

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

DISSERTATION

**The influence of bony glenoid reconstruction procedures on soft
tissue integrity of the shoulder**

**Der Einfluss von knöchernen Glenoid Rekonstruktionsverfahren
auf die Weichteilintegrität der Schulter**

zur Erlangung des akademischen Grades

Doctor medicinae (Dr. med.)

vorgelegt der Medizinischen Fakultät
Charité – Universitätsmedizin Berlin

von

Paul Siegert

aus Wien, Österreich

Datum der Promotion: 03.03.2023

Inhaltsverzeichnis

1.1 Abstract (English)	4
1.2 Abstrakt (Deutsch)	5
2 Abkürzungsverzeichnis	6
3 Einleitung	7
3.1 Anatomie	7
3.2 Schulterluxation	7
3.3 Therapie der akuten Schulterluxation	8
3.4 Knochenverlust der Gelenkspfanne	9
3.5 Kritischer Knochendefekt	11
3.6 Knöcherne Glenoidrekonstruktion	11
3.6.1 J-Span Plastik	11
3.6.2 Korakoidtransfer nach Latarjet	13
3.7 J-Span Plastik Versus Latarjet Verfahren	16
3.7.1 Komplikationen	16
3.7.2 Transplantatresorption und Remodellierung	17
3.7.3 Klinische Ergebnisse	18
3.8 Studienziel	19
4 Methoden	20
4.1 Patientenkollektiv	20
4.2 Radiologische Untersuchungen	20
4.3 Glenoidvermessung	20
4.4 Umleitung des Sehnenzugs	21
4.5 Sehnenintegrität	22
4.6 Muskelatrophie und -verfettung	23
5 Ergebnisse	25
5.1 Glenoidvermessung	25
5.2 Umleitung des Sehnenzugs	25
5.3 Sehnenintegrität	25

5.4 Muskelatrophie und -verfettung	25
5.5 Einfluss des Transplantates auf die Muskelverfettung	26
6 Diskussion	27
6.1 Klinische Anwendungen und Bedeutung	27
6.2 Limitationen der Arbeit	29
6.3 Weiterführende Fragen	30
7 Referenzen	32
8 Anhang	40
8.1 Eidesstattliche Versicherung	40
8.2 Anteilserklärung an den erfolgten Publikationen	41
8.3 Journal Summary List	42
8.4 Publikation	44
8.5 Lebenslauf	54
8.6 Publikationsliste	56
8.7 Danksagung	58

1.1 Abstract (English)

Introduction: Glenoid bone loss resulting from fractures or erosions caused by recurrent shoulder dislocations is a common cause of anterior shoulder instability. If the bony defect reaches a critical size, soft tissue surgery such as labrum refixation cannot achieve sufficient stability. In these cases, an osseous glenoid reconstruction is indicated. Basically, a distinction is made between two techniques, that of the coracoid transfer and that of the free bone graft. The following scientific work relates to two special subtypes of these surgical techniques: the screw-fixed coracoid transfer according to Latarjet and the implant-free J-shaped iliac crest bone graft transfer (ICBGT). Although studies have shown that the clinical results of both techniques are comparable, a significant reduction in internal rotation has been described after the Latarjet procedure. In this thesis the effects of the Latarjet procedure and the ICBGT on the soft tissue integrity of the shoulder were examined and possible causes for the restricted mobility were analyzed. We hypothesized that the subscapularis muscle, which is important for internal rotation, is significantly more affected by the Latarjet procedure compared to the ICBGT.

Methods: The integrity of the rotator cuff (subscapularis, infraspinatus and teres minor) was examined preoperatively and in a two-year follow-up using CT-data from a previous prospective randomized study (26 patients following Latarjet versus 26 ICBGT). Both, the degree of fatty muscle infiltration according to the Goutallier classification and a quantitative measurement of the attenuation (Hounsfield units) in relation to the average muscle area were determined. The tendon thickness of the subscapularis muscle was measured at the musculotendinous junction compared to the infraspinatus tendon thickness at the same level. In addition, an analysis of the bone resorption of the respective grafts and the resulting routing of the subscapularis was carried out.

Results: While the preoperative values of both groups with regard to fatty muscle infiltration and tendon thickness were comparable, there was a significant increase of fatty infiltration of the subscapularis muscle and thinning of the tendon in the Latarjet group in the follow-up compared to the ICBGT group.

Conclusion: The hypothesis could thus be proven. This study shows that the subscapularis muscle is structurally impaired postoperatively after the Latarjet procedure. One of the main reasons might be a mechanical conflict between the protruding screw heads, which is caused by partial resorption of the transplant.

1.2 Abstrakt (Deutsch)

Einleitung: Ein Knochenverlust des Glenoids durch Frakturen oder Erosionen bei wiederholten Schulterluxationen ist eine häufige Ursache der vorderen Schulterinstabilität. Erreicht der knöcherne Defekt eine kritische Größe kann mit einem Weichteileingriff wie zum Beispiel einer Labrumrefixierung nicht ausreichend Stabilität erzielt werden. In diesen Fällen ist eine knöcherne Glenoidrekonstruktion indiziert. Grundsätzlich werden zwei Techniken, die des Korakoidtransfers und, die des freien Knochentransplantates unterschieden. Die durchgeführte wissenschaftliche Arbeit bezieht sich auf zwei spezielle Unterarten dieser Operationstechniken: den mit Schrauben fixierten Korakoidtransfer nach Latarjet und die implantatfreie J-Span Beckenkammplastik. Obwohl in Studien gezeigt wurde, dass die klinischen Ergebnisse beider Techniken vergleichbar sind, wurde nach dem Latarjet Verfahren eine signifikante Reduktion der Innenrotation beschrieben. In dieser Arbeit wurden die Auswirkungen des Latarjet Verfahrens und der J-Span Plastik auf die Weichteilintegrität der Schulter untersucht und mögliche Ursachen für diese Bewegungseinschränkung analysiert. Wir stellten die Hypothese auf, dass der für die Innenrotation wichtige Muskel Subskapularis durch das Latarjet Verfahren im Vergleich zur J-Span Plastik mehr beeinträchtigt wird.

Methoden: Anhand von CT-Daten, die im Rahmen einer früheren prospektiv randomisiert kontrollierten Studie erhoben wurden, wurde die Integrität der Rotatorenmanschette (M. Subskapularis, M. Infraspinatus, und M. Teres minor) präoperativ und im Follow-up nach zwei Jahren untersucht (26 Patienten nach Latarjet gegen 26 nach J-Span Plastik). Dabei wurde sowohl der Grad der Verfettung entsprechend der Goutallier Klassifikation als auch durch eine quantitative Messung der Strahlenabschwächung (Hounsfield units) in Relation zur Muskeldurchschnittsfläche bestimmt. Die Sehnendicke des Subskapularis wurde am muskulotendinösen Übergang im Vergleich zur Sehnendicke des M. Infraspinatus an selbiger Stelle gemessen. Zusätzlich erfolgte eine Analyse der Knochenresorption der entsprechenden Transplantate und die darauf resultierende Umleitung des M. Subskapularissehnenszugs.

Ergebnisse: Während die präoperativ erhobenen Werte beider Gruppen in Bezug auf die Muskelverfettung und die Sehnendicke vergleichbar waren, zeigte sich eine signifikante Zunahme der Verfettung des M. Subskapularis als auch eine Ausdünnung der Sehne in der Latarjet Gruppe im Follow-up im Vergleich zur J-Span Gruppe.

Schlussfolgerung: Die Hypothese konnte somit bestätigt werden. Diese Studie zeigt, dass der Subskapularis durch das Latarjet Verfahren strukturell beeinträchtigt wird. Einer der Hauptgründe könnte ein mechanischer Konflikt der hervorstehenden Schraubenköpfe sein, der durch eine partielle Resorption des Transplantates entsteht.

2 Abkürzungsverzeichnis

AC	Acromioklavikular
CT	Computertomographie
HU	Hounsfield units
ICBGT	Iliac crest bone graft transfer
ISP	Infraspinatus
M.	Muskulus
MRT	Magnetresonanztomographie
SC	Sternoklavikular
SSC	Subskapularis
TM	Teres minor

3 Einleitung

3.1 Anatomie

Die Schulter bildet den Übergang des Torsos mit der oberen Extremität. Genau betrachtet stellt die Klavikula die einzige Gelenksverbindung mit dem knöchernen Thorax über das Acromioklavikular- (AC) und das Sternoklavikulargelenk (SC) dar.^{23, 67} Das glenohumerale Gelenk ist hierbei der zentrale Drehpunkt der Bewegung des Arms. Anders als ein Scharniergelenk, wie beispielsweise das Kniegelenk, verfügt es über ein Bewegungsausmaß in allen Ebenen. Im Vergleich zu anderen Kugelgelenken bietet die flache Pfanne nur eine eingeschränkte knöcherne Überbauung und damit Stabilität, um wiederum eine maximale Bewegungsfreiheit zu schaffen.³⁶

Der Großteil der Stabilität im glenohumeralen Gelenk wird durch ein muskuläres und ligamentäres Gleichgewicht geschaffen.^{11, 42} In Abhängigkeit des Bewegungsausmaßes ist eine gewisse Verschieblichkeit oder auch Translation physiologisch.^{32, 36} Diese ist interindividuell je nach Dehnbarkeit und Laxizität des Kapsel-Band-Apparats des Gelenks unterschiedlich. Ist es allerdings nicht möglich den Humeruskopf in der Pfanne zu zentrieren, wird von einer Instabilität gesprochen.⁴²

3.2 Schulterluxation

Drei Viertel aller Schulterluxationen sind auf ein unfallbedingtes Trauma zurückzuführen und zählen zu den häufigsten Sportverletzungen im jungen Alter.⁵¹ Die vordere Schulterluxation, wobei der Humeruskopf in Relation zum Glenoid nach anterior und inferior luxiert, ist deutlich häufiger als die hintere Schulterluxation.^{33, 51} Der typische Unfallmechanismus einer vorderen Schulterluxation ist ein Sturz auf den ausgestreckten Arm. In den meisten Fällen führt dies zu einem strukturellen unilateralen Schaden des vorderen Glenoids.⁵¹ Es sind knöcherne und weichteilige Defekte zu unterscheiden. Bei den meisten Erstluxationen kommt es zu einem Riss des vorderen, unteren Labrum-Kapsel Anteils, auch Bankart-Läsion genannt.³⁸ Es kann allerdings auch zu einer knöchernen Absprengung des Glenoids kommen.⁶ Beide dieser Verletzungen führen zu einer Verringerung der Konkavität und erhöhen somit das Risiko einer Reluxation.⁴² (Abb. 1)

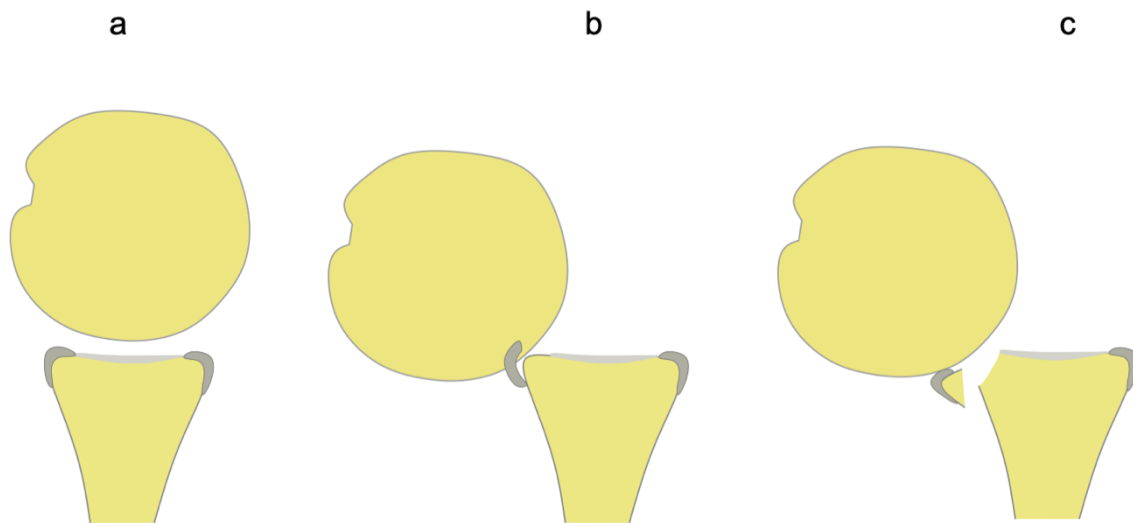


Abb. 1: Axiale Ansicht eines schematischen Glenoids mit normaler Konkavität durch Knochen und Weichteil (a). In Folge einer vorderen Luxation kann es sowohl zu einem Schaden des vorderen Labrum-Kapsel-Komplexes (b) als auch des Knochens (c) kommen. Diese Abbildung wurde durch Paul Siegert (Promovend) illustriert basierend auf der Publikation von Lippitt et al.⁴²

Durch das Anschlagen des Humeruskopfes am ventralen Glenoidrand kann es neben einer Pfannenverletzung auch zu einer Impression des dorsalen Humeruskopfes kommen. Diese als Hill-Sachs Läsion beschriebene Verletzung kann sich im Sinne einer seichten Delle bis hin zu größeren Knochendefekten des Humeruskopfes, vor allem bei Rezidivluxationen, manifestieren.¹²

3.3 Therapie der akuten Schulterluxation

Klinisch präsentiert sich ein Patient mit einer vorderen Schulterluxation meist mit einem herunterhängenden Arm in einer leichten Abduktion und Anteflexion. Äußerlich ist eine Einbuchtung kaudal des Acromions, auch „Epaulettenzeichen“ genannt, zu sehen und zu tasten.²⁹ Bei aktiver und passiver Bewegung des Arms entstehen akute und teils heftige Schmerzen. Trotz den meist eindeutigen klinischen Zeichen ist in der Diagnostik eine Röntgenuntersuchung zur Verifizierung und Ausschluss einer Fraktur in zwei Ebenen (anterior-posterior und outlet-view) empfehlenswert. Dafür sollten die Abklärung und Reposition im Krankenhaus durchgeführt werden.^{52, 56}

Vor der Durchführung einer Reposition muss die periphere Durchblutung, die Motorik und der Nervenstatus erhoben werden. Aufgrund der anatomischen Lage ist vor allem der Nervus Axillaris besonders gefährdet.⁵³

Um den Humeruskopf aus der Verhakung am vorderen, unteren Glenoidrand zu befreien, gibt es unterschiedliche Repositionsverfahren. Das Prinzip aller Techniken ist es ein Hypomochlion zu verwenden, wie eine Sessellehne oder den Fuß des Arztes.⁵⁶ Vorsichtig und unter konstantem Zug wird eine axiale Kraft angewandt, bis der Humeruskopf aus der Verhakung gelöst wird und zurück in die Pfanne rutscht. Der Behandler sollte dabei äußerst behutsam und ohne ruckartige Bewegungen oder zu starker Kraftaufwendung vorgehen, um eine Fraktur und einen Knorpelschaden zu verhindern. Ist eine Reposition auf Grund des schmerzbedingten Muskeltonus nicht möglich, sollte eine Analgesie oder Kurznarkose durchgeführt werden.⁴⁴ Nach der Reposition ist eine neuerliche Begutachtung der peripheren Versorgung von Nerven und Gefäßen durchzuführen. Anschließend ist eine Röntgenuntersuchung in zwei Ebenen vorgesehen, um die anatomische Reposition zu verifizieren und einen knöchernen Schaden zu beurteilen. Zur weiteren Abklärung bei Verdacht eines knöchernen strukturellen Schadens am Humeruskopf oder der Pfanne ist eine Computertomographie (CT) angezeigt.

Nach einer erstmaligen vorderen Schulterluxation wird – wie oben beschrieben – akut eine Reposition durchgeführt und die Schulter mit einer Schulterbandage ruhiggestellt. Die Entscheidung über ein konservatives oder operatives Vorgehen hängt von mehreren Faktoren ab. Ziel der Behandlung ist es, rezidivierende Luxationen zu vermeiden. Daher wird eine Risikoabschätzung durchgeführt. Besonders wird hier das männliche Geschlecht, als auch ein junges Alter von 15 bis 20 Jahren als Risikofaktor für eine Reluxation genannt.⁶⁹ Eine mögliche Hyperlaxizität sollte ebenfalls evaluiert werden.⁵⁰ Die Therapie der traumatischen Erstluxation wird jedoch weiterhin kontrovers diskutiert.⁶⁶

3.4 Knochenverlust der Gelenkspfanne

Knöchern wird die Stabilität des Gelenks sowohl durch die Größe der Pfanne als auch durch die Konkavität beeinflusst. Moroder et al. zeigten in einer Studie den Einfluss der knöchernen Konkavität auf die Stabilität des glenohumeralen Gelenks.⁴⁶ Zusätzlich verstärken Knorpel und Labrum am Rand der Pfanne den Effekt der Konkavität. Bei Verletzung dieser Strukturen kann es folglich zu einer Instabilität des glenohumeralen Gelenks kommen.³⁸

Ein knöcherner Verlust der vorderen Gelenkspfanne kann sowohl durch ein primär traumatisches Ereignis wie die Abspaltung der ventralen Kortikalis mit Spongiosaanteilen bedingt sein, als auch durch Erosionen am Glenoidrand durch repetitive Schulterluxationen.⁶

Bei singulärer Luxation wurden in über 40 Prozent ein Knochenverlust und bei chronischen Luxationen bei über 80 Prozent der Patienten beschrieben.³⁰

Nach Bigliani et. al⁶ wurde der knöcherne Defekt der Gelenkspfanne in drei verschiedene Typen unterteilt. Typ I umfasst Avulsionsläsionen mit weitgehend undislozierten kleineren Knorpel-Knochen Fragmenten, die mit dem Labrum verbunden sind. Der Typ II Defekt besteht aus bereits medial fehlverheilten Knorpel-Knochen Fragmenten, die nicht mit dem Labrum verbunden sind. Bei Typ III handelt es sich um eine Erosionsverletzung des ventralen Glenoids, welcher sich nach Größe des Knochenverlustes in Typ IIIa (<25% der Gelenkfläche) und Typ IIIb (>25% der Gelenkfläche) unterteilt.

Die Größe des knöchernen Defekts nimmt durch fortschreitende Erosion bei rezidivierenden Luxationen zu. Es kommt zu einem Abbau des anterior-inferioren Glenoids. (Abb. 2) Erreicht der Defekt eine Größe, bei der der inferiore Durchmesser der Gelenkfläche kleiner als der kraniale ist, verändert sich die Form zu einer umgekehrten Birne oder „inverted pear“ wie von Burkhart et al.⁹ beschrieben. (Abb. 2b)

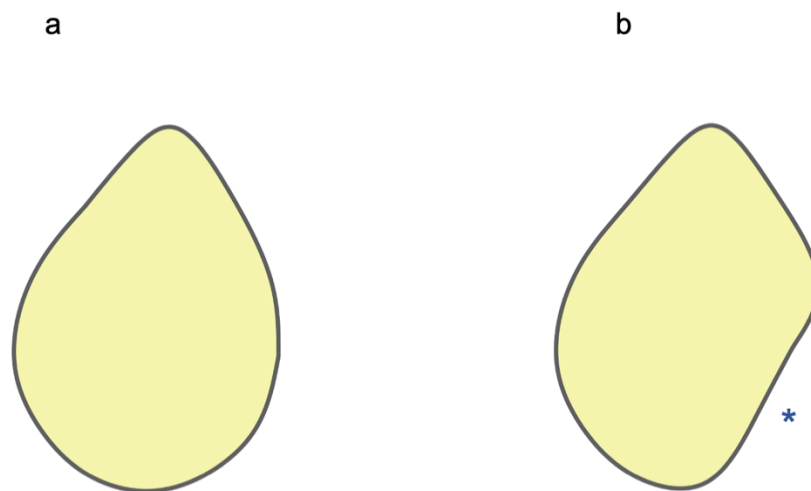


Abb. 2: „En face“ Ansicht eines schematischen Glenoids (a). Durch chronische Erosionen des anterioren Glenoids bei rezidivierender vorderer Schulterluxation kommt es zu einem progressiven Knochenverlust (*); das Glenoid nimmt dabei die Form einer umgekehrten Birne an (b). Diese Abbildung wurde durch Paul Siegert (Promovend) illustriert basierend auf der Publikation von Burkhart et al.⁹

Die Therapie einer chronischen Schulterinstabilität mit knöchernem Defekt hängt vor allem von der Größe ab. Bei nur kleineren Defekten kann mit einer Weichteilrekonstruktion des vorderen Kapsel-Labrum-Komplexes oder auch „Bankart Repair“ genannt, eine ausreichende Stabilität erzielt werden.³⁵ Bei einer akuten Luxation mit einer größeren knöchernen Absprengung ist

eine Fixierung des Fragmentes durch eine direkte Verschraubung, oder eine indirekte Reposition und Stabilisierung durch Refixation des Labrums oberhalb und unterhalb des Defekts angezeigt.⁶⁴ Bei einem mittelgroßen Knochenverlust der Gelenksfläche wurden ergänzende Allograft-Techniken beschrieben.⁴⁵ Überschreitet der Defekt des Glenoids eine gewisse Größe, sind Weichteileingriffe nicht mehr indiziert.

3.5 Kritischer Knochendefekt

Die Defektgröße des Glenoids ab der eine reine Weichteilrekonstruktion zu keiner ausreichenden Stabilisierung der Schulter führt, wird als kritischer Knochendefekt bezeichnet.⁹ ⁴⁶ In der Literatur werden die Grenzwerte jedoch kontrovers diskutiert.^{7, 11, 59} In Bezug auf die Fläche des Glenoids werden häufig Defektwerte zwischen 20 und 30% als kritisch genannt.^{6, 7, 36, 71} Eine Studie von Shaha et al.⁵⁹ konnte jedoch beweisen, dass es bereits ab einem knöchernen Defekt von 13,5% zu einer signifikanten klinischen Verschlechterung kommen kann. In einer rezenten Studie von Moroder et al.⁴⁶ wurde gezeigt, dass allein die Defektgröße keine genaue Voraussage über die Stabilität zulässt. Interindividuell konnten bei Patienten Unterschiede der Glenoidkonkavität festgestellt werden. Sie zogen aus ihren Daten den Schluss, dass auch ein kleinerer oder subkritischer Defekt zu einer Schulterinstabilität führen kann, wenn die Konkavität dadurch erheblich verändert wird.

3.6 Knöcherne Glenoidrekonstruktion

Bei kritischem Knochendefekt werden pfannenvergrößernde Verfahren angewandt. Ziel dieser Eingriffe ist eine Wiederherstellung des anterioren Glenoids. Grundlegend werden dabei zwei Techniken, die des Korakoidtransfers und die des freien Knochenspan-Transfers unterschieden. Die folgende Studie bezieht sich auf zwei spezielle Unterarten dieser Operationstechniken:

3.6.1 J-Span Plastik

Der Transfer eines freien Beckenkamm-Spans stellt ein häufig angewandtes anatomisches Verfahren dar. Die folgende Technik wird anhand der Beschreibung durch Auffarth et al.³ dargestellt. Der Patient wird unter Allgemeinnarkose halbsitzend in der sogenannten „beach chair“ Position gelagert. Der betroffene Arm wird in einer mobilen Armstütze befestigt. Es erfolgt eine intravenöse Antibiose. Nach dem sterilen Waschen und Abdecken der Schulter und des Beckenkamms werden das Akromion, die Klavikula und das Korakoid mit einem sterilen Stift markiert. Nun erfolgt eine Hautinzision ungefähr 1cm lateral der Korakoidspitze in der Verlaufsrichtung des Muskulus Deltoideus. Nach dem vorsichtigen Durchtrennen des

Subkutangewebe unter Schonung der Vena cephalica wird der mediale Rand des M. Deltoideus dargestellt und nach lateral weggehalten. Die Subskapularissehne wird nun mit ihren kranialen und kaudalen Anteilen dargestellt. Die umliegenden Gewebe werden vorsichtig präpariert, um eine gute Übersicht zu gewinnen. Um das Schultergelenk zu eröffnen, wird die Subskapularissehne im Faserverslauf horizontal geteilt und mit Haken weggehalten. Der Zugang wird zwischen dem Übergang der kranialen zwei Drittel und dem kaudalen ein Drittel des Subskapularis gewählt. Nun wird die Gelenkskapsel durchtrennt und medial bereits Fäden vorgelegt, um den späteren Verschluss zu erleichtern. Mit einem Fukuda-Haken wird der Humeruskopf nach dorsal retrahiert, um das Glenoid zu präsentieren. Noch vorhandene Anteile des Labrums werden vorsichtig abgeschoben, um den Knochen darzustellen. Nun wird der Defekt in allen Dimensionen vermessen, anschließend wird der knöcherne Untergrund mit einer Fräse vorsichtig angefrischt, um eine bessere Einheilung des Transplantates zu gewährleisten. Es erfolgt nun eine Hautinzision entlang des ipsilateralen Beckenkamms. Das Subkutangewebe und die Faszie werden durchtrennt und der Knochen dargestellt. Nun wird die zuvor ausgemessene Breite des Spans markiert (Abb. 3a). Mit der oszillierenden Säge wird nun ein bikortikaler Span gehoben (Abb. 3b) und anschließend der spongiöse Anteil entfernt, um die namensgebende J-Form zu erhalten (Abb. 3c).

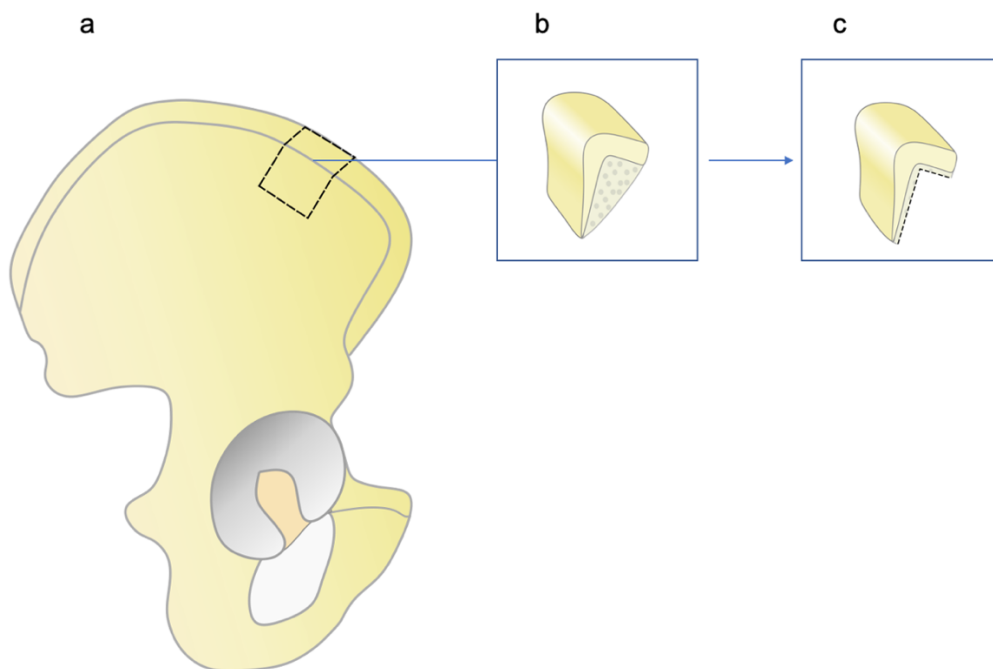


Abb. 3: Schematische Darstellung eines Beckenkamms von lateral. Die Dimensionen des Spans werden eingezeichnet (a), anschließend wird ein bikortikaler Span gehoben (b) und von der Spongiosa gelöst (c). Diese Abbildung wurde durch Paul Siegert (Promovend) illustriert basierend auf der Publikation von Auffarth et al.³

Der nächste Schritt ist die Osteotomie im Bereich des medialen Glenoidhalses. Diese wird entsprechend der Spandimension ca. 5mm medial der Gelenksfläche in 30° Angulation durchgeführt. Mit einem speziellen Impaktor wird nun der J-Span vorsichtig eingebracht. (Abb. 4) Da sich das Transplantat im spongiösen Lager gut verkeilt, wird keine Schraubenfixierung benötigt. Mit der Fräse wird nun der Überstand des Spans bis zur Höhe der Gelenksfläche reseziert, um eine Stufenbildung zu vermeiden.

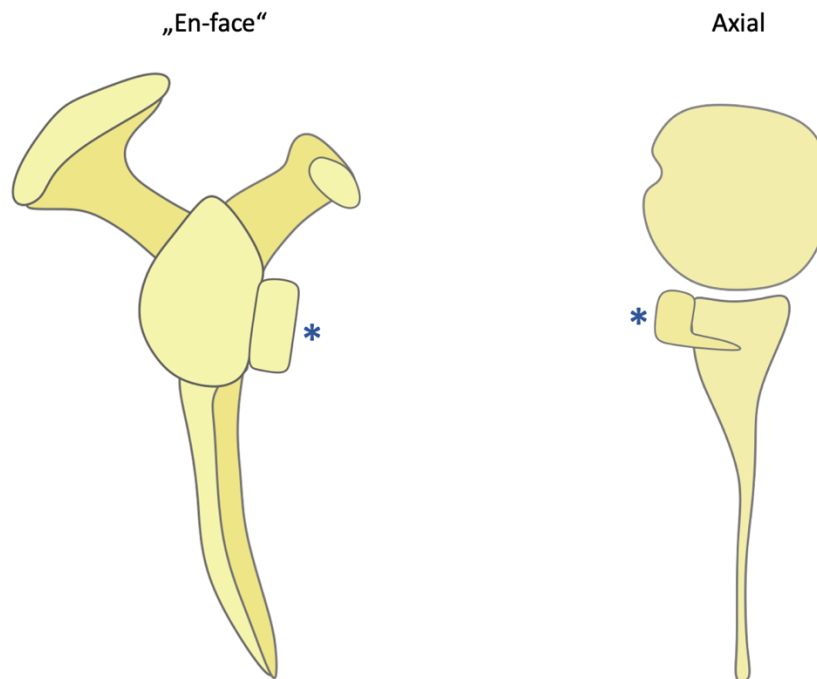


Abb. 4: Schematische Darstellung eines J-Spans (*) in zwei Ebenen. Der zuvor präparierte Beckenkammspan (J-Span) wird durch eine Osteotomie am medialen Glenoidhals fixiert und ein möglicher Überstand über die Gelenksfläche abgetragen.⁶⁰ Diese Abbildung wurde durch Paul Siegert (Promovend) illustriert basierend auf der Publikation von Auffarth et al.³

Es erfolgt nun eine Fixierung des Labrums über den J-Span. Die Kapsel, die Subskapularissehne, das Subkutangewebe und die Haut werden schichtweise verschlossen. Postoperativ wird eine Schulterbandage für 3 Wochen angelegt.³

3.6.2 Korakoidtransfer nach Latarjet

Der Korakoidtransfer wurde durch Latarjet et al.⁴¹ 1954 erstbeschrieben. Es handelt sich um ein extraanatomisches Verfahren, da es zu einer Änderung der ursprünglichen Physiologie kommt. Die Technik wurde im Verlauf der letzten Jahrzehnte mehrfach modifiziert.

Entsprechend der Beschreibung von Young et al.⁷² wird das Latarjet Verfahren wie folgt durchgeführt: Der Patient wird wie bei der J-Span Plastik in einer halbsitzenden Position gelagert. Die Hautinzision wird vom Korakoid in Richtung Achselfalte geführt. Der M. Deltoideus wird nun nach lateral weggehalten, um das Korakoid zu präsentieren. Das Ligamentum coracoacromiale wird im Verlauf dargestellt und mit circa 1cm Abstand zum Ansatz abgesetzt. Nach sorgfältiger Präparation und Ablösen von Anteilen des M. Pectoralis minor wird das Korakoid im Bereich seiner Biegung mit einem Meißel osteotomiert. (Abb. 5a) Das Transplantat kann nun mit einer Zange mobilisiert werden. Im Bereich der Korakoidspitze wird der Ansatz der sogenannten „Conjoint-Tendons“ (M. biceps brachii caput breve und M. coracobrachialis) erhalten. Die Unterseite wird nun mit der oszillierenden Säge flach angefrischt, um die spätere Einheilung zu verbessern. Nun wird die Subskapularissehne in ihrem kranialen bis kaudalen Verlauf bis zum Ansatz dargestellt. Zwischen den kranialen zwei Drittel und dem kaudalen ein Drittel wird die Sehne im Faserverlauf des muskulotendinösen Übergangs geteilt und mit Haken aufgehalten, um die Kapsel darzustellen. Durch eine vertikale Inzision wird das Schultergelenk eröffnet. Der Humeruskopf wird nach dorsal mit einem Retraktor gehalten und die Glenoidvorderkante präsentiert. Der knöcherne Glenoiddefekt wird dargestellt und von Weichteilgewebe befreit. Mit einem Meißel oder einer Fräse wird der Knochen angefrischt und ein flacher Untergrund geschaffen. Unter Verwendung eines speziellen Instruments werden nun entsprechend der Transplantatgröße ein kraniales und ein kaudales Loch parallel zur Gelenksfläche gebohrt. Das Korakoidtransplantat wird nun durch die Subskapularissehne mit der flachen Seite zur Defektfläche eingepasst und mit zwei Schrauben am Glenoidhals fixiert. (Abb. 5b, Abb. 6) Um eine Stufenbildung zu vermeiden, werden Knochenanteile, die die Gelenksfläche überragen, abgetragen. Die Kapsel wird nun mit dem Stumpf des Ligamentum coracoacromiale vernäht. Da die „Conjoint-Tendons“ nun permanent durch die Subskapularissehne geleitet werden, muss keine Naht der Sehne durchgeführt werden. Durch diese Umleitung wird ein sogenannter „sling effect“ erzielt, welcher zu einer besseren Stabilität des Gelenkes führt. Das Subkutangewebe und die Haut werden schichtweise verschlossen. Für 2 Wochen wird eine Schulterbandage angelegt.

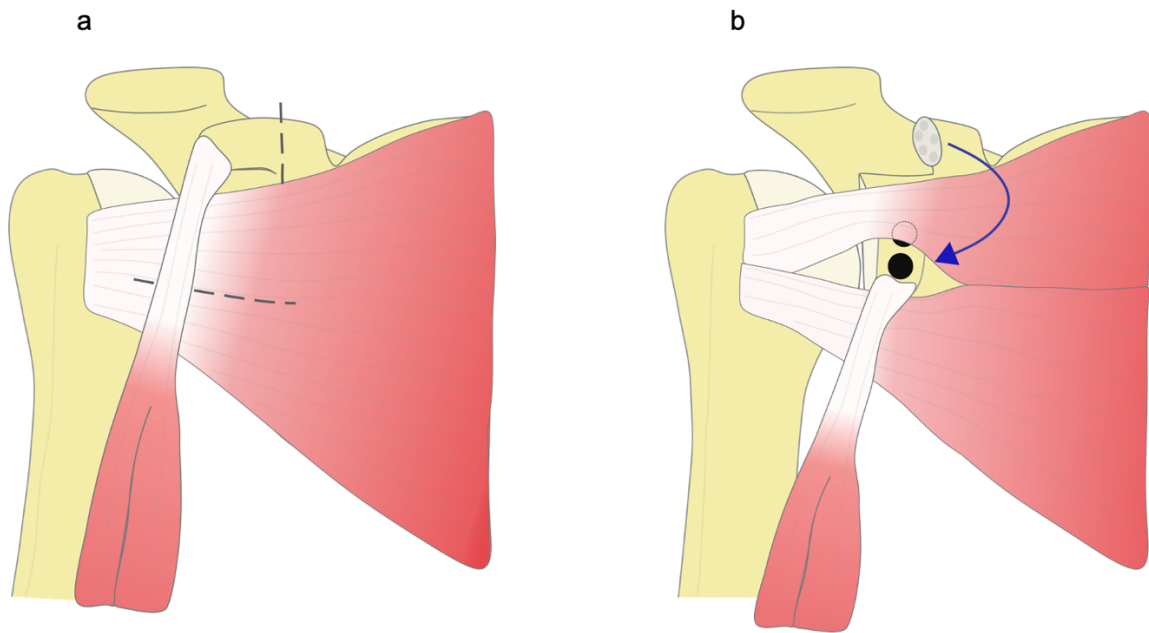


Abb. 5: Schematische Darstellung des Korakoidtransfers nach Latarjet. Die Osteotomie der Korakoids wird an seiner Biegung durchgeführt (a) und anschließend durch eine permanente Teilung des Subskapularis (muskulotendinöser Übergang) geleitet (b) und mit zwei Schrauben fixiert. 6) Diese Abbildung wurde durch Paul Siegert (Promovend) illustriert basierend auf der Publikation von Latarjet et al.⁴¹

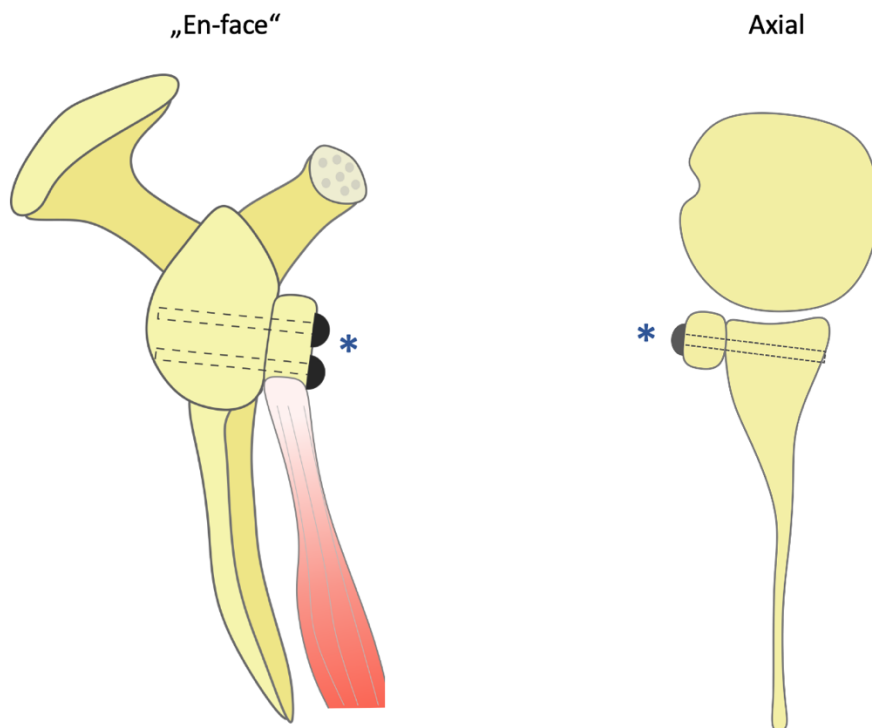


Abb. 6: „En-Face“ und axiale Ansicht des Korakoidtransfers nach Latarjet. Das Transplantat (*) wird am ventralen Glenoidhals mit Schrauben fixiert. Diese Abbildung wurde durch Paul Siegert (Promovend) illustriert basierend auf der Publikation von Latarjet et al.⁴¹

3.7 *J-Span Plastik Versus Latarjet Verfahren*

Sowohl die Indikation als auch die Überlegenheit einer der beiden Techniken gegenüber der anderen wird kontrovers diskutiert. Beide Verfahren sind anspruchsvoll in der Anwendung und zeigten sich als effektive Therapie bei chronischer vorderer Schulterinstabilität. Die Wahl ist hauptsächlich von der Präferenz und Gewohnheit des entsprechenden Operateurs abhängig. Seit der Erstbeschreibung dieser zwei Operationen wurden viele Modifikationen mit teils minimalinvasiven Methoden oder unterschiedlicher Transplantatfixierung publiziert.^{1, 40, 70} Biomechanisch wird die primäre Stabilität durch eine Vergrößerung der Gelenkspfanne und Wiederherstellung der Konkavität erreicht. Die extraanatomische Umleitung der „Conjoint-Tendons“ durch eine permanente Subskapularis (SSC) Teilung sorgt beim Latarjet Verfahren zusätzlich zu einer Verbesserung der Stabilität durch den sogenannten „sling effect“. Die „Conjoint-Tendons“ verlaufen dabei über die kaudalen Anteile des SSC und bilden eine Schlinge. Bei der Abduktions- und Außenrotationsbewegung des Armes werden diese Anteile nach dorsal gedrückt und verhindern somit ein Bewegen des Humeruskopfes nach vorne.¹⁰ Es konnte allerdings gezeigt werden, dass die Reluxationsraten beider Techniken vergleichbar sind.⁴⁹

3.7.1 Komplikationen

Beide Verfahren bergen durch ihre Komplexität ein Komplikationsrisiko. Intraoperativ kann es zu einer Fehlpositionierung des Transplantates kommen. Bei beiden Techniken sollte der Graft zwischen 2 und 5 Uhr (rechte Schulter) positioniert werden. Durch die teils eingeschränkte Visualisierung und erschwerte Einstellung der Glenoidvorderkante ist dies allerdings auch für geübte Operateure fordernd.³¹ Eine zu kraniale Positionierung kann nicht nur zu einer Steigerung der Reluxationsrate, sondern in seltenen Fällen durch die kraniale Schraubenfixierung beim Latarjet Verfahren auch zu einer Einengung des Nervus Supraskapularis führen.³⁹ Wird der Knochenblock zu medial eingebracht, kann dies den gewünschten Effekt der Pfannenvergrößerung verringern, was ebenfalls zu einer erhöhten Reluxationsrate führen kann.⁶⁸ Bei einer lateralen Einbringung kommt es zu einer Stufenbildung im Gelenk. Intraoperativ kann diese mit einer Fräse angeglichen werden. Verbleibt allerdings eine größere Kante, kann es zu einer frühzeitigen Gelenksabnutzung oder Arthrose kommen.³⁴ Bei der Fixierung des Transplantates kann dieses brechen. Wie mit solch einer Komplikation verfahren wird, hängt von der Größe und Qualität des verbleibenden Knochenblocks ab. Bei der J-Span Plastik besteht zusätzlich das Risiko einer Glenoidfraktur durch das Einschlagen in den Skapulahals.³ Durch die Entnahme des Knochentransplantates

aus dem Beckenkamm bei der J-Span Plastik kann es auch hier zu lokalen Komplikationen kommen. Häufig kommt es zu Dysästhesien und Schmerzen im Bereich der Entnahmeestelle.^{3, 13, 49} Die Schraubenfixierung des Korakoidtransplantates führt in manchen Fällen zu einem mechanischen Konflikt. Es konnte in einer Studie gezeigt werden, dass es durch die Entfernung der Schrauben nach dem Latarjet Verfahren mit unerklärlichen vorderen Schulterschmerzen zu einer deutlichen Besserung der Beschwerdesymptomatik kommen kann.²⁵

3.7.2 Transplantatresorption und Remodellierung

Sowohl die J-Span Plastik als auch das Latarjet Verfahren nutzen ein Knochenransplantat, um die Größe und Konkavität der Pfanne wiederherzustellen. Die Knochenblöcke sind durch ihre unterschiedliche Fixierung anderen biomechanischen Kräften ausgesetzt. Während der J-Span ohne zusätzliche Fixierung in den Skapulahals eingebracht wird, bringen die Schrauben auf das Korakoidransplantat mehr Kompression auf. Die Resorption und das Ausbleiben der knöchernen Integration ist bei beiden Techniken eine Sorge. Samim et al.⁵⁵ berichteten, dass im Durchschnitt 67% des Korakoidransplantates einheilen. In rund 5% ihres Kollektivs konnte überhaupt keine Heilung mit vollständiger Resorption des Knochenblocks gezeigt werden. Di Giacomo et al.¹⁷ untersuchten in einer Studie anhand von CT-Bildern die genaue Lokalisation der Resorption nach offenem Latarjet-Verfahren. Sie zeigten, dass der Knochen vor allem am äußeren Rand und den kranialen Anteilen einer Osteolyse unterliegt. Dieser Effekt wurde auf mehrere biomechanische Eigenschaften zurückgeführt. Es wird davon ausgegangen, dass die Blutzufuhr direkt an der Verbindung zwischen dem Transplantat und dem Skapulahals am höchsten ist, daher komme es eher zu einer Auflösung der äußeren Anteile. Zusätzlich sei die Blutzufuhr der kaudalen Anteile durch die noch inserierten „Conjoint-Tendons“ verbessert. Biomechanisch wird auf die kaudalen Anteile auch eine größere Scherkraft ausgeübt. Zusammen kommt es dabei zu einem Effekt, bei dem die kraniale Schraube oft nur noch zum Teil mit Knochen bedeckt ist und dadurch übersteht. Im Gegensatz dazu wirkt auf den J-Span nur die Scherkraft des Humeruskopfes ein.³ Es kommt zu einer anderen Art der Osteolyse oder Remodellierung. Moroder et al.⁴⁸ untersuchten das Resorptionsmuster nach J-Span Plastik in einer CT-Analyse. Sie fanden ähnlich wie nach dem Latarjet-Verfahren eine deutliche Osteolyse des Knochenblocks. Im Vergleich zur kontralateralen Seite zeigte sich allerdings eine Remodellierung auf annähernd dieselbe Größe. Die Form des neuen Glenoids wies ebenfalls einen anatomischen Charakter auf. Diese Eigenschaften werden der Kraftverteilung entsprechend dem Wolff'schen Gesetz zugesprochen.¹⁶

3.7.3 Klinische Ergebnisse

In der Literatur wurden die Ergebnisse nach Latarjet Verfahren und J-Span Plastik häufig dargestellt, allerdings gibt es derzeit nur eine prospektiv randomisiert kontrollierte Studie von Moroder et al.,⁴⁹ die einen direkten Vergleich der beiden Techniken durchführten. Dabei zeigten sich in einem Nachuntersuchungszeitraum von zwei Jahren keine signifikanten Unterschiede klinischer Scores. In dieser Studie wurde der Western Ontario Shoulder Instability (WOSI) index³⁷ als Hauptmessergebnis verwendet. Verglichen wurden die Scores zu folgenden Zeitpunkten: Präoperativ, 6 Monate, 12 Monate und 24 Monate Follow-up. Zu keinem dieser Zeitpunkte konnte zwischen den beiden Techniken ein signifikanter Unterschied anhand von WOSI Index³⁷, Rowe Score⁵⁴, Subjective Shoulder Value²⁴, und Athletic Shoulder Outcome Scoring System (ASOSS)⁶³ gezeigt werden.

Während die Abduktion und Außenrotation zu keinem Zeitpunkt einen Unterschied zwischen den beiden Gruppen aufwies, war die Innenrotation mit adduziertem Arm als auch die hohe Innenrotation im 6, 12 und 24 Monats Follow-up signifikant verringert in der Latarjet Gruppe im Vergleich zur J-Span Gruppe, während präoperativ keine Unterschiede gemessen wurden.⁴⁹ In einer Studie von Caubère et al.¹⁵ wurden die klinischen Ergebnisse nach dem Latarjet Verfahren in Bezug auf die Subskapularisintegrität untersucht. Obwohl im Follow-up nach einem Jahr keine Veränderungen des Muskels radiologisch gezeigt werden konnten, fand sich dennoch ein signifikantes Kraftdefizit.

Edouard et al.¹⁸ beschrieben ebenfalls eine signifikante Kraftminderung der Innenrotation nach dem Latarjet Verfahren, sie zeigten allerdings eine zunehmende Remission nach zwei Jahren. Im Vergleich zu den Ergebnissen von Moroder et al.⁴⁹ zeigte sich auch hier im Verlauf eine leichte Verbesserung der Innenrotation im 6 zu 24 Monate Follow-up, im direkten Vergleich zur J-Span Gruppe wurden jedoch immer noch signifikante Unterschiede gemessen.

3.8 Studienziel

Entsprechend der klinischen Ergebnisse nach dem Latarjet Verfahren und der J-Span Plastik konnte gezeigt werden, dass die Reluxationsrate und der klinische Erfolg vergleichbar sind. Es wurde allerdings ein Innenrotationsdefizit nach dem Latarjet Verfahren beschrieben, ohne eine Evidenz-basierte Erklärung.

Ziel dieser Studie war es, die Sehnen- und Muskelintegrität des Subskapularis zu bestimmen und mögliche Ursachen für die signifikant verringerte Innenrotationskapazität im Vergleich zur J-Span Plastik zu untersuchen. Wir stellten die Hypothese auf, dass die Integrität der Subskapularissehne und des Muskels nach der J-Span Plastik im Vergleich zum Latarjet Verfahren weniger beeinträchtigt ist.

4 Methoden

4.1 Patientenkollektiv

Wie in der Originalpublikation⁶⁰ beschrieben wurden für diese Studie die CT-Daten von Patienten evaluiert, die zuvor in einer prospektiv randomisiert kontrollierten Studie von Moroder et al.⁴⁹ eingeschlossen worden waren. Entsprechend der Ein- und Ausschlusskriterien wurden 52 Patienten (26 Latarjet Verfahren versus 26 J-Span Plastik) untersucht.

4.2 Radiologische Untersuchungen

Die primäre Schichtdicke der CT-Untersuchungen betrug mindestens 0,625mm. Alle Vermessungen wurden durch den Erstautor (Promovend) und eine Zweitmessung durch PD Dr. Fabian Plachel durchgeführt. Eine gemeinsame Trainingseinheit der Methoden wurde vor der Messung durchgeführt, die eigentlichen Messungen erfolgten daraufhin jedoch unabhängig, ohne jegliches Wissen über die Ergebnisse beider Untersucher. Der errechnete Intraklassenkorrelationskoeffizient (ICC) zeigte bei allen durchgeführten Messungen eine substanzielle bis perfekte Übereinstimmung wie in Tabelle 1 der Originalpublikation⁶⁰ dargestellt.

4.3 Glenoidvermessung

Es gibt verschiedene Methoden den knöchernen Verlust zu vermessen. Bei der sogenannten PICO-Methode, beschrieben durch Baudi et. al⁵, werden die bilateralen Gelenksflächen multiplanar in einer Computertomographie dargestellt, um einen parasagittalen Blick („en-face“ Ansicht) auf das Glenoid zu erhalten. Nun wird auf der gesunden Seite ein Kreis eingezeichnet, der den dorsalen und inferioren Glenoidrand tangiert. Dieser soll so gut wie möglich an die Form des Glenoids angepasst werden („best-fit“). Ein Kreis mit demselben Durchmesser wird nun an der pathologischen Seite an den posterioren und inferioren Glenoidrand angelegt und die Fläche des Defektes wird als Prozentanteil der Gesamtfläche angegeben (Abb. 7). Bei bilateralem Knochendefekt wird der Kreis an der zu vermessenden Seite nach „best-fit“ Prinzip am posterioren und inferioren Glenoidrand angelegt. In der Originalpublikation⁶⁰ wurde dieses Prinzip angewandt.

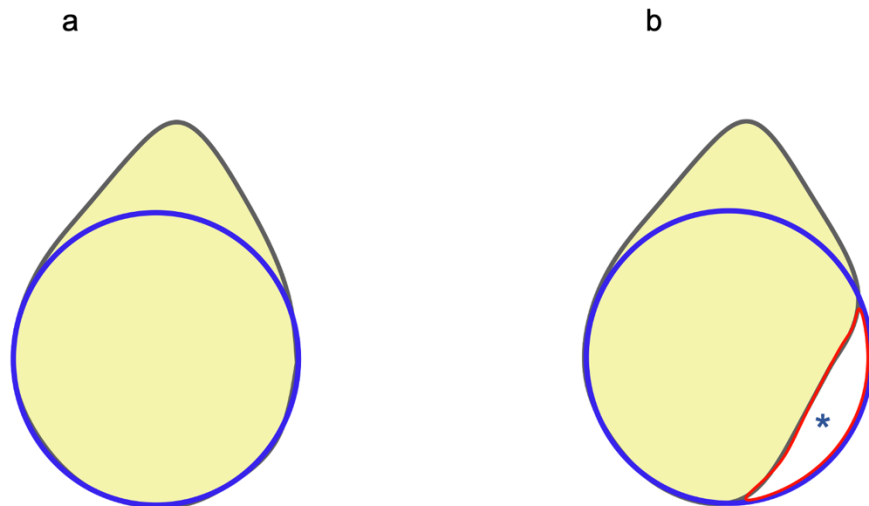


Abb. 7: „En-face“ Ansicht eines schematischen Glenoids ohne Knochendefekt mit eingezeichnetem Vermessungskreis („best-fit“) (a). Bei einem knöchernen Defekt (*) wird die Fläche (rot) in Relation zur Gesamtfläche (blau) gemessen (b). Diese Abbildung wurde durch Paul Siegert (Promovend) illustriert basierend auf der Publikation von Baudi et al.⁵

4.4 Umleitung des Sehnenzugs

Die Innenrotation des Arms wird unter anderem durch den M. Subskapularis erzielt. Der Ursprung des Muskels entspringt der Vorderseite der Skapula ausgehend vom medialen Rand. Der Muskel zieht nun entlang der Skapulakurvatur bis zum Hals, wo er in die Subskapularissehne übergeht und am Tuberculum minus inseriert. Durch die vordere Glenoidrekonstruktion (Augmentation) kommt es zu einer Zunahme des Pfannendurchmessers und damit zu einer möglichen Umleitung des Sehnenzugs um das entsprechende Transplantat (Korakoid oder J-Span) (Abb. 8). In der Originalpublikation⁶⁰ untersuchten wir den Einfluss der Transplantate auf die Sehnenzugrichtung. Dazu nutzten wir drei verschiedene Winkel, um die den Subskapularis-Verlauf um den Skapulahals zu beschreiben. Als Referenzpunkte wurden der mediale Glenoidrand, der Mittelpunkt des Glenoids und die am weitesten anterior gelegene Ausbreitung des Transplantates oder der Schraube gemessen. Bewusst wurde nicht der Ansatz der Sehne am Tuberculum minus als Referenz gewählt, da der Humeruskopf durch eine mögliche Subluxationsstellung oder Rotation eine Verzerrung der Messung verursachen kann. Der Mittelpunkt des Glenoids wurde durch den zuvor eingezeichneten „best-fit“ Kreis ermittelt und der Schnittpunkt der Tangente des Glenoids mit dem „best-fit“ Kreis als physiologischer Glenoidrand (ohne Knochenverlust) definiert.

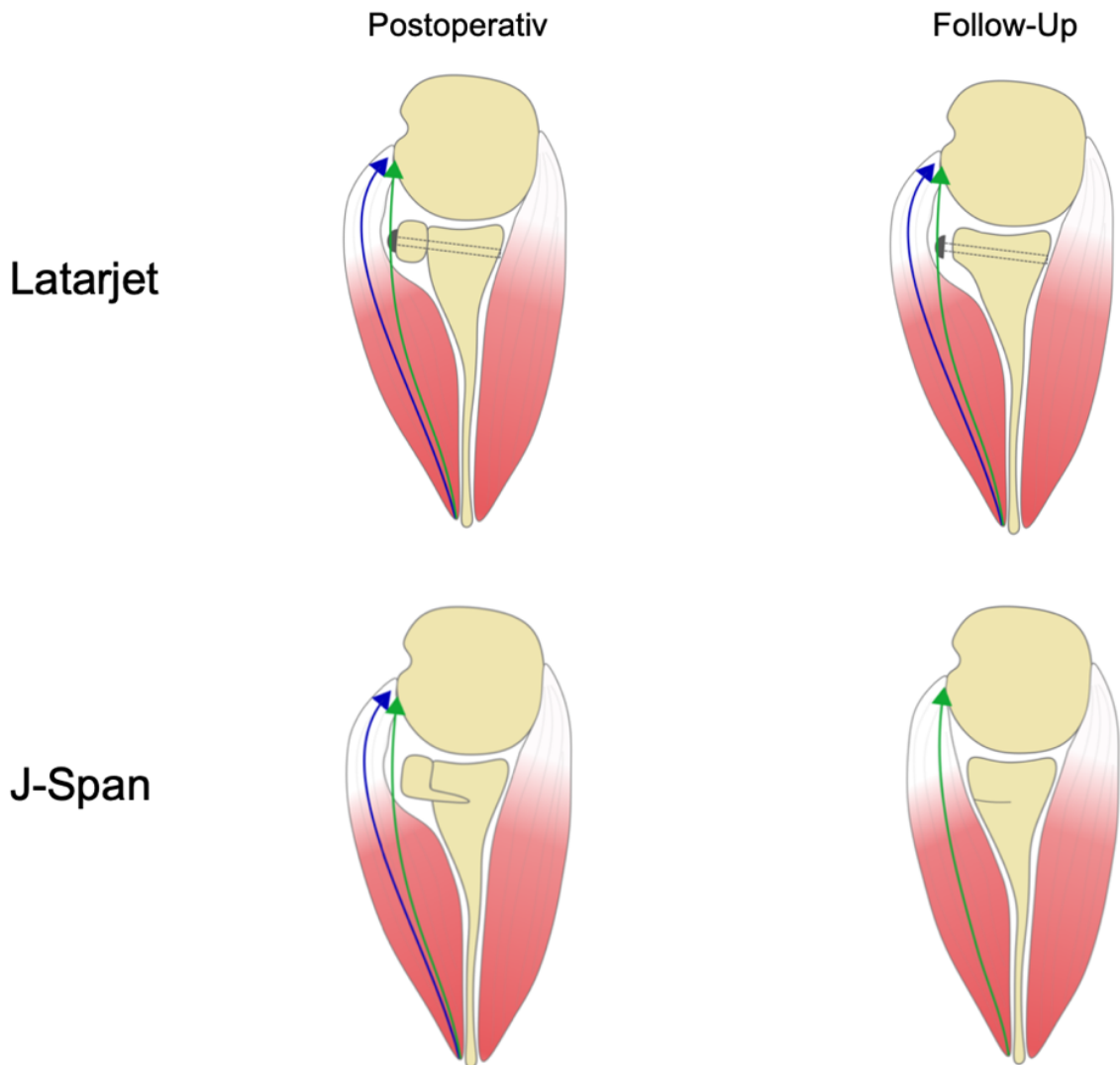


Abb. 8: Schematische Darstellung der Zugrichtung des Subskapularis in axialer Ansicht auf Höhe des Glenoidmittelpunktes. Direkt postoperativ wird der Sehnenzug (blau) um das ausladende Transplantat (Korakoid oder J-Span), abweichend von der physiologischen Zugrichtung (grün), geleitet. Im Verlauf kommt es zu einem Remodeling des Transplantates. Nach dem Korakoidtransfer (Latarjet) wird der Sehnenzug weiterhin um den Schraubenkopf geführt. Durch die anatomische Remodellierung nach der implantatfreien J-Span Plastik wird die Subskapularissehne erneut physiologisch geführt. Diese Abbildung wurde durch Paul Siegert (Promovend) illustriert basierend auf der Publikation von Siegert et al.⁶⁰

4.5 Sehnenintegrität

Die Sehrendicke kann ebenfalls Auskunft über die Integrität und eine mögliche Verletzung dieser geben. Wie in der Publikation⁶⁰ beschrieben wurde die Sehndicke auf Höhe des Glenoidmittelpunktes auf einer Tangente durch das Glenoid gemessen.⁴³ Um eine Verzerrung

der Messwerte durch eine mögliche Veränderung der Sehnenanspannung durch unterschiedliche Rotationen des Humeruskopfes zu vermeiden, wurde das Verhältnis zwischen Subskapularis- und Infraspinatussehrendicke als Quotient errechnet.

4.6 Muskelatrophie und -verfettung

Verletzungen der Rotatorenmanschette können Auswirkungen auf den entsprechenden Muskel haben. Kommt es zu einem Riss von Teilen einer Sehne oder einer kompletten Ruptur, können die zugeordneten Muskelstränge durch Kontraktion keine Zugkraft bewirken. Dies führt zu einer Verringerung des Muskelsvolumens (Atrophie), sowie in weiterer Folge zu einer Auffüllung des Volumens mit intramuskulärem Fett (Verfettung).²⁸ Die Beurteilung des Muskels wird anhand einer Computertomographie in der parasagittalen Schnittebene auf Höhe des lateralsten Schnittes, bei dem das Korakoid und die Spina Scapulae eine Y-Form bilden, durchgeführt.^{28, 57} Nach Scheibel et al.⁵⁷ wird die Atrophie der Muskelbäuche durch eine Verringerung des Volumens beziehungsweise des Quer- und Längsdurchmessers beurteilt. Die Degeneration der Muskelbäuche der Rotatorenmanschette durch Verfettung folgend einer Sehnenruptur wurde durch Goutallier et al. 1994 erstbeschrieben.²⁸ Es entsteht ein Querschnitt des Supraspinatus (SSP), Infraspinatus (ISP), Subskapularis (SSC) und Teres minor (TM) Muskels. Dabei kann nun der Anteil der Verfettung in Bezug auf die Muskelfläche beschrieben werden. Nach Goutallier et al.²⁸ wird diese in folgende Grade eingeteilt: Grad 0 – normaler Muskel; Grad I – leichte Verfettung; Grad II – weniger Fett als Muskel; Grad III – gleich viel Fett wie Muskel und Grad IV – Fett überwiegt Muskel. Diese Klassifikation wurde später auf die Magnetresonanztomographie (MRT) übertragen.^{22, 65}

Die Limitation der Evaluierung einer postoperativen Atrophie und Muskelverfettung liegt darin, dass oft ein präoperativer Vergleichswert fehlt. In der Originalpublikation⁶⁰ konnten durch vorhandene prä- und postoperative CT-Untersuchungen mit demselben CT-Gerät exakte Vermessungsgrundlagen erreicht werden.

Die Einteilung der Muskelverfettung nach Goutallier et al.²⁸ ist hilfreich um große Veränderungen der Muskelzusammensetzung darzustellen, ist jedoch nicht geeignet um eine geringere Progredienz zu quantifizieren. Die Grundlage zur Analyse des Fettgehalts in Geweben durch die CT-Untersuchung beruht auf dem Prinzip der Strahlenabschwächung.^{26, 27} Zwei-dimensionale CT-Bilder werden durch Pixel (picture elements) zusammengesetzt, welche entsprechend ihrer Graustufe einen Wert zwischen -1000 bis +3095 (4096 Werte) einnehmen. Drei-dimensional wird die Schichtdicke des untersuchten Gewebes mitberechnet, um ein Voxel (volume element) zu bilden. Die Graustufen-Werte werden in der Einheit Hounsfield units

(HU) angegeben.²⁶ Entsprechend der Eigenschaft eines Gewebes kommt es zu einer Abschwächung der Röntgenstrahlung und damit Veränderung der HU. Somit können Gewebe in der CT Untersuchung voneinander durch ihre Dichte unterschieden werden. Ein HU Wert von 0 ist der Referenzwert für Wasser.²⁶ Fettgewebe zeigt negative Werte (-190 bis -30 HU) und normale Muskulatur positive von +30 bis +150 HU. Somit ist Fettgewebe dunkler als Muskelgewebe in der CT- Untersuchung.^{2, 26}

In der Originalpublikation⁶⁰ wurde das wissenschaftliche Bildanalyseprogramm ImageJ (National Institutes of Health) genutzt um eine Voxel-basierte Analyse eines Muskeldurchschnitts der Rotatorenmanschette auf einer Y-Aufnahme durchzuführen.⁵⁸ Mit Hilfe des Programms können Voxel anhand ihrer Graustufe erkannt und isoliert analysiert werden. Der HU-Wert wurde auf -190 bis -30 HU eingestellt, anschließend der Muskel des SSC, sowie ISP gemeinsam mit TM markiert und nun die Fläche des Fettgewebes in Bezug auf die Muskelfläche in Prozent errechnet. ISP und TM wurden zusammen gemessen, da eine genaue Teilung der beiden Muskeln nur bei fortgeschrittener Atrophie einer der beiden möglich ist.⁷³ Die Atrophie des Subskapularis Muskels wurde durch den Längsdurchmesser und zwei Querdurchmesser gemessen. Zusätzlich wurde auf Höhe des oberen und unteren Muskelquerdurchmessers des SSC ein 25mm im Durchmesser messender Kreis eingezeichnet und die Strahlenabschwächung in HU gemessen. Damit sollten mögliche Unterschiede der Verletzung des kranialen und kaudalen Anteils untersucht werden.⁶⁰

5 Ergebnisse

Die detaillierte Darstellung der Ergebnisse ist der Publikation⁶⁰ zu entnehmen.

5.1 Glenoidvermessung

Der präoperativ gemessene Glenoiddefekt betrug $18.2\% \pm 2.4\%$ in der Latarjet Gruppe und $18.0\% \pm 2.0\%$ in der J-Span Gruppe ($p=0.704$). Zum Zeitpunkt des Follow-up wurde in der Latarjet Gruppe ein Überstand des Transplantates über den eingezeichneten „best-fit“ Kreis von $15.2\% \pm 8.2\%$ gemessen, während in der J-Span Gruppe der Überstand nur $1.5\% \pm 2.0\%$ ($p<0.001$) betrug. Im Durchschnitt ragte das Korakoidtransplantat oder der Schraubenkopf $7.0 \pm 2.6\text{mm}$ über den anterioren Glenoidrand, während der J-Span nur $1.0 \pm 1.0\text{mm}$ ($p<0.001$) überstand.⁶⁰

5.2 Umleitung des Sehnenzugs

Der präoperativ gemessene Sehnenverlauf des Subskapularis war in beiden Gruppen vergleichbar mit $5.7^\circ \pm 0.7^\circ$ in der Latarjet Gruppe und $5.5^\circ \pm 0.7^\circ$ ($p=0.338$) bezogen auf das native Glenoid und $7.5^\circ \pm 0.4^\circ$ in der Latarjet Gruppe gegen $7.5^\circ \pm 0.3^\circ$ ($p=0.627$) in der J-Span Gruppe für das physiologische Glenoid („best-fit“ Kreis als Referenzpunkt). Im Follow-up zeigte sich ein signifikant größerer Umleitungswinkel in der Latarjet-Gruppe ($11.8^\circ \pm 2.1^\circ$) im Vergleich zur J-Span Gruppe ($7.5^\circ \pm 1.3^\circ$) ($p<0.001$).⁶⁰

5.3 Sehnenintegrität

Der Quotient der Sehrendicke von Subskapularis durch Infraspinatus ergab präoperativ 1.03 ± 0.3 in der Latarjet Gruppe gegen 0.97 ± 0.3 ($p=0.383$) in der J-Span Gruppe. Im Follow-up wurde in der Latarjet Gruppe 0.70 ± 0.3 und in der J-Span Gruppe 1.00 ± 0.2 gemessen und zeigte somit einen signifikanten Unterschied ($p<0.001$).⁶⁰

5.4 Muskelatrophie und -verfettung

Entsprechend der Goutallier Klassifikation zeigten vier Patienten (15.4%) in der Latarjet Gruppe eine Progression von Grad 0 auf Grad 1, was einer leichten Muskelverfettung entspricht. In der J-Span Gruppe konnte keine Veränderung festgestellt werden. In keiner der beiden Gruppen wurde eine Muskelatrophie gemessen, sowohl der Längs- als auch der beiden Querdurchmesser waren präoperativ und auch im Follow-up nicht signifikant unterschiedlich. Bei der quantitativen Messung der Muskelverfettung zeigten beide Gruppen vergleichbare präoperative Werte mit einem Fettanteil von $2.0\% \pm 2.2\%$ in der Latarjet Gruppe gegen 2.4%

± 2.2% in der J-Span Gruppe. Im Follow-up zeigte sich auch hier eine Progression in der Latarjet Gruppe mit 5.3% ± 4.5% im Vergleich zu 2.3% ± 1.7% in der J-Span Gruppe (p=0.001). In einer Subanalyse wurde die Muskelintegrität durch Hounsfield units (HU) im kranialen und kaudalen Anteil des Subskapularis gemessen. Dabei konnte zwar gezeigt werden, dass es zu einer vermehrten Verfettung im oberen Anteil des SSC kommt mit 58.1 HU präoperativ und 50.6 HU im Follow-up in der Latarjet Gruppe. Verglichen mit der J-Span Gruppe (59.7 HU präoperativ und 54.7 HU im Follow-up) waren diese Unterschiede jedoch nicht signifikant (p=0.124).⁶⁰

5.5 Einfluss des Transplantates auf die Muskelverfettung

Um den Einfluss der einzelnen Transplantatparameter auf die Muskelverfettung des Subskapularis zu analysieren, wurde eine Regressionsanalyse durchgeführt. Dabei zeigte sich eine Korrelation mit zunehmendem Umleitungswinkel um das Transplantat (p=0.008). Die überragende Fläche des Transplantates über den Glenoidrand in Prozent (p=0.251) und in mm (p=0.762) zeigten keinen Einfluss auf die Muskelverfettung.⁶⁰

6 Diskussion

6.1 Klinische Anwendungen und Bedeutung

Die vordere Schulterluxation ist eine häufige Verletzung im jungen Alter.³³ Die hohe Relaxationsrate, vor allem bei sportlich aktiven Patienten, stellt eine Herausforderung für den behandelnden Arzt dar. Mit jeder folgenden Luxation steigt das Risiko einer Omarthrose, welche in weiterer Folge zu Funktionseinschränkungen und Schmerzen führen kann.³³ Bei kritischem Knochendefekt ist eine Rekonstruktion der Schultergelenkspfanne indiziert.^{36, 59, 71} Welches Verfahren angewandt wird, hängt in erster Linie von der Präferenz des Operateurs ab, da die derzeitige Studienlage keine eindeutige Überlegenheit einer der Techniken gegenüber der anderen aufweist. In unserer Arbeit⁶⁰ konnte erstmals gezeigt werden, dass ein radiologisches Korrelat für die klinische Innenrotationseinschränkung im Sinne einer Verletzung der Subskapularissehne als auch des Muskels zwei Jahre postoperativ bei Patienten nach Korakoidtransfer (Latarjet Verfahren) vorliegt. Eine Verminderung der Rotationskapazität nach dem Latarjet Verfahren wurde zuvor bereits beschrieben. Während Caubère et al.¹⁵ klinisch ein Kraftdefizit der Innen- und Außenrotation beschrieb, konnte keine Verletzung der Rotatorenmanschette nachgewiesen werden. Die Evaluation der Subskapularis Integrität wurde in deren Studie anhand von MRT Untersuchungen durchgeführt. Entsprechend der Klassifikation von Fuchs et al.²², wurde die fettige Degeneration bezogen auf den Muskelquerschnitt bewertet. Diese Klassifikation wurde in Anlehnung an die CT-basierte Beschreibung von Goutallier et al.²⁸ publiziert. Ein Nachteil dieser Klassifikationen ist, dass ein Untersucher die MRT Bilder visuell beurteilt, somit sind kleine Veränderungen der Muskelverfettung nur eingeschränkt darstellbar. In unserer Publikation⁶⁰ wurde sowohl eine CT-basierte Evaluation der Muskelintegrität nach Goutallier et al.²⁸ durchgeführt, als auch eine quantitative Messung anhand der Strahlenabschwächung (Hounsfield units). Es zeigte sich nur in 15.4% der Patienten visuell eine Progression der Muskelverfettung von Grad 0 auf Grad 1 nach Goutallier et al.²⁸ in der Latarjet Gruppe. Quantitativ wurde allerdings eine durchschnittliche Zunahme der Verfettung von 2.0% auf 5.3% festgestellt. Somit ist der direkte Vergleich mit den Ergebnissen von Caubère et al.¹⁵, bezüglich der Muskelintegrität, nur eingeschränkt beurteilbar. Eine rezente Studie von Ernstbrunner et al.²¹ untersuchte ebenfalls die Integrität des Subskapularis nach offenem Latarjet Verfahren in einem mindestens fünfjährigen Nachuntersuchungszeitraum. Isokinetisch wurde auch in dieser Studie ein Kraftdefizit in Innen- und Außenrotation, als auch eine Einschränkung des Bewegungsumfanges beschrieben. Die Integrität des Subskapularis wurde anhand einer bilateralen MRT Untersuchung mit 3D Volumetrie und quantitativer Fettanteilsbestimmung untersucht. Es

wurde postoperativ ein Fettanteil von 3.8% errechnet, ohne signifikantem Unterschied zur kontralateralen und gesunden Seite. Im Vergleich wurde in unserer Studie eine Auswertung der ipsilateralen Schulter prä- und postoperativ durchgeführt. Hier konnte gezeigt werden, dass im direkten Vergleich nur in der Latarjet Gruppe, nicht aber in der J-Span Gruppe eine Progression der Verfettung zum präoperativen Status besteht.

Unsere Daten legen nahe, dass die Verletzung des Subskapularis auf einen mechanischen Konflikt des oberen Sehnenanteils mit dem superioren Schraubenkopf zurückzuführen ist. Da der operative Zugang bei beiden Techniken durch eine Subskapularis Spaltung ident ist, gehen wir nicht von einer intraoperativen Verletzung des Muskels aus. Auch die Größe des primär eingebrachten Knochentransplantates ist bei beiden Techniken vergleichbar. Ein Unterschied der beiden Techniken zeigt sich im postoperativen Verlauf im Sinne der Knochenresorption. Nach dem Latarjet Verfahren führt diese zu einer Freistellung vor allem der kranialen Schraube.¹⁷ Wir vermuten, dass dies zu einem Versenken des Schraubenkopfes in die kraniale Sehne im Bereich des muskulotendinösen Übergangs führt und durch die entstehende Reibung bei der Rotationsbewegung eine Verletzung verursacht. Unsere Daten zeigten in einer quantitativen Messung eine vermehrte Verfettung des superioren Subskapularis Muskelanteils, auch wenn kein statistisch signifikanter Unterschied zum inferioren Anteil gezeigt werden konnte. Kritisch betrachtet wurde diese Messung allerdings nur auf einer Schicht in einem Areal von jeweils 25mm Durchmesser durchgeführt, daher kann der Unterschied über- oder unterschätzt werden.⁶⁰ Eine biomechanische Studie von Ernstbrunner et al.²⁰ zeigte, dass besonders der untere Anteil des Subskapularis für eine uneingeschränkte Schulterbewegung notwendig ist. Dies könnte erklären, warum die Verletzung des oberen Anteils durch die Schraubenköpfe nur zu einer eher geringfügigen Einschränkung der Rotation führt. Dennoch könnte dieser mechanische Konflikt das Phänomen des vorderen Schulterschmerzes bei Patienten nach dem Latarjet Verfahren erklären. In einer rezenten Studie wurde dieser Schmerz untersucht und es konnte gezeigt werden, dass eine Entfernung der Schrauben zu einer Besserung der Beschwerden führen kann.²⁵ Dies unterstützt unsere Hypothese. Möglicherweise könnte eine frühzeitige Entfernung der Schrauben nach knöcherner Integration und Heilung eine Verletzung des Subskapularis vermeiden. Als Nachteil ist allerdings ein erneuter Eingriff mit entsprechendem Operationsrisiko zu bewerten. Anhand unserer Daten kann dies zwar nicht bewiesen werden, bildet allerdings eine gute Grundlage für weitere Studien und klinische Anwendungen.

Eine Studie von Steffen et al.⁶² untersuchte die Langzeitergebnisse nach Glenoidrekonstruktion mit autologem Beckenkammtransplantat. Im Vergleich mit unserer Studienkohorte wurde das

Transplantat jedoch durch eine Schraubenfixierung, ähnlich dem Latarjet Verfahren fixiert. In dieser Studie wurde eine Atrophie des Subskapularismuskels von 7.4% im Vergleich zur kontralateralen Seite gezeigt. Ein klinisches Innenrotationsdefizit von einem Wirbelsegment hinter dem Rücken wurde ebenfalls berichtet. Die Sehnendicke des Subskapularis wurde wie in unserer Studie als Verhältnis zur Infraspinatus Sehnendicke gemessen.⁴³ Im Vergleich zur gesunden Seite wurde auch hier eine Ausdünnung von 1/10 gezeigt. Diese Ergebnisse könnten ebenfalls primär auf eine Verletzung des Subskapularis durch einen mechanischen Konflikt mit den Schraubenköpfen, als mit der Umleitung der Sehne beim Latarjet Verfahren hinweisen.

Während sich im direkten Vergleich der Kohorten (J-Span und Latarjet Verfahren) von Moroder et al.⁴⁹ eine signifikante Reduktion der Innenrotation in 0° und 90° Abduktion nach dem Latarjet Verfahren zeigte, bleibt die klinische Relevanz noch unklar. Im Durchschnitt wurde eine Reduktion der Innenrotation um etwa zwei Wirbelsegmente hinter dem Rücken beschrieben, jedoch zumindest ein Erreichen des zehnten thorakalen Wirbels nach zwei Jahren.⁴⁹ Auch bei Ernstbrunner et al.²¹ wurde ein Defizit nach dem Latarjet Verfahren aufgezeigt. Im Durchschnitt wurde hier nach mindestens fünf Jahren postoperativ eine Innenrotation bis zum zwölften thorakalen Wirbel erreicht. Ernat et al.¹⁹ berichteten eine Rückkehr zur sportlichen Aktivität von 97% nach offenem Latarjet Verfahren, trotz einer Einschränkung der Bewegung. Skand et al.⁶¹ zeigten bei einem Innenrotationsdefizit von 6.4° und Außenrotationsdefizit von 9.9° eine ähnliche Erfolgsquote von rund 94% nach zwei Jahren postoperativ.

6.2 Limitationen der Arbeit

Die zwei Hauptlimitationen wurden in der Originalpublikation⁶⁰ ausführlich diskutiert. Obwohl im Follow-up von zwei Jahren Veränderung der Weichteilintegrität gezeigt werden konnten, geben Langzeitergebnisse besser Auskunft über die letztendliche Schädigung des Gewebes. Gerade bei jungen Patienten kann die Einlagerung von intramuskulärem Fett eine längere Zeit beanspruchen. Dennoch konnte in der Studie ein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Techniken gezeigt werden. Als zweite große Limitation ist die Verblindung des Untersuchers gegenüber der OP-Technik zu nennen. Obwohl die Patienten randomisiert untersucht wurden, kann auf Grund der im CT sichtbaren Schraubenfixierung das Transplantat erkannt werden. Um diese Limitation zu verringern, wurden alle Messungen von zwei Untersuchern zu unterschiedlichen Zeitpunkten durchgeführt und zeigten einen guten Intraklassenkorrelationskoeffizienten. Die Selektion der Patienten war von der zuvor durchgeführten prospektiv randomisierten Studie vorgegeben.⁴⁹ Ein entsprechender Bias kann

dadurch verringert werden. Die primär durchgeführten Operationen, sowohl des J-Spans als auch des Latarjet Verfahrens wurden randomisiert durch erfahrene Chirurgen an zwei verschiedenen Zentren durchgeführt. Obwohl alle beteiligten Chirurgen in beiden dieser anspruchsvollen Techniken geübt sind, kann das postoperative Ergebnis je nach Operateur beeinflusst werden.

6.3 Weiterführende Fragen

Im Rahmen unserer Untersuchungen zeigten wir, dass es zu einer Remodellierung des Beckenkammspans bei der J-Span Plastik kommt. Dies folgt dem Prinzip des Wolff'schen Gesetzes entsprechend der Druck- und Zugbelastung.¹⁶ In unseren Messungen der Subskapularis Zugrichtung wurden im Durchschnitt physiologische Messwerte im Follow-up gezeigt. Diese anatomische Remodellierung wurde bereits in anderen Studien beschrieben.⁴⁷ Im Gegenzug dazu kommt es nach dem Korakoidtransfer zu einer anderen Form der Resorption des Transplantates, bei der vor allem der inferiore Teil weniger in Lyse geht. Ursächlich dafür wurde in der Literatur der Zug der „Conjoint-Tendons“ am inferioren Pol genannt.¹⁷ Anhand unserer Analyse kann diese Hypothese zwar nicht bestätigt werden, es zeigte sich in der Latarjet Gruppe im Follow-up jedoch eine vermehrte Protrusion des Korakoid-Transplantates über den Glenoidrand vor allem im inferioren Bereich. Ergänzende biomechanische Studien und eine drei-dimensionale Volumetrie könnten in Zukunft Aufschluss über dieses Phänomen geben.

Beim Latarjet Verfahren handelt es sich um eine extraanatomische Technik. Neben der Transposition der „Conjoint-Tendons“ durch die permanente Subskapularis Teilung muss – wie in der Technikbeschreibung dargestellt – auch der Pectoralis minor Muskel vom Korakoid abgelöst werden.⁷² Dieser Muskel unterstützt biomechanisch die Funktion des M. Serratus anterior und ist damit an der Innenrotation und Protraktion der Skapula beteiligt.¹⁴ Carbone et al.¹⁴ untersuchten den Zusammenhang von Skapuladyskinesien mit dem Latarjet Verfahren und konnten diese in 25% der Patienten nachweisen. Auch in der Studie von Moroder et al.⁴⁹ zeigten 13% der Patienten eine neu aufgetretene Skapuladyskinesie nach dem Latarjet Verfahren. Die Beeinträchtigung der Innenrotation könnte somit auch im Zusammenhang mit der Muskelablösung des M. Pectoralis minor stehen, mit unseren Daten kann dies allerdings nicht belegt werden. In Folgestudien sollte dieser Aspekt weiter beleuchtet werden.

In unserer Studienkohorte⁶⁰ wurde die Fixierung des Korakoidtransplantates mit einer Schraubenfixierung durchgeführt. In rezenten Studien wurden alternative Systeme zur Fixierung des Knochenblocks beschrieben. Bonneville et al.⁸ untersuchten die Einheilung des Knochentransplantates mit Schraubenfixierung verglichen mit einer Doppel-Knopf Technik.

Obwohl die Einheilung verzögert war, zeigten sich vergleichbare Einheilungsraten. Auch die Fixierung des Korakoids mit resorbierbaren Schrauben wurde untersucht, zeigte allerdings eine vermehrte Osteolyse des Knochens.⁴ Die Ansätze einer alternativen Fixierung des Transplantates beim Latarjet Verfahren erscheinen in Bezug auf unsere Daten jedoch als sinnvoll. Zukünftige Studien sollten den Einfluss dieser Techniken auf die Weichteilintegrität der Schulter untersuchen.

7 Referenzen

1. Anderl W, Kriegleder B, Heuberer PR. All-arthroscopic implant-free iliac crest bone grafting: new technique and case report. *Arthroscopy*. 2012;28(1):131-7 DOI: 10.1016/j.arthro.2011.10.027I.
2. Aubrey J, Esfandiari N, Baracos VE, Buteau FA, Frenette J, Putman CT, Mazurak VC. Measurement of skeletal muscle radiation attenuation and basis of its biological variation. *Acta Physiol (Oxf)*. 2014;210(3):489-97 DOI: 10.1111/apha.12224I.
3. Auffarth A, Schauer J, Matis N, Kofler B, Hitzl W, Resch H. The J-bone graft for anatomical glenoid reconstruction in recurrent posttraumatic anterior shoulder dislocation. *Am J Sports Med*. 2008;36(4):638-47 DOI: 10.1177/0363546507309672I.
4. Balestro JC, Young A, Maccioni C, Walch G. Graft osteolysis and recurrent instability after the Latarjet procedure performed with bioabsorbable screw fixation. *J Shoulder Elbow Surg*. 2015;24(5):711-8 DOI: 10.1016/j.jse.2014.07.014I.
5. Baudi P, Righi P, Bolognesi D, Rivetta S, Rossi Urtoler E, Guicciardi N, Carrara M. How to identify and calculate glenoid bone deficit. *Chir Organi Mov*. 2005;90(2):145-52
6. Bigliani LU, Newton PM, Steinmann SP, Connor PM, McLlveen SJ. Glenoid rim lesions associated with recurrent anterior dislocation of the shoulder. *Am J Sports Med*. 1998;26(1):41-5 DOI: 10.1177/03635465980260012301I.
7. Boileau P, Villalba M, Hery JY, Balg F, Ahrens P, Neyton L. Risk factors for recurrence of shoulder instability after arthroscopic Bankart repair. *J Bone Joint Surg Am*. 2006;88(8):1755-63 DOI: 10.2106/JBJS.E.00817I.
8. Bonneville N, Girard M, Dalmas Y, Martinel V, Faruch M, Mansat P. Short-Term Bone Fusion With Arthroscopic Double-Button Latarjet Versus Open-Screw Latarjet. *Am J Sports Med*. 2021;49(6):1596-603 DOI: 10.1177/03635465211001095I.
9. Burkhart SS, De Beer JF. Traumatic glenohumeral bone defects and their relationship to failure of arthroscopic Bankart repairs: significance of the inverted-pear glenoid and the humeral engaging Hill-Sachs lesion. *Arthroscopy*. 2000;16(7):677-94 DOI: 10.1053/jars.2000.17715I.

10. Burkhart SS, De Beer JF, Barth JR, Cresswell T, Roberts C, Richards DP. Results of modified Latarjet reconstruction in patients with anteroinferior instability and significant bone loss. *Arthroscopy*. 2007;23(10):1033-41 DOI: 10.1016/j.arthro.2007.08.009I.
11. Bushnell BD, Creighton RA, Herring MM. Bony instability of the shoulder. *Arthroscopy*. 2008;24(9):1061-73 DOI: 10.1016/j.arthro.2008.05.015I.
12. Calandra JJ, Baker CL, Uribe J. The incidence of Hill-Sachs lesions in initial anterior shoulder dislocations. *Arthroscopy*. 1989;5(4):254-7 DOI: 10.1016/0749-8063(89)90138-2I.
13. Calori GM, Colombo M, Mazza EL, Mazzola S, Malagoli E, Mineo GV. Incidence of donor site morbidity following harvesting from iliac crest or RIA graft. *Injury*. 2014;45 Suppl 6:S116-20 DOI: 10.1016/j.injury.2014.10.034I.
14. Carbone S, Moroder P, Runer A, Resch H, Gumina S, Hertel R. Scapular dyskinesia after Latarjet procedure. *J Shoulder Elbow Surg*. 2016;25(3):422-7 DOI: 10.1016/j.jse.2015.08.001I.
15. Caubère A, Lami D, Boileau P, Parratte S, Ollivier M, Argenson JN. Is the subscapularis normal after the open Latarjet procedure? An isokinetic and magnetic resonance imaging evaluation. *J Shoulder Elbow Surg*. 2017;26(10):1775-81 DOI: 10.1016/j.jse.2017.03.034I.
16. Chamay A, Tschantz P. Mechanical influences in bone remodeling. Experimental research on Wolff's law. *J Biomech*. 1972;5(2):173-80 DOI: 10.1016/0021-9290(72)90053-xI.
17. Di Giacomo G, Costantini A, de Gasperis N, De Vita A, Lin BK, Francone M, Rojas Beccaglia MA, Mastantuono M. Coracoid graft osteolysis after the Latarjet procedure for anteroinferior shoulder instability: a computed tomography scan study of twenty-six patients. *J Shoulder Elbow Surg*. 2011;20(6):989-95 DOI: 10.1016/j.jse.2010.11.016I.
18. Edouard P, Bankolé C, Calmels P, Beguin L, Degache F. Isokinetic rotator muscles fatigue in glenohumeral joint instability before and after Latarjet surgery: a pilot prospective study. *Scand J Med Sci Sports*. 2013;23(2):e74-80 DOI: 10.1111/sms.12011I.
19. Ernat JJ, Rakowski DR, Hanson JA, Casp AJ, Lee S, Peebles AM, Horan MP, Provencher CMT, Millett PJ. High Rate of Return to Sport and Excellent Patient Reported Outcomes After an Open Latarjet Procedure. *J Shoulder Elbow Surg*. 2022 DOI: 10.1016/j.jse.2022.01.139I.

20. Ernstbrunner L, El Nashar R, Bouaicha S, Wieser K, Gerber C. Scapular Morphologic Characteristics and Rotator Cuff Tear Pattern Are Independently Associated With Chronic Pseudoparalysis: A Matched-Pair Analysis of Patients With Massive Rotator Cuff Tears. *Am J Sports Med.* 2020;48(9):2137-43 DOI: 10.1177/0363546520929353I.
21. Ernstbrunner L, Waltenspul M, Suter C, El-Nashar R, Scherr J, Wieser K. Primary Open Latarjet Procedure Results in Functional Differences but No Structural Changes in Subscapularis Muscle Quality vs the Healthy Contralateral Shoulder at Long-term Follow-up. *Am J Sports Med.* 2022;50(6):1495-502 DOI: 10.1177/03635465221079858I.
22. Fuchs B, Weishaupt D, Zanetti M, Hodler J, Gerber C. Fatty degeneration of the muscles of the rotator cuff: assessment by computed tomography versus magnetic resonance imaging. *J Shoulder Elbow Surg.* 1999;8(6):599-605 DOI: 10.1016/s1058-2746(99)90097-6I.
23. Fukuda K, Craig EV, An KN, Cofield RH, Chao EY. Biomechanical study of the ligamentous system of the acromioclavicular joint. *J Bone Joint Surg Am.* 1986;68(3):434-40
24. Gilbert MK, Gerber C. Comparison of the subjective shoulder value and the Constant score. *J Shoulder Elbow Surg.* 2007;16(6):717-21 DOI: 10.1016/j.jse.2007.02.123I.
25. Godeneche A, Merlini L, Roulet S, Le Chatelier M, Delgrande D, Saffarini M, Metais P. Screw Removal Can Resolve Unexplained Anterior Pain Without Recurrence of Shoulder Instability After Open Latarjet Procedures. *Am J Sports Med.* 2020;48(6):1450-5 DOI: 10.1177/0363546520916171I.
26. Goodpaster BH, Thaete FL, Kelley DE. Composition of skeletal muscle evaluated with computed tomography. *Ann N Y Acad Sci.* 2000;904:18-24 DOI: 10.1111/j.1749-6632.2000.tb06416.xI.
27. Goodpaster BH, Thaete FL, Kelley DE. Thigh adipose tissue distribution is associated with insulin resistance in obesity and in type 2 diabetes mellitus. *Am J Clin Nutr.* 2000;71(4):885-92 DOI: 10.1093/ajcn/71.4.885I.
28. Goutallier D, Postel JM, Bernageau J, Lavau L, Voisin MC. Fatty muscle degeneration in cuff ruptures. Pre- and postoperative evaluation by CT scan. *Clin Orthop Relat Res.* 1994(304):78-83

29. Greiner S, Herrmann S, Gerhardt C, Scheibel M. [Classification and diagnostics of unstable shoulders]. *Orthopade*. 2009;38(1):6-8, 10-5 DOI: 10.1007/s00132-008-1349-7I.
30. Griffith JF, Antonio GE, Yung PS, Wong EM, Yu AB, Ahuja AT, Chan KM. Prevalence, pattern, and spectrum of glenoid bone loss in anterior shoulder dislocation: CT analysis of 218 patients. *AJR Am J Roentgenol*. 2008;190(5):1247-54 DOI: 10.2214/AJR.07.3009I.
31. Gupta A, Delaney R, Petkin K, Lafosse L. Complications of the Latarjet procedure. *Curr Rev Musculoskelet Med*. 2015;8(1):59-66 DOI: 10.1007/s12178-015-9258-yI.
32. Harryman DT, 2nd, Sidles JA, Clark JM, McQuade KJ, Gibb TD, Matsen FA, 3rd. Translation of the humeral head on the glenoid with passive glenohumeral motion. *J Bone Joint Surg Am*. 1990;72(9):1334-43
33. Hovelius L, Augustini BG, Fredin H, Johansson O, Norlin R, Thorling J. Primary anterior dislocation of the shoulder in young patients. A ten-year prospective study. *J Bone Joint Surg Am*. 1996;78(11):1677-84 DOI: 10.2106/00004623-199611000-00006I.
34. Hovelius L, Korner L, Lundberg B, Akermark C, Herberts P, Wredmark T, Berg E. The coracoid transfer for recurrent dislocation of the shoulder. Technical aspects of the Bristow-Latarjet procedure. *J Bone Joint Surg Am*. 1983;65(7):926-34
35. Hurley ET, Manjunath AK, Bloom DA, Pauzenberger L, Mullett H, Alaia MJ, Strauss EJ. Arthroscopic Bankart Repair Versus Conservative Management for First-Time Traumatic Anterior Shoulder Instability: A Systematic Review and Meta-analysis. *Arthroscopy*. 2020;36(9):2526-32 DOI: 10.1016/j.arthro.2020.04.046I.
36. Itoi E, Lee SB, Berglund LJ, Berge LL, An KN. The effect of a glenoid defect on anteroinferior stability of the shoulder after Bankart repair: a cadaveric study. *J Bone Joint Surg Am*. 2000;82(1):35-46 DOI: 10.2106/00004623-200001000-00005I.
37. Kirkley A, Griffin S, McLintock H, Ng L. The development and evaluation of a disease-specific quality of life measurement tool for shoulder instability. The Western Ontario Shoulder Instability Index (WOSI). *Am J Sports Med*. 1998;26(6):764-72 DOI: 10.1177/03635465980260060501I.

38. Klein AH, Harner CD, Fu FH. The Bankart lesion of the shoulder: a biomechanical analysis following repair. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 1995;3(2):117-20 DOI: 10.1007/BF01552387I.
39. Ladermann A, Denard PJ, Burkhart SS. Injury of the suprascapular nerve during Latarjet procedure: an anatomic study. *Arthroscopy.* 2012;28(3):316-21 DOI: 10.1016/j.arthro.2011.08.307I.
40. Lafosse L, Boyle S. Arthroscopic Latarjet procedure. *J Shoulder Elbow Surg.* 2010;19(2 Suppl):2-12 DOI: 10.1016/j.jse.2009.12.010I.
41. Latarjet M. [Treatment of recurrent dislocation of the shoulder]. *Lyon Chir.* 1954;49(8):994-7
42. Lippitt S, Matsen F. Mechanisms of glenohumeral joint stability. *Clin Orthop Relat Res.* 1993(291):20-8
43. Maynou C, Cassagnaud X, Mestdagh H. Function of subscapularis after surgical treatment for recurrent instability of the shoulder using a bone-block procedure. *J Bone Joint Surg Br.* 2005;87(8):1096-101 DOI: 10.1302/0301-620X.87B8.14605I.
44. Miller SL, Cleeman E, Auerbach J, Flatow EL. Comparison of intra-articular lidocaine and intravenous sedation for reduction of shoulder dislocations: a randomized, prospective study. *J Bone Joint Surg Am.* 2002;84(12):2135-9 DOI: 10.2106/00004623-200212000-00002I.
45. Moroder P, Bohm E, Scheibel M. The Arthroscopic Bankart-Plus Procedure for Treatment of Anterior Shoulder Instability With Small to Intermediate Glenoid Defects. *Arthrosc Tech.* 2018;7(4):e379-e84 DOI: 10.1016/j.eats.2017.10.009I.
46. Moroder P, Damm P, Wierer G, Bohm E, Minkus M, Plachel F, Mardian S, Scheibel M, Khatamirad M. Challenging the Current Concept of Critical Glenoid Bone Loss in Shoulder Instability: Does the Size Measurement Really Tell It All? *Am J Sports Med.* 2019;47(3):688-94 DOI: 10.1177/0363546518819102I.
47. Moroder P, Hirzinger C, Lederer S, Matis N, Hitzl W, Tauber M, Resch H, Auffarth A. Restoration of anterior glenoid bone defects in posttraumatic recurrent anterior shoulder

instability using the J-bone graft shows anatomic graft remodeling. *Am J Sports Med.* 2012;40(7):1544-50 DOI: 10.1177/0363546512446681I.

48. Moroder P, Hitzl W, Tauber M, Hoffelner T, Resch H, Auffarth A. Effect of anatomic bone grafting in post-traumatic recurrent anterior shoulder instability on glenoid morphology. *J Shoulder Elbow Surg.* 2013;22(11):1522-9 DOI: 10.1016/j.jse.2013.03.006I.

49. Moroder P, Schulz E, Wierer G, Auffarth A, Habermeyer P, Resch H, Tauber M. Neer Award 2019: Latarjet procedure vs. iliac crest bone graft transfer for treatment of anterior shoulder instability with glenoid bone loss: a prospective randomized trial. *J Shoulder Elbow Surg.* 2019;28(7):1298-307 DOI: 10.1016/j.jse.2019.03.035I.

50. Olds MK, Ellis R, Parmar P, Kersten P. Who will redislocate his/her shoulder? Predicting recurrent instability following a first traumatic anterior shoulder dislocation. *BMJ Open Sport Exerc Med.* 2019;5(1):e000447 DOI: 10.1136/bmjsem-2018-000447I.

51. Postacchini F, Gumina S, Cinotti G. Anterior shoulder dislocation in adolescents. *J Shoulder Elbow Surg.* 2000;9(6):470-4 DOI: 10.1067/mse.2000.108385I.

52. Riebel GD, McCabe JB. Anterior shoulder dislocation: a review of reduction techniques. *Am J Emerg Med.* 1991;9(2):180-8 DOI: 10.1016/0735-6757(91)90187-oI.

53. Robinson CM, Shur N, Sharpe T, Ray A, Murray IR. Injuries associated with traumatic anterior glenohumeral dislocations. *J Bone Joint Surg Am.* 2012;94(1):18-26 DOI: 10.2106/JBJS.J.01795I.

54. Rowe CR, Patel D, Southmayd WW. The Bankart procedure: a long-term end-result study. *J Bone Joint Surg Am.* 1978;60(1):1-16

55. Samim M, Small KM, Higgins LD. Coracoid graft union: a quantitative assessment by computed tomography in primary and revision Latarjet procedure. *J Shoulder Elbow Surg.* 2018;27(8):1475-82 DOI: 10.1016/j.jse.2018.01.008I.

56. Sayegh FE, Kenanidis EI, Papavasiliou KA, Potoupnis ME, Kirkos JM, Kapetanios GA. Reduction of acute anterior dislocations: a prospective randomized study comparing a new technique with the Hippocratic and Kocher methods. *J Bone Joint Surg Am.* 2009;91(12):2775-82 DOI: 10.2106/JBJS.H.01434I.

57. Scheibel M, Tsynman A, Magosch P, Schroeder RJ, Habermeyer P. Postoperative subscapularis muscle insufficiency after primary and revision open shoulder stabilization. *Am J Sports Med.* 2006;34(10):1586-93 DOI: 10.1177/0363546506288852I.
58. Schneider CA, Rasband WS, Eliceiri KW. NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nat Methods.* 2012;9(7):671-5 DOI: 10.1038/nmeth.2089I.
59. Shaha JS, Cook JB, Song DJ, Rowles DJ, Bottoni CR, Shaha SH, Tokish JM. Redefining "Critical" Bone Loss in Shoulder Instability: Functional Outcomes Worsen With "Subcritical" Bone Loss. *Am J Sports Med.* 2015;43(7):1719-25 DOI: 10.1177/0363546515578250I.
60. Siegert P, Plachel F, Akgun D, Baur ADJ, Schulz E, Auffarth A, Tauber M, Moroder P. Comparison of Structural Subscapularis Integrity After Latarjet Procedure Versus Iliac Crest Bone Graft Transfer. *Orthop J Sports Med.* 2020;8(10):2325967120958007 DOI: 10.1177/2325967120958007I.
61. Sinha S, Kar S, Naik AK, Kumar J, Goyal R, Jain VK, Arya RK. Decreased motion with normal strength after Latarjet procedure has minimal impact on return to activity. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2021;29(8):2579-86 DOI: 10.1007/s00167-020-06414-6I.
62. Steffen V, Hertel R. Rim reconstruction with autogenous iliac crest for anterior glenoid deficiency: forty-three instability cases followed for 5-19 years. *J Shoulder Elbow Surg.* 2013;22(4):550-9 DOI: 10.1016/j.jse.2012.05.038I.
63. Stein T, Linke RD, Buckup J, Efe T, von Eisenhart-Rothe R, Hoffmann R, Jager A, Welsch F. Shoulder sport-specific impairments after arthroscopic Bankart repair: a prospective longitudinal assessment. *Am J Sports Med.* 2011;39(11):2404-14 DOI: 10.1177/0363546511417407I.
64. Sugaya H, Moriishi J, Kanisawa I, Tsuchiya A. Arthroscopic osseous Bankart repair for chronic recurrent traumatic anterior glenohumeral instability. Surgical technique. *J Bone Joint Surg Am.* 2006;88 Suppl 1 Pt 2:159-69 DOI: 10.2106/JBJS.F.00319I.
65. Thomazeau H, Rolland Y, Lucas C, Duval JM, Langlais F. Atrophy of the supraspinatus belly. Assessment by MRI in 55 patients with rotator cuff pathology. *Acta Orthop Scand.* 1996;67(3):264-8 DOI: 10.3109/17453679608994685I.

66. Tokish JM, Kuhn JE, Ayers GD, Arciero RA, Burks RT, Dines DM, Duralde XA, ElAttrache NS, Millett PJ, St Pierre P, Provencher MT, Tibone JE, Ticker JB, Cordasco FA. Decision making in treatment after a first-time anterior glenohumeral dislocation: A Delphi approach by the Neer Circle of the American Shoulder and Elbow Surgeons. *J Shoulder Elbow Surg.* 2020;29(12):2429-45 DOI: 10.1016/j.jse.2020.08.011I.
67. von Schroeder HP, Kuiper SD, Botte MJ. Osseous anatomy of the scapula. *Clin Orthop Relat Res.* 2001(383):131-9 DOI: 10.1097/00003086-200102000-00015I.
68. Weppe F, Magnussen RA, Lustig S, Demey G, Neyret P, Servien E. A biomechanical evaluation of bicortical metal screw fixation versus absorbable interference screw fixation after coracoid transfer for anterior shoulder instability. *Arthroscopy.* 2011;27(10):1358-63 DOI: 10.1016/j.arthro.2011.03.074I.
69. Wheeler JH, Ryan JB, Arciero RA, Molinari RN. Arthroscopic versus nonoperative treatment of acute shoulder dislocations in young athletes. *Arthroscopy.* 1989;5(3):213-7 DOI: 10.1016/0749-8063(89)90174-6I.
70. Williams RC, Morris RP, El Beaino M, Maassen NH. Cortical suture button fixation vs. bicortical screw fixation in the Latarjet procedure: a biomechanical comparison. *J Shoulder Elbow Surg.* 2020;29(7):1470-8 DOI: 10.1016/j.jse.2019.11.025I.
71. Yamamoto N, Itoi E, Abe H, Kikuchi K, Seki N, Minagawa H, Tuoheti Y. Effect of an anterior glenoid defect on anterior shoulder stability: a cadaveric study. *Am J Sports Med.* 2009;37(5):949-54 DOI: 10.1177/0363546508330139I.
72. Young AA, Maia R, Berhouet J, Walch G. Open Latarjet procedure for management of bone loss in anterior instability of the glenohumeral joint. *J Shoulder Elbow Surg.* 2011;20(2 Suppl):S61-9 DOI: 10.1016/j.jse.2010.07.022I.
73. Zanetti M, Gerber C, Hodler J. Quantitative assessment of the muscles of the rotator cuff with magnetic resonance imaging. *Invest Radiol.* 1998;33(3):163-70 DOI: 10.1097/00004424-199803000-00006I.

8 Anhang

8.1 Eidesstattliche Versicherung

„Ich, Paul Siegert, versichere an Eides statt durch meine eigenhändige Unterschrift, dass ich die vorgelegte Dissertation mit dem Thema: „The influence of bony glenoid reconstruction procedures on soft tissue integrity of the shoulder / Der Einfluss von knöchernen Glenoid Rekonstruktionsverfahren auf die Weichteilintegrität der Schulter“ selbstständig und ohne nicht offengelegte Hilfe Dritter verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel genutzt habe.

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

Ich versichere ferner, dass ich die in Zusammenarbeit mit anderen Personen generierten Daten, Datenauswertungen und Schlussfolgerungen korrekt gekennzeichnet und meinen eigenen Beitrag sowie die Beiträge anderer Personen korrekt kenntlich gemacht habe (siehe Anteilserklärung). Texte oder Textteile, die gemeinsam mit anderen erstellt oder verwendet wurden, habe ich korrekt kenntlich gemacht.

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

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

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

Datum

Unterschrift

8.2 Anteilserklärung an den erfolgten Publikationen

Der Promovend Paul Siegert hatte folgenden Anteil an der folgenden Publikation:

Siegert Paul, Plachel Fabian, Akgün Doruk, Schulz Eva, Auffarth Alexander, Tauber Mark, Moroder Philipp.

Comparison of structural subscapularis integrity following Latarjet procedure versus iliac crest bone graft transfer

Orthopaedic Journal of Sports Medicine. 2020 Oct DOI: 10.1177/2325967120958007.

(Impact Factor 2018: 2.589)

Anteil an der Publikation: 85 Prozent

Beitrag im Einzelnen: Herr Siegert hat aus eigenen Überlegungen die Messmethoden zur Überprüfung der Primär- und Sekundärhypothesen entwickelt. Die Verwendung einer Voxel-basierten quantitativen Analyse zur Bestimmung des Verfettungsgrades der Muskulatur der Rotatorenmanschette wurde von ihm modifiziert und angewandt. Die Messungen wurden durch den Promovenden selbstständig durchgeführt und anschließend statistisch analysiert. Sämtliche Tabellen und Graphen wurden von Herrn Siegert erstellt und alle Illustrationen (Figure 1 und Figure 10) selbst von ihm gezeichnet. Außerdem wurde das Manuskript von ihm verfasst und eingereicht, sowie die Kommentare der Reviewer durch ihn beantwortet.

Unterschrift, Datum und Stempel des/der erstbetreuenden Hochschullehrers/in

Unterschrift des Doktoranden/der Doktorandin

8.3 Journal Summary List

Journal Data Filtered By: **Selected JCR Year: 2018** Selected Editions: SCIE,SSCI
 Selected Categories: **"ORTHOPEDICS"** Selected Category Scheme: WoS
Gesamtanzahl: 76 Journale

Rank	Full Journal Title	Total Cites	Journal Impact Factor	Eigenfactor Score
1	AMERICAN JOURNAL OF SPORTS MEDICINE	35,110	6.093	0.044140
2	Journal of Physiotherapy	1,189	5.551	0.002780
3	OSTEOARTHRITIS AND CARTILAGE	16,264	4.879	0.027140
4	JOURNAL OF BONE AND JOINT SURGERY-AMERICAN VOLUME	46,190	4.716	0.042700
5	ARTHROSCOPY-THE JOURNAL OF ARTHROSCOPIC AND RELATED SURGERY	17,057	4.433	0.021140
6	Bone & Joint Journal	5,865	4.301	0.024380
7	CLINICAL ORTHOPAEDICS AND RELATED RESEARCH	38,592	4.154	0.036010
8	EUROPEAN CELLS & MATERIALS	3,184	3.682	0.003620
9	Bone & Joint Research	1,111	3.652	0.004080
10	JOURNAL OF ARTHROPLASTY	18,401	3.524	0.034350
11	Acta Orthopaedica	8,685	3.217	0.009100
12	Spine Journal	9,595	3.196	0.019800
13	KNEE SURGERY SPORTS TRAUMATOLOGY ARTHROSCOPY	14,500	3.149	0.027480
14	Journal of Orthopaedic Translation	375	3.063	0.000980
15	JOURNAL OF ORTHOPAEDIC & SPORTS PHYSICAL THERAPY	7,369	3.058	0.007160
16	JOURNAL OF ORTHOPAEDIC RESEARCH	14,813	3.043	0.016510
16	PHYSICAL THERAPY	12,062	3.043	0.008890
18	Cartilage	818	2.961	0.001830

Rank	Full Journal Title	Total Cites	Journal Impact Factor	Eigenfactor Score
19	SPINE	47,839	2.903	0.033120
20	JOURNAL OF SHOULDER AND ELBOW SURGERY	13,446	2.865	0.017570
21	CLINICAL JOURNAL OF SPORT MEDICINE	4,034	2.702	0.004650
22	Orthopaedic Journal of Sports Medicine	1,922	2.589	0.007620
23	EUROPEAN SPINE JOURNAL	16,408	2.513	0.021220
24	ORTHOPEDIC CLINICS OF NORTH AMERICA	3,006	2.475	0.002650
25	Archives of Osteoporosis	1,097	2.469	0.003490
26	GAIT & POSTURE	14,352	2.414	0.017290
27	INTERNATIONAL ORTHOPAEDICS	9,195	2.384	0.015020
28	JOURNAL OF THE AMERICAN ACADEMY OF ORTHOPAEDIC SURGEONS	5,593	2.348	0.007390
29	FOOT & ANKLE INTERNATIONAL	8,941	2.341	0.007930
30	Journal of Hand Surgery-European Volume	4,595	2.225	0.003790
31	CONNECTIVE TISSUE RESEARCH	2,241	2.167	0.002310
32	JOURNAL OF HAND SURGERY-AMERICAN VOLUME	11,735	2.090	0.009910
33	JOURNAL OF PEDIATRIC ORTHOPAEDICS	7,447	2.046	0.007000
34	BMC MUSCULOSKELETAL DISORDERS	9,916	2.002	0.021440
35	CLINICAL BIOMECHANICS	8,724	1.977	0.008600
36	ARCHIVES OF ORTHOPAEDIC AND TRAUMA SURGERY	6,184	1.973	0.008790
37	Journal of Orthopaedic Surgery and Research	2,262	1.907	0.005840
38	Brazilian Journal of Physical Therapy	1,472	1.879	0.001900
39	PHYSICIAN AND SPORTSMEDICINE	1,317	1.874	0.001980

Selected JCR Year: 2018; Selected Categories: "ORTHOPEDICS"

2

8.4 Publikation

Siegert P, Plachel F, Akgün D, Schulz E, Auffarth A, Tauber M, Moroder P. Comparison of structural subscapularis integrity following Latarjet procedure versus iliac crest bone graft transfer.

Orthop J Sports Med. 2020 Oct DOI: 10.1177/2325967120958007.

(Impact Factor 2018: 2.589)

Comparison of Structural Subscapularis Integrity After Latarjet Procedure Versus Iliac Crest Bone Graft Transfer

Paul Siegert,^{*†} MD, Fabian Plachel,[†] MD, PhD, Doruk Akgün,[†] MD, Alexander D.J. Baur,[‡] MD, Eva Schulz,[§] MD, Alexander Auffarth,[§] MD, Mark Tauber,^{||} MD, and Philipp Moroder,[†] MD

Investigations performed at the Department for Shoulder and Elbow Surgery, Charité–Universitätsmedizin Berlin, Center for Musculoskeletal Surgery, Berlin, Germany

Background: Although clinical outcome scores are comparable after coracoid transfer procedure (Latarjet) and iliac crest bone graft transfer (ICBGT) for anterior shoulder instability with glenoid bone loss, a significant decrease in internal rotation capacity has been reported for the Latarjet procedure.

Hypothesis: The subscapularis (SSC) musculotendinous integrity will be less compromised by ICBGT than by the Latarjet procedure.

Study Design: Cohort study; Level of evidence, 3.

Methods: We retrospectively analyzed pre- and postoperative computed tomography (CT) scans at short-term follow-up of 52 patients (26 Latarjet, 26 ICBGT) previously assessed in a prospective randomized controlled trial. Measurements included the preoperative glenoid defect area and graft area protruding the glenoid rim at follow-up and tendon thickness assessed through SSC and infraspinatus (ISP) ratios. Fatty muscle infiltration was graded according to Goutallier, quantified with muscle attenuation in Hounsfield units, and additionally calculated as percentages. We measured 3 angles to describe rerouting of the SSC musculotendinous unit around the bone grafts.

Results: SSC fatty muscle infiltration was $2.0\% \pm 2.2\%$ in the Latarjet group versus $2.4\% \pm 2.2\%$ in ICBGT ($P = .546$) preoperatively and showed significantly higher values in the Latarjet group at follow-up ($5.3\% \pm 4.5\%$ vs $2.3\% \pm 1.7\%$; $P = .001$). In total, 4 patients (15.4%) in the Latarjet group showed a progression from grade 0 to grade 1 at follow-up, whereas no changes in the ICBGT group were noted. The measured rerouting angle of the SSC muscle was significantly increased in the Latarjet group ($11.8^\circ \pm 2.1^\circ$) compared with ICBGT ($7.5^\circ \pm 1.3^\circ$; $P < .001$) at follow-up, with a significant positive correlation between this angle and fatty muscle infiltration ($R = 0.447$; $P = .008$). Ratios of SSC/ISP tendon thickness were 1.03 ± 0.3 in the Latarjet group versus 0.97 ± 0.3 ($P = .383$) in ICBGT preoperatively and showed significantly lower ratios in the Latarjet group (0.7 ± 0.3 vs 1.0 ± 0.2 ; $P < .001$) at follow-up.

Conclusion: Although clinical outcome scores after anterior shoulder stabilization with a Latarjet procedure and ICBGT are comparable, this study shows that the described decline in internal rotation capacity after Latarjet procedure has a radiographic structural correlate in terms of marked thinning and rerouting of the SSC tendon as well as slight fatty degeneration of the muscle.

Keywords: Latarjet; iliac crest bone graft transfer; subscapularis; shoulder instability

Glenoid bone augmentation procedures have shown to be superior to mere soft tissue stabilization for treatment of anterior shoulder instability with extensive glenoid bone loss.^{5,6} To restore glenoid bone integrity, various grafting procedures have been established. However, coracoid and free bone transfer are distinguished as the 2 main surgical approaches.^{1,3,14,16,25} The current study provides a comparative analysis of iliac crest bone graft transfer (ICBGT) in

terms of the implant free J-bone graft technique³ and the Latarjet procedure.²⁵ To reconstitute the glenoid rim, in the ICBGT, a J-shaped bone graft, harvested from the iliac crest, is press-fit into an osteotomy at the anterior glenoid neck (Figure 1). In the Latarjet procedure, the coracoid process, along with the conjoint tendons, is used as a bone graft and implanted onto the anterior glenoid neck through screw fixation.¹⁶ Although the ICBGT requires a temporary, horizontal split of the subscapularis (SSC), the Latarjet procedure redirects the conjoint tendon through a permanent SSC split to enhance anterior shoulder stability via an additional sling effect.¹¹

The Orthopaedic Journal of Sports Medicine, 8(10), 2325967120958007
DOI: 10.1177/2325967120958007
© The Author(s) 2020

This open-access article is published and distributed under the Creative Commons Attribution - NonCommercial - No Derivatives License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>), which permits the noncommercial use, distribution, and reproduction of the article in any medium, provided the original author and source are credited. You may not alter, transform, or build upon this article without the permission of the Author(s). For article reuse guidelines, please visit SAGE's website at <http://www.sagepub.com/journals-permissions>.

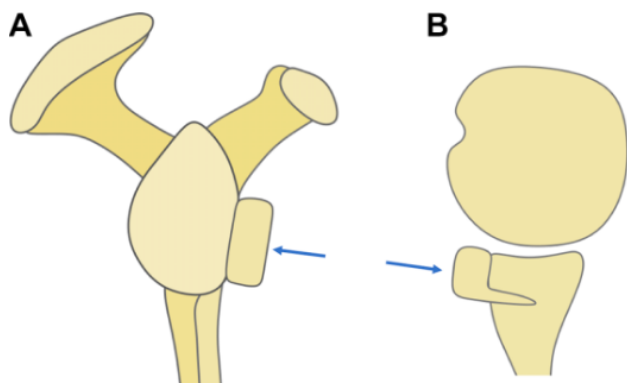


Figure 1. Schematic illustration of an iliac crest J-bone graft (blue arrow) inserted into an osteotomy at the anterior glenoid neck with press-fit fixation on (A) en face and (B) axial views.

A recent prospective, randomized controlled study²⁰ analyzing these 2 procedures for anterior shoulder instability showed no differences regarding main outcome measures at short-term follow-up but observed a significant postoperative decrease of internal rotation with the arm adducted and held at 90° of abduction in patients after Latarjet procedure compared with ICBGT. This effect is thought to be the result of a mechanical influence of the conjoint tendons and screw fixation on structural SSC muscle integrity and redirection of the musculotendinous unit around the graft.²⁰

The aim of this study was to identify the influence of glenoid bone augmentation with Latarjet procedure versus ICBGT on integrity and rerouting of the SSC musculotendinous unit. We hypothesized that the integrity of the SSC tendon and muscle is less compromised after ICBGT compared with the Latarjet procedure.

METHODS

Approval from the regional ethics committees was obtained before onset of the investigation.

Study Population

For this retrospective evaluation of prospectively acquired data, we enrolled 60 eligible patients who underwent either the Latarjet (n = 30) procedure or ICBGT (n = 30) for

anterior shoulder instability with critical bone loss within the recruitment period between 2012 and 2015 and had been previously assessed in a prospective randomized controlled trial.²⁰ In the prior study, inclusion criteria were (1) anterior shoulder instability with ≥ 2 recurrent dislocations and (2) glenoid bone loss $\geq 15\%$ of the glenoid articular surface measured with the PICO method.⁴ Exclusion criteria included (1) any concomitant shoulder pathologies (eg, cuff tears, nerve lesions, osteoarthritis $> 1^\circ$); (2) previous surgeries of the affected shoulder other than open or arthroscopic Bankart repairs; (3) neuromuscular pathologies including seizure disorders; (4) previous history of infection; (5) compliance problems (eg, alcohol or drug abuse); and (6) unwillingness to participate in the study.

Of this cohort, all patients with (1) lack of follow-up CT scans (minimum 12 months after surgery) and (2) CT scans not covering the medial border of the scapula and at least 75% of the craniocaudal scapular extent were excluded from the current study.⁸

After application of these criteria, the final cohort included 26 patients receiving ICBGT with a mean \pm SD follow-up of 24.5 ± 3.2 months and 26 patients with Latarjet procedure with a mean follow-up of 21.7 ± 6.8 months ($P = .120$). The Latarjet group included 1 female and 25 male patients with a mean age of 29.6 years (range, 20-57 years) and the ICBGT group included 1 female and 25 male patients with a mean age of 31.8 years (range, 16-47 years; $P = .386$) at the time of surgery.

Interventions

Detailed descriptions of the randomization process as well as surgical procedures for ICBGT and Latarjet were provided in a previous publication.²⁰

Radiographic Assessment

For preoperative and follow-up evaluation, patients underwent CT examination with a primary slice thickness of 0.625 mm. All multiplanar reconstructions and measurements were independently conducted by 2 observers (P.S., F.P.) using Visage 7.1 (Visage Imaging) software.

Glenoid Measurements

Preoperatively, glenoid defects were measured using the PICO method on en face views.⁴ The defect area of the

*Address correspondence to Paul Siegert, MD, Charité-Universitätsmedizin Berlin, Corporate Member of Freie Universität Berlin, Humboldt-Universität zu Berlin, and Berlin Institute of Health, Center for Musculoskeletal Surgery, Department for Shoulder and Elbow Surgery, Berlin 13353, Germany (email: paul.siegert@charite.de).

[†]Charité-Universitätsmedizin Berlin, Corporate Member of Freie Universität Berlin, Humboldt-Universität zu Berlin, and Berlin Institute of Health, Center for Musculoskeletal Surgery, Department for Shoulder and Elbow Surgery, Berlin, Germany.

[‡]Charité-Universitätsmedizin Berlin, Corporate Member of Freie Universität Berlin, Humboldt-Universität zu Berlin, and Berlin Institute of Health, Department of Radiology, Berlin, Germany.

[§]Department of Orthopedics and Traumatology, Paracelsus Medical University, Salzburg, Austria.

^{||}Department for Shoulder and Elbow Surgery, ATOS Clinic Munich, Munich, Germany.

Final revision submitted July 8, 2020; accepted July 29, 2020.

The authors declared that there are no conflicts of interest in the authorship and publication of this contribution. AOSSM checks author disclosures against the Open Payments Database (OPD). AOSSM has not conducted an independent investigation on the OPD and disclaims any liability or responsibility relating thereto.

Ethical approval for this study was obtained from the regional ethics committee for Salzburg Austria, and the ATOS-Klinik ethics committee.

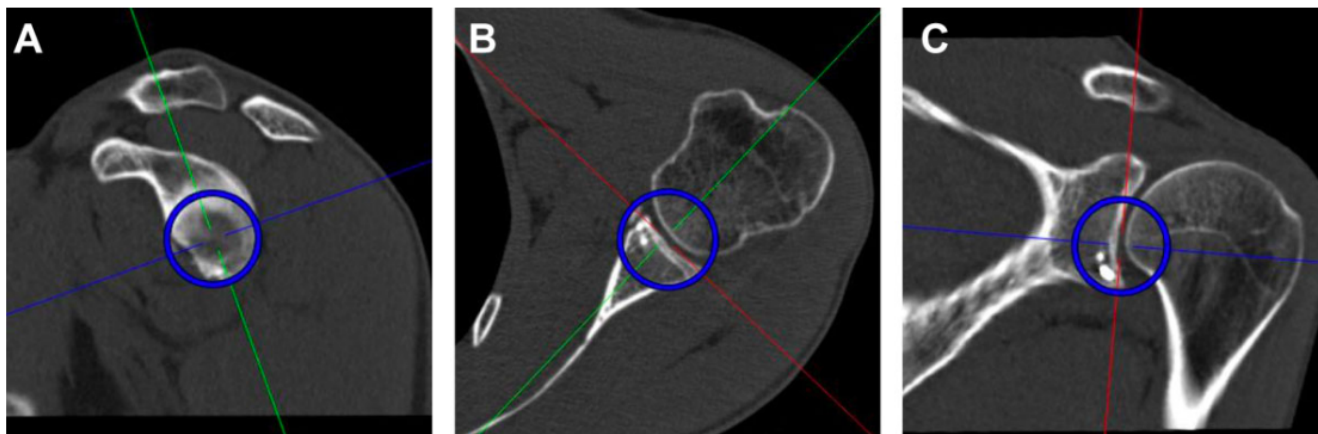


Figure 2. A spherical volume of interest (blue circles) was set on (A) an en face view as a best-fit circle, with its center at the deepest point of the glenoid concavity, which allowed measurements on the (B) transverse and (C) coronal planes.

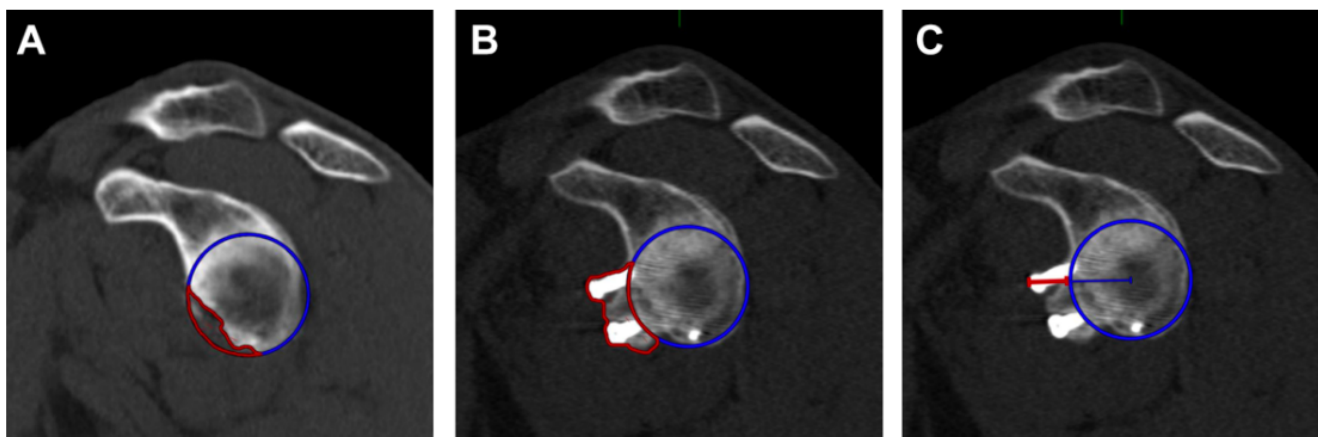


Figure 3. (A) Preoperative glenoid defect measured with the PICO method on an en face view. (B) Area protruding (red) the best-fit circle (blue) at latest follow-up, calculated as percentage in respect to the best-fit circle area. (C) Widest diameter protruding the best-fit circle, measured from the center of the glenoid in millimeters.

glenoid was calculated as a percentage of the best-fit circle area. For later measurements, the best-fit circle on an en face view was constituted as a spherical volume of interest (VOI) with its center defined at the midpoint of the glenoid concavity to allow measurements of the former glenoid rim on the transverse plane (Figure 2). At follow-up, a spherical VOI with the same diameter as preoperatively was drawn on an en face view of the glenoid, and the graft area (including screws) protruding the best-fit circle was measured and calculated as a percentage in respect to the best-fit circle area. Additionally, widest expansion of the graft diameter measured from the center of the glenoid protruding the best-fit circle was measured in millimeters (Figure 3).

SSC Route

For the measurement of the SSC route around the grafts, 3 different angles were measured. To determine SSC routing around the native (preoperative) glenoid, we measured an

angle between a line from the medial border of the scapula to the center of the glenoid (defined by the center of the spherical VOI) and a line from the medial border of the scapula to the most anterior extent of the glenoid rim on the transverse plane. At follow-up, the same angle was measured to the extent of the most anterior aspect of the respective graft. To define the theoretically physiologic SSC route (glenoid without bone defect), we measured the angle between a line from the medial border of the scapula to the center of the glenoid and a tangent line from the medial border of the scapula to the spherical VOI (Figure 4). Measurements of SSC routes were referenced to only the anatomic features of the scapula to prevent the influence of varying humeral head translation.

SSC Musculotendinous Integrity

To measure atrophy or thinning of the SSC musculotendinous interface, a tangent to the surface of the glenoid was

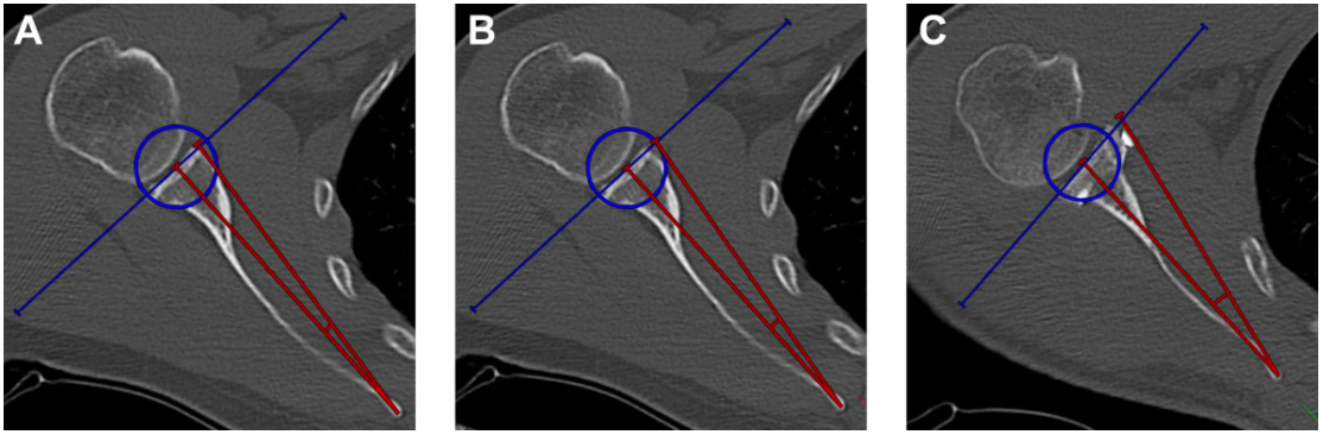


Figure 4. Subscapularis routing angles (red) are measured between the line from the medial scapular ridge to the center of the glenoid and the line from the medial scapular ridge to the (A) preoperative, native, most anterior border of the glenoid, (B) interception of a glenoid tangent and the best-fit circle, and (C) most anterior extent of the respective graft.

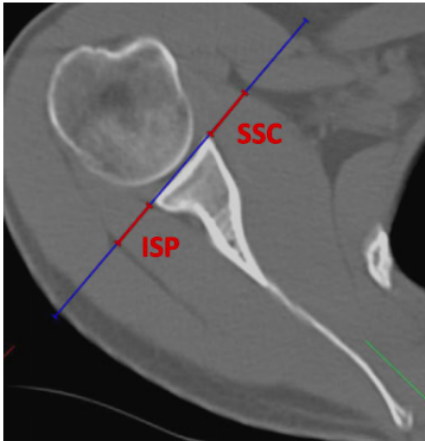


Figure 5. Measurement of subscapularis (SSC) and infraspinatus (ISP) tendon thicknesses on the transverse plane at the level of the glenoid center. A ratio of SSC tendon thickness divided by ISP tendon thickness was calculated.

drawn at the level of the glenoid center on the transverse plane, and the respective thicknesses of the SSC and infraspinatus (ISP) tendons were measured on this tangent as proposed by Maynou et al.¹⁷ Ratios were calculated by dividing tendon thicknesses in millimeters of SSC through ISP (Figure 5).

SSC Muscle Atrophy and Fatty Infiltration

SSC muscle integrity was measured on a parasagittal image plane at the most lateral image on which the coracoid process and the spine of the scapula form a Y-shape.²¹ A vertical diameter, an upper transverse diameter (UTD) at the concavity of the scapular body, and a lower transverse diameter (LTD) at the most inferior aspect of the scapular body were measured in millimeters (Figure 6A).^{21,22,24}

Fatty infiltration of the SSC muscles was graded on the parasagittal (Y-) image plane via the Goutallier

classification, with grade 0 being normal muscle; grade 1, muscle with fatty streaks; grade 2, muscle content greater than fat content; grade 3, muscle and fat equal; and grade 4, muscle content less than fat content.¹³ Additionally, a region of interest (ROI) was drawn around the SSC muscle on a single representative slice, and the mean muscle attenuation was measured in Hounsfield units (HU) (Figure 6C). The teres minor (TM) and ISP were measured together, because exact separation of these 2 muscles is not feasible.²⁶ To portray upper muscle attenuation (UMA) and lower muscle attenuation (LMA) of the SSC, 2 circular ROIs with a circumference of 25 mm were drawn at the level of the UTD and the LTD (Figure 6B).²⁴ For quantitative measurements, DICOM data from images on the parasagittal (Y-) image plane were exported and analyzed using ImageJ software (National Institutes of Health).²³ According to Aubrey et al,² the threshold for adipose tissue was set to -190 to -30 HU. A ROI was drawn around the SSC and ISP/TM muscles. Voxels within the defined -190 and -30 HU (adipose tissue) were extracted and calculated as percentages from the respective ROI (Figure 7).

Statistics

For statistical analyses, we used SPSS Statistics Version 24.0 (IBM) software. $P < .05$ was considered significant. Descriptive statistics, including mean, standard deviation, and minimum and maximum values of continuous variables, were calculated. Two raters (P.S. and F.P.) conducted the measurements independently at different time points. An intraclass correlation coefficient (ICC) with 95% CI was calculated for all measurements. As recommended by Landis and Koch,¹⁵ an ICC < 0.20 is considered slight agreement, 0.21 to 0.40 fair agreement, 0.41 to 0.60 moderate agreement, 0.61 to 0.80 substantial agreement, and > 0.81 almost perfect agreement.¹⁵ After reliability assessment, values of both raters were averaged for further analysis. Statistical differences

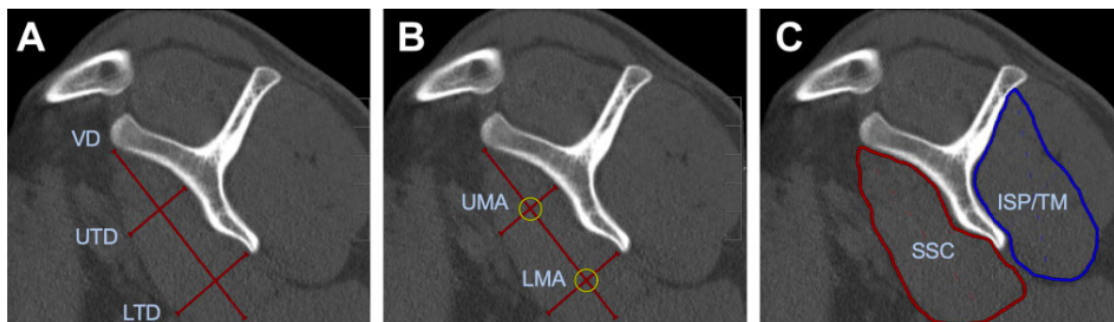


Figure 6. (A) Measurement of subscapularis (SSC) muscle diameters. LTD, lower transverse diameter; UTD, upper transverse diameter; VD, vertical diameter. (B) Measurement of muscle attenuation in Hounsfield units (HU) of upper muscle attenuation (UMA) and lower muscle attenuation (LMA) of SSC muscle. (C) Mean muscle attenuation in HU of SSC and infraspinatus/teres minor (ISP/TM) muscles.

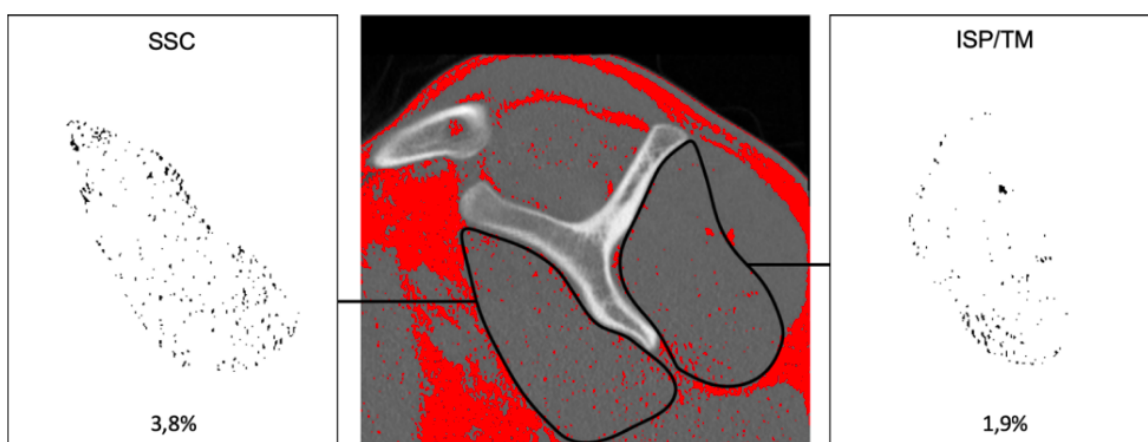


Figure 7. Voxel-based quantification of fatty infiltration of subscapularis (SSC) and infraspinatus/teres minor (ISP/TM) muscles. The threshold for adipose tissue was set at -190 to -30 Hounsfield units (red). Areas of respective muscles were marked, and fatty infiltration was calculated as percentage of the muscle area.

between measurements were determined by independent *t* test. To analyze correlations between parameters, the Pearson correlation coefficient was determined. A linear regression model was calculated to investigate the influence of graft parameters on fatty infiltration of the SSC muscle.

RESULTS

All measurements showed substantial to almost perfect agreement between the 2 raters. The ICCs are summarized in Table 1.

Glenoid Measurements

The mean preoperative glenoid defect was $18.2\% \pm 2.4\%$ and $18.0\% \pm 2.0\%$ in the Latarjet and ICBGT groups ($P = .704$), respectively. At follow-up, the measured graft area protruding the best-fit circle was $15.2\% \pm 8.2\%$ in the Latarjet group compared with $1.5\% \pm 2.0\%$ ($P < .001$)

in ICBGT, and the widest graft overhang was significantly larger in the Latarjet group (7.0 ± 2.6 vs 1.0 ± 1.0 mm; $P < .001$).

SSC Route

Although preoperative routing angles ($5.7^\circ \pm 0.7^\circ$ vs $5.5^\circ \pm 0.7^\circ$; $P = .338$) and physiologic routing ($7.5^\circ \pm 0.4^\circ$ vs $7.5^\circ \pm 0.3^\circ$; $P = .627$) in Latarjet and ICBGT, respectively, were comparable, we observed a significantly larger mean rerouting angle in the Latarjet group ($11.8^\circ \pm 2.1^\circ$) compared with ICBGT ($7.5^\circ \pm 1.3^\circ$; $P < .001$) at follow-up.

SSC Musculotendinous Integrity

Ratios of SSC/ISP tendon thickness were 1.03 ± 0.3 in the Latarjet group versus 0.97 ± 0.3 ($P = .383$) in ICBGT preoperatively, but the Latarjet group had significantly lower ratios at follow-up (0.70 ± 0.3 vs 1.00 ± 0.2 ; $P < .001$) (Figure 8).

TABLE 1
Calculated Intraclass Correlation Coefficients (ICC) for All Measurement Parameters With 95% CIs^a

	ICC	95% CI		Agreement
		Lower Bound	Upper Bound	
Glenoid defect	0.731	0.573	0.836	Substantial
Graft area over best-fit circle	0.929	0.880	0.959	Almost perfect
Graft width over best-fit circle	0.895	0.824	0.939	Almost perfect
Ratios of SSC/ISP tendon thickness	0.856	0.795	0.900	Almost perfect
SSC routing angles	0.959	0.945	0.970	Almost perfect
Attenuation SSC/ISP/TM	0.969	0.959	0.976	Almost perfect
Attenuation upper/lower SSC	0.990	0.987	0.992	Almost perfect
Fatty infiltration SSC/ISP/TM	0.975	0.968	0.981	Almost perfect
Goutallier classification SSC/ISP/TM	1.000	1.000	1.000	Almost perfect
SSC diameter	0.986	0.987	0.992	Almost perfect

^aISP, infraspinatus; SSC, subscapularis; TM, teres minor.

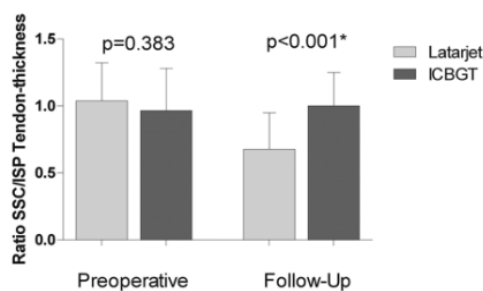


Figure 8. Mean ratios with SDs of tendon thicknesses (subscapularis [SSC]/infraspinatus [ISP]) for both groups preoperatively and at last follow-up. ICBGT, iliac crest bone graft transfer. *Significant difference.

SSC Muscle Atrophy and Fatty Infiltration

Although 4 patients (15.4%) in the Latarjet group showed a progression from Goutallier grade 0 to grade 1 at follow-up, there was no change in ICBGT. Neither group had a significant decrease in mean UMA and LMA. SSC fatty muscle infiltration was $2.0\% \pm 2.2\%$ in the Latarjet group versus $2.4\% \pm 2.2\%$ in ICBGT ($P = .546$) preoperatively and showed slightly but significantly higher values in the Latarjet group at follow-up ($5.3\% \pm 4.5\%$ vs $2.3\% \pm 1.7\%$; $P = .001$) (Table 2).

Influence of Graft Parameters on SSC Muscle Integrity

A linear regression model ($R = 0.447$) showed a significant influence of increased SSC rerouting angles on fatty infiltration of the SSC muscle ($P = .008$) (Table 3).

DISCUSSION

Although clinical outcome scores after anterior shoulder stabilization with the Latarjet procedure and ICBGT are comparable,²⁰ this study shows that the described decline

in internal rotation capacity, including range of motion²⁰ and strength,^{7,24} after the Latarjet procedure has a radiographic structural correlate in terms of slight fatty degeneration of the SSC muscle and marked thinning of the tendon at short-term follow-up. As no visual compromise in the ICBGT group was found, our hypothesis was confirmed.

At follow-up, we found that the graft in ICBGT was anatomically remodeled. This process was described in former studies.^{18,19} Even though the Latarjet group showed graft remodeling as previously described,⁹ the inferior aspect of the graft resorbs less due to the pull of the conjoint tendons, leading to an extra-anatomic enlargement of the anteroinferior glenoid rim. In addition, the screws used for graft fixation in the Latarjet procedure stay in place over time and lead to a “metallic enlargement” of the anterior glenoid. Subsequently, in the Latarjet procedure, after horizontal split of the SSC, the upper parts of the musculotendinous unit are rerouted and glide superficially to the graft and screws, which could explain the markedly reduced thickness of the musculotendinous unit at follow-up (Figure 9). Even though technically not measurable in this study, the lower part of the SSC is most likely rerouted inferiorly, which might lead to restriction in rotation (Figure 10).

At follow-up in both groups, none or only mild (grade 1) fatty infiltration of the SSC muscle was seen and muscle diameters were not affected. As described by others,^{21,24} we observed a decreased muscle attenuation in the upper parts of the SSC compared with the lower parts in the Latarjet group, although we noticed no significant differences when comparing the two procedures. Although mean muscle attenuation indicated no decrease in fatty muscle infiltration of SSC muscles, voxel-based quantification showed a significant increase in fatty muscle infiltration of 2% to 5% in the Latarjet group, whereas no differences were seen in ICBGT.

Interestingly, although not significant, an increase in fatty muscle infiltration of the ISP/TM muscle was observed in the Latarjet group. Valencia et al²⁴ investigated SSC integrity after arthroscopic Latarjet procedure and found a

TABLE 2
Measurements for SSC and ISP/TM Structural Muscle Integrity Through SSC Diameters, Mean Muscle Attenuation, and Voxel Quantification^a

	Preoperative			Follow-Up		
	Latarjet	ICBGT	P Value	Latarjet	ICBGT	P Value
SSC diameter, mm						
VD	82.6 ± 10.9	86.3 ± 9.6	.197	82.2 ± 12.0	83.5 ± 9.8	.668
UTD	26.6 ± 3.8	27.3 ± 4.5	.521	26.0 ± 6.0	27.2 ± 4.7	.456
LTD	30.3 ± 5.4	31.0 ± 6.1	.671	28.3 ± 5.2	30.1 ± 5.6	.249
Mean muscle attenuation, HU						
SSC (total)	57.5 ± 5.4	57.4 ± 4.9	.915	56.2 ± 7.6	56.2 ± 7.3	.997
SSC (UMA)	58.1 ± 7.9	59.7 ± 8.8	.510	50.6 ± 9.7	54.7 ± 9.0	.124
SSC (LMA)	59.2 ± 7.4	59.1 ± 5.7	.958	60.7 ± 12.7	58.6 ± 10.9	.515
ISP/TM	66.9 ± 8.5	65.0 ± 9.3	.451	67.6 ± 9.3	66.5 ± 9.1	.651
Fatty muscle infiltration, %						
SSC	2.0 ± 2.9	2.4 ± 2.2	.546	5.3 ± 4.5	2.3 ± 1.7	.001 ^b
ISP/TM	1.7 ± 2.8	2.0 ± 2.5	.630	3 ± 3.6	1.7 ± 1.3	.064

^aValues are expressed as mean ± SD. HU, Hounsfield units; ICBGT, iliac crest bone graft transfer; ISP, infraspinatus; LMA, lower muscle attenuation; LTD, lower transverse diameter; SSC, subscapularis; TM, teres minor; UMA, upper muscle attenuation; UTD, upper transverse diameter; VD, vertical diameter.

^bSignificant difference.

TABLE 3
Linear Regression Model (*R* = 0.447) Investigating the Influence of Postoperative Glenoid Measurements and SSC Rerouting Angles on SSC Fatty Muscle Infiltration^a

	β Coefficient	95% CI		P Value
		Lower Bound	Upper Bound	
Graft area over best-fit circle	-0.177	-0.483	0.129	.251
Graft width over best-fit circle	-0.131	-0.732	0.994	.762
SSC rerouting angle	0.841	0.229	1.454	.008 ^b

^aThe dependent variable was percentage of fatty muscle infiltration of subscapularis (SSC).

^bSignificant correlation.

decrease of internal rotation strength at mid- to long-term follow-up, but ratios to external rotation remained unchanged over the study course. This could be an indicator of concomitant damage to antagonist muscles through impairment of the agonist. Caubère et al⁷ found similar results after short-term follow-up.

Although Edouard et al¹⁰ reported a transient SSC muscle strength weakness and fatigue after Latarjet procedure, Valencia et al²⁴ showed a residual deficit at latest follow-up. In contrast, previously published data²⁰ showed no significant difference of internal or external rotation strength at 2-year follow-up. However, a critical evaluation showed that the measurements were conducted in 0° of arm abduction, neutral rotation, and 90° of elbow flexion, which reflects on functional internal rotation with possible compensation of internal rotators such as the pectoralis muscle, but not merely SSC strength.

In the literature, reduced SSC function after open shoulder stabilization is often attributed to muscle violation upon index surgery, through either tenotomy or split.^{17,21,22} Because surgical approaches in both ICBGT and Latarjet are conducted through a split of the SSC, our results indicate that injuries to the SSC tendon with consecutive compromise of structural muscle integrity are attributed to postoperative mechanical conflict rather than the sole intraoperative trauma. In a recent study, Godenèche et al¹² investigated the effect of screw removal in patients with unexplained anterior shoulder pain after Latarjet procedure and found complete or partial relief of pain, supporting the hypothesis of mechanical conflict between the screw fixation and the SSC.

The strength of the current study is that data were acquired from a prospective randomized controlled trial, and selection bias was therefore minimized. An evaluation of the preoperative state allows for more accurate findings than comparison with the contralateral side. There were 2 main limitations: (1) the follow-up time of 2 years was short, as damage to musculotendinous structures through mechanical friction may progress over time, and (2) although 2 raters completed the measurements with good interobserver reliability, blinding for surgical technique was not possible due to the visible screw fixation on the CT scans. Additionally, patients were placed in the supine position with the arms at the side with no fixed external rotation angle during CT imaging, which could affect the measurements. However, we referenced the measurements to the anatomic features of the scapular body to prevent the influence of varying humeral head translation and rotation. Patients receiving open or arthroscopic Bankart repair before bone augmentation were not excluded from this study. This might also affect the SSC musculotendinous integrity, but as previously reported, there was no

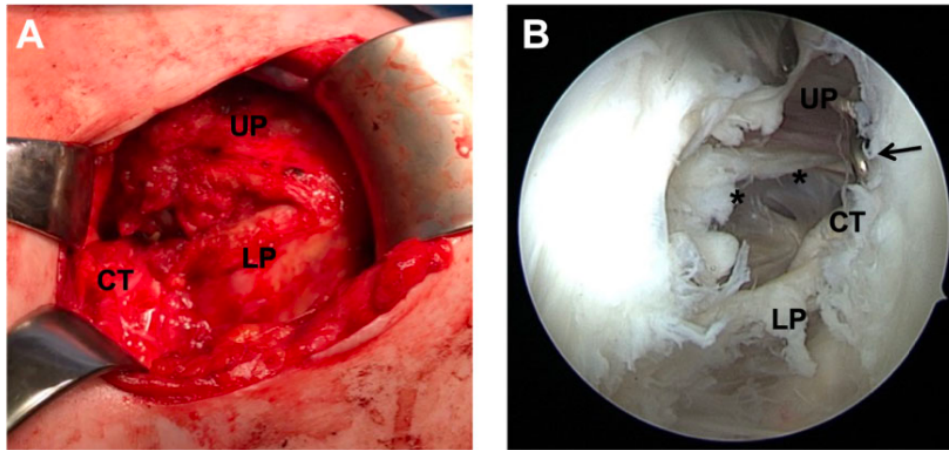


Figure 9. (A) Intraoperative image of permanent horizontal subscapularis (SSC) split after a Latarjet procedure. Upper parts (UP) of the musculotendinous SSC unit protrude over the graft, and lower parts (LP) are redirected underneath the conjoint tendons (CT). (B) Arthroscopic view through an anterolateral viewing portal in a left shoulder that was revised due to persistent anterior shoulder pain after a Latarjet procedure. A marked defect area (asterisks) can be identified in the tendon and muscle of the SSC close to the screw heads (arrow).

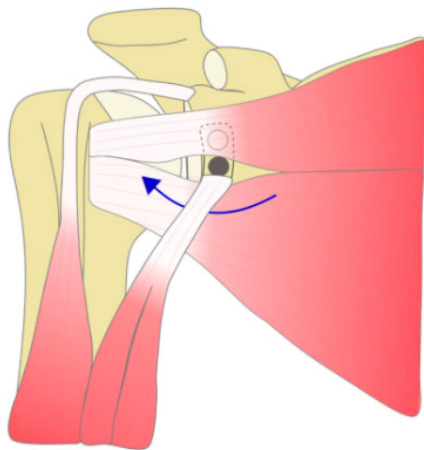


Figure 10. Illustration of subscapularis (SSC) traction force around the coracoid graft in the Latarjet procedure. The upper parts of the SSC are routed over the graft and screw heads, and the lower parts are redirected under the conjoint tendons (blue arrow), which might lead to mechanical conflict.

statistically significant difference in prior procedures in both groups.²⁰

CONCLUSION

Although clinical outcome scores after anterior shoulder stabilization with the Latarjet procedure and ICBGT are comparable, this study shows that the described decline in internal rotation capacity after Latarjet has a radiographic structural correlate in terms of marked thinning and rerouting of the SSC tendon as well as slight fatty degeneration of the muscle. Further studies need to clarify

whether these structural changes might cause long-term problems in individual patients.

REFERENCES

1. Anderl W, Pauzenberger L, Laky B, Kriegleder B, Heuberger PR. Arthroscopic implant-free bone grafting for shoulder instability with glenoid bone loss: clinical and radiological outcome at a minimum 2-year follow-up. *Am J Sports Med.* 2016;44(5):1137-1145.
2. Aubrey J, Esfandiari N, Baracos VE, et al. Measurement of skeletal muscle radiation attenuation and basis of its biological variation. *Acta Physiol (Oxf).* 2014;210(3):489-497.
3. Auffarth A, Schauer J, Matis N, et al. The J-bone graft for anatomical glenoid reconstruction in recurrent posttraumatic anterior shoulder dislocation. *Am J Sports Med.* 2008;36(4):638-647.
4. Baudi P, Righi P, Bolognesi D, et al. How to identify and calculate glenoid bone deficit. *Chir Organi Mov.* 2005;90(2):145-152.
5. Burkhart SS, De Beer JF. Traumatic glenohumeral bone defects and their relationship to failure of arthroscopic Bankart repairs: significance of the inverted-pear glenoid and the humeral engaging Hill-Sachs lesion. *Arthroscopy.* 2000;16(7):677-694.
6. Bushnell BD, Creighton RA, Herring MM. Bony instability of the shoulder. *Arthroscopy.* 2008;24(9):1061-1073.
7. Caubère A, Lami D, Boileau P, et al. Is the subscapularis normal after the open Latarjet procedure? An isokinetic and magnetic resonance imaging evaluation. *J Shoulder Elbow Surg.* 2017;26(10):1775-1781.
8. Chalmers PN, Salazar D, Chamberlain A, Keener JD. Radiographic characterization of the B2 glenoid: is inclusion of the entirety of the scapula necessary? *J Shoulder Elbow Surg.* 2017;26(5):855-860.
9. Di Giacomo G, Costantini A, de Gasperis N, et al. Coracoid graft osteolysis after the Latarjet procedure for anteroinferior shoulder instability: a computed tomography scan study of twenty-six patients. *J Shoulder Elbow Surg.* 2011;20(6):989-995.
10. Edouard P, Bankolé C, Calmels P, Beguin L, Degache F. Isokinetic rotator muscles fatigue in glenohumeral joint instability before and after Latarjet surgery: a pilot prospective study. *Scand J Med Sci Sports.* 2013;23(2):e74-e80.
11. Giles JW, Boons HW, Elkinson I, et al. Does the dynamic sling effect of the Latarjet procedure improve shoulder stability? A biomechanical evaluation. *J Shoulder Elbow Surg.* 2013;22(6):821-827.

12. Godenèche A, Merlini L, Roulet S, et al. Screw removal can resolve unexplained anterior pain without recurrence of shoulder instability after open Latarjet procedures. *Am J Sports Med.* 2020;48(6):1450-1455.
13. Goutallier D, Postel JM, Bernageau J, Lavau L, Voisin MC. Fatty muscle degeneration in cuff ruptures: pre- and postoperative evaluation by CT scan. *Clin Orthop Relat Res.* 1994;304:78-83.
14. Lafosse L, Boyle S. Arthroscopic Latarjet procedure. *J Shoulder Elbow Surg.* 2010;19(2)(suppl):2-12.
15. Landis JR, Koch GG. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics.* 1977;33(1):159-174.
16. Latarjet M. Treatment of recurrent dislocation of the shoulder [in French]. *Lyon Chir.* 1954;49(8):994-997.
17. Maynou C, Cassagnaud X, Mestdagh H. Function of subscapularis after surgical treatment for recurrent instability of the shoulder using a bone-block procedure. *J Bone Joint Surg Br.* 2005;87(8):1096-1101.
18. Moroder P, Hirzinger C, Lederer S, et al. Restoration of anterior glenoid bone defects in posttraumatic recurrent anterior shoulder instability using the J-bone graft shows anatomic graft remodeling. *Am J Sports Med.* 2012;40(7):1544-1550.
19. Moroder P, Hitzl W, Tauber M, et al. Effect of anatomic bone grafting in post-traumatic recurrent anterior shoulder instability on glenoid morphology. *J Shoulder Elbow Surg.* 2013;22(11):1522-1529.
20. Moroder P, Schulz E, Wierer G, et al. Neer Award 2019: Latarjet procedure vs. iliac crest bone graft transfer for treatment of anterior shoulder instability with glenoid bone loss: a prospective randomized trial. *J Shoulder Elbow Surg.* 2019;28(7):1298-1307.
21. Scheibel M, Nikulka C, Dick A, et al. Structural integrity and clinical function of the subscapularis musculotendinous unit after arthroscopic and open shoulder stabilization. *Am J Sports Med.* 2007;35(7):1153-1161.
22. Scheibel M, Tsynman A, Magosch P, Schroeder RJ, Habermeyer P. Postoperative subscapularis muscle insufficiency after primary and revision open shoulder stabilization. *Am J Sports Med.* 2006;34(10):1586-1593.
23. Schneider CA, Rasband WS, Eliceiri KW. NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nat Methods.* 2012;9(7):671-675.
24. Valencia M, Fernandez-Bermejo G, Martin-Rios MD, et al. Subscapularis structural integrity and function after arthroscopic Latarjet procedure at a minimum 2-year follow-up. *J Shoulder Elbow Surg.* 2020;29(1):104-112.
25. Warner JJ, Gill TJ, O'Hollerhan JD, Pathare N, Millett PJ. Anatomical glenoid reconstruction for recurrent anterior glenohumeral instability with glenoid deficiency using an autogenous tricortical iliac crest bone graft. *Am J Sports Med.* 2006;34(2):205-212.
26. Zanetti M, Gerber C, Hodler J. Quantitative assessment of the muscles of the rotator cuff with magnetic resonance imaging. *Invest Radiol.* 1998;33(3):163-170.

8.5 Lebenslauf

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

8.6 Publikationsliste

Frank JK, **Siegert P**, Plachel F, Heuberer PR, Huber S, Schanda JE. The Evolution of Reverse Total Shoulder Arthroplasty-From the First Steps to Novel Implant Designs and Surgical Techniques. *J Clin Med*. 2022 Mar 10;11(6):1512. DOI: 10.3390/jcm11061512.

Moroder P, Paksoy A, **Siegert P**, Thiele K, Lacheta L, Akgün D. The Independent Double-Row (IDR) bony Bankart repair technique. *Z Orthop Unfall*. 2022 Feb 23. DOI: 10.1055/a-1753-9883.

Ostermann R, Moen TC, **Siegert P**, Bukowsky C, Lang S, Heuberer PR. The Intraarticular Disk of the AC Joint as a Potential Source of Pain in AC Joint Injuries - A Neural Anatomic Study. *Am J Sports Med*. 2022 Mar;50(4):1039-1043. DOI: 10.1177/03635465211070276.

Kilgus S, Eder C, **Siegert P**, Moroder P, Zimmermann E, Thiele K. The inter-individual anatomical variation of the trochlear notch as a predisposition for simple elbow dislocation. *Arch Orthop Trauma Surg*. 2021 Dec 25. DOI: 10.1007/s00402-021-04284-2.

Moroder P, Urvoy M, Raiss P, Werthel JD, Akgün D, Chaoui J, **Siegert P**. Patient Posture Affects Simulated ROM in Reverse Total Shoulder Arthroplasty: A Modeling Study Using Preoperative Planning Software. *Clin Orthop Relat Res*. 2021 Oct 20. DOI: 10.1097/CORR.0000000000002003.

Siegert P, Plachel F, Akgün D, Schulz E, Auffarth A, Tauber M, Moroder P. Comparison of structural subscapularis integrity following Latarjet procedure versus iliac crest bone graft transfer. *Orthop J Sports Med*. 2020 Oct DOI: 10.1177/2325967120958007.

Moroder P, Akgün D, Plachel F, Baur ADJ, **Siegert P**. The influence of posture and scapulothoracic orientation on the choice of humeral component retrotorsion in reverse total shoulder arthroplasty. *J Shoulder Elbow Surg*. 2020 DOI: 10.1016/j.jse.2020.01.089I.

Siegert P, Ernstbrunner L, Runer A, Neunhäuserer D, Resch H, Moroder P. Injuries in Freestyle Motocross (FMX): A Retrospective Study; *Sportverletz Sportschaden*. 2016 Jun;30(2):106-10. doi: 10.1055/s-0041-106946.

Plachel F, **Siegert P**, Moroder P, Pauzenberger L, Laky B, Anderl W, Heuberger P. Treatment of non-arthritic pseudoparetic shoulders with irreparable massive rotator cuff tears: arthroscopic procedures yield comparable midterm results to reverse arthroplasty. *BMC Musculoskelet Disord*. 2021;22(1):190 DOI: 10.1186/s12891-021-04050-wI.

Akgün D, Wietholter M, **Siegert P**, Danzinger V, Minkus M, Braun KF, Moroder P. The role of serum C-reactive protein in the diagnosis of periprosthetic shoulder infection. *Arch Orthop Trauma Surg*. 2021 DOI: 10.1007/s00402-021-03779-2I.

Plachel F, **Siegert P**, Rüttershoff K, Thiele K, Akgün D, Moroder P, et al. Long-term Results of Arthroscopic Rotator Cuff Repair: A Follow-up Study Comparing Single-Row Versus Double-Row Fixation Techniques. *Am J Sports Med*. 2020:363546520919120 DOI: 10.1177/0363546520919120I.

Akgün D, **Siegert P**, Danzinger V, Plachel F, Minkus M, Thiele K, Moroder P. Glenoid vault and humeral head alignment in relation to the scapular blade axis in young patients with pre-osteoarthritic static posterior subluxation of the humeral head. *J Shoulder Elbow Surg*. 2020 Aug, DOI: 10.1016/j.jse.2020.08.004.

Plachel F, **Siegert P**, Rüttershoff K, Akgün D, Thiele K, Moroder P, Scheibel M. Clinical midterm results of arthroscopic rotator cuff repair in patients older than 75 years of age. *J Shoulder Elbow Surg*. 2020 Mar 4. DOI: 10.1016/j.jse.2020.01.093.

Moroder P, Akgün D, **Siegert P**, Thiele K, Plachel F. "Strings" (Multiple Tendon Interposition Autografts) for Reconstruction of Presumably Irreparable Rotator Cuff Tears. *Arthrosc Tech*. 2020;9(4):e459-e67 DOI: 10.1016/j.eats.2019.11.018I.

Akgün D, Maziak N, Plachel F, **Siegert P**, Minkus M, Thiele K, Moroder P. The role of implant sonication in the diagnosis of periprosthetic shoulder infection. *J Shoulder Elbow Surg*. 2020 Jan 7. pii: S1058-2746(19)30715-3. doi: 10.1016/j.jse.2019.10.011.

Ernstbrunner L, Runer A, **Siegert P**, Ernstbrunner M, Becker J, Freude T, Resch H, Moroder P. A prospective analysis of injury rates, patterns and causes in Cliff and Splash Diving. *Injury*. 2017 Oct;48(10):2125-2131.

8.7 Danksagung

Mein größter Dank gilt Prof. Dr. Philipp Moroder und dem gesamten Team der Schulter- und Ellenbogenchirurgie am Centrum für Muskuloskeletale Chirurgie (CMSC), die mir diese Promotion ermöglicht haben.

Neben Philipp Moroder gilt ein großer Dank Fabian Plachel und Doruk Akgün, die mich wissenschaftlich und freundschaftlich begleitet haben.

Ich danke meiner Verlobten, Theresa, die mir verständnisvoll zur Seite gestanden ist und auf die ich mich immer verlassen kann.