klinischen Tests wurden Lachman- und Pivot-Shift-Test sowie eine Rolimeter-Messung durchgeführt.

Der Lachman-Test gilt als sensitiver und spezifischer Test zur Diagnose einer VKB-Insuffizienz (Kulwin et al. 2023) und wurde anhand der Anschlagsqualität (hart, weich, fehlend) bewertet (Breusch et al. 2019). Aufgrund der Untersucherabhängigkeit des Lachman-Tests (Peeler et al. 2010) erfolgte ergänzend eine objektive Quantifizierung der anterioren tibialen Translation mittels Rolimeter bei 30° Kniebeugung. Die Messung wurde beidseits dreimal durchgeführt und gemittelt. Der Pivot-Shift-Test ist ein dynamischer vorderer Subluxationstest und die Ergebnisse wurden dichotom (positiv oder negativ) eingeteilt. Ein positiver Befund liegt vor, wenn es bei etwa 20–40° Kniebeugung zu einer sicht- und fühlbaren Reposition der zuvor ventral subluxierten Tibia kommt (Breusch et al. 2019).

Zur subjektiven Beurteilung der Kniefunktion wurden der International Knee Documentation Committee (IKDC), die Tegner Activity Scale (TAS) und der Lysholm Score erhoben. Es handelt sich um etablierte Standardverfahren mit guter Vergleichbarkeit zur Literatur.

Der IKDC ist ein subjektiver Fragebogen zur Erfassung kniegelenkbezogener Symptome, der Funktionsfähigkeit im Alltag und der sportlichen Aktivität (Hefti et al. 1993). Beim TAS wird die alltags- und sportspezifische Funktion allgemein (nicht nur auf das Knie bezogen) von den Patienten selbst bewertet (Tegner und Lysholm 1985). Es wurden prä- und postoperative Werte erhoben, wobei der präoperative Wert den Zeitpunkt vor der VKB-Ruptur und der postoperative Wert den Untersuchungstag widerspiegelt. Zur Beurteilung der Veränderung wurde zusätzlich die Differenz beider Werte berechnet. Der Lysholm Score ist ein Fragebogen zur Erfassung von Symptomen und alltagsbezogener Funktion des Kniegelenks (Lysholm und Gillquist 1982).

1.2.5 Statistik

Um eine ausreichend große Teilnehmerzahl zu gewährleisten, wurde vor Durchführung der Studie eine a priori-Poweranalyse mit G*Power Version 3.1.9.7 durchgeführt. Bei einer erwarteten

Effektstärke mittleren bis großen Ausmaßes (Cohen's d = 0,75; Issaoui et al. 2025), einer angestrebten Teststärke von 80 % und einem zweiseitigen Signifikanzniveau von 5 % ergab sich ein Mindestumfang von 23 Probanden pro Gruppe, um bei den angenommenen Parametern statistisch signifikante Unterschiede mit ausreichender Teststärke untersuchen zu können.

Die statistische Auswertung wurde mit den Programmen Microsoft Excel (Version 2603) und IBM SPSS Statistics (Version 28.0.0.0) durchgeführt. Da die geprüften Variablen im Shapiro-Wilk-Test keine Normalverteilung zeigten, wurde für Vergleiche zwischen den beiden Gruppen der Mann-Whitney-U-Test und für intraindividuelle Vergleiche der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test verwendet. Deskriptive Basismerkmale und Fragebogenergebnisse wurden als Mittelwert ± Standardabweichung dargestellt, während Kraft- und sEMG-Werte als Median und Interquartilsabstand angegeben wurden. Das Signifikanzniveau wurde auf $p < 0,05$ festgelegt.

Angaben zum Meniskusstatus lagen für 19 QT- und 29 HT-Teilnehmende vor; 20 % der Daten fehlten. Da der Umfang fehlender Werte ein relevantes Risiko für systematischen Bias birgt (Sterne et al. 2009), wurde die Variable nicht in weiterführende Analysen einbezogen.

1.3 Ergebnisse

1.3.1 Patientencharakteristika

Insgesamt wurden 60 Teilnehmende in die Analyse eingeschlossen und das Follow-up betrug im Mittel 24,2 ± 9,5 Monate. In der HT-Gruppe erhielten 17 Patienten ein Semitendinosus- und 19 ein kombiniertes Semitendinosus-Gracilis-Transplantat. Von 48 Teilnehmenden mit verfügbaren Meniskusdaten wiesen 23 eine Läsion auf (QT: 13/19; HT: 10/29). Zwischen den Gruppen bestanden keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich Geschlecht, Alter, Follow-up-Dauer, Körpergröße, Körpergewicht oder BMI.

1.3.2 Isometrische Muskelkraft

Die Analyse des LSI ergab weder für die Kniestreck- noch für die Kniebeugekraft signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen (Kniebeuge-LSI: QT 96,9 % [IQR 79,6–116,7] vs. HT 84,8 % [IQR 74,9–96,3], $p = 0,094$; Kniestreck-LSI: QT 90,5 % [IQR 81,8–104,2] vs. HT 93,2 % [IQR 84,6–110,1], $p = 0,583$).

Im Vergleich der auf das Körpergewicht normierten absoluten isometrischen Muskelkraft ließen sich jedoch transplantatspezifische Differenzen nachweisen. Bezüglich der Kniebeugekraft zeigte die HT-Gruppe auf der operierten Seite im Vergleich zur QT-Gruppe signifikant niedrigere normierte Kraftwerte (HT: 1,88 N/kg [IQR 1,08–2,55] vs. QT: 2,37 N/kg [IQR 1,31–3,02], $p = 0,034$). Intraindividuell bestand in der HT-Gruppe ein signifikanter Unterschied zwischen operierter und

nicht-operierter Seite ($p < 0{,}001$), während dies in der QT-Gruppe nicht der Fall war ($p = 0{,}447$). Bezüglich der Kniestreckkraft zeigte die QT-Gruppe eine signifikante intraindividuelle Schwächung ($p = 0{,}045$), nicht jedoch die HT-Gruppe ($p = 0{,}112$), ohne dass sich im Gruppenvergleich ein signifikanter Unterschied ergab (QT: 5,42 N/kg [IQR 4,48–6,28] vs. HT: 4,88 N/kg [IQR 3,51–6,33], $p = 0{,}184$).

Für den HQ-Index ergaben sich weder zwischen den Gruppen noch intraindividuell signifikante Unterschiede ($p = 0{,}136$–$0{,}880$).

1.3.3 Neuromuskuläre Aktivität

Die Analyse der normierten Muskelaktivität (%MVC) zeigte weder zwischen den Gruppen noch intraindividuell signifikante Unterschiede.

Über alle untersuchten Muskeln (M. vastus medialis, M. vastus lateralis, M. semitendinosus, M. biceps femoris) und beide Extremitätenseiten hinweg lagen die Medianwerte zwischen 62,06 %MVC (IQR 56,89–66,99) und 70,15 %MVC (IQR 63,20–73,68), ohne signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen ($p = 0{,}152$–$0{,}902$). Auch in intraindividuellen Vergleichen ließen sich keine signifikanten Seitenunterschiede feststellen ($p = 0{,}128$–$0{,}932$).

1.3.4 Klinische Untersuchung und Fragebögen

Die Stabilitätsmessungen zeigten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen. Der Lachman- und der Pivot-Shift-Test waren bei allen Teilnehmenden negativ. Der Rolimeter-Test ergab mittlere Seitendifferenzen von 1,84 ± 1,71 mm in der QT-Gruppe und 1,44 ± 1,95 mm in der HT-Gruppe ($p = 0{,}290$).

Auch die Ergebnisse der Fragebögen unterschieden sich nicht signifikant zwischen den Gruppen. Die IKDC-Werte lagen bei 86,06 ± 10,84 Punkten in der QT- und 85,95 ± 12,51 Punkten in der HT-Gruppe ($p = 0{,}821$). Der Lysholm-Score betrug in der QT-Gruppe 87,54 ± 11,94 Punkte bzw. 86,97 ± 14,32 Punkte in der HT-Gruppe ($p = 0{,}934$). Die Differenz der TAS-Werte (prä- vs. postoperativ) lag bei 0,96 ± 1,30 in der QT- und 1,06 ± 1,53 in der HT-Gruppe ($p = 0{,}987$).

1.4 Diskussion

Ziel dieser Arbeit war es, die klinischen Ergebnisse, die isometrische Muskelkraft und die neuromuskuläre Aktivität nach VKB-Rekonstruktion zwischen HT- und QT-Transplantaten im mittelfristigen Verlauf zu vergleichen. Beide Transplantattypen zeigten vergleichbare klinische Ergebnisse. Es fanden sich jedoch graftspezifische Kraftdefizite mit reduzierter Kniestreckkraft nach QT- und reduzierter Kniebeugekraft nach HT-Transplantation. Im Gruppenvergleich wies die HT-

Gruppe zudem eine geringere auf das Körpergewicht normierte Kniebeugekraft der operierten Seite auf, bei gleichzeitig fehlenden signifikanten Unterschieden im LSI. Hinsichtlich der neuromuskulären Aktivierung ergaben sich keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen.

In der frühen Phase nach einer VKB-Rekonstruktion werden häufig neuromuskuläre Veränderungen im Sinne einer sogenannten „Hamstring-Dominanz“ (Georgoulis et al. 2023) beschrieben, die mit einer arthrogenen Muskelinhibition (AMI) in Zusammenhang gebracht werden (Sonnery-Cottet et al. 2019). In der vorliegenden Untersuchung ließen sich bei maximal isometrischer Kontraktion nach durchschnittlich zwei Jahren keine statistisch signifikanten Unterschiede hinsichtlich der neuromuskulären Aktivierung zwischen beiden Transplantattypen oder zwischen operiertem und nicht-operiertem Bein nachweisen.

Eine mögliche Erklärung hierfür könnte eine weitgehende Normalisierung der neuromuskulären Aktivierung sein. Allerdings lässt sich anhand der vorliegenden Daten nicht unterscheiden, ob tatsächlich eine vollständige Wiederherstellung vorliegt oder ob sich zentralnervöse bzw. bilaterale Adaptationsstrategien entwickeln. So zeigten Zandiyeh et al., dass sEMG-Muster nach VKB-Rekonstruktion trotz bilateraler Symmetrie weiterhin signifikant von denen gesunder Kontrollpersonen abwichen. Diese Symmetrie wurde als Ausdruck zentralnervöser Adaptationsmechanismen interpretiert (Zandiyeh et al. 2023). Blasimann et al. berichteten zudem, dass ein Jahr postoperativ neuromuskuläre Aktivitätsmuster zwar symmetrisch erscheinen können, diese Symmetrie jedoch nicht auf einer vollständigen Normalisierung des operierten Beins beruht. Vielmehr werden bilaterale Anpassungen, unter anderem im Sinne veränderter Ko-Kontraktionsstrategien, diskutiert, die auch das nicht-operierte Bein betreffen und somit eine scheinbare Symmetrie erzeugen. Eine solche Ko-Kontraktion beschreibt die gleichzeitige Aktivierung antagonistischer Muskelgruppen und führt zu erhöhter Gelenksteifigkeit (Blasimann et al. 2023).

Vor diesem Hintergrund lässt sich das Ausbleiben statistisch signifikanter Unterschiede in der vorliegenden Studie nicht ohne Weiteres als Ausdruck einer vollständigen neuromuskulären Wiederherstellung interpretieren. Nicht auszuschließen ist zudem, dass kleinere Unterschiede in der neuromuskulären Aktivierung bei größerer Fallzahl statistisch signifikant geworden wären. Die a priori berechnete Power für mittlere bis große Effekte wurde erreicht; für kleine Effekte hätte es jedoch deutlich größere Fallzahlen gebraucht. Zudem zeigt sich in Hinblick auf die Ergebnisse von Zandiyeh et al., dass das Fehlen einer gesunden Kontrollgruppe in der Dissertationsstudie eine methodische Limitation darstellt. Aus klinischer Perspektive erscheint so eine weiterführende Verlaufskontrolle über die ersten Rehabilitationsmonate hinaus sinnvoll, da veränderte neuromuskuläre Aktivierungsmuster langfristig mit ungünstigen Belastungsmustern (Blackburn et al. 2019), muskulären Dysbalancen oder degenerativen Veränderungen (Zandiyeh et al. 2023) sowie

mit einem erhöhten Risiko für erneute Verletzungen (Øiestad et al. 2015) in Verbindung gebracht wurden.

In der Kraftmessung unterschied sich der LSI für die Kniestreckung nicht signifikant zwischen den Gruppen – im Einklang mit vielen Studien mit längerem Follow-up (Horteur et al. 2022, Lee et al. 2016, Cavaignac et al. 2017, Herbawi et al. 2022, Roman Salas et al. 2020). Einzelne Studien mit kürzeren Nachbeobachtungszeiten berichten dagegen von geringerer Streckkraft bei QT-Transplantaten (Fischer et al. 2017, Sinding et al. 2020), was auf temporäre Unterschiede in der postoperativen Rehabilitation hindeuten könnte. Auch eine Meta-Analyse von Khiang Tan et al. identifizierte einen reduzierten Kniestreckkraft-LSI bei QT-Transplantat (Khiang Tan et al. 2021), basierend jedoch überwiegend auf den gleichen Studien mit kurzen Nachbeobachtungszeiten (Fischer et al. 2017, Sinding et al. 2020).

Bei der Beugung zeigte sich in unserer Studie ein signifikanter Kraftunterschied mit geringeren Werten in der HT-Gruppe bei den relativ zum Körpergewicht normierten Werten, obwohl der LSI keine Unterschiede erkennen ließ. Erklärungen für die geringere absolute Kniebeugekraft in der HT-Gruppe sind zum einen mögliche Unterschiede im muskulären Trainingszustand zwischen den Gruppen, die bei der vorliegenden Stichprobengröße nicht vollständig auszuschließen sind. Zum anderen könnten transplantatspezifische strukturelle Anpassungen nach Entnahme der Semitendinosus-Sehne (Konrath et al. 2016) eine Rolle spielen. Die Diskrepanz zwischen absoluten Kraftwerten und seitenbezogenen Kennwerten wirft auch methodische Fragen zur Aussagekraft des LSI auf. Sie könnte darauf hindeuten, dass eine reduzierte Kniebeuge-Kapazität nicht ausschließlich die operierte Seite betrifft, sodass bilaterale Adaptationen nach VKB-Rekonstruktion absolute Defizite im Seitenvergleich maskieren. Simonsson et al. konnten zeigen, dass der LSI in Muskelkrafttests nicht zwischen Athleten unterscheidet, die nach VKB-Rekonstruktion ohne erneute Ruptur innerhalb von zwei Jahren zum Sport zurückkehren, und solchen, die eine Re-Verletzung erleiden (Simonsson et al. 2025). Zudem deuten aktuelle Daten darauf hin, dass der LSI allein nicht sensitiv genug ist, um subtile Kraftdefizite zu erkennen (Whitworth et al. 2025). Daher erscheint es sinnvoll, den LSI im Rahmen der Return-to-Sport-Entscheidung durch zusätzliche absolute Parameter zu ergänzen, die nicht auf einem Seitenverhältnis beruhen, um bilaterale oder verdeckte Defizite zu erfassen.

Intraindividuell zeigten sich transplantatspezifische Kraftdefizite: In der QT-Gruppe war die Kniestreckkraft auf der operierten Seite signifikant reduziert im Vergleich zur nicht-operierten Seite, in der HT-Gruppe betraf dies die Kniebeugung. Diese Asymmetrien können funktionelle Auswirkungen haben (Ithurburn et al. 2018) und stehen mit einer erhöhten Reverletzungsrate nach vorderer Kreuzbandrekonstruktion in Zusammenhang (Grindem et al. 2016). Die Ergebnisse unserer Studie legen nahe, dass die Rehabilitationsschwerpunkte abhängig vom verwendeten Transplantat differenzierter gesetzt werden sollten: Nach HT-Entnahme sind gezielte Maßnahmen zur Stärkung

der Hamstrings sinnvoll, während bei QT-Transplantaten ein besonderer Fokus auf die Wiederherstellung der Quadrizepskraft angezeigt ist.

Unsere Ergebnisse zeigen keine signifikanten Unterschiede in der sEMG-Aktivität, jedoch signifikante Unterschiede in der isometrischen Muskelkraft. Unter der Annahme einer proportionalen sEMG-Kraft-Beziehung wären entsprechende Aktivierungsunterschiede zu erwarten gewesen (Milner-Brown und Stein 1975). Deren Ausbleiben trotz signifikanter Kraftdifferenzen spricht dafür, dass die reduzierte Kraftentwicklung nicht allein durch sEMG-Aktivität erklärbar ist, sondern zusätzliche periphere strukturelle oder mechanische Faktoren der Muskel-Sehnen-Einheit zu berücksichtigen sind. Ristanis et al. zeigten, dass auch zwei Jahre nach HT-Transplantation der „electromechanical delay“ (Zeit vom sEMG-Onset bis zur Drehmomententwicklung) signifikant verlängert ist. Als Ursache werden strukturelle Veränderungen des Sehnengewebes mit irregulärer Kollagenorganisation, narbenähnlichen Arealen und reduzierter Steifigkeit diskutiert, die zu einer ineffizienteren Kraftübertragung innerhalb der Muskel-Sehnen-Einheit führen können (Ristanis et al. 2009). Darüber hinaus berichteten Konrath et al., dass zwei Jahre nach HT-Transplantation das kombinierte Volumen der Hamstrings auf der operierten Seite um 12 % reduziert war; dieses Volumendefizit korrelierte signifikant mit dem Defizit der Knieflexionskraft (Konrath et al. 2016). In der Literatur wird zudem eine strukturelle Regeneration der entnommenen Semitendinosus-Sehne beschrieben, wobei die berichteten Raten erheblich variieren. Während einzelne Studien eine nahezu vollständige Regeneration nachweisen (Nikose et al. 2021), zeigen andere deutlich geringere Anteile (Konrath et al. 2016). Jedoch scheint selbst bei nachweisbarer Regeneration die morphologische und biomechanische Qualität des Gewebes verändert zu sein (Messer et al. 2020, Speedtsberg et al. 2022). Für das QT-Transplantat ist die Evidenzlage hinsichtlich persistierender morphologischer Defizite limitiert. Bildgebende Untersuchungen zeigen eine weitgehende Normalisierung der Sehnenmorphologie zwei Jahre postoperativ (Inoue et al. 2023), erfassen jedoch funktionelle und biomechanische Aspekte nur unzureichend. Ein verlängerter „electromechanical delay“, eine Volumenreduktion der Hamstrings sowie qualitative Veränderungen des Sehnengewebes könnten somit für strukturelle Ursachen der Kraftdefizite sprechen, ohne zwangsläufig mit einer reduzierten sEMG-Aktivität einherzugehen. Vor diesem Hintergrund erscheint es plausibel, dass trotz vergleichbarer sEMG-Aktivität gruppenspezifische Unterschiede in der isometrischen Kraft auftreten.

Neben den bereits diskutierten Aspekten weist die Studie einige Limitationen auf. Die Gruppengrößen waren leicht unbalanciert (QT: n = 24, HT: n = 36), wodurch die statistische Aussagekraft insbesondere für kleinere Effekte reduziert sein könnte. Die Rekrutierung aus zwei Zentren mit unterschiedlicher Transplantatpräferenz kann einen zentrumsspezifischen Bias begünstigen. Allerdings stehen beide Zentren unter gleicher unfallchirurgischer Leitung und tauschen regelmäßig ärztliches Personal aus. Meniskusverletzungen wurden nicht ausgeschlossen

und könnten die Muskelkraft und neuromuskuläre Aktivität beeinflusst haben (Akima et al. 2008). Die Umsetzung der Rehabilitationsmaßnahmen wurde nicht standardisiert erfasst, was Unterschiede in muskulärer Adaption und neuromuskulärer Kontrolle begünstigt haben könnte (Petterson et al. 2025, Cui et al. 2023). Die ausschließliche Erhebung isometrischer Messungen beschränkt die Übertragbarkeit auf dynamische Belastungssituationen (Pua et al. 2008, Herbawi et al. 2022) und erschwert die Vergleichbarkeit mit anderen Studien (Runer et al. 2023). Ob sich bei dynamischen, sportnahen Aufgaben transplantatspezifische Unterschiede der neuromuskulären Kontrolle zwischen QT- und HT-Transplantat im mittelfristigen Verlauf zeigen, bleibt Gegenstand zukünftiger Untersuchungen.

Zusammenfassend zeigt die vorliegende Arbeit, dass sowohl QT- als auch HT-Transplantate sehr gute klinische Ergebnisse erzielen. Für die neuromuskuläre Aktivierung ergaben sich keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen, ohne dass daraus eine Gleichwertigkeit der Aktivierung abgeleitet werden kann. Gleichzeitig bestehen transplantatspezifische Kraftdefizite, mit reduzierter Quadrizepskraft bei QT- und verminderter Hamstringkraft bei HT-Transplantat. Zudem wies die HT-Gruppe im Gruppenvergleich eine geringere auf das Körpergewicht normierte Kniebeugekraft auf. Auch wenn unsere Ergebnisse keine direkte Empfehlung zur Transplantat-Wahl erlauben, sprechen die Befunde dafür, dass die Wahl des Transplantats durch individuelle Überlegungen bestimmt werden sollte – etwa bei Patienten mit hohem sportlichen Anspruch oder bei Patienten mit erhöhter Neigung zu anterioren Knieschmerzen.

2. Artikel

Der vollständige Artikel in Originalversion findet sich unverändert auf den nächsten Seiten. Die darin enthaltene journal-spezifische Seitengestaltung und Seitenzählung wurden unverändert übernommen.

Check for updates

Received: 23 September 2025 | Accepted: 27 January 2026

DOI: 10.1002/ksa.70342

KNEE

Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy WILEY

Impact of hamstring versus quadriceps tendon graft on thigh muscle strength and surface electromyography activity after anterior cruciate ligament reconstruction

Benjamin Forquignon[1] | **Tobias Drenck**[2] | **Matthias Krause**[3] | **Ralph Akoto**[2,4] | **Karl-Heinz Frosch**[2,3] | **Götz Welsch**[1,3] | **Alexander Korthaus**[3] | **Grégoire Thürig**[5] | **Dimitris Dalos**[1,3,6]

[1]UKE Athleticum - Center for Athletic Medicine, University Medical Center Hamburg- Eppendorf, Hamburg, Germany

[2]Department of Trauma Surgery, Orthopaedics and Sports Traumatology, BG Hospital Hamburg, Hamburg, Germany

[3]Department of Trauma and Orthopaedic Surgery, University Medical Center Hamburg-Eppendorf, Hamburg, Germany

[4]Department of Orthopaedic Surgery, Trauma Surgery and Sports Medicine, Cologne Merheim Medical Center, Witten/Herdecke University, Cologne, Germany

[5]Articon Spezialpraxis für Gelenkchirurgie, Berner Prothetikzentrum, Salem-Spital, Bern, Switzerland

[6]Institute of Interdisciplinary Exercise Science and Sports Medicine, MSH Medical School Hamburg – University of Applied Sciences and Medical University, Hamburg, Germany

Correspondence

Dimitris Dalos, MSH Medical School Hamburg, University of Applied Sciences and Medical University Institute of Interdisciplinary Exercise Science and Sports Medicine, Am Kaiserkai 1, Hamburg 20457, Germany.
Email: dimitris.dalos@medicalschool-hamburg.de

Abstract

Purpose: To compare quadriceps tendon (QT) and hamstring tendon (HT) autografts regarding isometric thigh muscle strength, surface electromyography (sEMG) activity and clinical outcomes following anterior cruciate ligament reconstruction (ACLR).

Methods: Sixty patients (HT: $n = 36$; QT: $n = 24$) were evaluated at a mean follow-up of 24 months. Maximum isometric strength of knee flexors and extensors was measured and normalised to body weight. Muscle activity of the quadriceps and hamstrings was evaluated using sEMG and normalised to maximum voluntary contraction (MVC). Clinical assessments included the Lachman, Pivot-Shift and Rolimeter tests, as well as patient-reported outcome measures (International Knee Documentation Committee, Lysholm, Tegner activity scale).

Results: Limb symmetry index (LSI) values did not differ significantly between the HT and QT group. Within-group analysis showed reduced flexion strength in the HT group ($p < 0.001$) and reduced extension strength in the QT group ($p = 0.045$). The HT group demonstrated significantly lower bodyweight-normalised flexion strength compared to the QT group ($p = 0.034$), with no difference in extension strength ($p = 0.184$). No significant differences were observed in sEMG activity between graft types or limb sides. Clinical stability and patient-reported outcomes did not differ between groups.

Conclusion: Both grafts provide excellent clinical outcomes. No statistically significant differences in muscle activation were detected at midterm follow-up, yet equivalence should not be inferred from this finding. This is one of the first studies to include sEMG analysis during maximum isometric contractions when comparing QT and HT grafts. Persistent graft-specific weaknesses, quadriceps after QT and hamstrings after HT, highlight the

Abbreviations: %MVC, percentage of maximum voluntary contraction; ACL, anterior cruciate ligament; ACLR, anterior cruciate ligament reconstruction; AMI, arthrogenic muscle inhibition; BMI, body mass index; HQ-index, hamstring–quadriceps index; HT, hamstring tendon; IKDC, International Knee Documentation Committee; LSI, limb symmetry index; MVC, maximum voluntary contraction; QT, quadriceps tendon; sEMG, surface electromyography; TAS, Tegner activity scale.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
© 2026 The Author(s). *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy* published by John Wiley & Sons Ltd on behalf of European Society of Sports Traumatology, Knee Surgery and Arthroscopy.

need for targeted rehabilitation focusing on the affected muscle group to address these imbalances.

Level of Evidence: Level III.

KEYWORDS

anterior cruciate ligament reconstruction, hamstring tendon graft, isometric muscle strength, quadriceps tendon graft, surface electromyography

INTRODUCTION

Anterior cruciate ligament (ACL) injuries are among the most common knee injuries [32], and surgical ACL reconstruction (ACLR) is frequently recommended for physically active individuals to restore joint stability and enable return to sport. Two of the most commonly used graft types are the hamstring tendon (HT) graft, typically involving the semitendinosus tendon alone or in combination with the gracilis tendon, and the quadriceps tendon (QT) graft [36].

HT grafts are relatively easy to harvest [75] and are associated with a low overall complication rate [74], although nerve injury—particularly to the saphenous nerve—remains one of the most frequently reported adverse events [20, 72]. It has been suggested that the use of an HT graft may lead to reduced maximum knee flexor strength after surgery and is therefore considered a potential disadvantage, particularly in physically active individuals [36].

As an alternative to the HT graft, the QT graft has gained increasing popularity in recent years [22, 36, 71]. One of its main advantages is the reduced donor-side morbidity compared to other graft options [63]. Since the hamstring muscles naturally serve as dynamic agonists for the ACL [53], preserving them by the use of the QT graft helps to maintain supportive function. QT graft harvesting may be associated with postoperative anterior knee pain and impaired knee extension strength, and extension deficit [62].

Both graft types demonstrate excellent and comparable clinical outcomes [18, 28, 30, 38, 40, 50, 66] and to date there is no conclusive evidence favouring one graft type over another [47, 58, 76].

Strength recovery is a key element in the rehabilitation process. Adequate and symmetrical strength is linked to better functional performance and reduced risk of subsequent knee injuries [19, 56]. In this context surface electromyography (sEMG) plays a crucial role by providing valuable insights into muscle activation patterns [21]. This allows neuromuscular monitoring of the rehabilitation progress and supports the development of personalised treatment plans by identifying muscles that require targeted training [14, 37]. While sEMG activity after ACLR is commonly evaluated during gait [5, 55, 73] or dynamic tasks [8, 17], there is limited evidence on its behaviour during maximum isometric contractions and direct comparisons between QT and HT grafts are particularly scarce. This study is among the first [55] to compare sEMG-based neuromuscular activation between QT and HT grafts following ACLR.

The aim of this study was to compare HT and QT grafts in terms of isometric thigh muscle strength, sEMG activity and clinical outcomes at midterm follow-up. It was hypothesised that no significant clinical differences would exist between the groups, but that differences in muscle strength and activity would be present.

MATERIALS AND METHODS

Inclusion and exclusion criteria

This study was designed as a prospective cross-sectional follow-up study and included male and female patients aged 18–55 years who had undergone ACLR using either a QT, semitendinosus tendon or combined semitendinosus and gracilis tendon autograft, with a minimum follow-up period of 12 months. Patients were recruited from two tertiary care centres within the same metropolitan area, with one centre routinely utilising QT and the other favouring HT grafts as standard practice. Graft type selection was based on the surgeon's clinical judgement and patient preference. Both centres operate under the same surgical leadership and follow similar postoperative rehabilitation principles. In the HT group, the semitendinosus tendon alone was used in 17 patients, while a combined semitendinosus and gracilis tendon graft was used in 19 patients. In the QT group, a quadriceps tendon graft was used as previously described by Eggeling et al. [14].

A total of 210 potential participants were contacted over a 22-month recruitment period.

Exclusion criteria included comorbidities related to rheumatic diseases; systemic or dystrophic soft tissue disorders; systemic neurological or psychiatric conditions; concomitant posterior cruciate ligament injuries; previous surgeries on either knee; prior ACL ruptures; or fractures involving the knee joint.

14337347, 0, Downloaded from https://esskajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ksa.70342 by Benjamin Fonquignon - Readcube (Labtiva Inc.) , Wiley Online Library on [16/02/2026]. See the Terms and Conditions (https://onlinelibrary.wiley.com/terms-and-conditions) on Wiley Online Library for rules of use; OA articles are governed by the applicable Creative Commons License

Ethical approval

The study was approved by the Ethics Committee of the local Medical Association (2021-100750-BO-ff) and was conducted in accordance with the Declaration of Helsinki. Informed consent was obtained from all participants, and participation was voluntary.

Examination procedure

All participants completed a single 45–60-min session consisting of two measurement phases—knee flexion and knee extension—during which sEMG and isometric strength data were recorded simultaneously.

As a general warm-up, participants were instructed to perform light cycling on an ergometer for 5 min. sEMG electrodes were placed in accordance with the *Surface Electromyography for the Non-Invasive Assessment of Muscles* (SENIAM) guidelines in parallel alignment with the muscle fibres of the following muscles: M. vastus medialis, M. vastus lateralis, M. semitendinosus and M. biceps femoris. If necessary, the skin was shaved using a disposable razor and thoroughly cleaned with an alcohol-based disinfectant wipe to ensure strong electrode contact and low skin impedance. All cables were secured to minimise motion artifacts.

Subsequently, participants were positioned on the strength measurement device using the Diers Myoline device (Schlangenbad, Germany) [48]. Participants were seated with their pelvis positioned as far back as possible, the spine upright, and their hands crossed in front of the chest. The knee joint was maintained at a 90° angle, as determined by the Myoline device setup. Prior to data collection, participants familiarised themselves with the correct seating position and practiced the movement pattern a few times.

An identical protocol was used for both sEMG and strength assessments of the hamstrings and quadriceps, which included two periods of 10-s maximum isometric contraction, with 20 s of rest in between. Testing began with knee extension followed by knee flexion. Both the operated and non-operated sides were measured simultaneously but analysed independently.

Finally, participants completed the clinical tests and questionnaires.

Strength assessment

Relative strength was evaluated using the limb symmetry index (LSI), defined as the strength of the operated leg divided by the strength of the unoperated leg, multiplied by 100 [34]. LSI values > 100% indicate greater strength on the operated side, whereas values < 100% indicate reduced strength. Absolute isometric strength values were recorded in Newtons and normalised to body weight (in N/kg) [45]. Both within-group differences (between operated and non-operated limb) and between-group differences (between graft types) were assessed.

In addition, the Hamstring-Quadriceps-index (HQ-index) was used to demonstrate the proportions of quadriceps and hamstring muscle strength. It is calculated by dividing the normalised maximum knee flexion strength by the normalised maximum knee extension strength, multiplied by 100 [1].

sEMG

The Velamed Noraxon Ultium EMG system was used as the sEMG device with a sampling rate of 2000 Hz. The data were transmitted in real time via Bluetooth to a laptop. Data analysis was performed using Noraxon MR3 software. Raw sEMG signals were first filtered using a finite impulse response (FIR) bandpass filter with frequencies between 80 and 250 Hz [33] in a Lanczos window. The filtered signals were then full-wave rectified and smoothed using a root mean square (RMS) algorithm with a 50 ms window.

To determine the individual maximum neuromuscular activation capacity, a 500 ms moving RMS window was applied across the entire 20-s signal [33]. Visual inspection was used to detect and exclude motion artifacts or signal dropouts prior to analysis. The highest average RMS value within this window was defined as the maximum voluntary contraction (MVC) reference for normalisation. All subsequent EMG data were normalised to this MVC value and expressed as a percentage of maximum activation (%MVC).

Between-group differences were assessed by evaluating %MVC values on the operated side across the two graft groups. Within-group differences were evaluated by comparing the %MVC values of the operated and non-operated sides within each individual.

Clinical outcome

ACL stability was assessed via Lachman test [6], Pivot-Shift test [6] and Rolimeter test [12]. All examinations were performed by a single examiner. The endpoint quality of the Lachman test was assessed as firm, soft or absent [43]. A positive test was indicated by a soft or absent endpoint, while a negative test showed a firm endpoint. To supplement the subjective assessment, a Rolimeter was used to objectively measure anterior translation at 30° knee flexion angle. Three measurements were taken per side, and the arithmetic mean of both sides was calculated.

Patient-reported outcome measures included the International Knee Documentation Committee (IKDC) questionnaire, the Tegner activity scale (TAS) and the Lysholm knee score.

14337347, 0, Downloaded from https://esska-journals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ksa.70342 by Benjamin Forquignon - Readcube (Labtiva Inc.) , Wiley Online Library on [16/02/2026]. See the Terms and Conditions (https://onlinelibrary.wiley.com/terms-and-conditions) on Wiley Online Library for rules of use; OA articles are governed by the applicable Creative Commons License

For TAS, both preoperative and postoperative values were provided. The preoperative value was defined as the time just before the ACL rupture, while the postoperative time was defined as the day of the examination.

Statistical analysis

The statistical analysis was conducted using Microsoft Excel version 2412 and IBM SPSS Statistics version 28.0.0.0. The Shapiro–Wilk test was performed to evaluate the normality of the data. The Mann–Whitney *U* test was used to assess significant differences between groups. For within-group differences the Wilcoxon Signed-Rank Test was performed. Descriptive baseline characteristics and patient-reported outcomes are presented as mean ± standard deviation. Strength and sEMG values are reported as median and interquartile range. Data on concomitant meniscal injury were collected, however, information was missing in 20% of participants. Given the associated risk of systematic bias [65], this variable was not included in adjusted analyses. The significance level was set at $p < 0.05$.

A-priori power analysis was conducted using G*Power version 3.1.9.7 to determine the required sample size for detecting statistically significant differences between two independent groups. Based on anticipated medium-high effect sizes (Cohen's $d = 0.75$) [26], a power of 0.80, and a two-tailed significance level of $\alpha = 0.05$, the required sample size was calculated to be 23 participants per group.

RESULTS

Participant characteristics

A total of 60 participants were included in the study. There were no statistically significant differences between the two groups regarding sex, age, follow-up duration, height, weight or BMI (body mass index), as summarised in Table 1. Meniscal injury was documented in 23 of 48 participants with available data (QT: 13/19; HT: 10/29).

Strength measurement

Regarding relative strength, no significant group differences were found in LSI values. LSI for knee flexion was 96.9% (interquartile range [IQR] 79.6–116.7) in the QT group and 84.8% (IQR 74.9–96.3) in the HT group ($p = 0.094$). LSI for knee extension was 90.5% (IQR 81.8–104.2) in the QT group and 93.2% (IQR 84.6–110.1) in the HT group ($p = 0.583$). The LSI results for knee flexion and extension are presented in Figure 1.

Regarding knee flexion strength, within-group analysis showed a statistically significant difference between the operated and non-operated side in the HT group (HT: $p < 0.001$; QT: $p = 0.447$). In between-group analysis, the HT group demonstrated significantly lower bodyweight-normalised knee flexion strength on the operated side compared to the QT group ($p = 0.034$; HT: 1.88 N/kg [IQR 1.08–2.55] vs. QT: 2.37 N/kg [IQR 1.31–3.02]). Normalised knee flexion strength for both graft types and limb sides is shown in Figure 2.

Regarding knee extension strength, within-group analysis showed a statistically significant difference only in the QT group (QT: $p = 0.045$; HT: $p = 0.112$), with lower extension strength on the operated side. Between groups, however, the difference in bodyweight-normalised extension strength on the operated side was not statistically significant ($p = 0.184$; QT: 5.42 N/kg [IQR 4.48–6.28] vs. HT: 4.88 N/kg [IQR 3.51–6.33]). Normalised knee extension strength for both graft types and limb sides is illustrated in Figure 3.

For the HQ-index, no statistically significant differences were observed between graft types, neither on the operated side ($p = 0.276$) nor on the non-operated

TABLE 1 Participant characteristics by graft type.

	Quadriceps tendon graft	Hamstring tendon graft	*p*-value
Number	$n = 24$; 40% of total count	$n = 36$; 60% of total count	
Sex	$m = 14$, $f = 10$; $m = 58.3\%$, $f = 41.7\%$	$m = 21$, $f = 15$; $m = 58.3\%$, $f = 41.7\%$	
Age at time of examination (years)	30.5 ± 8.29	33.56 ± 10.62	0.319
Follow-up time (months)	26.1 ± 10.7	22.9 ± 8.6	0.305
Height (m)	1.76 ± 0.11	1.76 ± 0.09	0.946
Weight (kg)	78.04 ± 15.00	80.04 ± 17.23	0.774
Body mass index (BMI) (kg/m²)	24.90 ± 3.11	25.60 ± 4.41	0.774

Note: Values are presented as mean ± standard deviation or absolute numbers, as appropriate.

14337347, 0, Downloaded from https://esska-journals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ksa.70342 by Benjamin Fonquignon - Readcube (Labtiva Inc.) , Wiley Online Library on [16/02/2026]. See the Terms and Conditions (https://onlinelibrary.wiley.com/terms-and-conditions) on Wiley Online Library for rules of use; OA articles are governed by the applicable Creative Commons License

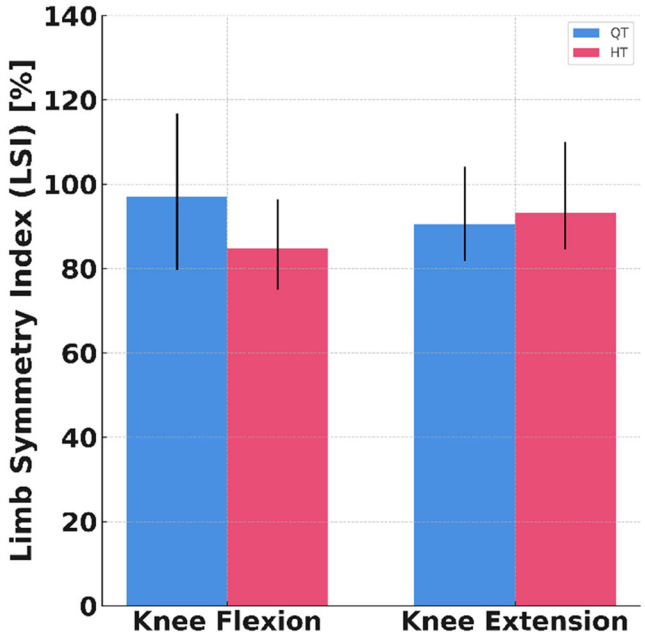


FIGURE 1 Limb symmetry index (LSI) of knee flexion and extension by graft type (quadriceps tendon [QT] vs. hamstring tendon [HT]). Between-group comparisons showed no significant differences for knee flexion ($p = 0.094$) or knee extension ($p = 0.583$). Bars represent median ± interquartile range.

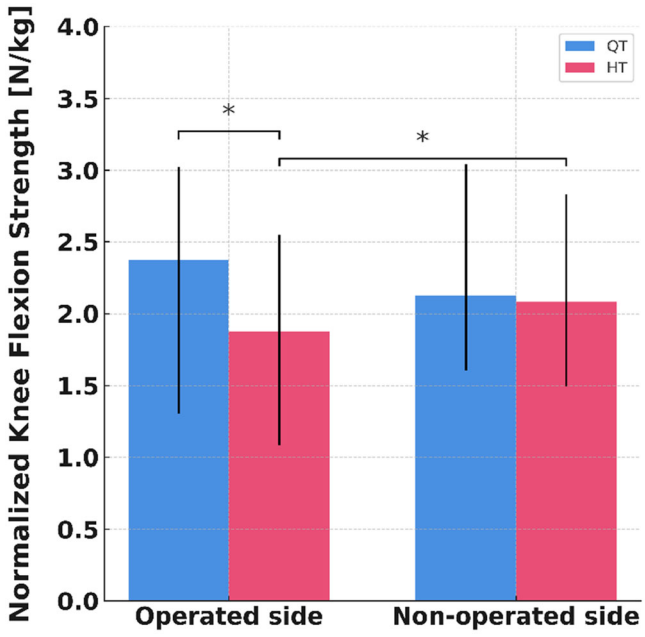


FIGURE 2 Normalised isometric knee flexion strength (N/kg) by graft type (quadriceps tendon [QT] vs. hamstring tendon [HT]) and limb side (operated vs. non-operated). The HT group showed lower flexion strength than the QT group ($p = 0.034$). Within–group analysis revealed reduced flexion strength on the operated side in the HT group ($p < 0.001$), whereas no within-group deficit was observed in the QT group ($p = 0.447$). Bars represent median ± interquartile range. Asterisks (*) indicate statistically significant differences ($p < 0.05$).

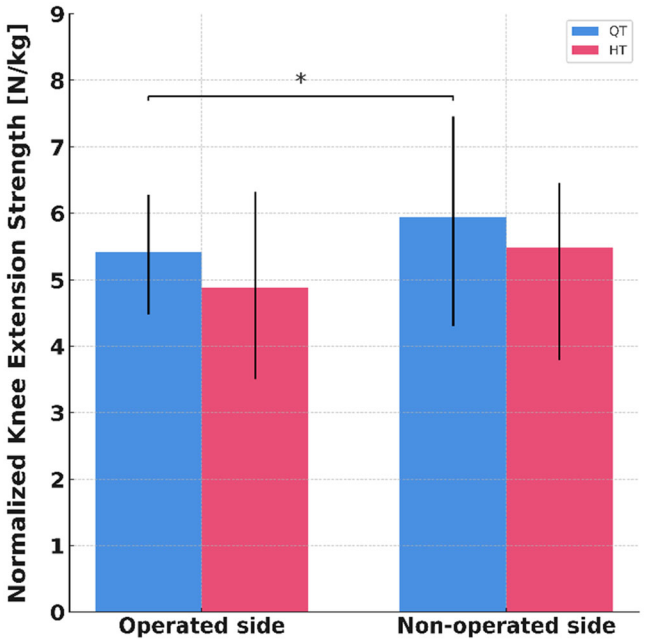


FIGURE 3 Normalised isometric knee extension strength (N/kg) by graft type (quadriceps tendon [QT] vs. hamstring tendon [HT]) and limb side (operated vs. non-operated). No significant between-group difference for the operated side was detected ($p = 0.184$). Within-group analysis showed reduced extension strength on the operated side in the QT group ($p = 0.045$), while no within-group difference occurred in the HT group ($p = 0.112$). Bars represent median ± interquartile range. Asterisks (*) indicate statistically significant differences ($p < 0.05$).

side ($p = 0.880$). Within-group analysis likewise revealed no significant side-to-side differences in either group (QT: $p = 0.503$; HT: $p = 0.136$). Detailed HQ-index values for both graft types are provided in Table 2.

sEMG

Normalised sEMG activity (%MVC) during maximum isometric contraction ranged from 62.06 (IQR 56.89–66.99) to 70.15 (IQR 63.20–73.68) across all muscles and limb sides. The normalised sEMG activation patterns across all examined muscles are displayed in Figure 4. Median activation of the semitendinosus muscle was 69.44%MVC (IQR 63.94–72.19) in the QT group and 70.15%MVC (IQR 63.20–73.68) in the HT group. Similarly, for the vastus medialis, values were 65.81%MVC (IQR 58.85–70.46) in the QT group and 62.75%MVC (IQR 57.32–65.83) in the HT group. In between-group analysis, no statistically significant differences in normalised sEMG activity were observed between the QT and HT groups for any of the examined muscles ($p = 0.152$–0.902). Also, within-group analysis between the operated and non-operated sides showed no significant differences in normalised sEMG activity within either transplant group ($p = 0.128$–0.932).

14337347, 0, Downloaded from https://esska-journals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ksa.70342 by Benjamin Fonquignon - Readcube (Labtiva Inc.) , Wiley Online Library on [16/02/2026]. See the Terms and Conditions (https://onlinelibrary.wiley.com/terms-and-conditions) on Wiley Online Library for rules of use; OA articles are governed by the applicable Creative Commons License

TABLE 2 Hamstring–Quadriceps-index (HQ-index) for QT and HT grafts, expressed as median and interquartile range.

	Quadriceps tendon (QT) graft	Hamstring tendon (HT) graft	*p*-values (between-group)
HQ-index operated side (%)	38.53 (interquartile range [IQR] 29.11–60.13)	37.20 (IQR 25.24–44.37)	0.276
HQ-index non-operated side (%)	40.26 (IQR 32.82–52.87)	40.86 (IQR 31.55–47.78)	0.880
p-values (within-group)	0.503	0.136	

Note: Within-group and between-group *p*-values are provided.

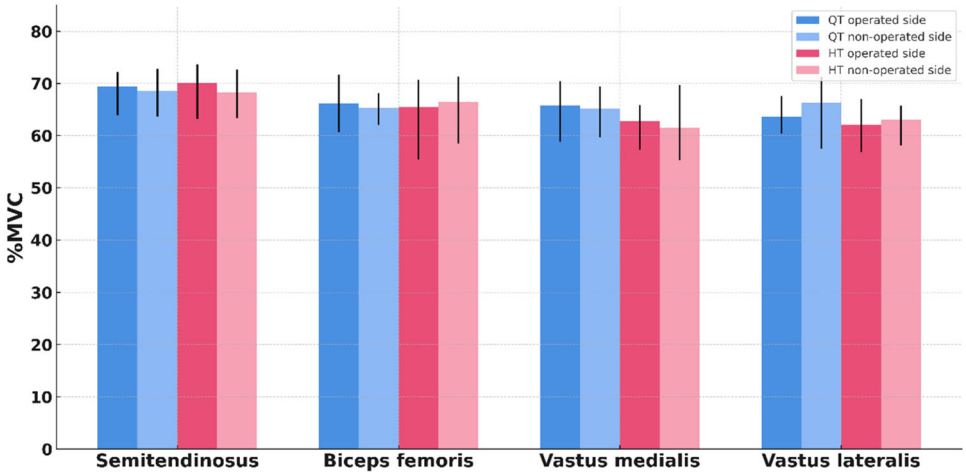


FIGURE 4 Normalised surface electromyography (sEMG) activity (%MVC) by graft type (quadriceps tendon [QT] vs. hamstring tendon [HT]), limb side (operated vs. non-operated side) and muscle group. No significant differences were found between graft types or between operated and non-operated limbs ($p = 0.152–0.902$). Bars represent median ± interquartile range.

TABLE 3 Clinical outcome measures (Rolimeter test), expressed as mean ± standard deviation.

	Quadriceps tendon graft	Hamstring tendon graft	*p*-values
Rolimeter side-to-side difference (mm)	1.84 ± 1.71 (95% confidence interval [CI]: 1.15–2.53)	1.44 ± 1.95 (95% CI: 0.80–2.08)	0.290

Note: The side-to-side difference was calculated as: Rolimeter operated side minus Rolimeter non-operated side.

Clinical outcome

There were no statistically significant differences between the groups in any of the stability tests. The mean Rolimeter side-to-side differences were positive, indicating greater anterior laxity on the operated leg on average (mean difference: QT 1.84 ± 1.71 mm vs. HT 1.44 ± 1.95 mm). The Rolimeter side-to-side differences are reported in Table 3. The Lachman and Pivot-Shift tests were negative in 100% of cases in both groups. No reinjuries, graft failures, or postoperative complications were reported during the follow-up period.

There were no statistically significant differences regarding the questionnaires. The mean values of the TAS difference were positive, indicating that the preoperative TAS score was higher than the postoperative score at the time of evaluation. The patient-reported outcome measures (IKDC, Lysholm and TAS) are displayed in Table 4.

DISCUSSION

This study demonstrates that both HT and QT grafts lead to very good clinical outcomes at midterm follow-up after ACLR, with no significant differences in patient-reported outcome measures (IKDC, Lysholm, TAS) or clinical stability tests (Rolimeter, Lachman test, Pivot-Shift test). Within-group analyses revealed graft-specific strength deficits: reduced extension strength in the QT group and reduced flexion strength in the HT group. Despite no differences in LSI, HT grafts were associated with significantly lower bodyweight-normalised knee flexion strength

14337347, 0, Downloaded from https://esskajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ksa.70342 by Benjamin Fonquignon - Readcube (Labtiva Inc.) , Wiley Online Library on [16/02/2026]. See the Terms and Conditions (https://onlinelibrary.wiley.com/terms-and-conditions) on Wiley Online Library for rules of use; OA articles are governed by the applicable Creative Commons License

TABLE 4 Patient-reported outcome scores (International Knee Documentation Committee [IKDC], Lysholm and Tegner activity score [TAS]) for QT and HT grafts. Values are presented as mean ± standard deviation. The TAS difference was calculated as: Preoperative TAS minus postoperative TAS.

	Quadriceps tendon (QT) graft	Hamstring tendon (HT) graft	*p*-values
IKDC	86.06 ± 10.84	85.95 ± 12.51	0.821
Lysholm Score	87.54 ± 11.94	86.97 ± 14.32	0.934
TAS preoperative	7.00 ± 1.77	6.72 ± 2.16	0.612
TAS postoperative	6.04 ± 2.01	5.67 ± 2.08	0.441
TAS difference	0.96 ± 1.30	1.06 ± 1.53	0.987

compared to QT grafts. No significant differences were found in muscle activity as assessed by sEMG, neither between the graft groups nor between the operated and non-operated sides.

Neuromuscular alterations in thigh muscles are commonly observed in the early period following ACLR. A common pattern referred to as 'hamstrings-dominant' strategy [17] is decreased quadriceps sEMG activity and increased hamstring activity, sometimes at the same time [60]. This may serve as a protective mechanism to mitigate the risk of re-injury [46]. Arthrogenic muscle inhibition (AMI) has been suggested as a possible contributing factor to this phenomenon [64]. While a hamstring-dominant strategy may enhance the dynamic stability of the knee joint [51], its persistence in the long-term could negatively affect joint mechanics, increase cartilage stress and promote knee osteoarthritis [67]. However, none of these studies differentiate between graft types—and there is a particular lack of studies examining the distinct effects of HT versus QT grafts on neuromuscular activation patterns following ACLR. Our study is among the first to specifically examine sEMG activity of the thigh muscles comparing QT and HT grafts. A similar approach was taken by Schagemann et al., who also investigated QT versus HT graft-specific effects. They reported no significant differences in neuromuscular activation, except for increased vastus medialis obliquus activity on the operated side in the QT group during walking [55].

In our study, however, we did not observe this hamstring-dominant pattern. Neither between-group comparisons nor within-group comparisons between the operated and non-operated legs revealed significant differences in normalised sEMG activity of the quadriceps or hamstrings. These findings indicate that no statistically significant differences in neuromuscular activation were observed between graft types at midterm follow-up during maximum isometric contraction. For correct interpretation, it should also be noted that normalised activation values around 60–70%MVC are physiologically expected, as sEMG amplitudes naturally vary and decline during prolonged maximal efforts [15], and the brief MVC peak therefore cannot be matched by the 20-s average. Clinically, submaximal normalised amplitudes during sustained maximal efforts are typically expected and do not imply impaired activation [9, 49].

Wu et al. showed that the initially increased hamstring activity in the early postoperative phase decreased over the course of the first year [73], possibly aligning even more over time. Nevertheless, given that altered sEMG patterns have been associated with joint overload [7] and increased reinjury risk [44], monitoring sEMG recovery remains important. Biofeedback physiotherapy via sEMG can be a useful tool in reversing the AMI and can be a valuable part of the rehabilitation process, especially in the early postoperative phase [3, 60].

In terms of strength evaluation, the operated leg is significantly weaker in knee extension strength compared to the non-operated leg in the QT group. This is in line with other studies that describe strength deficits in the operated limb even years after ACLR [31, 39, 41]. However, the within-group extension deficit observed in the QT group ($p = 0.045$) should be interpreted cautiously, as multiple comparisons may increase the risk of type I error. Additionally, there is a significant difference in knee flexion strength between the operated and non-operated leg in the HT group of our study, consistent with findings from other studies using the HT graft [4, 10, 29, 31]. These findings suggest a graft-specific pattern of long-term strength deficits, highlighting that both graft types lead to muscle-specific weakness on the operated side. Although these graft-specific strength deficits did not translate into differences in clinical scores, persistent quadriceps or hamstring weakness may still be relevant for sport-specific performance, reinjury risk and long-term joint health. Strength asymmetries have been shown to impair functional tasks [27] and have also been associated with an increased risk of reinjury after ACLR [19]. Furthermore, altered knee biomechanics after ACLR have been linked to early cartilage degeneration [52].

In our study, no significant difference in isometric knee extension strength, as measured by the LSI, was observed between the QT and HT groups. This aligns with the general findings in the literature, which typically show no difference in isokinetic extensor strength between the QT graft and HT graft [11, 25, 36].

However, some studies have reported significantly weaker knee extension strength with the QT graft after ACLR compared to the HT graft [61], but these studies usually have a shorter follow-up period of around 6 months [13, 16, 24]. This suggests that these differences may be more short-term, possibly due to variations in rehabilitation programs and tend to resolve with longer rehabilitation periods.

14337347, 0, Downloaded from https://esska-journals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ksa.70342 by Benjamin Fonquignon - Readcube (Labtiva Inc.) , Wiley Online Library on [16/02/2026]. See the Terms and Conditions (https://onlinelibrary.wiley.com/terms-and-conditions) on Wiley Online Library for rules of use; OA articles are governed by the applicable Creative Commons License

A meta-analysis by Khiang Tan et al., including 20 studies and 28,621 patients with either HT or QT graft, found a lower knee extension strength LSI with the QT graft [30]. However, this specific comparison is based on only three studies [16, 36, 61]. Of these, two had a follow-up time of 1 year [16, 61]. The only study with a 2-year follow-up found no significant difference [36]. So while the meta-analysis by Khiang Tan et al. identifies a difference in knee extension strength, this again appears to be influenced by the shorter follow-up period rather than the type of graft used.

No significant differences were found in LSI values for knee flexion strength between the HT and QT groups. Reduced knee flexion strength in patients receiving HT grafts has been commonly described in the literature [23, 54]. In contrast to these studies, which typically report isokinetic peak torque (Nm) or LSI, our study assessed isometric force normalised to bodyweight (N/kg) in addition to LSI. This parameter has also been applied in recent work [34]. Using bodyweight-normalised values, we observed significantly lower knee flexion strength in the HT group compared to the QT group. This discrepancy between relative and absolute normalised strength measures may suggest a general reduction in hamstring capacity following HT graft harvesting, potentially affecting both limbs and thus remaining undetected by LSI. This methodological limitation of LSI has also been highlighted recently by Whitworth et al. [69]. Alternatively, baseline differences in physical capacity or rehabilitation adherence may have contributed to the lower absolute strength observed in the HT cohort.

The limitations of this study must be recognised. First, the sample size is relatively small, increasing the risk of type II errors. Furthermore, group sizes were slightly unbalanced (QT: 24, HT: 36), but both exceeded the a priori sample size for medium–large effects. Smaller effects may have remained undetected, especially in the sEMG outcomes. Additionally, the unequal distribution of concomitant meniscal pathology between groups represents a potential source of residual confounding, as the higher prevalence of meniscal injury in the QT group could theoretically be associated with less favourable outcomes. Aside from that, the use of isometric testing restricts the interpretation of dynamic muscle performance [53]. Although a single rater minimised inter-tester variability, no intra-rater or test–retest reliability was assessed. However, previous studies have demonstrated excellent reproducibility of the Myoline device [57], and the Noraxon EMG system is well established in lower-limb neuromuscular research [8, 46, 55]. The lack of preoperative baseline data represents a further limitation. In particular, time to surgery is known to affect preoperative muscle atrophy [70] and postoperative clinical outcomes [59, 68], but corresponding data were not available. Moreover, the study did not include a control group of healthy participants, which limits conclusions about full postoperative normalisation. Lastly, recruitment from two centres with different graft preferences may have introduced centre-related bias due to minor differences in postoperative guidance or rehabilitation.

The results of this study underscore the importance of individualised rehabilitation protocols tailored to the specific graft type. While the Aspetar 2023 Clinical Practice Guideline primarily focuses on bone-patellar-tendon and HT autografts [34], its recommendation to restore graft-specific quadriceps and hamstring strength aligns with our findings and is expanded here by providing comparable data for QT grafts. In our cohort, HT autografts showed residual hamstring weakness, whereas QT autografts demonstrated quadriceps deficits, highlighting the need to prioritise the respective muscle groups during strengthening. Recent recommendations further emphasise a modern, individualised rehabilitation framework integrating safe open-kinetic-chain quadriceps work, neurocognitive components and patient-specific support strategies to optimise recovery [42]. Our findings fit well within this evolving perspective, as they reinforce the notion that rehabilitation should be tailored to the patient's graft type rather than follow a uniform protocol. The lack of significant differences in subjective clinical scores like IKDC, Tegner or Lysholm score and sEMG activity in the thigh muscles suggests that both graft types are viable options for ACLR, with the choice largely dependent on surgeon expertise, patient preference and individual considerations [2, 30, 35, 58]. While the observed muscle strength differences did not translate into measurable clinical impairment in our cohort, such imbalances might be of greater relevance in elite athletes.

CONCLUSION

Both QT and HT autografts provide excellent midterm clinical outcomes and comparable isometric knee flexion and extension strength after ACLR. No statistically significant differences in thigh muscle activation were observed between graft types. Still, equivalence should not be inferred from this finding. Distinct graft-specific weaknesses persist, quadriceps deficits after QT and hamstring deficits after HT, with the latter showing significantly lower bodyweight-normalised hamstring strength despite similar LSI values. As one of the first studies to compare QT and HT grafts using sEMG during maximum isometric contractions at midterm follow-up, these findings highlight the need for graft-specific rehabilitation protocols that prioritise quadriceps strengthening after QT and hamstring strengthening after HT in order to address these imbalances effectively.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

All authors contributed to the study conception and design. Material preparation, data collection and analysis were

14337347, 0, Downloaded from https://esska-journals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ksa.70342 by Benjamin Fonquignon - Readcube (Labtiva Inc.) , Wiley Online Library on [16/02/2026]. See the Terms and Conditions (https://onlinelibrary.wiley.com/terms-and-conditions) on Wiley Online Library for rules of use; OA articles are governed by the applicable Creative Commons License

performed by Benjamin Forquignon, Dimitris Dalos, Grégoire Thürig and Tobias Drenck. The first draft of the manuscript was written by Benjamin Forquignon and all authors commented on previous versions of the manuscript. All authors read and approved the final manuscript.

ACKNOWLEDGEMENTS
Open Access funding enabled and organized by Projekt DEAL.

CONFLICT OF INTEREST STATEMENT
The authors declare no conflicts of interest.

DATA AVAILABILITY STATEMENT
The datasets generated and analysed during the current study are not publicly available due to privacy restrictions but are available from the corresponding author on reasonable request.

ETHICS STATEMENT
All procedures performed in studies involving human participants were in accordance with the ethical standards of the institutional and/or national research committee and with the 1964 Helsinki Declaration and its later amendments. The study was approved by the Ethics Committee of the Medical Association Hamburg, Germany (2021-100750-BO-ff). Written informed consent was obtained from all individual participants included in the study.

ORCID
Benjamin Forquignon https://orcid.org/0009-0005-7035-6795
Tobias Drenck https://orcid.org/0000-0002-5265-5004
Matthias Krause https://orcid.org/0000-0002-7345-6506
Ralph Akoto https://orcid.org/0000-0002-5470-4981
Karl-Heinz Frosch https://orcid.org/0000-0002-9195-1869
Götz Welsch https://orcid.org/0000-0002-0757-9233
Alexander Korthaus https://orcid.org/0000-0001-5361-6173
Grégoire Thürig https://orcid.org/0000-0003-0924-133X
Dimitris Dalos https://orcid.org/0000-0002-4055-8856

REFERENCES
1. Aagaard P, Simonsen EB, Magnusson SP, Larsson B, Dyhre-Poulsen P. A new concept for isokinetic hamstring: quadriceps muscle strength ratio. Am J Sports Med. 1998;26:231–7.
2. Almqvist KF, Willaert P, De Brabandere S, Criel K, Verdonk R. A long-term study of anterior cruciate ligament allograft reconstruction. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. 2009;17:818–22.
3. Ananías J, Vidal C, Ortiz-Muñoz L, Irarrázaval S, Besa P. Use of electromyographic biofeedback in rehabilitation following anterior cruciate ligament reconstruction: a systematic review and meta-analysis. Physiotherapy. 2024;123:19–29.
4. Ardern CL, Webster KE, Taylor NF, Feller JA. Hamstring strength recovery after hamstring tendon harvest for anterior cruciate ligament reconstruction: a comparison between graft types. Arthrosc J Arthrosc Rel Surg. 2010;26:462–9.
5. Arundale AJH, Lapham K, Silvers HJ, Marmon A, Snyder-Mackler L. Medial and lateral hamstring muscle activity differs for ACL graft types. Orthop J Sports Med. 2015;3:2325967115S00103. https://doi.org/10.1177/2325967115S00103
6. Benjaminse A, Gokeler A, Van Der Schans CP. Clinical diagnosis of an anterior cruciate ligament rupture: a meta-analysis. J Orthop Sports Phys Ther. 2006;36:267–88.
7. Blackburn T, Pietrosimone B, Goodwin JS, Johnston C, Spang JT. Co-activation during gait following anterior cruciate ligament reconstruction. Clin Biomech. 2019;67:153–9.
8. Briem K, Sigurbjörnsson S, Kristjánsson H, Árnason Á. Hamstring muscle activation during single leg jump after anterior cruciate ligament reconstruction with a semitendinosus graft. BMJ Open Sport Exerc Med. 2023;9(Suppl 1):A18.
9. Burden A. How should we normalize electromyograms obtained from healthy participants? What we have learned from over 25 years of research. J Electromyogr Kinesiol. 2010;20:1023–35.
10. Burks RT, Crim J, Fink BP, Boylan DN, Greis PE. The effects of semitendinosus and gracilis harvest in anterior cruciate ligament reconstruction. Arthrosc J Arthrosc Rel Surg. 2005;21:1177–85.
11. Cavaignac E, Coulin B, Tscholl P, Nik Mohd Fatmy N, Duthon V, Menetrey J. Is quadriceps tendon autograft a better choice than hamstring autograft for anterior cruciate ligament reconstruction? A comparative study with a mean follow-up of 3.6 years. Am J Sports Med. 2017;45:1326–32.
12. Cimino F, Volk BS, Setter D. Anterior cruciate ligament injury: diagnosis, management, and prevention. Am Fam Physician. 2010;82:917–22.
13. Csapo R, Hoser C, Gföller P, Raschner C, Fink C. Fitness, knee function and competition performance in professional alpine skiers after ACL injury. J Sci Med Sport. 2019;22:S39–43.
14. Cui H, Cao Z, Wang S, Zhang H, Chen Z, Wu X, et al. Surface electromyography characteristics of patients with anterior cruciate ligament injury in different rehabilitation phases. Front Physiol. 2023;14:1116452.
15. Enoka RM, Duchateau J. Muscle fatigue: What, why and how it influences muscle function. J Physiol. 2008;586:11–23.
16. Fischer F, Fink C, Herbst E, Hoser C, Hepperger C, Blank C, et al. Higher hamstring-to-quadriceps isokinetic strength ratio during the first post-operative months in patients with quadriceps tendon compared to hamstring tendon graft following ACL reconstruction. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. 2017;26:418–25.
17. Georgoulis JD, Melissaridou D, Patras K, Megaloikonomos PD, Trikoupis I, Savvidou OD, et al. Neuromuscular activity of the lower-extremities during running, landing and changing-of-direction movements in individuals with anterior cruciate ligament reconstruction: a review of electromyographic studies. J Exp Orthop. 2023;10:43.
18. Grassi A, Pizza N, Al-zu'bi BBH, Fabbro GD, Lucidi GA, Zaffagnini S. Clinical outcomes and osteoarthritis at very long-term follow-up after ACL reconstruction: a systematic review and meta-analysis. Orthop J Sports Med. 2022;10:23259671211062238.
19. Grindem H, Snyder-Mackler L, Moksnes H, Engebretsen L, Risberg MA. Simple decision rules can reduce reinjury risk by 84% after ACL reconstruction: the Delaware-Oslo ACL cohort study. Br J Sports Med. 2016;50:804–8.
20. Hardy A, Casabianca L, Andrieu K, Baverel L, Noailles T. Complications following harvesting of patellar tendon or hamstring tendon

14337347, 0, Downloaded from https://esskajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ksa.70342 by Benjamin Forquignon - Readcube (Labtiva Inc.) , Wiley Online Library on [16/02/2026]. See the Terms and Conditions (https://onlinelibrary.wiley.com/terms-and-conditions) on Wiley Online Library for rules of use; OA articles are governed by the applicable Creative Commons License

grafts for anterior cruciate ligament reconstruction: systematic review of literature. Orthop Traumatol Surg Res. 2017;103:S245–8.
21. Hatamzadeh M, Sharifnezhad A, Hassannejad R, Zory R. Discriminative sEMG-based features to assess damping ability and interpret activation patterns in lower-limb muscles of ACLR athletes. Biomed Signal Process Control. 2023;83:104665.
22. Heffron WM, Hunnicutt JL, Xerogeanes JW, Woolf SK, Slone HS. Systematic review of publications regarding quadriceps tendon autograft use in anterior cruciate ligament reconstruction. Arthrosc Sports Med Rehabil. 2019;1:e93–9.
23. Herbawi F, Lozano-Lozano M, Lopez-Garzon M, Postigo-Martin P, Ortiz-Comino L, Martin-Alguacil JL, et al. A systematic review and meta-analysis of strength recovery measured by isokinetic dynamometer technology after anterior cruciate ligament reconstruction using quadriceps tendon autografts vs. hamstring tendon autografts or patellar tendon autografts. Int J Environ Res Public Health. 2022;19:6764.
24. Holmgren D, Noory S, Moström E, Grindem H, Stålman A, Wörner T. Weaker quadriceps muscle strength with a quadriceps tendon graft compared with a patellar or hamstring tendon graft at 7 months after anterior cruciate ligament reconstruction. Am J Sports Med. 2024;52:69–76.
25. Horteur C, Rubens Duval B, Merlin A, Cognault J, Ollivier M, Pailhe R. Comparison of knee extensor strength after anterior cruciate ligament reconstruction using either quadriceps tendon or hamstring tendon autografts. Euro J Orthop Surg Traumatol. 2021;32:857–65.
26. Issaoui W, Dergaa I, Ghouili H, El Omri A, Guelmami N, Chomier P, et al. A comparative analysis of autograft choices of anterior cruciate ligament reconstruction and their effects on muscle strength and joint biomechanics. Front Sports Active Living. 2025;6:1444465.
27. Ithurburn MP, Altenburger AR, Thomas S, Hewett TE, Paterno MV, Schmitt LC. Young athletes after ACL reconstruction with quadriceps strength asymmetry at the time of return-to-sport demonstrate decreased knee function 1 year later. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. 2018;26:426–33.
28. Johnston PT, Feller JA, McClelland JA, Webster KE. Knee strength deficits following anterior cruciate ligament reconstruction differ between quadriceps and hamstring tendon autografts. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. 2022;30:1300–10.
29. Keays SL, Bullock-Saxton J, Keays AC, Newcombe P. Muscle strength and function before and after anterior cruciate ligament reconstruction using semitendonosus and gracilis. Knee. 2001; 8:229–34.
30. Khiang Tan T, Gopal Subramaniam A, Ebert JR, Radic R. Quadriceps tendon versus hamstring tendon autografts for anterior cruciate ligament reconstruction: a systematic review and meta-analysis. Am J Sports Med. 2021;49:2805–15.
31. Kim HJ, Lee JH, Ahn SE, Park MJ, Lee DH. Influence of anterior cruciate ligament tear on thigh muscle strength and hamstring-to-quadriceps ratio: a meta-analysis. PLoS One. 2016; 11:e0146234.
32. Kohn L, Rembeck E, Rauch A. Verletzung des vorderen Kreuzbandes beim Erwachsenen: Diagnostik und Therapie. Orthopade. 2020;49:1013–28.
33. Konrad P. The ABC of EMG: a practical introduction to kinesiological electromyography. Noraxon USA Inc; 2005.
34. Kotsifaki R, Korakakis V, King E, Barbosa O, Maree D, Pantouveris M, et al. Aspetar clinical practice guideline on rehabilitation after anterior cruciate ligament reconstruction. Br J Sports Med. 2023;57:500–14.
35. Kurz A, Evaniew N, Yeung M, Samuelsson K, Peterson D, Ayeni OR. Credibility and quality of meta-analyses addressing graft choice in anterior cruciate ligament reconstruction: a systematic review. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. 2017;25:538–51.
36. Lee JK, Lee S, Lee MC. Outcomes of anatomic anterior cruciate ligament reconstruction: bone-quadriceps tendon graft versus double-bundle hamstring tendon graft. Am J Sports Med. 2016; 44:2323–9.
37. Li B, Shi L, He Z, He D. Application value of surface electromyography in knee joint sports injury. Adv Phys Sci. 2020;8: 1–6.
38. Lind M, Nielsen TG, Soerensen OG, Mygind-Klavsen B, Faunø P. Quadriceps tendon grafts does not cause patients to have inferior subjective outcome after anterior cruciate ligament (ACL) reconstruction than do hamstring grafts: a 2-year prospective randomised controlled trial. Br J Sports Med. 2020;54: 183–7.
39. Lisee C, Lepley AS, Birchmeier T, O'Hagan K, Kuenze C. Quadriceps strength and volitional activation after anterior cruciate ligament reconstruction: a systematic review and meta-analysis. Sports Health Multidiscipl Appr. 2019;11:163–79.
40. Magnussen RA, Carey JL, Spindler KP. Does autograft choice determine intermediate-term outcome of ACL reconstruction? Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. 2011;19:462–72.
41. Mattacola CG, Perrin DH, Gansneder BM, Gieck JH, Saliba EN, McCue FC. Strength, functional outcome, and postural stability after anterior cruciate ligament reconstruction. J Athl Train. 2002;37:262–8.
42. van Melick N, Senorski EH, Królikowska A, Prill R. Anterior cruciate ligament reconstruction rehabilitation: decades of change. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. 2025;33: 1178–82.
43. Mulligan EP, McGuffie DQ, Coyner K, Khazzam M. The reliability and diagnostic accuracy of assessing the translation endpoint during the Lachman test. Int J Sports Phys Ther. 2015; 10:52–61.
44. Øiestad BE, Juhl CB, Eitzen I, Thorlund JB. Knee extensor muscle weakness is a risk factor for development of knee osteoarthritis. A systematic review and meta-analysis. Osteoarthr Cartil. 2015;23:171–7.
45. Ossendorff R, Lauter LM, Walter SG, Sowa M, Haeder G, Salzmann GM. Systematic evaluation of isometric maximal muscle strength in an orthopaedic cohort. Sports Health Multidiscipl Appr. 2025;17:629–36.
46. Palmieri-Smith RM, Strickland M, Lepley LK. Hamstring muscle activity after primary anterior cruciate ligament reconstruction – a protective mechanism in those who do not sustain a secondary injury? A preliminary study. Sports Health Multidiscipl Appr. 2019;11:316–23.
47. Petersen W, Benedetto KP. Verschiedene Techniken zur Ersatzplastik des vorderen Kreuzbands: Personalisierte VKB-Chirurgie? Arthroskopie. 2013;26:6–11.
48. Pietsch A, Schröder J, Reer R, Edler C, Kutasow A, Riepenhof H. Referenzwerte in der isometrischen Kraftdiagnostik: Messung von Rumpfkraftwerten bei Patienten mit Rückenschmerzen. Orthopade. 2021;50:946–54.
49. Rainoldi A, Bullock-Saxton JE, Cavarretta F, Hogan N. Repeatability of maximal voluntary force and of surface EMG variables during voluntary isometric contraction of quadriceps muscles in healthy subjects. J Electromyogr Kinesiol. 2001;11: 425–38.
50. Raj S, Ridha A, Searle HKC, Khatri C, Ahmed I, Metcalfe A, et al. Quadriceps tendon versus hamstring tendon graft for primary anterior cruciate ligament reconstruction: a systematic review and meta-analysis of randomised trials. Knee. 2024;49: 226–40.
51. Renström P, Arms SW, Stanwyck TS, Johnson RJ, Pope MH. Strain within the anterior cruciate ligament during hamstring and quadriceps activity. Am J Sports Med. 1986;14:83–7.
52. Riera J, Campion M, Néri T, Rambaud AJM, Duclos NC. Association between walking gait biomechanical changes after anterior cruciate ligament injury or reconstruction and the development of osteoarthritis: a systematic review. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. 2025:1–14.

14337347, 0, Downloaded from https://esska-journals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ksa.70342 by Benjamin Forquignon - Readcube (Labtiva Inc.) , Wiley Online Library on [16/02/2026]. See the Terms and Conditions (https://onlinelibrary.wiley.com/terms-and-conditions) on Wiley Online Library for rules of use; OA articles are governed by the applicable Creative Commons License

53. Runer A, Keeling L, Wagala N, Nugraha H, Özbek EA, Hughes JD, et al. Current trends in graft choice for primary anterior cruciate ligament reconstruction – part II: in-vivo kinematics, patient reported outcomes, re-rupture rates, strength recovery, return to sports and complications. J Exp Orthop. 2023;10:61.
54. Salas VER, Oliveira DE, Lima MV, Duarte Junior A, Guglielmetti LGB, Cury RPL, et al. Quadriceps autograft in anterior cruciate ligament reconstruction: a literature review. Rev Bras Med Esporte. 2020;26:58–62.
55. Schagemann J, Koebrich T, Wendlandt R, Schulz AP, Gille J, Oheim R. Comparison of hamstring and quadriceps tendon autografts in anterior cruciate ligament reconstruction with gait analysis and surface electromyography. J Orthop Traumatol. 2021;22:20.
56. Schmitt LC, Paterno MV, Hewett TE. The impact of quadriceps femoris strength asymmetry on functional performance at return to sport following anterior cruciate ligament reconstruction. J Orthop Sports Phys Ther. 2012;42:750–9.
57. Schröder J, Braumann KM, Reer R. Wirbelsäulenform- und Funktionsprofile: Referenzwerte für die klinische Nutzung bei Rückenschmerzsyndromen. Orthopade. 2014;43:841–9.
58. Shaerf DA. Anterior cruciate ligament reconstruction best practice: a review of graft choice. World J Orthop. 2014;5:23–9.
59. Shen X, Liu T, Xu S, Chen B, Tang X, Xiao J, et al. Optimal timing of anterior cruciate ligament reconstruction in patients with anterior cruciate ligament tear: a systematic review and meta-analysis. JAMA Netw Open. 2022;5:e2242742.
60. Sherman DA, Glaviano NR, Norte GE. Hamstrings neuromuscular function after anterior cruciate ligament reconstruction: a systematic review and meta-analysis. Sports Med. 2021;51:1751–69.
61. Sinding KS, Nielsen TG, Hvid LG, Lind M, Dalgas U. Effects of autograft types on muscle strength and functional capacity in patients having anterior cruciate ligament reconstruction: a randomized controlled trial. Sports Med. 2020;50:1393–403.
62. Singh H, Glassman I, Sheean A, Hoshino Y, Nagai K, de Sa D. Less than 1% risk of donor-site quadriceps tendon rupture post-ACL reconstruction with quadriceps tendon autograft: a systematic review. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. 2023;31:572–85.
63. Slone HS, Romine SE, Premkumar A, Xerogeanes JW. Quadriceps tendon autograft for anterior cruciate ligament reconstruction: a comprehensive review of current literature and systematic review of clinical results. Arthrosc J Arthrosc Rel Surg. 2015;31:541–54.
64. Sonnery-Cottet B, Saithna A, Quelard B, Daggett M, Borade A, Ouanezar H, et al. Arthrogenic muscle inhibition after ACL reconstruction: a scoping review of the efficacy of interventions. Br J Sports Med. 2019;53:289–98.
65. Sterne JAC, White IR, Carlin JB, Spratt M, Royston P, Kenward MG, et al. Multiple imputation for missing data in epidemiological and clinical research: potential and pitfalls. BMJ. 2009;338:b2393.
66. Todor A, Viorel Nistor D, Caterev S. Clinical outcomes after ACL reconstruction with free quadriceps tendon autograft versus hamstring tendons autograft. A retrospective study with a minimal follow-up two years. Acta Orthop Traumatol Turc. 2019;53:180–3.
67. Tsai LC, McLean S, Colletti PM, Powers CM. Greater muscle co-contraction results in increased tibiofemoral compressive forces in females who have undergone anterior cruciate ligament reconstruction. J Orthop Res. 2012;30:2007–14.
68. Vermeijden HD, Yang XA, Rademakers MV, Kerkhoffs GMMJ, van der List JP, DiFelice GS. Early and delayed surgery for isolated ACL and multiligamentous knee injuries have equivalent results: a systematic review and meta-analysis. Am J Sports Med. 2023;51:1106–16.
69. Whitworth N, Webster KE, Klemm HJ, McClelland JA, Batty LM, Kirby JC, et al. Impact of change in contralateral knee extensor strength on achieving limb symmetry index targets following anterior cruciate ligament reconstruction. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. 2025:1–8.
70. Widhalm HK, Draschl A, Horns J, Rilk S, Leitgeb J, Hajdu S, et al. The optimal window for reconstruction of the anterior cruciate ligament (ACL) with respect to quadriceps atrophies lies within 21 to 100 days. PLoS One. 2024;19:e0296943.
71. Winkler PW, Vivacqua T, Thomassen S, Lovse L, Lesniak BP, Getgood AMJ, et al. Quadriceps tendon autograft is becoming increasingly popular in revision ACL reconstruction. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. 2022;30:149–60.
72. Wittstein JR, Wilson JB, Moorman CT. Complications related to hamstring tendon harvest. Oper Tech Sports Med. 2006;14:15–9.
73. Wu X, Zhang H, Cui H, Pei W, Zhao Y, Wang S, et al. Surface electromyography and gait features in patients after anterior cruciate ligament reconstruction. Orthopaedic Surgery. 2025;17:62–70.
74. Yasuda K, Tsujino J, Ohkoshi Y, Tanabe Y, Kaneda K. Graft site morbidity with autogenous semitendinosus and gracilis tendons. Am J Sports Med. 1995;23:706–14.
75. Yeh W-L, Chen J-M, Liu C-H, Tsai P-J, Higashiyama R, Takaso M. Endoscopic harvest of autogenous gracilis and semitendinosus tendons. Arthrosc Tech. 2018;7:e1019–24.
76. Young BA, Delaware JC, Lee Major III E, Morrison EL, Feingold CL, Lin EH, et al. Quadriceps tendon graft leads to stronger flexion and weaker extension of the knee than hamstring graft post-ACLR: systematic review and meta-analysis. Indian J Orthop. 2025;59:2026–38.

How to cite this article: Forquignon B, Drenck T, Krause M, Akoto R, Frosch K-H, Welsch G, et al. Impact of hamstring versus quadriceps tendon graft on thigh muscle strength and surface electromyography activity after anterior cruciate ligament reconstruction. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. 2026;1–11. https://doi.org/10.1002/ksa.70342

14337347, 0, Downloaded from https://esska-journals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ksa.70342 by Benjamin Forquignon - Readcube (Labtiva Inc.) , Wiley Online Library on [16/02/2026]. See the Terms and Conditions (https://onlinelibrary.wiley.com/terms-and-conditions) on Wiley Online Library for rules of use; OA articles are governed by the applicable Creative Commons License

3. Zusammenfassung

Deutsch Für die Rekonstruktion von Rupturen des vorderen Kreuzbandes werden häufig Hamstring- (HT) oder Quadrizepssehnen-Transplantate (QT) verwendet. Ziel der Studie war es, klinische Ergebnisse, Muskelkraft und neuromuskuläre Aktivierung zwischen den beiden Transplantaten im mittelfristigen Verlauf zu vergleichen. 60 Patienten (36 HT, 24 QT) wurden im Mittel 24 Monate postoperativ untersucht. In der Oberflächen-Elektromyografie (Quadrizeps- und Hamstringsmuskeln) zeigten sich keine statistisch signifikanten Unterschiede der neuromuskulären Aktivierung zwischen den Transplantatgruppen oder zwischen operierter und nicht-operierter Seite. Die klinischen Stabilitätstests sowie Scores zeigten keine Unterschiede zwischen den Gruppen. In der isometrischen Kraftmessung der Kniebeugung und -streckung zeigten sich jedoch transplantatspezifische Defizite: reduzierte Streckkraft nach QT und reduzierte Beugekraft nach HT, letztere auch signifikant geringer in den normalisierten absoluten Werten. Der Limb Symmetry Index unterschied sich nicht zwischen den Gruppen. Beide Transplantate führen zu sehr guten klinischen Ergebnissen. Persistierende, transplantatspezifische Kraftdefizite legen eine differenzierte Rehabilitation nahe: Fokus auf Quadrizeps nach QT, auf Hamstrings nach HT.

Englisch For the reconstruction of anterior cruciate ligament ruptures, hamstring tendon (HT) and quadriceps tendon (QT) grafts are commonly used. The aim of this study was to compare clinical outcomes, muscle strength, and neuromuscular activation between the two graft types at mid-term follow-up. A total of 60 patients (36 HT, 24 QT) were evaluated at a mean of 24 months postoperatively. Surface electromyography (quadriceps and hamstring muscles) revealed no statistically significant differences in neuromuscular activation between the graft groups or between the operated and non-operated limbs. Clinical stability tests as well as patient-reported outcome scores showed no differences between the groups. However, isometric strength testing of knee flexion and extension demonstrated graft-specific deficits: reduced extension strength following QT and reduced flexion strength following HT, the latter also being significantly lower in normalized absolute values. The Limb Symmetry Index did not differ between the groups. Both graft types resulted in very good clinical outcomes. Persistent, graft-specific strength deficits suggest the need for targeted rehabilitation: focusing on the quadriceps after QT and on the hamstrings after HT.

4. Literaturverzeichnis

Aagaard P, Simonsen EB, Magnusson SP, Larsson B, Dyhre-Poulsen P (1998) A new concept for isokinetic hamstring:quadriceps muscle strength ratio. Am J Sports Med. 26(2):231–237.

Akima H, Hioki M, Furukawa T (2008) Effect of arthroscopic partial meniscectomy on the function of quadriceps femoris. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. 16(11):1017–1025.

Arnold MP, Calcei JG, Vogel N, Magnussen RA, Clatworthy M, Spalding T, Campbell JD, Bergfeld JA, Sherman SL (2021) ACL Study Group survey reveals the evolution of anterior cruciate ligament reconstruction graft choice over the past three decades. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. 29(11):3871–3876.

Arundale AJH, Lapham K, Silvers HJ, Marmon A, Snyder-Mackler L (2015) Medial and lateral hamstring muscle activity differs for ACL graft types. Orthop J Sports Med. 3(7):2325967115S00103.

Beere M, Ebert JR, Joss B, Ackland T (2022) Isometric dynamometry, dependent on knee angle, is a suitable alternative to isokinetic dynamometry when evaluating quadriceps strength symmetry in patients following anterior cruciate ligament reconstruction. Knee. 34:124–133.

Belk JW, McCarty E (2020) Editorial Commentary: Patellar Tendon or Hamstring: Which Kind of Anterior Cruciate Ligament Patient Are You? Arthroscopy. 36(8):2292–2294.

Blackburn T, Pietrosimone B, Goodwin JS, Johnston C, Spang JT (2019) Co-activation during gait following anterior cruciate ligament reconstruction. Clin Biomech (Bristol, Avon). 67:153–159.

Blasimann A, Busch A, Henle P, Bruhn S, Vissers D, Baur H (2023) Neuromuscular control in males and females 1 year after an anterior cruciate ligament rupture or reconstruction during stair descent and artificial tibial translation. Sci Rep. 13(1):1–13.

Boden BP, Sheehan FT (2022) Mechanism of non-contact ACL injury: OREF Clinical Research Award 2021. J Orthop Res. 40(3):531–540.

Bowman EN, Limpisvasti O, Cole BJ, ElAttrache NS (2021) Anterior Cruciate Ligament Reconstruction Graft Preference Most Dependent on Patient Age: A Survey of United States Surgeons. Arthroscopy. 37(5):1559–1566.

Breusch S, Mau H, Sabo D, Schneidmüller D, Clarius M (2019) Klinikleitfaden Orthopädie Unfallchirurgie. 9. Auflage. Elsevier, München.

Briem K, Sigurbjörnsson PS, Kristjánsson H, Árnason Á (2023) Hamstring muscle activation during single leg jump after anterior cruciate ligament reconstruction with a semitendinosus graft. BMJ Open Sport Exerc Med. 9(Suppl 1):A7.

Brophy RH, Lowry KJ (2023) American Academy of Orthopaedic Surgeons Clinical Practice Guideline Summary: Management of Anterior Cruciate Ligament Injuries. J Am Acad Orthop Surg. 31(11):531–537.

Burks RT, Crim J, Fink BP, Boylan DN, Greis PE (2005) The effects of semitendinosus and gracilis harvest in anterior cruciate ligament reconstruction. Arthroscopy. 21(10):1177–1185.

Cavaignac E, Coulin B, Tscholl P, Nik Mohd Fatmy N, Duthon V, Menetrey J (2017) Is quadriceps tendon autograft a better choice than hamstring autograft for anterior cruciate ligament

reconstruction? A comparative study with a mean follow-up of 3.6 years. Am J Sports Med. 45(6):1326–1332.

Chen CF, Qian SY, Li T, Yao L, Xu Y, Wang L, Li J (2025) Which graft is associated with better outcomes in ACL reconstruction? A systematic review and network meta-analysis of randomized controlled trials. Clin Orthop Relat Res. 483(12):2334–2349.

Cui H, Cao Z, Wang S, Zhang H, Chen Z, Wu X, Zhao Y, Qie S, Li W (2023) Surface electromyography characteristics of patients with anterior cruciate ligament injury in different rehabilitation phases. Front Physiol. 14:1116452.

Domnick C, Garcia P, Raschke MJ, Glasbrenner J, Lodde G, Fink C, Herbort M (2017) Trends and incidences of ligament-surgeries and osteotomies of the knee: an analysis of German inpatient records 2005-2013. Arch Orthop Trauma Surg. 137(7):989–995.

Fischer F, Fink C, Herbst E, Hoser C, Hepperger C, Blank C, Gföller P (2017) Higher hamstring-to-quadriceps isokinetic strength ratio during the first post-operative months in patients with quadriceps tendon compared to hamstring tendon graft following ACL reconstruction. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. 26(2):418–425.

Georgoulis JD, Melissaridou D, Patras K, Megaloikonomos PD, Trikoupis I, Savvidou OD, Papagelopoulos PJ (2023) Neuromuscular activity of the lower extremities during running, landing and changing-of-direction movements in individuals with anterior cruciate ligament reconstruction: a review of electromyographic studies. J Exp Orthop. 10:43.

Grassi A, Pizza N, Al-Zu'bi BBH, Fabbro GD, Lucidi GA, Zaffagnini S (2022) Clinical outcomes and osteoarthritis at very long-term follow-up after ACL reconstruction: a systematic review and meta-analysis. Orthop J Sports Med. 10(1):23259671211062238.

Grindem H, Snyder-Mackler L, Moksnes H, Engebretsen L, Risberg MA (2016) Simple decision rules can reduce reinjury risk by 84% after ACL reconstruction: The Delaware-Oslo ACL cohort study. Br J Sports Med. 50(13):804–808.

Hasan M, Berkovich Y, Khatib M, Yonai Y, Ben Zvi L, Alhija AA, Shpigelman A, Ginesin E (2026) Graft selection in ACL reconstruction: clinical and functional outcomes based on level I–II evidence. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. 34:543–552.

Hatamzadeh M, Sharifnezhad A, Hassannejad R, Zory R (2023) Discriminative sEMG-based features to assess damping ability and interpret activation patterns in lower-limb muscles of ACLR athletes. Biomed Signal Process Control. 83:104665.

Heffron WM, Hunnicutt JL, Xerogeanes JW, Woolf SK, Slone HS (2019) Systematic review of publications regarding quadriceps tendon autograft use in anterior cruciate ligament reconstruction. Arthrosc Sports Med Rehabil. 1(1):e93–e99.

Hefti E, Müller W, Jakob RP, Stäubli HU (1993) Evaluation of knee ligament injuries with the IKDC form. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. 1(3–4):226–234.

Herbawi F, Lozano-Lozano M, Lopez-Garzon M, Postigo-Martin P, Ortiz-Comino L, Martin-Alguacil JL, Arroyo-Morales M, Fernandez-Lao C (2022) A systematic review and meta-analysis of strength recovery measured by isokinetic dynamometer technology after anterior cruciate ligament reconstruction using quadriceps tendon autografts vs. hamstring tendon autografts or patellar tendon autografts. Int J Environ Res Public Health. 19:6764.

Horstmann H, Medico P, Lasch F, Krutsch W, Weber-Spickschen TS (2020) Simplified measurement of maximum strength after knee surgery: Application-based knee-training device compared to isokinetic testing. Open Access J Sports Med. 11:43–49.

Horteur C, Rubens Duval B, Merlin A, Cognault J, Ollivier M, Pailhe R, Rubens Duval B (2022) Comparison of knee extensor strength after anterior cruciate ligament reconstruction using either quadriceps tendon or hamstring tendon autografts. Eur J Orthop Surg Traumatol. 32:857–865.

Huseth K, Aagaard P, Gutke A, Karlsson J, Tranberg R (2020) Assessment of neuromuscular activity during maximal isometric contraction in supine vs standing body positions. J Electromyogr Kinesiol. 50:102365.

Inoue J, Dadoo S, Nukuto K, Özbek EA, Lesniak BP, Sprague AL, Irrgang JJ, Musahl V (2023) Near complete quadriceps tendon healing 2 years following harvest in anterior cruciate ligament reconstruction. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. 31(12):5747–5754.

Issaoui W, Dergaa I, Ghouili H, El Omri A, Guelmami N, Chomier P, Ghrairi M, Ben Saad H, Moalla W (2025) A comparative analysis of autograft choices of anterior cruciate ligament reconstruction and their effects on muscle strength and joint biomechanics. Front Sports Act Living. 6:1444465.

Ithurburn MP, Altenburger AR, Thomas S, Hewett TE, Paterno MV, Schmitt LC (2018) Young athletes after ACL reconstruction with quadriceps strength asymmetry at the time of return-to-sport demonstrate decreased knee function 1 year later. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. 26(2):426–433.

Johnston PT, Feller JA, McClelland JA, Webster KE (2022) Knee strength deficits following anterior cruciate ligament reconstruction differ between quadriceps and hamstring tendon autografts. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. 30(4):1300–1310.

Keays SL, Bullock-Saxton J, Keays AC, Newcombe P (2001) Muscle strength and function before and after anterior cruciate ligament reconstruction using semitendinosus and gracilis. Knee. 8(3):229–234.

Khiang Tan T, Gopal Subramaniam A, Ebert JR, Radic R (2021) Quadriceps tendon versus hamstring tendon autografts for anterior cruciate ligament reconstruction: A systematic review and meta-analysis. Am J Sports Med. 49(10):2805–2815.

Kim HJ, Lee JH, Ahn SE, Park MJ, Lee DH (2016) Influence of anterior cruciate ligament tear on thigh muscle strength and hamstring-to-quadriceps ratio: A meta-analysis. PLoS One. 11(1):e0146234.

Kohn L, Rembeck E, Rauch A (2020) Anterior cruciate ligament injury in adults: Diagnostics and treatment. Orthopade. 49(11):1013–1028.

Konrad P (2005) The ABC of EMG: A practical introduction to kinesiological electromyography. Noraxon U.S.A., Inc., Scottsdale, AZ.

Konrath JM, Vertullo CJ, Kennedy BA, Bush HS, Barrett RS, Lloyd DG (2016) Morphologic Characteristics and Strength of the Hamstring Muscles Remain Altered at 2 Years after Use of a Hamstring Tendon Graft in Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. Am J Sports Med. 44(10):2589–2598.

Kotsifaki R, Korakakis V, King E, Barbosa O, Maree D, Pantouveris M, Bjerregaard A, Luomajoki J, Wilhelmsen J, Whiteley R (2023) Aspetar clinical practice guideline on rehabilitation after anterior cruciate ligament reconstruction. Br J Sports Med. 57(9):500–514.

Krause M, Frosch KH, Freudenthaler F, Achtnich A, Petersen W, Akoto R (2018) Operative Versus Conservative Treatment of Anterior Cruciate Ligament Rupture. Dtsch Arztebl Int. 115(51–52):855–862.

Kulwin RL, Schmidt GJ, Snyder DA, Klitzman RG (2023) Clinical examination in the diagnosis of anterior cruciate ligament injury: A blinded, cross-sectional evaluation. JAAOS Glob Res Rev. 7(2):e22.00123.

Kunze KN, Moran J, Polce EM, Pareek A, Strickland SM, Williams RJ (2023) Lower donor site morbidity with hamstring and quadriceps tendon autograft compared with bone-patellar tendon-bone autograft after anterior cruciate ligament reconstruction: a systematic review and network meta-analysis of randomized controlled trials. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. 31(8):3339–3352.

Lee K, Lee S, Lee M (2016) Outcomes of anatomic anterior cruciate ligament reconstruction: Bone-quadriceps tendon graft versus double-bundle hamstring tendon graft. Am J Sports Med. 44(9):2323–2329.

Li B, Shi L, He Z, He D (2020) Application value of surface electromyography in knee joint sports injury. Adv Phys Sci. 08(01):1–6.

Lind M, Nielsen TG, Soerensen OG, Mygind-Klavsen B, Faunø P (2020) Quadriceps tendon grafts does not cause patients to have inferior subjective outcome after anterior cruciate ligament (ACL) reconstruction than do hamstring grafts: a 2-year prospective randomised controlled trial. Br J Sports Med. 54(3):183–187.

Lisee C, Lepley AS, Birchmeier T, O'Hagan K, Kuenze C (2019) Quadriceps strength and volitional activation after anterior cruciate ligament reconstruction: A systematic review and meta-analysis. Sports Health. 11(2):163–179.

Lysholm J, Gillquist J (1982) Evaluation of knee ligament surgery results with special emphasis on use of a scoring scale. Am J Sports Med. 10(3):150–154.

Magnussen RA, Carey JL, Spindler KP (2011) Does autograft choice determine intermediate-term outcome of ACL reconstruction? Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. 19(3):462–472.

Messer DJ, Shield AJ, Williams MD, Timmins RG, Bourne MN (2020) Hamstring muscle activation and morphology are significantly altered 1-6 years after anterior cruciate ligament reconstruction with semitendinosus graft. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. 28(3):733–741.

Milner-Brown HS, Stein RB (1975) The relation between the surface electromyogram and muscular force. J Physiol. 246(3):549–569.

Musahl V, Karlsson J (2019) Anterior Cruciate Ligament Tear. N Engl J Med. 380(24):2341–2348.

Nuelle CW (2025) Editorial Commentary: Anterior Cruciate Ligament Graft Selection Is Best Tailored to Individual Patient Sport and Activity Level. Arthroscopy. 41(5):1521–1522.

Øiestad BE, Juhl CB, Eitzen I, Thorlund JB (2015) Knee extensor muscle weakness is a risk factor for development of knee osteoarthritis. A systematic review and meta-analysis. Osteoarthritis and Cartilage. 23(2):171–177.

Ossendorff R, Lauter LM, Walter SG, Sowa M, Haeder G, Salzmann GM (2024) Systematic evaluation of isometric maximal muscle strength in an orthopaedic cohort. Sports Health. 17(3):629–636.

Papaleontiou A, Poupard AM, Mahajan UD, Tsantanis P (2024) Conservative vs Surgical Treatment of Anterior Cruciate Ligament Rupture: A Systematic Review. Cureus. 16(3):e56532.

Paredes R, Crasto C, Montes AM, André A, Pereira S, Guedes D, Alves L, Arias-Buría JL (2025) Electromyographic assessment of agonist and antagonist muscles related to the anterior cruciate ligament following surgical reconstruction: A cross-sectional study. J Electromyogr Kinesiol. 84:103044.

Peeler J, Leiter J, MacDonald P (2010) Accuracy and reliability of anterior cruciate ligament clinical examination in a multidisciplinary sports medicine setting. Clin J Sport Med. 20(2):80–85.

Petterson SC, Buckmire MC, Giordano AO (2025) Recovery Stages After Anterior Crucuiate Ligament Reconstruction. Arthroscopy. 41(11):4393–4395.

Pietsch A, Schröder J, Reer R, Edler C, Kutasow A, Riepenhof H (2021) Reference values in isometric strength diagnostics: Measurement of core strength values in patients with back pain. Orthopade. 50(11):946–954.

Popovic M, Myhre JR, Holen JIH, Gifstad T, Strand IL, Strand T, Mo IF, Fischer-Bredenbeck C, Drogset JO (2024) Reduced Knee Flexion Strength 18 Years After ACL Reconstruction With Hamstring Tendon Versus Patellar Tendon. Am J Sports Med. 52(11):2750–2757.

Pua YH, Bryant AL, Steele JR, Newton RU, Wrigley TV (2008) Isokinetic dynamometry in anterior cruciate ligament injury and reconstruction. Ann Acad Med Singap. 37(4):330–340.

Raj S, Ridha A, Searle HKC, Khatri C, Ahmed I, Metcalfe A, Smith N (2024) Quadriceps tendon versus hamstring tendon graft for primary anterior cruciate ligament reconstruction: A systematic review and meta-analysis of randomised trials. Knee. 49:226–240.

Rechter GR, Mason E, Levy BA (2024) Editorial Commentary: Gracilis-Sparing Anterior Cruciate Ligament Hamstring Graft Reconstruction Is Less Invasive Than Semitendinosus-Gracilis Graft Harvest, and Shows No Clinical Difference in Outcomes With Grafts Greater Than 8 mm in Diameter. Arthroscopy. 40(6):1833–1836.

Ristanis S, Tsepis E, Giotis D, Stergiou N, Cerulli G, Georgoulis AD (2009) Electromechanical delay of the knee flexor muscles is impaired after harvesting hamstring tendons for anterior cruciate ligament reconstruction. Am J Sports Med. 37(11):2179–2186.

Roman Salas VE, De Oliveira DE, De Lima MV, Junior AD, Betoni Guglielmetti LG, Leite Cury RDP, Baches Jorge P (2020) Quadriceps autograft in anterior cruciate ligament reconstruction: A literature review. Rev Bras Med Esporte. 26(1):58–62.

Runer A, Keeling L, Wagala N, Nugraha H, Özbek EA, Hughes JD, Musahl V (2023) Current trends in graft choice for primary anterior cruciate ligament reconstruction – part II: In-vivo

kinematics, patient reported outcomes, re-rupture rates, strength recovery, return to sports and complications. J Exp Orthop. 10(1):61.

Schagemann J, Koebrich T, Wendlandt R, Schulz AP, Gille J, Oheim R (2021) Comparison of hamstring and quadriceps tendon autografts in anterior cruciate ligament reconstruction with gait analysis and surface electromyography. J Orthop Traumatol. 22(1):20.

Schmitt L, Paterno M, Hewett T (2012) The impact of quadriceps femoris strength asymmetry on functional performance at return to sport following anterior cruciate ligament reconstruction. J Orthop Sports Phys Ther. 42(9):750–759.

Servant C (2024) Editorial Commentary: Quadriceps Tendon Anterior Cruciate Ligament Graft Shows Advantages and Disadvantages. Arthroscopy. 40(1):146–148.

Nikose SS, Nikose D, Jain S, Kekatpure A, Saoji K, Chaudhary R, Pisulkar G (2021) Determinants of regeneration and strength of hamstrings after anterior cruciate ligament reconstruction—fate of hamstring tendon. Int Orthop. 45:1751–1760.

Simonsson R, Sundberg A, Piussi R, Högberg J, Senorski C, Thomeé R, Samuelsson K, Della Villa F, Hamrin Senorski E (2025) Questioning the rules of engagement: A critical analysis of the use of limb symmetry index for safe return to sport after anterior cruciate ligament reconstruction. Br J Sports Med. 59(6):376–384.

Sinding KS, Nielsen TG, Hvid LG, Lind M, Dalgas U (2020) Effects of autograft types on muscle strength and functional capacity in patients having anterior cruciate ligament reconstruction: A randomized controlled trial. Sports Med. 50(7):1393–1403.

Sonnery-Cottet B, Saithna A, Quelard B, Daggett M, Borade A, Ouanezar H, Thaunat M, Blakeney WG (2019) Arthrogenic muscle inhibition after ACL reconstruction: A scoping review of the efficacy of interventions. Br J Sports Med. 53(5):289–298.

Speedtsberg MB, Zebis MK, Lauridsen HB, Magnussen E, Hölmich P (2022) Anatomical retraction of the semitendinosus muscle following harvest of the distal semitendinosus tendon for ACL reconstruction. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. 30(5):1706–1710.

Sterne JAC, White IR, Carlin JB, Spratt M, Royston P, Kenward MG, Wood AM, Carpenter JR (2009) Multiple imputation for missing data in epidemiological and clinical research: potential and pitfalls. BMJ. 338(7713):157–160.

Tegner Y, Lysholm J (1985) Rating systems in the evaluation of knee ligament injuries. Clin Orthop Relat Res. 1985;(198):43–49.

Todor A, Nistor DV, Caterev S (2019) Clinical outcomes after ACL reconstruction with free quadriceps tendon autograft versus hamstring tendons autograft. A retrospective study with a minimal follow-up two years. Acta Orthopaedica et Traumatologica Turcica. 53(3):180–183.

Whitworth N, Webster KE, Klemm HJ, McClelland JA, Batty LM, Kirby JC, Whitehead TS, Feller JA (2025) Impact of change in contralateral knee extensor strength on achieving limb symmetry index targets following anterior cruciate ligament reconstruction. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. 1–8.

Willinger L, Athwal KK, Holthof S, Imhoff AB, Williams A, Amis AA (2023) Role of the Anterior Cruciate Ligament, Anterolateral Complex, and Lateral Meniscus Posterior Root in

Anterolateral Rotatory Knee Instability: A Biomechanical Study. Am J Sports Med. 51(5):1136–1145.

Wu Y, Li Y, Guo J, Li Q, Wu J, Cao Z, Song Y (2022) Optimal surgical treatment method for anterior cruciate ligament rupture: Results from a network meta-analysis. Med Sci Monit. 28:e937118.

Young BA, Dawahare JC, Major EL III, Morrison EL, Feingold CL, Lin EH, Liu JN, Stone AV (2025) Quadriceps tendon graft leads to stronger flexion and weaker extension of the knee than hamstring graft post-ACLR: Systematic review and meta-analysis. J Orthop Investig. 59:2026–2038.

Zandiyeh P, Parola LR, Costa MQ, Hague MJ, Molino J, Fleming BC, Beveridge JE (2023) Long-Term Bilateral Neuromuscular Function and Knee Osteoarthritis after Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. Bioengineering (Basel). 10(7):812.

Zwolski C, Schmitt LC, Quatman-Yates C, Thomas S, Hewett TE, Paterno MV (2015) The influence of quadriceps strength asymmetry on patient-reported function at time of return to sport after anterior cruciate ligament reconstruction. Am J Sports Med. 43(9):2242–2249.

5. Abkürzungsverzeichnis

%MVC	Prozentuale Aktivierung der Maximum Voluntary Contraction
AMI	Arthrogene Muskelinhibition
BMI	Body-Mass-Index
CT	Computertomografie
EMG	Elektromyografie
FIR	Finite Impulse Response
HT	Hamstringsehne
IKDC	International Knee Documentation Committee
IQR	Interquartile Range
LSI	Limb Symmetry Index
MRT	Magnetresonanztomografie
MVC	Maximum Voluntary Contraction
PT	Patellarsehne
QT	Quadrizepssehne
RMS	Root Mean Square
sEMG	Oberflächen-Elektromyografie
SENIAM	Surface Electromyography for the Non-Invasive Assessment of Muscles
TAS	Tegner Activity Scale
VKB	Vorderes Kreuzband

6. Erklärung des Eigenanteils

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen einer Publikation, an der mehrere Wissenschaftler beteiligt waren.

Die Studienidee und das grundlegende Konzept wurden von Dimitris Dalos und Grégoire Thürig entwickelt. Der Ethik-Antrag wurde unter anderem durch Alexander Korthaus bearbeitet. Die konkrete methodische Ausgestaltung der Studie erfolgte durch Dimitris Dalos gemeinsam mit mir. Hierzu gehörten insbesondere die Definition der Messprotokolle für die EMG- und Kraftmessungen, die Auswahl der zu untersuchenden Muskulatur sowie die Festlegung der eingesetzten klinischen Tests und Scores.

Die Durchführung der Studie, einschließlich der Patientenrekrutierung, Aufklärungsgespräche, Terminorganisation und praktische Datenerhebung, lag in meiner Verantwortung. Grégoire Thürig war punktuell an der Identifikation potenzieller Studienteilnehmender beteiligt. Die Einführung in die Handhabung des verwendeten EMG-Systems (Noraxon Ultium) erfolgte durch Christoph Zaar und Jan Hennig.

Die anschließende statistische Auswertung der erhobenen Daten wurde von mir eigenständig vorgenommen. Dies beinhaltete die Datenaufbereitung, die Auswahl und Durchführung der statistischen Analysen, die Interpretation der Ergebnisse sowie die Erstellung von Grafiken und Tabellen. Eine punktuelle statistische Beratung durch Hans Pinnschmidt erfolgte bei einzelnen Fragestellungen.

Das Manuskript der Publikation wurde von mir eigenständig verfasst. Die Co-Autoren leisteten kommentierende Beiträge und inhaltliche Korrekturen. Dimitris Dalos übernahm als Letztautor die wissenschaftliche Supervision und Korrektur des Manuskripts.

Die Anfertigung der Dissertation wurde von mir selbstständig vorgenommen. Dabei habe ich die Inhalte der Publikation in einen erweiterten wissenschaftlichen Kontext eingebettet und die Ergebnisse vertieft diskutiert. Die Dissertation wurde durch Dimitris Dalos korrigiert und die finale Fassung wurde durch Götz Welsch freigegeben.

7. Eidesstattliche Versicherung

Ich versichere ausdrücklich, dass ich die Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe, insbesondere ohne entgeltliche Hilfe von Vermittlungs- und Beratungsdiensten, verfasst, andere als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die aus den benutzten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen einzeln nach Ausgabe (Auflage und Jahr des Erscheinens), Band und Seite des benutzten Werkes kenntlich gemacht habe. Das gilt insbesondere auch für alle Informationen aus Internetquellen.

Soweit beim Verfassen der Dissertation KI-basierte Tools („Chatbots“) verwendet wurden, versichere ich ausdrücklich, den daraus generierten Anteil deutlich kenntlich gemacht zu haben. Die „Stellungnahme des Präsidiums der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) zum Einfluss generativer Modelle für die Text- und Bilderstellung auf die Wissenschaften und das Förderhandeln der DFG“ aus September 2023 wurde dabei beachtet.

Ferner versichere ich, dass ich die Dissertation bisher nicht einem Fachvertreter an einer anderen Hochschule zur Überprüfung vorgelegt oder mich anderweitig um Zulassung zur Promotion beworben habe.

Ich erkläre mich damit einverstanden, dass meine Dissertation vom Dekanat der Medizinischen Fakultät mit einer gängigen Software zur Erkennung von Plagiaten überprüft werden kann.

Datum Unterschrift

8. Danksagung

Ich möchte mich bei allen Probandinnen und Probanden für ihre uneigennützige Teilnahme an der Studie bedanken.

Mein Dank gilt außerdem allen Mitarbeitenden des Athleticums, die mich bei der Terminfindung und beim Teilen der Räumlichkeiten und Trainingsgeräte unterstützt haben. Ein besonderer Dank geht an Christoph Zaar, der insbesondere bei Fragen zum verwendeten sEMG-Gerät mit großem Fachwissen helfen konnte.

Ich danke den Co-Autoren für ihre Beiträge zur Durchführung und Veröffentlichung der Studie.

Mein ganz besonderer Dank gilt Prof. Dr. Dimitris Dalos für seine tatkräftige Unterstützung während der gesamten Arbeit. Seine sehr schnellen Rückmeldungen, auch zu später Stunde oder im Urlaub, sein stets konstruktives kritisches Feedback, sein Pragmatismus sowie seine große Erfahrung im wissenschaftlichen Arbeiten waren von entscheidender Bedeutung für das Gelingen dieser Arbeit.

Zuletzt danke ich meiner wundervollen Partnerin Johanna für ihre kontinuierliche und bedingungslose Unterstützung, auch bei diesem Projekt.