

Aus der  
Berufsgenossenschaftlichen Unfallklinik  
Klinik für Hand-, Plastische, Rekonstruktive und  
Verbrennungschirurgie an der Universität Tübingen

**Untersuchungen zur Diagnostik intrinsischer Bandschäden  
am Handgelenk – Vergleich zwischen konventioneller  
radiologischer Bildgebung und Handgelenksarthroskopie**

**Inaugural-Dissertation  
zur Erlangung des Doktorgrades  
der Medizin**

**der Medizinischen Fakultät  
der Eberhard-Karls-Universität  
zu Tübingen**

vorgelegt von  
Maja Hunkin, geb. Barczak

2024

Dekan: Professor Dr. B. Pichler

1. Berichterstatter: Professor Dr. J. Rothenberger
2. Berichterstatter: Professor Dr. M. Küper

Tag der Disputation: 20.06.2024

## Inhaltsverzeichnis

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Abbildungs- und Tabellenverzeichnis .....</b>                    | <b>5</b>  |
| <b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>                                   | <b>6</b>  |
| <b>1. Einleitung.....</b>   | <b>7</b>  |
| <b>1.1. Allgemeine Anatomie und Biomechanik der Handwurzel.....</b> | <b>8</b>  |
| 1.1.1. Das SL-Band.....   | 11        |
| 1.1.2. Das LT-Band.....   | 13        |
| 1.1.3. Sekundäre Stabilisatoren und Propriozeption .....            | 13        |
| <b>1.2. Kinetik und Kinematik des Handgelenks .....</b>             | <b>16</b> |
| <b>1.3. Karpale Instabilität – CID/CIND .....</b>                   | <b>18</b> |
| <b>1.4. SL-Band Verletzungen.....</b>                               | <b>19</b> |
| 1.4.1. Pathogenese und Inzidenz .....                               | 19        |
| 1.4.2. Pathomechanik .....  | 20        |
| 1.4.3. Definition und Klassifikation – SL-Band-Instabilität .....   | 22        |
| <b>1.5. LT-Band Verletzungen.....</b>                               | <b>26</b> |
| <b>1.6. Diagnostik .....</b>  | <b>26</b> |
| 1.6.1. Anamnese/ Klinische Diagnostik .....                         | 27        |
| 1.6.2. Röntgen.....   | 27        |
| 1.6.3. Weitere Bildgebung .....                                     | 32        |
| 1.6.4. Operative Diagnostik.....                                    | 33        |
| <b>1.7. Behandlungsmöglichkeiten.....</b>                           | <b>37</b> |
| <b>2. Material und Methoden .....</b>                               | <b>40</b> |
| <b>2.1. Patienten.....</b>  | <b>40</b> |
| <b>2.2. Parameter .....</b>   | <b>42</b> |
| 2.2.1. Aufgestellte Parameter Patientenakte.....                    | 42        |
| 2.2.2. Aufgestellte radiologische Parameter .....                   | 42        |
| 2.2.3. Arthroskopie .....   | 43        |
| <b>2.3. Statistische Methodik .....</b>                             | <b>45</b> |
| <b>3. Ergebnisse.....</b>   | <b>47</b> |
| <b>3.1. Allgemeines.....</b>  | <b>47</b> |
| 3.1.1. Altersverteilung.....  | 48        |
| 3.1.2. Verteilung der SL-Bandrupturen .....                         | 48        |
| 3.1.3. Ipsilaterale Begleitverletzungen.....                        | 51        |
| <b>3.2. Klinische Parameter.....</b>                                | <b>53</b> |
| 3.2.1. Watson-Test .....  | 53        |
| 3.2.2. Bewegungsausmaße .....                                       | 53        |
| <b>3.3. Radiologische Parameter .....</b>                           | <b>55</b> |
| 3.3.1. Siegelringzeichen .....                                      | 55        |
| 3.3.2. MRT-Untersuchung .....                                       | 55        |
| 3.3.3. Röntgenuntersuchung.....                                     | 57        |
| <b>3.4. Trennwerte und diagnostische Güte .....</b>                 | <b>64</b> |
| <b>3.5. Kombination der Diagnostik .....</b>                        | <b>67</b> |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>4. Diskussion</b> .....                | <b>69</b> |
| <b>5. Zusammenfassung</b> .....           | <b>83</b> |
| <b>Literaturverzeichnis</b> .....         | <b>86</b> |
| <b>Eigenanteilserklärung</b> .....        | <b>93</b> |
| <b>Liste der Veröffentlichungen</b> ..... | <b>94</b> |

## Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| Abbildung 1: Anatomie der Handwurzel. ....   | 9  |
| Abbildung 2: Anatomie des SL-Bandes. ....  | 11 |
| Abbildung 3: Kinetik der karpalen Reihen während Radial-/Ulnarabduktion. ....  | 17 |
| Abbildung 4: Bild einer Fortgeschrittene SLAC-Wrist Grad III. ....   | 21 |
| Abbildung 5: Positives Ringzeichen bei SL-Spalt Verbreiterung. ....  | 29 |
| Abbildung 6: Bild einer DISI-Fehlstellung. ....  | 30 |
| Abbildung 7: Beispiel der Zunahme einer SL-Spalt-Erweiterung. ....   | 31 |
| Abbildung 8: Box Plot mit der Altersverteilung in den jeweiligen Schweregraden der SL-Band Verletzung. ....  | 48 |
| Abbildung 9: Darstellung der jeweiligen SL-Band-Rupturen nach Geissler. ....   | 50 |
| Abbildung 10: Box Plot mit den jeweiligen SL-Abständen auf den a.-p.-Aufnahmen bei jeweiliger SL-Band-Ruptur nach Geissler bzw. ohne SL-Band-Ruptur (Grad 0). ....                 | 59 |
| Abbildung 11: Box Plot mit den jeweiligen SL-Abständen auf den Ulnarabduktion bei jeweiliger SL-Band-Ruptur nach Geissler bzw. ohne SL-Band-Ruptur (Grad 0) [114].                 | 60 |
| Abbildung 12: Box Plot mit den jeweiligen SL-Abständen auf den Aufnahmen in Radialadduktion bei jeweiliger SL-Band-Ruptur nach Geissler bzw. ohne SL-Band-Ruptur (Grad 0). ....    | 61 |
| Abbildung 13: Box Plot mit den jeweiligen SL-Winkeln auf den lateralen Aufnahmen bei jeweiliger SL-Band-Ruptur nach Geissler bzw. ohne SL-Band-Ruptur (Grad 0) [114].              | 62 |
| Abbildung 14: Box Plot mit den jeweiligen RL-Winkeln auf den lateralen Aufnahmen bei jeweiliger SL-Band-Ruptur nach Geissler bzw. ohne SL-Band-Ruptur (Grad 0) [114].              | 63 |
| Abbildung 15: Darstellung der ROC-Kurve für den SL-Abstand in der a.-p.-Aufnahme, in Ulnarabduktion und Radialabduktion sowie der SL-Winkel in der seitlichen Aufnahme [114]. .... | 66 |
|  |    |
| Tabelle 1: SLAC-Wrist Stadien nach Watson und Ballet [68]. ....  | 22 |
| Tabelle 2: Stadien der SL-Instabilität nach Wolfe [16]. ....   | 25 |
| Tabelle 3: Geissler Klassifikation [98]. ....  | 35 |
| Tabelle 4: EWAS-Klassifikation [75]. ....  | 36 |
| Tabelle 5: Traumatische Läsion des TFCC nach Palmer [112]. ....  | 44 |
| Tabelle 6: Degenerative Läsionen des TFCC nach Palmer [112]. ....  | 44 |
| Tabelle 7: Arthrose Grade nach Outerbridge [113]. ....   | 44 |
| Tabelle 8: Allgemeine Informationen zum Patientenkollektiv ....  | 47 |
| Tabelle 9: Darstellung der Häufigkeiten der SL-Band-Läsionen und bei wie vielen keine SL-Band-Läsion (SLBL) vorlag ....  | 50 |
| Tabelle 10: Häufigkeitsverteilung von LT-Band-Läsionen. ....   | 51 |
| Tabelle 11: Median der Bewegungsausmaße bei vorliegender SL-Band-Läsion im Vergleich zur Gegenseite ....   | 54 |
| Tabelle 12: Übersicht SL-Abstände, SL- und RL-Winkel. ....   | 58 |
| Tabelle 13: Diagnostische Genauigkeit bei jeweiligem Cut-off-Wert sowie Darstellung der Diagnostischen Güte. ....  | 64 |
| Tabelle 14: Diagnostische Genauigkeit bei Kombination von Diagnostischen Verfahren ....  | 68 |

## **Abkürzungsverzeichnis**

a.-p. – anterior-posterior

AUC – Area under the Curve

BG – Berufsgenossenschaft

CIC – Carpal instability combined/ Carpal instability complex

CID – Carpal instability dissociative

CIND – Carpal instability non dissociative

CL-Winkel – Capitatolunärer-Winkel

CT – Computertomographie

DISI – Dorsal intercalated segment instability

EWAS – European Wrist Arthroscopy Society

K-Draht – Kirschner-Draht

LT-Band – Lunotriquetrale-Band

LTD – Lunotriquetrale-Dissoziation

mm – Millimeter

MRT – Magnetresonanztomografie

N – Newton

N. – Nervus

NVW – Negativer Vorhersagewert

PACS System – Picture Archiving and Communication System

PISI – Palmar intercalated segment instability

PVW – Positiver Vorhersagewert

R. – Ramus

RL-Winkel – Radiolunärer-Winkel

ROC – Receiver operating characteristic

SL-Abstand – Skapholunärer-Abstand

SLAC – Scapholunar advanced collapse

SL-Band – Skapholunäre-Band

SLD – Skapholunäre-Dissoziation

SLI – Skapholunäre-Instabilität

SL-Winkel – Skapholunärer-Winkel

TFCC – Triangulärer fibrocartilaginärer Komplex

VISI – Volar intercalated segment instability

## 1. Einleitung

Das menschliche Handgelenk ist ein hochkomplexes System aus Knochen, Bändern, Sehnen, Nerven, Gefäßen und Muskeln, welches Stabilität, aber gleichzeitig Beweglichkeit für die Vollbringung alltäglicher Aufgaben bietet. Der primäre Stabilisator ist das Ligamentum Scapholunatum (SL-Band) [1].

Das SL-Band kann bis zu 300 Newton aushalten [2] und bis zu 200 % ausgedehnt werden, bevor es reißt [3]. Am häufigsten (42 %) kommt es zu sogenannten lateralen Avulsionsausrissen im Bereich des Os scaphoideum [4].

Es werden Inzidenzen von SL-Band-Rupturen zwischen 14-75 % beschrieben [5-9]. Dies liegt daran, dass diese meist durch Extensionstraumen und somit auch als Begleitverletzung im Rahmen von distalen Radius- oder Skaphoidfrakturen vorkommen [7, 10-14].

Unbehandelt kann es aufgrund einer SL-Band-Verletzung zu einem karpalen Kollaps mit Arthrose-Bildung im Bereich der Handwurzel kommen [15], bei welchem der sogenannte „scapholunate advanced collapse“ (SLAC-Wrist) das Endstadium darstellt [15, 16].

Die Handgelenksarthroskopie als Goldstandard zur Detektierung von SL-Band Schäden [17] steht den meisten Kliniken jedoch in der Erstversorgung nicht zur Verfügung. Nativradiologische Bildgebung sowie eine sorgfältige klinische Untersuchung können in den meisten regionalen Krankenhäusern durchgeführt werden. Diese sind eine kostengünstige und effektive Methode und können, wenn richtig angewendet und interpretiert, frühzeitig Hinweise auf eine SL-Band-Läsion geben. In der Literatur werden jedoch unterschiedliche Angaben bezüglich Aufnahmetechniken, Abstandsbestimmung und pathologischen Grenzwerten, sogenannten „Cut-off-Werten“, bzgl. Skapholunären-Abstand (SL-Abstand), Skapholunären-Winkel (SL-Winkel) bzw. Radiolunären-Winkel (RL-Winkel) gemacht [15, 18-22].

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, deskriptiv den Zusammenhang zwischen klinischem, radiologischem und arthroskopischem Befund bei SL-Band-Läsionen aufzuzeigen und den Stellenwert der nativradiologischen Bildgebung sowie der klinischen Untersuchung für den Alltag herauszuarbeiten. Ferner sollten ggf. Cut-off-Werte bestimmt bzw. ein Logarithmus aufgestellt werden, um diejenigen Patienten herauszufiltern, welche eine weitere Bildgebung mittels Magnetresonanztomografie (MRT) oder gar operativer Intervention zugeführt werden sollten.

Im Rahmen dessen wurden die Befunde von Handgelenkarthroskopien bei Patienten mit Handgelenksbeschwerden mit den Befunden der präoperativen klinischen sowie radiologischen Untersuchungen verglichen und in Korrelation gestellt.

### **1.1. Allgemeine Anatomie und Biomechanik der Handwurzel**

Das Handgelenk setzt sich aus mehreren Gelenken und Knochen zusammen. Die Handwurzel besteht im wesentlichen Teil aus acht Knochen. Sie wird in eine proximale Reihe mit dem Os scaphoideum (Kahnbein), Os lunatum (Mondbein), Os triquetrum (Dreiecksbein) und dem Os pisiforme (Erbsenbein), sowie eine distale Reihe mit dem Os trapezium (großes Vieleckbein), Os trapezoideum (kleines Vieleckbein), Os capitatum (Kopfbein) und dem Os hamatum (Hakenbein) unterteilt.

Zwischen den einzelnen Handwurzel Knochen gibt es die sogenannten Articulationes intercarpales, welche Gelenke vom Amphiarthrose-Typ bilden. Das proximale Handgelenk oder auch Articulatio radiocarpalis, ein Ellipsoidgelenk, verbindet Radius bzw. Ulna mit der proximalen Handwurzelreihe. Das distale Handgelenk, Articulatio mediocarpalis, liegt zwischen proximaler und distaler Handwurzelreihe. Bei diesem handelt es sich um ein verzahntes Scharniergelenk. Zwischen der distalen Handwurzelreihe und den Mittelhandknochen zwei bis fünf gibt es die Articulationes carpometacarpales bzw. am Übergang zwischen gro-



ßem Vieleckbein und erstem Mittelhandknochen das Articulatio carpometacarpalis pollicis, ein Sattelgelenk, welches eine hohe Beweglichkeit des Daumens zulässt.

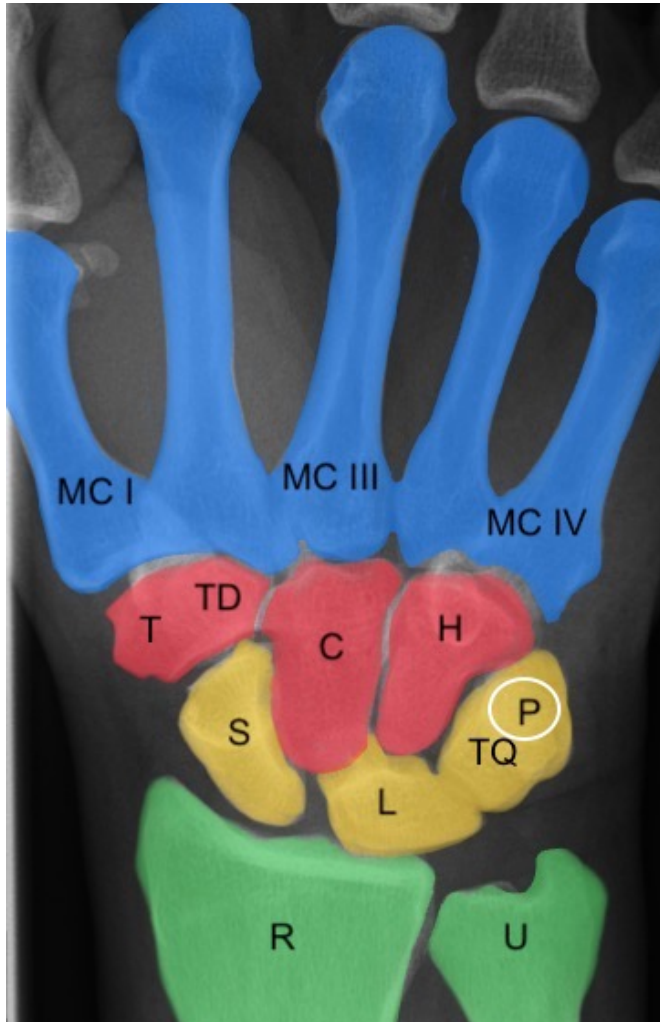


Abbildung 1: Anatomie der Handwurzel.

S (Os scaphoideum), L (Os lunatum), TQ (Os triquetrum), P (Os pisiforme), T (Os trapezium), TD (Os trapezoideum), C (Os capitatum), H (Os hamatum), R (Radius), U (Ulna), MC I-V (Mittelhandknochen I-V), eigene Abbildung aus dem Bilderarchiv der Berufsgenossenschaftlichen Klinik (BG) Tübingen

Die proximale Handwurzelreihe wird auch als „Intercalated Segment“ bezeichnet. Im Gegensatz zur distalen Handwurzelreihe ist diese frei von Sehnen-Ansätzen. Zusammengehalten werden die Handwurzelknochen durch die intrinsischen Bänder, welche die proximalen Handwurzelknochen verbinden. Die Bewegung erfolgt passiv in Abhängigkeit von den artikulierenden Flächen der einzelnen Handwurzelknochen bzw. durch Restriktion der umliegenden Bänder, Muskeln und Sehnen [15, 19, 23].

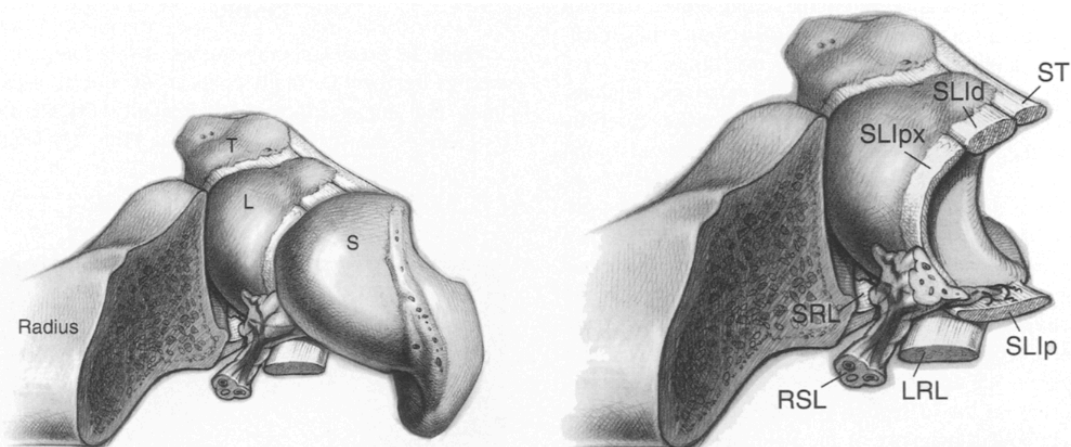
Die Morphologie des Os lunatum kann in zwei Typen unterteilt werden. Im Vergleich zum Os lunatum Typ I, besitzt das Os lunatum Typ II eine zusätzliche Gelenkfläche zum Os hamatum. Dies scheint auf die Kinematik und Pathophysiologie wichtige Auswirkungen zu haben. Zum einen konnte gezeigt werden, dass sich die Kinematik der Handwurzel während Radial-/Ulnarabduktion bzw. Extension/Flexion abhängig vom Lunatum-Typ grundlegend unterscheidet [24, 25]. Zum anderen konnte bei einem Lunatum-Typ II eine erhöhte Inzidenz von degenerativen Prozessen am Os hamatum und Os lunatum festgestellt werden [26, 27]. Ferner zeigte sich auch eine signifikant erniedrigte Inzidenz von dorsalen interkalierten Segmentinstabilitäten (DISI-Fehlstellung, siehe Kapitel 1.4.2.) trotz kompletter SL-Band-Ruptur, was wiederum die Annahme bestätigt, dass die Morphologie des Os lunatum in der Stabilisierung des Handgelenkes eine wichtige Rolle spielt [28].

Der Bandapparat des Handgelenkes besteht insgesamt aus 33 Bändern [29]. Diese können in extrinsische und intrinsische Bänder unterteilt werden [30]. Ihrem Aufgabenbereich unterliegt die Steuerung der komplexen Bewegungen, aber auch die Einschränkung exzessiver Bewegungen der Handwurzelknochen [31]. Die extrinsischen Bänder können grob in proximal (radiocarpal) und distal (carpometacarpal) unterteilt werden, während die intrinsischen Bänder in kurz, intermediär und lang unterteilt werden [30]. Die extrinsischen Bänder setzen zwischen den Handwurzelknochen und dem Radius bzw. den Mittelhandknochen an, während die intrinsischen Bänder innerhalb der Handwurzelknochen ansetzen [30].

### 1.1.1. Das SL-Band

Abbildung 2: Anatomie des SL-Bandes.

S (Os scaphoideum), L (Os lunatum), T (Os triquetrum), RSL (Ligamentum radioscapholunatum), LRL (langes Ligamentum radiolunatum), SRL (kurzes Ligamentum radiolunatum), SLIp (palmarer Anteil des SL-Bandes), SLIpx (proximaler Anteil des SL-Bandes), SLId (distaler Anteil des SL-Bandes), ST (Ligamentum scaphotriquetrum). Quelle: übernommen aus Berger, R.A., *The gross and histologic anatomy of the scapholunate interosseous ligament*. *J Hand Surg Am*, 1996. 21(2): p. 170-8 [32], mit Genehmigung von Elsevier.



Das SL-Band verbindet das Os scaphoideum mit dem Os lunatum und gehört zu einem der wichtigsten mechanischen Elemente der Handwurzel [33]. Das c- oder halbmondförmige Band gehört zu der Gruppe der intermediär intrinsischen Bänder und kann in einen dicken dorsalen, einen proximalen und einen dünnen palmaren Anteil unterteilt werden, welches den skapholunären Gelenkspalt von allen Seiten außer von der distalen verbindet [30, 32]. Der distale skapholunäre Gelenkspalt ist frei von ligamentären Verbindungen. Insgesamt kann das SL-Band bis zu 300 Newton (N) aushalten, bevor es reißt, und gehört somit zu den stärkeren Bändern des Handgelenkes [2]. Der straffe 3 mm dicke und 5 mm lange trapezförmige dorsale Anteil besteht aus kurzen transversalen Kollagenfasern und wird von perifaszikulärem lockerem Bindegewebe ummantelt, in welchem die Gefäß-Nervenbündel verlaufen [32]. Es kann aufgrund seiner histologischen

Eigenschaft Kräfte von bis zu 250 Newton standhalten und ist somit der stärkste Anteil des SL-Bandes [2]. Seine primäre Aufgabe liegt somit darin, übermäßige Bewegungen zu beschränken sowie Torsions- und Translationsstabilität zu bieten [15]. Der dorsale Anteil des SL-Bandes verläuft zwischen dem proximalen Os scaphoideum und dem dorsalen Os lunatum [32]. Distal fusioniert es mit dem Ligamentum scaphotriquetrum, haftet an der Kapsel des dorsalen radiocarpal-Gelenkes an, bis es proximal in den proximalen Anteil des SL-Bandes übergeht [32].

Der biegsame proximale Anteil des Bandes mit variabler Dicke ist von faserknorpeliger Beschaffenheit mit einigen longitudinalen, oberflächlich integrierten Kollagenfasern [32]. Vor allem das avaskuläre Zentrum des proximalen Anteils mit vertikal verlaufenden Kollagenfasern ist anfällig für Verletzungen bzw. degenerative Veränderungen besonders im Bereich des Os scaphoideum [32]. Aufgrund seiner histologischen Beschaffenheit gehört es mit einer Belastbarkeit von 25 N zum schwächsten Anteil des SL-Bandes und trägt somit nur wenig zur Limitation abnormer Bewegungen des Handgelenks bei [2, 15]. Richtung palmar fusioniert es in das Ligamentum radioscapulolunatum, einem neurovaskulären Stiel, welcher aus lockerem Bindegewebe besteht, den palmaren vom proximalen Anteil des SL-Bandes trennt und häufig dorsal zum palmaren SL-Band zieht [32].

Der dünne, etwa 1 mm breite palmare Anteil besteht aus dünnen, schräg verlaufenden Kollagenfasern [32]. Zwischen den Faszikeln verlaufen in longitudinaler Ausrichtung die Gefäßnervenbündel [32]. Es hält Kräfte von 125 N aus und liegt somit von der Belastbarkeit zwischen dem dorsalen und proximalen Anteil [2]. Es trägt auch wesentlich zur Rotationsstabilität des Handgelenks bei [15]. Durch den schrägen Verlauf des Bandes ist eine gute Beweglichkeit zwischen Os scaphoideum und Os lunatum gegeben [30]. Distal sind Verbindungen zwischen dem palmaren Anteil des SL-Bandes und dem Ligamentum radioscapulocapitatum möglich [32].

Auch bei der propriozeptiven Reizweiterleitung an die Muskulatur und somit Stabilisierung des Handgelenkes spielt das SL-Band eine wichtige Rolle [34, 35].

### 1.1.2. Das LT-Band

Das Ligamentum lunotriquetrum (LT-Band) verbindet das Os lunatum mit dem Os triquetrum. Es ist ein palmares Band und gehört zu der Gruppe der intermediären intrinsischen Bänder [30]. Es verläuft vom Os lunatum zur Basis der Gelenkfläche des Os pisiforme und Os triquetrum [30]. Auch dieses intrinsische Band ist stark und kann Kräften von bis zu 300 N standhalten. Allerdings ist hier die palmare Region am kräftigsten und hält Kräften von 250 N stand, gefolgt vom dorsalen Anteil welcher etwa 125 N aushalten kann [2]. Der proximale Anteil ist aufgrund seiner faserknorpeligen Beschaffenheit wie beim SL-Band das schwächste Glied und hält etwa 25 N stand [2].

### 1.1.3. Sekundäre Stabilisatoren und Propriozeption

Neben den intrinsischen Bändern sind zur Stabilisation und Beweglichkeit des Handgelenkes insbesondere auch die sekundären Stabilisatoren von außerordentlicher Bedeutung. Zu diesen gehören die extrinsischen Bänder, die Unterarmmuskeln mit ihren Sehnen sowie die sensorischen Eigenschaften der Bänder mit ihren neuromuskulären Reflexen [1, 31, 34, 36-39]. Vermutet wird, dass viele weitere sekundäre Stabilisatoren in der Stabilisierung des SL-Gelenkes involviert sein könnten, wobei nicht von jedem seine genaue Funktion bekannt ist [40].

Grob können die sekundären Stabilisator-Bänder in palmar, dorsal sowie distal unterteilt werden. So bilden am Handrücken das Ligamentum radiotriquetrum dorsale und das Ligamentum intercarpale dorsale eine V-förmige Struktur, welche durch Änderung der Länge des jeweiligen Anteils dieses V's das Os scaphoideum in allen Bewegungsrichtungen indirekt stabilisiert [36]. Beide setzen unter anderem auch am Os lunatum an, wodurch es durch diese ligamentäre

Verbindung stabilisiert wird [38]. Als sekundärer Stabilisator spielt es vor allem während repetitiver Handgelenksbewegungen eine wichtige Rolle [1].

Palmar auf radialer Seite bilden das Ligamentum radioscapholunatum, das Ligamentum radioscaphocapitatum sowie das lange und kurze Ligamentum radiolunatum den palmaren radiocarpalen Bänder-Komplex [31]. Das Ligamentum radioscapholunatum besteht aus locker organisiertem kollagenem Bindegewebe mit hoher Vaskularisation [37], welches den palmaren Anteil des SL-Bandes mit den terminalen Fasern des Nervus (N.) interosseus anterior speist [32]. Gleichzeitig stabilisiert es das Os scaphoideum, indem es die Rotation des proximalen Pols des Os scaphoideum nach dorsal verhindert [37]. Das Ligamentum radioscaphocapitatum und das Ligamentum scaphotrapeziotrapezoideum stabilisieren die Flexions- sowie Pronationstendenz des Os scaphoideum während der Bewegung des Handgelenks [34, 39].

Palmar auf ulnarer Seite stabilisiert das Ligamentum ulnotriquetrum sowie Ligamentum ulnolunatum das lunotriquetrale Gelenk [15]. Das Ligamentum scaphotrapezium stabilisiert das Os scaphoideum von distal [39].

Neben den genannten mechanischen Eigenschaften der Bänder in Bezug auf die kinetische Stabilisierung unseres Handgelenks sind auch die sensorischen Eigenschaften von großer Bedeutung [2, 34].

Die Innervation der Handgelenksbänder unterscheiden sich untereinander stark. Das SL-Band zählt hier zu den stärker innervierten Bändern [41]. Innerviert wird dieses durch die Endäste des N. interosseus anterior (aus dem Ligamentum radioscapholunatum) und posterior [34]. Histologisch konnten sowohl Ruffini- als auch Vater-Pacini-Körperchen sowie freie Nervenenden nachgewiesen werden [41]. Diese Propriozeptoren können mechanische Signale in propriozeptive Informationen umwandeln, über afferente Fasern in das zentrale Nervensystem leiten und von dort über das efferente sensomotorische System die Unterarmmuskula-

tur aktivieren bzw. auch inhibieren und somit die Bänder während exzessiver Bewegungen schützen bzw. das Handgelenk stabilisieren [34, 41-44]. Diese gelenkschützenden Reflexe laufen innerhalb von 20 Millisekunden (ms) ab, was auf die monosynaptische Reizweiterleitung zurückzuführen ist [42].

Allgemein können die Nerven, welche das Handgelenk innervieren, in dorsal und palmar untergliedert werden. Der N. interosseus posterior, der N. cutaneus antebrachii lateralis, der Ramus (R.) superficialis des N. radialis, der R. dorsalis des N. ulnaris sowie perforierende Äste des N. ulnaris versorgen das dorsale Handgelenk. Der N. interosseus anterior, der R. cutaneus palmaris des N. medianus, der R. profundus sowie der Hauptstamm des N. ulnaris versorgen das palmare Handgelenk [2, 44].

Die Muskeln bzw. Sehnen, welche zur Stabilität des Handgelenks beitragen, werden in zwei Muskelgruppen unterteilt: Die midcarpalen Pronatoren, bestehend aus Musculus extensor carpi radialis longus und Musculus flexor carpi radialis sowie die midcarpalen Supinatoren, bestehend aus Musculus flexor carpi ulnaris, Musculus extensor carpi radialis longus und Musculus abductor pollicis longus. Allgemein tendieren die Supinatoren dazu den SL-Spalt zu schließen und am Os scaphoideum ein Supinations-Drehmoment zu bewirken, welches der natürlichen Bewegung des Os scaphoideum in Flexion und Pronation entgegenwirkt. Die Pronatoren tendieren stattdessen dazu den SL-Spalt zu öffnen und so eine SL-Instabilität zu verstärken [43]. Die Balance zwischen diesem System aus Agonist und Antagonist scheint eine Rolle insbesondere für die dynamische Stabilität des Handgelenks zu spielen [43]. Eine besondere Stellung in der Protektion des SL-Bandes scheint die Extensor carpi ulnaris Sehne zu haben. Während der Ulnarabduktion ist das SL-Band maximal gestreckt und somit sehr vulnerabel. Während aller Handgelenksbewegungen ist dies die einzige Position, in der die Extensor carpi ulnaris Sehne aktiv maximal inhibiert ist und dadurch das SL-Band schützt [42]. Diese Schutzreaktion wird durch den N. interosseus posterior vermittelt und fällt bei Ausfall desselbigen komplett weg [45]. Im Übrigen ist der Mus-

culus extensor carpi ulnaris in Kontraktion eigentlich ein den SL-Spalt erweiternder Muskel, indem er die distale karpale Reihe zusammen mit dem Os scaphoideum und dem Os triquetrum in Pronation kippt [34, 42, 46].

## **1.2. Kinetik und Kinematik des Handgelenks**

Das Handgelenk setzt sich aus den folgenden Komponenten zusammen: Dem Articulatio radioulnaris distalis, das zwischen dem distalen Radius und der distalen Ulna verläuft, dem Articulatio radiocarpalis, das zwischen Radius und der proximalen Handwurzelreihe situiert ist sowie dem Articulatio mediocarpalis, das sich wiederum zwischen proximaler und distaler Handwurzelreihe hinzieht. Zu den Bewegungen des Handgelenks gehören die Extension und Flexion sowie Radialabduktion und Ulnarabduktion, aus welchen sich das Handkreisen, also die Zirkumduktion, zusammensetzt [47]. Das Zentrum dieser zwei Bewegungen befindet sich über einer festen Achse innerhalb des Kopfes des Os capitatum [48, 49]. Des weiteren sind Rotationsbewegungen mit Supination und Pronation möglich, wobei hier die Radioulnargelenke sowie das Glenohumeralgelenk ebenfalls eine Rolle spielen [50].

Mehrere Theorien zur Kinematik bzw. Beziehung der Handwurzelknochen zueinander sind etabliert. Lichtman et al. beschreiben die Handwurzel als einen ovalen Ring mit zwei mobilen Verbindungen, dem Articulatio hamatotriquetrum sowie dem Articulatio scaphotrapezotrapezoideum, welche entgegengesetzte Bewegungen zwischen distaler und proximaler Reihe der Handwurzelknochen während der Radial-/Ulnarabduktion erlauben [23]. Taleisnik unterteilt dagegen die Handwurzel in drei Säulen: Eine zentrale Flexion-Extensionssäule, welche aus der distalen Reihe und dem Os lunatum besteht, eine mobile laterale Säule, welche das Os scaphoideum mit einschließt, sowie eine mediale Rotationssäule, bestehend aus dem Os triquetrum [30].

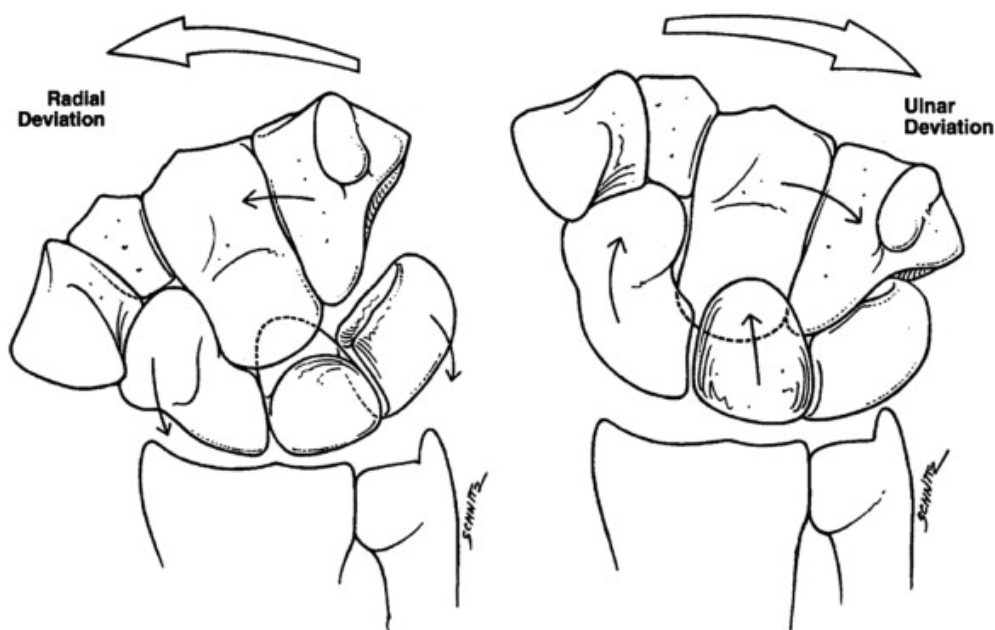
Allgemein gilt, dass Os scaphoideum, Os lunatum und Os triquetrum gemeinsam als „Intercalated Segment“ in Flexion/Extension rotieren. Die distale karpale



Reihe hat feste intercarpale ligamentäre Verbindungen, weshalb Bewegungen untereinander vernachlässigt werden können. Sie bewegen sich als Antwort auf muskulotendinöse Kräfte des Unterarms [15].

Abbildung 3: Kinetik der karpalen Reihen während Radial-/Ulnarabduktion.

Übernommen aus Wolfe, S.W., Scapholunate instability. *Journal of the American Society for Surgery of the Hand*, 2001. 1(1): p. 45-60. [16] mit Genehmigung von Elsevier



Das Os scaphoideum und das Os lunatum rotieren dank ihrer starken Verbindung durch das SL-Band immer zusammen, bei Radialabduktion in Flexion und bei Ulnarabduktion in Extension [51]. Das Os triquetrum gleitet über eine schraubenartige Bewegung, bedingt durch das helikoide Gelenk, zwischen dem Os hamatum in eine proximale bzw. distale Position und neigt sich Richtung palmar bzw. dorsal [51]. So entstehen hier am Os lunatum zwei entgegengesetzte Kräfte, welche sich bei intaktem Bandsystem ausgleichen [34].

In Flexion rotiert das Os scaphoideum am distalen Pol durch den Druck des Os trapezium und trapezoideum nach palmar (Flexion), während es in Extension am

distalen Pol Richtung dorsal (Extension) gleitet [51]. Aufgrund ihrer intrinsischen Verbindung folgt das Os lunatum sowie das Os triquetrum passiv den Bewegungsrichtungen des Os scaphoideum [51]. Die distale karpale Reihe wandert im Gegensatz zu den Bewegungen in der sagittalen Ebene während Flexion synchron mit der proximalen Reihe nach palmar und während Extension nach dorsal [23].

Die „dart thrower's motion“ oder Pfeilwurfbewegung ist eine Kombinationsbewegung von einer Radial-Extension in eine Ulnar-Flexion [47, 52]. Während dieser Bewegungsabfolge ist das SL-Gelenk stabil. Zwischen Os scaphoideum, Os lunatum und Radius gibt es fast keine Bewegung und das SL-Band wird minimal gespannt [47, 53-55]. Diese für den Menschen spezifische Bewegungskombination wird bei den meisten alltäglichen Aufgaben verwendet [47, 52]. Insbesondere in der physiotherapeutischen Beübung nach Handgelenksverletzung wird sich dies zur Schonung des SL-Bandes zu Nutzen gemacht [15, 54].

### **1.3. Karpale Instabilität – CID/CIND**

Garcia-Elias postulierte als modifizierte Definition der karpalen Instabilität eine Kombination aus symptomatischer Dysfunktion, der Unfähigkeit der Handwurzel, Gewicht auszuhalten, sowie eine abnormale Kinematik während der Bewegungsabläufe [56].

Allgemein können die karpalen Instabilitäten in nicht-dissoziativ und dissoziativ aufgeteilt werden. Bei den nicht-dissoziativen Instabilitäten (CIND) liegt die karpale Instabilität radiocarpal oder midcarpal vor, während die Kontinuität der proximalen sowie distalen Reihe erhalten bleibt [57]. Hervorgerufen wird diese beispielsweise durch hyperlaxe extrinsische Bänder, eine Verletzung der extrinsischen Bänder oder eine pathologische Radiusgelenkfläche [57-59].

Bei den dissoziativen (CID) liegt die Instabilität innerhalb der proximalen oder distalen Reihe und zeigt sich als pathologische Ausrichtung innerhalb bzw. zwischen den karpalen Knochen [57]. Ursachen hierfür sind beispielsweise eine Verletzung intrinsischer Bänder mit resultierender skapholunärer- oder lunotriquetraler Dissoziation, aber auch Skaphoidfrakturen [57, 58].

„Carpal instability combined“ oder „Carpal instability complex“ (CIC) setzt sich aus CID und CIND zusammen und wird definiert über die Instabilität sowohl innerhalb als auch zwischen den karpalen Reihen. Oft entwickeln sich CID/CIND in CIC [57].

## **1.4. SL-Band Verletzungen**

### **1.4.1. Pathogenese und Inzidenz**

Häufige Ursache für direkte Verletzungen des SL-Bandes sind Extensionstraumata im Rahmen von Stürzen auf das Handgelenk. Aber auch bei intraartikulären distalen Radiusfrakturen oder Skaphoidfrakturen sollte eine begleitende SL-Band Verletzung ausgeschlossen werden [5, 10, 11, 13, 60]. Die genaue Inzidenz von SL-Band Verletzungen ist nicht bekannt, da diese häufig übersehen werden oder als Begleitverletzungen im Rahmen von eben genannten Frakturen vorkommen [7, 10-14]. Die Inzidenzen variieren in der Literatur und liegen bei 14-75 % [5-9]. Weitere Ursachen sind u.a. Gicht, Chondrokalzinose und allgemein rheumatologische Erkrankungen [10]. Auch ein hyperlaxer Bandapparat kann zu Beschwerden bzw. zu einer Hypermobilität des Gelenkes führen und trägt zur Entstehung von Bänderrissen bzw. einer dorsalen/ palmaren interkalierten Segmentinstabilität (DISI/PISI-Fehlstellungen) im Handgelenk bei [23, 61]. So kann es zunächst zu einer Teilruptur oder Elongation des schwächeren Anteils des Bandes kommen und später infolgedessen zu einer kompletten Ruptur des ausgedehnten Bandes [60, 62]. Das SL-Band kann bis zu 200 % ausgedehnt werden, bevor es reißt [3]. In welchem Bereich das Band reißt kann nach Garcia-Elias eingeteilt werden. Laterale Avulsionsausrisse im Bereich des Os scaphoideum, so genannte Typ I Verletzungen, kommen mit 42 % am häufigsten vor, gefolgt von Typ

IV Verletzungen mit 22 %, bei welchen es zur Partialruptur und Elongation des SL-Bandes kommt. In 20 % der Fälle kommt es zu Typ III Verletzungen mit mittleren Rupturen des SL-Bandes sowie in 16 % der Fälle zu Typ II Verletzungen mit Avulsionsausrissen im Bereich des Os lunatum [4].

#### 1.4.2. Pathomechanik

Bei der skapholunären Instabilität handelt es sich um eine dissoziative Gefügestörung der proximalen Handwurzelreihe. Kommt es zur einer SL-Band Verletzung, fehlt die feste Verbindung zwischen Os scaphoideum und Os lunatum und resultierend daraus rotieren die beiden Knochen aufgrund ihrer Eigenbewegung in entgegengesetzten Richtungen [10]. Dies kann zu einer CID-DISI-Fehlstellung (Carpal instability dissociative – Dorsal intercalated segment instability) führen [57, 63]. Folglich rotiert das Os scaphoideum in Flexion, bedingt durch den Druck am distalen Pol durch das Os trapezium und trapezoideum [43, 63]. Das Os lunatum rotiert aufgrund der anatomischen Gegebenheit der Gelenkfläche von Radius und Os lunatum, zusammen mit dem Os triquetrum in Extension nach palmar. Dies geschieht zum einen durch den Druck des Os capitatus auf den dorsalen Pol des Os lunatum und zum anderen aufgrund der straffen Verbindung durch das LT-Band, [19, 57, 63]. Das Os capitatum wandert nach proximal [19]. Aufgrund dessen zeigt sich der SL-Winkel in der seitlichen Projektion sowie der SL-Spalt in der anterior-posterior (a.-p.)-Projektion erweitert [57, 64] (Kapitel 1.6.2.).

Dies unterscheidet sich zur CIND – DISI (Carpal Instability non Dissociative – Dorsal intercalated segment instability), bei welcher die intrinsischen Bänder intakt bleiben, die karpale Instabilität radiocarpal oder midcarpal besteht und somit der SL-Winkel normwertig verbleibt [57].

Die komplette Ruptur des SL-Bandes wird auch Rotationssubluxation genannt [65]. Allerdings ist ein alleiniges Reißen des SL-Bandes nicht ausreichend für eine Rotation des Os scaphoideum in Subluxation [66]. Vielmehr spielen hier

auch Verletzungen weiterer Bänder wie des Ligamentum scaphotrapeziotrapezoideum sowie des Ligamentum radiocarpale palmare eine Rolle [19, 66, 67].

Aufgrund der pathologischen Artikulation durch die DISI-Fehlstellung kommt es im Laufe der Zeit zu Abnutzungserscheinungen, welche unter dem Begriff SLAC-Wrist zusammengefasst werden. „Nach Lichtman (1997) wird der Karpus funktionell als ein unter Spannung stehender Ring betrachtet“ [23, 60]. Somit führt das Umpositionieren der karpalen Knochen zu einem Verlust der Spannung und zu einem kompletten Kollaps des Gefüges [60, 68]. Dadurch artikulieren die karpalen Knochen nicht mehr reibungslos [63, 68].

Die SLAC-Wrist ist die maximal Variante der skapholunären Instabilität [10]. Nach Watson und Ballet folgt die Arthrose des Handgelenkes einem konstanten Schema in Reihenfolge und Progress [68].

*Abbildung 4: Bild einer Fortgeschrittene SLAC-Wrist Grad III.*

*Eigene Abbildung aus dem Bilderarchiv der BG-Klinik Tübingen*



Die SLAC-Wrist Grad I beginnt mit der Arthrose im Processus Styloideus radii [68]. Bedingt ist dies u.a. durch die abnorme Bewegung des Os scaphoideum bei SL-Band Verletzungen. Bei einer SL-Ruptur bewegt sich das Os scaphoideum Richtung Processus Styloideus radii, während sich die Position des Os lunatum kaum ändert. Dies vergrößert den Abstand zwischen den beiden karpalen Knochen [69, 70].

Das Fortschreiten auf die distale Radiusgelenkfläche und Fossa scaphoidei definiert Grad II [68]. Dank der elliptischen Form zwischen Radius und Os scaphoideum ist diese Stelle besonders anfällig für degenerative Prozesse, während das Gelenk zwischen Radius und Os lunatum wegen seiner kugelförmigen Form selten betroffen ist [68].

Neben dem Druck des Os capitatum auf den dorsalen Pol des Os lunatum gleitet dies auch aufgrund des vergrößerten Abstandes zwischen Os lunatum und Os scaphoideum nach proximal. Die Arthrose greift auch auf das Mediokarpal-Gelenk über, welches Stadium 3 definiert [10, 68].

*Tabelle 1: SLAC-Wrist Stadien nach Watson und Ballet [68].*

|     |   |
|-----|---|
| I   | Arthrose Processus Styloideus radii                               |
| II  | I + Arthrose der distalen Radiusgelenkfläche und Fossa scaphoidei |
| III | II + Arthrose Mediokarpal-Gelenk                                  |

#### 1.4.3. Definition und Klassifikation – SL-Band-Instabilität

Im Laufe der Geschichte lassen sich verschiedene Definitionen in Bezug auf SL-Band Rupturen finden.

Die ursprüngliche Definition nach Linscheid klassifizierte die sogenannte skapho-lunäre-Insuffizienz durch eine abnorme Ausrichtung des Os scaphoideum und Os lunatum mittels Röntgenbildern [71] nach Merkmalen, welche der statischen

skapholunären Dissoziation (SLD) zugeordnet werden kann [72]. Einige skapholunäre-Insuffizienzen zeigen sich allerdings nur während bestimmter Bewegungen und werden als dynamische skapholunäre-Dissoziation bezeichnet [61, 72].

Heutzutage wird der Begriff der sogenannten skapholunären Instabilität (SLI) verwendet. Dieser definiert sich über eine belastungsabhängige Symptomatik im Bereich des Handgelenkes sowie eine pathologische Kinematik der karpalen Knochen im Rahmen von Bewegungen [56]. Ursächlich hierfür sind Pathologien im Bereich des SL-Bandes. Sie gehören zu den häufigsten Ursachen einer CID [10, 15, 61, 73].

Das alleinige Reißen des SL-Bandes reicht jedoch nicht aus, um das Vollbild der karpalen Instabilität herbeizuführen. Vielmehr spielen auch die extrinsischen Bänder eine entscheidende Rolle in der Stabilisierung des Handgelenkes [1, 19, 39, 74, 75]. Aus diesem Grund sollte man von einer „Scapholunate ligament complex lesion“ sprechen [75].

Einige skapholunären Insuffizienzen zeigen sich nur während bestimmter Bewegungen und werden als dynamische SLD's bezeichnet [61, 72]. a [38]. Erst das Reißen dieser Bänder führt zur statischen Instabilität und zum karpalen Kollaps (DISI) [38]. Trotzdem ist die Wichtigkeit des SL-Bandes als primärer Stabilisator nicht zu vernachlässigen, dessen Rolle die sekundären Stabilisatoren nicht übernehmen können [1]. Allerdings führt das alleinige Reißen der sekundären Stabilisatoren nicht zur Änderung der skapholunären-Kinematik [1].

Skapholunäre-Instabilitäten können in fünf Stadien unterteilt werden. Diese beinhalten eine Korrelation zwischen Schweregrad der Verletzung und dem radiologischen Befund [15, 16]. Eine partielle Ruptur des SL-Bandes ohne Fehlstellungen wird als okkultes Stadium bezeichnet. Röntgen-Bilder zeigen dementsprechend noch keine Auffälligkeiten, während die Patienten über belastungsabhängige Symptome klagen können [15, 16].

Im zweiten Stadium, den dynamischen SL-Instabilitäten, kann das SL-Band teilweise oder komplett durchtrennt sein. Zusätzlich können die palmaren Extensoren geschädigt sein. Während die statischen Aufnahmen normal ausfallen können, zeigen die Funktionsaufnahmen meist radiologische Auffälligkeiten [15, 16].

Eine komplette Ruptur des SL-Bandes mit Einbeziehung der palmaren oder dorsalen Extensoren definiert das dritte Stadium, die skapholunäre Dissoziation bzw. statische Instabilität [15]. Aufgrund der Flexion des Os scaphoideum [57, 63] sowie der Extension des Os lunatum nach palmar [19, 57, 63] zeigt sich der SL-Spalt in der a.-p.-Projektion erweitert [57, 64]. Hier sind sowohl die statischen als auch die Funktionsaufnahmen pathologisch mit einem SL-Abstand  $\geq 3$  mm, sowie einem SL-Winkel  $\geq 60$  Grad (Kapitel 1.6.2.) [15, 16].

Sukzessive entwickelt sich eine DISI-Fehlstellung, welche aufgrund sekundärer Veränderungen in den Bereichen des Ligamentum radiolunatum, Ligamentum scaphotrapezotrapezoideum sowie Ligamentum radiocarpale dorsale permanent verbleibt. Dies definiert Stadium vier. Klassische Anomalien einer DISI-Fehlstellung werden bereits in den statischen Röntgenaufnahmen sichtbar, mit einem SL-Winkel  $\geq 60$  Grad, RL-Winkel  $\geq 15$  Grad, Capitatlunären-Winkel (CL-Winkel)  $\geq 15$  Grad, sowie einem SL-Abstand  $\geq 3$  mm (Kapitel 1.6.2.) [15, 16].

Die SLAC-Wrist ist das Endstadium der skapholunären Instabilität. Die sekundären degenerativen Veränderungen innerhalb des Handgelenkes folgen aufgrund der pathologischen Kinematik den im Kapitel 1.4.2. beschriebenen Mustern [15, 16].



Tabelle 2: Stadien der SL-Instabilität nach Wolfe [16].

|                          | I. Okkulte                          | II. Dynamische   | III. SL Dissoziation  | IV. DISI  | V. SLAC   |
|--------------------------|-------------------------------------|--|---|---|---|
| <b>Verletztes Band</b>   | partielle SL-Band-Ruptur            | inkomplette SL-Band-Ruptur, partielle Beteiligung der volaren extrinsischen Bänder | komplette SL-Band-Ruptur mit Beteiligung der volaren oder dorsalen extrinsischen Bänder | komplette SL-Band-Ruptur; sekundäre Veränderungen in LRL-, LST-, DIC-Band                                     | gleich zu Stadium IV  |
| <b>Röntgen</b>           | unauffällig                         | normalerweise unauffällig  | SL-Abstand $\geq 3$ mm;<br>RS Winkel $\geq 60^\circ$                                    | SL-Winkel $\geq 70^\circ$<br>SL-Abstand $\geq 3$ mm<br>RL-Winkel $\geq 15^\circ$<br>CL-Winkel $\geq 15^\circ$ | I. Arthrose Styloid<br>II. Arthrose RS<br>III. Arthrose CL<br>IV. Pankarpale Arthrose |
| <b>Funktionsaufnahme</b> | Unauffällig, abnormale Fluoroskopie | pathologisch   | offensichtlich pathologisch   | unnötig   | unnötig   |
| <b>Behandlung</b>        | Transfixation oder Kapsulodese      | SL-Band Rekonstruktion mit Kapsulodese   | SL-Band Rekonstruktion mit Kapsulodese vs. triligamentäre Tenodese                      | Reponibel: triligamentäre Tenodese, Nicht reponibel: interkarpale Fusion                                      | interkarpale Fusion oder Karpektomie der proximalen Reihe                             |

CL (capitolunär), RL (radiolunatum), RS (radioscaphoid), SL (scapholunatum), ST (scaphotrapezoideum), LRL (Ligamentum radiolunatum), LST (Ligamentum scaphotriquetrum), DIC (Ligamentum intercarpale dorsale)

## 1.5. LT-Band Verletzungen

Lunotriquetrale Dissoziationen (LTD) entstehen durch eine Verletzung des LT-Bandes, welche das Os lunatum und das Os triquetrum verbinden. Sie zählen auch zu den oben erwähnten CID – Carpal instability dissociative – und gehören zu den zweithäufigsten Ursachen für diese nach der SLD [61]. LT-Bandverletzungen entstehen durch Sturz auf das überstreckte Handgelenk, also Extension, Radialabduktion und gleichzeitig Pronation [73, 76]. Das Os pisiforme erzeugt durch seine prominente Lage eine hohe Krafteinwirkung gegen das Os triquetrum, welches zu einer Verletzung des LT-Bandes und in Folge dessen zu ulnarseitigen Schmerzen führen kann [63]. Entgegengesetzt der SLD rotiert hier das Os triquetrum bei Ruptur des LT-Bandes in Extension und das durch das SL-Band verbundene Os lunatum und Os scaphoideum in Palmar-Flexion in Bezug auf den Radius [57, 63]. Zusätzlich kann das Os capitatum in Extension rotieren in Bezug auf das Os lunatum [57]. Dadurch entsteht eine volare- bzw. palmare interkalierte Segmentinstabilität (VISI bzw. PISI) [57, 63, 73].

Klinisch kann der Ballotement-Test geprüft werden. Dabei fixiert der Untersucher das Os lunatum und das Os triquetrum und versucht, beide gegeneinander zu verschieben. Wenn es dabei stark verschieblich ist, es zu Schmerzen oder einem Klick-Phänomen kommt, kann dies Hinweis auf eine LT-Band Läsionen geben [77]. In der Bildgebung können ein vergrößerter Lunotriquetrale-Abstand oder ein gestörtes Alignment der Gilula-Linien hinweisend auf eine LTD sein [63].

## 1.6. Diagnostik

Insgesamt sollte die Diagnostik und Untersuchung des Handgelenkes immer im Seitenvergleich geschehen [65]. Neben der Anamnese, insbesondere im Hinblick auf den Unfallmechanismus und die klinische Untersuchung, stehen diverse radiologische bildgebende Verfahren sowie die Arthroskopie zur Verfügung.

### 1.6.1. Anamnese/ Klinische Diagnostik

Insbesondere die Anamnese bzgl. Unfallhergang und Schmerzsymptomatik können initial zur groben Einordnung hilfreich sein. Neben Verdrehtraumen oder Stürzen auf das extendierte Handgelenk können SL-Band Läsionen als Begleitverletzungen in Rahmen von beispielsweise distalen Radiusfrakturen oder Skaphoidfrakturen vorkommen [5, 10, 11, 13, 60].

Klinisch kann dies zur Schwellung sowie Druckschmerzen im Bereich des Os scaphoideum bzw. dorsalseitig zwischen Os scaphoideum und Os lunatum führen [10, 15]. Zusätzlich kann es zu Klickgeräuschen und Schnappen während Bewegungen sowie Kraftverlust, Instabilitätsgefühl und Bewegungseinschränkung des Handgelenkes kommen [15, 19, 21].

Des Weiteren kann der Watson Test wegweisend für die Diagnostik sein. Der Untersucher fixiert mit dem Daumen den proximalen Pol des Os scaphoideum und bringt mit der anderen Hand das Handgelenk aus Ulnar-Extension in Radial-Flexion. Eine SL-Band Läsion führt zur Subluxation des Os scaphoideum über den dorsalen Radiusrand des distalen Radius durch den Druck von außen [10, 63]. Dies kann sich durch ein schmerzhaftes Schnappen bemerkbar machen. Der Test ist dann positiv und kann Hinweis auf eine SL-Band Läsion geben [10, 63]. Aufgrund von Bänder-Hyperlaxität kann der Test in bis zu etwa 1/3 der Fälle falsch positiv ausfallen [78].

### 1.6.2. Röntgen

Bei Verdacht auf eine Verletzung der SL-Bandes können neben den statischen Röntgenaufnahmen in zwei Ebenen (a.-p. sowie lateral) auch dynamische Funktions- oder Stress-Aufnahmen erstellt werden. Es werden mehrere verschiedene Funktionsaufnahmen in der Literatur beschrieben, beispielsweise a.-p.-Aufnahmen bei Faustschluss in Radial-/Ulnarabduktion, a.-p.-Aufnahmen unter Zug des

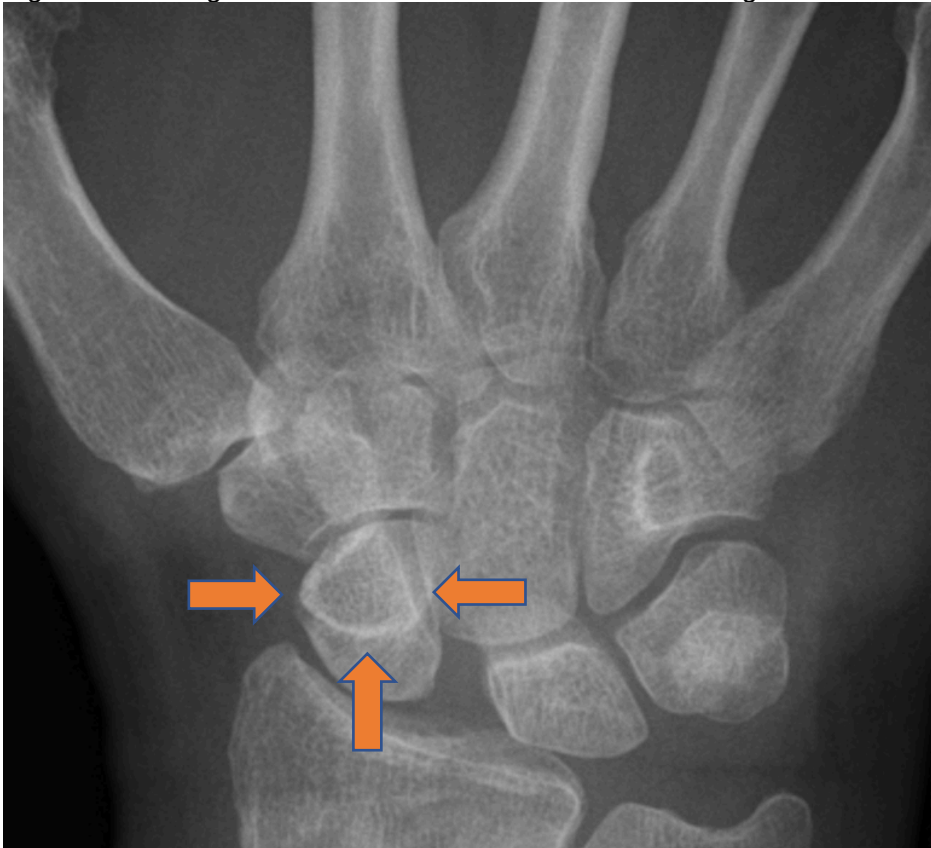
Daumens oder die sogenannte „clenched pencil view“ [79]. Einen Standard hierfür gibt es nicht, jedoch konnte gezeigt werden, dass die „clenched pencil view“, eine Aufnahme beider Hände im Pronation während sie einen Stift umgreifen, sowie die Aufnahmen bei Faustschluss in 30 Grad Ulnarabduktion zur größten SL-Spalt Verbreitung bei SL-Instabilitäten führen [79]. Während okkulte Instabilitäten, also Teilrupturen des SL-Bandes, weder auf statischen Röntgenaufnahmen noch auf Funktionsaufnahmen sichtbar sind, können dynamische Instabilitäten Grad II durch Funktionsaufnahmen sichtbar gemacht werden [15, 16]. Die forcierte Ulnarabduktion führt zur Erweiterung des SL-Spalt [19]. Des Weiteren wird durch den Faustschluss zusätzlich Kraft durch den Kopf des Os capitatum auf die SL-Verbindung ausgeübt und eine eventuell vorhandene SL-Instabilität kann sichtbar gemacht werden [19, 65].

Kommt es zusätzlich zur Verletzung extrinsischer Bänder, liegt eine SL-Instabilität Grad III vor, welche zu den statischen Instabilitäten gehört. Diese können durch Erweiterung des SL-Spalt bereits auf klassischen a.-p.-Aufnahmen auffällig werden [16]. Die Erweiterung des SL-Spalt wird in der englischen Literatur auch als „Terry Thomas Zeichen“ bezeichnet [63]. Je nach Quelle werden hier Werte zwischen zwei bis fünf mm als pathologisch genannt [15, 18-22]. Der Abstand sollte in der Mitte zwischen den Gelenkrändern des Os scaphoideum und Os lunatum gemessen werden [18].

Darüber hinaus kann es zu einem sogenannten Ringzeichen (englisch Signet Ring Sign) kommen. Dieses entsteht durch Flexion des Os scaphoideum, wodurch sich der distale Pol des Os scaphoideum auf die Taille des Os scaphoideum projiziert und das Scaphoid insgesamt verkürzt wirkt. Ab einem Abstand von  $< 7$  mm zwischen Ringanteil im Bereich der Taille und proximalem Os scaphoideum spricht man von einem positiven Ringzeichen [57].

Abbildung 5: Positives Ringzeichen bei SL-Spalt Verbreiterung.

Eigene Abbildung aus dem Bilderarchiv der BG-Klinik Tübingen

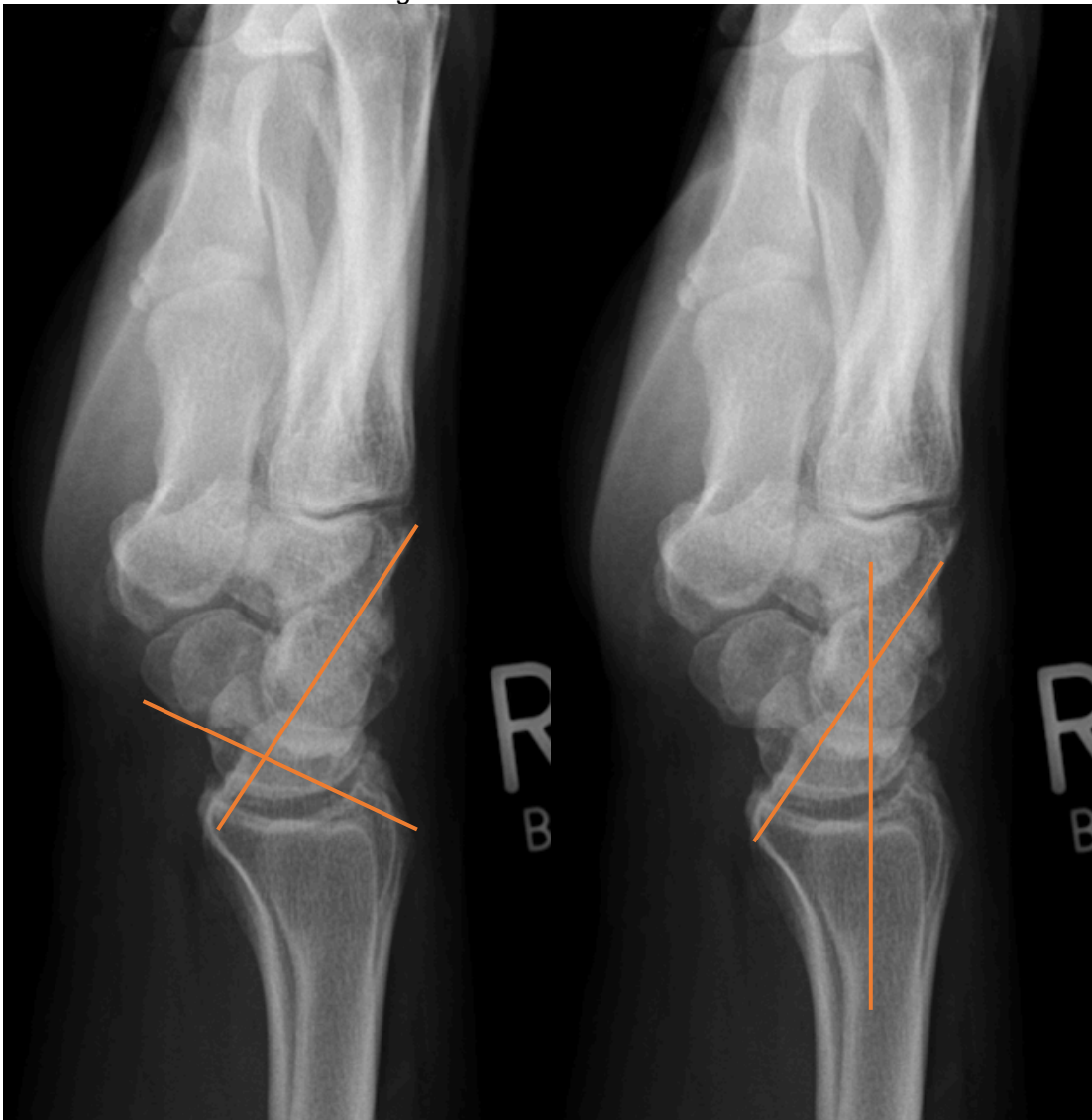


Kommt es im weiteren Verlauf zur einer DISI-Fehlstellung, können neben dem erweiterten SL-Abstand in der a.-p.- Aufnahme auch pathologische Winkel in der lateralen Aufnahme beobachtet werden. Bei den lateralen Aufnahmen sollte der dritte Mittelhandknochen, das Os capitatum sowie der Radius in etwa in einer Linie stehen [15]. Der SL-Winkel wird gebildet durch die Achsen des Os scaphoideum und Os lunatum. Für das Os scaphoideum ist dies die Verbindungslinie zwischen den palmaren Facetten, also dem proximalen und distalen Pol des Os scaphoideum [19, 80]. Bildet man ein 90-Grad-Lot zur Verbindungslinie zwischen den Tuberkeln des Os lunatum, entsteht die Achse des Os lunatum [80]. Der durchschnittliche Winkel liegt normalerweise zwischen 30-60 Grad. Ein Winkel  $> 70$  Grad kann auf eine karpale Instabilität hindeuten [19, 63, 81]. Ein RL- oder CL-Winkel  $\geq 15$  Grad kann hinweisend auf eine DISI-Fehlstellung sein [15]. Der RL-Winkel wird gebildet durch ein 90-Grad-Lot zur Verbindungslinie zwischen den Tuberkeln des Os lunatum und der Achse mittig entlang der Diaphyse

des Radius bzw. im Falle des CL-Winkels durch eine Achse durch die Spitze der Konvexität des Os capitatum [80].

*Abbildung 6: Bild einer DISI-Fehlstellung.*

*SL-Winkel ca. 95 Grad (links), RL-Winkel ca. 20 Grad (rechts). Eigene Abbildung aus dem Bilderarchiv der BG-Klinik Tübingen*



*Abbildung 7: Beispiel der Zunahme einer SL-Spalt-Erweiterung.*

*Von 2,2 mm auf 3 mm bei Ulnarabduktion (links) im Vergleich zur a.-p.-Aufnahme (rechts), eigene Abbildung aus dem Bilderarchiv der BG-Klinik Tübingen*



Auch die Gilula Linien in der a.-p.-Aufnahme müssen beurteilt werden. Diese sind drei gedachte karpale Bögen, welche entlang der Oberflächen proximal und distal der proximalen Handwurzelreihe verlaufen (Os scaphoideum, Os lunatum, Os triquetrum) sowie entlang der Oberfläche proximal der distalen Handwurzelreihe (Os capitatum, Os hamatum) [57, 82]. Brüche/Unebenheiten entlang dieser Bögen können Hinweise auf Pathologien im Handgelenk geben [57, 82].

Im finalen Stadium der SL-Instabilität der SLAC-Wrist können typische radiologische Zeichen einer Arthrose mit Gelenkspaltverschmälerung, osteophytären Randbauten, subchondraler Sklerosierung sowie Pseudozysten-Bildung beobachtet werden [68].

### 1.6.3. Weitere Bildgebung

Die Kinematographie sind röntgenologische Bildsequenzen, welche eine abnormale Kinematik der Handwurzelknochen während der Durchbewegung des Handgelenkes darstellen können und somit indirekt Hinweise auf eine SL-Band Schädigung geben können [73]. Somit ist diese Untersuchungstechnik insbesondere hilfreich, um die dynamischen Formen der SL-Instabilitäten zu identifizieren [10].

Zur direkten Darstellung der anatomischen Verhältnisse der SL-Band Läsion eignet sich die Arthrographie. Bei der Drei-Kompartiment-Arthrographie wird Kontrastmittel radiocarpal, intercarpal sowie im distalen Radioulnargelenk injiziert [83]. Nach intraartikulärer Injektion von Kontrastmittel kann unter radiologischer Kontrolle beobachtet werden, ob es jeweils zu einem Kontrastmittelübertritt zwischen den normalerweise sonst separaten Kompartimenten kommt [83]. Falls es zu einem Kontrastmittelübertritt zwischen dem radiocarpalen und intercarpalen Kompartiment kommt, kann dies hinweisend auf eine SL-Band Läsion sein [83]. Limitierend in der Arthrographie ist die Aussage in Hinsicht auf eine Teil bzw. Komplettruptur sowie den Anteil des beschädigten SL-Bandes. So kann nicht zwischen dem krafttragenden dorsalen bzw. palmaren Anteil und dem faserknorpeligen proximalen Anteil unterschieden werden. Aus diesem Grund sollte bei Verdacht auf eine SL-Band Läsion die Untersuchung mit einem MRT oder einer Computertomographie (CT) des Handgelenkes verbunden werden [10, 51, 84].

Bei der MRT-Arthrographie wird durch das intraartikulär appliziertem Kontrastmittel verursachte Gelenkdistension sowie dem verbessertem Umgebungskontrast SL-Band Schäden detaillierter dargestellt [84]. Im Vergleich zur Arthroskopie können mit dieser Untersuchungsmethode eine Spezifität zwischen 87-100 % [85, 86] und eine Sensitivität zwischen 72-90 % erreicht werden [85, 86]. Vorteil gegenüber der Arthroskopie ist, dass in der MRT-Arthrographie auch die extrinsischen Bänder gut dargestellt und besser beurteilt werden können [74]. Die CT-Arthrographie zeigt vergleichbare Ergebnisse in Bezug auf die Detektion



von SL-Band Schäden [87]. In der MRT-Bildgebung können insbesondere Weichteile gut dargestellt werden. In der Literatur besteht eine große Bandbreite in Bezug auf die diagnostische Güte der Untersuchung. So werden Sensitivitäten zwischen 11-94 % genannt [88-92]. Ursächlich hierfür kann neben der Erfahrung der Untersucher auch ein fehlender Standard in Bezug auf die MRT-Bildgebung sein, beispielsweise ob eine Handspule verwendet oder Kontrastmittel gegeben wurde [90]. Hinweisend auf eine SL-Band-Ruptur kann ein hyperintenses Umgebungsödem in der T2-Gewichtung des MRT sein [84]. Das Anwenden von gadoliniumhaltigen Kontrastmittel erhöht die Spezifität [90], da sich das Kontrastmittel bei akut bis subakuten Verletzungen bis zu sechs bis neun Monaten im Bereich des SL-Bandes aufgrund von Reparationsprozessen und der damit erhöhten Durchblutung anreichert [84]. Das CT ist erst in den späteren Stadien der SL-Instabilität indiziert, um arthrotische Veränderungen beispielsweise vor operativer Versorgung darzustellen [10, 84].

#### 1.6.4. Operative Diagnostik

Als Goldstandard zur Darstellung von SL-Band Schäden gilt die Arthroskopie des Handgelenkes [17].

Neben direkter Sicht auf Knochen, Knorpel, Bänder, sowie Sehnen kann die Stabilität mittels Tasthaken untersucht werden. In minimal invasiver Form wird hier über festgelegte Zugangswege das Gelenk mittels einer Kamera gespiegelt; ggf. werden operative Maßnahmen vorgenommen.

Der Patient wird in Rücklagerung und Aushang des Handgelenkes in Extension beispielsweise im Mädchenfänger gelagert. Normalerweise kann der Eingriff in Vollnarkose oder Plexus-Anästhesie stattfinden. Eine Blutleere sollte angelegt werden [93]. Der Oberarm ist etwa 90 Grad abduziert, der Ellenbogen in 90 Grad Flexion und der Unterarm sowie das Handgelenk in Neutralstellung. Es wird ein axialer Zug am Oberarm mit etwa drei bis vier kg durch Gewichte angelegt [94].

Der Rundgang kann mit Kohlendioxid-Gasfüllung stattfinden. Werden therapeutische Prozedere vorgenommen, sollte auf ein Flüssigkeitsmedium beispielsweise mit einer Natrium-Chlorid-Lösung gewechselt werden [94].

Die bekannten Standardzugangswege befinden sich dorsalseitig und werden in Ihrer Lage zu den Strecksehnenfächer entsprechend 1-2, 3-4, 4-5, 6R und 6U bezeichnet [93]. Zusätzlich gibt es noch die midcarpalen Zugänge MCR und MCU [95]. Die Arthroskopie erfolgt bei SL-Band-Rupturen meist von radiocarpal nach midcarpal über den SL-Spalt [95]. Es wird mit einer 2,7 mm 30-Grad Optik eingegangen [94]. Das SL-Band wird normalerweise von proximal nach distal entsprechend seiner Anteile untersucht und insbesondere die Kontinuität und Stabilität mittels Testhaken bzw. Sonde untersucht. Während der Arthroskopie können neben dem SL-Band auch die restlichen Strukturen wie das LT-Band, TFCC (triangulärer fibrocartilaginärer Komplex) sowie mögliche Knorpelschäden begutachtet werden [95]. Im Anschluss an die Arthroskopie wird das Gelenk mit einer Natrium-Chlorid-Lösung gespült, die Haut mittels Einzelknopfnähten verschlossen und ein steriler Verband angelegt.

Die ursprüngliche Einteilung nach Geissler unterteilt den SL-Band Schaden in vier Stufen anhand der Bandmorphologie, karpalen Inkongruenz sowie der Passierbarkeit des Gelenkes [6]. Die Inkongruenz entsteht durch die kinematische Eigenbewegung der karpalen Knochen welche bereits in 1.2. erläutert wurde. Grad-I-Läsionen stellen sich nur als Einblutung oder Dehnung des SL-Bandes dar. Bei Grad-II-Läsionen zeigt sich zusätzlich bereits ein geringer Spalt zwischen den Handwurzelknochen, welcher jedoch nicht mittels Testhaken sondiert werden kann. Bei Grad-III-Läsionen ist ein Teil des dorsalen Anteils des SL-Bandes noch intakt, der Spalt kann jedoch mittels Testhaken passiert werden. Bei Grad IV liegt eine vollständige Ruptur des Bandes vor. Hier kann mit dem Arthroskop der SL-Spalt sondiert und der Kopf des Os capitatum dargestellt werden [95].

Tabelle 3: Geissler Klassifikation [95].

|     |  |
|-----|--|
| I   | Abschwächung oder Blutung des interossären Bandes von radiocarpal gesehen. Keine Inkongruenz der karpalen Ausrichtung von midcarpal.   |
| II  | Abschwächung oder Blutung des interossären Bandes von radiocarpal gesehen. Stufe oder Inkongruenz der karpalen Ausrichtung. Ggf. geringer Spalt zwischen den Handwurzelknochen (weniger als die Breite der Sonde).                                 |
| III | Inkongruenz oder Abstufung der karpalen Ausrichtung, sowohl von radiocarpal als auch von midcarpal. Die Sonde kann durch den Spalt zwischen den Handwurzelknochen Os lunatum und Os scaphoideum geführt werden.                                    |
| IV  | Inkongruenz oder Abstufung der karpalen Ausrichtung, sowohl von radiocarpal als auch von midcarpal. Instabilität bei Manipulation. Das 2,7-Millimeter-Arthroskop kann zwischen den Handwurzelknochen Os lunatum und Os scaphoideum geführt werden. |

Im Gegenzug dazu fokussiert sich die neuere Klassifikation der „European Wrist Arthroscopy Society“ (EWAS) auf den Anteil des SL-Bandes bzw. die extrinsischen Bänder welche gerissen sind und darauf, welches arthroskopisches Korrelat diese mit sich bringen [75]. Dies wurde in der vorherigen Klassifikation nach Geissler vernachlässigt. Das SL-Band reißt in einer bestimmten Reihenfolge beginnend mit dem palmaren Anteil [62]. Diese können sich jedoch weiter zu vollständigen SL-Band-Rupturen entwickeln, weshalb die Früherkennung auch einer Teilruptur und gegebenenfalls operative Wiederherstellung wichtig ist [75]. Während Stadium II (lediglich Schädigung des membranösen Anteils) noch stabil ist und konservativ behandelt werden kann, können sich Läsionen des Stadiums III b und III c als instabil erweisen und müssen gegebenenfalls operativ versorgt werden. In Stadium IV sind neben der vollständigen SL-Band-Ruptur mindestens zwei weitere extrinsische Bänder geschädigt und es kommt zu einer SL-Spalt-Erweiterung. In Stadium V sind zusätzliche Veränderungen auf den Röntgenbildern sichtbar [75].

Tabelle 4: EWAS-Klassifikation [75].

| <b>Arthroskopisches Stadium (EWAS)</b>                    | <b>Arthroskopischer Befund des SL-Bandes vom Mediokarpalgelenk aus</b>  |
|---|---|
| I.  | kein Durchgang der Sonde in den skapholunären Raum  |
| II. Läsion des proximalen SL-Bandes                       | Durchgang der Sondenspitze in den skapholunären Raum ohne Erweiterung (stabil)  |
| III A. partielle Läsion des palmaren SL-Bandes            | palmare Erweiterung des skapholunären Raums bei dynamischer Testung vom MC-Gelenk aus (anteriore Laxität)                                 |
| III B. partielle Läsion des dorsalen SL-Bandes            | dorsale Erweiterung des skapholunären Raums bei dynamischer Testung (posteriore Laxität)  |
| III C. komplette SL-Band-Ruptur, das Gelenk ist reponibel | vollständige Erweiterung des skapholunären Raums bei der dynamischen Prüfung, die durch Entfernen der Sonde verringert werden kann        |
| IV. komplette SL-Band-Ruptur mit SL-Spalt-Erweiterung     | SL-Spalterweiterung mit Passagemöglichkeit des Arthroskops vom MC zum RC-Gelenk, keine röntgenologischen Anomalien                        |
| V.  | breiter SL-Spalt mit Passage des Arthroskops durch das SL-Gelenk, häufige Röntgenanomalien wie ein vergrößerter SL-Spalt, DISI-Deformität |

MC (midcarpal), RC (radiocarpal)

## 1.7. Behandlungsmöglichkeiten

Um das Spektrum der Behandlungsmöglichkeiten je nach Alter und Ausmaß der Ruptur besser darzustellen, werden diese im Folgenden anhand der Stadien der SL-Instabilität wie bereits in Kapitel 1.4.3, Tabelle 2 erwähnt, erläutert. Diese sind im Großen und Ganzen an fünf Fragen angelehnt, welche Garcia et al. als Therapiealgorithmus aufgestellt hatte [96].

- „1. Ist der dorsale Anteil des SL-Bandes intakt?
2. Hat der dorsale Anteil des SL-Bandes genug Gewebe, um repariert zu werden?
3. Sind die sekundären Stabilisatoren intakt?
4. Kann eine karpale Fehlstellung reponiert werden?
5. Ist der Knorpel auf der radiocarpalen und midcarpalen Oberfläche intakt?“ [63, 96]

Stadium I, die sogenannten okkulten Läsionen, denen eine partielle SL-Band-Ruptur zu Grunde liegt und bei denen der dorsale Anteil intakt ist, können konservativ mit entsprechender Ruhigstellung im Unterarmcast mit Daumeneinschluss und nicht steroidale Antirheumatika (NSAR) behandelt werden [15, 75]. Teilweise kann auch eine Transfixation mittels Kirschner-Drähten durchgeführt werden [15]. Bei konservativer Therapie sollte auch die physiotherapeutische Übung der für den SL-Spalt protektiven Muskeln im Vordergrund stehen [34, 97]. Zusätzlich können zur Symptomlinderung die gerissenen Bandanteile arthroskopisch mittels Shaver debridert werden [15, 98].

Im Stadium II, den dynamischen SL-Instabilitäten, liegt meist eine Kompletttraktur des SL-Bandes vor [15]. Am häufigsten kommt es hier zu knöchernen Avulsionsverletzungen lateral am Os scaphoideum mit etwa 42 % der Fälle bzw. seltener medial am Os lunatum mit etwa 16 % [4]. Ist das Band knöchern ausgerissen kann es mittels Knochen-Anker refixiert werden [99]. Zusätzlich wird eine dorsale Kapsulodese zur Stabilisierung sowie eine temporäre Transfixation mittels

Kirschner-Drähten zwischen Os scaphoideum und Os lunatum sowie Os scaphoideum und Os capitatum durchgeführt [10, 15, 99]. Falls eine seltenere mittige Ruptur des SL-Bandes vorliegt, in etwa 20 % der Fälle [4], und die Stümpfe des SL-Bandes rekonstruierbar sind, werden Sie genäht [10, 15]. Sollte das SL-Band sich als nicht rekonstruierbar erweisen, jedoch noch keine SLD vorliegen, ist eine sogenannte Knochen-Band-Knochen-Plastik möglich [15, 100, 101]. Dafür wird aus dem dritten Strecksehnenfach ein Stück des Retinaculum extensorum im Bereich des Radius mit jeweils knöchernen Anteilen an der medialen und lateralen Seite entfernt und in vorgefertigte Vertiefungen in das dorsale Os scaphoideum bzw. Os lunatum eingepasst und danach das Os scaphoideum und Os lunatum mittels Kirschner-Drähten transfixiert [100].

Befindet man sich bereits im Stadium III, der Komplettruptur des SL-Bandes sowie einer Ruptur der sekundären Stabilisatoren mit resultierender skapholunären Dissoziation ohne bestehende Osteoarthritis, ist eine Direktnaht des SL-Bandes häufig nicht mehr möglich. In diesem Fall bieten ligamentäre Rekonstruktionen eine Option [15]. Eine etablierte Methode ist neben der Rekonstruktion nach Brunelli [66] die triligamentäre Tenodese. Vorteil dieser Methode ist, dass neben dem SL-Band auch die Funktion des Ligamentum radiotriquetrum dorsale sowie des Ligamentum scaphotrapeziotrapezoideum wiederhergestellt werden [15, 96]. Ein Teil der Sehne des Musculus Flexor carpi radiales wird bei dieser Operation durch ein Bohrloch quer durch das Os scaphoideum von palmar nach dorsal gezogen. Palmarseitig erfolgt die Fixierung mittels Knochenanker am Os lunatum. Um die Spannung dieser Sehnenrekonstruktion zu halten, wird diese anschließend durch einen Schlitz im Bereich der Ligamentum radiotriquetrum dorsale gezogen, umgeschlagen, und mit sich selbst wieder vernäht. Das Os scaphoideum wird anschließend mittels Kirschner-Drähten am Os lunatum und Os capitatum fixiert. Neben der SL-Band-Rekonstruktion kann somit auch eine Stabilisierung im dorso-palmaren Os scaphoideum sowie eine Reduktion der Eigenbewegung des Os lunatums erreicht werden [96].

Besteht bereits eine DISI-Fehlstellung entsprechend Stadium IV, jedoch ohne degenerative Veränderungen, kann, falls reponibel, obengenannte triligamentäre Tenodese durchgeführt werden. Sollte sich die DISI-Fehlstellung als nicht reponibel erweisen, bleibt nur noch die interkarpale Arthrodesse, welche jedoch mit einer deutlichen Einschränkung der Beweglichkeit einhergeht [15]. Neben der Scapho-capitatum-Fusion [102] oder Scaphotrapeziotrapezoideum-Fusion [103] erzielte die Scaphocapitatolunatum-Fusion [104] bessere Ergebnisse in Hinblick auf die Kräfteverteilung auf die Fossa scaphoidea sowie Fossa lunata [105].

Im Endstadium der SLAC-Wrist bestehen bereits degenerative Veränderungen. Die „Four Corner Fusion“ und Karpektomie der proximalen Reihe stellen Bewegungserhaltende Operationen für symptomatische Patienten dar [15]. Patienten mit einer geringgradig fortgeschrittenen SLAC-Wrist und intakten palmaren extrinsischen Bändern können von einer Karpektomie der proximalen Reihe profitieren [15, 95]. Patienten mit bereits signifikanter Chondromalazie im Bereich des Kopfes des Os capitatum erzielen meist bessere Ergebnisse mit einer sogenannten „Four Corner Fusion“. Bei dieser handelt es sich um eine Arthrodesse des Os capitatum, Os lunatum, Os hamatum sowie Os triquetrum [15]. Beide zeigen ähnliche Ergebnisse im Hinblick auf Beweglichkeit und Griffstärke [106].

Eine weitere Option stellt die Denervierung dar. Denervierungsoperationen sollten jedoch in Hinblick auf die propriozeptiven neuromuskulären Reflexe mit Vorsicht genossen werden. Diese schützen unser Handgelenk vor exzessiven Bewegungen und verhindern somit eine Osteoarthritis bzw. verlangsamen diese [34, 107].

## 2. Material und Methoden

### 2.1. Patienten

Nach Genehmigung der Ethikkommission für diese retrospektive Studie (513/2018BO2), wurden alle Patienten aus dem Patientenpool der Berufsgenossenschaftlichen Unfallklinik Tübingen eingeschlossen, welche im ambulanten oder stationären Setting eine diagnostische Handgelenksarthroskopie bei Handgelenksbeschwerden mit und ohne erinnerliches Trauma im Zeitraum von 01/2011 bis 12/2017 erhielten. Die Ergebnisse wurden mit den präoperativen Röntgenbildern, MRT-Befunden und der klinischen Untersuchung verglichen.

Folgende Such-Kriterien wurden unter Zuhilfenahme des Operationen- und Prozedurenschlüssels (OPS) angewandt:

1-697.3 – Diagnostische Arthroskopie Handgelenk

5-811.27 – Arthroskopische Operation an der Synovialis, Synovektomie, partiell: Handgelenk n.n. bezeichnet

5-812.e7 – Arthroskopische Operation am Gelenkknorpel und an den Menisken – Knorpelglättung (Chondroplastik): Handgelenk n.n. bezeichnet

5-812.b – Arthroskopische Operation am Gelenkknorpel und an den Menisken, Resektion des Discus triangularis

5-812.n – Arthroskopische Operation am Gelenkknorpel und an den Menisken, Naht oder Rekonstruktion des Discus triangularis [TFCC]

5-812.f9 – Arthroskopische Operation am Gelenkknorpel und an den Menisken, Subchondrale Knocheneröffnung (z.B. nach Pridie, Mikrofrakturierung, Abrasionsarthroplastik): Ulnokarpalgelenk

Es ergab sich ein Patientenkollektiv von 585 Patienten.

Ausgeschlossen wurden Patienten, bei denen die Akte unvollständig war, OP-Berichte fehlten oder die präoperativen Röntgenbilder nicht im System aufzufinden waren. Zudem wurden Patienten ausgeschlossen, bei denen Arthritiden entzündlicher oder autoimmuner Genese bekannt waren oder avaskuläre Nekrosen



der karpalen Knochen vorlagen. Patienten, bei denen eine länger zurückliegende Radiusfraktur vorlag oder welche bereits eine Osteosynthese im Bereich des Handgelenkes oder Handwurzel erhielten wurden ebenfalls exkludiert. Zusätzlich wurden Patienten ausgeschlossen, bei welchen eine Skaphoidpseudarthrose oder eine Lunatum- bzw. Radiocarpalluxation vorlag.

Insgesamt wurden nach Anwendung der aufgeführten Ausschlusskriterien 414 Patienten erfasst, die mittels Medico Software und Picture Archiving and Communication System (PACS-System) nach einem intern festgelegten standardisierten Verfahren analysiert wurden. Um die Homogenität und Qualität der Daten zu sichern, wurden alle Daten durch eine in diesem Verfahren geschulte Person ausgewertet. Die Daten wurden zunächst mittels Microsoft Excel 2018 erfasst. Dabei wurden alle Patientendaten, welche zur Identifikation des Patienten führen könnten, pseudoanonymisiert. Lediglich Geschlecht und Alter zum Zeitpunkt des Unfalls sowie eine anonyme ID wurden erfasst, zum eventuellen späteren Wiederauffinden der Akte.

Die Auswertung der allgemeinen Daten wie beispielsweise die Untersuchungsbefunde wurden aus der elektronischen Akte erhoben. Die Daten über die intraoperativen Befunde wurden aus den Operationsberichten sowie den intraoperativen Arthroskopie-Bildern zusammengestellt. Die Operationen wurden durch Fachärzte mit der Zusatzbezeichnung Handchirurgie der BG-Unfallklinik Tübingen durchgeführt. MRT-Befunde wurden aus den radiologischen Berichten entnommen. Diese wurden durch die Fachärzte für Radiologie der BG-Unfallklinik Tübingen erstellt. Die Parameter der prä-operativen Röntgenaufnahmen der Hand wurden mittels PACS-System ausgewertet. Dies wurde zur Sicherung der Qualität vor der restlichen Auswertung als Erstes durchgeführt. Falls vorhanden, fand die Auswertung im Seitenvergleich mit der gesunden Gegenseite statt.

## **2.2. Parameter**

### 2.2.1. Aufgestellte Parameter Patientenakte

Neben Alter, Geschlecht und der betroffenen Beschwerde Seite wurde aus dem Untersuchungsbericht und der Anamnese ermittelt, ob ein Trauma stattgefunden hatte.

Die Bewegungsausmaße im Handgelenk (Extension/ Flexion, Radial/Ulnarabduktion sowie Pronation/ Supination) wurden nach der Neutral-Null-Methode und, wenn vorhanden, im Seitenvergleich erfasst.

Ebenso wurde erhoben, ob ein pathologischer Watson-Test vorlag (Kapitel 1.6.1.). In der BG Unfallklinik Tübingen ist der Test positiv, wenn es zu zusätzlichen Schmerzen oder einem Schnappen kommt.

### 2.2.2. Aufgestellte radiologische Parameter

Es wurden nur in der BG-Klinik Tübingen durchgeführte prä-operative Röntgenbilder, wenn vorhanden, im Vergleich zur Gegenseite in a.-p. sowie lateraler Projektion und in Ulnarabduktion sowie Radialabduktion bewertet. MRT-Befunde wurden nur berücksichtigt, wenn diese durch Fachärzte der Radiologie der BG-Klinik Tübingen ausgewertet wurden. Insgesamt wurden 314 Röntgenbilder in a.-p.-Aufnahme der betroffenen Seite, sowie 161 a.-p.-Aufnahmen der gesunden Gegenseite ausgewertet. In Ulnarabduktion lagen 284 Bilder auf der betroffenen Seite und 270 von der gesunden Gegenseite vor. In Radialabduktion wurden insgesamt 274 Bilder der pathologischen Seite ausgewertet.

Für den SL-Abstand wurde, wie in Kapitel 1.6.2. beschrieben, der Abstand mittig zwischen den Gelenkrändern des Os scaphoideum und Os lunatum bestimmt (Abbildung 7) [18]. Der SL-Winkel und RL-Winkel wurde, wie in Kapitel 1.6.2. beschrieben, durch die Achsen des Os scaphoideum und Os lunatum bzw. Os lunatum und Diaphyse des Radius gebildet (Abbildung 6) [19, 80]. Des Weiteren

wurde erhoben, ob ein sogenanntes Siegelringzeichen vorlag. Dieses entsteht bei fehlender SL-Band Verbindung durch Flexion des Os scaphoideum, wodurch sich der distale Pol des Os scaphoideum auf die Taille des Os scaphoideum projiziert und wie ein Siegel erscheint [57, 108]. Die ausführliche Bestimmung wurde in Kapitel 1.6.2. beschrieben (Abbildung 5) [57].

Zusätzlich wurde dokumentiert ob als Begleitverletzung nativradiologisch eine frische Radius- oder Skaphoidfraktur vorlag.

### 2.2.3. Arthroskopie

Die Arthroskopien des Handgelenkes werden in der BG-Klinik Tübingen nach einem standardisierten Verfahren durch Fachärzte mit der Zusatzbezeichnung für Handchirurgie durchgeführt. Die Indikationsstellung wird in der Zusammenschau der Anamnese, klinischen Untersuchung, sowie nativradiologischer oder MRT-Bildgebung des betroffenen Handgelenkes gestellt. In der Regel wird der Eingriff in einer axillären Plexusblockade durchgeführt, um narkosebedingte Risiken für die Patienten zu minimieren. Für den Ablauf siehe Kapitel 1.6.4. Für die Einsicht zum Radiocarpalgelenk wird der 3-4-Zugang zwischen den Sehnen des Extensor pollicis longus und Extensor digitorum communis, sowie dem 6-R Zugang, radial zur Extensor-carpi-ulnaris-Sehne verwendet. Für die Einsicht zum Midcarpalgelenk werden die midcarpalen Zugänge MCR/MCU radial bzw. ulnar des Os capitatum verwendet. Es wird mit dem Arthroskop, einer 2,7 mm 30-Grad-Optik, eingegangen. Es erfolgt die Untersuchung der Fovea scaphoidea, der radialen Kapsel mit dem radialem Recessus, der Radiusgelenkfläche und radiopalmaren Kapsel sowie des skapholunären Überganges mit dem SL-Band und seinen Anteilen. Hier wird die Stabilität mit dem Testhaken untersucht. Weiter wird dann die Fovea lunata, der Übergang der Radiusgelenkfläche und des Discus articularis ulnocarpalis einschließlich der Diskusaufhängung mit dem Tasthaken untersucht und der Trampolineffekt überprüft. Zuletzt wird die ulnopalmar sowie ulnare Kapsel, die

Gelenkfläche des Os triquetrum mit Übergang zum Os lunatum sowie die dorsoulnare Kapsel begutachtet. Die intraoperativen Arthroskopie-Bilder wurden digital gespeichert.

Die SL-Band Läsionen und LT-Band Läsionen wurden in vier Stufen nach Geisler klassifiziert (Tabelle 3) [95]. TFCC-Läsionen werden nach Palmer in traumatische und degenerative Läsionen eingeteilt (Tabelle 5 und 6) [109].

*Tabelle 5: Traumatische Läsion des TFCC nach Palmer [109].*

|     |   |
|-----|---|
| I A | zentrale Perforation  |
| I B | ulnarer Abriss mit oder ohne Fraktur der distalen Ulna                          |
| I C | distaler TFCC-Abriss  |
| I D | radialer TFCC-Abriss mit oder ohne Avulsionsfraktur der Incisura radialis ulnae |

*Tabelle 6: Degenerative Läsionen des TFCC nach Palmer [109].*

|      |  |
|------|--|
| II A | TFCC-Verschleiß                          |
| II B | II A + ulnare oder lunare Chondromalazie |
| II C | Chondromalazie + TFCC-Ruptur             |
| II D | II C + LT-Band-Ruptur                    |
| II E | II D + ulnocarpale Arthrose              |

Die in der Arthroskopie festgestellten Arthrose Grade wurden nach Outerbridge in fünf Grade eingeteilt (Tabelle 7) [110].

*Tabelle 7: Arthrose Grade nach Outerbridge [110].*

|        |   |
|--------|---|
| Grad 0 | Gesunder Knorpel  |
| Grad 1 | Knorpelerweichung und Schwellung                                  |
| Grad 2 | oberflächliche Risse, die nicht bis auf den Knochen reichen       |
| Grad 3 | Risse, die bis auf den Knochen reichen ohne freiliegenden Knochen |
| Grad 4 | Erosion des Knorpels bis zum Knochen (Knorpelglätze)              |

### 2.3. Statistische Methodik

Die ausgewerteten Daten wurden anschließend aus Microsoft Excel 2018 in das IBM© SPSS© Statistics Premium Version 25.0.0.1 (Home-Use Student) MacOS übertragen und ausgewertet.

Es handelt sich um eine explorative Datenanalyse. Die P-Werte werden deskriptiv interpretiert.

Zur Deskription der metrisch skalierten Variablen wurden folgende Größen verwendet: Anzahl, Mittelwert, Standardabweichung, Extrema und Median. Die Verteilung kategorialer Daten wurde mittels absoluter und relativer Häufigkeiten beschrieben.

Zur Visualisierung der Verteilung metrischer Variablen wurden Boxplots verwendet, bei kategorialen Daten Kreis- oder Balken-Diagramme.

Zum Vergleich der Lage der Verteilung einer metrischen Variablen von mehreren unabhängigen Gruppen kam der Kruskal-Wallis-Test zur Anwendung. Der Vergleich zweier abhängiger Stichproben bzgl. einer metrischen Variablen wurde mit dem Wilcoxon-Test für verbundene Stichproben durchgeführt. Zum Vergleich der Häufigkeitsverteilungen einer kategorialen Variablen von unabhängigen Gruppen wurde der exakte Test nach Fisher verwendet. Alle Tests wurden zweiseitig gerechnet.

Der Zusammenhang zweier metrischer Variablen wurde mit dem Spearman Rangkorrelationskoeffizienten quantifiziert.

Zur Bestimmung möglicher Cutpoints des SL-Abstandes, des SL-Winkels und des RL-Winkels zur Diagnostik von SL-Band-Läsionen wurden ROC-Kurven (receiver operating characteristic) erstellt und die dazugehörigen Flächen unter der Kurve berechnet (AUC).

Zur Beurteilung der diagnostischen Güte interessierender Variablen bzgl. SL-Band-Läsionen wurden Sensitivität, Spezifität sowie positiver und negativer Vorhersagewert berechnet.

### 3. Ergebnisse

#### 3.1. Allgemeines

*Tabelle 8: Allgemeine Informationen zum Patientenkollektiv und weiteren diagnostizierten Pathologien.*

|                                |                        |                        | <b>Gesamtzahl</b> |
|--------------------------------|------------------------|------------------------|-------------------|
| <b>SL-Band Verletzung</b>      | Ja<br>176 (42,5 %)     | Nein<br>238 (57,5 %)   | 414               |
| <b>Alter</b>                   | Min.<br>10             | Max.<br>81             |                   |
| <b>Geschlecht</b>              | Weiblich<br>112 (27 %) | Männlich<br>302 (73 %) | 414               |
| <b>Betroffene Seite</b>        | Rechts<br>230 (56 %)   | Links<br>184 (44 %)    | 414               |
| <b>MRT-Befund</b>              | Ja<br>185 (45 %)       | Nein<br>229 (55 %)     | 414               |
| <b>Trauma</b>                  | Ja<br>267 (65 %)       | Nein<br>147 (35 %)     | 414               |
| <b>LT-Band Verletzungen</b>    | Ja<br>29 (7 %)         | Nein<br>385 (93 %)     | 414               |
| <b>TFCC-Läsion</b>             | Ja<br>173 (42 %)       | Nein<br>241 (58 %)     | 414               |
| <b>Distale Radiusfrakturen</b> | Ja<br>21 (5 %)         | Nein<br>393 (95 %)     | 414               |
| <b>Skaphoidfrakturen</b>       | Ja<br>17 (4 %)         | Nein<br>397 (96 %)     | 414               |
| <b>Radiocarpale Arthrose</b>   | Ja<br>243 (59 %)       | Nein<br>171 (41 %)     | 414               |

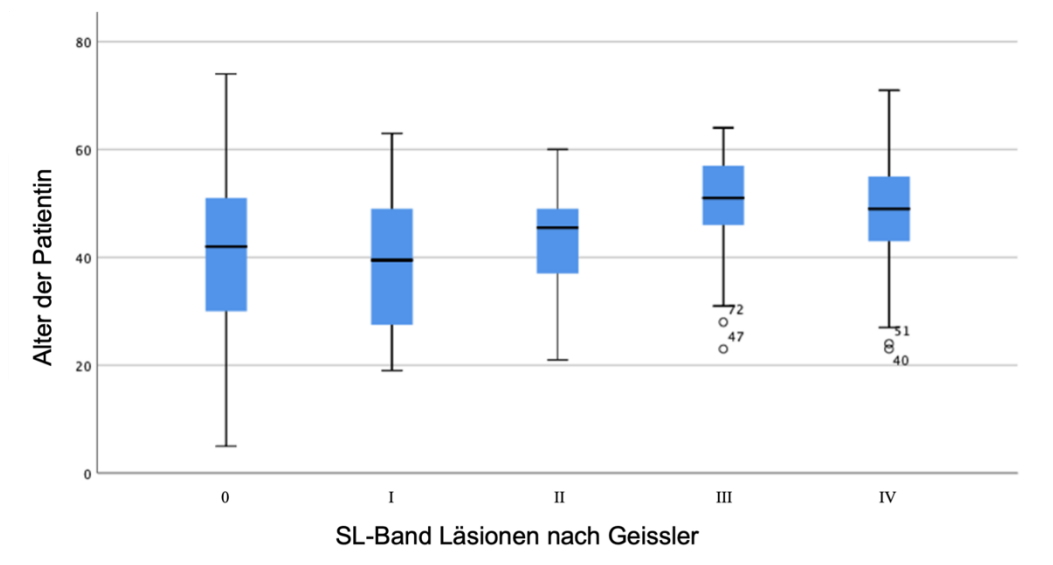
Von 585 Patienten erfüllten 414 Patienten die Aufnahmekriterien. Verglichen wurden präoperative klinische Untersuchung, Röntgenbilder sowie MRT-Befunde mit den arthroskopischen Ergebnissen. Insgesamt waren 27 % dieser Patienten weiblich und 73 % männlich. Der jüngste Patient war 10 Jahre alt und der älteste 81 Jahre. Der Median betrug 50 Jahre. Bei 176, also 42,5 % dieser Patienten konnte eine SL-Band-Ruptur festgestellt werden. 267 Patienten bzw. 65 % war ein Trauma erinnerlich. Bei 56 % war die rechte und bei 44 % die linke Hand betroffen [111].

### 3.1.1. Altersverteilung

In der Altersverteilung lag der Median bei Patienten ohne SL-Band-Verletzung (Grad 0) bei 42 Jahren. Bei SL-Läsionen Grad I nach Geissler lag der Median bei 40 Jahren, bei Grad-IV-Läsionen bei 49 Jahren (Abbildung 8).

Ob das Alter der Patienten mit dem Grad der SL-Läsion zusammenhängt, wurde mit dem Kruskal-Wallis Test für unabhängige Stichproben getestet. Der p-Wert war  $< 0,001$  und somit auffällig klein. Dies deutet auf einen starken Zusammenhang hin. Tendenziell stieg das durchschnittliche Alter bei Patienten mit einem höheren Grad der SL-Band-Läsion.

*Abbildung 8: Box Plot mit der Altersverteilung in den jeweiligen Schweregraden der SL-Band Verletzung. Grad 0 falls keine SL-Band-Läsion vorlag.*



### 3.1.2. Verteilung der SL-Bandrüpturen

Der Schweregrad der Läsion wurde nach Geissler eingeteilt und mittels Arthroskopie festgestellt. Insgesamt konnte bei 176, also 42,6 % der Patienten eine SL-Band-Ruptur festgestellt werden. Innerhalb der SL-Band-Verletzung kamen die Geissler Typ-IV-Verletzungen am häufigsten vor und konnten bei insgesamt 111 (63 %) aller Patienten mit einer SL-Band-Läsion nachgewiesen werden. Am zweit



häufigsten konnten SL-Band-Rupturen III. Grades bei 29 Patienten (16,5 %) nachgewiesen werden. Am seltensten kamen SL-Band-Rupturen I. Grades vor. Diese konnten bei 12 Patienten (6,8 %) diagnostiziert werden [111]. Bei drei Patienten fehlte im OP-Bericht eine genaue Aussage hinsichtlich der SL-Band-Läsion. In der Zusammenschau lag in diesen Fällen jedoch keine SL-Band-Läsion vor, weshalb diese zu der Gruppe der Patienten ohne SL-Band-Läsion gezählt werden konnten.

Abbildung 9: Darstellung der jeweiligen SL-Band-Rupturen nach Geissler gemessen am gesamten Patientenkollektiv, Grad 0, falls keine SL-Band-Läsion vorlag.

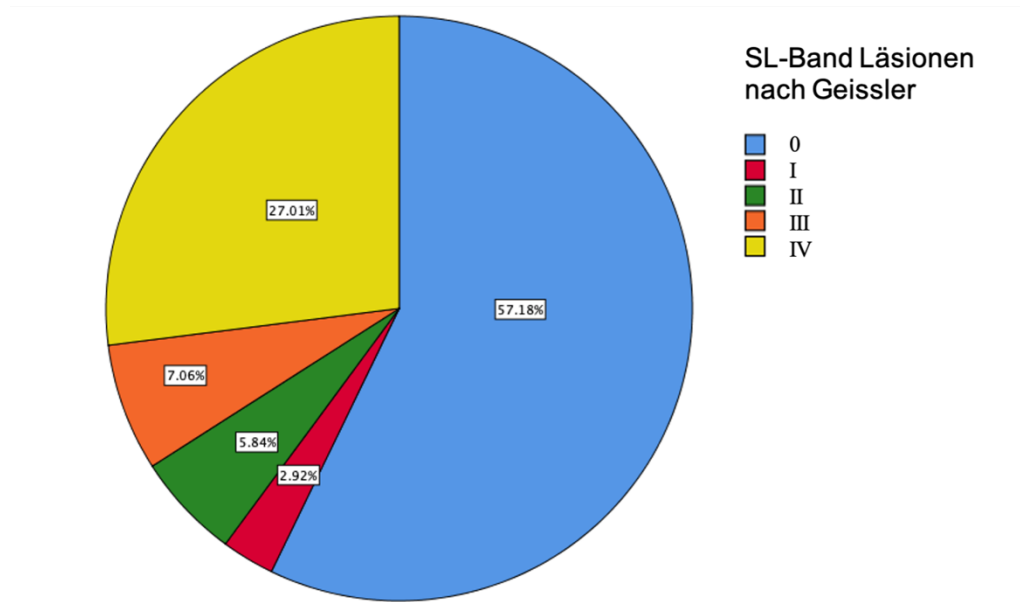


Tabelle 9: Darstellung der Häufigkeiten der SL-Band-Läsionen und bei wie vielen keine SL-Band-Läsion (SLBL) vorlag

|         | SL-Band-Läsionen nach Geissler | Häufigkeit | Prozent | Gültige Prozente | Kumulierte Prozente |
|---------|--------------------------------|------------|---------|------------------|---------------------|
| Gültige | keine SLBL                     | 235        | 56,8    | 57,2             | 57,2                |
|         | Grad I                         | 12         | 2,9     | 2,9              | 60,1                |
|         | Grad II                        | 24         | 5,8     | 5,8              | 65,9                |
|         | Grad III                       | 29         | 7,0     | 7,1              | 73,0                |
|         | Grad IV                        | 111        | 26,8    | 27,0             | 100,0               |
|         | Gesamt                         | 411        | 99,3    | 100,0            |                     |
| Fehlend | System                         | 3          | 0,7     |                  |                     |
| Gesamt  |                                | 414        | 100,0   |                  |                     |

### 3.1.3. Ipsilaterale Begleitverletzungen

#### LT-Band-Verletzungen

Insgesamt lag bei 29 (ca. 7 %) aller Patienten eine LT-Band-Verletzung vor. Geisler-Typ-II-Verletzungen waren am häufigsten und konnten bei 14 (48,3 %) aller Patienten mit einer LT-Band-Verletzung nachgewiesen werden. Bei 11,9 % aller Patienten mit einer SL-Band-Verletzung konnte gleichzeitig eine LT-Band-Läsion festgestellt werden.

*Tabelle 10: Häufigkeitsverteilung von LT-Band-Läsionen.*

|         |          | Häufigkeit | Prozent | Gültige<br>Prozente | Kumulierte<br>Prozente |
|---------|----------|------------|---------|---------------------|------------------------|
| Gültig  | Grad I   | 3          | 0,7     | 0,7                 | 0,7                    |
|         | Grad II  | 14         | 3,4     | 3,4                 | 7,1                    |
|         | Grad III | 3          | 0,7     | 0,7                 | 1,5                    |
|         | Grad IV  | 9          | 2,2     | 2,2                 | 3,7                    |
|         | intakt   | 381        | 92,0    | 92,9                | 100,0                  |
|         | Gesamt   | 410        | 99,0    | 100,0               |                        |
| Fehlend |          | 4          | 1,0     |                     |                        |
| Gesamt  |          | 414        | 100,0   |                     |                        |

#### Skaphoidfrakturen

Insgesamt wurden 17 Skaphoidfrakturen nachgewiesen. Bei fünf (29,4 %) dieser Skaphoidfrakturen konnten eine SL-Band-Läsion nachgewiesen werden. Innerhalb aller SL-Band-Läsionen bestand in 2,9 % der Fälle zusätzlich eine Skaphoidfraktur.

Ob die SL-Band-Läsionen mit den Skaphoidfrakturen zusammenhängen, wurde mit dem Exakten Test nach Fisher getestet. Der p-Wert betrug 0,319. Somit konnte kein Zusammenhang zwischen Skaphoidfrakturen und SL-Band-Läsionen nachgewiesen werden. Patienten mit Skaphoidfrakturen hatten nicht häufiger eine SL-Band-Läsion als Patienten ohne Fraktur.

### Distale Radiusfrakturen

Bei den Radiusfrakturen handelte es sich um frische Frakturen im direkten Zusammenhang mit dem Unfallereignis. Insgesamt lagen bei 21 Patienten distale Radiusfrakturen vor. Acht von diesen waren extraartikulär und 13 intraartikulär. Innerhalb der extraartikulären Radiusfrakturen hatten 12,5 % zusätzlich eine SL-Bandverletzung. Bei den intraartikulären konnte bei 46,2 % eine zusätzliche SL-Bandverletzung nachgewiesen werden. Insgesamt konnte innerhalb aller SL-Band-Verletzungen in 5 % der Fälle eine intraartikuläre und in 0,8 % der Fälle eine extraartikuläre Radiusfraktur diagnostiziert werden.

Ob die distalen Radiusfrakturen mit den SL-Band-Läsionen zusammenhängen, wurde mit dem Exakten Test nach Fisher getestet. Der p-Wert betrug 0,646. Somit konnte kein Zusammenhang zwischen Radiusfrakturen und SL-Band-Läsionen nachgewiesen werden. Patienten mit Radiusfrakturen hatten nicht häufiger eine SL-Band-Läsion als Patienten ohne Fraktur.

### Radiocarpal-Arthrose

Insgesamt konnte innerhalb aller SL-Band-Läsionen bei 55,7 % eine Radiocarpalarthrose festgestellt werden.

Ob eine Radiocarpalarthrose mit SL-Band-Läsionen zusammenhängt, wurde mit dem Exakten Test nach Fisher getestet. Der p-Wert war  $< 0,001$  und somit auffällig klein. Dies deutet auf einen starken Zusammenhang hin. Patienten mit einer SL-Band-Läsion hatten häufiger eine Radiocarpalarthrose als Patienten ohne eine SL-Band-Läsion.

## TFCC-Läsionen

Insgesamt konnte bei 173 von 414 Patienten eine TFCC-Läsion nachgewiesen werden. Bei 61 Patienten (34,7 %) konnte arthroskopisch neben einer SL-Band-Läsion zusätzlich eine TFCC-Läsion nachgewiesen werden.

### **3.2. Klinische Parameter**

#### 3.2.1. Watson-Test

Der Watson-Test kann bei positivem Befund auf eine SL-Band-Läsion hinweisen. Bei 75 Patienten wurde dieser präoperativ dokumentiert.

Insgesamt konnte bei 26 von 29 Patienten, die in der klinischen Untersuchung einen positiven Watson-Test hatten, arthroskopisch eine SL-Band-Läsion nachgewiesen werden. Der positive Vorhersagewert (PVW) betrug 89,7 %. Lediglich drei Patienten (10,3 %) hatten trotz positivem Watson-Test arthroskopisch keine SL-Band-Läsion. Im Gegenzug hatten 24 von 46 Patienten mit einem unauffälligen Watson-Test keine SL-Band-Läsion. Der negative Vorhersagewert (NVW) betrug 52,2 %.

Von 48 Patienten mit einer arthroskopisch nachgewiesenen SL-Band-Ruptur hatten 26 einen positiven Watson-Test in der prä-operativen klinischen Untersuchung. Die Sensitivität betrug 54,2 %. Von den 27 Patienten ohne SL-Band-Läsion hatten 24 einen negativen Watson-Test. Die Spezifität betrug 88,9 %.

#### 3.2.2. Bewegungsausmaße

Die Bewegungsausmaße wurden präoperativ bei der klinischen Untersuchung festgehalten. Der Median für die Bewegungsausmaße Extension/ Neutralstellung/ Flexion, wenn keine SL-Band-Läsion vorlag (n=133), betragen 60/0/60

Grad. Der Median für Extension/ Neutralstellung/ Flexion bei Patienten, bei welchen arthroskopisch eine SL-Band-Läsion nachgewiesen werden konnte, (n=105), betragen 50/0/50 Grad.

Der Median für Radialabduktion/ Neutralstellung/ Ulnarabduktion betragen ohne nachgewiesene SL-Band-Läsion (n=125) 20/0/30 Grad. Bei vorliegender SL-Band-Läsion (n=100) 20/0/25 Grad.

Für Pronation/ Neutralstellung/ Supination betrug der Median ohne vorliegende SL-Band-Läsion (n=127) 85/0/85 Grad. Der Median für Pronation/ Neutralstellung/ Supination bei nachgewiesener SL-Band-Läsion lagen bei (n=100) 85/0/85 Grad.

Die meisten Bewegungseinschränkungen bei einer vorliegenden SL-Band-Läsion sind demnach bei Extension/ Flexion zu sehen, mit einem Verlust von etwa 10 Grad an Beweglichkeit. In Ulnarabduktion liegt ein Beweglichkeitsverlust von 5 Grad vor (Tabelle 11).

*Tabelle 11: Median der Bewegungsmaße bei vorliegender SL-Band-Läsion im Vergleich zur Gegenseite*

|                                 | Median ohne vorliegende SL-Band-Läsion | Median mit vorliegender SL-Band-Läsion |
|---------------------------------|--|--|
| Extension/ Flexion              | 60-0-60°                               | 50-0-50°                               |
| Radialabduktion/ Ulnarabduktion | 20-0-30°                               | 20-0-25°                               |
| Pronation/ Supination           | 85°-0-85°                              | 85-0-85°                               |

### **3.3. Radiologische Parameter**

#### **3.3.1. Siegelringzeichen**

Innerhalb der Personengruppe mit positiven Siegelringzeichen hatten 36,4 % keinen SL-Band-Schaden und bei 63,6 % konnte ein SL-Band-Schaden nachgewiesen werden. Bei genauerer Betrachtung der Subgruppen fällt auf, dass das Siegelringzeichen zu 46,6 % bei Grad-IV-Läsionen vorkam. Insgesamt konnte bei 88 Patienten radiologisch ein Siegelringzeichen nachgewiesen werden. Davon hatten 56 Patienten arthroskopisch eine SL-Band-Läsion. Der positive Vorhersagewert ergab 63,3 %. Von den 300 Patienten ohne Siegelringzeichen hatten 193 keine SL-Band-Läsion. Der negative Vorhersagewert betrug 64,3 %. Von 163 Patienten mit einer SL-Band-Läsion hatten 56 ein positives Siegelringzeichen, entsprechend ergab sich eine Sensitivität von 34,4 %. Von 225 Patienten ohne SL-Band-Läsion hatten 193 kein Siegelringzeichen, dies ergab eine Spezifität von 85,5 %.

#### **3.3.2. MRT-Untersuchung**

Bei Insgesamt 285 Patienten, also 69 % lag ein präoperatives MRT und bei 45 % zusätzlich ein schriftlicher MRT-Befund vor.

Von den 67 Patienten mit positivem MRT-Befund hinsichtlich eines SL-Band-Schadens konnte dieser bei 61 arthroskopisch bestätigt werden. Der PVW betrug somit 91,0 %. Im Gegenzug dazu wurde präoperativ bei 117 Patienten ein intaktes SL-Band beschrieben. Dies bestätigte sich arthroskopisch bei 102 Patienten. Der NVW betrug 87,2 %.

Von den 76 Patienten mit einer arthroskopisch diagnostizierten SL-Band-Läsion hatten 61 einen positiven MRT-Befund hinsichtlich einer SL-Band-Läsion. Die Sensitivität betrug 80,3 %.

Bei 102 von 108 Patienten ohne arthroskopisch vorliegender SL-Band-Läsion, wurde dies bereits präoperativ im MRT befundet. Die Spezifität betrug 94,4 %.

Ob der MRT-Befund mit den intraoperativ festgestellten SL-Band-Läsionen zusammenhängt, wurde mit dem Exakten Test nach Fisher für unverbundene Stichproben getestet. Der p-Wert betrug  $< 0,001$  und war somit auffällig klein, weshalb davon ausgegangen wird, dass es einen starken Zusammenhang zwischen positivem MRT-Befund und dem Vorliegen einer SL-Band-Läsion gibt.



### 3.3.3. Röntgenuntersuchung

Verglichen wurden die SL-Abstände der verunfallten Hand in den a.-p.-Aufnahmen, in Ulnarabduktion sowie Radialabduktion jeweils im Vergleich zu der gesunden Seite, sowie der SL- und RL-Winkel in der seitlichen Aufnahme.

Insgesamt zeigte sich der Median des SL-Abstandes in allen Projektionen (Tabelle 12) bei vorliegender SL-Band-Läsion erhöht im Vergleich zu den Patienten ohne SL-Band-Läsion. Zudem stieg der Median des SL-Abstandes entsprechend dem Grad der SL-Band-Läsion nach Geissler insbesondere in der a.-p.-Aufnahme sowie in Ulnarabduktion an. Lediglich in den Aufnahmen in Radialabduktion kam es zwischen Grad I und IV (2,20 vs. 2,25 mm) zu keinem wesentlichen Anstieg des SL-Abstandes (Tabelle 12). In Ulnarabduktion sowie der a.-p.-Aufnahme wurde zudem die gesunde Gegenseite untersucht. Diese wurden jeweils entsprechend der vorliegenden Diagnose der Gegenseite unterteilt, um besser darstellen zu können, wie sich die gesunde Gegenseite im Vergleich zu der betroffenen Seite verhält.

Insgesamt fielen die SL-Abstände auf der gesunden Gegenseite in der a.-p.-Aufnahme und in Ulnarabduktion kleiner als auf der betroffenen Hand aus. Auffällig war jedoch, dass Patienten mit einer SL-Band-Läsion Grad IV auf der Gegenseite auch einen erhöhten SL-Abstand in der a.-p.-Aufnahme und in Ulnarabduktion im Vergleich zu Patienten ohne SL-Band-Läsion vorzeigten. Beispielsweise lag der Median des SL-Abstandes in Ulnarabduktion bei Patienten ohne SL-Band-Läsion auf der verunfallten Seite bei 2,15 mm. Auf der gesunden Gegenseite lag dieser bei diesen Patienten bei 1,90 mm. Gleichzeitig lag der Median bei Patienten mit einer Grad-IV-Läsion auf der verunfallten Seite bei 4,15 mm, und auf der gesunden Gegenseite hatten diese Patienten einen SL-Abstand von 2,8 mm. In den seitlichen Aufnahmen zeigten insbesondere Patienten mit einer Geissler-Grad-III-IV-Läsion einen erhöhten SL-Winkel (Median 65-74,6 Grad). Der RL-Winkel war in unserem Patientenkollektiv bei SL-Läsionen Geissler-Grad-III am meisten erhöht mit einem Median von 14,4 Grad (Tabelle 12).

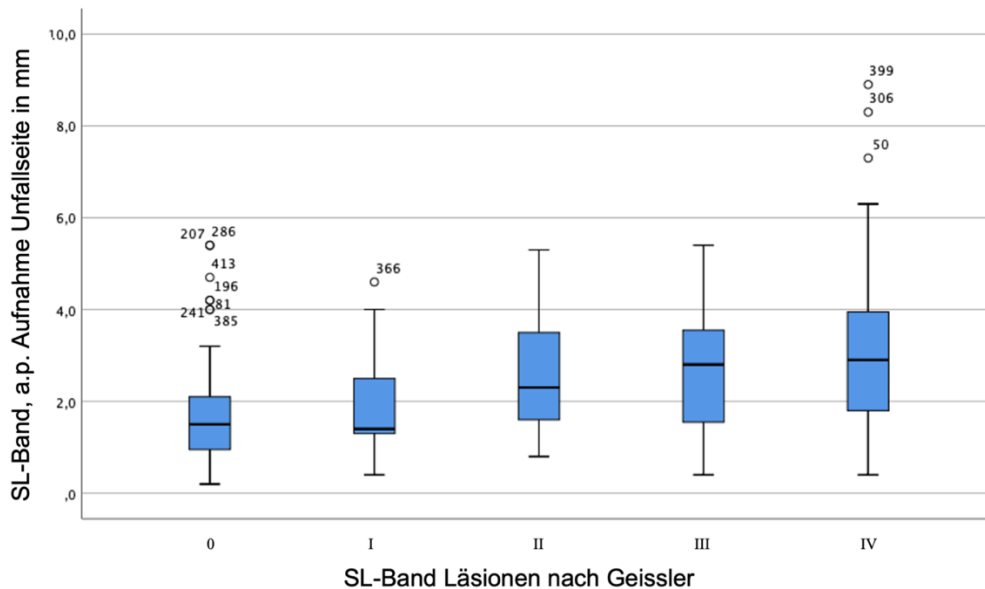
**Tabelle 12: Übersicht SL-Abstände, SL- und RL-Winkel.**

SL-Abstände in mm in den a.-p.-Aufnahmen, in Ulnarabduktion sowie Radialabduktion der verunfallten Seite, bei Ulnarabduktion und der a.-p.-Aufnahme zusätzlich im Vergleich zu der gesunden Gegenseite, sowie der SL- und RL-Winkel in der seitlichen Aufnahme der verunfallten Hand und jeweilige Unterteilung der SL-Band-Läsion nach Geissler bzw. Grad 0 falls keine SL-Band-Läsion vorlag [111].

|   | Grad nach Geissler Klassifikation | Gültige Anzahl | Mittelwert | Standard Abweichung | Minimum (25. Perzentile) | Median | Maximum (75. Perzentile) | P-Werte   |
|---|-----------------------------------|----------------|------------|---------------------|--------------------------|--------|--------------------------|-----------|
| SL-Abstand in a.-p.-Aufnahme der betroffenen Seite        | 0*                                | 164            | 1,6        | 0,9                 | 0,2                      | 1,5    | 5,4                      | <0,001*** |
|   | I                                 | 9              | 2,0        | 1,4                 | 0,4                      | 1,4    | 4,6                      |           |
|   | II                                | 18             | 2,5        | 1,2                 | 0,8                      | 2,3    | 5,3                      |           |
|   | III                               | 27             | 2,6        | 1,4                 | 0,4                      | 2,8    | 5,4                      |           |
|   | IV                                | 96             | 3,1        | 1,7                 | 0,4                      | 2,9    | 8,9                      |           |
| SL-Abstand in a.-p.-Aufnahme der gesunden Gegenseite      | 0*                                | 76             | 1,4        | 0,8                 | 0,2                      | 1,3    | 5,4                      |           |
|   | I                                 | 5              | 2,1        | 0,8                 | 0,6                      | 2,5    | 2,6                      |           |
|   | II                                | 12             | 1,8        | 1,2                 | 0,7                      | 1,4    | 4,7                      |           |
|   | III                               | 14             | 2,0        | 1,1                 | 0,7                      | 1,9    | 4,3                      |           |
|   | IV                                | 54             | 2,2        | 1,1                 | 0,5                      | 2,0    | 5,7                      |           |
| SL-Abstand in Ulnarabduktion der betroffenen Seite        | 0*                                | 132            | 2,36       | 1,30                | 0,50                     | 2,15   | 8,30                     | <0,001**  |
|   | I                                 | 10             | 3,67       | 1,61                | 1,80                     | 3,65   | 7,10                     |           |
|   | II                                | 19             | 3,09       | 1,22                | 1,10                     | 3,20   | 5,40                     |           |
|   | III                               | 25             | 3,30       | 1,49                | 0,70                     | 3,20   | 6,60                     |           |
|   | IV                                | 98             | 4,47       | 2,05                | 0,80                     | 4,15   | 10,20                    |           |
| SL-Abstand in Ulnarabduktion der gesunden Gegenseite      | 0*                                | 124            | 2,08       | 0,90                | 0,20                     | 1,90   | 6,00                     | <0,001*** |
|   | I                                 | 9              | 2,59       | 0,81                | 1,50                     | 2,70   | 3,80                     |           |
|   | II                                | 19             | 2,57       | 0,92                | 0,80                     | 2,40   | 4,50                     |           |
|   | III                               | 26             | 2,73       | 1,27                | 0,50                     | 2,40   | 5,50                     |           |
|   | IV                                | 92             | 2,92       | 1,25                | 0,60                     | 2,80   | 6,10                     |           |
| SL-Abstand in Radialabduktion der betroffenen Seite       | 0*                                | 126            | 1,82       | 0,82                | 0,40                     | 1,60   | 5,50                     | <0,001**  |
|   | I                                 | 10             | 2,33       | 0,61                | 1,30                     | 2,20   | 3,30                     |           |
|   | II                                | 20             | 2,27       | 1,08                | 0,80                     | 2,00   | 4,60                     |           |
|   | III                               | 24             | 2,42       | 1,10                | 0,60                     | 2,20   | 4,50                     |           |
|   | IV                                | 94             | 2,47       | 1,21                | 0,30                     | 2,25   | 5,70                     |           |
| SL-Winkel in der lateralen Aufnahme der betroffenen Seite | 0*                                | 218            | 57,1       | 13,0                | 24,0                     | 56,2   | 107,0                    | <0,001**  |
|   | I                                 | 10             | 60,1       | 14,1                | 41,9                     | 59,8   | 79,2                     |           |
|   | II                                | 23             | 54,8       | 11,9                | 36,8                     | 52,5   | 94,2                     |           |
|   | III                               | 27             | 66,3       | 13,7                | 35,7                     | 65,0   | 88,0                     |           |
|   | IV                                | 99             | 72,8       | 12,8                | 36,4                     | 74,6   | 97,9                     |           |
| RL-Winkel in der lateralen Aufnahme der betroffenen Seite | 0*                                | 221            | 11,5       | 9,4                 | 0,2                      | 9,2    | 46,6                     | 0,153**   |
|   | I                                 | 10             | 10,8       | 11,3                | 1,0                      | 7,9    | 36,8                     |           |
|   | II                                | 23             | 8,5        | 7,2                 | 0,2                      | 6,2    | 23,3                     |           |
|   | III                               | 29             | 14,2       | 11,1                | 0,1                      | 14,4   | 33,8                     |           |
|   | IV                                | 102            | 13,1       | 9,5                 | 0,4                      | 11,7   | 47,7                     |           |

\*keine SL-Band-Läsion in der Arthroskopie \*\*Kruskal-Wallis-Test, \*\*\* Wilcoxon Test

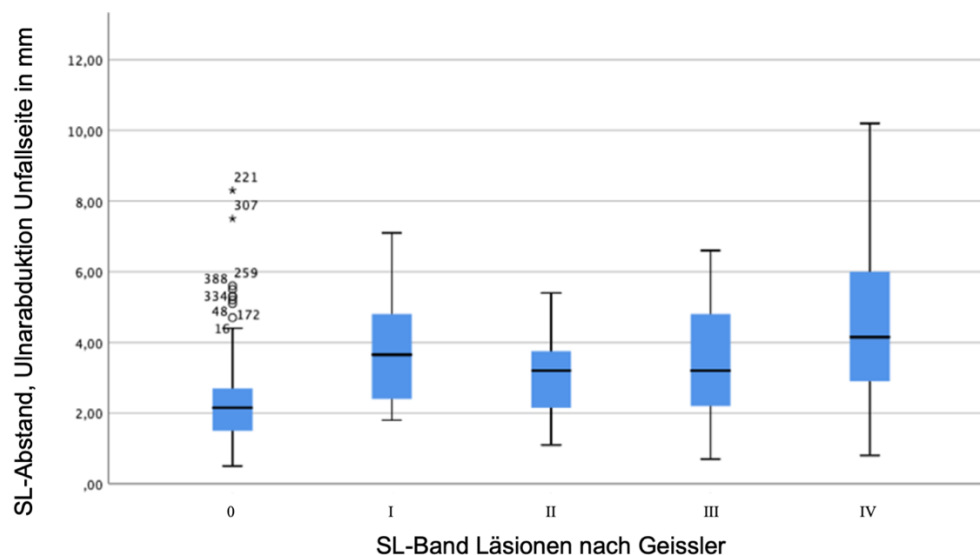
Abbildung 10: Box Plot mit den jeweiligen SL-Abständen auf den a.-p.-Aufnahmen bei jeweiliger SL-Band-Ruptur nach Geissler bzw. ohne SL-Band-Ruptur (Grad 0).



Konnte keine SL-Band-Läsion festgestellt werden, betrug der Median des SL-Abstandes in der a.-p.-Aufnahme 1,5 mm, der Median für Grad-I-Läsionen 1,4 mm und für Grad-IV-Läsionen 2,9 mm. Auf der gesunden Gegenseite ergab der Median in der a.-p.-Aufnahme für Patienten ohne SL-Band-Läsionen auf der verunfallten Seite 1,3 mm, bei Grad-I-Läsionen auf der verunfallten Seite 2,5 mm sowie bei Grad-IV-Läsionen auf der Gegenseite 2,0 mm.

Ob der SL-Abstand in der a.-p.- Aufnahme mit dem Grad der SL-Band-Läsion zusammenhängt, wurde mit dem Kruskal-Wallis-Test für unabhängige Stichproben getestet. Der p-Wert war  $< 0,001$  und ist somit auffällig klein, weshalb davon ausgegangen wird, dass sich die Grade der SL-Band-Läsion bzgl. des SL-Abstandes in der a.-p.-Aufnahme unterscheiden (Tabelle 12).

Abbildung 11: Box Plot mit den jeweiligen SL-Abständen bei Ulnarabduktion bei jeweiliger SL-Band-Ruptur nach Geissler bzw. ohne SL-Band-Ruptur (Grad 0) [111].



Konnte keine SL-Band-Läsion festgestellt werden, betrug der Median des SL-Abstandes in Ulnarabduktion 2,15 mm. Für Grad-I-Läsionen betrug der Median 3,65 mm und für Grad-4-Läsionen 4,15 mm.

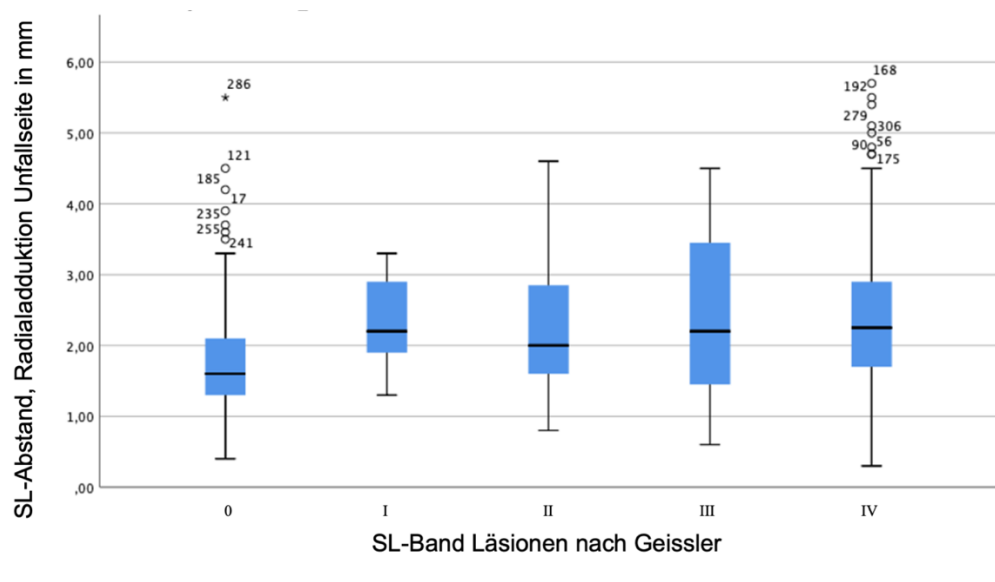
Auf der gesunden Gegenseite ergab der Median 2,8 mm in Ulnarabduktion bei Patienten mit einer Grad-IV-Läsion auf der verunfallten Gegenseite und 1,9 mm, falls keine SL-Band-Läsion auf der Gegenseite vorlag.

Ob der SL-Abstand in Ulnarabduktion mit dem Grad der SL-Band-Läsion zusammenhängt, wurde mit dem Kruskal-Wallis-Test für unabhängige Stichproben getestet. Der p-Wert war  $< 0,001$  und ist somit auffällig klein, weshalb davon ausgegangen wird, dass sich die Grade der SL-Band-Läsion bzgl. des SL-Abstandes bei Ulnarabduktion unterscheiden (Tabelle 12).

Ob der SL-Abstand in Ulnarabduktion auf der Unfallseite mit dem auf der gesunden Gegenseite zusammenhängt bzw. korreliert, wurde mit dem Wilcoxon-Test für verbundene Stichproben getestet. Der p-Wert war  $< 0,001$  und ist somit auf-

fällig klein. Daraus kann geschlossen werden, dass sich der SL-Abstand in Ul-  
narabduktion bei vorliegender SL-Band-Läsion unterscheidet im Vergleich mit  
der gesunden Gegenseite.

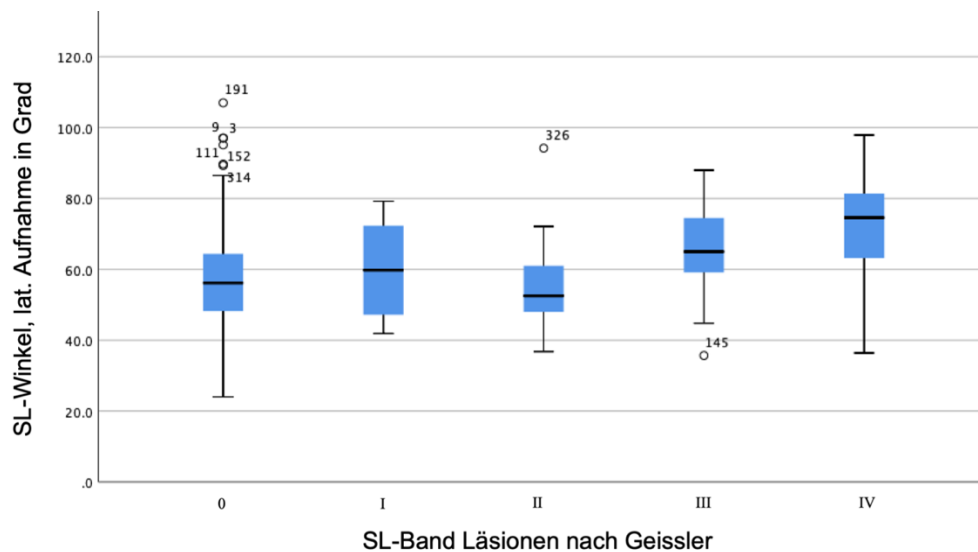
Abbildung 12: Box Plot mit den jeweiligen SL-Abständen in Radialabduktion bei  
jeweiliger SL-Band-Ruptur nach Geissler bzw. ohne SL-Band-Ruptur (Grad 0).



Konnte keine SL-Band-Läsion festgestellt werden, betrug der Median des SL-  
Abstandes in Radialabduktion 1,6 mm. Der Median für Grad-I-Läsionen betrug  
2,2 mm und für Grad-IV-Läsionen 2,25 mm.

Ob der SL-Abstand in Radialabduktion mit dem Grad der SL-Band-Läsion zu-  
sammenhängt, wurde mit dem Kruskal-Wallis-Test für unabhängige Stichproben  
getestet. Der p-Wert war  $< 0.001$  und ist somit auffällig klein, weshalb davon aus-  
gegangen wird, dass sich die Grade der SL-Band-Läsion bzgl. des SL-Abstandes  
in Radialabduktion unterscheiden (Tabelle 12).

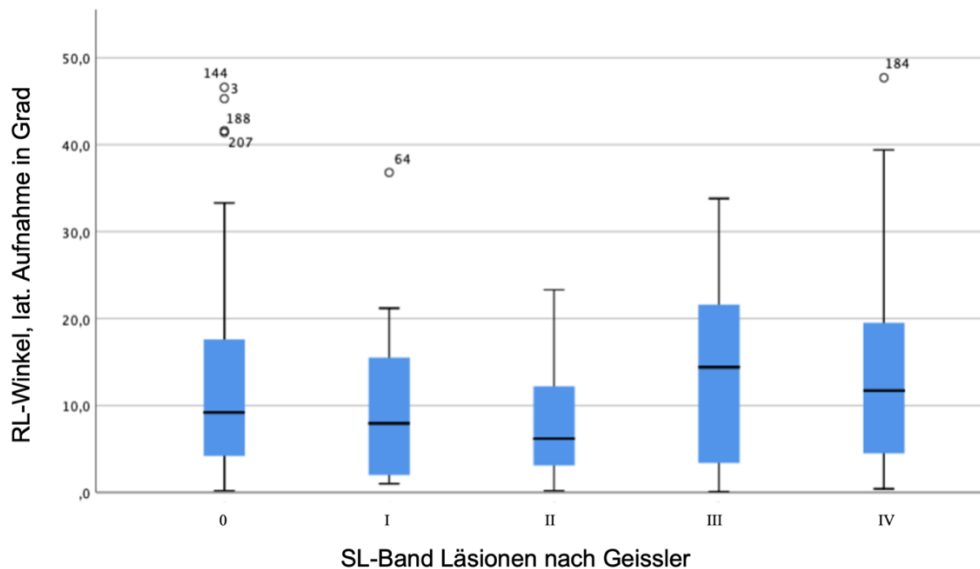
Abbildung 13: Box Plot mit den jeweiligen SL-Winkeln auf den lateralen Aufnahmen bei jeweiliger SL-Band-Ruptur nach Geissler bzw. ohne SL-Band-Ruptur (Grad 0) [111].



Der Median des SL-Winkels in der lateralen Aufnahme für die Unfallhand ohne SL-Band-Läsion ergab 56,2 Grad. Grad I Läsionen hatten einen Median von 59,8 Grad und Grad IV Läsionen einen Median von 74,6 Grad.

Ob der SL-Winkel in den seitlichen Aufnahmen mit dem Grad der SL-Band-Läsion zusammenhängt, wurde mit dem Kruskal-Wallis-Test für unabhängige Stichproben getestet. Der p-Wert war  $< 0,001$  und ist somit auffällig klein, weshalb davon ausgegangen wird, dass sich die Grade der SL-Band-Läsion bzgl. des SL-Winkels in den seitlichen Aufnahmen unterscheiden (Tabelle 12).

Abbildung 14: Box Plot mit den jeweiligen RL-Winkeln auf den lateralen Aufnahmen bei jeweiliger SL-Band-Ruptur nach Geissler bzw. ohne SL-Band-Ruptur (Grad 0) [111].



Der Median des RL-Winkels in der lateralen Aufnahme für die Unfallhand ohne SL-Band-Läsion ergab 9,2 Grad. Grad-III-Läsionen hatten einen Median von 14,4 Grad und Grad-IV-Läsionen einen Median von 11,7 Grad.

Ob der RL-Winkel in den seitlichen Aufnahmen mit dem Grad der SL-Band-Läsion zusammenhängt, wurde mit dem Kruskal-Wallis-Test für unabhängige Stichproben getestet. Der p-Wert für den RL-Winkel lag bei 0,15, weshalb davon ausgegangen wird, dass sich die Grade der SL-Band-Läsion bzgl. des RL-Winkel nicht unterscheiden (Tabelle 12).

### 3.4. Trennwerte und diagnostische Güte

Tabelle 13: Diagnostische Genauigkeit bei jeweiligem Cut-off-Wert sowie Darstellung der Diagnostischen Güte.

|  | Sensitivität | Spezifität | PVW    | NVW    | AUC  |
|--|--------------|------------|--------|--------|------|
| SL-Abstand a.-p. bei Trennwert 2,35mm          | 60,7 %       | 84,1 %     | 77,8 % | 70,1 % | 0,75 |
| SL-Abstand Ulnarabduktion bei Trennwert 2,75mm | 73,0 %       | 75,8 %     | 77,6 % | 70,9 % | 0,77 |
| SL-Abstand Radialabduktion bei 1,85mm          | 65,5 %       | 61,9 %     | 66,9 % | 60,5 % | 0,68 |
| SL-Winkel laterale Aufnahme bei Trennwert 60°  | 70,4 %       | 66,1 %     | 60,2 % | 75,4 % | 0,72 |
| RL-Winkel laterale Aufnahme bei Trennwert 5,3° | 70,1 %       | 34,8 %     | 44,4 % | 61,1 % | 0,53 |

PVW= positiver Vorhersagewert, NVW= negativer Vorhersagewert, AUC= Area under the curve

Es wurden ROC-Kurven (Abbildung 15) für die einzelnen Verfahren aufgestellt und daraus Trennwerte abgeleitet, bei welchen sich das beste Verhältnis von Sensitivität und Spezifität ergab. In Tabelle 13 sind die Werte für die diagnostische Genauigkeit für den jeweiligen Cut-off-Wert für den SL-Abstand in a.-p.-Projektion und in Ulnar- bzw. Radialabduktion sowie die SL- und RL-Winkel in der lateralen Aufnahme dargestellt. Die Werte wurden explorativ gewählt.

Es ergab sich bei einem SL-Abstand von 2,75 mm in Ulnarabduktion eine Sensitivität von 73 % und eine Spezifität von 75,8 %. Dies bedeutet, dass bei diesem Cut-off-Wert 111 von 152 Patienten aufgrund des Röntgenbildes mit einer SL-



Band-Läsion richtig erkannt wurden. Gleichzeitig sind 100 von 132 ohne SL-Band-Läsion als richtig negativ eingeordnet worden.

Für den SL-Abstand in der a.-p.-Projektion ergab sich das beste Verhältnis von Sensitivität (60,2 %) und Spezifität (84,1 %) bei einem SL-Abstand von 2,35 mm. Somit wären 138 von 164 Patienten ohne SL-Band-Läsion auch als solche bei einem SL-Abstand von 2,35 erkannt worden. 91 von 150 Patienten mit einer SL-Band-Läsion wären als richtig positiv erkannt worden.

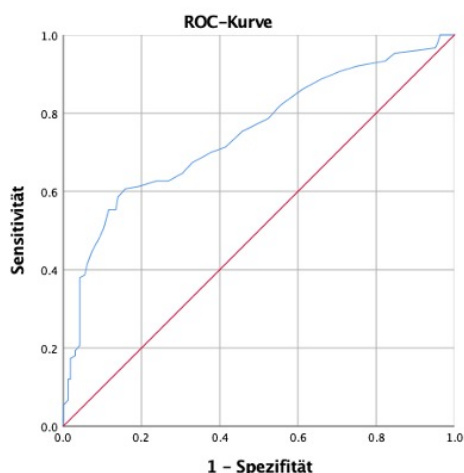
Für den SL-Abstand in Radialabduktion ergab sich bei einem Trennwert von 1,85 mm eine Sensitivität von 65 % und eine Spezifität von 62 %. 97 von 148 Patienten wurden anhand des Röntgenbildes korrekterweise mit einer SL-Band-Läsion diagnostiziert. Bei 78 von 126 Patienten wurde richtig erkannt, dass keine SL-Band-Pathologie vorlag.

Bei einem Trennwert von 60 Grad ergab sich bei dem SL-Winkel eine Sensitivität von 70 % und eine Spezifität von 66 %. Von 159 wurden 112 Patienten anhand des SL-Winkels von 60 Grad in der seitlichen Aufnahme richtig mit einer SL-Band-Ruptur diagnostiziert, während 144 von 218 korrekterweise als richtig negativ eingeordnet wurden.

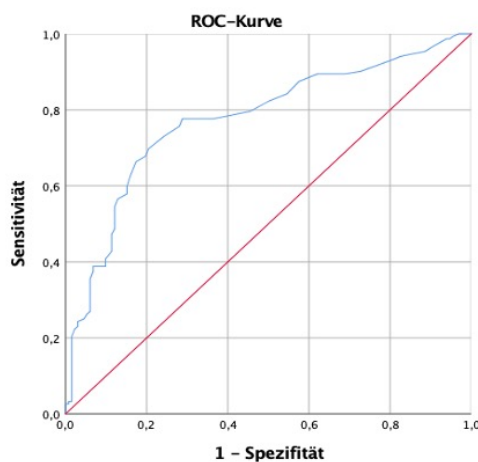
Für den RL-Winkel in lateraler Aufnahme ergab ein Trennwert von 5,3 Grad eine Sensitivität von 70 % und eine Spezifität von 35 %. Dies bedeutet, dass von den 221 Patienten ohne SL-Band-Läsion 77 einen RL-Winkel  $<5,3$  Grad hatten. Gleichzeitig wurden 115 von 164 Patienten mit einer SL-Band-Läsion bei einem RL-Winkel  $>5,3$  Grad richtig als solche erkannt.

Abbildung 15: Darstellung der ROC-Kurve für den SL-Abstand in der a.-p.-Aufnahme, in Ulnarabduktion und Radialabduktion sowie der SL-Winkel in der seitlichen Aufnahme [111].

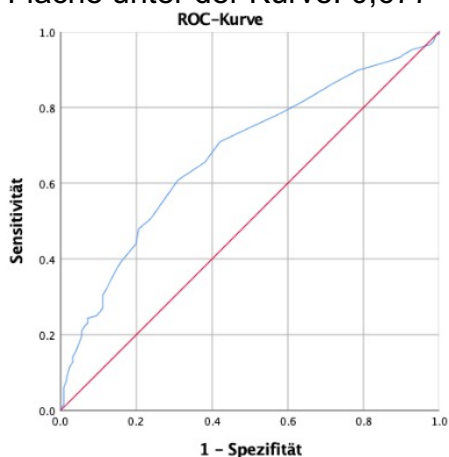
ROC-Kurve SL-Abstand in  
a.-p.-Aufnahme  
Fläche unter der Kurve: 0,748



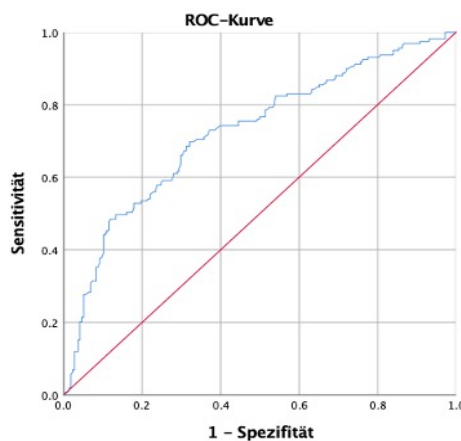
ROC-Kurve SL-Abstand in  
Ulnarabduktion  
Fläche unter der Kurve: 0,775



ROC-Kurve SL-Abstand in  
Radialabduktion  
Fläche unter der Kurve: 0,677



ROC-Kurve SL-Winkel in der  
seitlichen Aufnahme  
Fläche unter der Kurve: 0,724



Der SL-Abstand in der a.-p.-Projektion sowie in Ulnarabduktion sowie der SL-Winkel in der lateralen Projektion haben sich als radiologische Parameter mit dem höchsten Diagnostischen Wert erwiesen (Tabelle 13).

Die „Area under the Curve“ (AUC), welche eine allgemeine Aussage über die diagnostische Güte eines Verfahrens gibt, ergab den besten Wert mit 0,77 für

den SL-Abstand in Ulnarabduktion. Das bedeutet, dass in 77,0 % der Fälle mit diesem Verfahren die richtige Diagnose einer SL-Band-Läsion Grad I-IV nach Geissler gestellt werden kann. Ebenso gute Ergebnisse erzielten der SL-Abstand in der a.-p.-Aufnahme mit einer AUC von 0,75 sowie der SL-Winkel in der lateralen Aufnahme mit einer AUC von 0,72. Ungünstiger fiel die AUC für den SL-Abstand in Radialabduktion (AUC 0,68) sowie der RL-Winkel in der lateralen Aufnahme aus (AUC 0,53) [111] (Tabelle 13 sowie Abbildung 15).

### **3.5. Kombination der Diagnostik**

Es wurden verschiedene klinische und radiologische Verfahren miteinander kombiniert, welche im klinischen Alltag in den meisten Kliniken relativ einfach umzusetzen waren und jeweils gute Ergebnisse hinsichtlich der diagnostischen Genauigkeit ergaben.

Bei Kombination eines positiven MRT-Befundes und eines SL-Abstandes in Ulnarabduktion bei einem Cut-off-Wert von 2,75 mm unter der Bedingung, dass mindestens eines der beiden positiv sein muss, um eine SL-Band-Läsion zu diagnostizieren, konnte eine Sensitivität von 95,6 % erreicht werden (Tabelle 14). Somit wurden bei einer Kombination der beiden Verfahren von 136 Patienten mit einer SL-Band-Läsion 130 richtig erkannt. Bei einer alleinigen MRT-Untersuchung konnte eine Sensitivität von 80,3 % und in der SL-Abstands-Bestimmung in Ulnarabduktion bei einem Cut-off-Wert von 2,75 mm eine Sensitivität von 73 % erreicht werden (Tabelle 13). Im Gegenzug dazu ergab die Spezifität bei einer Kombination von MRT und Röntgen in Ulnarabduktion mit der Voraussetzung, dass beide negativ sein müssen, einen Wert von 60,9 %. Von den 87 Patienten ohne eine vorliegende SL-Band-Läsion wurden 53 bei beiden radiologischen Verfahren als negativ erkannt. Der NVW liegt bei 89,8 %. Die alleinige Röntgenuntersuchung in Ulnarabduktion mit einem Cut-off-Wert von 2,75 mm ergab eine Spezifität von 75,8 % (Tabelle 13), während die alleinige MRT-Bildgebung eine Spezifität von 94,4 % ergab.

*Tabelle 14: Diagnostische Genauigkeit bei Kombination von Diagnostischen Verfahren*

| Diagnostisches Verfahren                                    | Gültige Anzahl | Sensitivität | Spezifizität | PVW    | NVW    |
|---|----------------|--------------|--------------|--------|--------|
| SL-Abstand in Ulnarabduktion (Cut Off 2,75mm) + MRT         | 223            | 95,6 %       | 60,9 %       | 79,3 % | 89,8 % |
| SL-Abstand in Ulnarabduktion (Cut Off 2,75mm) + Watson-Test | 175            | 93,7 %       | 29,2 %       | 77,8 % | 63,6 % |

PVW= positiver Vorhersagewert, NVW= negativer Vorhersagewert

Auch die Kombination von SL-Abstand in Ulnarabduktion konnte gute Ergebnisse zeigen. Hier wurde der Cut-off-Wert von 2,75 mm gewählt sowie ein positiver Watson-Test in der klinischen Untersuchung unter der Bedingung, dass mindestens eines der beiden positiv sein muss, um eine SL-Band-Läsion zu diagnostizieren. Der alleinige Watson-Test konnte lediglich eine Sensitivität von 54,2 % erreichen. In Kombination mit dem SL-Abstand in Ulnarabduktion bei einem Cut-off-Wert von 2,75 mm konnte eine Sensitivität von 93,7 % erreicht werden (Tabelle 14). Somit wurden bei einer Kombination der beiden Verfahren von 127 Patienten mit einer SL-Band-Läsion 119 richtig erkannt. Im Gegenzug dazu ergab die Spezifität bei einer Kombination des Watson-Tests und Röntgen in Ulnarabduktion mit der Voraussetzung, dass beide negativ sein müssen, einen Wert von 29,9 %. Von 48 Patienten ohne eine SL-Band-Läsion wurden 14 bei beiden Tests als negativ erkannt. Der alleinige Watson-Test ergab eine Spezifität von 88,9 %.

#### 4. Diskussion

Ziel dieser Arbeit war es, eine Empfehlung für die Entscheidungsfindung hinsichtlich des weiteren Procederes bei Verdacht auf eine SL-Band-Läsion für den klinischen Alltag zu formulieren. Hierfür wurden die klinische, röntgenologische und MRT-Diagnostik analysiert und mit den intraoperativen Befunden der Arthroskopie verglichen.

In Bezug auf das Material wurden die Daten von insgesamt 414 Patienten analysiert. Der Median der Altersverteilung bei Patienten ohne eine SL-Band-Läsion lag bei 42 Jahren. Der Median für Geissler-Grad-IV-Läsionen lag bei 49 Jahren. In der Literatur zeigte sich insgesamt ein höheres Durchschnittsalter zwischen 55-67 Jahren [21, 112, 113]. In diesen Studien handelt es sich zum Teil um Kadaverstudien, weshalb sich das höhere Alter erklären lässt. Zudem könnte das spezielle Patientengut einer BG-Klinik eine weitere Rolle spielen.

Bei Betrachtung der Seitenverteilung war in 56 % der Fälle die rechte und in 44 % der Fälle die linke Seite betroffen. 73 % des Patientenkollektivs war männlich und 27 % weiblich. Die Verteilung deckt sich mit den Daten anderer Arbeiten. Hier wird ein Anteil an männlichen Patienten zwischen 65-80 % beschrieben [21, 113]. Ursächlich hierfür könnte sein, dass Männer tendenziell häufiger handwerkliche Berufe ausüben oder in Risikobereichen arbeiten.

In dieser Arbeit konnte bei insgesamt 176 Patienten von 414 mit Beschwerden im Bereich des Handgelenkes eine SL-Band-Läsion nachgewiesen werden. Dies macht einen Anteil von 42,5 % aus.

In der Literatur werden Inzidenzen von 14-75 % bei SL-Band-Rupturen im Rahmen von Handgelenksbeschwerden beschrieben [5-9, 18]. Diese Kontroverse ist darin begründet, dass SL-Band-Rupturen häufig übersehen werden oder im Rahmen von Begleitverletzungen, beispielsweise distalen Radiusfrakturen oder Skaphoidfrakturen, vorkommen [7, 10-14]. In einer Studie mit 393 untersuchten Personen konnte lediglich in 28 % der Fälle ein SL-Band-Läsion nachgewiesen

werden, wobei sich die Studie hinsichtlich des Aufbaus grundsätzlich von unserer unterscheidet, da dort Leichenpräparate untersucht wurden [112]. Picha et al. konnten bei 124 Patienten mit auffälligen SL-Abständen bzw. SL-Winkeln in 11 % eine SL-Dissoziation nachweisen, ohne dass diese zwingend Handgelenksbeschwerden aufwiesen [113]. Unser Patientenkollektiv wurde gezielt bei Handgelenksbeschwerden untersucht, wodurch sich die höhere Anzahl an SL-Band-Rupturen erklären lässt.

Unterteilt wurden die SL-Band-Läsionen in dieser Arbeit in die vier Stadien nach Geissler [95]. Innerhalb dieser Stadien zeigte sich folgende Verteilung: Die Geissler-Grad-IV-Verletzung fand sich mit 63 % aller SL-Band-Läsionen am häufigsten. Gefolgt von Grad-III-Verletzungen mit 16,5 %, Grad-II-Läsionen mit 13,7 % und Grad-I-Läsionen mit 6,8 %. Die hohe Anzahl an Patienten mit Grad-III und -IV-Läsionen lässt sich mit dem Studiendesign erklären. Es wurden Patienten ausgewählt, bei denen aufgrund ihrer Beschwerden eine Arthroskopie des Handgelenks erfolgte. Patienten mit niedriggradigen SL-Band-Rupturen (Typ I und II) zeigen weniger klinische Beschwerden und radiologische Auffälligkeiten [113]. Folglich erhalten diese Patienten seltener eine diagnostische Arthroskopie.

Neben der primär untersuchten SL-Band-Verletzungen konnten diverse Begleitverletzungen erfasst werden. Dies umfasst unter anderem LT-Band-Rupturen, distale Radius- und Skaphoidfrakturen sowie die Entwicklung einer Radiocarpalarthrose.

LT-Band-Rupturen konnten in der vorliegenden Arbeit insgesamt bei 29 Patienten (7 %) nachgewiesen werden.

In einer retrospektiven Studie an Kadavern, bei welcher Pathologien im Bereich des Handgelenkes untersucht wurden, konnte eine Inzidenz von 36 % für LT-Band-Verletzungen festgestellt werden. Die Inzidenz der gleichzeitigen SL-Band-Ruptur wurde jedoch nicht beschrieben [112]. Insgesamt scheint die LT-Bandruptur selten als Begleitverletzung der SL-Band-Ruptur vorzukommen (11,9 %).

Ursächlich hierfür könnte der unterschiedliche Unfallmechanismus sein: LT-Bandverletzungen entstehen insbesondere durch den Sturz auf das überstreckte Handgelenk, also Extension, Radialabduktion und gleichzeitige Pronation [73, 76]. SL-Bandverletzungen können jedoch - neben einem Sturz auf das überstreckte Handgelenk - auch durch Sturz auf den ausgestreckten Arm mit überstrecktem Handgelenk, also Extension, Ulnarabduktion und Supination entstehen [73, 114].

Innerhalb des Patientenkollektivs lagen insgesamt 17 Skaphoidfrakturen, 8 extraartikuläre und 13 intraartikuläre Radiusfrakturen vor. Alle Frakturen konnten in direkten Zusammenhang mit dem Unfallereignis gebracht werden. Bei 2,9 % aller SL-Band-Läsionen konnte als Begleitverletzung eine Skaphoidfraktur, bei 5 % eine intraartikuläre und bei 0,8 % eine extraartikuläre Radiusfraktur diagnostiziert werden. Jedoch konnte bei 29,4 % der Skaphoidfrakturen, bei 46,2 % der intraartikulären sowie bei 12,5 % der extraartikulären Radiusfrakturen eine begleitende SL-Band-Läsion nachgewiesen werden. Ein direkter Zusammenhang zwischen Skaphoid- oder distalen Radiusfrakturen und SL-Band-Läsionen konnte im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht nachgewiesen werden.

In der Literatur zeigt sich hingegen, dass intraartikuläre distale Radiusfrakturen oder Skaphoidfrakturen zu SL-Band-Läsionen führen [5, 10, 11, 13, 60].

Innerhalb der Patientengruppe mit SL-Band-Läsionen konnte bei 55,7 % eine Radiocarpalarthrose festgestellt werden. Es konnte ein starker Zusammenhang zwischen einer SL-Band-Läsion und Radiocarpalarthrose in unserer Arbeit nachgewiesen werden. Diese Zahlen entsprechen der Literatur. Picha et al. beschrieben in ihrer Studie mit insgesamt 124 Patienten mit auffälligen SL-Spalt oder SL-Winkel eine Radiocarpalarthrose in 50 % der Fälle. Bei 49 % der Patienten war ein Trauma erinnerlich [113]. In einer anderen Studie mit einem Durchschnittsalter von 67 Jahren wurde ein ähnlich hoher Wert mit 58 % beschrieben. Allerdings wurde der Anteil der Patienten mit Radiocarpalarthrose bei gleichzeitig vorliegender SL-Band-Läsion nicht erhoben [112]. Dass die Radiocarpalarthrose jedoch

häufig im Rahmen von SL-Band Rupturen vorkommt, lässt sich anhand der Stadien der SL-Instabilität nach Wolfe [16] gut nachvollziehen. Die SLAC-Wrist stellt das Endstadium der SL-Instabilität dar [16].

An präoperativer klinischer Diagnostik wurden in unserer Arbeit der Watson-Test sowie die Bewegungsausmaße des Handgelenkes, soweit bei retrospektiver Untersuchung vorhanden, eingeschlossen.

Der Watson-Test wurde bei 75 Patienten präoperativ dokumentiert. Die Sensitivität betrug 54.2 % und die Spezifität 88.9 %. In der Literatur wird auch ein laxer Bandapparat mit einem positiven Watson-Test assoziiert. In 32 % der Fälle ergab sich ein positiver Watson-Test ohne Pathologie. Zu 68 % betraf dies auch die Gegenseite [115]. Diese Ergebnisse könnten zum Hinterfragen der Sinnhaftigkeit des Watson-Test führen. Ozelik et al. beschrieben, dass erst eine zusätzliche Durchtrennung des Ligamentum radioscaphocapitatum neben der Durchtrennung des SL-Band zu einer karpalen Instabilität und positivem Watson Test führt [116]. Eine Verletzung von sekundären Stabilisatoren wurde auf Grund des Studiendesigns und der vorhandenen Daten nicht erfasst, weshalb sich diesbezüglich kein Vergleich herstellen lässt. Der alleinige Watson-Test scheint als Screeningmethode für SL-Band-Rupturen nicht geeignet. Ursächlich hierfür könnte unter anderem sein, dass sich dieser Test in der Klinik bei einem akuten Trauma häufig aufgrund der Schmerzen seitens des Patienten nicht durchführen lässt. Darüber hinaus ist er untersucherabhängig.

Die meisten Bewegungseinschränkungen konnten bei einer vorliegenden SL-Band-Läsion bei Extension/ Flexion beschrieben werden, mit einem Verlust von etwa 10 Grad an Beweglichkeit. In Ulnarabduktion liegt ein Verlust von 5 Grad Beweglichkeit vor. Pronation und Supination scheinen von einer SL-Band-Läsion nicht wesentlich beeinträchtigt zu werden. Dies könnte daran liegen, dass bei Pro- und Supination auch die Radioulnargelenke sowie das Glenohumeralgelenk eine wichtige Rolle spielen [47] und somit eine Pathologie im Bereich des Karpus kompensieren können.



In dieser Arbeit wurden Röntgenbilder sowie präoperativ vorliegende MRT-Befunde analysiert. Aus Gründen der besseren Übersicht werden nun zuerst die Ergebnisse der Auswertung der Röntgendiagnostik diskutiert und anschließend die der MRT-Diagnostik, bevor danach die verschiedenen Verfahren in Kombination mit der klinischen Diagnostik dargestellt werden.

In Bezug auf die Methodik wurde zur einheitlichen Gestaltung und zum Erzeugen einer Vergleichbarkeit in unserer Untersuchung der SL-Abstand nach Schimmerl [18] in Ulnar- sowie Radialabduktion, sowie in den a.-p.-Aufnahmen untersucht. Der SL- und RL-Winkel in den lateralen Aufnahmen wurde nach Larsen bestimmt [80].

Schimmerl et al. verglichen die SL-Abstände von 40 Handgelenken, die an jeweils drei verschiedenen Punkten mittig bzw. jeweils proximal und distal zwischen dem Os scaphoideum und Os lunatum gemessen wurden. Es konnten drei verschiedene anatomische Varianten der kortikalen Konfiguration innerhalb des SL-Gelenkes beobachtet werden. Am häufigsten zeigte sich eine parallel-kongruente Fläche (78 %), gefolgt von der invertierten Y-Konfiguration (15%) und der mittig punktförmigen-Konfiguration (8%). Insgesamt kam die Studie zu dem Ergebnis, dass der mittig gemessene Abstand am schmalsten und somit am beständigsten sowie sensitivsten auch innerhalb der anatomischen Varianten war. Gleichzeitig postulierte der Autor, dass diese Messung am besten in den a.-p.-Aufnahmen bei gut einsehbarem SL-Spalt durchgeführt werden sollte. Bei Aufnahmen in Radial- bzw. Ulnarabduktion kann es durch gleichzeitige Flexion/ Extension zu einer verfälschten Projektion der karpalen Stellung und somit ungenauen Werten kommen [18]. Dies kann eine Erklärung für die differenten Angaben in der Literatur bezüglich des SL-Abstandes sein. Zu kritisieren ist jedoch, dass in der Studie von Schimmerl et al. die SL-Abstände in Ulnarabduktion nicht bestimmt und verglichen wurden [18].

Innerhalb der einzelnen Messverfahren zeigte sich in unserem Patientenkollektiv der Median des SL-Abstandes in allen Aufnahmen bei vorliegender SL-Band-Läsion Geissler I-IV erhöht im Vergleich zu einem unverletzten Handgelenk. Zudem stieg der Median des SL-Abstandes entsprechend dem Grad der SL-Band-Läsion nach Geissler an. Lediglich bei den Aufnahmen in Radialabduktion kam es zwischen Grad I und IV zu keinem wesentlichen Anstieg des SL-Abstandes. In den seitlichen Aufnahmen zeigten insbesondere Patienten mit einer Geissler-Grad III- und IV-Läsion einen erhöhten SL-Winkel. Es konnte ein direkter Zusammenhang zwischen einer SL-Band-Läsion und dem SL-Abstand in den a.-p.-Aufnahmen, den Aufnahmen in Ulnarabduktion, Radialabduktion sowie dem SL-Winkel in den seitlichen Aufnahmen festgestellt werden. Der RL-Winkel zeigte keinen direkten Zusammenhang mit dem Grad der SL-Band-Läsion. Das Os scaphoideum und das Os lunatum bewegen sich im Falle einer SL-Band-Verletzung in entgegengesetzte Richtungen. Durch den Druck des Os trapezium und trapezoideum rotiert das Os scaphoideum in Flexion [43, 63], während das Os lunatum in Extension nach palmar rotiert [19, 57, 63]. Dadurch erweitert sich der SL-Spalt und der SL-Winkel. Der RL-Winkel setzt sich aus der Radiuschaftachse und der Mondbeinachse zusammen. Da der Radius keine Stellungsänderung im Rahmen von SL-Band-Verletzungen erleidet, könnte dies erklären, weshalb sich ein geringer Unterschied bezüglich des RL-Winkels und des Grads der SL-Band-Läsion zeigte.

Das beste Verhältnis von Sensitivität und Spezifität ergab sich für den SL-Abstand in Ulnarabduktion bei einem Cut-off-Wert von 2,75 mm. Bei diesem Wert könnten 73 % der Patienten aufgrund des Röntgenbildes mit einer SL-Band-Läsion des Typs Geissler Grad I-IV richtig erkannt werden. Innerhalb der Patientenkohorte ohne SL-Band-Läsion wären 75,8 % richtig negativ eingeordnet worden und könnten so einem invasiven Eingriff mittels Arthroskopie entgehen.

In der a.-p.-Projektion schlagen wir einen Cut-off-Wert von 2,35 mm mit resultierender Sensitivität von 60,2 % und Spezifität von 84,1 % vor. Bezüglich des SL-Winkels schlagen wir, wie bereits in der Literatur weit verbreitet [19], einen Cut-

off-Wert von 60 Grad vor. Hier zeigte sich das beste Verhältnis mit einer Sensitivität von 70 % und einer Spezifität von 66 %. Bei insgesamt niedriger AUC für den SL-Abstand in Radialabduktion sowie dem RL-Winkel in der lateralen Aufnahme scheinen diese Werte weniger geeignet zur Diagnostik eines SL-Bandschadens. Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass sich für den SL-Abstand in Radialabduktion bei einem Trennwert von 1,85 mm eine Sensitivität von 65 % und eine Spezifität von 62 % ergab. Für den RL-Winkel in lateraler Aufnahme ergab ein Trennwert von 5,3 Grad eine Sensitivität von 70 % und eine Spezifität von 35 %.

Bezüglich den pathologischen Cut-off-Werte in der Röntgenbildgebung gibt es gemäß den vorliegenden Studien keine einheitliche Empfehlung. So kamen Schimmer-Metz et al. zu dem Ergebnis, dass ein SL-Spalt  $< 2\text{mm}$  gemessen in der Mitte der Gelenkränder zwischen Os scaphoideum und Os lunatum als nicht pathologisch gewertet werden darf. Zu erwähnen ist jedoch, dass hier MRT-Bilder ausgewertet wurden [18], somit lässt sich diese Technik nicht auf Röntgenbilder übertragen.

Sebald et al. beschrieben für DISI-Fehlstellungen einen pathologischen SL-Abstand ab  $> 2\text{mm}$ , auch wenn dieser zum Teil nur in Ulnarabduktion sichtbar war, sowie einen SL-Winkel  $> 70$  Grad und RL-Winkel  $> 15$  Grad. Zur Art der Messung des SL-Abstandes wurden in dieser Studie jedoch keine Angaben gemacht [21]. Belsole et al. beschrieben einen pathologische Abstand ab  $> 3\text{mm}$  [22].

Linscheid et al. werteten einen SL-Spalt  $> 2\text{mm}$  und einen SL-Winkel  $> 60$  Grad als pathologisch und beschrieben im Rahmen von skapholunären Dissoziationen eine durchschnittliche SL-Spalt-Erweiterung von 4 mm bei einem SL-Winkel von 90 Grad in den a.-p.- bzw. seitlichen Aufnahmen. Die verwendete Messtechnik wurde in dieser Studie jedoch ebenfalls nicht erwähnt [19].

Laut Gilula et al. ist ein SL-Winkel  $> 80$  Grad als pathologisch zu werten [57].

Cautilli et al. postulierten, dass ein SL-Abstand von bis zu 5 mm als normal zu werten sei. Der Abstand wurde in dieser Studie jedoch proximal, zwischen der am meisten ulnarseitigen Ecke des Os scaphoideum und der radialseitigsten Ecke des Os lunatum, gemessen [20].

Dornberger et al. wiederum legten einen SL-Abstand von 3 mm für a.-p.-Projektionen und 3,7 mm für Stecher-Aufnahmen fest, um SL-Band-Läsionen ab Grad III nach Geissler zu diagnostizieren [117].

Zusammenfassend zeigt sich, dass bezüglich des pathologischen SL-Abstandes und auch bezüglich des SL- bzw. RL-Winkels in der Literatur kein Konsens besteht. Es werden unterschiedliche Angaben bezüglich der Bestimmung des Abstandes, der aussagekräftigsten Aufnahme-Technik sowie bezüglich des gemessenen Abstandes gemacht [15, 18-22].

Gemäß vorliegender Studien kann auch ein laxer Bandapparat zu einer SL-Spalt-Verbreiterung mit entsprechenden Beschwerden führen [19, 23, 61], gegebenenfalls auch auf der gesunden Gegenseite [118]. Aus diesem Grund haben wir in unserer Arbeit auch den SL-Abstand in der a.-p.-Aufnahme sowie in Ulnarabduktion auf der nicht betroffenen Seite untersucht. Hier zeigten sich die SL-Abstände auf der gesunden Gegenseite niedriger als an der betroffenen Hand. Auffällig war jedoch, dass Patienten mit einer SL-Band-Läsion Grad IV auch auf der Gegenseite einen erhöhten SL-Abstand im Vergleich zu Patienten ohne SL-Band-Läsion aufzeigten (1,9 mm vs. 2,8 mm). Würde man bei diesen Patienten den von uns vorgeschlagenen Cut-off-Wert von 2,75 mm anwenden, hätte man dort fälschlicherweise bei isolierter Betrachtung der Röntgendiagnostik den Verdacht auf eine SL-Band-Ruptur gestellt. Dieses Phänomen wurde bereits in anderen Studien beschrieben.

Picha et al. verglichen die Röntgenaufnahmen von 124 Patienten mit pathologischen Röntgenbildern in a.-p. sowie lateraler Projektion (SL-Spalt > 5 mm und SL-Winkel >60 Grad) mit der Gegenseite. Insgesamt zeigte sich bei 44 % der Patienten auf der Gegenseite ein ebenso pathologischer SL-Spalt und bei 65 % der Patienten ein pathologischer SL-Winkel. Insgesamt zeigten 80 % aller Patienten auf der Gegenseite entweder einen pathologischen SL-Winkel oder SL-Abstand [113].

Auch Jones et al. konnten bei 19 Patienten mit einem pathologischen SL-Spalt (>2 mm) in a.-p.- sowie Funktionsaufnahmen diesen auch bei 14 Patienten auf

der gesunden Gegenseite nachweisen [65]. Im Gegenzug dazu führte bei Dornberger et al. die Untersuchung der Röntgenbilder der gesunden Gegenseite bei SL-Band-Läsion Grad III-IV zu keinem Informationsgewinn [117]. Dornberger hinterfragte als Folge die Sinnhaftigkeit eines Vergleichs der Röntgenbilder mit der gesunden Gegenseite [117]. Lichtmann et al. postulierten jedoch, dass DISI-Fehlstellung bei kongenitaler oder posttraumatischer Bandlaxizität vorkommen können [23]. Im Gegensatz zur Studie von Dornberger et al [117] wurden in unserer Studie auch Patienten mit länger bestehenden Beschwerden und SL-Band Läsion eingeschlossen, bei welchen beispielsweise in 35 % der Fälle kein Trauma vorausgegangen war. Somit könnte dies ein Erklärungsversuch für den erweiterten SL-Spalt auf der gesunden Gegenseite bei Patienten mit Geissler-Läsionen sein. Daher empfehlen wir, trotz der uneinheitlichen Studienlage in der Literatur, bei Patienten mit länger bestehenden Beschwerden ohne Trauma den röntgenologischen und klinischen Seitenvergleich zum Ausschluss einer durch Bandlaxizität verursachten SL-Instabilität.

Bezüglich der weiteren Methodik wurde die AUC für die Diagnostik einer SL-Band-Läsion an Röntgenbildern bestimmt. Die SL-Abstände, welche in Ulnarabduktion bestimmt wurden, zeigten die größte AUC und somit höchste diagnostische Güte mit einem Wert von 0,77. Dies bedeutet, dass in 77,0 % der Fälle mit diesem Verfahren die richtige Diagnose bei einer SL-Band-Läsion Grad I-IV nach Geissler gestellt werden könnte. Ähnlich gute Ergebnisse erzielten der SL-Abstand in der a.-p.-Aufnahme mit einer AUC von 0,75 sowie der SL-Winkel in der lateralen Aufnahme mit einer AUC von 0,72. Ungünstiger fiel die AUC für den SL-Abstand in Radialadduktion (AUC 0,68) sowie für den RL-Winkel in der lateralen Aufnahme aus (AUC 0,53) [111].

Insgesamt decken sich diese Ergebnisse mit der vorliegenden Literatur. Dornberger et al. untersuchten 72 Patienten mit arthroskopisch nachgewiesener Geissler-Läsion Grad III oder IV. Die beste diagnostische Güte bezüglich des SL-Abstands zeigte sich in der Stecher-Aufnahme (AUC 92,7 % bzw. 90,6 %), gefolgt von der a.-p.-Aufnahme, dem SL-Winkel und zuletzt dem RL-Winkel [117].

Die forcierte Ulnarabduktion führt zur Erweiterung des SL-Spaltes [19]. Zusätzlich wird durch den Faustschluss in der „clenched pencil view“ Kraft durch den Kopf des Os capitatum auf die skapholunäre Verbindung ausgeübt und eine eventuell vorhandene SL-Dissoziation kann besser sichtbar gemacht werden [19, 65]. Dies erklärt auch die bessere AUC bei Ulnarabduktion im Vergleich zur Radialabduktion.

Der Vollständigkeit halber muss kurz auf das Siegelringzeichen eingegangen werden, welches auch in der Literatur zur Diagnostik von SL-Band-Läsionen beschrieben wird. Dieses kam in dieser Arbeit hauptsächlich bei Geissler-Grad-IV-Läsionen (46,6 %) vor und ist mit einer Sensitivität von 34,4 % und einer Spezifität von 85,5 % nicht besonders geeignet als Screening-Methode für SL-Band-Läsionen. Diese Tatsache deckt sich auch mit den Ergebnissen anderer Studien [20]. Daher hat das Siegelringzeichen primär einen deskriptiven Charakter und sollte nicht zur Diagnostik eines SL-Band-Schadens verwendet werden.

Nun erfolgt die Diskussion der Auswertung der präoperativen MRT-Ergebnisse und deren Einordnung in die vorhandene Literatur sowie ihre klinische Bedeutung.

In unserer Studie lag bei insgesamt 285 Patienten eine präoperative MRT-Bildgebung vor. Im retrospektiven Abgleich der präoperativen MRT-Befunde mit den arthroskopisch festgestellten SL-Band-Läsionen konnte eine Sensitivität von 80,3 % und eine Spezifität von 94,4 % erreicht werden. Es konnte ein starker Zusammenhang zwischen positivem MRT-Befund und dem Vorliegen einer SL-Band-Läsion festgestellt werden.

In der Literatur werden für die MRT-Bildgebung Sensitivitäten zwischen 11-94 % genannt [88-92]. Ursächlich für die stark differierenden Zahlen kann neben der Erfahrung der Untersucher auch ein fehlender Standard in Bezug auf die MRT-Bildgebung sein. So macht es beispielsweise einen Unterschied, ob eine Handspule verwendet oder Kontrastmittel gegeben wurde [90]. Eine Alternative bietet die MRT-Arthrographie. Obwohl in der Literatur eine Spezifität zwischen 87-

100 % [85, 86] und eine Sensitivität zwischen 72-90 % [85, 86] in Bezug auf die Detektion von SL-Band-Schäden beschrieben werden, handelt es sich hierbei um eine invasive Methode. Hiermit verbunden besteht ein gewisses Infektionsrisiko. Zudem kann das Verfahren bei Kontraindikationen, z.B. bei einer Kontrastmittel-Allergie oder einer bestehenden Niereninsuffizienz, nicht angewandt werden.

Es wurden nun Verfahren mit guter Sensitivität kombiniert, um die Diagnose einer SL-Band-Schädigung mit hoher Wahrscheinlichkeit korrekt stellen zu können. In der vorliegenden Arbeit konnten die besten Sensitivitäten bei einer Kombination von klinischem Befund (Watson-Verschiebetest) oder MRT-Diagnostik und einem SL-Abstand in Ulnarabduktion  $> 2,75$  mm erreicht werden:

Die Sensitivität von MRT-Befund und SL-Abstand in Ulnarabduktion  $> 2,75$  mm erreichte 95,6 %. Bei Kombination von Watson-Verschiebetest sowie SL-Abstand  $> 2,75$  mm in Ulnarabduktion konnte eine Sensitivität von 93,7 % erreicht werden. Insgesamt eignen sich somit beide Kombinationen gut zur Diagnosestellung einer SL-Band-Läsion um anschließend die entsprechenden therapeutischen Schritte einzuleiten.

Gleichzeitig soll mit hoher Wahrscheinlichkeit sichergestellt sein, dass als gesund gescreente Patienten keine SL-Band-Läsion aufweisen. Der NVW gibt genau dieses an. Dieser Betrag in der Kombination von Röntgen in Ulnarabduktion sowie MRT 89,8 % und in der Kombination von Röntgen in Ulnarabduktion sowie Watson-Verschiebetest 77,8 %. Somit kann festgehalten werden, dass Patienten, bei denen beide Verfahren ein negatives Ergebnis erbringen, mit relativ hoher Wahrscheinlichkeit korrekt als negativ eingestuft und somit im Sinne eines Ausschlusses einer SL-Band-Läsion therapiert werden.

Abschließend muss auch auf Limitationen der Studie eingegangen und diese kritisch diskutiert werden.

Aufgrund des retrospektiven Studiendesigns wurde die klinische Untersuchung aus den präoperativen Untersuchungsbefunden erhoben. Diese wurden jedoch durch unterschiedliche Untersucher erbracht und lassen somit keine sichere Homogenität in Bezug auf die klinische Untersuchung zu. Zudem stellt die geringe Anzahl der Patienten mit präoperativem Watson-Test (75 Patienten) eine weitere Einschränkung dar. Somit sollten zukünftige Studien zu diesem Thema idealerweise ein prospektives Studiendesign, möglichst wenige Untersucher sowie standardisierte Diagnostik aufweisen.

In unserer Studie handelte es sich zum größten Teil um SL-Band-Verletzungen Typ Geissler III sowie IV (79,5 %). Da bei diesen Patienten nativradiologisch ein vergrößerter SL-Spalt bzw. -Winkel zu erwarten ist, könnte die große Repräsentanz dieser Patienten ggf. zu verfälscht hohen Werten führen. Andererseits spiegelt diese Verteilung gut den Klinikalltag wider, da Patienten mit geringfügigen SL-Band-Verletzungen aufgrund geringerer Beschwerden und seltenerer Behandlung in Kliniken häufig keine weitere Diagnostik mittels Arthroskopie erhalten und somit letztendlich häufig nicht oder erst in späteren Stadien diagnostiziert werden. Da sich bei diesen Patienten mit Teilrupturen vollständige Rupturen entwickeln können, [75] wäre eine zeitigere Detektierung der Patienten mit niedriggradigen SL-Band-Rupturen (Typ I und II) wünschenswert. Somit könnten diese Patienten frühzeitig der korrekten Therapie zugeführt und oben genannte Entwicklung hin zu einem schwereren Erkrankungsstadium vermieden werden.

Eine weitere Limitation der hier präsentierten Studie ist, dass es keinen definierten Grad für die Aufnahmen in Ulnarabduktion bzw. Radialabduktion gab, was eine Vergleichbarkeit mit anderen Arbeiten erschwert.

Die SL-Band-Läsionen wurden arthroskopisch lediglich nach Geissler und nicht nach EWAS klassifiziert. Die Einteilung nach Geissler lässt keine genaue Aussage zu, welcher Anteil des SL-Bandes gerissen ist. Lediglich bei Grad-IV-Läsionen steht fest, dass eine vollständige Ruptur incl. des dorsalen Anteils vorliegt [95]. Da sich jedoch Teilrupturen zu vollständigen SL-Band-Rupturen entwickeln



können, ist eine Identifizierung des betroffenen Anteiles und anschließend Einleitung einer korrekten Therapie essentiell [75]. Die neuere EWAS-Klassifikation fokussiert sich im Gegensatz dazu auf den Anteil des SL-Bandes welcher gerissen ist, und ist somit aussagekräftiger [75].

Bei der Betrachtung der Begleitverletzungen (distale Radius- und Skaphoidfrakturen) konnte keine statistische Signifikanz in Bezug auf SL-Band-Läsionen nachgewiesen werden. Zu berücksichtigen ist jedoch die sehr geringe Anzahl der Patienten mit oben genannten Begleitverletzungen, da diese Arbeit primär an Patienten mit SL-Band-Rupturen ausgerichtet war. In Anbetracht der Häufigkeit einer SL-Band-Ruptur als Begleitverletzung bei Skaphoid- und intraartikulären distalen Radiusfrakturen sollte diese jedoch unserer Meinung nach bei Auftreten dieser Verletzungen ausgeschlossen werden.

Angesichts der oben dargestellten Ergebnisse bezüglich der möglichen diagnostischen Schritte soll ein Algorithmus vorgeschlagen werden: Bei bekannt hoher Sensitivität sollte initial die klinische Untersuchung mittels Watson-Test und röntgenologischer Bildgebung im Vordergrund stehen. Diese ist stets verfügbar und in den meisten klinischen Settings umsetzbar. In vielen Fällen könnte auf eine weitere Bildgebung mittels MRT verzichtet werden und direkt die Indikation zur diagnostischen bzw. ggf. therapeutischen Arthroskopie gestellt werden.

Wenn sich der klinische und röntgenologische Befund nicht eindeutig gestaltet, sollte die MRT-Bildgebung in die Wege geleitet werden. Somit stellt die Kombination aus Röntgen und Watson-Test unserer Meinung nach eine ideale Screening-Methode dar.

Das MRT bietet den Vorteil einer gering erhöhten Sensitivität, ist strahlungsfrei und nicht-invasiv. Jedoch entstehen hier verhältnismäßig hohe Kosten und es ist nicht überall verfügbar.

Des Weiteren ist das Einführen von internationalen Standards hinsichtlich der nativradiologischen Bildgebung und deren Auswertung wichtig. Der SL-Abstand sollte nach Schimmerl [18] und der SL-Winkel nach Larsen bestimmt werden [80].

Zudem sollte ein Standard für die Funktionsaufnahmen eingeführt werden. In Einklang mit Lee et al. empfehlen wir zur Diagnose dynamischer SL-Instabilitäten die „Clenched pencil view“. Neben dem direkten Seitenvergleich zeigten sich diese Aufnahmen am besten reproduzierbar mit dem breitesten SL-Abstand bei einer Ulnarabduktion von 30 Grad [79]. Realistischerweise lässt sich dies jedoch beispielsweise aufgrund der vorhandenen Schmerzen und resultierender Bewegungseinschränkung oder bei fehlender Patientencompliance in der Praxis nicht immer durchführen. Bei diesen Patienten sollte nach Möglichkeit die maximal durchführbare Ulnarabduktion verwendet werden.

Zusammenfassend sollten zur Entscheidungsfindung bzgl. des weiteren Prozedere der Unfallmechanismus, die vorliegende Klinik mit positivem Watson-Test sowie die Bewegungseinschränkung insbesondere bei Flexion/ Extension in Zusammenschau mit den Ergebnissen der nativradiologischen Bildgebung inklusive der Funktionsaufnahmen evaluiert werden. Die Röntgenaufnahmen in Ulnarabduktion bzw. „Clenched pencil view“ stellen insgesamt eine schnelle, ubiquitär verfügbare, kostengünstige, einfach reproduzierbare, relativ strahlenarme, schnell erlernbare und interdisziplinär durchführbare Screeningmethode dar.

## 5. Zusammenfassung

SL-Band-Verletzungen treten in relevanter Anzahl nach einfachen Extensions-traumata des Handgelenkes im Rahmen von Stürzen auf [5, 10, 11, 13, 60], werden jedoch häufig übersehen. Dies führt bei den betroffenen Patienten teilweise zu langwierigen Behandlungsverläufen und im schlimmsten Fall bis hin zur SLAC-Wrist. Bei zeitgerechter Diagnosestellung kann die SL-Band-Verletzung gut behandelt und bleibende Funktionseinschränkungen minimiert werden. Bei fehlendem Konsens in der Literatur bezüglich pathologischer Cut-off-Werte, unterschiedlichen Angaben bezüglich der Bestimmung des Abstandes sowie der aussagekräftigsten Aufnahmetechnik [15, 18-22], lag der Fokus der vorliegenden Arbeit insbesondere in der Erarbeitung des Stellenwertes der nativradiologischen Bildgebung. Diese stellt in der Akutversorgung in regionalen Krankenhäusern eine verfügbare, kostengünstige und strahlenarme Methode dar, während der Goldstandard, die Handgelenksarthroskopie, meist spezialisierten Zentren vorbehalten bleibt.

Um den Zusammenhang zwischen klinischem, radiologischem und arthroskopischem Befund bei SL-Band-Läsionen darzustellen und Cut-off-Werte zu bestimmen, wurden die Befunde von 414 Patienten, welche eine Handgelenkarthroskopie bei Handgelenkbeschwerden im Zeitraum von 01/2011 bis 12/2017 erhielten, mit den Befunden der präoperativen klinischen und radiologischen Untersuchungen (MRT- sowie Röntgen-Bildgebung) verglichen und in Korrelation gestellt.

Es wurden die SL-Abstände in den a.-p.-Aufnahmen sowie in Ulnar- und Radialabduktion ebenso wie der SL- und RL-Winkel in der seitlichen Aufnahme bestimmt. Zusätzlich wurde der SL-Abstand mit der gesunden Gegenseite in Ulnarabduktion sowie der a.-p.-Aufnahme verglichen.

Es handelt sich um eine explorative Datenanalyse. Die p-Werte wurden deskriptiv interpretiert. Zur Deskription der metrischen Variablen wurden folgende Größen verwendet: Anzahl, Mittelwert, Standardabweichung, Extrema und Median. Die Verteilung kategorialer Daten wurde mittels absoluter und relativer Häufigkeiten

beschrieben. Zur Bestimmung möglicher Cutpoints des SL-Abstandes, des SL-Winkels und des RL-Winkels zur Diagnostik von SL-Band-Läsionen wurden ROC-Kurven erstellt und die dazugehörigen Flächen unter der Kurve berechnet. Zur Beurteilung der diagnostischen Güte interessierender Variablen bzgl. SL-Band-Läsionen wurden Sensitivität, Spezifität sowie positiver und negativer Vorhersagewert berechnet.

Die Prävalenz von SL-Band-Rupturen betrug 42,5 %. Die beste diagnostische Güte zeigte der SL-Abstand in Ulnarabduktion (AUC 0,77), gefolgt vom SL-Abstand in der a.-p.-Aufnahme (AUC 0,75) sowie dem SL-Winkel in der lateralen Aufnahme (AUC 0,72). Der SL-Abstand in Radialabduktion (AUC 0,68) sowie der RL-Winkel (0,53) scheinen zur Diagnostik der SL-Band-Läsion weniger geeignet. Weitere Untersuchungen sollten bei einem SL-Abstand von 2,35 mm in der a.-p.-Aufnahme, 2,75 mm in Ulnarabduktion bzw. einem SL-Winkel  $> 60$  Grad in die Wege geleitet werden. Der Median des SL-Abstandes in Ulnarabduktion und auf den a.-p.-Aufnahmen fiel auf der gesunden Gegenseite bei entsprechender SL-Band-Läsion ebenfalls erhöht aus. Aus diesem Grund sollten die Aufnahmen, falls kein Trauma vorausging, im Seitenvergleich stattfinden. Die MRT-Bildgebung ergab eine Sensitivität von 80,3 % und eine Spezifität von 94,4 %. Die Kombination aus SL-Abstand in Ulnarabduktion bei einem Cut-off-Wert von 2,75 mm mit einem positiven Watson-Verschiebetest in der klinischen Untersuchung ergab eine Sensitivität von 93,7 %. Die Kombination aus SL-Abstand in Ulnarabduktion bei einem Cut-off-Wert von 2,75 mm mit einem positiven MRT-Befund ergab eine Sensitivität von 95,6 %.

Das Einführen von internationalen Standards ist sinnvoll, um die Vergleichbarkeit der Röntgenbilder zu erhöhen. Wir empfehlen die Bestimmung des SL-Abstandes nach Schimmerl [18] und des SL-Winkel nach Larsen [80]. Die Funktionsaufnahmen sollten im Seitenvergleich in der sogenannten „Clenched pencil view“ angefertigt werden [79].

Im Rahmen eines diagnostischen Algorithmus empfehlen wir bei positivem klinischen Watson-Test in Kombination mit einem pathologischen standardisierten Röntgenbild auf eine MRT-Diagnostik zu verzichten und direkt die Arthroskopie in die Wege zu leiten. Die nativradiologische Bildgebung in Kombination mit der klinischen Untersuchung stellt eine schnelle, kostengünstige und reproduzierbare Screeningmethode dar. Sollten klinische Untersuchung und Röntgendiagnostik inkonklusiv sein, sollte eine MRT-Diagnostik erfolgen.

## Literaturverzeichnis

### Reference list

1. Short, W.H., et al., *Biomechanical evaluation of the ligamentous stabilizers of the scaphoid and lunate: part III*. The Journal of hand surgery, 2007. **32**(3): p. 297. e1-297. e18.
2. Berger, R.A., *The anatomy and basic biomechanics of the wrist joint*. J Hand Ther, 1996. **9**(2): p. 84-93.
3. Mayfield, J., et al., *Biomechanical properties of human carpal ligaments*. Orthop Trans, 1979. **3**(2): p. 143-44.
4. Andersson, J. and M. Garcia-Elias, *Dorsal scapholunate ligament injury: a classification of clinical forms*. Journal of Hand Surgery (European Volume), 2013. **38**(2): p. 165-169.
5. Lindau, T., M. Arner, and L. Hagberg, *Intraarticular lesions in distal fractures of the radius in young adults: a descriptive arthroscopic study in 50 patients*. The Journal of Hand Surgery: British & European Volume, 1997. **22**(5): p. 638-643.
6. Geissler, W.B., et al., *Intracarpal soft-tissue lesions associated with an intra-articular fracture of the distal end of the radius*. JBJS, 1996. **78**(3): p. 357-365.
7. Rappold, G., M. Leixnering, and C. Pezzei, *Carpal injuries associated with distal radius fractures. Diagnosis and therapy*. Handchirurgie, Mikrochirurgie, Plastische Chirurgie: Organ der Deutschsprachigen Arbeitsgemeinschaft für Handchirurgie: Organ der Deutschsprachigen Arbeitsgemeinschaft für Mikrochirurgie der Peripheren Nerven und Gefässe: Organ der V.. 2001. **33**(4): p. 221-228.
8. Hanker, G.J., *Diagnostic and operative arthroscopy of the wrist*. Clinical Orthopaedics and Related Research, 1991. **263**: p. 165-174.
9. Stoffelen, D., K. De Mulder, and P. Broos, *The clinical importance of carpal instabilities following distal radial fractures*. Journal of Hand Surgery, 1998. **23**(4): p. 512-516.
10. Prommersberger, K.-J., et al., *Die skapholunäre Bandverletzung*. Der Unfallchirurg, 2014. **117**(8): p. 723-739.
11. Jørgsholm, P., et al., *The incidence of intrinsic and extrinsic ligament injuries in scaphoid waist fractures*. J Hand Surg Am, 2010. **35**(3): p. 368-74.
12. Mayfield, J.K., R.P. Johnson, and R.K. Kilcoyne, *Carpal dislocations: pathomechanics and progressive perilunar instability*. The Journal of hand surgery, 1980. **5**(3): p. 226-241.
13. Cooney, W.r., J.H. Dobyns, and R.L. Linscheid, *Complications of Colles' fractures*. J Bone Joint Surg Am, 1980. **62**(4): p. 613-619.
14. Forward, D.P., T.R. Lindau, and D.S. Melsom, *Intercarpal ligament injuries associated with fractures of the distal part of the radius*. JBJS, 2007. **89**(11): p. 2334-2340.
15. Kuo, C.E. and S.W. Wolfe, *Scapholunate instability: current concepts in diagnosis and management*. J Hand Surg Am, 2008. **33**(6): p. 998-1013.
16. Wolfe, S.W., *Scapholunate instability*. Journal of the American Society for Surgery of the Hand, 2001. **1**(1): p. 45-60.

17. Andersson, J.K., et al., *Efficacy of Magnetic Resonance Imaging and Clinical Tests in Diagnostics of Wrist Ligament Injuries: A Systematic Review*. Arthroscopy, 2015. **31**(10): p. 2014-2020.
18. Schimmerl-Metz, S.M., et al., *Radiologic measurement of the scapholunate joint: implications of biologic variation in scapholunate joint morphology*. The Journal of hand surgery, 1999. **24**(6): p. 1237-1244.
19. Linscheid, R.L., et al., *Traumatic instability of the wrist. Diagnosis, classification, and pathomechanics*. J Bone Joint Surg Am, 1972. **54**(8): p. 1612-32.
20. Cautilli, G.P. and M.A. Wehbé, *Scapho-lunate distance and cortical ring sign*. The Journal of hand surgery, 1991. **16**(3): p. 501-503.
21. Sebald, J.R., J.H. Dobyns, and R.L. Linscheid, *The natural history of collapse deformities of the wrist*. Clinical Orthopaedics and Related Research®, 1974. **104**: p. 140-148.
22. Belsole, R.J., *Radiography of the wrist*. Clin Orthop Relat Res, 1986(202): p. 50-6.
23. Lichtman, D.M., et al., *Ulnar midcarpal instability—clinical and laboratory analysis*. The Journal of hand surgery, 1981. **6**(5): p. 515-523.
24. Nakamura, K., et al., *Motion analysis in two dimensions of radial-ulnar deviation of type I versus type II lunates*. The Journal of hand surgery, 2000. **25**(5): p. 877-888.
25. Bain, G.I., et al., *The effect of lunate morphology on the 3-dimensional kinematics of the carpus*. The Journal of Hand Surgery, 2015. **40**(1): p. 81-89.
26. Burgess, R.C., *Anatomic variations of the midcarpal joint*. The Journal of hand surgery, 1990. **15**(1): p. 129-131.
27. Viegas, S.F., *The lunatohamate articulation of the midcarpal joint*. Arthroscopy: The Journal of Arthroscopic & Related Surgery, 1990. **6**(1): p. 5-10.
28. Rhee, P.C., S.L. Moran, and A.Y. Shin, *Association between lunate morphology and carpal collapse in cases of scapholunate dissociation*. The Journal of hand surgery, 2009. **34**(9): p. 1633-1639.
29. Bonnel, F. and Y. Allieu, *Radioulnocarpal and mediocarpal articulations. Anatomic organization and biomechanical bases*. Annales de chirurgie de la main: organe officiel des sociétés de chirurgie de la main, 1984. **3**(4): p. 287-296.
30. Taleisnik, J., *The ligaments of the wrist*. J Hand Surg Am, 1976. **1**(2): p. 110-8.
31. Berger, R.A., *The anatomy of the ligaments of the wrist and distal radioulnar joints*. Clinical Orthopaedics and Related Research®, 2001. **383**: p. 32-40.
32. Berger, R.A., *The gross and histologic anatomy of the scapholunate interosseous ligament*. J Hand Surg Am, 1996. **21**(2): p. 170-8.
33. Kehr, P. and A.G. Graftiaux, *B. Hirt, H. Seyhan, M. Wagner, R. Zumhasch: Hand and wrist anatomy and biomechanics: a comprehensive guide*. European Journal of Orthopaedic Surgery & Traumatology, 2017. **27**(7): p. 1029-1029.

34. Salva-Coll, G., M. Garcia-Elias, and E. Hagert, *Scapholunate instability: proprioception and neuromuscular control*. Journal of wrist surgery, 2013. **2**(02): p. 136-140.
35. Hagert, E., B.-O. Ljung, and S. Forsgren, *General innervation pattern and sensory corpuscles in the scapholunate interosseous ligament*. Cells Tissues Organs, 2004. **177**(1): p. 47-54.
36. Viegas, S.F., et al., *The dorsal ligaments of the wrist: anatomy, mechanical properties, and function*. J Hand Surg Am, 1999. **24**(3): p. 456-68.
37. Berger, R.A. and W.F. Blair, *The radioscapholunate ligament: a gross and histologic description*. The Anatomical Record, 1984. **210**(2): p. 393-405.
38. Mitsuyasu, H., et al., *The role of the dorsal intercarpal ligament in dynamic and static scapholunate instability*. The Journal of hand surgery, 2004. **29**(2): p. 279-288.
39. Short, W.H., et al., *Biomechanical evaluation of ligamentous stabilizers of the scaphoid and lunate*. The Journal of hand surgery, 2002. **27**(6): p. 991-1002.
40. Rajan, P.V. and C.S. Day, *Scapholunate interosseous ligament anatomy and biomechanics*. The Journal of hand surgery, 2015. **40**(8): p. 1692-1702.
41. Hagert, E., S. Forsgren, and B.O. Ljung, *Differences in the presence of mechanoreceptors and nerve structures between wrist ligaments may imply differential roles in wrist stabilization*. Journal of orthopaedic research, 2005. **23**(4): p. 757-763.
42. Hagert, E., et al., *Evidence of wrist proprioceptive reflexes elicited after stimulation of the scapholunate interosseous ligament*. The Journal of hand surgery, 2009. **34**(4): p. 642-651.
43. Salva-Coll, G., et al., *Effects of forearm muscles on carpal stability*. Journal of Hand Surgery (European Volume), 2011. **36**(7): p. 553-559.
44. Fukumoto, K., et al., *An anatomic study of the innervation of the wrist joint and Wilhelm's technique for denervation*. The Journal of hand surgery, 1993. **18**(3): p. 484-489.
45. Hagert, E. and J.K. Persson, *Desensitizing the posterior interosseous nerve alters wrist proprioceptive reflexes*. The Journal of hand surgery, 2010. **35**(7): p. 1059-1066.
46. Salva-Coll, G., et al., *Role of the extensor carpi ulnaris and its sheath on dynamic carpal stability*. Journal of Hand Surgery (European Volume), 2012. **37**(6): p. 544-548.
47. Palmer, A.K., et al., *Functional wrist motion: a biomechanical study*. Journal of Hand Surgery, 1985. **10**(1): p. 39-46.
48. Youm, Y., et al., *Kinematics of the wrist. I. An experimental study of radial-ulnar deviation and flexion-extension*. The Journal of bone and joint surgery. American volume, 1978. **60**(4): p. 423-431.
49. Youm, Y. and A.E. FLATT, *Kinematics of the wrist*. Clinical Orthopaedics and Related Research®, 1980. **149**: p. 21-32.



50. Soubeyrand, M., et al., *Pronation and supination of the hand: Anatomy and biomechanics*. Hand Surgery and Rehabilitation, 2017. **36**(1): p. 2-11.
51. Kitay, A. and S.W. Wolfe, *Scapholunate instability: current concepts in diagnosis and management*. J Hand Surg Am, 2012. **37**(10): p. 2175-96.
52. Moritomo, H., et al., *2007 IFSSH committee report of wrist biomechanics committee: biomechanics of the so-called dart-throwing motion of the wrist*. The Journal of hand surgery, 2007. **32**(9): p. 1447-1453.
53. Moritomo, H., et al., *International Federation of Societies for Surgery of the Hand 2013 Committee's report on wrist dart-throwing motion*. The Journal of hand surgery, 2014. **39**(7): p. 1433-1439.
54. Werner, F.W., et al., *Scaphoid and lunate motion during a wrist dart throw motion*. The Journal of hand surgery, 2004. **29**(3): p. 418-422.
55. Ishikawa, J.-i., et al., *The effects of wrist distraction on carpal kinematics*. The Journal of hand surgery, 1999. **24**(1): p. 113-120.
56. Garcia-Elias, M., *Position Statement: Definition of Carpal Instability: The Anatomy and Biomechanics Committee of the International Federation of Societies for Surgery of the Hand2*. Journal of Hand Surgery, 1999. **24**(4): p. 866-867.
57. Gilula, L., et al., *Wrist Terminology as Defined by the International wrist Investigators'Workshop (IWIW)* JBJS, 2002. **84**: p. 1-66.
58. Lee, D.J. and J.C. Elfar, *Carpal Ligament Injuries, Pathomechanics, and Classification*. Hand Clin, 2015. **31**(3): p. 389-98.
59. Wright, T.W., et al., *Carpal instability non-dissociative*. J Hand Surg Br, 1994. **19**(6): p. 763-73.
60. Engelhardt, T. and H. Krimmer, *Dissoziative Instabilitäten der proximalen Handwurzelreihe*. Plastische Chirurgie, 2006. **5**: p. 1-22.
61. Taleisnik, J., *Current concepts review. Carpal instability*. J Bone Joint Surg Am, 1988. **70**(8): p. 1262-1268.
62. Mayfield, J.K., *Patterns of Injury to Carpal Ligaments A Spectrum*. Clinical Orthopaedics and Related Research (1976-2007), 1984. **187**: p. 36-49.
63. Farhadieh, R., N. Bulstrode, and S. Cugno, *Plastic and Reconstructive Surgery: Approaches and Techniques*. 2015: John Wiley & Sons.
64. Meade, T.D., L.H. Schneider, and K. Cherry, *Radiographic analysis of selective ligament sectioning at the carpal scaphoid: a cadaver study*. The Journal of hand surgery, 1990. **15**(6): p. 855-862.
65. Jones, W., *Beware the sprained wrist. The incidence and diagnosis of scapholunate instability*. The Journal of bone and joint surgery. British volume, 1988. **70**(2): p. 293-297.
66. Brunelli, G.A. and G.R. Brunelli, *A new technique to correct carpal instability with scaphoid rotary subluxation: a preliminary report*. The Journal of hand surgery, 1995. **20**(3): p. 82-85.
67. Palmer, A.K., J.H. Dobyns, and R.L. Linscheid, *Management of post-traumatic instability of the wrist secondary to ligament rupture*. J Hand Surg Am, 1978. **3**(6): p. 507-32.

68. Watson, H.K. and F.L. Ballet, *The SLAC wrist: scapholunate advanced collapse pattern of degenerative arthritis*. The Journal of hand surgery, 1984. **9**(3): p. 358-365.
69. Werner, F.W., W.H. Short, and J.K. Green, *Changes in patterns of scaphoid and lunate motion during functional arcs of wrist motion induced by ligament division*. The Journal of hand surgery, 2005. **30**(6): p. 1156-1160.
70. Garcia-Elias, M., X. Alomar Serrallach, and J. Monill Serra, *Dart-throwing motion in patients with scapholunate instability: a dynamic four-dimensional computed tomography study*. Journal of Hand Surgery (European Volume), 2014. **39**(4): p. 346-352.
71. Linscheid, R. and J. Dobyns, *Treatment of scapholunate dissociation. Rotatory subluxation of the scaphoid*. Hand clinics, 1992. **8**(4): p. 645-652.
72. Taleisnik, J., *Post-traumatic carpal instability*. Clinical Orthopaedics and Related Research, 1980(149): p. 73-82.
73. Hempfling, H., *Begutachtung der SL- und LT-Band-Schäden*. Trauma und Berufskrankheit, 2008. **10**(4): p. 286-299.
74. Theumann, N.H., et al., *Association between extrinsic and intrinsic carpal ligament injuries at MR arthrography and carpal instability at radiography: initial observations*. Radiology, 2006. **238**(3): p. 950-957.
75. Messina, J.C., et al., *The EWAS classification of scapholunate tears: an anatomical arthroscopic study*. Journal of wrist surgery, 2013. **2**(02): p. 105-109.
76. Viegas, S.F., et al., *Ulnar-sided perilunate instability: an anatomic and biomechanic study*. The Journal of hand surgery, 1990. **15**(2): p. 268-278.
77. Shin, A.Y., M.J. Battaglia, and A.T. Bishop, *Lunotriquetral instability: diagnosis and treatment*. JAAOS-Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons, 2000. **8**(3): p. 170-179.
78. Wolfe, S.W., A. Gupta, and J.J. Crisco III, *Kinematics of the scaphoid shift test*. The Journal of hand surgery, 1997. **22**(5): p. 801-806.
79. Lee, S.K., et al., *Comparison of radiographic stress views for scapholunate dynamic instability in a cadaver model*. The Journal of hand surgery, 2011. **36**(7): p. 1149-1157.
80. Larsen, C.F., F.K. Mathiesen, and S. Lindequist, *Measurements of carpal bone angles on lateral wrist radiographs*. The Journal of hand surgery, 1991. **16**(5): p. 888-893.
81. Bickert, B., *Rupture of the scapholunate intercarpal ligament*. Unfallchirurg, 2018. **121**(5): p. 351-357.
82. Gilula, L., *Carpal injuries: analytic approach and case exercises*. American Journal of Roentgenology, 1979. **133**(3): p. 503-517.
83. Levinsohn, E.M., et al., *Wrist arthrography: the value of the three compartment injection technique*. Skeletal Radiol, 1987. **16**(7): p. 539-44.
84. Schmitt, R., et al., *Radiologische Frühdiagnostik der skapholunären Dissoziation (SLD)*. Der Radiologe, 2006. **46**(8): p. 654-663.

85. Meier, R., et al., *Darstellung skapholunärer Verletzungen im Arthro-MRT im Vergleich zur Handgelenkarthroskopie*. Handchirurgie· Mikrochirurgie· Plastische Chirurgie, 2002. **34**(06): p. 381-385.
86. Scheck, R., et al., *The scapholunate interosseous ligament in MR arthrography of the wrist: correlation with non-enhanced MRI and wrist arthroscopy*. Skeletal radiology, 1997. **26**(5): p. 263-271.
87. Schmid, M.R., et al., *Interosseous ligament tears of the wrist: comparison of multi-detector row CT arthrography and MR imaging*. Radiology, 2005. **237**(3): p. 1008-1013.
88. Morley, J., J. Bidwell, and M. Bransby-Zachary, *A comparison of the findings of wrist arthroscopy and magnetic resonance imaging in the investigation of wrist pain*. The Journal of Hand Surgery: British & European Volume, 2001. **26**(6): p. 544-546.
89. Redeker, J., et al., *Wertigkeit unspezifisch angeforderter und durchgeführter MRT-Diagnostik bei intrakarpalen Verletzungen im Vergleich zum Arthroskopiebefund an 217 Patienten*. Handchirurgie· Mikrochirurgie· Plastische Chirurgie, 2009. **41**(03): p. 129-134.
90. Mayer, S., et al., *Aussagekraft präoperativer MRT-Diagnostik hinsichtlich Läsionen des skapholunären Bandes im klinischen Alltag*. Handchirurgie· Mikrochirurgie· Plastische Chirurgie, 2013. **45**(01): p. 26-32.
91. Anderson, M.L., et al., *Diagnostic comparison of 1.5 Tesla and 3.0 Tesla preoperative MRI of the wrist in patients with ulnar-sided wrist pain*. The Journal of hand surgery, 2008. **33**(7): p. 1153-1159.
92. Magee, T., *Comparison of 3-T MRI and arthroscopy of intrinsic wrist ligament and TFCC tears*. American journal of roentgenology, 2009. **192**(1): p. 80-85.
93. Pillukat, T., J. Windolf, and J. van Schoonhoven, *Die Arthroskopie des Handgelenkes*. Handchirurgie Scan, 2021. **10**(03): p. 193-214.
94. Löw, S., A. Herold, and C. Eingartner, *Die standardisierte arthroskopie des handgelenks*. Operative Orthopädie und Traumatologie, 2014. **26**(6): p. 539-546.
95. Geissler, W.B., *Arthroscopic management of scapholunate instability*. J Wrist Surg, 2013. **2**(2): p. 129-35.
96. Garcia-Elias, M., A.L. Lluch, and J.K. Stanley, *Three-ligament tenodesis for the treatment of scapholunate dissociation: indications and surgical technique*. J Hand Surg Am, 2006. **31**(1): p. 125-34.
97. Hagert, E., *Proprioception of the wrist joint: a review of current concepts and possible implications on the rehabilitation of the wrist*. Journal of Hand Therapy, 2010. **23**(1): p. 2-17.
98. Weiss, A.-P.C., K. Sachar, and K.A. Glowacki, *Arthroscopic debridement alone for intercarpal ligament tears*. The Journal of hand surgery, 1997. **22**(2): p. 344-349.
99. Lavernia, C.J., M.S. Cohen, and J. Taleisnik, *Treatment of scapholunate dissociation by ligamentous repair and capsulodesis*. The Journal of hand surgery, 1992. **17**(2): p. 354-359.
100. Weiss, A.-P.C., *Scapholunate ligament reconstruction using a bone-retinaculum-bone autograft*. The Journal of hand surgery, 1998. **23**(2): p. 205-215.

101. Harvey, E.J. and D.P. Hanel, *Bone-Ligament–Bone Reconstruction for Scapholunate Disruption*. Techniques in Hand & Upper Extremity Surgery, 2002. **6**(1): p. 2-5.
102. Szalay, M.D.Y. and C.A. Peimer, *Scaphocapitate arthrodesis*. Techniques in Hand & Upper Extremity Surgery, 2002. **6**(2): p. 56-60.
103. Watson, H.K., J. Ryu, and E. Akelman, *Limited triscaphoid intercarpal arthrodesis for rotatory subluxation of the scaphoid*. J Bone Joint Surg Am, 1986. **68**(3): p. 345-349.
104. Rotman, M.B., et al., *Scaphocapitolunate arthrodesis*. The Journal of hand surgery, 1993. **18**(1): p. 26-33.
105. Viegas, S.F., et al., *Evaluation of the biomechanical efficacy of limited intercarpal fusions for the treatment of scapho-lunate dissociation*. The Journal of hand surgery, 1990. **15**(1): p. 120-128.
106. Cohen, M.S. and S.H. Kozin, *Degenerative arthritis of the wrist: proximal row carpectomy versus scaphoid excision and four-corner arthrodesis*. The Journal of hand surgery, 2001. **26**(1): p. 94-104.
107. Hagert, E., Å. Ferreres, and M. Garcia-Elias, *Nerve-sparing dorsal and volar approaches to the radiocarpal joint*. The Journal of hand surgery, 2010. **35**(7): p. 1070-1074.
108. Pliefke, J., et al., *Diagnostic accuracy of plain radiographs and cineradiography in diagnosing traumatic scapholunate dissociation*. Skeletal Radiol, 2008. **37**(2): p. 139-45.
109. Palmer, A.K., *Triangular fibrocartilage complex lesions: a classification*. J Hand Surg Am, 1989. **14**(4): p. 594-606.
110. Outerbridge, R.E., *The etiology of chondromalacia patellae*. 1961. Clinical orthopaedics and related research, 2001(389): p. 5-8.
111. Rachunek, K., et al., *An algorithmic diagnostic approach to scapholunate ligament injuries based on comparison of X-ray examinations and arthroscopy in 414 patients*. Journal of Plastic, Reconstructive & Aesthetic Surgery, 2022. **75**(9): p. 3293-3303.
112. Viegas, S.F., et al., *Wrist anatomy: incidence, distribution, and correlation of anatomic variations, tears, and arthrosis*. The Journal of hand surgery, 1993. **18**(3): p. 463-475.
113. Picha, B.M., E.K. Konstantakos, and D.A. Gordon, *Incidence of bilateral scapholunate dissociation in symptomatic and asymptomatic wrists*. The Journal of hand surgery, 2012. **37**(6): p. 1130-1135.
114. Mayfield, J.K., *Mechanism of carpal injuries*. Clinical Orthopaedics and Related Research (1976-2007), 1980. **149**: p. 45-54.
115. Easterling, K.J. and S.W. Wolfe, *Scaphoid shift in the uninjured wrist*. The Journal of hand surgery, 1994. **19**(4): p. 604-606.
116. Ozcelik, A., et al., *Wrist ligaments: their significance in carpal instability*. Ulus Travma Acil Cerrahi Derg, 2005. **11**(2): p. 115-120.
117. Dornberger, J.E., et al., *Accuracy of simple plain radiographic signs and measures to diagnose acute scapholunate ligament injuries of the wrist*. Eur Radiol, 2015. **25**(12): p. 3488-98.
118. Vance, R.M., R.H. Gelberman, and R.M. Braun, *Chronic bilateral scapholunate dissociation without symptoms*. The Journal of Hand Surgery, 1979. **4**(2): p. 178-180.

## **Eigenanteilserklärung**

Ich, Maja Hunkin, erkläre, dass ich die vorgelegte Dissertationsschrift mit dem Thema: „Untersuchungen zur Diagnostik intrinsischer Bandschäden am Handgelenk – Vergleich zwischen konventioneller radiologischer Bildgebung und Handgelenksarthroskopie“ selbst verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt, ohne die (unzulässige) Hilfe Dritter verfasst und auch in Teilen keine Kopien anderer Arbeiten dargestellt habe.“

Tübingen, den 09.11.2023

## Liste der Veröffentlichungen

Teile der vorliegenden Dissertationsschrift wurden bereits in den folgenden Publikationen veröffentlicht:

Rachunek, K., et al., An algorithmic diagnostic approach to scapholunate ligament injuries based on comparison of X-ray examinations and arthroscopy in 414 patients. *Journal of Plastic, Reconstructive & Aesthetic Surgery*, 2022. 75(9): p. 3293-3303.