

Aus der Klinik und Poliklinik für Radiologie  
der Ludwig-Maximilians-Universität München  
Direktor: Prof. Dr. med. Jens Ricke

**VERLETZUNGEN UND VERKNÖCHERUNG DES LARYNX  
IM POST MORTEM COMPUTERTOMOGRAMM  
IN KORRELATION MIT OBDUKTION UND FEINPRÄPARATION**

Dissertation  
zum Erwerb des Doktorgrades der Medizin  
an der Medizinischen Fakultät der  
Ludwig-Maximilians-Universität zu München

vorgelegt von  
Laura Isabel Kaiser  
aus München  
2019

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät  
der Universität München

Berichterstatter:	PD Dr. Karla Maria Treitl <hr/>
Mitberichterstatter:	Prof. Dr. Maria Schuster <hr/> Prof. Dr. Ulrich Linsenmaier <hr/>
Mitbetreuung durch den promovierten Mitarbeiter:	Dr. Michael Scherr <hr/>
Dekan:	Prof. Dr. med. dent. Reinhard Hickel <hr/>
Tag der mündlichen Prüfung:	14.03.2019 <hr/>

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>1. EINLEITUNG.....</b>	<b>5</b>
<b>2. GRUNDLAGEN.....</b>	<b>7</b>
<b>2.1 Postmortale Computertomographie (PMCT).....</b>	<b>7</b>
<b>2.2 Anatomie des Kehlkopfes.....</b>	<b>8</b>
2.2.1 Funktion.....	8
2.2.2 Aufbau.....	9
2.2.3 Normvarianten.....	14
2.2.4 Geschlechtsspezifische Unterschiede des Kehlkopfes.....	19
2.2.5 Altersspezifische Veränderungen des Kehlkopfes.....	20
<b>2.3 Verletzungen des Kehlkopfes.....</b>	<b>23</b>
2.3.1 Ursachen.....	23
2.3.2 Verletzungsart und -lokalisierung.....	23
<b>3. ZIELSETZUNG.....</b>	<b>25</b>
<b>4. MATERIAL UND METHODEN.....</b>	<b>27</b>
<b>4.1 Kollektiv.....</b>	<b>27</b>
<b>4.2 Methodik.....</b>	<b>27</b>
4.2.1 Feinpräparation.....	27
4.2.2 Computertomographie.....	30
4.2.3 Statistische Analyse.....	37
<b>5. ERGEBNISSE.....</b>	<b>38</b>
<b>5.1 Kollektiv.....</b>	<b>38</b>
<b>5.2 Untersuchungsqualität.....</b>	<b>40</b>
5.2.1 Einflussfaktoren.....	40
5.2.2 Beurteilung der Bildqualität.....	40
5.2.3 Fensterung.....	41
<b>5.3 Normvarianten.....</b>	<b>42</b>
<b>5.4 Verletzungen.....</b>	<b>44</b>
5.4.1 Verletzungshäufigkeiten anhand der Feinpräparation.....	44
5.4.2 Korrelationsanalyse der Verletzungen.....	48

5.4.3	Vierfeldertafeln.....	50
<b>5.5</b>	<b>Verknöcherung .....</b>	<b>53</b>
5.5.1	Häufigkeiten .....	53
5.5.2	Korrelationsanalyse der Verknöcherung.....	56
<b>5.6</b>	<b>Zeitaufwand .....</b>	<b>61</b>
<b>5.7</b>	<b>Strahlendosis.....</b>	<b>61</b>
<b>6.</b>	<b>DISKUSSION .....</b>	<b>62</b>
<b>6.1</b>	<b>Interpretation der Ergebnisse .....</b>	<b>62</b>
6.1.1	Kollektiv .....	62
6.1.2	Normvarianten.....	62
6.1.3	Verletzungsursachen.....	63
6.1.4	Frakturarten und -lokalisationen.....	64
6.1.5	Verletzungsdiagnostik.....	68
6.1.6	Zusammenhang zwischen Verknöcherung und Alter.....	70
<b>6.2</b>	<b>Stärken und Schwächen der Methoden.....</b>	<b>75</b>
6.2.1	Feinpräparation.....	75
6.2.2	PMCT .....	76
<b>6.3</b>	<b>Forensische und klinische Anwendungsmöglichkeiten.....</b>	<b>78</b>
<b>7.</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>80</b>
<b>8.</b>	<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....</b>	<b>82</b>
<b>9.</b>	<b>TABELLENVERZEICHNIS.....</b>	<b>87</b>
<b>10.</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS.....</b>	<b>89</b>
<b>11.</b>	<b>ANHANG .....</b>	<b>98</b>
<b>11.1</b>	<b>Dokumentationsblatt für die Ergebnisse der Feinpräparation .....</b>	<b>98</b>
<b>11.2</b>	<b>Verletzungshäufigkeiten anhand der PMCT .....</b>	<b>99</b>
11.2.1	Grad und Lokalisation der Frakturen des Zungenbeins .....	99
11.2.2	Grad und Lokalisation der Frakturen des Schildknorpels.....	100
11.2.3	Grad und Lokalisation der Frakturen des Ringknorpels.....	101
<b>12.</b>	<b>EIDESSTATTLICHE VERSICHERUNG .....</b>	<b>102</b>
<b>13.</b>	<b>DANKSAGUNG.....</b>	<b>103</b>

# 1. EINLEITUNG

*„Frau L. B., 35 Jahre alt, war in einem Keller mit zahlreichen Quetschwunden am Kopfe, suffundirten Exkorationen im Gesicht, am Halse und an Armen und Händen todt gefunden worden. Die Obduktion ergab intermeningeale Hämorrhagie in der linken Schläfengegend, Fraktur des Kehlkopfes und Sperma in der Vagina. Offenbar lag ein Lustmord vor. Schon am nächsten Tage wurde auch der Thäter eruiert, welcher gestand, dass er die Frau, der er in den Keller nachgegangen war, durch Schläge auf den Kopf betäubt und dann den Coitus vollzogen habe. Vor demselben, nach einer anderen Angabe nach demselben, habe er, da die Frau röchelte, sich einen Stiefel ausgezogen (!) und sei ihr auf den Vorderhals getreten. Der Kehlkopf war von vorn nach hinten plattgedrückt, beide oberen Hörner an der Basis gebrochen und nach einwärts geknickt, die Schildknorpelplatten nicht gebrochen, doch gegen einander leichter beweglich. Die vordere Spange des Ringknorpels ist beiderseits unter dem Musc. crico-thyroideus vertikal gebrochen und das abgebrochene Stück ist deprimiert. Die Knorpel sind nicht verknöchert, doch asbestartig degeneriert. Schleimhaut und Zungenbein unverletzt.“ [1]*

Schon 1886 war bekannt, dass durch Gewalteinwirkung gegen den Hals Kehlkopfverletzungen entstehen können [1]. Dabei widersprach v. Hoffmann bereits damals seinem Kollegen, dass nur „Würgen“ dafür die Ursache sein könne [1]. Heute geht man davon aus, dass Erhängen der häufigste Grund für Kehlkopfverletzungen ist [2].

Erhängen wird mit 41,8% als häufigste Ursache eines asphyktischen Todes in einer retrospektiven Auswertung von 134 Obduktionen beschrieben [3]. Außerdem stellt Erhängen in vielen Ländern die häufigste Form des Suizides dar [4-6]. Auch in der Bundesrepublik Deutschland ist es zusammen mit Strangulierung und Ersticken die häufigste Art des Suizides [7]. Allerdings ist nicht nur infolge des Erhängens, sondern auch beim Tod durch Erdrosseln oder Erwürgen besonders durch Fremdeinwirkung aufgrund der Halskompression regelmäßig mit Verletzungen des Kehlkopfes zu rechnen [2, 3, 8, 9].

Typischerweise können als Folge der Halskompression bei derartigen Gewalteinwirkungen unter anderem petechiale Einblutungen in die Haut von Hals und Gesicht oberhalb der Kompression sowie in die Schleimhäute und Konjunktiven

auftreten (Abb. 1) [8]. Außerdem sind eine Zyanose des Gesichts bei mangelnder Blutzufuhr, eine Dunsung bei unzureichendem venösem Abfluss oder auch Strang- oder Drosselmarken möglich [8].



**Abbildung 1: Präparate der Epiglottis (links) sowie der Kehlkopfschleimhaut (rechts), die jeweils multiple Einblutungen aufweisen**

Allerdings können diese äußeren Befunde abhängig vom Ablauf des Geschehens verschieden stark ausgeprägt sein [8, 10]. Sind derartige Hinweise gering bis gar nicht vorhanden, kann der Nachweis von Kehlkopfverletzungen einen wichtigen Anhaltspunkt für das Geschehene liefern [11]. Betz und Eisenmenger fanden beispielsweise in ihrem Kollektiv in 67% der Fälle von Erhängen Kehlkopffrakturen [12].

Kehlkopfverletzungen wurden bereits vielfältig untersucht, sei es im Rahmen der Obduktion [3, 13], durch eine anschließende aufwendige Feinpräparation der Kehlkopfbestandteile [14, 15], die aktuell dem Goldstandard entspricht [16], oder auch durch bildgebende Verfahren wie der Röntgenuntersuchung [14, 15] oder der Computertomographie (CT) [11, 17-19]. Dabei zeigen alle Techniken Schwachstellen. Bei der Obduktion können Verletzungen leichter übersehen werden, die Feinpräparation ist ein zeitaufwendiges Verfahren und in der konventionellen Röntgenuntersuchung sind schwach verknöcherte Kehlköpfe schwer zu beurteilen. Die Beurteilung in der CT erschien beispielsweise bereits Maiese et al. sinnvoll [11], sie wurde in diesem Gebiet allerdings nur selten, außerdem postmortal bisher nur in situ und nicht als Untersuchung des isolierten Kehlkopfes durchgeführt [10, 11, 17, 20]. Da die Computertomographie ein schnelles und geeignetes Verfahren zum Nachweis von Frakturen ist und zudem eine nicht-invasive Untersuchungsart darstellt, die mögliche postmortale iatrogene Artefakte vermeidet, stellt sie eine vielversprechende Alternative zu den üblichen Untersuchungstechniken des Kehlkopfes dar.

## **2. GRUNDLAGEN**

### **2.1 Postmortale Computertomographie (PMCT)**

Bereits 1977 wurden computertomographische Untersuchungen mit forensischem Hintergrund durchgeführt [21]. Dabei wurden zum einen akute Schädelschussverletzungen, zum anderen die Spätfolgen von derartigen Verletzungen computertomographisch dargestellt [21]. 1983 wurde die postmortale computertomographische Untersuchung von Kopfschussverletzungen mit der neuropathologischen Untersuchung verglichen, wobei die CT-Bilder als eine „wertvolle Ergänzung“ zur pathologischen Untersuchung galten [22]. Schon 1994 diskutierten Donchin et al. die PMCT als mögliche Alternative zur Obduktion [23]. Dies ist nach wie vor Thema zahlreicher Studien [24-27]. Dabei wird die Ganzkörper-PMCT größtenteils als effektive Ergänzung zur Obduktion gesehen, allerdings nicht als Ersatz [28, 29], da in einigen Punkten Einschränkungen für die CT bestehen [24]. Roberts et al. hatten Schwierigkeiten bei der Diagnose von ischämischen Herzerkrankungen, Lungenembolien, Pneumonien oder intraabdominellen Läsionen als Todesursache [24]. Außerdem können postmortale Artefakte die Beurteilung erschweren. Dabei ist z.B. eine Verwechslung von inneren Totenflecken in der Lunge mit einem Infiltrat im Rahmen einer Pneumonie, eines Lungenödems o.Ä. möglich [30]. Die Entstehung von intraabdomineller Luft durch Fäulnisprozessen kann eine Magen- oder Darmperforation verschleiern bzw. fälschlicherweise für eine antemortale Perforation gehalten werden [24, 30]. Auch die intrakraniellen postmortalen Veränderungen müssen bei der Befundung einer CT-Aufnahme nach dem Tod bedacht werden. Im Rahmen der Verwesung finden sich im CT eine Abnahme der Mark-Rinden-Differenzierung sowie das Verschwinden der Sulci und Ventrikel [31]. Allerdings hat sich die PMCT in vielen Bereichen bereits als sehr effektiv erwiesen und sich in einer Studie von 2012, was das Feststellen der Todesursache angeht, gegen das MRT durchgesetzt [24]. Die Stärken des CTs liegen dabei insbesondere in der Beurteilung von Traumata [27, 32]. Besonders Frakturen, aber auch Schussverletzungen oder andere Arten von scharfer und stumpfer Gewalt können erfolgreich erkannt werden [32-34]. Auch bei Verletzungen im Rahmen des Todes durch Gewalt gegen den Hals hat sich die PMCT bereits als hilfreich erwiesen [10, 11].

Ein großer Vorteil der postmortalen Bildgebung ist, dass die Strahlenbelastung nicht berücksichtigt werden muss und somit eine bessere Bildqualität ermöglicht werden

kann. Außerdem können die Bilder entgegen einer Obduktion jederzeit re-evaluiert werden, falls neue Fragestellungen auftreten [29, 35].

Im Jahr 2000 entstand an der Universität in Bern ein Projekt mit dem Namen „Virtopsy“, das zum einen eine dreidimensionale Dokumentation der Oberfläche mittels forensischer Photogrammetrie und eines „3D optical scanning“ umfasst, und zum anderen eine postmortale CT- und MRT-Bildgebung sowie gegebenenfalls ergänzende mikroskopische CT bzw. MRT-Untersuchungen verwendet [26, 35-37]. Im Rahmen dieses Projekts wurde außerdem der „Virtobot“ entwickelt, ein Robotersystem, das die dreidimensionale Oberflächen- sowie CT-Untersuchung durchführt und auch automatische Biopsien ermöglicht [38, 39]. Allerdings wird die postmortale Bildgebung bisher nicht als vollständige Alternative zur Obduktion gesehen [24, 28, 29].

## **2.2 Anatomie des Kehlkopfes**

### **2.2.1 Funktion**

Der Kehlkopf übernimmt als Verbindungsstück zwischen Pharynx und Trachea überlebensnotwendige Funktionen. Er leitet die Atemluft aus dem Rachen in die unteren Luftwege und wieder zurück und ermöglicht somit die Ventilation [40].

Zudem trennt der Kehlkopf Luft- und Speisewege voneinander und hat damit eine wichtige Schutzfunktion [40-42]. Durch Schluss des Kehldeckels werden die unteren Atemwege vor Aspiration während des Schluckaktes und dem Eindringen von Fremdkörpern geschützt [40, 42]. Beim Schlucken wird der Kehldeckel vor allem durch suprahyale Muskeln, zusätzlich auch durch die Pharynxmuskulatur und den nach hinten sinkenden Zungengrund auf den Kehlkopfeingang gedrückt [40]. Durch Kontraktion zweier innerer Kehlkopfmuskeln (Mm. thyroarytenoideus, Mm. arytenoidei obliqui) wird der Kehlkopf zusätzlich verengt [40]. Eine weitere Barriere stellen die Stimmfalten dar, die den Weg in die unteren Atemwege verschließen können [42]. Dringt dennoch ein Fremdkörper wie ein Nahrungsbestandteil bis in den Kehlkopf ein, wird dort aufgrund der ausgeprägten sensorischen Innervierung ein starker Hustenreiz zur Entfernung des Fremdkörpers ausgelöst [40].

Zusätzlich stellt der Kehlkopf ein zentrales Element der Stimmbildung und damit der verbalen Kommunikation dar [40-42]. Die vorbeiströmende Expirationsluft führt zur Schwingung der Stimmbänder und ermöglicht damit die Phonation, wobei die Tonhöhe durch die Spannung der Stimmbänder mittels Muskeln variiert werden kann [40, 41].

## 2.2.2 Aufbau

Die Grundlage des Kehlkopfes stellt ein am Zungenbein aufgehängtes Knorpelgerüst dar, das über diverse Muskeln, Gelenke und Bänder verbunden und von Schleimhaut überzogen ist [40]. Mit Ausnahme der Stimmfalten, die mit mehrschichtig unverhorntem Plattenepithel bedeckt sind, findet sich im Kehlkopf vor allem respiratorisches mehrreihiges Flimmerepithel, welches unter anderem durch Becherzellen gekennzeichnet ist [40, 42, 43]. Allerdings kann sich die Verteilung von Platten- und respiratorischem Epithel unterscheiden [40, 43].

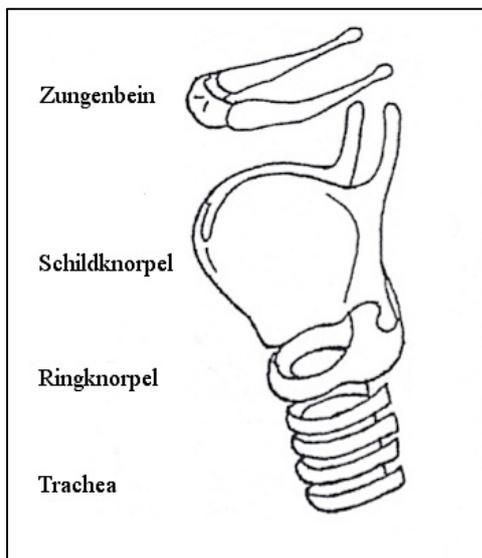


Abbildung 2: Schema des Kehlkopfskeletts

Das Kehlkopfskelett besteht aus dem Kehldeckel (Epiglottis), dem Schildknorpel (Cartilago thyroidea), dem Ringknorpel (Cartilago cricoidea) kaudal davon (Abb. 2), den paarigen Stellknorpeln (Cartilagine arytenoideae), denen wiederum jeweils ein Spitzenknorpel, auch Santorini-Knorpel, (Cartilago corniculata) aufsitzt und ebenfalls paarig angelegte Wrisberg Knorpel (Cartilagine cuneiformes) [41, 42]. Fakultativ kann sich zusätzlich jeweils oberhalb der oberen Schildknorpelhörner ein Weizenkornknorpel, Cartilago triticea, befinden [40, 41]. Schild-, Ring- und Stellknorpel bestehen aus hyalinem Knorpel, der einer Mineralisation und Ossifikation unterliegt, die sich mit zunehmendem Lebensalter abspielt [41, 42]. Die Epiglottis, die Cartilagine corniculatae und cuneiformes dagegen bestehen aus elastischem Knorpel [41].

Zunächst soll nun aber das Zungenbein (Os hyoideum) beschrieben werden, an dem der Kehlkopf kranial befestigt ist (Abb. 3) [43]. Das Zungenbein ist ein bogenförmiger, oft als hufeisenförmig beschriebener Knochen, der sich aus einem Corpus und jeweils paarig angelegten großen (Cornua maiora) und kleinen Hörnern (Cornua minora) zusammensetzt [41, 43, 44].

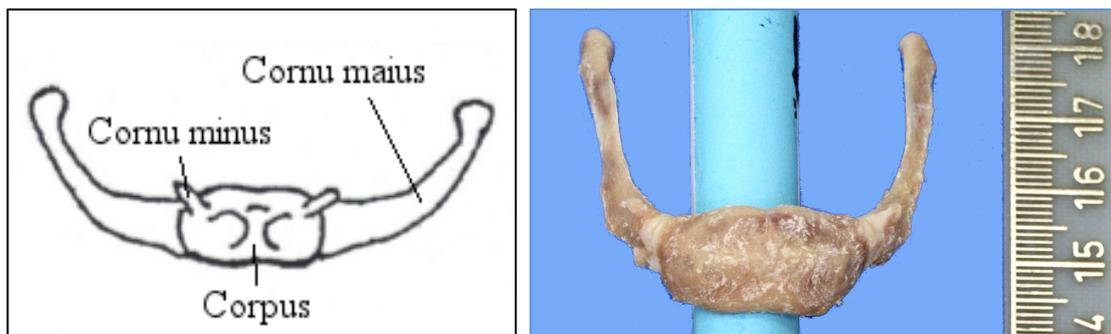


Abbildung 3: Anatomie des Zungenbeins (rechts: Präparat nach Feinpräparation)

Die beiden großen Hörner schließen jeweils lateral an den mittigen Corpus an. Die Verbindung kann von knorpeliger, bindegewebiger oder knöcherner Struktur sein oder sich als Gelenk darstellen [44, 45]. Ob die kleinen Hörner laterokranial am Corpus, direkt an der Fusionsstelle von Corpus und großen Hörnern oder an den rostralen Bereichen der großen Hörner ansetzen, ist unterschiedlich beschrieben [44, 45]. Auch sind sie nicht in allen Fällen knöchern mit der jeweiligen Struktur verbunden [45] und können einen unterschiedlichen Verknöcherungsgrad aufweisen [44]. Fixiert ist das Zungenbein sowohl nach kranial als auch kaudal durch die in supra- und infrahyale Muskulatur [43]. Diese Muskeln halten unter anderem das Zungenbein und auch den Kehlkopf gegen den elastischen Zug der Trachea in seiner Position [44]. Suprahyal ist das Zungenbein über die Mm. mylohyoideus, geniohyoideus und den Venter anterior des M. digastricus vor allem mit der Mandibula verbunden, zusätzlich über den Venter posterior des M. digastricus mit dem Mastoid und über den M. stylohyoideus mit dem Proc. Styloideus des Schädels [43, 44]. Über diese Aufhängung kann das Zungenbein bei Kontraktion der Muskulatur im Rahmen des Schluckaktes nach oben und vorne bewegt werden [46]. Infrahyal bestehen Verbindungen zum Schildknorpel über den M. thyrohyoideus, zum Sternum über den M. sternohyoideus und zur Scapula über den M. omohyoideus [43]. Der M. thyrohyoideus setzt sich vom Schildknorpel als M. sternothyroideus zum Sternum hin fort [44]. Deren Kontraktion führt zu einem Absenken des Zungenbeins und einem Anheben des Kehlkopfes während des Schluckaktes [46].

Der Knorpel, der eine entscheidende Rolle beim Schluckakt spielt, ist der Kehldeckel, die Epiglottis [40, 42]. Er hat die Form eines Blattes [41] bzw. Fahrradsattels [40] und ist an seinem Stiel, Petiolus, über das Lig. thyroepiglotticum an der vorderen Innenseite median am Schildknorpel befestigt [40, 41, 43]. Über das Lig. hyoepiglotticum steht der Kehldeckel in Verbindung mit dem Zungenbein [40]. Für den Verschluss der unteren Atemwege durch die Epiglottis ist ein Fettkörper, der Corpus adiposum

praeepiglotticum, sehr wichtig, da er bei Anheben des Kehlkopfes den Kehldeckel nach unten und damit auf den Kehlkopfeingang drückt, so dass dieser sicher verschlossen ist [40].

Der größte Knorpel des Kehlkopfes ist der Schildknorpel (Abb. 4) [43]. Er ist durch die Membrana thyrohyoidea direkt mit dem darüberliegenden Zungenbein verbunden [40, 47]. Der Schildknorpel ist aufgebaut aus zwei annähernd fünfeckigen Platten, Laminae [40], die ventral miteinander verbunden sind, beim Mann in einem Winkel von etwa 90°, bei der Frau von ca. 120° [42]. Die kraniale Verbindungsstelle bildet die Prominentia laryngea aus, die als Adamsapfel bekannte Vorwölbung, die v. a. bei Männern deutlich hervortreten kann [40, 42]. Oberhalb der Prominentia sind die beiden Platten durch die Incisura thyroidea superior voneinander getrennt [40]. Der kraniale Rand der Laminae bildet die Ansatzstelle für die Membrana thyrohyoidea, die eine bandförmige Verbindung zum Zungenbein darstellt [40]. Medial erhält sie durch das Lig. Thyrohyoideum medianum eine bandförmige Verstärkung, lateral jeweils durch ein Lig. Thyrohyoideum laterale [40, 43]. Dorsal laufen die Schildknorpelplatten nach kranial und kaudal jeweils in zwei obere und untere Hörner zusammen [41, 42].

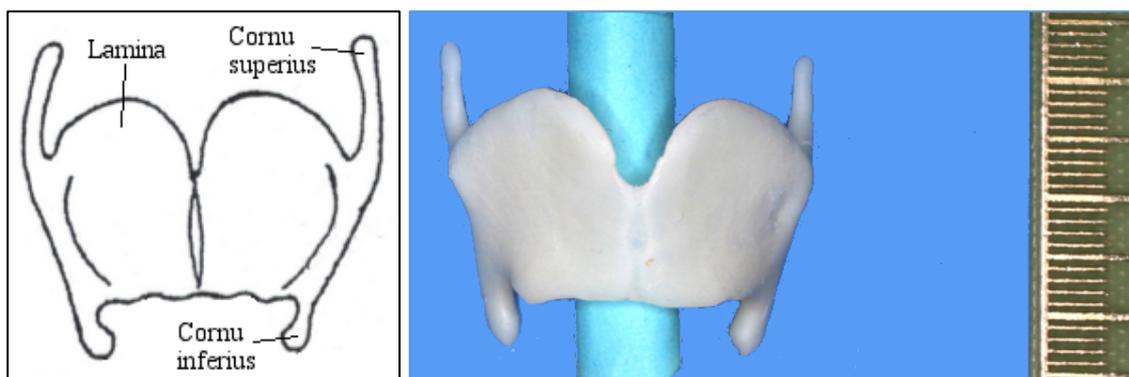


Abbildung 4: Anatomie des Schildknorpels (rechts: Präparat nach Feinpräparation)

Die beiden oberen Hörner sind Ansatz des Lig. thyrohyoideum laterale, das zu den okzipitalen Enden der großen Zungenbeinhörner zieht [40]. Die beiden unteren Hörner artikulieren mit dem nach kaudal anschließenden Ringknorpel in der Articulatio cricothyroidea [40, 42]. Die Gelenkflächen am Ringknorpel befinden sich jeweils lateral außen und werden als Facies articularis thyroidea bezeichnet [42].

Der Ringknorpel (Abb. 5) besitzt zusätzlich zwei weitere Gelenkflächen im kraniookzipitalen Bereich, die mit den Aryknorpeln jeweils eine Art. cricoarytenoidea ausbilden [40, 42]. Der Ringknorpel selbst hat die Form eines „Siegelrings“ [42], wobei ein vorderer schmaler Arcus mit der höheren dorsalen Lamina verbunden ist [40]. Nach

kranial zieht vom rostralen Oberrand das Lig. cricothyroideum medianum zum Unterrand des Schildknorpels [40].

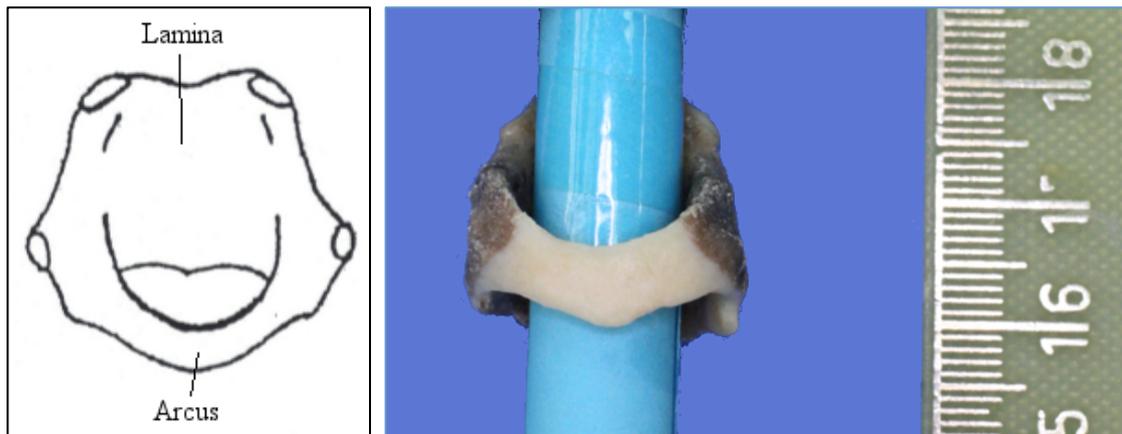


Abbildung 5: Anatomie des Ringknorpels (rechts: Präparat nach Feinpräparation)

Die bereits angesprochenen Aryknorpel übernehmen trotz ihrer geringen Größe eine bedeutende Aufgabe [40]. Sie sind nicht nur Ansatzpunkt für einige Kehlkopfmuskeln, sondern dienen auch als Ansatz für die Stimmbänder [40]. In ihrer Form ähneln sie einer Pyramide [40, 41]. Lateral bietet der Proc. muscularis Ansatzpunkt für mehrere Kehlkopfmuskeln [41]. Oberhalb der Apex cartilaginis arytenoideae findet sich jeweils ein Cartilago corniculata [42]. Nach rostral ist schließlich der Proc. vocalis jeweils Ansatzpunkt für die Stimmbänder, Ligg. vocalia, die über den Conus elasticus mit den lateralen und dorsalen Oberrändern des Ringknorpels verbunden sind, sowie für die Mm. thyroarytenoidei, die je einen M. vocalis beinhalten [43].

Der Cartilago cuneiformis ist jeweils in der Plica aryepiglottica eingelagert, über die Aryknorpel und Epiglottis miteinander verbunden sind [42].

Um die einzelnen Bestandteile des Kehlkopfskeletts beim Schlucken, Sprechen oder Atmen in die adäquate Position zu bringen, sind einige Muskeln nötig [40, 42, 43]. Sie können unterteilt werden in die inneren Kehlkopfmuskeln und einen äußeren Kehlkopfmuskel, den M. cricothyroideus [40-42]. Dieser einzige äußere Muskel besteht beidseits aus einer Pars recta und einer Pars obliqua, welche Schildknorpelunterkante und die unteren Schildknorpelhörner mit der Ringknorpeloberkante verbinden [40]. Dadurch kann der Schildknorpel bei Kontraktion nach vorne unten gegen den Ringknorpel abgekippt werden [41, 43]. Dies hat letztendlich eine grobe Vorspannung der Stimmbänder zur Folge [43]. Die Aufgabe der inneren Kehlkopfmuskeln besteht vor allem im Schließen und Öffnen der Stimmritze, um Luft für die Atmung und auch zur Phonation hindurchzulassen [40]. Sie werden mit Ausnahme des M. vocalis als

Stellapparat bezeichnet [42]. Die Stimmritze selbst wird in einen knorpeligen Anteil, die Pars intercartilaginea, zwischen den beiden Aryknorpeln und eine Pars intermembranacea zwischen den Stimmbändern an sich unterteilt, wobei die beiden Anteile durch unterschiedliche Muskeln verschlossen werden [40, 43]. Das Öffnen hingegen übernimmt nur ein einziger Muskel, der M. cricoarytenoideus posterior [40]. Er zieht von der äußeren Hinterfläche des Ringknorpels jeweils zum Proc. muscularis des Aryknorpels [43]. Dadurch werden die Aryknorpel um eine vertikale Achse nach außen rotiert, sodass die gesamte Stimmritze eröffnet wird [40, 43]. Für den Stimmritzenschluss dagegen sind diverse Muskeln zuständig [40, 42]. Den knorpeligen Anteil verschließen die Mm. arytenoidei obliquus und transversus, die die beiden Aryknorpel dorsalseitig schräg bzw. waagrecht miteinander verbinden [40, 42]. Der Bereich zwischen den Stimmbändern wird jeweils vom M. cricoarytenoideus lateralis verschlossen [42]. Bei dessen alleiniger Anspannung bleibt zwischen den Aryknorpeln das sogenannte Flüsterdreieck geöffnet [43]. Zusätzlich verschließt auch der M. thyroarytenoideus die Pars intermembranacea [42], wobei der darin enthaltene M. vocalis eher für die Feinpannung der Stimmbänder zuständig ist [43]. Damit sind M. vocalis und M. cricothyroideus die zentralen Regulatoren des Spannapparates [42]. Ein weiterer Binnenmuskel des Kehlkopfes ist der M. aryepiglotticum, der die Plica aryepiglottica formt [42].

Damit dieser Komplex seine Funktion erfüllen kann, ist auch eine entsprechende Blutversorgung und Innervation nötig [43]. Die arterielle Gefäßversorgung erfolgt durch drei paarige Äste: die A. laryngea superior und den R. cricothyroideus, welche Abgänge der A. thyroidea superior aus der A. carotis externa sind, und durch die A. laryngea inferior, die aus der A. thyroidea inferior aus dem Truncus thyrocervicalis hervorgeht [42]. Die A. laryngea superior tritt jeweils durch eine laterale Öffnung in der Membrana thyrohyoidea in den Kehlkopf ein, die A. laryngea inferior dagegen auf Höhe der unteren Schildknorpelhörner, wobei es zu Anastomosen der beiden Gefäße innerhalb des Kehlkopfes kommt [40, 43]. Außerdem sind alternative Verläufe bzw. Anastomosen im Falle der Normvariante eines Foramen thyroideum, wie unten näher beschrieben, möglich [48, 49]. Der R. cricothyroideus von rechts und links vereint sich zur A. laryngea media und tritt durch das Lig. cricothyroideum medianum in das Kehlkopfinnere ein [42]. Er versorgt den Bereich der Glottis [42]. Der venöse Abfluss erfolgt parallel zu den arteriellen Gefäßen und drainiert in die V. jugularis interna [40].

Auch die Nerven verlaufen größtenteils ähnlich wie die Gefäße. Insgesamt wird der Kehlkopf sowohl motorisch als auch sensibel durch Äste des N. vagus (X.) versorgt [42]. Dabei teilen sich der N. laryngeus superior und der N. laryngeus recurrens die Versorgung, wobei der obere Ast den oberen Anteil des Kehlkopfes bis zur Stimmritze innerviert und der untere Ast entsprechend den Anteil unterhalb der Stimmritze [40, 43]. Zusätzlich werden sympathische und parasympathische Äste zur Versorgung der Drüsen angelagert [40]. Der N. laryngeus superior teilt sich in einen R. internus und externus auf, bevor der erstgenannte zusammen mit der A. laryngea superior durch die Membrana thyrohyoidea in das Innere des Kehlkopfes zieht [40]. Der R. externus ist am Kehlkopf zuständig für die Innervation des M. cricothyroideus [42]. Der R. externus und internus können im Rahmen einer Normvariante wie unten näher beschrieben über eine Anastomose miteinander kommunizieren [48, 49]. Der N. laryngeus recurrens gelangt über Umwege, rechts in einem Bogen um die A. subclavia und links um den Aortenbogen, zum Kehlkopf [43]. Er tritt von dorsal etwa zwischen den unteren Schildknorpelhörnern und Ringknorpel ein [42]. Die beiden Kehlkopfnerve sind im Bereich des Recessus piriformis in der Galen Anastomose miteinander verbunden [42].

### 2.2.3 Normvarianten

Wie in allen Bereichen der Anatomie finden sich auch beim Kehlkopf Varianten des oben beschriebenen Aufbaus [50-52]. Die Kenntnis dieser Normvarianten spielt auch im klinischen Alltag eine wichtige Rolle. Zum einen können sie im Rahmen von Operationen von Bedeutung sein, zum anderen natürlich auch in der bildgebenden Diagnostik und Rechtsmedizin, da eine Normvariante beispielsweise als Verletzung, Raumforderung o. Ä. fehlinterpretiert werden könnte. Denn die Fehldeutung einer Normvariante als Verletzung oder Fraktur wäre ein potenzieller Hinweis auf eine Tötung [52].

Zunächst sollen die Normvarianten des Zungenbeins betrachtet werden. Dabei kann das Zungenbein eine unterschiedliche Form aufweisen: eine Hyperbel-, Parabel- oder Hufeisenform (Abb. 6) [45]. Außerdem sind Mischformen aus zwei der genannten möglich [45]. Die Hufeisenform, bei der die distalen Enden der großen Zungenbeinhörner nach innen gebogen sind, tritt selten auf [45, 52, 53]. Die Angaben variieren zwischen 4,2% beim Mann bzw. 2,1% bei der Frau [53], über 7% [52] bis zu einer Häufigkeit von 13% [45]. Koebke und Saturnus fanden in ihrer Untersuchung von 504 menschlichen Zungenbeinen beim Mann am häufigsten die Parabelform gefolgt

von der Hyperbelform, bei der Frau häufiger die Hyperbelform [45]. Brenner dagegen stellte bei beiden Geschlechtern eine Hyperbelform häufiger als eine Parabelform fest [52].



**Abbildung 6: Präparat eines Zungenbeins mit Parabel- (links) und Hyperbelform (Mitte) sowie Skizze eines Zungenbeins mit Hufeisenform (rechts)**

Eine weitere beschriebene Variante ist die Lingula (Abb. 7). Ito et al. beschreiben damit einen nach kranial ausgerichteten Knochenvorsprung [53], der auch von Di Nunno et al. bereits in drei Fällen nachgewiesen wurde [50]. Dieser beschreibt sogar einen Fall mit doppelter Exostose [50]. Ito et al. unterteilten die Lingula danach, ob sie voll ausgebildet war, ein Ansatz vorhanden oder gar nicht angelegt war [53]. Dabei wurden bei 91,3% der Männer bzw. 90,0% der Frauen eine vollständig oder ansatzweise ausgebildete Lingula beobachtet [53].



**Abbildung 7: 3D-Rekonstruktionen aus dem CT-Datensatz zweier Zungenbeine, Ansicht von anterior, rechts mit geringer Kippung nach kaudal: Beide Zungenbeine zeigen einen nach kranial gerichteten, mittig am Corpus lokalisierten Knochenvorsprung im Sinne einer vollständig ausgeprägten Lingula**

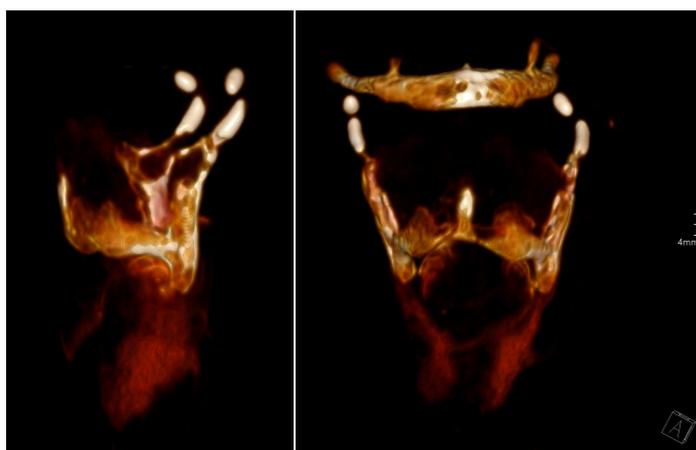
Schwerwiegende Anomalien des Zungenbeins treten beim Pierre Robin Syndrom auf [54]. Dabei können in ausgeprägten Fällen Anteile oder sogar fast das ganze Zungenbein fehlen, was das Schlucken unmöglich machen kann [54].

Auf die Verknöcherung zwischen Corpus und den großen Hörnern, die sehr unterschiedlich ausgeprägt sein kann, wird im Kapitel der altersspezifischen Veränderungen näher eingegangen.

Auch die kleinen Zungenbeinhörner müssen nicht immer gleichermaßen ausgeprägt sein. Sie können sich asymmetrisch darstellen, ein Horn kann fehlen und auch eine beidseitige Aplasie ist beschrieben [50, 51]. Gok et al. berichten über einen Fall, bei dem beide kleinen Hörner fehlten, stattdessen ein zusätzlicher ca. 1,59 cm langer Knochen von der linken Corpuseite entsprang [55].

Eine weitere Anlagevariante der kleinen Hörner, ist das Eagle-Syndrom [56], das mit einem verlängerten Proc. styloideus, einem verkalkten Lig. stylohyoideum oder einer Kombination aus beidem assoziiert sein kann [57, 58]. Die Veränderungen können sowohl uni- als auch bilateral auftreten [57, 58]. Es wird vermutet, dass diese Variante bei etwa 4% der Bevölkerung zu finden ist, allerdings zeigt nur ein kleiner Anteil Symptome des Eagle Syndroms [57-59], wie z. B. Halsschmerzen, Schmerzen bei Kopfbewegungen, Schluckbeschwerden, Hypersalivation, Fremdkörpergefühl oder Veränderungen der Stimme [51, 58, 59]. Pathophysiologisch gibt es verschiedene Theorien: eine vorangegangene Tonsillektomie, die zur Irritation der Pharynxschleimhaut führt, eine Fraktur des Proc. styloideus, eine Irritation der angrenzenden Nerven, Druck auf die A. carotis interna, die zu einer Irritation der arterienversorgenden vegetativen Nerven führt und entzündliche oder degenerative

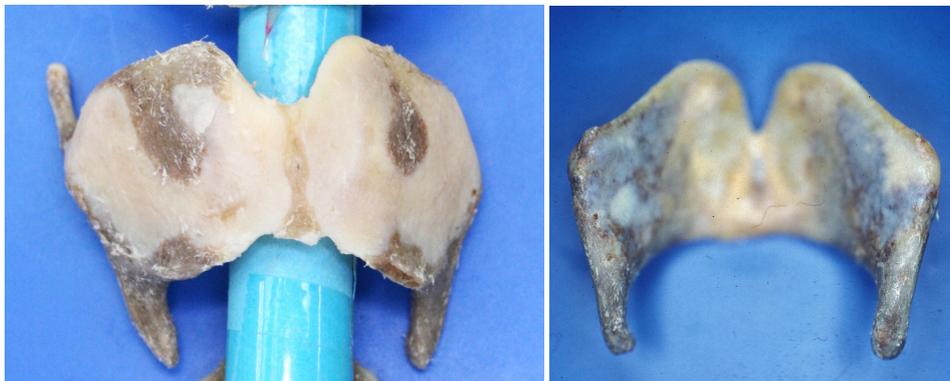
Veränderungen am Ansatz des Lig. stylohyoideus [57, 58].



**Abbildung 8:** 3D-Rekonstruktionen aus dem CT-Datensatz eines Kehlkopfes, links wurde das Zungenbein zur verbesserten Übersicht entfernt; Ansicht von laterodorsal (links) sowie von anterior (rechts): Beidseits ausgebildeter Cartilago triticea kranial der oberen Schildknorpelhörner

Eine weitere, bekannte Variante ist der Weizenkornknorpel (Abb. 8), Cartilago triticea, der in das Lig. thyrohyoideum laterale eingelagert ist [40, 41]. Ob sein Vorhandensein oder nur seine Verknöcherung variabel ist, geht aus der aktuell vorhandenen Literatur nicht eindeutig hervor [17, 40-42, 60]. Aufgrund der Fähigkeit zur

Verknöcherung liegt histologisch hyaliner Knorpel vor [60]. Er kann sowohl ein- als auch beidseitig auftreten [50]. Ajmani, der 40 Kehlköpfe nigerianischer Erwachsener ausmaß und untersuchte, stellte bei 16,66% der Frauen und 13,5% der Männer Weizenkornknorpel fest [61]. Turk und Hogg stellten in 33,3% deren Auftreten in Röntgenbildern des Kehlkopfes fest [60], während Di Nunno et al. mit mammographischer Untersuchungstechnik ähnliche Ergebnisse erzielten (ein- oder beidseitig Weizenkornknorpel in 12 von 40 Fällen) [50]. In sogar 40,2% ihres Kollektivs fanden de la Grandmaison et al. bei ihren Untersuchungen ebenfalls mittels Röntgenaufnahmen das Auftreten von jeweils ein oder zwei Cartilagine triticeae [62]. Naimo et al. schließlich untersuchten 431 Kehlköpfe im Computertomogramm und entdeckten in nur 23,6% diese Normvariante [17]. Während Ajmani, O'Bannon und Grunow und Ahmad et al. eine Verkalkung des Cartilago triticea häufiger bei Frauen als bei Männern fanden [61, 63, 64], trat diese in Hately et al.'s Kollektiv häufiger bei Männern auf [65]. Als sehr variable, jedoch auch häufige Normvariante, sollte der Cartilago triticea im Hinterkopf behalten werden, denn derartig eingelagerte Knorpel können beispielsweise bei unvollständiger Verknöcherung leicht als Frakturfragment eines oberen Schildknorpelhorns fehlinterpretiert werden [14, 50]. Carter, Ahmad et al. und Kamikawa et al. befürchten unter anderem eine Verwechslung mit verkalkten Atheromen der A. carotis in der Bildgebung [64, 66, 67].

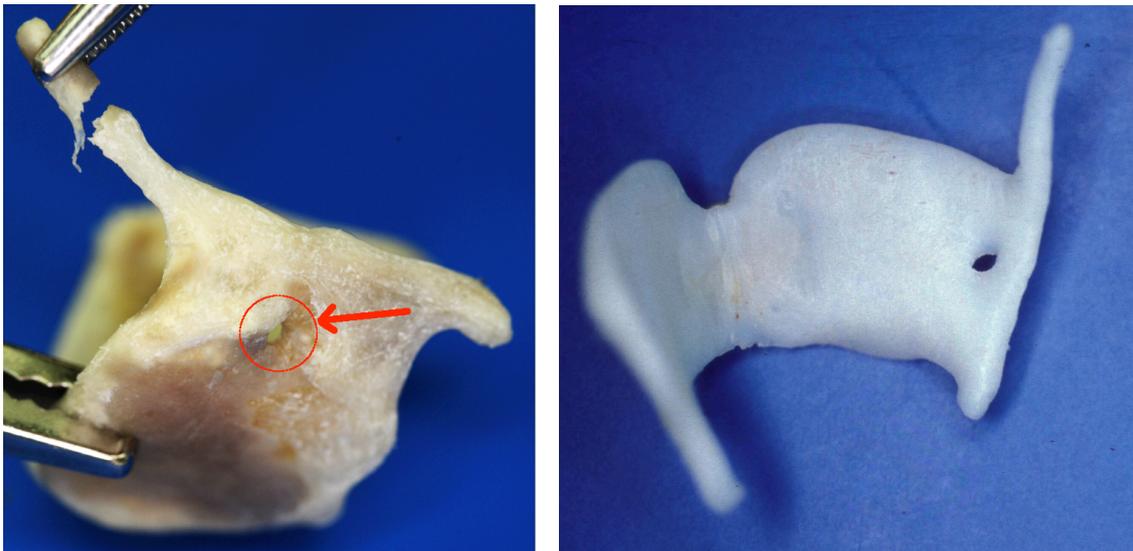


**Abbildung 9: Präparate zweier Schildknorpel nach Feinpräparation in der Ansicht von anterior (links) sowie von posterior (rechts): Agenesie des linken oberen Zungenbeinhorns (links); bilaterale Agenesie der oberen Zungenbeinhörner (rechts)**

Auch der Schildknorpel selbst kann Varianten aufweisen [52]. Das betrifft zum Beispiel die Schildknorpelhörner [52]. Dabei können obere Schildknorpelhörner sowohl uni- als auch bilateral fehlen (Abb. 9) [52, 62]. In der Studie von de la Grandmaison et al. war in 7,3% der Fälle einseitig ein Horn nicht angelegt [68]. Brenner stellte bei der Untersuchung von 213 Kehlköpfen in 3 Fällen das Fehlen beider Hörner und in 3

jeweils eines Hornes fest [52]. Weiterhin können die oberen Hörner in das Lumen hinein verdreht bzw. disloziert sein, auch ohne dass ein Trauma vorangegangen sein muss [69-71]. Diese Patienten können z. B. über Dysphagie oder Fremdkörpergefühl klagen [69].

Die Schildknorpelplatten können ebenfalls von Anlagevarianten betroffen sein [48, 72]. Dort kann uni- oder bilateral ein Foramen thyroideum auftreten (Abb. 10) [48, 72]. Es befindet sich im posterior-superioren Bereich der Lamina des Schildknorpels [49, 72]. Die Prävalenz variiert nach Studie und Kollektiv. Durchschnittlich beträgt sie etwa 27% [72]. León et al. stellten das Auftreten eines Foramens bei Embryos und Feten in 57% der Fälle fest, bei Erwachsenen dagegen in 31% der Fälle [48]. Das Foramen kann Gefäße, Nerven oder beides beinhalten [48, 49, 72, 73]. Dabei handelt es sich im Falle des Nerven um einen anastomosierenden Ast zwischen dem R. externus und internus des N. laryngeus superior [48, 49]. Das Gefäß ist die A. laryngea superior oder ein anastomosierender Ast zwischen der A. laryngea superior und dem R. cricothyroideus [48, 49].



**Abbildung 10:** Präparate zweier Schildknorpel nach Feinpräparation in der Ansicht von lateral des gekippten Schildknorpels (links) sowie von dorsolateral (rechts); Rechts: Foramen thyroideum in der linken Schildknorpelplatte; außerdem liegt eine mittige Fraktur des linken oberen Schildknorpelhornes sowie eine basisnahe, komplette Fraktur des rechten oberen Schildknorpelhornes vor; Links: Foramen thyroideum in der rechten Schildknorpelplatte; außerdem Aplasie des linken oberen Zungenbeinhornes

León et al. stellten fest, dass unter den Embryos und Feten in 37% keine neurovaskulären Elemente in den Foramina zu finden waren, sondern nur Bindegewebe [48]. Unter den Erwachsenen dagegen wurde in 73% Gefäß und Nerv, in 20% ein Nerv und in 7% ein Gefäß gefunden [48]. Daher wird vermutet, dass die Entstehung dieses

Foramens eine Kombination der neurovaskulären und Kiemenbogen-Theorie ist [48]. Die neurovaskuläre Theorie vermutet, dass es aufgrund von Gefäßen oder Nerven, die sich im Bereich der späteren Schildknorpelplatte befinden, dort zu keiner Knorpelbildung kommt und daher ein Loch resultiert [48, 49, 72]. Die Kiembogen-Theorie dagegen geht davon aus, dass das Loch Folge einer unvollständigen Verbindung des 4. und 6. Kiemenbogens ist [48, 72]. León et al. vermuten daher, dass das Loch bei der Verbindung von 4. und 6. Kiemenbogen entsteht und persistiert, wenn ein Gefäß oder Nerv einwächst [48]. Ist das nicht der Fall, kommt es zum kompletten knorpeligen Verschluss [48].

Ein seltener Fund am Kehlkopf kann auch eine angeborene Spaltbildung sein, die in der Regel dorsalseitig auftritt [51, 74]. Es wurde aber auch eine vordere und sogar gleichzeitig vordere und hintere Spaltbildung beschrieben [74, 75].

Weiterhin kann eine Verbindung bzw. Fusion des Ringknorpels mit der ersten Trachealspange auftreten [76].

Am Kehlkopf können sich natürlich auch Folgen von Verletzungen finden wie z. B. eine Pseudarthrose nach Fraktur eines Schildknorpelhorns [51, 77] oder eine Chondronekrose durch Bestrahlung [51, 78].

#### 2.2.4 Geschlechtsspezifische Unterschiede des Kehlkopfes

Geschlechtsspezifische Unterschiede sind vor allem zum Zungenbein beschrieben [79-81]. Die Größe bzw. verschiedene Abmessungen des Zungenbeins wurden bereits vielfach als Mittel zur Geschlechtsbestimmung vorgeschlagen, da männliche Zungenbeine fast durchgehend größere Messwerte aufwiesen [53, 79-86]. Miller et al. erstellten mithilfe eines Bildanalyse-Systems 30 Messungen [80], die von mehreren Autoren weiter verwendet wurden [79, 81, 86]. Dabei wurden die Abmessungen der einzelnen Zungenbeinbestandteile, also des Corpus sowie der großen und kleinen Hörner, als auch Abstände und Winkel zueinander erfasst [79-81]. Kim et al. stellten für 21 der Messungen in einem koreanischen Kollektiv fest, dass der Großteil der Werte männlicher Zungenbeine signifikant größer als die der weiblichen waren [79]. Auch das Gewicht ergab bei den Männern größere Werte [79]. Aus drei der Messungen wurde eine Gleichung ermittelt mit einer Treffsicherheit der korrekten Geschlechterermittlung von 88,5% bei Männern und 87,9% bei Frauen [79]. Balseven et al. machten ähnliche Beobachtungen bei den Untersuchungen eines türkischen Kollektivs [81]. 18 der

Messungen waren hier signifikant größer bei Männern [81]. Sie berechneten aus dem Abstand zwischen den distalen Enden der großen Zungenbeinhörnern, deren Länge und der Länge der kleinen Hörner eine Diskriminanzfunktion, womit 77,4% der Männer und 81,3% der Frauen richtig zugeordnet werden konnten [81]. Weiterhin konnte Mukhopadhyay mit seiner Funktion, die sich auch aus vier manuellen Messungen ergibt, 90% der Fälle dem richtigen Geschlecht zuordnen [83]. Gegenüber diesen Messungen an den fotografierten bzw. manuell ausgemessenen Zungenbeinen schlugen Ito et al. vor, die Geschlechtsdifferenzierung mit einer Volumenmessung mittels Computertomographie durchzuführen [53, 79, 81, 83]. Anhand von 3D-CT-Rekonstruktionen fanden Loth et al. in fast allen ihrer Längenmessungen an den Kehlkopfknochen signifikant höhere Werte bei den Männern gegenüber den Frauen des Kollektivs [87]. Auch Form und Größe ergaben signifikante Unterschiede zwischen Mann und Frau [87]. Insgesamt wird die Morphologie des Zungenbeins als adäquate Methode zur Bestimmung des Geschlechts betrachtet [79, 81, 83].

### 2.2.5 Altersspezifische Veränderungen des Kehlkopfes

Auch bezüglich des Alters wurden Veränderungen am Zungenbein und Kehlkopfskelett beschrieben. Vielfach wurde eine mit dem Alter zunehmende Fusion bzw. Ossifikation von Zungenbeincorpus mit den großen Hörnern beobachtet (Abb. 11) [45, 53, 81, 88-90].



**Abbildung 11: Zwei Zungenbeinpräparate nach Feinpräparation in der Ansicht von kranial und anterior; Links: knorpelige Verbindung des Zungenbeincorpus mit den großen Hörnern ohne knöcherne Fusion Rechts: vollständige knöcherne Fusion des Zungenbeincorpus mit den großen Hörnern**

Dabei wurde die uni- und bilaterale Fusion makroskopisch oder im Röntgenbild betrachtet. Eine unilaterale Fusion trat in der Regel zu einem früheren Zeitpunkt auf, allerdings muss die Fusion der anderen Seite nicht zwangsläufig darauf folgen [88]. Es konnte keine Fusion vor dem 20. bzw. 25. Lebensjahr festgestellt werden [45, 88-90].

Das Durchschnittsalter der unilateralen Fusion liegt je nach Studie zwischen 38 und 59 Jahren, das der bilateralen Fusion zwischen 42 und 86 Jahren [53, 88, 89]. Bei Männern, die älter als 70 bzw. Frauen, die älter als 80 waren, hatte sich in Ito et al.'s Kollektiv zu 80% eine Verknöcherung entwickelt [53]. Sie beschreiben außerdem im Gegensatz zu anderen Studien eine signifikant höhere Anzahl an unilateraler linksseitiger Fusion [53]. Als mögliche Ursache wird der wahrscheinlich große Anteil an Rechtshändern und eine damit verbundene größere Beanspruchung der linken Seite z. B. beim Kauen vermutet [53]. Im Hinblick auf eine forensische Altersbestimmung anhand des Zungenbeins erweist sich diese Methode allerdings als unzuverlässig [45, 81, 88, 90]. Die Problematik ist das sehr variable Fusionsalter. Es finden sich selbst in hohem Alter noch komplett unfusionierte Zungenbeine [45, 88], aber auch eine komplette Fusion in der Altersgruppe von 20 bis 30 Jahren ist möglich [53, 81]. Daher sollte die Fusion des Zungenbeins nur in Kombination mit zusätzlichen Methoden zur Altersbestimmung verwendet werden [88].

Auch die anderen Kehlkopfbestandteile, darunter vor allem der Schildknorpel wurden bereits einige Male auf eine zunehmende Verknöcherung mit dem Alter hin untersucht [60, 62, 91, 92]. Dort wurde ebenfalls stets ein Zusammenhang zwischen Alter und Ossifikation gefunden [60, 62, 91, 92]. Ob diese allerdings einem bestimmten Muster folgt oder eine Alterseinschätzung anhand dessen erlaubt, wird ebenso wie beim Zungenbein gegensätzlich beurteilt [17, 60, 62, 76, 91-95]. Es war z. B. von Keen und Wainwright 1958 ein Schema der Verknöcherung von Schild-, Ring- und Aryknorpel erstellt worden [76], das später unter anderem von Turk und Hogg, de la Grandmaison et al. und Dang-Tran et al. an ihren Kollektiven überprüft worden war [60, 62, 91]. Turk und Hogg fanden in Röntgenaufnahmen große individuelle Unterschiede bezüglich des Alters bei ähnlichen Verknöcherungsstadien und schlussfolgerten, dass eine Altersbestimmung auf Basis der Verknöcherung nicht sinnvoll sei [60]. Sie stellten allerdings fest, dass die Ossifikation bei Frauen an allen drei Knorpeln langsamer abläuft als beim Mann, bzw. bei Frauen in den höheren Altersgruppen ein geringerer Verknöcherungsgrad als bei den Männern entsprechenden Alters vorlag [60]. De la Grandmaison et al. hatten für jeden Kehlkopf einen Score aus der Summe der Verknöcherungsstufen berechnet und dabei eine Korrelation mit dem Alter von 0,74 gezeigt [62]. Der Zusammenhang war in ihrem Kollektiv von 82 Patienten bei Männern stärker als bei Frauen zu finden [62]. Dang-Tran et al. schließlich verglichen das Schema von Turk und Hogg bzw. Keen und Wainwright mit einem siebenstufigen

Schema von Vleck [91]. 312 Schildknorpel waren dabei anhand von 3D-CT-Rekonstruktionen den Verknöcherungsstufen der beiden Schemata zugeordnet worden [91]. Dabei waren ebenfalls große Altersunterschiede innerhalb einer Stufe zu finden gewesen [91]. Das Schema von Turk und Hogg erbrachte dabei die bessere Einschätzung [91]. In der Volumenanalyse, in der jeweils das verknöcherte Volumen des Kehlkopfes errechnet wurde, ergaben sich Korrelationen von 0,75 bei Frauen und 0,73 bei Männern mit dem Alter, welche dennoch zu ungenau für eine Methode der forensischen Altersbestimmung erschienen [91]. Damit hat sich bisher durchaus ein Zusammenhang der Kehlkopfverknöcherung mit dem Alter gezeigt, allerdings wurde noch keine adäquate Methode gefunden, dies für eine Alterseinschätzung zu nutzen [62, 91, 92].

## 2.3 Verletzungen des Kehlkopfes

### 2.3.1 Ursachen

Obwohl Kehlkopfverletzungen aus verschiedensten Gründen entstehen, wird dennoch wenig Genaues über die Verletzungen an sich berichtet. Zu den häufigsten Ursachen zählt die direkte Gewalt gegen den Hals im Rahmen von Erhängen, Erdrosseln oder Erwürgen [2]. Direkte Gewalt gegen den Hals im Gesamten war im Kollektiv von Dunsby und Davison bei etwas mehr als der Hälfte der Fälle (56,4%) ursächlich für Kehlkopfverletzungen [2]. Bei der Halspräparation in situ waren die Verletzungen in 32 Fällen (41,0%) auf Erhängen, in 11 Fällen (14,1%) auf Erwürgen und in einem Fall (1,3%) auf Erdrosseln zurückzuführen gewesen [2].

Allerdings können Kehlkopfverletzungen auch ganz andere Ursachen zugrunde liegen [19, 96]. Dies war bereits 1886 bekannt [1]. Sie können infolge stumpfer Gewalt verschiedenster Art, wie z. B. im Rahmen von Verkehrsunfällen entstehen [2, 19, 97]. 12 (15,4%) der 78 untersuchten Fälle mit Kehlkopfverletzungen waren in Dunsbys und Davisons Kollektiv auf einen Verkehrsunfall im Straßenverkehr oder einen Sturz vor einen Zug zurückzuführen [2]. Außerdem wurden mehrfach Kehlkopfverletzungen sowohl bei Stürzen aus größerer Höhe als auch aus dem Stand beschrieben [2, 68, 98]. Zudem können Kampfsportarten ein Risiko für derartige Frakturen darstellen [99]. Auch in anderen Sportarten wie Basketball oder Football sind Fälle von Kehlkopfverletzungen durch einen Schlag auf die Halsregion des Spielers beschrieben [100, 101]. Seltener Gründe können z.B. Schuss- oder Schnittwunden bzw. Explosionen sein [2, 19].

### 2.3.2 Verletzungsart und -lokalisation

Welche Strukturen des Kehlkopfes und des Zungenbeins bei Verletzungen betroffen sind, hängt vor allem von der Lokalisation und der Stärke der Gewalteinwirkung ab. Sind noch keine Frakturen entstanden, können Einblutungen in die Halsmuskulatur oder in die Weichteile Hinweis auf eine Gewalteinwirkung sein (Abb. 12) [8]. Vor allem bei Fällen von Erdrosseln oder Erwürgen sind solche Verletzungen häufig [8], wobei z. B. Azmak auch beim Tod durch Erhängen in 51,7% der Fälle derartige Einblutungen fanden [3]. Werden umblutete Frakturen am Kehlkopf nachgewiesen, deutet dies neben dem Auftreten von petechialen Einblutungen für die Vitalität des Opfers zum Zeitpunkt der Gewalteinwirkung hin [8].

Was Frakturen des Kehlkopfes an sich angeht, war in den meisten Studien der Schildknorpel am häufigsten betroffen [2, 4, 13, 19, 102, 103]. Während Dunsby und Davison und Becker et al. dies unabhängig von der Verletzungsursache feststellten [2, 19], befassen sich viele andere vor allem mit dem Tod durch Erhängen [3, 4, 12, 13, 103]. Dabei werden typischerweise Frakturen der oberen Schildknorpelhörner



**Abbildung 12: Kehlkopfpräparat vor Präparation in der Ansicht von posterior: Basisnahe umblutete Frakturen der beiden oberen Schildknorpelhörner**

beschrieben [4, 10, 103, 104], die dadurch entstehen, dass der Kehlkopf nach dorsal gegen die Halswirbelsäule gedrückt, wodurch es zu einer Flexion der Hörner kommt [15]. Die Bruchstelle findet sich dabei zumeist an der Basis der Hörner [15, 104]. Saternus et al. zeigten, dass die Fraktur bei homogen verknöcherten Schildknorpeln an der Stelle der größten mechanischen Krafteinwirkung, also zumeist im unteren Drittel des Horns, auftritt [15]. Bei inhomogen verknöcherten Schildknorpeln kommt es an der Knorpel-Knochen-Grenze aufgrund des hohen

Dichteunterschieds zur Fraktur [15]. Nicht verknöcherte Schildknorpel bleiben aufgrund ihrer elastischen Knorpelstruktur meist unverletzt [104]. Insgesamt werden Frakturen des Kehlkopfes zunehmend bei älteren Menschen beobachtet, was auf den größeren Verknöcherungsanteil im Alter zurückgeführt wird [5, 8, 13, 19]. Frakturen der unteren Hörner sind vergleichsweise selten [4, 10, 103].

Azmaç et al. und Üzün et al. stellten in ihren retrospektiven Analysen der Obduktionsergebnisse häufiger Frakturen des Zungenbeins im Falle von Erhängen fest [3, 5]. Das Zungenbein frakturiert dabei meist im Bereich der großen Hörner in der Regel im distalen bis mittleren Drittel [8, 14, 105]. Aber auch zwischen Corpus und den großen Hörnern ist dies möglich [4, 106].

Verletzungen des Ringknorpels hingegen sind selten und untypisch für Erhängen [2, 4, 10, 19, 107]. Godin et al. halten Ringknorpelfrakturen sogar für einen möglichen Hinweis auf Fremdeinwirkung, da diese deutlich häufiger bei aktiven Strangulationen als bei Suiziden gefunden wurden [102].

### 3. ZIELSETZUNG

Kehlkopfverletzungen spielen in der rechtsmedizinischen Untersuchung eine wichtige Rolle, da sie beispielsweise beim Tod durch Erhängen, Erdrosseln oder Erwürgen auftreten können. Nachdem sie, vor allem bei den zuletzt genannten Todesursachen, einen Hinweis auf eine Tat durch dritte Hand darstellen können, ist es entscheidend, diese häufig sehr subtilen Verletzungen zu entdecken. Nicht immer liegen begleitende Weichteileinblutungen oder Dislokationen von Frakturfragmenten vor. Oft können kleine Risse der einzige Hinweis auf stattgehabte Gewalteinwirkung sein, weshalb diese fragile Region mit größter Vorsicht und Sorgfalt untersucht werden muss. Besteht der Verdacht auf ein Halstrauma, gehört nach Herstellen einer künstlichen Blutleere die Darstellung des Zungenbeins, das „Freilegen der oberen Schildknorpelhörner“ sowie der Cricothyroidgelenke und die Darstellung der inneren Kehlkopfmuskeln zum leitliniengerechten Vorgehen [16]. Eine genauere Kehlkopfuntersuchung und Feinpräparation wie z. B. nach Maxeiner kann „bei Todesfällen durch Halskompression wertvolle Befunde (vor allem Blutungen) für ein solches Geschehen liefern“ [16]. Diese Vorgehensweise ist allerdings nicht Teil der standardmäßigen Leicheneröffnung [16]. Es sind eine entsprechende Erfahrung mit der Präparationstechnik sowie ein zusätzlicher Zeitaufwand für diese Untersuchungstechnik nötig, so dass das Institut für Rechtsmedizin der LMU zu den Ausnahmen gehört, das die vollständige Feinpräparation des Zungenbein-Kehlkopfkomplexes regelmäßig durchführt.

Daher wäre eine gleichwertige, unkomplizierte Methode für diesen zentralen Bereich der postmortalen Untersuchung wünschenswert. Aufgrund dessen wurde in dieser Arbeit die computertomographische Untersuchung des Zungenbein- und Kehlkopfpaketes als Alternative zur manuellen Präparation evaluiert. Während die PMCT-Untersuchungen des Kehlkopfes bisher nur in situ erfolgt sind [10, 11, 17, 20], wurde in dieser Studie der Zungenbein-Kehlkopf-Komplex separat in einem Formalin-gefüllten Behältnis in der CT untersucht. Die Untersuchung konnte in dem ohnehin nötigen Zeitraum der Formalinfixierung stattfinden ohne zusätzliche Zeit in Anspruch zu nehmen. Der Transport der Kehlköpfe in den verschlossenen Plastikbehältern gestaltete sich unkompliziert und mit gegebenenfalls ergänzender Verpackung in Plastiktüten ergaben sich außerdem keine hygienischen Probleme oder Geruchsbelästigung.

Studienziel war es die diagnostische Genauigkeit der post-mortem-Computertomographie (PMCT) am isolierten Zungenbein-Kehlkopf-Komplex hinsichtlich Verletzungen zu evaluieren und mit der Feinpräparation bis auf mikroskopische Ebene als Goldstandard zu vergleichen.

Zum anderen war der Kehlkopf bereits Objekt zahlreicher Studien zur forensischen Altersbestimmung. Da diese häufig unbefriedigende Ergebnisse hinsichtlich der Zuverlässigkeit lieferten, ist dies der zweite Aspekt, der an diesem Kollektiv untersucht werden soll. Dabei sollen Daten bezüglich der Verknöcherung der einzelnen Kehlkopfbestandteile sowohl aus der feinpräparatorischen Untersuchung sowie aus der Bildgebung gewonnen und hinsichtlich ihres Zusammenhanges mit dem Alter beurteilt werden.

## **4. MATERIAL UND METHODEN**

### **4.1 Kollektiv**

Es wurden innerhalb von 10 Monaten (von Juli 2013 bis Mai 2014) 54 isolierte Kehlkopfpakete zunächst in der CT und anschließend mittels Feinpräparation untersucht, nachdem sie im Rahmen gerichtlicher Obduktionen am Institut für Rechtsmedizin der Universität München asserviert worden waren. Voraussetzung für die Asservierung war, dass bei der Obduktion der Verdacht auf eine Verletzung im Halsbereich bestanden hatte oder eine solche nicht mit Sicherheit ausgeschlossen werden konnte. Ausschlusskriterien für die CT-Untersuchung waren ein unvollständig erhaltener Kehlkopf, z. B. aufgrund von Brand oder stark fortgeschrittener Fäulnis und ein Alter von unter 15 Jahren.

### **4.2 Methodik**

#### **4.2.1 Feinpräparation**

Zur Diagnostik der Kehlkopfverletzungen erfolgte von rechtsmedizinischer Seite im Falle einer Asservierung zusätzlich zur Obduktion eine Feinpräparation. Durchgeführt wurde die Feinpräparation von einem ärztlichen Mitarbeiter des rechtsmedizinischen Institutes, der ein Spezialist der Kehlkopfpräparation mit jahrzehntelanger Erfahrung auf diesem Gebiet ist. Die Präparation erfolgte in mehreren Schritten und konnte je nach Verletzungsmuster mehrere Stunden in Anspruch nehmen. Die Kehlkopfpakete wurden bei der Obduktion oberhalb des Zungenbeins und unterhalb der ersten Trachealspangen vorsichtig herausgetrennt, dem Leichnam entnommen und in 2%iger Formaldehydlösung mindestens für eine Nacht fixiert, um postmortalen Einblutungen vorzubeugen und die Präparation zu erleichtern [108]. Fixiert, in einem mit Formalin gefüllten Plastikbehälter, konnten die Kehlköpfe auch einige Zeit bis zur Bearbeitung verbleiben. Für die Präparation wurde die Technik nach Prof. Mishin angewendet [108]. Dafür wurden Holzstäbe in verschiedenen Größen, Scheren, eine Pinzette und ein Skalpell benötigt (Abb. 13).

Vor Beginn der Bearbeitung wurde der Kehlkopfkomplex auf einen dem inneren Durchmesser des Kehlkopfes entsprechenden Holzstab aufgesteckt und mit einer Schnur vorsichtig am Stab befestigt (Abb. 14) [108]. Die einzelnen Kehlkopfknorpel,

die im Laufe der Präparation aus dem Komplex herausgelöst werden konnten, wurden zur Weiterbearbeitung mit einer anatomischen Pinzette fixiert.



**Abbildung 13: Holzstäbe und Besteck für die Präparation**

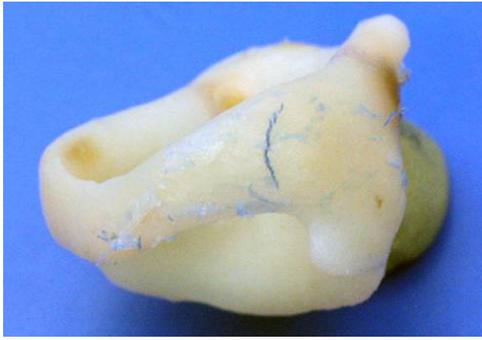
Im ersten Schritt wurde zunächst mit einer Schere grob das Weichgewebe um den Kehlkopf herum entfernt und das Zungenbein ebenfalls mit einer Schere vom übrigen Kehlkopfkomplex gelöst. Das Zungenbein wurde dann beginnend am Corpus zunächst ventral, anschließend dorsal und zuletzt an den großen Hörnern mit der Spitze eines Skalpells vorsichtig vom Weichteil befreit. Diese Technik, die an allen Kehlkopfbereichen zur Entfernung des Weichgewebes angewandt wurde, fand nach Einschneiden des Gewebes an einer Stelle unter „schiebenden und drehenden Bewegungen“ [108] statt, um dadurch Schnitte im Knorpel zu vermeiden [108, 109].

Im nächsten Schritt wurde der Schildknorpel präpariert. Nach zunächst grober Beseitigung des Muskelgewebes wurde an den Hinterkanten der Schildknorpelplatten das Weichgewebe in Richtung der oberen und unteren Schildknorpelhörner entfernt. Weiterhin wurde durch drehende Bewegungen von den Hinterkanten der Laminae nach vorne zur Mitte hin das Perichondrium gelöst. Anschließend konnte der Schildknorpel mit Skalpell und Schere vorsichtig vom darunterliegenden Ringknorpel sowie den anhängenden Trachealspangen befreit werden. Auch der Kehildeckel wurde abgeschnitten. Das restliche anliegende Weichgewebe, das bereits vom Knorpel gelöst wurde, konnte zur Mitte hin geschoben und dort im Ganzen vom Knorpel



**Abbildung 14: Befestigung des Kehlkopfpräparates vor Präparation auf einem Holzstab**

abgelöst werden. An den äußert fragilen Hörnern wurde das Gewebe nach seitlichem Einschneiden mit größter Vorsicht entfernt, um Verletzungen zu vermeiden [108, 109].



**Abbildung 15: Präparat eines Ringknorpels nach Feinpräparation: Das Anfärben mittels blauer Tinte bringt einen feinen Riss im Ringknorpel zur Darstellung.**

Der Ringknorpel konnte schließlich, nachdem das Perichondrium an einer Stelle abgelöst worden war, vom umgebenden Gewebe befreit werden, wodurch sich auch die beiden Aryknorpel lösten. Anschließend wurde der Ringknorpel von den darunterliegenden Trachealspangen abgetrennt. Ebenso wie am Ringknorpel erfolgte die Bearbeitung der Trachealspangen. Vollendet wurde die Präparation durch die Entfernung von Geweberesten mithilfe des Skalpells unter dem Stereomikroskop [108, 109]. Bei Verdacht auf schwer erkennbare kleine Risse konnten diese durch Auftragen von blauer Tinte zum Vorschein gebracht werden (Abb. 15).

Nach Abschluss der Präparation erfolgte schließlich die Erhebung der Befunde. Dafür wurde am Institut für Rechtsmedizin ein Dokumentationsblatt, das 1994 von Prof. E. Mishin zu diesem Zweck erstellt wurde, ins Deutsche übersetzt (siehe Anlage 11.1). Darin wurde in Gelb der Verkalkungsgrad des Kehlkopfes bzw. die Fusion der großen Zungenbeinhörner mit dem Corpus markiert. Frische Verletzungen wurden mit der Farbe Rot eingezeichnet, alte Verletzungen in Blau. Im Falle von Frakturen konnten zudem die Dehnungs- und Kompressionszone der Fraktur mit „-“ und „+“ bezeichnet und auch die Richtung der Krafteinwirkung bzw. Dislokation des Frakturfragments in Form eines Pfeiles vermerkt werden. Rot ausgefüllte Bereiche beschrieben Einblutungen. Außer den Weichteileinblutungen, die bereits während des Präparationsvorganges festgehalten wurden, wurden alle weiteren Befunde erst nach Abschluss der Präparation erfasst.

Um die feinpräparatorischen Ergebnisse schließlich mit denen der CT vergleichen zu können, wurden die Informationen des Dokumentationsblattes bezüglich der Verletzungsart, -lokalisierung und -anzahl analog zu den CT-Ergebnissen (vgl. Kapitel 4.2.2.3) in eine Excel-Tabelle übertragen. Dafür wurden die Patientendaten pseudonymisiert, Geschlecht und Alter blieben als wichtige Informationen für den Verknöcherungsstatus erhalten. Für die weitere Untersuchung des Verknöcherungsgrades erfolgte anhand der gelb markierten Areale ein Abgleich mit dem Verknöcherungsschema nach Keen und Wainwright sowie eine Zuordnung zu einem der Verknöcherungsgrade für Schild- und Ringknorpel (Tab. 3) [76]. Für das

Zungenbein wurde je nach Befund die fehlende, ein- oder beidseitige Verknöcherung dokumentiert.

## 4.2.2 Computertomographie

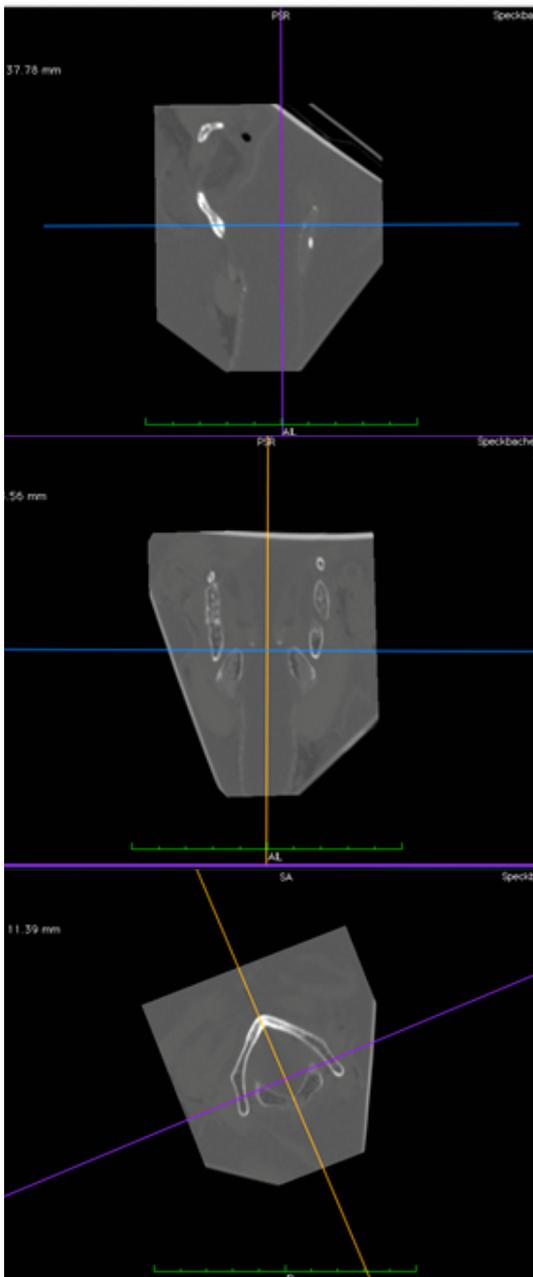
### 4.2.2.1 Bildakquisition

Im Zeitraum von 10 Monaten (Juli 2013 bis Mai 2014) wurden 54 Kehlköpfe in der CT untersucht. Nachdem sie wie oben beschrieben nach der Entnahme aus der Leiche in Formalin fixiert worden waren, wurden sie in fest verschlossenen durchsichtigen Behältern (ca. 10 cm x 10 cm x 12 cm) aufbewahrt. In dieser Form konnten sie problemlos und innerhalb kurzer Zeit aus dem benachbarten Institut für Rechtsmedizin in das Institut für Klinische Radiologie (Campus Innenstadt) transferiert werden. Die computertomographische Untersuchung wurde an einem *Optima CT 660 (GE Healthcare, Buckinghamshire, GB)* Scanner durchgeführt. Für Transport und Untersuchung verblieben die Kehlköpfe stets in den Behältern, so dass kein direkter Kontakt mit dem Gewebe selbst nötig war. Lediglich in 3 Fällen mit fraglich äußerlich verunreinigtem Behälter wurden diese im Vorfeld nochmals hygienisch und dicht in zusätzliche Plastiktüten verpackt. Die Behälter wurden möglichst so auf dem Kopfteil der CT-Liege positioniert und fixiert, dass die Ausrichtung des Präparats der einer üblichen Hals-CT-Untersuchung entsprach, also mit dem trachealen Ende nach kaudal. Außerdem wurde auf die Positionierung des Behälters im Isozentrum geachtet. War dies nicht möglich oder im Falle von Ungenauigkeiten, konnte die Lage im Rahmen der Bilddatennachverarbeitung korrigiert werden. Zunächst wurde ein Topogramm in anterior-posteriorer und lateraler Projektion angefertigt mit Abmessungen von jeweils zehn Zentimetern von der Mittellinie des Behälters ausgehend. Anhand des Topogramms wurde der abzubildende Bereich so eng wie möglich um den Behälter herum eingegrenzt, um die Auflösung und damit die Bildqualität zu optimieren. Die Untersuchung erfolgte als Helical Scan mit dem voreingestellten SFOV Head mit 120 kV und 300 mA wie für kleinvolumige Schädeluntersuchungen. Die Rotationsdauer betrug 1 s, die Detektorscanfläche 1 mm und die Aufnahmegeschwindigkeit  $10,62 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$ . Der Pitchfaktor wurde mit 0,05 niedrig gehalten, um durch den langsamen Tischvorschub Bewegungen in dem flüssigkeitsgefüllten Behälter zu minimieren und durch die höhere Strahlendosis die Bildqualität zu optimieren. Die Schichtdicke wurde mit 0,625 mm so dünn wie möglich gewählt. Die erste Rekonstruktionen erfolgte in einem Standard-Weichteil-Kernel mit 0,5 mm Überlappung im Weichteilfenster und als

zweite Rekonstruktion ebenfalls mit einer Schichtdicke von 0,625 mm und einer Überlappung von 0,5 mm im „Bone-Plus“-Kernel im Knochenfenster.

#### 4.2.2.2 Aufarbeitung der Bilddaten

Die Aufarbeitung der jeweils 2 entstandenen Bilderserien erfolgte auf einem iMac (27“, Typ: Mitte 2011, Betriebssystem: OS X 10.9.3). Für alle nachfolgenden



Bearbeitungsschritte und zur Auswertung der Bilder wurde das Programm *OsiriX Imaging Software 32-bit* (Pixmeo, Bernex, Schweiz) verwendet, wobei die Bilder im üblichen DICOM-Format vorlagen. Die Aufarbeitung der Bilder wurde mithilfe der Funktion 3D MPR durchgeführt (Abb. 16). Sie diente dazu, die Bilder derart zu bearbeiten, dass die Kehlköpfe zur Befundung orthograd ausgerichtet waren und so die gängige axiale Betrachtungsweise der Schichten, wie bei einer üblichen Hals-CT-Untersuchung am Lebenden, erlaubte. Dies war nötig, wenn sich die Kehlköpfe schräg oder mit dem oberen Ende nach unten in dem Behälter befanden. Diese Situation trat in der Mehrheit der Fälle auf, da sich der Kehlkopf im flüssigen Formalin befand und somit nicht direkt fixiert werden konnte. Für die korrekte Ausrichtung konnte zunächst die Anatomie des Kehlkopfes hilfreich sein. Vor allem die durch das Cornu superius und Cornu inferius des Schildknorpels verlaufenden Achsen stellten einen

Abbildung 16: Orthograde Ausrichtung der Kehlköpfe mithilfe der Funktion „3D MPR“

Anhaltspunkt bezüglich der Längsachse des Kehlkopfes dar. War das Zungenbein noch

nicht vom Kehlkopfkomplex gelöst worden, konnte auch dies weiterhelfen. Hiermit war bereits die korrekte Ausrichtung hinsichtlich oben und unten möglich. Durch die Position des Zungenbeincorpus konnten außerdem Vorder- und Rückseite des

Kehlkopfes festgelegt werden. Die folgende Herausforderung bestand nun darin, die Darstellung hinsichtlich der Seiten zu überprüfen. In vielen Fällen hatten die Kehlköpfe annähernd optimal im CT positioniert werden können, sodass eine Änderung nicht nötig war. Hatten sich die Kehlköpfe aber aufgrund des Platzmangels schräg im Behälter befunden, oder hatte die Prominentia laryngea bzw. der Corpus des Zungenbeins nach unten also zum Untersuchungstisch des CTs hin gezeigt, war es möglich, dass die Bezeichnung von rechts und links auf dem Bildschirm nicht mehr mit dem tatsächlichen rechts und links übereinstimmte. Dies konnte zum einen anhand von Befunden der Feinpräparation wie einseitigen Normvarianten oder asymmetrischen Verletzungen erkannt und korrigiert werden. Blieb diese Möglichkeit aus, mussten mithilfe der Topogramme durch dreidimensionale Überlegungen Rückschlüsse auf die Ausrichtung des Kehlkopfes im Behälter gezogen werden, um ihn im Anschluss korrekt drehen zu können. So konnte zum Beispiel erkannt werden, ob der Kehlkopf auf dem Kopf stand oder zu welcher Seite hin die Prominentia laryngea des Schildknorpels wies. Damit waren wiederum Rückschlüsse auf die korrekte Seitenzuordnung des Kehlkopfes in Bezug zum Bild möglich. Mit diesen Hilfsmitteln konnten letztendlich alle Kehlköpfe in die für eine Schnittbilddiagnostik nötige Position überführt werden. Begleitend dazu wurden zur dreidimensionalen Betrachtung der Bilder die multiplanaren Rekonstruktionen in drei Ebenen angefertigt, wodurch auch Verletzungen, die in einer Ebene unentdeckt blieben, zum Vorschein kamen. Für die 3D-Rekonstruktionen zur Illustration wurden die weichteiligen Bilderserien an einer Syngo-Via-Workstation (Syngo.via, Client 3.0 einer Serverversion VB10B, Siemens AG, Erlangen) in repräsentativen räumlichen Ansichten und zum Teil beschnitten aufbereitet.

#### 4.2.2.3 Bildauswertung

Zwei Reader, mit jeweils 4 und 12 Jahren Erfahrung in radiologischer Diagnostik, beurteilten die CT-Aufnahmen im Konsens hinsichtlich der Bildqualität, dem Auftreten

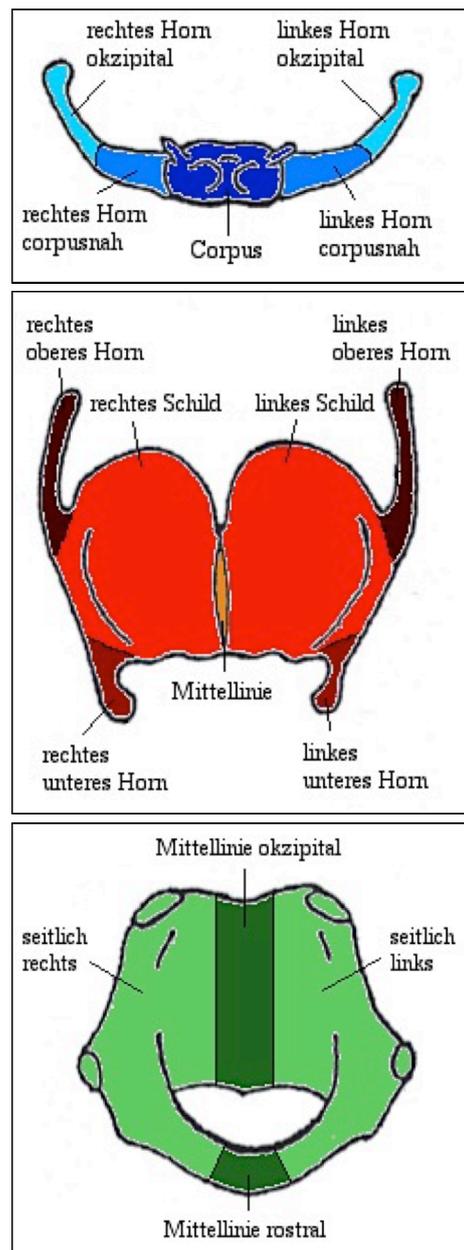
Bildqualität		von Normvarianten, der Verletzungen und der Verknöcherung.
1	schlecht/mangelhaft, definitive Diagnose unmöglich	Die Bildqualität wurde zum einen im Gesamten anhand folgender Skala bewertet: 1 =
2	ausreichend, Beurteilung der Hauptbefunde möglich	
3	gut, definitive Diagnose möglich	
4	exzellent, genaue Diagnose möglich	

**Tabelle 1: Skala zur Beurteilung der Bildqualität**

unzureichend, 2 = ausreichend , 3 = gut, 4 = exzellent. Zum anderen wurde sie, wie in Tabelle 1 dargestellt, beurteilt.

Für jeden der drei Kehlkopfbestandteile wurde festgehalten, welche Fensterungen zur Beurteilung nötig waren, wobei die Auswertung in Knochen-, Weichteilfenster oder in beiden möglich war. Außerdem wurden potentielle Einflussfaktoren auf die Auswertungsergebnisse wie Luftblasen in den Weichteilen bei Fäulnis, ein bereits vom übrigen Kehlkopf abgetrenntes Zungenbein oder iatrogene Verletzungen durch Sektionsschnitte erfasst. Ebenso erfolgte die Dokumentation von Normvarianten mit Art und Lokalisation. Dabei wurde auf das Auftreten eines Foramen thyroideum, eines Cartilago triticea und die Agenesie von Schildknorpelhörnern geachtet.

Die Verletzungen wurden einzeln für jeden Kehlkopfbestandteil dokumentiert. Zunächst wurde jeweils die Anzahl der Fragmente (0 = nicht betroffen, 1 = einfach, 2 = mehrfach mit  $\leq 3$  Fragmente, 3 = mehrfach mit  $> 3$  Fragmente) angegeben. Zur genaueren Beschreibung der Frakturlokalisierung erfolgte eine Unterteilung der Bestandteile in mehrere Bereiche (Abb. 17). Das Zungenbein wurde in fünf Zonen (Corpus, rechtes Horn corpusnah, linkes Horn corpusnah, rechtes Horn okzipital, linkes Horn okzipital), der Schildknorpel in sieben Zonen (Mittellinie, rechtes Schild, linkes Schild, rechtes oberes Horn, linkes oberes Horn, rechtes unteres Horn, linkes unteres Horn) und der Ringknorpel in vier Zonen (Mittellinie rostral, Mittellinie okzipital, seitlich rechts, seitlich links) unterteilt.



**Abbildung 17: Aufteilung der Kehlkopfbestandteile zur Frakturbeurteilung**

Dislokationsgrad	
0	nicht betroffen
1	Fissur
2	komplette, nicht dislozierte Fraktur
3	dislozierte Fraktur $\leq 50\%$
4	dislozierte Fraktur $> 50\%$

**Tabelle 2: Einteilung der Frakturen**

seitlich rechts, seitlich links) gegliedert. Für die einzelnen Zonen wurde im Falle einer Fraktur jeweils der Dislokationsgrad beschrieben, wie in Tab. 2 dargestellt. Die Richtung der Krafteinwirkung konnte in der CT allerdings nicht bestimmt werden. Angaben dazu erfolgten nur anhand der Feinpräparation.

Außerdem wurde die Verknöcherung der Kehlkopfbestandteile beurteilt. Dafür erfolgte die Bestimmung des Fusionsgrades des Zungenbeincorpus mit den großen Hörnern (Abb. 20 vgl. [60, 62, 76, 92] , Tab. 3) sowie des Verkalkungsgrades von Schild- und Ringknorpel nach dem Schema von Keen und Wainwright [76] statt (Tab. 3; Abb. 18, 19 nach Vorlage von Keen und Wainwright, Turk und Hogg, und de la Grandmaison et al. [60, 62, 76]). Um den Verknöcherungsgrad zu bestimmen, wurde in den meisten Fällen eine MIP-Darstellung zu Hilfe genommen, um die verknöcherten Anteile besser abgrenzen zu können. Am Zungenbein wurde zusätzlich der Abstand zwischen Corpus und großen Hörnern ausgemessen (0 = > 2 mm, 1 = 1-2 mm, 2 = < 1 mm, 3 = komplett fusioniert), um den Fusionsgrad ggf. genauer bestimmen zu können. Außerdem wurde der Fusionsgrad der kleinen Zungenbeinhörner mit dem Corpus bzw. den großen Hörnern ermittelt (0 = nicht fusioniert, 1 = einseitig bzw, teilweise fusioniert, 2 = komplett fusioniert).

	<b>Zungenbein</b>	<b>Schildknorpel</b>	<b>Ringknorpel</b>
<b>0</b>	keine Fusion des Corpus mit den großen Hörnern	keine bis minimale Ossifikationsherde	keine bis minimale Ossifikationsherde
<b>I</b>	teilweise bzw. einseitige Fusion	beginnende Ossifikation der unteren Hörner und der Schilde unten	beginnende Ossifikation der kranialen Lamina
<b>II</b>	beidseitige, vollständige Fusion	zunehmende Ossifikation im Bereich der Mittellinie (Mann) bzw. der oberen Hörner (Frau)	zunehmende Ossifikation nach kaudal und lateral
<b>III</b>		fortgeschrittene Ossifikation aller Hörner und der Schilde von unten nach oben	fortgeschrittene Ossifikation mit Aussparung des Arcus
<b>IV</b>		wenige nicht ossifizierte Areale verbleibend	vollständige Ossifikation
<b>V</b>		komplette Ossifikation (nur beim Mann)	

**Tabelle 3: Verknöcherungsstadien von Zungenbein, Schildknorpel und Ringknorpel**

Um den Verknöcherungsgrad des gesamten Kehlkopfes zu bestimmen, wurde nach dem Vorbild von de la Grandmaison die Summe des Verkalkungsgrades von Zungenbein, Schildknorpel und Ringknorpel bestimmt [62]. Ebenso wie die Werte des Verknöcherungsgrades der Feinpräparation wurden auch die der CT mit dem Alter abgeglichen und korreliert.

Außerdem wurde die benötigte Zeit für Aufnahme und Bildbearbeitung sowie die der eigentlichen Auswertung erfasst.

Zur Bestimmung der Strahlendosis wurden das CTDI (Computed Tomography Dose Index) und DLP (Dosislängenprodukt) einer jeden Untersuchung dokumentiert und deren Mittelwerte bestimmt. Außerdem wurde zur weiteren Objektivierung und Einschätzung die effektive Dosis mit Hilfe eines Faktors ( $E_{DLP}$ ) aus dem DLP abgeschätzt:  $E = E_{DLP} \cdot DLP$  [110]. Dieser Faktor liegt für den Hals bei 0,0054 [110].

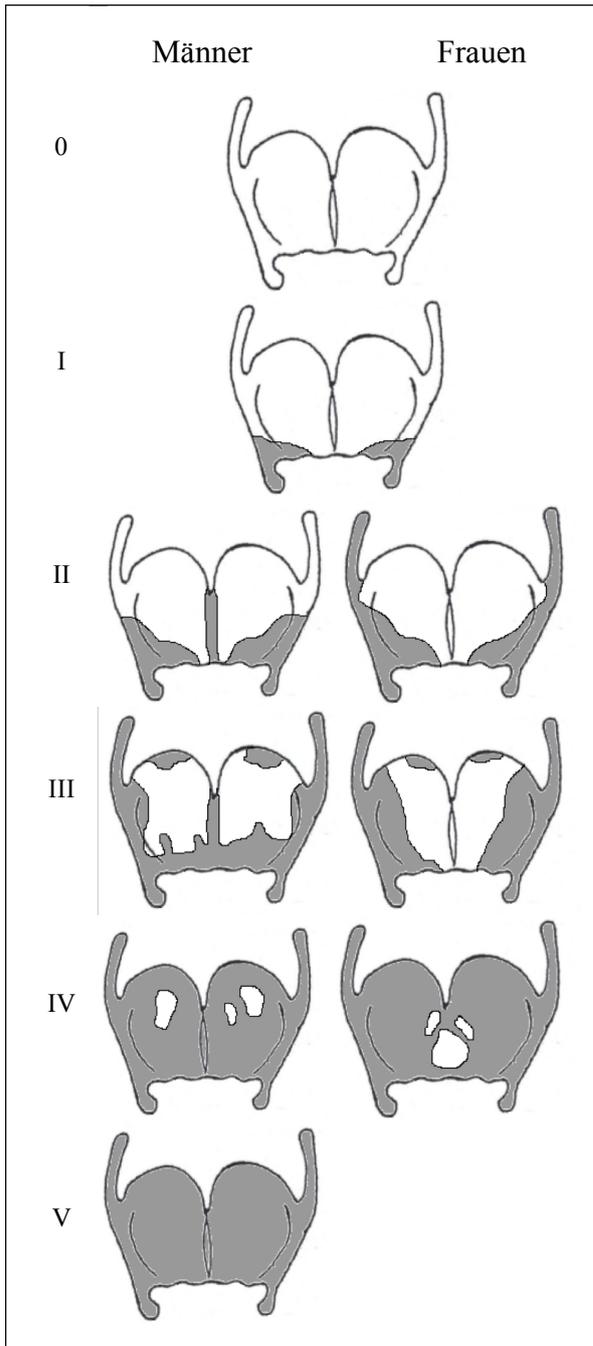


Abbildung 20: Verknöcherungsgrade des Schildknorpels

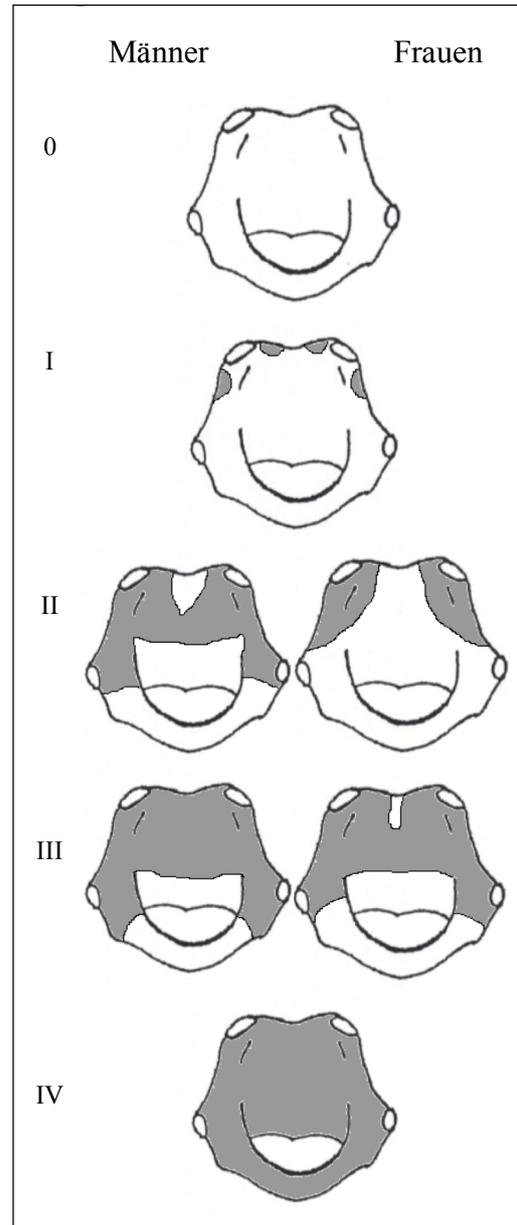


Abbildung 19: Verknöcherungsgrade des Ringknorpels

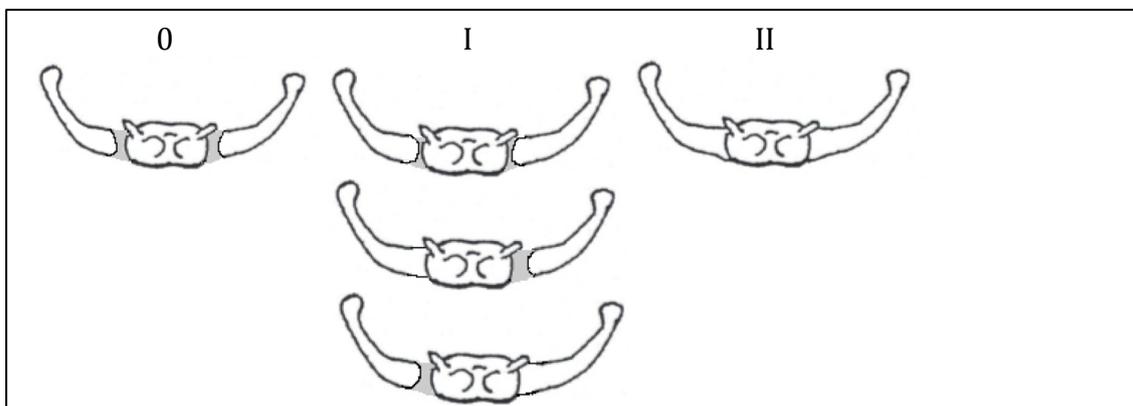


Abbildung 18: Fusionsgrad des Zungenbeincorpus mit den Cornua maiora

### 4.2.3 Statistische Analyse

Die Erfassung und Gliederung der Daten erfolgte mit *Microsoft Office Excel 2011* (*Microsoft Corporation, Redmond, WA, USA*). Für die anschließende statistische Auswertung kam *IBM SPSS Statistics 22* (*IBM Corporation, Armonk, NY, USA*) zur Anwendung. Dabei wurden für die Beschreibung des Patientenkollektivs, sowie für die Angabe von Häufigkeiten bezüglich Kehlkopfverletzungen, Verknöcherung und Untersuchungsqualität deskriptive Methoden verwendet. Damit wurden auch Mittelwert bezüglich Zeitaufwand und Strahlendosis bestimmt. Die Testung der Variablen des Kollektivs auf Normalverteilung erfolgte mittels des Kolmogorow-Smirnow-Tests. Signifikante Unterschiede ( $p < 0,05$ ) wurden durch den T-Test für unabhängige Stichproben berechnet. Weiterhin erfolgten bivariate Korrelationsanalysen nach Spearman, um die Übereinstimmung von Computertomographie und Feinpräparation bezüglich der Verletzungen zu untersuchen und außerdem den Zusammenhang zwischen Verknöcherung und Lebensalter zu berechnen. Ebenso wurden die Ergebnisse der CT und der Feinpräparation bezüglich des Verknöcherungsgrades korreliert. Das Signifikanzniveau war dabei mit  $p < 0,05$  festgelegt worden. Anhand von Kreuztabellen wurden außerdem Sensitivität, Spezifität, sowie der positive und negative prädiktive Werte der computertomographischen Diagnostik ermittelt. Um signifikante Unterschiede hinsichtlich der Dauer von CT und Feinpräparation darzustellen, erfolgte ein T-Test für unabhängige Stichproben.

## 5. ERGEBNISSE

### 5.1 Kollektiv

Das Kollektiv bestand aus 54 Kehlkopfpräparaten, davon 33 Präparate männlicher (61,1%) und 21 Präparate weiblicher Leichen (38,9%). Von den ursprünglich 58 untersuchten Kehlköpfen mussten 4 aufgrund der Ausschlusskriterien aus dem Kollektiv genommen werden. In einem Fall war der Kehlkopf aufgrund eines Brandes nicht vollständig erhalten, in zwei Fällen lag deutlich fortgeschrittene Fäulnis vor und in einem Fall lag das Alter zum Todeszeitpunkt unter 15 Jahren.

	männlich (n=33)	weiblich (n=21)	gesamt (n=54)
Alter [Jahre]	50,2 ± 21,8	57,4 ± 19,9	52,7 ± 21,2
Gewicht [kg]	77,0 ± 14,3	65,5 ± 14,2	72,5 ± 15,2
Größe [m]	1,78 ± 0,08	1,64 ± 0,07	1,7 ± 0,1
BMI [kg/m <sup>2</sup> ]	24,4 ± 4,3	24,6 ± 6,0	24,5 ± 5,0

Tabelle 4: Mittelwerte ± Standardabweichung zu Alter, Gewicht, Größe und BMI

Der Altersdurchschnitt zum Todeszeitpunkt lag bei  $53,0 \pm 21,2$  Jahren. Das Alter der jüngsten Leiche betrug 15 Jahre, das der ältesten 95 Jahre. Hinsichtlich Gewicht und Größe bestand zwischen beiden Geschlechtern ein signifikanter Unterschied (Gewicht:  $77,0 \pm 14,3$  kg vs.  $65,5 \pm 14,2$  kg,  $p = 0,005$ ; Größe:  $1,78 \pm 0,09$  m vs.  $1,64 \pm 0,07$  m,  $p < 0,000$ ). Der BMI war mit  $24,4 \text{ kg/m}^2$  bei den Männern und  $24,6 \text{ kg/m}^2$  bei den Frauen vergleichbar (Tab. 4).

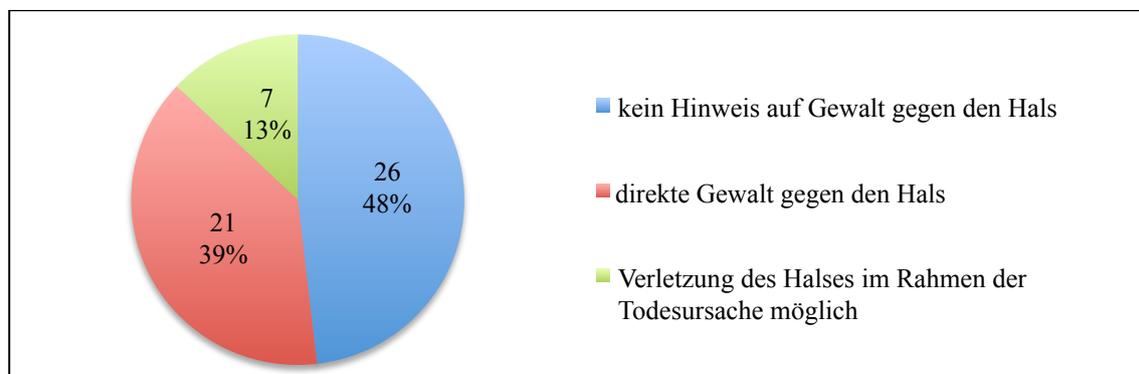


Abbildung 21: Beteiligung des Halses im Rahmen der Todesursache

In über der Hälfte der Fälle (52%) wurde als Todesursache entweder eine direkte Gewalteinwirkung gegen den Hals (39%) diagnostiziert, oder es lag eine Todesursache

mit extremer äußerer Gewalteinwirkung, wie ein Polytrauma vor, die mit Verletzungen im Kehlkopfbereich einhergehen kann. In den übrigen 48% der Fälle konnte anhand der Obduktion keine äußere Gewalteinwirkung gegen den Hals festgestellt werden (Abb. 21).

In 21 Fällen konnte eine direkte Gewalteinwirkung gegen den Hals nachgewiesen werden. Darunter stellte Erhängen bei acht Patienten die häufigste Ursache dar. In fünf Fällen konnte nicht endgültig geklärt werden, ob die Halsverletzung durch Fremdeinwirkung oder beispielsweise im Rahmen eines Unfalls stattgefunden hatte. In absteigender Reihenfolge traten außerdem Erdrosseln, Erwürgen und in einem Fall scharfe Gewalt in Form einer Schnittverletzung auf (Tab. 5). Bei sieben Patienten lagen Todesursachen mit einer möglichen Verletzung des Halses vor, wobei Stürze v. a. aus großer Höhe oder Verkehrsunfälle ursächlich waren.

<b>Todesursache</b>	<b>Häufigkeit</b>
direkte Gewalt gegen den Hals	21 (38,9%)
Erhängen	8 (14,8%)
Erdrosseln	5 (9,3%)
Erwürgen	2 (3,7%)
scharfe Gewalt	1 (1,9%)
ungeklärte Kompression des Halses	5 (9,3%)
Todesursache mit möglicher Verletzung des Halses	7 (13,0%)
Sturz [davon aus großer Höhe]	5 (9,3%) [4 (7,4%)]
Verkehrsunfall	2 (3,7%)
kein Hinweis auf Gewalt gegen den Hals	26 (48,1%)

**Tabelle 5: Todesursachen und deren Häufigkeiten**

## 5.2 Untersuchungsqualität

### 5.2.1 Einflussfaktoren

Im Kollektiv traten einige äußere Einflussfaktoren auf, die die CT-Diagnostik von Verletzungen erschwerten (Abb. 22). 7 von 54 Fällen (13,0%) waren von Fäulnis betroffen, was zu vermehrten Lufteinschlüssen in den Weichteilen führte. Dies erschwerte die Abgrenzung der Knorpeloberfläche und konnte damit die Beurteilung möglicher Frakturen beeinträchtigen. Lediglich 3 von 54 Kehlkopfpräparaten waren beim Heraustrennen während der Obduktion mit dem Skalpell verletzt worden. Dabei war in zwei Fällen der Ringknorpel und in einem Fall Schild-, Ringknorpel und Trachea betroffen. Dies wurde als Verletzung festgehalten und als solche mit den CT-Befunden korreliert, da die Abgrenzung von einer prämortalen Verletzung in der CT-Aufnahme der fixierten Kehlkopfpräparate nicht möglich ist. Eine weitere Herausforderung, vor allem bei der Beurteilung der CT-Bilder, war das separate Vorliegen von Zungenbein und dem Komplex der Kehlkopfknorpel, wenn das Zungenbein vorzeitig abgetrennt worden war oder es sich gelöst hatte, was bei insgesamt 12 Fällen auftrat. In diesen Fällen wurden Zungenbein und Kehlkopfknorpel vor der Auswertung jeweils getrennt voneinander orthograd rekonstruiert, um gleichwertige Voraussetzungen für die Bildbetrachtung zu schaffen.

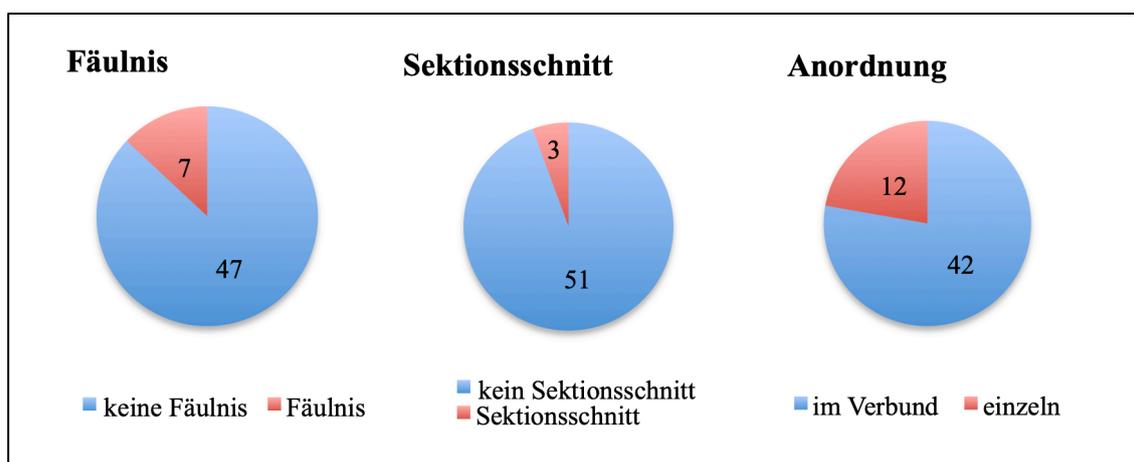


Abbildung 22: Faktoren mit Einfluss auf die Untersuchungsqualität

### 5.2.2 Beurteilung der Bildqualität

Die diagnostische Bildqualität der CT-Bilder wurde vor der eigentlichen Verletzungsdiagnostik beurteilt. Für die Bewertung im Gesamten ergab sich ein

Mittelwert von  $3,80 \pm 0,41$  (Median: 4,0) und damit eine annähernd durchgehend exzellente Bildqualität.

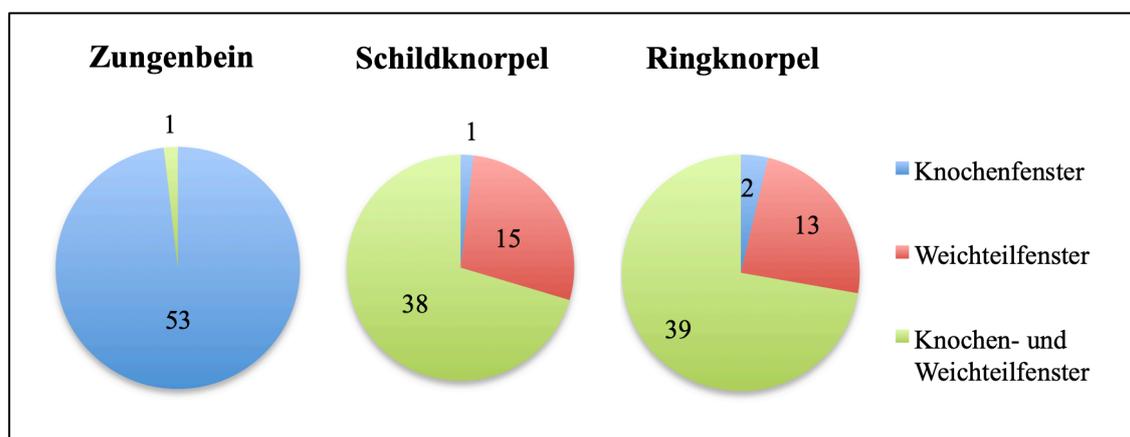
	Zungenbein	Schildknorpel	Ringknorpel
Bildqualität	$3,74 \pm 0,52$	$3,43 \pm 0,66$	$3,89 \pm 0,37$

**Tabelle 6: Mittelwerte und Standardabweichung der Bildqualität**

Zusätzlich wurde die Bildqualität für die drei Kehlkopfbestandteile einzeln bewertet. Dabei konnte der Ringknorpel vor Zungenbein und Schildknorpel am sichersten beurteilt werden. Im Durchschnitt war für alle drei Bestandteile eine definitive bis exakte Diagnosestellung möglich (Tab. 6). Eine Beeinträchtigung der Bildqualität durch die zusätzliche hygienebedingte Verpackung mittels Plastiktüten konnte nicht festgestellt werden.

### 5.2.3 Fensterung

Für die gesamte Beurteilung der drei Kehlkopfbestandteile wurde in allen Fällen sowohl Knochen- als auch Weichteilfenster verwendet. Im Einzelnen war dies nicht immer nötig (Abb. 19).



**Abbildung 23: Verwendung des Knochen- und Weichteilfensters zur Beurteilung der Kehlkopfbestandteile**

Das knöcherne Zungenbein wurde fast ausschließlich im Knochenfenster beurteilt (53/99,0%), während für Schild- und Ringknorpel in jeweils mehr als der Hälfte der Fälle beide Fensterungen (38/70,4% und 39/72,2%) oder sogar ausschließlich das Weichteilfenster verwendet wurden. In 15 Fällen (28%) und 13 Fällen (24%) wurde bei Schild- und Ringknorpel nur auf das Weichteilfenster zurückgegriffen.

### 5.3 Normvarianten

Außerdem wurde das Auftreten von Normvarianten, insbesondere des Schildknorpels, anhand der CT-Bilder festgehalten. Insgesamt fanden sich in 34 der 54 Fälle (63,0%) Normvarianten. Die Mehrheit der Schildknorpel zeigte eine Normvariante wie ein Foramen thyroideum, das Auftreten von Cartilagine triticeae oder die Agenesie eines Horns (Abb. 24).

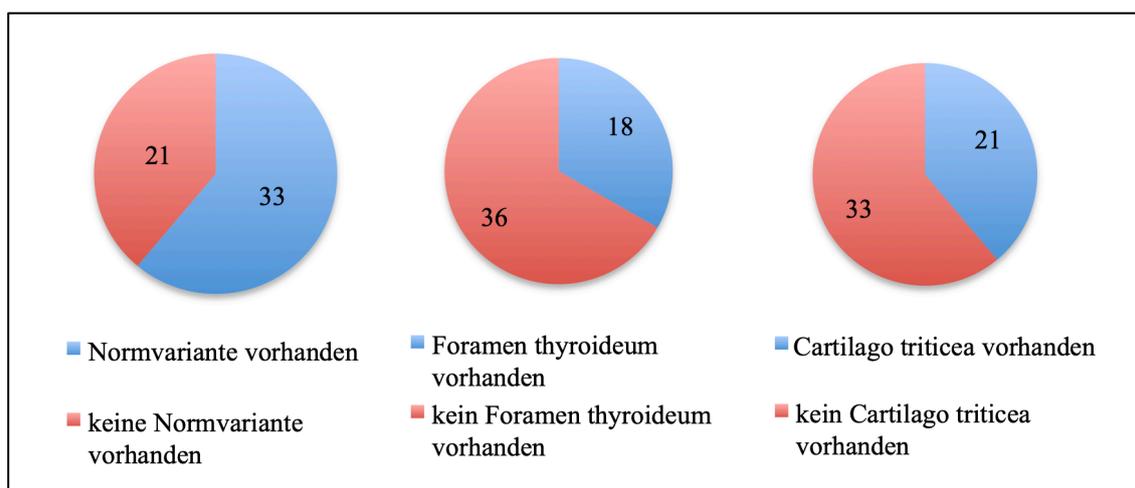


Abbildung 24: Normvarianten des Schildknorpels

Die Agenesie eines Horns konnte nur in einem Fall entdeckt werden. Die beiden anderen Normvarianten dagegen traten deutlich häufiger auf. 38,9% der Fälle wiesen einen Weizenkornknorpel auf. Dabei war dieser meistens beidseitig oberhalb der beiden oberen Schildknorpelhörner oder nur einseitig rechts zu finden.

Schildknorpel	Häufigkeit	Schildknorpel	Häufigkeit
kein F. thyroideum	36 (66,6%)	kein C. triticea	33 (61,1%)
F. thyroideum vorhanden	18 (33,3%)	C. triticea vorhanden	21 (38,9%)
- F. thyroideum rechts	6 (11,1%)	- C. triticea rechts	8 (14,8%)
- F. thyroideum links	6 (11,1%)	- C. triticea links	3 (5,6%)
- F. thyroideum beidseitig	6 (11,1%)	- C. triticea beidseitig	10 (18,5%)

Tabelle 7: Häufigkeit der Normvarianten „Foramen thyroideum“ (F. thyroideum) und Cartilago triticea“ (C. triticea)

Aussparungen in den Schildknorpelplatten traten dagegen bei 18 Patienten auf. Rechts-, links- und beidseitige Lokalisation des Foramen thyroideum trat jeweils in 6 Fällen auf (Tab. 7).

An den anderen beiden Kehlkopfbestandteilen zeigten sich nur wenige Anomalien. Am Zungenbein wurde in 6 Fällen (11,1%) eine beidseitige Aplasie der kleinen Zungenbeinhörner nachgewiesen. Was den Ringknorpel betrifft, wurde bei zwei Patienten eine Normvariante beobachtet. In einem Fall wies dieser eine asymmetrische Form auf, in dem anderen war ein Loch zu finden gewesen.

## 5.4 Verletzungen

### 5.4.1 Verletzungshäufigkeiten anhand der Feinpräparation

Bezüglich der Verletzungshäufigkeiten dienten die feinpräparatorisch erfassten Daten als Referenz. Die anhand der PMCT Verletzungshäufigkeiten finden sich im Anhang (11.2). Insgesamt traten in 34 Fällen (63,0%) Verletzungen an einem oder mehreren Bestandteilen des Kehlkopfskeletts auf. Darunter waren am häufigsten der Schildknorpel mit 28 Fällen gefolgt von Zungenbein und Ringknorpel betroffen (Abb. 25).

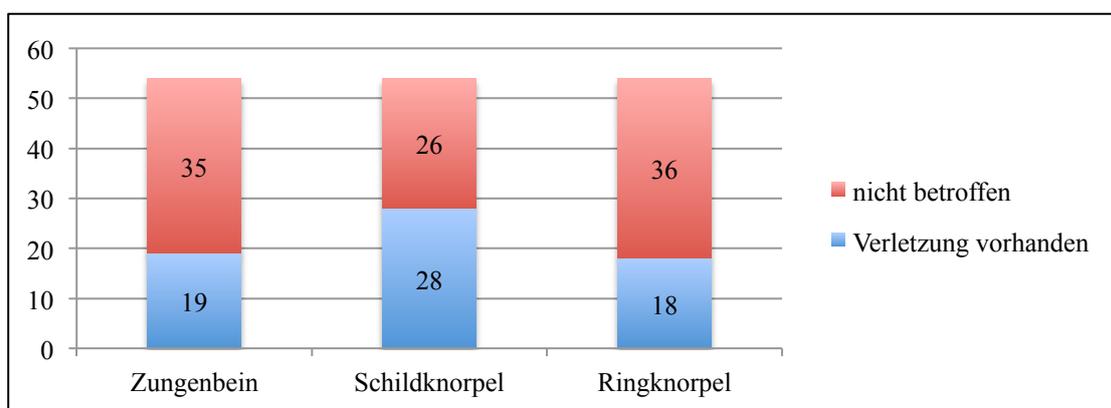


Abbildung 25: Anzahl der Verletzungen an Zungenbein, Schild- und Ringknorpel

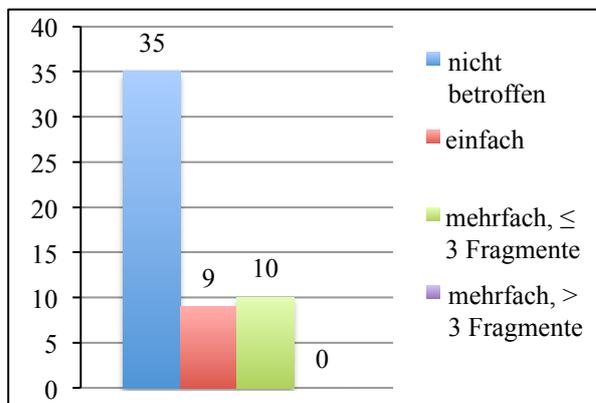
Der Großteil der 34 betroffenen Fälle (15/44,1%) wies Verletzungen in zwei der drei Bestandteile auf. Bei 11 Patienten (32,6%) war ein und nur bei 8 (23,5%) alle drei Bestandteile betroffen.

Bei den 18 Patienten (85,7%), die Opfer von direkter Gewalt gegen den Hals geworden waren, wurden auch in der Feinpräparation in den meisten Fällen Verletzungen des Kehlkopfes gefunden. Dies war in 87,5% der Fälle von Erhängen, in 80% der Fälle von Erdrosseln, in 50% der Fälle von Erwürgen und in 100% unklarer Gewalt gegen den Hals der Fall. Darunter waren 16-mal der Schildknorpel, 12-mal das Zungenbein und 9-mal der Ringknorpel verletzt. In 11 der 21 Fälle waren alle drei Bestandteile betroffen.

Zur detaillierteren Beschreibung der Frakturen und deren Lokalisation wurden die drei untersuchten Kehlkopfbestandteile getrennt voneinander und in mehrere Regionen unterteilt betrachtet.

### 5.4.1.1 Verletzungen des Zungenbeins

Im Kollektiv traten in allen fünf Bereichen des Zungenbeins Verletzungen auf, wobei einfach und mehrfach verletzte Zungenbeine etwa gleich häufig zu finden waren (Tab. 8, Abb. 26).



nicht betroffen	35 (64,8%)
betroffen	19 (35,2%)
- einfach	9 (16,7%)
- mehrfach, ≤ 3 Fragmente	10 (18,5%)
- mehrfach, > 3 Fragmente	0 (0,0%)

Abbildung 26: Balkendiagramm zur Verteilung der Zungenbeinfrakturen

Tabelle 8: Übersicht der Zungenbeinfrakturen

	Corpus	rechtes Horn corpusnah	linkes Horn corpusnah	rechtes Horn okzipital	linkes Horn okzipital
nicht betroffen	48 (88,9%)	48 (88,9%)	50 (92,6%)	48 (88,9%)	44 (81,5%)
betroffen	6 (11,1%)	6 (11,1%)	4 (7,4%)	6 (11,1%)	10 (18,5%)
- Fissur (unvollständig)	2 (3,7%)	2 (3,7%)	1 (1,9%)	1 (1,9%)	1 (1,9%)
- vollständige Fraktur (nicht disloziert)	0 (0,0%)	2 (3,7%)	1 (1,9%)	3 (5,6%)	1 (1,9%)
- dislozierte Fraktur	4 (7,4%)	2 (3,7%)	2 (3,7%)	2 (3,7%)	8 (14,8%)

Tabelle 9: Frakturgrad und -lokalisierung am Zungenbein

Am häufigsten zeigten sich die Frakturen in den okzipitalen Anteilen, insbesondere linksseitig. Weiterhin wurden die Frakturen nach ihrer Ausprägung beschrieben (Tab 9). Dabei fanden sich Fissuren vor allem corpusnah rechts und am Corpus selbst. An den fragilen okzipitalen Bereichen der großen Hörner fanden sich häufiger vollständige Frakturen, links mehrheitlich disloziert. Komplette Frakturen des Corpus waren stets mit einer Dislokation der Frakturfragmente einhergegangen.

### 5.4.1.2 Verletzungen des Schildknorpels

Der Schildknorpel war der Bestandteil, der am häufigsten von Frakturen betroffen war. In etwa zwei Drittel der Fälle war er mehrfach von Verletzungen betroffen (Tab. 10, Abb. 27).

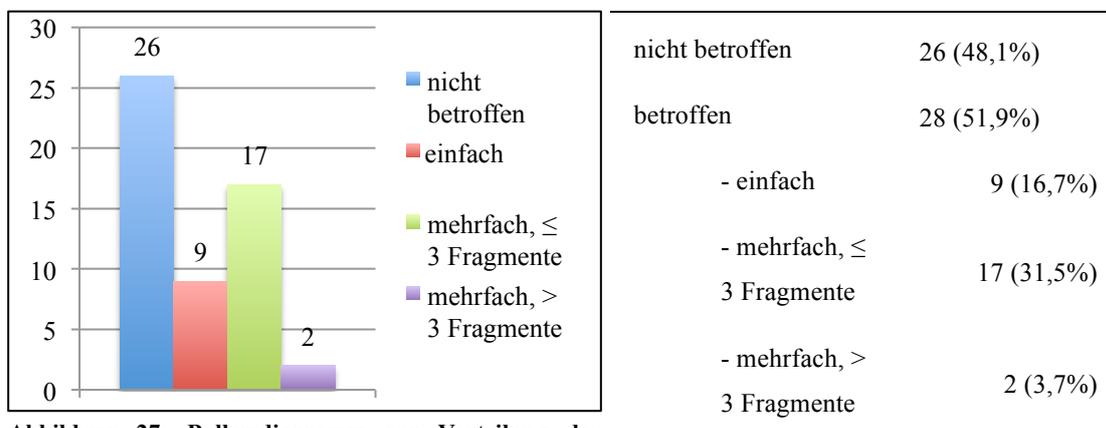


Abbildung 27: Balkendiagramm zur Verteilung der Schildknorpelfrakturen

Tabelle 10: Übersicht der Schildknorpelfrakturen

Mit Abstand am häufigsten traten Verletzungen an den beiden oberen Hörnern auf, während die anderen Bereiche in etwa mit gleicher Häufigkeit betroffen waren. Das rechte untere Horn war mit nur einer Verletzung die seltenste Frakturlokalisation. In den beiden Schilden und den unteren Hörnern fanden sich eher Fissuren oder nicht dislozierte Frakturen, wohingegen die oberen Hörner meist durch die Verletzung disloziert worden waren (Tab. 11).

	Mittellinie	rechtes Schild	linkes Schild
nicht betroffen	51 (94,9%)	50 (92,6%)	50 (92,6%)
betroffen	3 (5,6%)	4 (7,4%)	4 (7,4%)
- Fissur (unvollständig)	0 (0,0%)	1 (1,9%)	1 (1,9%)
- vollständige Fraktur (nicht disloziert)	3 (5,6%)	2 (3,7%)	2 (3,7%)
- dislozierte Fraktur	0 (0,0%)	1 (1,9%)	1 (1,9%)

	rechtes oberes Horn	linkes oberes Horn	rechtes unteres Horn	linkes unteres Horn
nicht betroffen	38 (70,4%)	33 (61,1%)	53 (98,1%)	50 (92,6%)
betroffen	16 (29,6%)	21 (38,9%)	1 (1,9%)	4 (7,4%)
- Fissur (unvollständig)	1 (1,9%)	2 (3,7%)	0 (0,0%)	2 (3,7%)
- vollständige Fraktur (nicht disloziert)	3 (5,6%)	3 (5,6%)	0 (0,0%)	2 (3,7%)
- dislozierte Fraktur	12 (22,2%)	16 (29,6%)	1 (1,9%)	0 (0,0%)

Tabelle 11: Frakturgrad und -lokalisierung am Schildknorpel

### 5.4.1.3 Verletzungen des Ringknorpels

Der Ringknorpel wies mit nur 18 Fällen die geringste Anzahl an Verletzungen auf. Darunter waren einfache und mehrfache Frakturen mit weniger als drei Frakturfragmenten zu finden. Frakturen mit mehr als drei Fragmenten traten nicht auf (Tab. 12, Abb. 28).

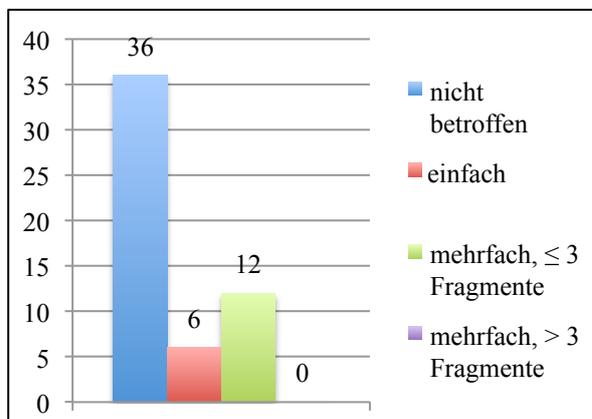


Abbildung 28: Balkendiagramm zur Verteilung der Ringknorpelfrakturen

nicht betroffen	36 (66,7%)
betroffen	18 (33,3%)
- einfach	6 (11,1%)
- mehrfach, ≤ 3 Fragmente	12 (22,2%)
- mehrfach, >3 Fragmente	0 (0,0%)

Tabelle 12: Übersicht der Ringknorpelfrakturen

Die Mehrheit der Verletzungen (76,5%) fand sich seitlich am Ringknorpel, davon 15 auf der rechten und 11 auf der linken Seite. Die rostrale und okzipitale Mittellinie waren dagegen mit jeweils 3 und 5 Verletzungen verhältnismäßig selten betroffen. Dislozierte Frakturen konnten nur in zwei Fällen okzipital mittig beschrieben werden. Im Übrigen waren in allen Bereichen des Ringknorpels vornehmlich Fissuren zu finden (Tab. 13).

	<b>Mittellinie rostral</b>	<b>Mittellinie okzipital</b>	<b>seitlich rechts</b>	<b>seitlich links</b>
nicht betroffen	51 (94,4%)	49 (90,7%)	39 (72,2%)	43 (79,6%)
betroffen	3 (5,6%)	5 (9,3%)	15 (27,8%)	11 (20,4%)
- Fissur (unvollständig)	2 (3,7%)	0 (0,0%)	11 (20,4%)	9 (16,7%)
- vollständige Fraktur (nicht disloziert)	1 (1,9%)	3 (5,6%)	4 (7,4%)	2 (3,7%)
- dislozierte Fraktur	0 (0,0%)	2 (3,7%)	0 (0,0%)	0 (0,0%)

**Tabelle 13: Frakturgrad und -lokalisierung am Ringknorpel**

#### 5.4.2 Korrelationsanalyse der Verletzungen

Um die diagnostische Genauigkeit der CT im Vergleich zur Feinpräparation als Referenz zu beurteilen, wurden die Ergebnisse beider Methoden hinsichtlich Vorhandensein, Lokalisation und Verletzungsgrad korreliert. Insgesamt stellten CT und Feinpräparation mit einer Korrelation von  $r = 0,703$  das Vorhandensein einer Verletzung fest. Bezogen auf die einzelnen Kehlkopfbestandteile ergaben sich folgende Korrelationen: die Übereinstimmung der CT-Diagnosen mit der Präparation war mit  $r = 0,832$  für den Schildknorpel am besten, dicht gefolgt vom Zungenbein ( $r = 0,737$ ). Der Ringknorpel erwies sich als am schwierigsten zu beurteilender Bestandteil ( $r = 0,475$ ). Alle Korrelationen waren mit einer Ausnahme, die den seitlich linken Bereich des Ringknorpels betraf, mindestens auf dem Niveau von  $p < 0,05$  signifikant.

<b>Frakturlokalisierung</b>	<b>r (CT – Feinpräparation)</b>	<b>p-Werte</b>
Zungenbein gesamt	$r = 0,737$	$p < 0,001$
Corpus	$r = 0,577$	$p < 0,001$
rechtes Horn corpusnah	$r = 0,723$	$p < 0,001$
linkes Horn corpusnah	$r = 0,333$	$p = 0,014$
Rechtes Horn okzipital	$r = 0,808$	$p < 0,001$
Linkes Horn okzipital	$r = 0,771$	$p < 0,001$

**Tabelle 14: Nicht parametrische Korrelation nach Spearman der Zungenbeinverletzungen in CT und Feinpräparation**

Im Einzelnen soll zunächst das Zungenbein betrachtet werden (Tab. 14). Dort fanden sich die höchsten Korrelationen in den okzipitalen Anteilen, besonders rechtsseitig mit einem  $r = 0,808$ . Am Corpus ( $r = 0,577$ ;  $p < 0,001$ ) sowie im linken corpusnahen Bereich ( $r = 0,333$ ;  $p = 0,014$ ) ergab sich eine schwächere Übereinstimmung der beiden Methoden.

Frakturlokalisation	r (CT - Feinpräparation)	p-Werte
Schildknorpel gesamt	$r = 0,832$	$p < 0,001$
Mittellinie	$r = 1,000$	$p < 0,001$
rechtes Schild	$r = 0,521$	$p < 0,001$
linkes Schild	$r = 0,555$	$p < 0,001$
rechtes oberes Horn	$r = 0,885$	$p < 0,001$
linkes oberes Horn	$r = 0,645$	$p < 0,001$
rechtes unteres Horn	$r = 0,714$	$p < 0,001$
linkes unteres Horn	$r = 0,868$	$p < 0,001$

**Tabelle 15: Nicht parametrische Korrelation nach Spearman der Schildknorpelverletzungen in CT und Feinpräparation**

Betrachtet man den Schildknorpel, wurden im Bereich der Mittellinie, dem rechten oberen und dem linken unteren Horn mit  $r > 0,880$  die besten Ergebnisse erzielt. Die übrigen beiden Hörner konnten ebenfalls zufriedenstellend bewertet werden, während bei Verletzungen in den Schildknorpelplatten mit  $r = 0,521$  und  $r = 0,555$  die niedrigsten Korrelationen erreicht werden konnten (Tab. 15).

Frakturlokalisation	CT - Feinpräparation	p-Werte
Ringknorpel gesamt	$r = 0,475$	$p < 0,001$
Mittellinie rostral	$r = 0,839$	$p < 0,001$
Mittellinie okzipital	$r = 0,438$	$p = 0,001$
seitlich rechts	$r = 0,401$	$p = 0,003$
seitlich links	$r = 0,130$	$p = 0,347$

**Tabelle 16: nicht parametrische Korrelation nach Spearman der Ringknorpelverletzungen in CT und Feinpräparation**

Beim Ringknorpel stimmten CT und Präparationsbefund am häufigsten in der Mittellinie überein (Tab. 16). Seitlich links fand sich die geringste Korrelation mit  $r = 0,130$  ( $p = 0,347$ ), die gleichzeitig auf dem Niveau von  $p < 0,05$  als einzige Ausnahme nicht signifikant war. Seitlich rechts und in der okzipitalen Mittellinie konnten mäßige Übereinstimmungen von  $r = 0,401$  ( $p = 0,003$ ) bzw.  $r = 0,428$  ( $p = 0,001$ ) erzielt werden.

### 5.4.3 Vierfeldertafeln

Um die Sicherheit und Qualität der Verletzungsdiagnostik durch das CT im Vergleich zur Feinpräparation darzustellen, wurden außerdem falsch positive und negative Befunde sowie Sensitivitäten, Spezifitäten und positiv und negativ prädiktive Werte der CT-Diagnostik untersucht.

Hinsichtlich der Fragestellung, ob ein Fall unabhängig von der Lokalisation und Anzahl überhaupt von Verletzungen betroffen war, zeigten Feinpräparation und CT in acht Fällen Abweichungen (Tab. 17). Darunter waren in der CT in zwei Fällen Verletzungen diagnostiziert worden, welche die Feinpräparation nicht bestätigte (falsch Positive), während bei sechs Kehlköpfen im CT keine Verletzungen beschrieben wurden, obwohl sie laut Präparation betroffen waren (falsch Negative).

		CT		gesamt
		Verletzung	keine Verletzung	
Feinpräparation	Verletzung	28	6	34
	keine Verletzung	2	18	20
gesamt		30	24	54

**Tabelle 17: Vierfeldertafel der diagnostizierten Verletzungen in CT und Feinpräparation fallbezogen**

Betrachtet man die drei Kehlkopfbestandteile im Einzelnen, finden sich die folgenden Ergebnisse (Tab. 18). Falsch positive CT-Befunde fanden sich selten, nämlich jeweils in einem Fall am Zungenbein und am Schildknorpel. Falsch negative CT-Diagnosen dagegen waren häufiger. Bei Zungenbein und Schildknorpel war dies jeweils sechs Mal der Fall, beim Ringknorpel wurden 13 von insgesamt 49 Verletzungen im CT nicht detektiert.

<b>Zungenbein</b>		CT		gesamt
		Verletzung	keine Verletzung	
Feinpräparation	Verletzung	13	6	19 (35,2%)
	keine Verletzung	1	34	35 (64,8%)
gesamt		14 (25,9%)	40 (74,0%)	54 (100%)
<b>Schildknorpel</b>		CT		gesamt
		Verletzung	keine Verletzung	
Feinpräparation	Verletzung	22	6	28 (51,9%)
	keine Verletzung	1	25	26 (48,1%)
gesamt		23 (42,6%)	31 (57,4%)	54 (100%)
<b>Ringknorpel</b>		CT		gesamt
		Verletzung	keine Verletzung	
Feinpräparation	Verletzung	5	13	18 (33,3%)
	keine Verletzung	0	36	36 (66,7%)
gesamt		5 (9,3%)	49 (90,7%)	54 (100%)

**Tabelle 18: Vierfeldertafeln der einzelnen Kehlkopfbestandteile hinsichtlich der Diagnose von Verletzungen in CT und Feinpräparation**

Des Weiteren wurden daraus Sensitivität, Spezifität, positiv und negativ prädiktiver Wert für die CT-Diagnostik ermittelt (Tab. 19). Hinsichtlich der Frage, ob am gesamten Kehlkopf eine Verletzung vorliegt oder nicht, wurde eine Sensitivität von 82,4% erreicht. Eine Schwierigkeit stellte vor allem die Beurteilung des Ringknorpels dar (Sensitivität 27,8%), während am Zungenbein mit einer Sensitivität von 68,4% und am Schildknorpel mit einer Sensitivität von 78,6% tatsächlich vorhandene Verletzungen auch als solche erkannt wurden. Dass wenig falsch negative Befunde aufgetreten waren, zeigte sich in der hohen Spezifität. Diese ergab 90% dafür, dass ein unversehrter Kehlkopf als solcher erkannt wurde. Bezüglich falsch negativer Befunde in der Beurteilung der Einzelbestandteile ergaben sich Spezifitäten von mindestens 96%. Auch der positive Vorhersagewert lag in allen drei Fällen über 90%, sodass bei Feststellen von Verletzungen in der CT mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit auch eine Verletzung in der Feinpräparation diagnostiziert worden war. Für die negativ prädiktiven Werte dagegen ergaben sich für das Zungenbein 85,0%, für den Schildknorpel 80,6% und für den Ringknorpel 73,5%. Insgesamt lag in 75% der Fälle,

in denen anhand der Computertomographie keine Verletzung am Kehlkopf diagnostiziert worden war, auch tatsächlich keine Verletzung vor.

	gesamter Kehlkopf	Zungenbein	Schildknorpel	Ringknorpel
Sensitivität	82,4%	68,4%	78,6%	27,8%
Spezifität	90,0%	97,1%	96,2%	100,0%
positiv prädiktiver Wert	93,3%	92,9%	95,7%	100,0%
negativ prädiktiver Wert	75,0%	85,0%	80,6%	73,5%
diagnostische Genauigkeit	85,2%	87,0%	87,0%	75,9%

**Tabelle 19: Sensitivität, Spezifität, positiv und negativ prädiktiver Wert der CT-Diagnostik**

## 5.5 Verknöcherung

Die Verknöcherung des Kehlkopfskeletts war der zweite Aspekt, der neben den Verletzungen untersucht wurde. Dabei wurde der Ossifikationsgrad sowohl anhand der Feinpräparation als auch mithilfe der computertomographischen Aufnahmen eingeteilt und anschließend im Hinblick auf eine Korrelation mit dem Alter ausgewertet.

### 5.5.1 Häufigkeiten

Insgesamt ähnelte sich die Verteilung der Verknöcherungsstufen der drei Kehlkopfbestandteile. Diese wiesen dabei überwiegend einen mittleren bis höheren Verknöcherungsgrad auf. Fälle fehlender oder komplett abgeschlossener Ossifikation dagegen waren selten.

#### 5.5.1.1 Zungenbein

Am Zungenbein zeigte etwa die Hälfte des Kollektivs eine partielle oder einseitige Verknöcherung, wobei in der anderen Hälfte größtenteils eine beidseitige Fusion stattgefunden hatte (Tab. 20). Geringfügige Unterschiede in der Beurteilung durch CT und Feinpräparation fanden sich vor allem bei der Zuordnung zu Verkalkungsgrad I und II. Auch bei getrennter Beurteilung von männlichem und weiblichem Geschlecht wurde der Zustand zwischen fehlenden Fusionszeichen und vollständiger Fusion am häufigsten beobachtet, gefolgt von der kompletten Verbindung von Corpus und großen Hörnern.

Verknöcherungsgrad	CT			Feinpräparation		
	gesamt	Männer	Frauen	gesamt	Männer	Frauen
<b>0</b>	7 (13,0%)	5 (15,2%)	2 (9,5%)	8 (14,8%)	5 (15,2%)	3 (14,3%)
<b>I</b>	24 (44,4%)	14 (42,4%)	10 (47,6%)	27 (50,0%)	17 (51,5%)	10 (47,6%)
<b>II</b>	23 (42,6%)	14 (42,4%)	9 (42,9%)	19 (35,2%)	11 (33,3%)	8 (38,1%)

**Tabelle 20: Verteilung des Verknöcherungsgrades des Zungenbeins im Kollektiv; 0 = keine Fusion, I = teilweise oder einseitige Fusion, II = beidseitige vollständige Fusion**

Betrachtet man den anhand der CT-Bilder ermittelten Abstand zwischen Corpus und den großen Hörnern, wies knapp die Hälfte des Kollektivs einen vorhandenen Abstand von < 1 mm auf (Tab. 21). Dies gilt sowohl für den männlichen Anteil der Präparate

als auch für die weiblichen Exemplare. Bei etwa einem Drittel trat die komplette Fusion von Corpus und großen Hörnern auf, während Abstände von 1-2 mm selten und Abstände > 2 mm nur in zwei Fällen auftraten.

Abstand	CT		
	gesamt	Männer	Frauen
> 2mm	2 (3,7%)	1 (3,0%)	1 (4,8%)
1-2mm	7 (13,0%)	4 (12,1%)	3 (14,3%)
< 1mm	26 (48,1%)	17 (51,1%)	9 (42,9%)
komplett fusioniert	19 (35,2%)	11 (3,3%)	8 (38,1%)

Tabelle 21: Abstand zwischen Corpus und den großen Hörnern des Zungenbeins

Was die Fusion der kleinen Hörner mit Corpus bzw. großen Hörnern des Zungenbeins angeht, konnten ausschließlich 48 der 54 Fälle in der CT beurteilt werden, da in den übrigen sechs Fällen die kleinen Hörner nicht ausgebildet waren. Am häufigsten war eine nicht knöcherne also bindegewebige oder knorpelige Verbindung am Zungenbeinskelett zu finden (54,2%), während eine teilweise oder komplette Fusion in jeweils 22,9% der beurteilbaren Kehlköpfe auftrat (Tab. 22).

Fusionsgrad	CT		
	gesamt	Männer	Frauen
0	26 (54,2%)	13 (48,1%)	13 (61,9%)
I	11 (22,9%)	7 (25,9%)	4 (19,0%)
II	11 (22,9%)	7 (25,9%)	4 (19,0%)

Tabelle 22: Fusionsgrad der kleinen Zungenbeinhörner; 0 = keine Fusion, I = teilweise bzw. einseitige Fusion, II = komplette Fusion

### 5.5.1.2 Schildknorpel

Beim Schildknorpel werden entsprechend der Arbeiten von Keen und Wainwright, Turk und Hogg und de la Grandmaison et al. insgesamt sechs Verknöcherungsstufen beim Mann bzw. fünf bei der Frau unterschieden (Tab. 23) [60, 62, 76]. Wie auch schon beim Zungenbein wies der Großteil mittlere bis höhere Verknöcherungsstufen auf. Der Extremfall „kein einziger Ossifikationsherd“ trat nur bei einer weiblichen Leiche auf und ebenso war der Fall der kompletten flächigen Ossifikation nur bei

einem männlichen Kehlkopf zu finden gewesen. Auch die Maximalverknöcherungsstufe der Frauen war mit zwei Fällen gemäß der Feinpräparation (9,5%) bzw. vier Fällen gemäß CT (19,0%) in diesem Kollektiv selten.

Verknöcherungsgrad	CT			Feinpräparation		
	gesamt	Männer	Frauen	gesamt	Männer	Frauen
<b>0</b>	1 (1,9%)	0 (0,0%)	1 (4,8%)	1 (1,9%)	0 (0,0%)	1 (4,8%)
<b>I</b>	4 (7,4%)	3 (9,1%)	1 (4,8%)	6 (11,1%)	5 (15,2%)	1 (4,8%)
<b>II</b>	12 (22,2%)	5 (15,2%)	7 (33,3%)	11 (20,4%)	4 (12,1%)	7 (33,3%)
<b>III</b>	20 (37,0%)	12 (36,4%)	8 (38,1%)	22 (40,7%)	12 (36,4%)	10 (47,6%)
<b>IV</b>	16 (29,6%)	12 (36,4%)	4 (19,0%)	13 (24,1%)	11 (33,3%)	2 (9,5%)
<b>V</b>	1 (1,9%)	1 (3,0%)	-	1 (1,9%)	1 (3,0%)	-

**Tabelle 23:** Verteilung des Verknöcherungsgrades des Schildknorpels im Kollektiv; **0** = keine bis minimale Ossifikationsherde, **I** = beginnende Ossifikation der unteren Hörner und der Schilde unten, **II** = zunehmende Ossifikation im Bereich der Mittellinie (Mann) bzw. der oberen Hörner (Frau), **III** = fortgeschrittene Ossifikation aller Hörner und der Schilde von unten nach oben, **IV** = wenige nicht ossifizierte Areale verbleibend, **V** = komplette Ossifikation (nur beim Mann)

### 5.5.1.3 Ringknorpel

Der Ringknorpel schließlich wurde ebenso nach Keen und Wainwright, Turk und Hogg und de la Grandmaison in vier Phasen der Ossifikation unterteilt (Tab. 24) [60, 62, 76]. Hier wurden im CT der Ossifikationsgrad III und IV, in der Präparation dagegen II und III am häufigsten beschrieben. Somit wies das Kollektiv auch in diesem Bestandteil in der Mehrheit eine mittel- bis höhergradige Verknöcherung auf.

Bezüglich der geringeren Ossifikation (Grad 0 und I) unterschieden sich CT und Feinpräparation häufiger. Während die Präparation in sechs von neun Fällen gar keine Verknöcherung beschrieb, konnte im CT in sieben von zehn Fällen bereits eine beginnende Ossifikation nachgewiesen werden. Hinsichtlich des Geschlechts trat die höchste Verknöcherungsstufe bei Frauen wieder deutlich seltener als bei Männern auf.

Verknöcherungsgrad	CT			Feinpräparation		
	gesamt	Männer	Frauen	gesamt	Männer	Frauen
<b>0</b>	3 (5,6%)	2 (6,1%)	1 (4,8%)	6 (11,1%)	4 (12,1%)	2 (9,5%)
<b>I</b>	7 (13,0%)	3 (9,1%)	4 (19,0%)	3 (5,6%)	1 (3,0%)	2 (9,5%)
<b>II</b>	11 (20,4%)	7 (21,2%)	4 (19,0%)	13 (24,1%)	8 (24,2%)	5 (23,8%)
<b>III</b>	21 (38,9%)	21 (36,4%)	9 (42,9%)	24 (44,4%)	13 (39,4%)	11 (52,4%)
<b>IV</b>	12 (22,2%)	9 (27,3%)	3 (14,3%)	8 (14,8%)	7 (21,2%)	1 (4,8%)

**Tabelle 24: Verteilung des Verknöcherungsgrades des Ringknorpels im Kollektiv; 0 = keine bis minimale Ossifikationsherde, I = beginnende Ossifikation der kranialen Lamina, II = zunehmende Ossifikation nach kaudal und lateral, III = fortgeschrittene Ossifikation mit Aussparung des Arcus, IV = vollständige Ossifikation**

### 5.5.2 Korrelationsanalyse der Verknöcherung

Um die Hypothese einer altersabhängigen Zunahme der Verknöcherung des Kehlkopfes an diesem Kollektiv zu überprüfen, wurde der Verknöcherungsgrad der einzelnen Kehlkopfbestandteile jeweils mit dem Alter zum Todeszeitpunkt verglichen. Dazu wurden sowohl die Ergebnisse der Feinpräparation als auch die der CT-Bilder verwendet und verglichen. Die Werte der Methoden korrelierten dabei über alle Bestandteile hinweg in hohem Maß. Am besten stimmten dabei die Werte für Schildknorpel überein (Tab. 25).

Bestandteil	r (CT – Feinpräparation)	p-Werte
Summe	r = 0,908	p < 0,001
Zungenbein	r = 0,811	p < 0,001
Schildknorpel	r = 0,897	p < 0,001
Ringknorpel	r = 0,844	p < 0,001

**Tabelle 25: nicht parametrische Korrelation nach Spearman der CT und Feinpräparation bezüglich des Fusions- bzw. Verknöcherungsgrad**

Für das Zungenbein zeigten sich mäßige Korrelationen mit dem Alter der Patienten. Der in der feinpräparatorischen Untersuchung bestimmte Verknöcherungsgrad zeigte einen größeren Zusammenhang mit dem Alter als der anhand der CT-Bilder bestimmte

Verknöcherungsgrad (Tab. 26). In der geschlechterunabhängigen Beurteilung durch die Computertomographie war das Zungenbein der Bestandteil mit der geringsten Korrelation. Bei beiden Untersuchungstechniken zeigte sich bei den Frauen ein geringerer Zusammenhang als bei den Männern.

Zungenbein	CT - Alter	Feinpräparation - Alter
gesamt	$r = 0,557$ ( $p < 0,001$ )	$r = 0,660$ ( $p < 0,001$ )
Mann	$r = 0,522$ ( $p = 0,002$ )	$r = 0,682$ ( $p < 0,001$ )
Frau	$r = 0,516$ ( $p = 0,017$ )	$r = 0,544$ ( $p = 0,011$ )

**Tabelle 26: Nicht parametrische Korrelation nach Spearman der Zungenbeinverknöcherung und des Alters**

Die Präparation konnte bei den Männern sogar eine relativ gute Übereinstimmung des Alters und der Fusion des Zungenbeinkorpus mit den Hörnern nachweisen ( $r = 0,682$ ,  $p < 0,001$ ). Außerdem nahm der Abstand zwischen Corpus und großen Hörnern mit zunehmendem Alter ab. Die Korrelation von Abstand und Alter ergab einen Wert von  $r = 0,488$  ( $p < 0,001$ ). Der Fusionsgrad der kleinen Hörner korrelierte nicht signifikant mit dem Alter ( $r = 0,162$ ;  $p = 0,272$ ).

Schildknorpel	CT	Feinpräparation
gesamt	$r = 0,606$ ( $p < 0,001$ )	$r = 0,568$ ( $p < 0,001$ )
Mann	$r = 0,788$ ( $p < 0,001$ )	$r = 0,721$ ( $p < 0,001$ )
Frau	$r = 0,412$ ( $p = 0,064$ )	$r = 0,404$ ( $p = 0,069$ )

**Tabelle 27: Nicht parametrische Korrelation nach Spearman der Schildknorpelverknöcherung und des Alters**

Betrachtet man die Korrelationsergebnisse des Schildknorpels (Tab. 27) gegenüber denen des Zungenbeins für das gesamte Kollektiv, so zeigen CT und Feinpräparation umgekehrte Ergebnisse. Während die Alterseinschätzung anhand des CTs nun eine höhere Korrelation von  $r = 0,606$  ( $p < 0,001$ ) aufwies, korrelierte die Alterseinschätzung anhand der Verknöcherung in der Feinpräparation geringer ( $r = 0,568$ ;  $p < 0,001$ ) mit dem tatsächlichen Alter. Unterscheidet man zwischen Frauen und Männern, zeigten sich für beide Methoden bei männliche Kehlköpfen ( $r = 0,788$ ) eine wesentlich höhere Korrelation als bei weiblichen Präparaten ( $r = 0,721$ ).

Ringknorpel	CT - Alter	Feinpräparation - Alter
gesamt	$r = 0,653$ ( $p < 0,001$ )	$r = 0,747$ ( $p < 0,001$ )
Mann	$r = 0,759$ ( $p < 0,001$ )	$r = 0,855$ ( $p < 0,001$ )
Frau	$r = 0,567$ ( $p = 0,007$ )	$r = 0,606$ ( $p = 0,004$ )

**Tabelle 28: Nicht parametrische Korrelation nach Spearman der Ringknorpelverknöcherung und des Alters**

Der dritte Bestandteil des Kehlkopfes, der Ringknorpel (Tab. 28), erbrachte schließlich den größten Zusammenhang zwischen Verknöcherungsgrad und Alter, wobei in diesem Fall wieder die Einstufung anhand der Feinpräparation besser mit dem tatsächlichen Alter korrelierte als die der CT. Wie auch schon Zungenbein und Schildknorpel war bei den Männern eine stärkere Korrelation vorhanden (Feinpräparation:  $r = 0,855$ ;  $p < 0,001$ ).

Insgesamt zeigten sich Korrelationen mit Werten  $\geq 0,557$ , was das gesamte Kollektiv angeht. Differenziert man allerdings hinsichtlich des Geschlechts, finden sich beim männlichen Anteil in allen drei Bestandteilen deutlich höhere Zusammenhänge zwischen ihrem Verknöcherungsgrad und dem Alter. Besonders beim Schildknorpel erscheint die Korrelation bei den Frauen mit Werten von  $0,412$  ( $p = 0,064$ ) bzw.  $0,404$  ( $p = 0,069$ ) im Vergleich gering.

Summe	CT	Feinpräparation
gesamt	$r = 0,702$ ( $p < 0,001$ )	$r = 0,735$ ( $p < 0,001$ )
Mann	$r = 0,819$ ( $p < 0,001$ )	$r = 0,873$ ( $p < 0,001$ )
Frau	$r = 0,540$ ( $p = 0,012$ )	$r = 0,535$ ( $p = 0,012$ )

**Tabelle 29: Nicht parametrische Korrelation nach Spearman der Summe der Verknöcherungsgrade und des Verknöcherungsgrade**

Um die Problematik des unregelmäßigen Verknöcherungsablaufes der einzelnen Kehlkopfbestandteile zu minimieren, wurden die jeweiligen Verknöcherungsgrade addiert und schließlich der Gesamtwert mit dem Alter korreliert (Tab. 28). Dabei zeigte sich für die Verknöcherungsbeurteilung durch die CT als Summe ein stärkerer Zusammenhang als bei Betrachtung der Einzelbestandteile. Für die Beurteilung anhand der Feinpräparation ist die Summe aus den Verknöcherungsstufen nur der separaten Beurteilung von Zungenbein und Schildknorpel überlegen. Dagegen ergibt

die einzelne Bewertung des Verknöcherungsgrades des Ringknorpels eine größere Korrelation. Hinsichtlich des Geschlechts hat bei den Männern die Summe der Verknöcherungsstufen gegenüber den einzelnen Werten unabhängig von der Untersuchungstechnik den größten Zusammenhang mit dem Alter. Bei den Frauen ist sie der alleinigen Bestimmung der Verknöcherung des Zungenbeins anhand der CT-Bilder und der des Schildknorpels für beide Untersuchungstechniken überlegen.

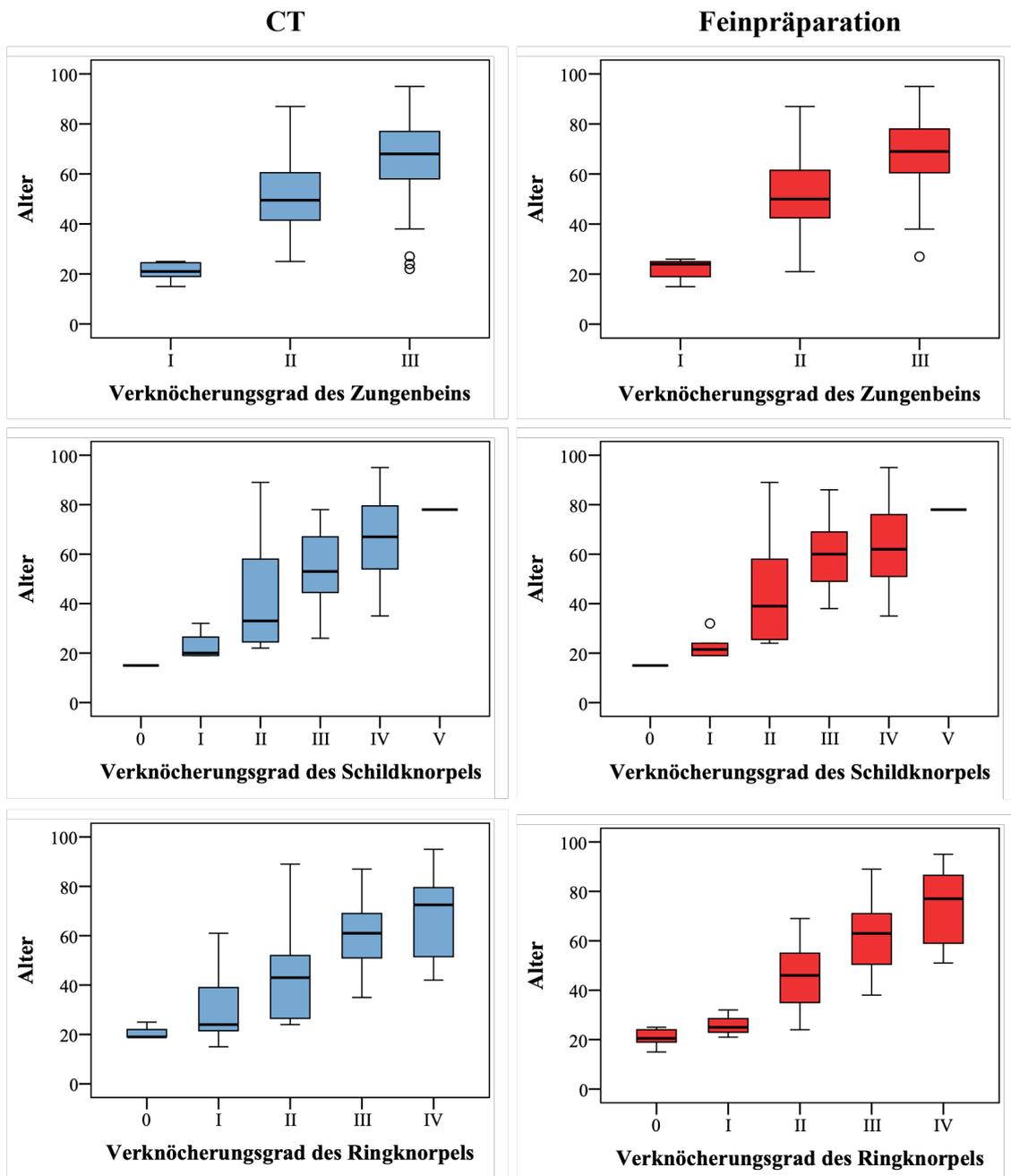


Abbildung 29: Boxplots der jeweiligen Verknöcherungsgrade bezogen auf das Alter und Median in CT (links) und Feinpräparation (rechts)

Abbildung 29 illustriert die Altersverteilung innerhalb der Verknöcherungsstufen anhand Feinpräparation und CT.

In allen Diagrammen lässt sich ein mit dem Ossifikationsgrad zunehmender Altersdurchschnitt erkennen. Vor allem am Schild-, aber auch am Ringknorpel zeigen sich in beiden Untersuchungsmodalitäten relativ breite Überlappungen der Altersbereiche von zwei aufeinanderfolgenden Verknöcherungsstufen. Dies zeigt sich unabhängig von der Untersuchungsmodalität. Es fällt für alle drei Bestandteile v. a. in den mittleren bis höheren Verknöcherungsstufen ein breites Altersspektrum innerhalb eines zugeordneten Ossifikationsgrades auf. Besonders ausgeprägt ist dies bei den Schildknorpeln mit Verknöcherungsgrad II, die eine Altersgruppe von 22 bis 89 Jahren (CT) und 24 bis 89 Jahren (Feinpräparation) umfasst. Auch die Verknöcherungsstadien I und II des Zungenbeins zeigen eine große Altersspannweite. Stellt man die Ossifikationsbeurteilung in CT der Feinpräparation gegenüber, fällt für Zungenbein und Ringknorpel eine ähnlich gute Korrelation der Verknöcherung mit dem Alter in beiden Methoden auf. Was den Schildknorpel betrifft, wird dieser Zusammenhang in den Ergebnissen des CTs deutlicher.

## 5.6 Zeitaufwand

Für die Auswertung der CT-Bilder wurden im Mittel pro Kehlkopf  $13,5 \pm 3,5$  min benötigt. Da für die Aufnahmezeit und die Bildbearbeitung zusätzlich Zeit benötigt wurde, ergab sich im Gesamten ein durchschnittlicher Zeitaufwand von  $28,9 \pm 4,1$  min. Die Präparations- und Beurteilungszeit dagegen nahm zwischen 180 und 300 min in Anspruch (durchschnittlich  $208,2 \pm 32,5$  min). Damit unterschied sich diese signifikant von der gesamten CT-Aufnahme-, Bearbeitungs- und Interpretationszeit ( $p < 0,001$ ).

## 5.7 Strahlendosis

Um die Strahlenbelastung der CT-Untersuchungen zu quantifizieren, wurden der Computed Tomography Dose Index (CTDI) sowie das Dosislängenprodukt (DLP) dokumentiert und deren Mittelwerte bestimmt (Tab. 29). Die abgeschätzte effektive Dosis anhand des Mittelwertes des Dosislängenprodukts lag bei 7,60 mSv.

	CTDI <sub>vol</sub> [mGy]	DLP [mGy*cm]
Mittelwert $\pm$ Standardabweichung	$103,76 \pm 10,20$	$1406,31 \pm 167,02$

**Tabelle 30: Mittelwerte des DLP und des CTDI der CT-Untersuchungen des Larynx**

## 6. DISKUSSION

### 6.1 Interpretation der Ergebnisse

#### 6.1.1 Kollektiv

Das Kollektiv zeigte im Hinblick auf das Geschlecht mit 33 zu 21 eine leichte Überzahl an männlichen Kehlköpfen. Insgesamt umfasste es ein breites Altersspektrum von 15 bis 95 Jahren mit einem Durchschnittsalter von 50,2 Jahren (Männer: 50,2 Jahre; Frauen: 57,4 Jahre). Damit konnte das Auftreten von Verletzungen sowie die Verknöcherung über alle Altersabschnitte hinweg beurteilt werden (Abb. 30).

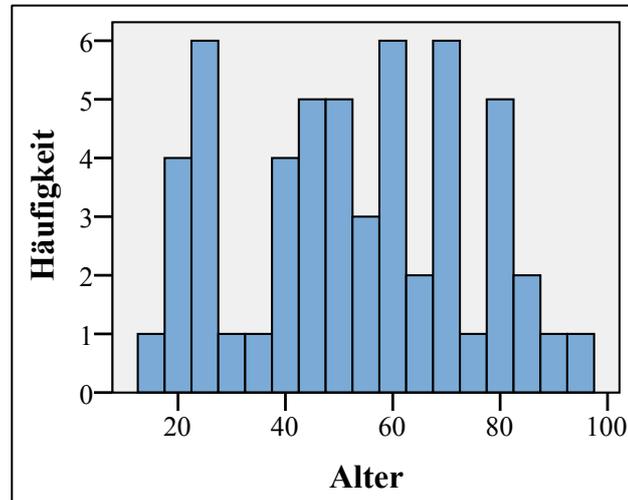


Abbildung 30: Altersverteilung des Kollektivs

Durch die Fallauswahl waren Todesursachen aufgrund von Gewalt gegen den Hals mit 38,9% des Kollektivs sehr häufig vertreten. Auch Stürze und Verkehrsunfälle waren im Gegensatz zu natürlichen Todesursachen verhältnismäßig stärker repräsentiert, wodurch eine ausreichende Anzahl potenzieller Verletzungen des Kehlkopfes eingeschlossen werden konnte.

Insgesamt waren 34 Fälle mit Verletzungen (63,0%) 20 Kehlköpfen ohne Verletzungsbefund (37,0%) gegenübergestellt worden, womit eine Überprüfung der computertomographischen Diagnostik anhand von Negativkontrollen gegeben war. Hierdurch war es möglich auch die falsch positiven Diagnosen der CT-Befundung zu erfassen.

#### 6.1.2 Normvarianten

Normvarianten des Kehlkopfes zeigten sich in diesem Kollektiv im Vergleich mit anderen Studien gleichermaßen oft bis häufiger. Dabei wurden vorrangig Normvarianten des Schildknorpels erfasst, da besonders diese eine potenzielle Verwechslungsgefahr mit Verletzungen darstellen. Beispielsweise könnte ein Cartilago triticea für ein abgesprengtes Frakturfragment gehalten werden oder ein

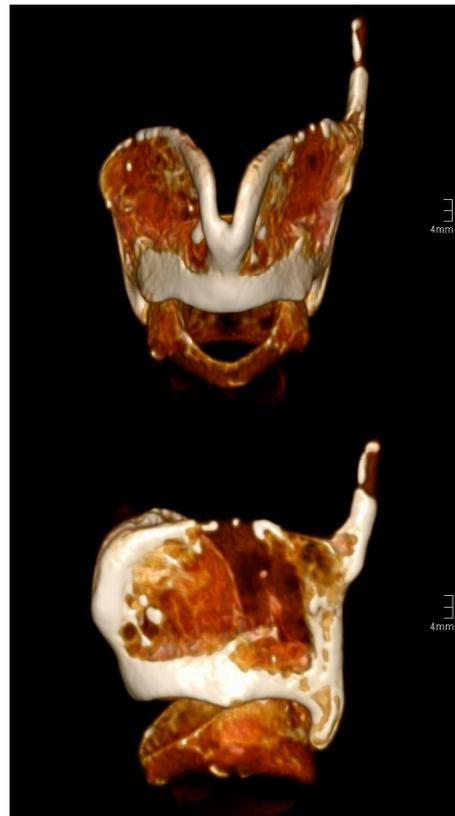
Foramen thyroideum bei zusätzlich unregelmäßiger Verknöcherung für eine Verletzung der Schildknorpelplatte. Bei einem fehlenden Schildknorpelhorn könnte fälschlicherweise ein traumatischer Abriss mit fehlendem Nachweis des Fragmentes vermutet werden. Insgesamt waren in 63% der Fälle Normvarianten erfasst worden. Bezüglich des Auftretens eines Cartilago triticea finden sich Häufigkeiten von 13,2% bis zu 53,1% in der Literatur [61, 111]. Diese Studie zeigte die Normvariante in 38,9% der Fälle und liegt somit zwischen den Literaturangaben. Ein möglicher Grund für die eher größere Häufigkeit könnte sein, dass in der CT im Gegensatz zur konventionellen Röntgenuntersuchung auch nicht verkalkte Weizenkornknorpel detektiert werden können. Alqahtani et al. hatten die Variante mit 53,1% in der Auswertung von 663 CT-Angiographien am häufigsten beobachtet [111].

Dagegen fanden Naimo et al. in 431 CT-Untersuchungen diese Normvariante nur in 23,6% [17], de la Grandmaison et al. anhand von 82 Röntgenaufnahmen allerdings in 40,2% der Fälle [62]. Das würde mit dieser Vermutung wiederum nicht übereinstimmen.

Das Auftreten eines Foramen thyroideums in diesem Kollektiv ist mit 33,3% vergleichbar mit dem der Literatur (durchschnittlich 28,3%) [72]. Die Agenesie eines Schildknorpelhorns war als bekanntermaßen seltene Normvariante auch hier in nur einem Fall aufgetreten (Abb. 31) [52, 62]. Insgesamt 6 Fälle wiesen eine beidseitige Aplasie der kleinen Zungenbeinhörner auf, die ebenfalls als eher seltene Normvariante beschrieben ist [50].

### 6.1.3 Verletzungsursachen

Kehlkopfverletzungen wurden v. a. als Folge von Gewalt gegen den Hals wie Erhängen untersucht, da sie in diesen Fällen besonders häufig auftreten. In diesem



**Abbildung 31: 3D Rekonstruktionen aus dem CT-Datensatz eines Schildknorpels in der Ansicht von anterior (oben) sowie von anterolateral: Agenesie des linken, oberen Schildknorpelhorns**

Kollektiv zeigten sich in 85,7% der Fälle von direkter Gewalt gegen den Hals auch Verletzungen des Kehlkopfes. Während Betz und Eisenmenger in 67% der Fälle durch Erhängen Kehlkopfverletzungen vorfanden [12], Green in 47,5% [103], Uzun et al. in 59,9% [5] und Amak et al. in 76,8% [3], konnten in diesem Kollektiv sogar in 87% der Fälle von Erhängen Verletzungen anhand der Feinpräparation nachgewiesen werden. Beim Tod durch Erdrosseln wies dieses Kollektiv in vier von fünf Fällen Verletzungen auf, beim Tod durch Erwürgen in ein von zwei Fällen. Bei Azmak et al. dagegen war dies in nur ein von vier Fällen bei Erdrosseln und drei von drei Fällen bei Erwürgen der Fall gewesen [3]. Aufgrund der jeweils niedrigen Fallzahlen dieser Studien erscheinen diese Unterschiede allerdings nicht weiter aussagekräftig. Insgesamt wird deutlich, dass im Falle einer Gewalteinwirkung gegen den Hals der Fund von Kehlkopfverletzungen sehr wahrscheinlich ist und somit den Verdacht auf eine solche Gewalteinwirkung bestätigen kann. Allerdings war nur in 52,9% der Fälle verletzter Kehlköpfe Gewalt gegen den Hals ursächlich. Dies entspricht ungefähr den Ergebnissen von Dunsby und Davison, die 56,4% der Kehlkopfverletzungen auf eine Krafteinwirkung gegen den Hals zurückführen konnten [2]. Daher kann von einer Kehlkopfverletzung nicht auf einen Tod in Form von Erhängen, Erdrosseln oder Erwürgen o. Ä. rückgeschlossen werden, da derartige Verletzungen auch als Folge anderer Geschehnisse wie z. B. Verkehrsunfällen und Stürzen möglich sind [2]. Diese alternativen Szenarien waren in den übrigen 47,1% ursächlich.

#### 6.1.4 Frakturarten und -lokalisationen

Wie in der Literatur beschrieben fanden sich in dieser Studie unabhängig von der Verletzungsursache am häufigsten Verletzungen des Schildknorpels gefolgt von Verletzungen des Zungenbeins und des Ringknorpels [2, 19]. Die häufigsten Schildknorpelverletzungen waren dabei Frakturen der oberen Hörner, links häufiger als rechts und zum größten Teil disloziert. Es traten 37 Frakturen der oberen Hörner verteilt auf 24 Fälle (44,4%) auf, wobei darunter beidseitige Frakturen häufig zu finden waren. Dies ist als typische Frakturlokalisation des Schildknorpels bereits mehrfach vorbeschrieben [4, 10, 103, 104]. Die oberen Schildknorpelhörner stellen als schmale Ausläufer der Laminae bei einer Krafteinwirkung gegen den Hals das fragilste Element des Schildknorpels dar und erscheinen aufgrund ihrer ungeschützten, exponierten Lage zwischen Zungenbein und Schildknorpelplatten ein anfälliger Bestandteil für Verletzungen zu sein. Besonders im Falle von Erhängen, Erwürgen oder Erdrosseln ist dieser Bereich von der Gewalteinwirkung betroffen [4, 10, 19].

Dabei wird der Schildknorpel nach dorsal gegen die Wirbelsäule gedrückt und die oberen Schildknorpelhörner somit nach vorne flektiert [15]. Dies kann letztlich bei ausreichender Krafteinwirkung und je nach Verknöcherungsgrad bzw. Elastizität des Knorpels zur Fraktur führen. Abbildung 32 zeigt den Kehlkopf eines weiblichen Erdrosselungsopfers und weist typische Verletzungen einer solchen Gewalteinwirkung auf. Dabei fallen beidseits frakturierte obere Schildknorpelhörner auf, die auch in der CT gut erkennbar sind. Außerdem zeigt sich eine dislozierte Fraktur distal am linken großen Zungenbeinhorn.

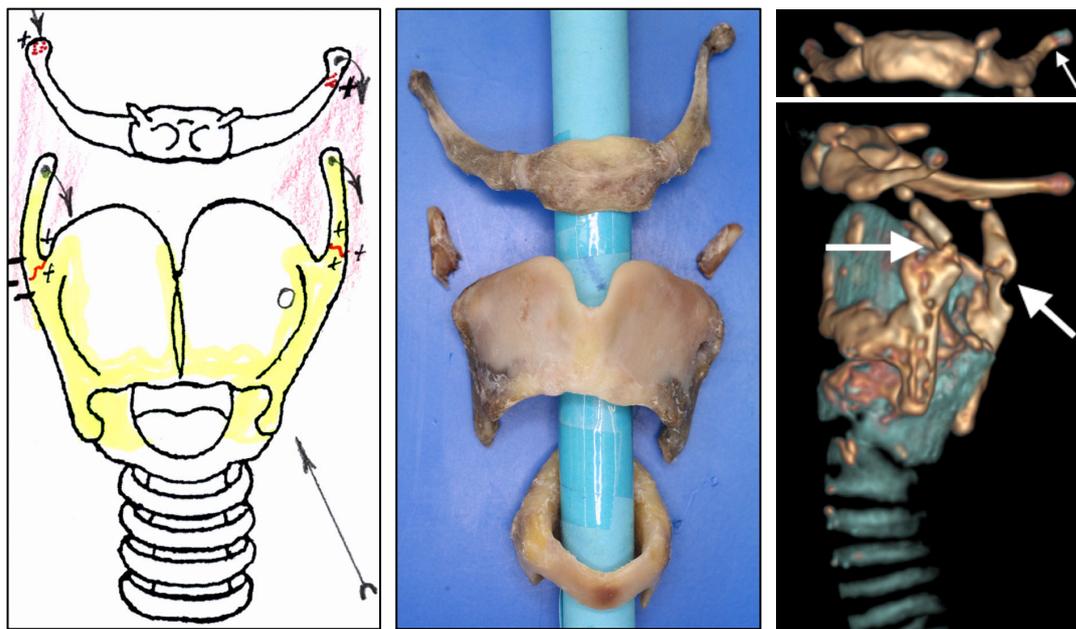


Abbildung 32: links: Übersicht der Verletzungen im Dokumentationsschema der Feinpräparation in der Ansicht von anterior; Mitte: Präparat des Zungenbeins, Schild- und Ringknorpels nach Feinpräparation; rechts: 3D-Rekonstruktionen aus den CT-Datensätzen des Zungenbeines von anterior (oben) sowie des gesamten Kehlkopfpaketes mit angrenzenden Trachealspangen in der Ansicht von posterolateral; Fall von Erdrosseln mit basisnahen Frakturen der beiden oberen Schildknorpelhörner jeweils mit Dislokation der Hörner nach anterior, einer okzipital gelegenen, nach lateral dislozierten Fraktur des linken großen Zungenbeinhorns sowie einer nicht dislozierten Fraktur des rechten großen Zungenbeinhorns okzipital

Verletzungen der unteren Hörner und der Platten inklusive der Mittellinie des Schildknorpels traten jeweils in 5 Fällen (9,3%) und 9 Fällen (16,7%) und damit insgesamt seltener auf (Abb. 33). Um die Schildknorpelplatten zu verletzen, war eine größere Krafteinwirkung oder auch eine scharfe Gewalteinwirkung wie z. B. eine Stich- bzw. Schnittverletzung nötig. In zwei Fällen waren die Verletzungen im Rahmen von Polytraumata entstanden und in jeweils einem durch Würgen, einen Schnitt und ungeklärte Gewalt. Die unteren Schildknorpelhörner werden möglicherweise durch ihre Befestigung in der Art. cricothyroidea und die innenseitige

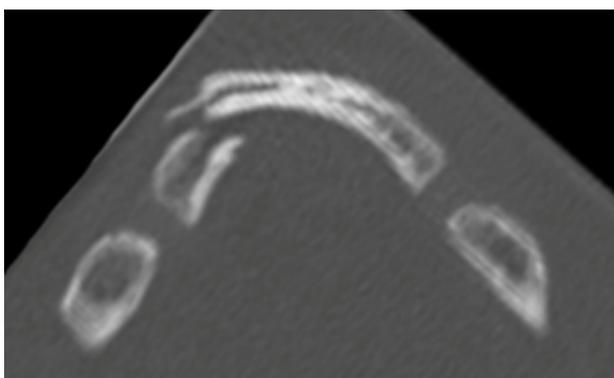
Stabilisierung durch den anliegenden Ringknorpel vor Frakturen geschützt. Außerdem sind sie im Vergleich zu den oberen Hörnern in ihrer Form eher kürzer und kompakter ausgebildet und damit nicht so anfällig für Verletzungen.

Das Zungenbein war als zweithäufigste Verletzungslokalisation bevorzugt an den jeweils okzipitalen Bereichen der großen Hörner betroffen, wobei dies auf der linken Seite fast doppelt so häufig auftrat. Da dieser Bereich den fragilsten und feinsten des Zungenbeins darstellt, wird er am häufigsten zur Lokalisation von Verletzungen [14]. Dies kann z. B. beim Erhängen entstehen wiederum durch den Druck des Kehlkopfes gegen die Wirbelsäule. Daraus resultierte in diesem Kollektiv größtenteils eine



**Abbildung 34: CT des Schildknorpels im Knochenfenster, axiale Schichtführung: Fraktur der rechten Schildknorpelplatte**

Fraktur mit Dislokation des Frakturfragments (Abb. 32, 37). Verletzungen des Corpus, die in 11,1% der Fälle zu finden waren, traten in Form von dislozierten Frakturen nur infolge massiver Krafteinwirkung wie bei Verkehrsunfällen oder Stürzen aus großer Höhe auf (Abb. 34). Für die Entstehung von Fissuren im Corpusbereich war in beiden Fällen die Einwirkung des Körpergewichts im Rahmen eines Todes durch Erhängen nötig gewesen. Bei Frakturen der proximalen Anteile der großen Zungenbeinhörner



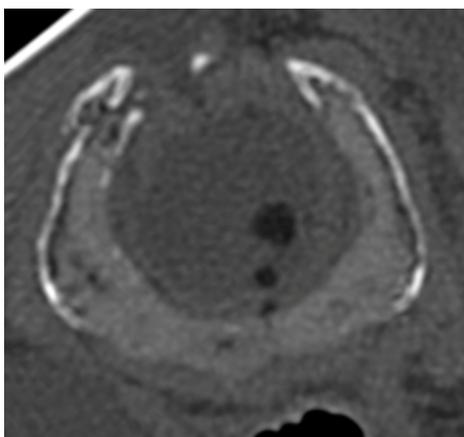
**Abbildung 33: CT des Zungenbeins im Knochenfenster, axiale Schichtführung: Dislozierte Fraktur des Zungenbeincorpus im Rahmen eines Verkehrsunfalls**

lag entweder eine komprimierende Gewalteinwirkung gegen den Hals wie Erhängen oder Erwürgen vor oder sie waren im Rahmen eines Polytraumas z. B. durch Stürze entstanden.

Der Ringknorpel war in 33,3% des Kollektivs von Verletzungen betroffen. Die häufigste Lokalisation (76,5%) waren dabei die seitlichen

Bereiche des Arcus, rechts mit 15 Verletzungen etwas häufiger als links (11 Verletzungen). Vollständige Frakturen zeigten sich am Ringknorpel seltener (Abb. 35). 13 der 18 Fälle mit Ringknorpelverletzungen wiesen nur Fissuren auf. Es ist anzunehmen, dass die stabile Ringstruktur des Knorpels ihn resistenter gegenüber

Verletzungen macht, sodass meist nur kleinere Risse entstehen. Außerdem können noch unverknöcherte Knorpelbereiche innerhalb dieser Ringstruktur einer Krafteinwirkung durch die Elastizität des Knorpels nachgeben und zunächst eine Fraktur verhindern. Vermutlich ist für eine vollständige Fraktur eine größere Krafteinwirkung nötig, was sich anhand der wenigen Fälle in diesem Kollektiv allerdings nicht zeigen ließ.



**Abbildung 35: CT des Ringknorpels im Knochenfenster, axiale Schichtführung: Dislozierte Fraktur des Ringknorpels**

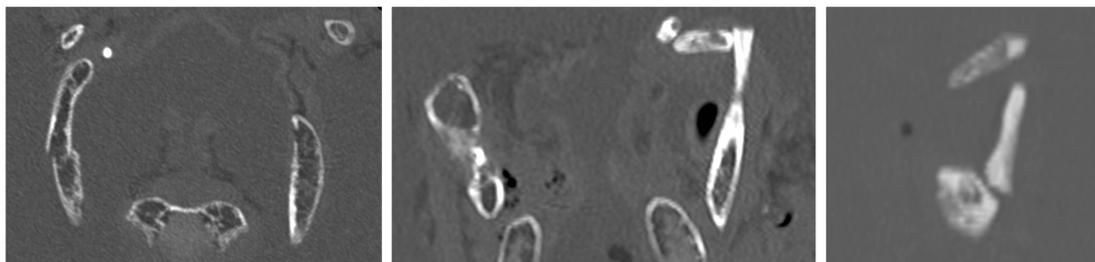
Den Ringknorpel ausgenommen fiel ein gehäuftes linksseitiges Auftreten von Verletzungen auf. Ito et al. vermuteten, dass die signifikant häufigere linksseitige Fusion des Zungenbeincorpus mit dem großen Horn auf die mehrheitlichen Rechtshänder in der Bevölkerung bzw. ihres Kollektivs und damit eine stärkere Belastung des linken Kiefers u. a. beim Kauen zurückzuführen ist [53]. Würde man von dieser Vermutung ausgehen, könnte der Grund für das gehäufte Auftreten von Verletzungen auf der linken Seite sein, dass die linke Seite durch stärkere Verknöcherung steifer und unelastischer und damit anfälliger für Frakturen ist. Um diese Vermutung zu untersuchen, wäre allerdings ein größeres Kollektiv und ggf. Untersuchungen an lebenden Patienten notwendig.

Weiterhin kann bei vollständigen bzw. dislozierten Frakturen von stabileren Anteilen des Kehlkopfes, wie den Schildknorpelplatten oder dessen unteren Hörnern, dem Corpus des Zungenbeins oder vermutlich auch des Ringknorpels von einem gewissen Maß an Krafteinwirkung ausgegangen werden, die zu diesen Verletzungen geführt haben muss.

Um die Vermutung zu untersuchen, dass in höhergradig verknöcherten Kehlköpfen aufgrund der abnehmenden Elastizität eher Frakturen auftreten als in knorpeligen [13, 88, 112], müsste ein Kollektiv mit gleichen bzw. ähnlichen Verletzungsursachen untersucht werden. Da in diesem Kollektiv verschiedenste Arten von Gewalteinwirkung vorlagen und damit zu geringe Fallzahlen der gleichen Art, kann diesbezüglich keine Aussage getroffen werden.

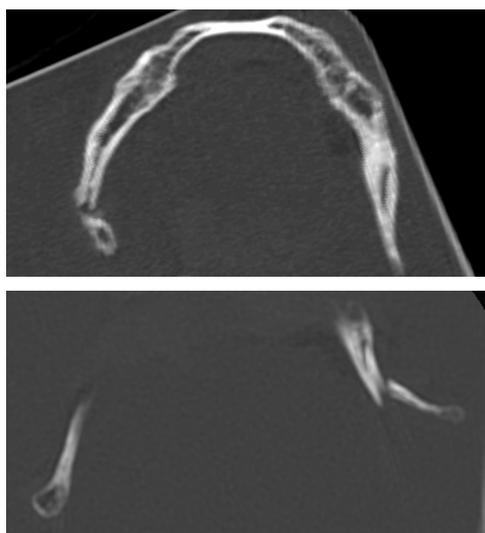
### 6.1.5 Verletzungsdiagnostik

Was das Erkennen von Verletzungen betrifft, konnten die Verletzungen des Schildknorpels im CT mit einer Korrelation von  $r = 0,832$  ( $p < 0,001$ ) am besten erkannt und beurteilt werden, gefolgt von Zungenbein ( $r = 0,733$ ;  $p < 0,001$ ) und Ringknorpel ( $r = 0,475$ ;  $p < 0,001$ ).



**Abbildung 36:** CT der oberen Schildknorpelhörner im Knochenfenster (links und Mitte in koronarer Rekonstruktion, rechts in sagittaler Rekonstruktion): Geringfügig dislozierte, basisnahe Frakturen des oberen Schildknorpelhorns (links und rechts) sowie vollständig dislozierte Fraktur des linken oberen Schildknorpelhorns im mittleren Drittel (Mitte)

Die guten Ergebnisse des Schildknorpels ergaben sich vor allem für Verletzungen der Hörner ( $r$  zwischen  $0,645$  und  $0,885$ ;  $p < 0,001$ ), die größtenteils mit einer Dislokation einhergingen. Damit waren sie als ein von der Normalposition abweichender Fortsatz des Schildknorpels gut als Fraktur zu erkennen (Abb. 36), besonders auch im Vergleich zur Gegenseite. Während die drei Frakturen der Mittellinie in der CT alle korrekt diagnostiziert wurden, gelang dies an den Schilden nur mit Korrelationen von  $r = 0,521$  und  $r = 0,555$  ( $p < 0,001$ ).



**Abbildung 37:** CT des Zungenbeins im Knochenfenster, axiale Schichtführung: Dislozierte Frakturen der großen Zungenbeinhörner okzipital rechts (oben), links (unten)

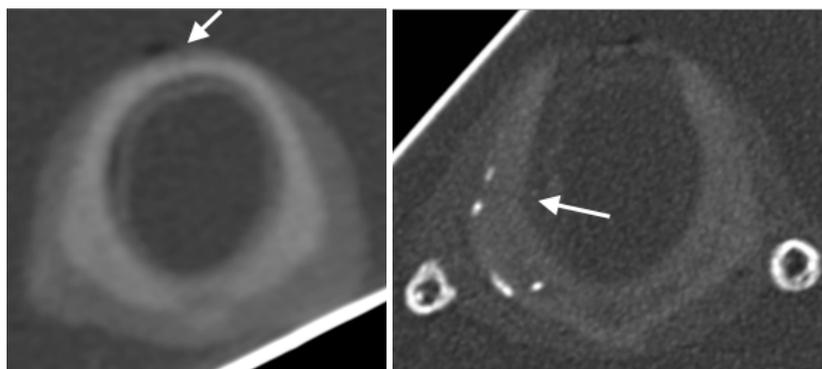
=  $0,521$  und  $r = 0,555$  ( $p < 0,001$ ). Schwierigkeiten stellten dabei insbesondere Fissuren in noch unverknöcherten Bereichen der Schildknorpelplatten dar.

Am Zungenbein wurden die Frakturen der okzipitalen Bereiche der großen Hörner mit Korrelationen von  $r = 0,808$  und  $r = 0,771$  ( $p < 0,001$ ) am besten erkannt. In diesen Bereichen waren ähnlich wie bei den Schildknorpelhörnern vornehmlich dislozierte Frakturen vorhanden, die wiederum durch die Fragmentdislokation gut abgrenzbar waren (Abb. 37). Die Ergebnisse der proximalen

Anteile der großen Hörner waren mit  $r = 0,723$  ( $p < 0,001$ ) rechts und  $r = 0,333$  ( $p = 0,014$ ) links verschieden. Eine mögliche Schwierigkeit liegt in der Abgrenzung einer potenziellen Fraktur von der Fusionszone zwischen großen Hörnern und Corpus, die sich je nach Verknöcherungsgrad ähnlich einer Verletzung darstellen kann. Am Zungenbeincorpus schließlich ergab sich eine für das Zungenbein unterdurchschnittliche Korrelation von  $r = 0,577$  ( $p < 0,001$ ), wobei möglicherweise das Erkennen besonders von Fissuren, aber auch von kompletten Frakturen durch die oft raue und unregelmäßige Struktur und Oberfläche des Zungenbeins erschwert ist.

Die Verletzungen des Ringknorpels waren verhältnismäßig schwer zu diagnostizieren ( $r = 0,475$ ,  $p < 0,001$ ). Dabei spielt die vergleichsweise größere Anzahl an Fissuren im Gegensatz zu kompletten Frakturen eine Rolle. In 13 der 18 Fälle mit Ringknorpelverletzungen traten eine oder mehrere Fissuren auf. Zudem waren diese besonders in noch knorpeligen Bereichen schlecht zu erkennen und blieben daher häufiger unentdeckt (Abb. 38).

Insgesamt wurden selten falsch positive Befunde im CT erzeugt. Nur in zwei Fällen wurde ein Kehlkopfbestandteil für verletzt gehalten, obwohl laut den Ergebnissen der



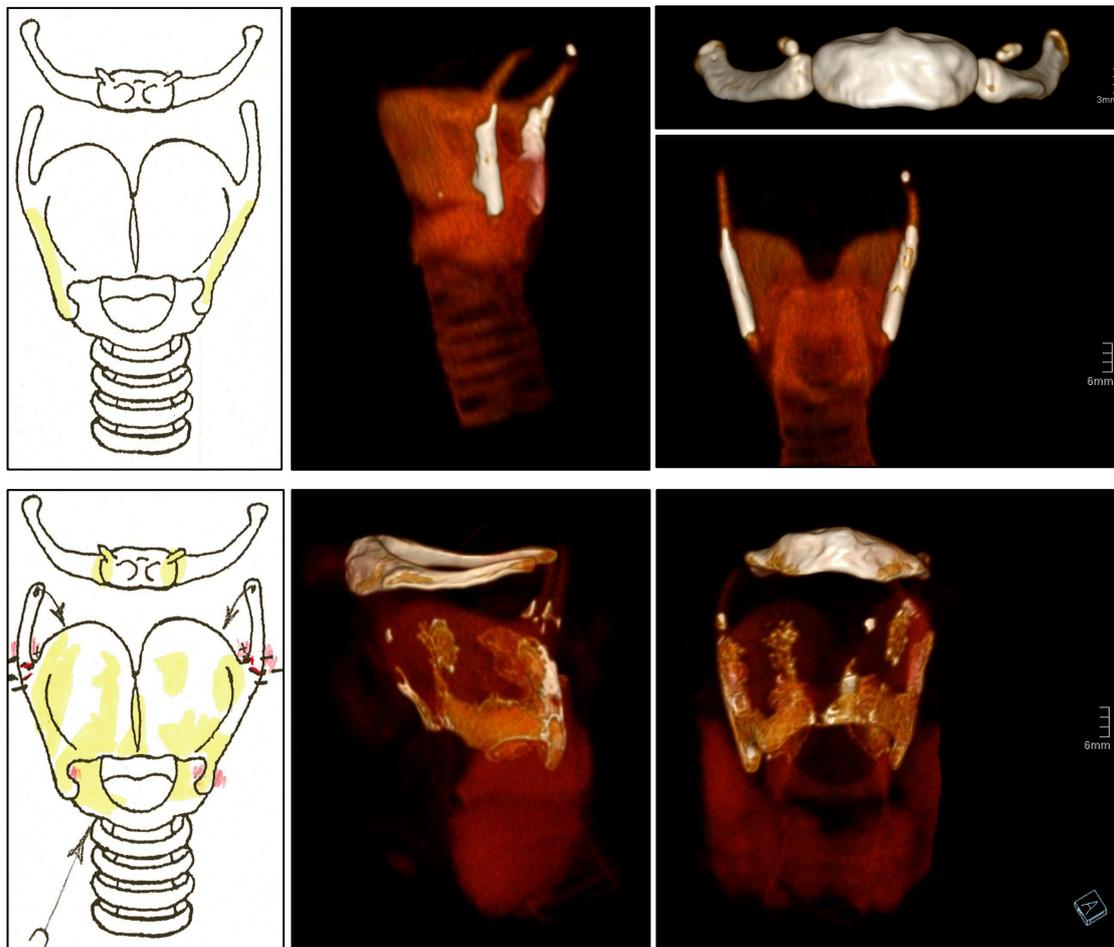
**Abbildung 38:** CT des Ringknorpels im Knochenfenster, axiale Schichtführung; links: diskrete Fissur im Bereich der rostralen Mittellinie bei fehlender Verknöcherung erschwert abgrenzbar; rechts: Fissur seitlich rechts

Feinpräparation keine Verletzung vorlag. Es wären einige Quellen falsch positiver Befunde denkbar gewesen. Beispielsweise könnte ein Cartilago triticea für ein Frakturfragment gehalten oder eine verdächtige Knorpel-Knochen-Grenze im Bereich von Verknöcherungszonen mit einer Frakturlinie verwechselt werden. Dennoch konnten falsch positive Befunde gering gehalten werden. Falsch negative Befunde dagegen waren häufiger. Dabei ergab die computertomographische Diagnose sowohl für das Zungenbein als auch für den Schildknorpel in jeweils 6 Fällen keine Fissur bzw. Fraktur, obwohl eine solche im Präparat vorhanden war. Beim Ringknorpel war dies mit 13 Fällen sogar noch häufiger. Letzters ergibt sich v. a. aus dem bereits oben beschriebenen großen Anteil von Fissuren in nicht-verknöcherten Arealen (unerkannte

Fissuren in 11 Fällen unerkannte Frakturen in 2 Fällen), die aufgrund dessen schwerer zu erkennen sind.

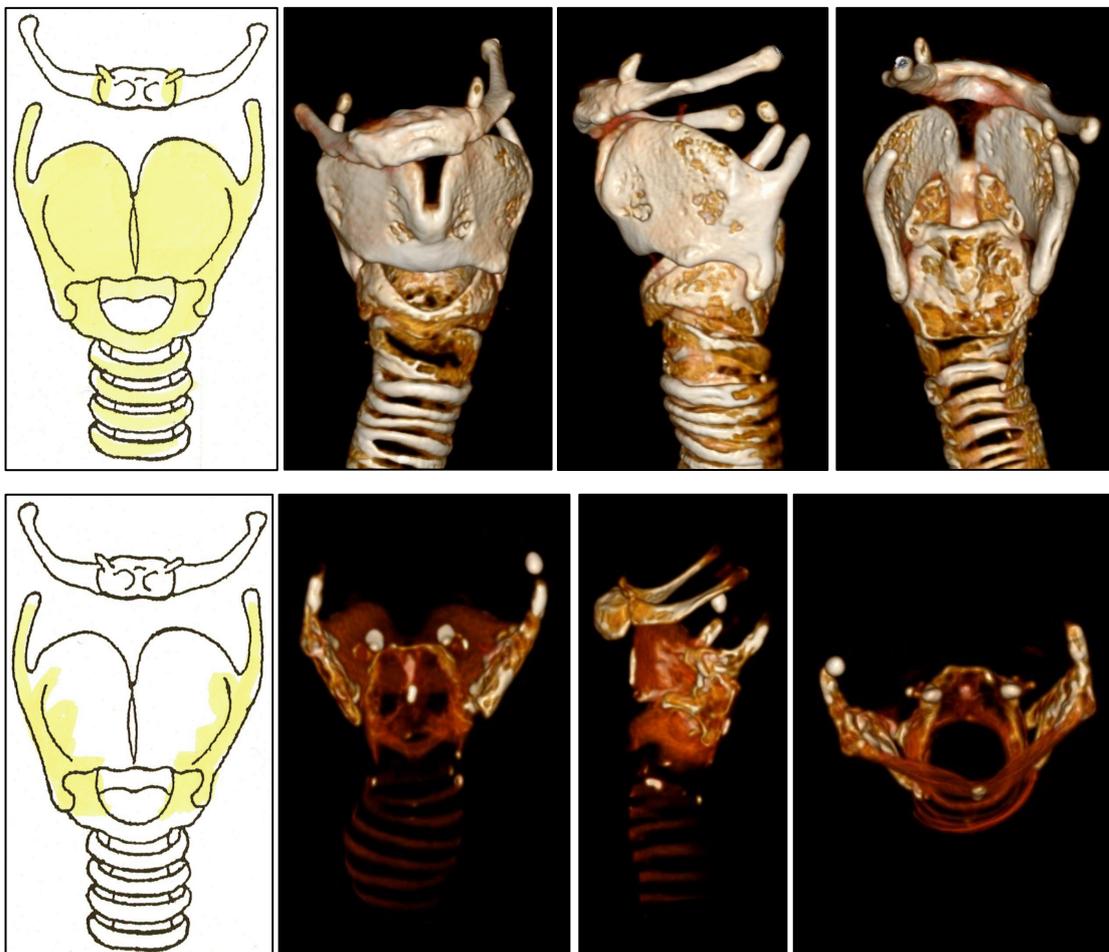
### 6.1.6 Zusammenhang zwischen Verknöcherung und Alter

Es konnte wie in der Literatur beschrieben auch in diesem Kollektiv über alle Bestandteile des Kehlkopfes hinweg ein Zusammenhang zwischen der Verknöcherung mit dem Alter gezeigt werden [60, 62, 76, 91, 93]. Doch auch in dieser Studie fanden sich einige Ausnahmen, die dem regelhaften Ablauf einer altersabhängigen Verknöcherung widersprachen (Abb. 39 und 40).



**Abbildung 39:** Dokumentation der Feinpräparationsergebnisse (links), wobei die gelb gekennzeichneten Bereiche den Verknöcherungsarealen entsprechen, sowie 3D-Rekonstruktionen aus CT-Datensätzen oben in der Ansicht von posterolateral und posterior, das Zungenbein von anterior, unten von lateral und anterior; oben: 25 Jahre, initiale Ossifikationszeichen im Bereich der dorsalen Schildknorpelplatten und unteren Hörnern; das Zungenbein lag hier separat vor und wurde getrennt rekonstruiert, es war keine knöcherne Verbindung zwischen Corpus und großen Hörnern nachzuweisen; unten: 26 Jahre, fortgeschrittene Ossifikation des Schildknorpels sowie vollständige knöcherne Fusion des Zungenbeincorpus mit den großen Hörnern

Abbildung 39 zeigt zwei etwa gleichaltrige Fälle mit 25 bzw. 26 Jahren zum Todeszeitpunkt. Während der Kehlkopf rechts bereits eine fortgeschrittene Verknöcherung aufweist, sind links zunächst nur kleine Ossifikationsbereiche abzugrenzen. In Abbildung 40 dagegen zeigen sich zwei Fälle höheren Alters (durchschnittliches Alter 79 Jahre), die deutlich verschiedene Verknöcherungsstufen aufweisen, obwohl in beiden Fällen eine fortgeschrittene Verknöcherung zu erwarten wäre. Dies zeigt, dass auch bei geringem Alter schon zunehmende Verknöcherungsareale vorhanden sein können, aber auch bis ins hohe Alter große Areale unverknöchert verbleiben können.



**Abbildung 40: Dokumentation der Feinpräparationsergebnisse (links), wobei die gelb gekennzeichneten Bereiche den Verknöcherungsarealen entsprechen, sowie 3D-Rekonstruktionen aus den CT-Datensätzen oben in der Ansicht von anterior, lateral und posterior sowie unten in der Ansicht von posterior, lateral und kranial; zur besseren Übersicht wurde unten das Zungenbein in der 3D-Rekonstruktion ggf. entfernt; oben: 78 Jahre, vollständige Ossifikation des Schild- und Ringknorpels sowie knöcherne Fusion zwischen Zungenbeincorpus und großen Hörnern; unten: 80 Jahre, partielle Ossifikation des Ringknorpels sowie der dorsalen Anteile der Schildknorpelplatten und der Hörner, fehlende knöcherne Fusion zwischen Zungenbeincorpus und den großen Hörnern**

Betrachtet man die Bestandteile im Einzelnen, zeigte sich die größte Korrelation für den Ringknorpel. Es wird vermutet, dass mechanische Reize, wie sie z. B. an Muskelansatzstellen auftreten, die Verknöcherung des Knorpels verstärken können [93, 94]. Da der Ring- im Vergleich zum Schildknorpel Ansatzpunkt weniger Muskeln und Sehnen ist, läuft dort die Ossifikation möglicherweise einheitlicher und weniger komplex ab. Dies würde sowohl die Erstellung als auch die Einteilung in ein Verknöcherungsschema erleichtern und den Zusammenhang mit dem Alter ersichtlicher machen.

Der Schildknorpel weist dagegen bereits eine komplexere Form auf, ist Ansatzpunkt zahlreicher Bänder und Muskeln und außerdem häufiger von Normvarianten betroffen, die vermutlich ebenso zu individuellen Unterschieden im Verknöcherungsablauf führen können. Durch den komplexeren Ossifikationsvorgang des Schildknorpels (Abb. 15) und den vermuteten Einfluss der genannten zusätzlichen Faktoren gestaltete sich die Zuordnung zu einer Verknöcherungsstufe bisweilen schwieriger. Dennoch ergaben sich Korrelationen von  $r = 0,606$ ,  $p < 0,001$  (CT) bzw.  $p = 0,568$ ;  $p < 0,001$  (Feinpräparation) für den Zusammenhang mit dem Alter.

Ähnliche Ergebnisse lagen bei der Fusion der großen Zungenbeinhörner mit dem Corpus vor. Hier wurde nur eine dreistufige Einteilung vorgenommen, wodurch die Altersabstufung möglicherweise nicht ausreichend war. Zudem stellt die Verknöcherungsstufe II (teilweise oder einseitige Fusion) nicht unbedingt die Zwischenstufe zwischen I und III dar, da auf eine einseitige Verknöcherung nicht zwangsläufig die der anderen Seite folgen muss [88]. Daher wurde zusätzlich eine vierstufige Einteilung anhand des in den CT-Bildern gemessenen Abstandes von Corpus zu großen Hörnern erstellt. Diese ergab allerdings nur eine Korrelation von  $r = 0,488$  ( $p < 0,001$ ) mit dem Alter. Möglicherweise könnten durch Modifizieren der Skala wie z. B. durch eine feinere Aufgliederung der Werte  $< 1\text{mm}$  größere Korrelationen erzielt werden. Die Untersuchung der Fusion der kleinen Hörner mit dem Zungenbeincorpus bzw. der großen Hörner zeigte kein signifikantes Ergebnis, vermutlich da diese sehr variabel in Form und Position ausgeprägt sein können und daher auch in der Ossifikation unterschiedlichen Mustern folgen. Deshalb ist zur Alterseinschätzung anhand des Zungenbeins am ehesten die Fusion der großen Hörner mit dem Corpus geeignet. Sie sollte allerdings nicht als einziger Anhaltspunkt verwendet werden wie auch schon mehrfach beschrieben [81, 88, 90].

Da die jeweiligen Einzelbestandteile durchaus einen Zusammenhang mit dem Alter aufwiesen, wurde zusätzlich nach dem Vorbild von de la Grandmaison et al. anhand einer Summe der Verknöcherungsstufen der Zusammenhang geprüft [62]. Da hierfür der gesamte Ossifikationszustand des Komplexes aus Zungenbein, Schild- und Ringknorpel berücksichtigt wurde, konnten damit Ausreißer in einem der Bestandteile besser ausgeglichen werden. Daraus ergaben sich schließlich auch mit  $r = 0,702$ ;  $p < 0,001$  (CT) bzw.  $r = 0,735$ ;  $p < 0,001$  (Feinpräparation) die höchsten Korrelationen. Daher sollte man sich für eine Alterseinschätzung anhand des Kehlkopfes nicht auf einen einzelnen Teil beschränken. Zusätzlich wäre auch die Beurteilung der Verknöcherung der Aryknorpel möglich [60].

Hinsichtlich der Methode zur Bestimmung des Verknöcherungsgrades ergaben die Werte der CT und der Feinpräparation kaum Unterschiede. Obwohl ein zusätzlicher Informationsgewinn in der CT vermutet werden könnte, da diese nicht nur die Oberfläche sondern auch das „Knorpelinnere“ und betrachtet, ergab sich eine hohe Übereinstimmung der Werte mit Korrelationen von  $r \geq 0,811$ ;  $p < 0,001$ .

Wie auch schon de la Grandmaison et al. festgestellt hatten, fiel über alle Korrelationsergebnisse hinweg ein Unterschied zwischen den Ergebnissen der männlichen und weiblichen Kehlköpfe auf, obwohl für Schild- und Ringknorpel geschlechtsspezifisch Schemata vorlagen und verwendet wurden [62]. Bei den Männern wurden für alle Bereiche ein größerer Zusammenhang der Verknöcherung mit dem Alter festgestellt, sodass sich für die Summe der Verknöcherungsstufen sogar Korrelationen von  $r = 0,819$ ;  $p < 0,001$  (CT) bzw.  $r = 0,873$ ;  $p < 0,001$  (Feinpräparation) ergaben, bei den Frauen dagegen nur  $r = 0,540$ ;  $p = 0,012$  (CT) bzw.  $r = 0,535$ ;  $p = 0,012$  (Feinpräparation). Als Ursache dieses geschlechtsspezifischen Unterschieds werden hormonelle Ursachen vermutet [93]. Da in den Chondrozyten des Schildknorpels Androgenrezeptoren allerdings keine Östrogen- oder Progesteronrezeptoren gefunden wurden, geht man von einem Einfluss von Androgenen auf die Verknöcherung des Schildknorpels aus [93, 113].

Insgesamt betrachtet zeigte sich in diesem Kollektiv damit vor allem für Männer ein starker Zusammenhang der Verknöcherung des Zungenbein-Kehlkopfkomplexes mit dem Alter, welcher besonders als Summe der einzelnen Bestandteile durchaus als Werkzeug einer groben Alterseinschätzung dienen kann. Für das Zuordnen

entsprechender Altersspannen zu den Verknöcherungsgraden wäre allerdings ein größeres Kollektiv als dieses nötig.

## 6.2 Stärken und Schwächen der Methoden

### 6.2.1 Feinpräparation

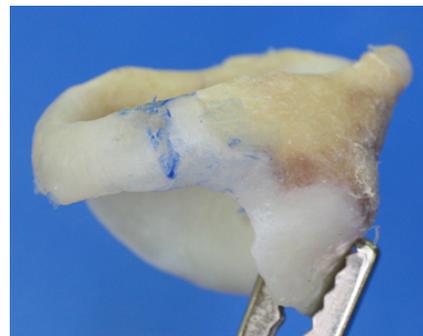


**Abbildung 42: Kehlhopfpräparat vor Feinpräparation: Einblutungen in die Epiglottis sowie im Bereich der frakturierten oberen Schildknorpelhörner**

Die als Referenzmethode verwendete Feinpräparation entspricht aktuell dem Goldstandard für die Untersuchung postmortaler Kehlkopfverletzungen [4, 16]. Anhand dieser Untersuchung können bereits ohne Beurteilung des Knorpels Hinweise auf eine Gewalteinwirkung sichtbar werden, z. B. in Form von Weichteileinblutungen (Abb. 41). Somit können auch kleine Verletzungen, die sonst schwer oder gar nicht zu erkennen wären, aufgedeckt werden. Außerdem sind auch petechiale Einblutungen in die Schleimhaut, die auf eine Halskompression zu Lebzeiten hindeuten, zu sehen, während sie in der CT besonders im Formalin-fixierten Gewebe nicht darstellbar sind. Insgesamt ist für die Beurteilung der Weichteile die Feinpräparation die exaktere Methode. Was die Untersuchung der Kehlkopfknorpel an sich angeht, ist die Beurteilung im Vergleich zur computertomographischen Untersuchung unabhängig vom Verknöcherungsgrad möglich. Weiterhin stehen zusätzliche Möglichkeiten wie der Einsatz von Tusche zur Fissur- bzw. Frakturliniendarstellung zur Verfügung (Abb. 42), um bis auf mikroskopische Ebene auch minimale Läsionen zu erfassen. Mithilfe dieser Techniken und durch die genaue Beurteilung unter dem Stereomikroskop entgehen dieser Methode praktisch keine Verletzungen. Allerdings benötigt diese präzise Untersuchung mit einer Dauer von circa

3-5 Stunden viel Zeit. Zudem ist die Präparation eine handwerklich anspruchsvolle Tätigkeit, deren adäquate Durchführung sehr viel Feingefühl und Expertise erfordert sowie eine entsprechende Erfahrung in der Interpretation der Präparationsergebnisse voraussetzt. Daher ist es derzeit eine Ausnahme, dass die vollständige Feinpräparation regelmäßig durchgeführt wird. Weiterhin können während der Präparation und v. a. im

Abbildung 41: Präparat eines Ringknorpels nach Feinpräparation: Fissurdarstellung mithilfe von blauer Tinte



**Abbildung 41: Präparat eines Ringknorpels nach Feinpräparation: Fissurdarstellung mithilfe von blauer Tinte**

Rahmen der Vorbereitung wie bei der Entnahme des Kehlkopfes aus der Leiche, iatrogen Verletzungen erzeugt werden, welche die Diagnostik erschweren.

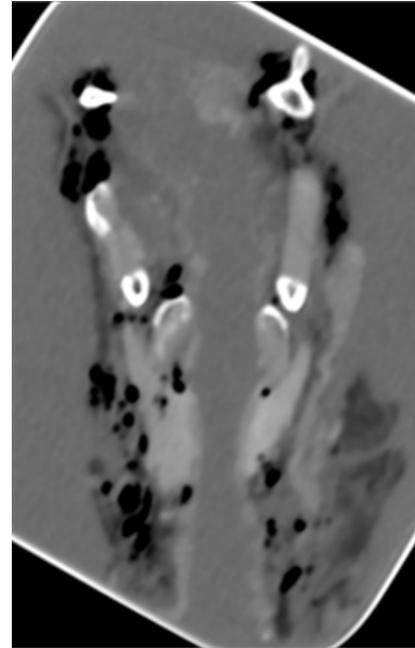
### 6.2.2 PMCT

Auch bei der computertomographischen Diagnostik zeigten sich Schwierigkeiten. Wurde das Zungenbein im Rahmen der Präparation vom restlichen Kehlkopf getrennt, musste ein zusätzlicher Arbeitsschritt mit separater orthograder Ausrichtung des Zungenbeins erfolgen, um gleiche Voraussetzungen zu schaffen. Im Gegensatz zur feinpräparatorischen Untersuchung war außerdem die Beurteilung des Weichgewebes nicht möglich und damit Einblutungen in das den Knorpel umgebende Gewebe nicht festzustellen. Damit fällt ein hilfreicher Hinweis auf mögliche Verletzungen weg. Weiterhin wurde die Diagnostik durch Fäulnis des Präparats erschwert (Abb. 43). Letztere beeinträchtigte allerdings ebenso die Feinpräparation.

Was aber vor allem in der CT eine Schwierigkeit darstellte, war das Beurteilen von schwach verknöcherten bis komplett knorpeligen Kehlköpfen

(Abb. 38). Dabei kam vermehrt das Weichteilfenster zum Einsatz, um den Knorpel besser beurteilen zu können. Dennoch gestaltete sich die Abgrenzung von möglichen Frakturlinien und besonders von Fissuren schwierig.

Trotz dieser Herausforderungen zeigten sich große Vorteile dieser Methode. Zum einen war der Zeitaufwand im Vergleich zur Präparation deutlich geringer. Mit einer durchschnittlichen Dauer von  $28,9 \pm 4,1$  min für die drei Arbeitsschritte der Erstellung der CT-Aufnahme, der Bildaufarbeitung und letztendlich der Beurteilung und Diagnosestellung ergibt dies eine sehr deutliche Zeitersparnis im Gegensatz zur Feinpräparation. Zwar ist für die Beurteilung der CT-Bilder eine genaue Kenntnis der Kehlkopfanatomie und ihrer möglichen Normvarianten nötig, allerdings bedarf es keiner zusätzlichen handwerklichen Fähigkeiten wie sie für die anspruchsvolle Präparation nötig sind. Ein weiterer wichtiger v. a. forensischer Aspekt ist die



**Abbildung 43: CT des Kehlkopfes in koronarer Rekonstruktion im Weichteilfenster, umgeben von Formalinflüssigkeit begrenzt durch die Behälterwand: Zahlreiche, durch Fäulnis bedingte Luftblasen, die die Kehlkopfknorpel und das Zungenbein umgeben**

Möglichkeit der Reevaluation der Bilder. Diese können gespeichert und bei Bedarf jederzeit – auch nach Bestattung des Leichnams – wieder abgerufen und erneut beurteilt werden, wenn neue Fragestellungen entstehen. Demgegenüber kann nach Präparation z. B. nicht mehr festgestellt werden, ob eine Verletzung durch die Präparation selbst entstanden ist oder bereits zuvor vorhanden war. Derartige Verletzungen können bei der CT-Diagnostik nur im Rahmen der Entnahme des Kehlkopfes aus der Leiche, nicht jedoch durch die Untersuchung selbst entstehen, was das Risiko iatrogenen Artefakte verringert.

Was die Verletzungsdiagnostik an sich angeht, zeigte sich die CT als sehr effektiv hinsichtlich der entscheidenden Verletzungen, wie Frakturen der oberen Schildknorpelhörner oder der großen Zungenbeinhörner. So wurden falsch negative Befunde größtenteils nur bei der Diagnostik von Fissuren erzeugt, die nur mittels Feinpräparation, insbesondere auf mikroskopischer Ebene, detektiert werden konnten. Sehr zuverlässig erwies sich die CT-Diagnostik hinsichtlich positiver Befunde. In nur zwei Fällen war ein Kehlkopf fälschlicherweise für verletzt gehalten worden. Damit ist die CT-Untersuchung eine Methode, die bei Diagnose einer Verletzung eine schnelle Bestätigung einer stattgehabten Gewalt- oder Krafteinwirkung bei einer Spezifität von 90% liefert. Ein negativer Befund sollte dagegen bei hochgradigem Verdacht auf Gewalteinwirkung gegen den Hals in jedem Fall durch eine Feinpräparation bestätigt werden [50]. Insgesamt können anhand der CT trotz einiger Einschränkungen die relevanten Verletzungen erkannt werden, wobei zusätzlich die Möglichkeit der Reevaluation besteht. Besonders an rechtsmedizinischen Institutionen ohne entsprechende Expertise in der Feinpräparation des Kehlkopfes wäre sicherlich eine erhöhte diagnostische Genauigkeit durch den ergänzenden CT-Einsatz zu erwarten. Denn die „gängige Sektionstechnik des Kehlkopfes ist nicht geeignet, solche Befunde darzustellen“ [16] wie sie bei Todesfällen durch Halskompression entstehen können [16]. Um in diesen Fällen mögliche Verletzungen durch die alleinige makroskopische Untersuchung nicht zu verpassen, stellt die PMCT eine schnelle und effektive Option dar, mögliche Verletzungen nachzuweisen. Für den sicheren Ausschluss von Verletzungen des Zungenbeins oder der Kehlkopfknorpel oder den Fissurnachweis ist die Feinpräparation allerdings überlegen.

### 6.3 Forensische und klinische Anwendungsmöglichkeiten

Nachdem anhand dieses Kollektivs gezeigt werden konnte, dass die Diagnostik von Larynxverletzungen in der Computertomographie möglich und überwiegend erfolgreich ist, könnte man entsprechend die diagnostische Genauigkeit der üblichen Ganzkörper-PMCT-Untersuchungen prüfen, die zunehmend ergänzend zur Obduktion durchgeführt werden. Fraglich wäre allerdings, ob hierfür die Auflösung bei einem deutlich größeren FOV ausreichend wäre, um den verhältnismäßig kleinen Kehlkopfkomplex adäquat beurteilen bzw. Frakturen abgrenzen zu können. Eine ergänzende kurzstreckige Untersuchungsspirale mit kleinstmöglichem Scan-FOV und dünn-schichtigen Rekonstruktionen könnten hier hilfreich sein, um eine verbesserte Auflösung und Beurteilbarkeit zu gewährleisten. Außerdem muss bei der Untersuchung auf Artefaktquellen wie zum Todeszeitpunkt getragenen Schmuck im Halsbereich, von außen eingebrachte Fremdmaterialien, wie Messer, oder ein post mortem belassener Beatmungstubus geachtet werden. Denn derartige Artefakte in diesem Bereich können die Beurteilung des Kehlkopfes unmöglich machen. Kempter et al. konnten in acht Fällen von Strangulation bereits sehr gute Ergebnisse mittels der Ganzkörper-PMCT-Untersuchung erzielen [10]. Allerdings diente hier die Obduktion und nicht die Feinpräparation als Referenzmethode [10].

Außerdem kann das Wissen über häufige Verletzungsarten und -lokalisationen bei verletzten lebenden Patienten angewandt werden. Bei akutem Larynxtrauma ist die CT nach Sicherung der Atemwege die Bildgebung der Wahl, um Verletzungen und deren Ausmaß feststellen zu können [19, 114]. Die in dieser Studie gewählte Strahlendosis übersteigt allerdings mit einem mittleren CTDI von  $103,76 \pm 10,20$  mGy und einem DLP von  $1406,31 \pm 167,02$  mGy\*cm bei weitem die Dosis einer üblichen Hals-CT Untersuchung (CTDI: 15 mGy, DLP: 330 mGy\*cm) [115]. Mit einer effektiven Dosis von 7,60 mSv entspricht dies fast dem doppelten der durchschnittlichen jährlichen Dosis einer Person in Deutschland aus natürlichen und künstlichen Strahlenquellen [116]. Am lebenden Patientin ist allerdings auf die Strahlenbelastung zu achten, u. a. da sich mit der Schilddrüse eines der strahlenempfindlichsten Organe im Untersuchungsgebiet befindet. Außerdem gilt es zu beachten, dass sowohl das umgebende Weichgewebe als auch besonders die Halswirbelsäule Strahlung absorbieren und im Vergleich zur Untersuchung des isolierten Kehlkopfes zusätzlich die Bildqualität reduzieren. Zudem entstehen durch Atmen, Schlucken oder anderen Bewegungen des Patienten Artefakte, die die Diagnostik erschweren. Ein großer Vorteil

bei der Untersuchung lebender Patienten ist die Möglichkeit die Weichteile beurteilen und damit beispielsweise Einblutungen detektieren zu können. Dabei ist allerdings auf die Strahlenbelastung zu achten, was eine Einschränkung für die Beurteilung kleinerer Verletzungen darstellen kann.

## 7. ZUSAMMENFASSUNG

Die postmortale Computertomographie wurde anhand eines Kollektivs ( $n = 54$ ) mit dem Goldstandard für diese Fragestellung, der Feinpräparation, hinsichtlich der Diagnostik von Kehlkopfverletzungen verglichen [16]. Das Kollektiv zeigte ein ausgeglichenes Geschlechterverhältnis (38,9% weibliche, 61,1% männliche Leichen) mit einem durchschnittliches Alter von 53 Jahren zum Todeszeitpunkt. Es wurden 34 Leichen mit Kehlkopfverletzungen sowie 20 ohne feinpräparatorischen Befund untersucht, um falsch positive sowie negative Befunde der CT-Diagnostik zu erfassen.

Um Ursachen möglicher falsch positiver Befunde einzugrenzen oder diese im Nachhinein verifizieren zu können, wurde das Kollektiv auf Normvarianten untersucht. Dabei waren in 38,9 % ein- oder beidseitige Cartilagine triticeae zu finden gewesen. Trotz potentieller Verwechslungsgefahr mit einem Frakturfragment einer oberen Schildknorpelhornfraktur kam es nicht zu einer derartigen Fehldeutung. Das Foramen thyroideum, eine Anomalie im Bereich der Schildknorpelplatte, war mit 33,3% ähnlich häufig wie in der Literatur zu finden gewesen [72]. Des Weiteren waren seltenere Normvarianten wie das Fehlen eines Schildknorpelhorns in einem von 54 Fällen (1,8%) und die beidseitige Aplasie der kleinen Zungenbeinhörner in sechs von 54 Fällen (11,1%) aufgetreten.

Insgesamt wurde in 82,4% der Fälle in der CT korrekt erkannt, dass eine oder mehrere Verletzungen vorlagen. Insbesondere dislozierte Frakturen konnten dabei gut detektiert werden. Schwierigkeiten stellten vor allem unvollständige Frakturen im Sinne von Fissuren dar, besonders in knorpeligen Anteilen des Kehlkopfes. Allgemein waren Verletzungen im Knorpelgewebe trotz kombiniertem Einsatz von Knochen- und Weichteilfenster schwieriger abzugrenzen als in bereits verknöcherten Arealen. Da am Ringknorpel häufig nur eine beginnende oder teilweise Verknöcherung vorlag und außerdem vornehmlich Fissuren zu finden waren, wurden dort die meisten der falsch negativen CT-Befunde erzeugt. Es ergab sich nur eine Korrelation von  $r = 0,475$ ,  $p < 0,001$  für die Übereinstimmung der computertomographischen mit der feinpräparatorischen Verletzungsdiagnostik. Dagegen konnten Frakturen der oberen Schildknorpelhörner – eine typische Verletzungslokalisierung im Fall von Gewalt gegen den Hals – regelhaft erfolgreich diagnostiziert werden. Dies wurde häufig auch durch die Dislokation des Frakturfragments erleichtert. Dabei wurde für die Diagnostik von Schildknorpelverletzungen sogar eine Korrelation von  $r = 0,832$ ,  $p < 0,001$  erreicht.

Auch die Verletzungen des Zungenbeins wurden mit  $r = 0,737$ ,  $p < 0,001$  zu großen Teilen erfolgreich erkannt. War der Kehlkopf dagegen unverletzt, konnte die computertomographische Diagnostik dies sogar in 90% der Fälle bestätigen. Damit stellt die CT-Untersuchung eine schnelle und unkomplizierte Alternative zur Feinpräparation dar, um die relevanten Verletzungen des Kehlkopfes zu erkennen und eine stattgehabte Gewalteinwirkung gegen den Hals zeitnah nachzuweisen. Ein sicherer Ausschluss, besonders kleinerer Verletzungen, scheint dagegen nur mittels der Feinpräparation möglich.

Außerdem wurden die Verknöcherung der Kehlkopfbestandteile und deren Zusammenhang mit dem Alter untersucht. Dabei war vor allem für die Summe der Verknöcherungsgrade der drei großen Kehlkopfbestandteile ein deutlicher Zusammenhang mit dem Alter mit einer Korrelation von  $r = 0,735$ ,  $p < 0,001$  in der Feinpräparation nachzuweisen. Demnach erscheint der Kehlkopf trotz Ausnahmen mit zunehmendem Alter einem fortschreitenden Verknöcherungsprozess zu unterliegen. In diesem Kollektiv zeigte sich der Zusammenhang deutlicher bei dem männlichen Anteil (Männer:  $r = 0,873$   $p < 0,001$ ; Frauen  $r = 0,535$   $p = 0,012$ ), was die Vermutung bestärkt, dass die Verknöcherung androgenabhängig abläuft [93, 113]. Zur Altersbestimmung erscheint der Verknöcherungsgrad des Kehlkopfes nur bedingt geeignet, da regelmäßig Ausnahmen vom altersabhängigen Ablauf der Verknöcherung zu finden sind, insbesondere beim weiblichen Geschlecht. Daher sollte über eine grobe Einschätzung hinaus keine Aussagen bezüglich des exakten Alters getroffen werden.

## 8. ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Präparate der Epiglottis (links) sowie der Kehlkopfschleimhaut (rechts), die jeweils multiple Einblutungen aufweisen .....	6
Abbildung 2: Schema des Kehlkopfskeletts .....	9
Abbildung 3: Anatomie des Zungenbeins (rechts: Präparat nach Feinpräparation) .....	10
Abbildung 4: Anatomie des Schildknorpels (rechts: Präparat nach Feinpräparation) ....	11
Abbildung 5: Anatomie des Ringknorpels (rechts: Präparat nach Feinpräparation) .....	12
Abbildung 6: Präparat eines Zungenbeins mit Parabel- (links) und Hyperbelform (Mitte) sowie Skizze eines Zungenbeins mit Hufeisenform (rechts) .....	15
Abbildung 7: 3D-Rekonstruktionen aus dem CT-Datensatz zweier Zungenbeine, Ansicht von anterior, rechts mit geringer Kippung nach kaudal: Beide Zungenbeine zeigen einen nach kranial gerichteten, mittig am Corpus lokalisierten Knochenvorsprung im Sinne einer vollständig ausgeprägten Lingula.....	15
Abbildung 8: 3D-Rekonstruktionen aus dem CT-Datensatz eines Kehlkopfes, links wurde das Zungenbein zur verbesserten Übersicht entfernt; Ansicht von laterodorsal (links) sowie von anterior (rechts): Beidseits ausgebildeter Cartilago triticea kranial der oberen Schildknorpelhörner .....	16
Abbildung 9: Präparate zweier Schildknorpel nach Feinpräparation in der Ansicht von anterior (links) sowie von posterior (rechts): Agenesie des linken oberen Zungenbeinhorns (links); bilaterale Agenesie der oberen Zungenbeinhörner (rechts).....	17
Abbildung 10: Präparate zweier Schildknorpel nach Feinpräparation in der Ansicht von lateral des gekippten Schildknorpels (links) sowie von dorsolateral (rechts); <u>Rechts</u> : Foramen thyroideum in der linken Schildknorpelplatte; außerdem liegt eine mittige Fraktur des linken oberen Schildknorpelhorns sowie eine basisnahe, komplette Fraktur des rechten oberen Schildknorpelhorns vor; <u>Links</u> : Foramen thyroideum in der rechten Schildknorpelplatte; außerdem Aplasie des linken oberen Zungenbeinhornes .....	18

Abbildung 11: Zwei Zungenbeinpräparate nach Feinpräparation in der Ansicht von kranial und anterior; <u>Links</u> : knorpelige Verbindung des Zungenbeincorpus mit den großen Hörnern ohne knöcherne Fusion <u>Rechts</u> : vollständige knöcherne Fusion des Zungenbeincorpus mit den großen Hörnern.....	20
Abbildung 12: Kehlkopfpräparat vor Präparation in der Ansicht von posterior: Basisnahe umblutete Frakturen der beiden oberen Schildknorpelhörner.....	24
Abbildung 13: Holzstäbe und Besteck für die Präparation .....	28
Abbildung 14: Befestigung des Kehlkopfpräparates vor Präparation auf einem Holzstab .....	28
Abbildung 15: Präparat eines Ringknorpels nach Feinpräparation: Das Anfärben mittels blauer Tinte bringt einen feinen Riss im Ringknorpel zur Darstellung. ....	29
Abbildung 16: Orthograde Ausrichtung der Kehlköpfe mithilfe der Funktion „3D MPR“ .....	31
Abbildung 17: Aufteilung der Kehlkopf-bestandteile zur Frakturbeurteilung.....	33
Abbildung 18: Fusionsgrad des Zungenbeincorpus mit den Cornua maiora .....	36
Abbildung 19: Verknöcherungsgrade des Ringknorpels .....	36
Abbildung 20: Verknöcherungsgrade des Schildknorpels .....	36
Abbildung 21: Beteiligung des Halses im Rahmen der Todesursache .....	38
Abbildung 22: Faktoren mit Einfluss auf die Untersuchungsqualität .....	40
Abbildung 23: Verwendung des Knochen- und Weichteilfensters zur Beurteilung der Kehlkopfbestandteile.....	41
Abbildung 24: Normvarianten des Schildknorpels .....	42
Abbildung 25: Anzahl der Verletzungen an Zungenbein, Schild- und Ringknorpel .....	44
Abbildung 26: Balkendiagramm zur Verteilung der Zungenbeinfrakturen .....	45
Abbildung 27: Balkendiagramm zur Verteilung der Schildknorpelfrakturen.....	46

Abbildung 28: Balkendiagramm zur Verteilung der Ringknorpelfrakturen .....	47
Abbildung 29: Boxplots der jeweiligen Verknöcherungsgrade bezogen auf das Alter und Median in CT (links) und Feinpräparation (rechts) .....	59
Abbildung 30: Altersverteilung des Kollektivs.....	62
Abbildung 31: 3D Rekonstruktionen aus dem CT-Datensatz eines Schildknorpels in der Ansicht von anterior (oben) sowie von anterolateral: Agenesie des linken, oberen Schildknorpelhorns .....	63
Abbildung 32: <u>links</u> : Übersicht der Verletzungen im Dokumentationsschema der Feinpräparation in der Ansicht von anterior; <u>Mitte</u> : Präparat des Zungenbeins, Schild- und Ringknorpels nach Feinpräparation; <u>rechts</u> : 3D-Rekonstruktionen aus den CT-Datensätzen des Zungenbeines von anterior (oben) sowie des gesamten Kehlkopfpaketes mit angrenzenden Trachealspangen in der Ansicht von posterolateral; Fall von Erdrosseln mit basisnahen Frakturen der beiden oberen Schildknorpelhörner jeweils mit Dislokation der Hörner nach anterior, einer okzipital gelegenen, nach lateral dislozierten Fraktur des linken großen Zungenbeinhorns sowie einer nicht dislozierten Fraktur des rechten großen Zungenbeinhorns okzipital.....	65
Abbildung 34: CT des Zungenbeins im Knochenfenster, axiale Schichtführung: Dislozierte Fraktur des Zungenbeincorpus im Rahmen eines Verkehrsunfalls .....	66
Abbildung 33: CT des Schildknorpels im Knochenfenster, axiale Schichtführung: Fraktur der rechten Schildknorpelplatte.....	66
Abbildung 35: CT des Ringknorpels im Knochenfenster, axiale Schichtführung: Dislozierte Fraktur des Ringknorpels.....	67
Abbildung 36: CT der oberen Schildknorpelhörner im Knochenfenster (links und Mitte in koronarer Rekonstruktion, rechts in sagittaler Rekonstruktion): Geringfügig dislozierte, basisnahe Frakturen des oberen Schildknorpelhorns (links und rechts) sowie vollständig dislozierte Fraktur des linken oberen Schildknorpelhorns im mittleren Drittel (Mitte).....	68

Abbildung 37: CT des Zungenbeins im Knochenfenster, axiale Schichtführung: Dislozierte Frakturen der großen Zungenbein-hörner okzipital rechts (oben), links (unten) .....	68
Abbildung 38: CT des Ringknorpels im Knochenfenster, axiale Schichtführung; <u>links</u> : diskrete Fissur im Bereich der rostralen Mittellinie bei fehlender Verknöcherung erschwert abgrenzbar; <u>rechts</u> : Fissur seitlich rechts .....	69
Abbildung 39: Dokumentation der Feinpräparationsergebnisse (links), wobei die gelb gekennzeichneten Bereiche den Verknöcherungsarealen entsprechen, sowie 3D- Rekonstruktionen aus CT-Datensätzen oben in der Ansicht von posterolateral und posterior, das Zungenbein von anterior, unten von lateral und anterior; <u>oben</u> : 25 Jahre, initiale Ossifikationszeichen im Bereich der dorsalen Schildknorpelplatten und unteren Hörnern; das Zungenbein lag hier separat vor und wurde getrennt rekonstruiert, es war keine knöcherne Verbindung zwischen Corpus und großen Hörnern nachzuweisen; <u>unten</u> : 26 Jahre, fortgeschrittene Ossifikation des Schildknorpels sowie vollständige knöcherne Fusion des Zungenbeincorpus mit den großen Hörnern.....	70
Abbildung 40: Dokumentation der Feinpräparationsergebnisse (links), wobei die gelb gekennzeichneten Bereiche den Verknöcherungsarealen entsprechen, sowie 3D- Rekonstruktionen aus den CT-Datensätzen oben in der Ansicht von anterior, lateral und posterior sowie unten in der Ansicht von posterior, lateral und kranial; zur besseren Übersicht wurde unten das Zungenbein in der 3D-Rekonstruktion ggf. entfernt; <u>oben</u> : 78 Jahre, vollständige Ossifikation des Schild- und Ringknorpels sowie knöcherne Fusion zwischen Zungenbeincorpus und großen Hörnern; <u>unten</u> : 80 Jahre, partielle Ossifikation des Ringknorpels sowie der dorsalen Anteile der Schildknorpelplatten und der Hörner, fehlende knöcherne Fusion zwischen Zungenbeincorpus und den großen Hörnern.....	71
Abbildung 42: Präparat eines Ringknorpels nach Feinpräparation: Fissurdarstellung mithilfe von blauer Tinte.....	75
Abbildung 41: Kehlkopfpräparat vor Feinpräparation: Einblutungen in die Epiglottis sowie im Bereich der frakturierten oberen Schildknorpelhörner .....	75
Abbildung 43: CT des Kehlkopfes in koronarer Rekonstruktion im Weichteilfenster, umgeben von Formalinflüssigkeit begrenzt durch die Behälterwand: Zahlreiche,	

durch Fäulnis bedingte Luftblasen, die die Kehlkopfknorpel und das Zungenbein  
umgeben ..... 76

## 9. TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Skala zur Beurteilung der Bildqualität.....	32
Tabelle 2: Einteilung der Frakturen .....	33
Tabelle 3: Verknöcherungsstadien von Zungenbein, Schildknorpel und Ringknorpel ..	34
Tabelle 4: Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung zu Alter, Gewicht, Größe und BMI .....	38
Tabelle 5: Todesursachen und deren Häufigkeiten .....	39
Tabelle 6: Mittelwerte und Standardabweichung der Bildqualität.....	41
Tabelle 7: Häufigkeit der Normvarianten „Foramen thyroideum“ (F. thyroideum) und Cartilago triticea“ (C. triticea).....	42
Tabelle 8: Übersicht der Zungenbeinfrakturen .....	45
Tabelle 9: Frakturgrad und -lokalisierung am Zungenbein.....	45
Tabelle 10: Übersicht der Schildknorpelfrakturen.....	46
Tabelle 11: Frakturgrad und -lokalisierung am Schildknorpel.....	47
Tabelle 12: Übersicht der Ringknorpelfrakturen .....	47
Tabelle 13: Frakturgrad und -lokalisierung am Ringknorpel .....	48
Tabelle 14: Nicht parametrische Korrelation nach Spearman der Zungenbeinverletzungen in CT und Feinpräparation.....	48
Tabelle 15: Nicht parametrische Korrelation nach Spearman der Schildknorpelverletzungen in CT und Feinpräparation .....	49
Tabelle 16: nicht parametrische Korrelation nach Spearman der Ringknorpelverletzungen in CT und Feinpräparation.....	49
Tabelle 17: Vierfeldertafel der diagnostizierten Verletzungen in CT und Feinpräparation fallbezogen .....	50
Tabelle 18: Vierfeldertafeln der einzelnen Kehlkopfbestandteile hinsichtlich der Diagnose von Verletzungen in CT und Feinpräparation.....	51
Tabelle 19: Sensitivität, Spezifität, positiv und negativ prädiktiver Wert der CT- Diagnostik .....	52
Tabelle 20: Verteilung des Verknöcherungsgrades des Zungenbeins im Kollektiv; .....	53
Tabelle 21: Abstand zwischen Corpus und den großen Hörnern des Zungenbeins.....	54
Tabelle 22: Fusionsgrad der kleinen Zungenbeinhörner .....	54
Tabelle 23: Verteilung des Verknöcherungsgrades des Schildknorpels im Kollektiv;...	55

Tabelle 24: Verteilung des Verknöcherungsgrades des Ringknorpels im Kollektiv; .....	56
Tabelle 25: nicht parametrische Korrelation nach Spearman der CT und Feinpräparation bezüglich des Fusions- bzw. Verknöcherungsgrad .....	56
Tabelle 26: Nicht parametrische Korrelation nach Spearman der Zungenbeinverknöcherung und des Alters.....	57
Tabelle 27: Nicht parametrische Korrelation nach Spearman der Schilddrüsenknorpelverknöcherung und des Alters .....	57
Tabelle 28: Nicht parametrische Korrelation nach Spearman der Ringknorpelverknöcherung und des Alters.....	58
Tabelle 29: Nicht parametrische Korrelation nach Spearman der Summe der Verknöcherungsgrade und des Verknöcherungsgrade .....	58
Tabelle 30: Mittelwerte des DLP und des CTDI der CT-Untersuchungen des Larynx..	61

## 10. LITERATURVERZEICHNIS

1. ER, H.v., *Zur Kenntnis der Entstehungsarten von Kehlkopffrakturen*. Wiener Medizinische Wochenschrift, 1886. **44**: p. 1466-70.
2. Dunsby, A.M. and A.M. Davison, *Causes of laryngeal cartilage and hyoid bone fractures found at postmortem*. Med Sci Law, 2011. **51**(2): p. 109-13.
3. Azmak, D., *Asphyxial deaths: a retrospective study and review of the literature*. Am J Forensic Med Pathol, 2006. **27**(2): p. 134-44.
4. Khokhlov, V.D., *Trauma to the hyoid bone and laryngeal cartilages in hanging: review of forensic research series since 1856*. Leg Med (Tokyo), 2015. **17**(1): p. 17-23.
5. Uzun, I., Y. Buyuk, and K. Gurpinar, *Suicidal hanging: fatalities in Istanbul retrospective analysis of 761 autopsy cases*. J Forensic Leg Med, 2007. **14**(7): p. 406-9.
6. Moschkau, N., *Erhebung, Aufarbeitung und Auswertung der Sektionsdaten des Instituts für Rechtsmedizin der Universität München aus dem Jahr 2003*. 2013, LMU München.
7. *Sterbefälle*. 29.01.2017]; Available from: <http://www.gbe-bund.de/gbe10/i?i=670:22303456D>.
8. R. B. Dettmeyer, H.F.S., M. A. Verhoff, *Forensische Traumatologie in Rechtsmedizin*, H.F.S. R. B. Dettmeyer, M. A. Verhoff, Editor. 2014, Springer: Berlin; Heidelberg. p. 80-90.
9. Maxeiner, H. and B. Bockholdt, *Homicidal and suicidal ligature strangulation-- a comparison of the post-mortem findings*. Forensic Sci Int, 2003. **137**(1): p. 60-6.
10. Kempter, M., et al., *Post-mortem imaging of laryngo-hyoid fractures in strangulation incidents: first results*. Leg Med (Tokyo), 2009. **11**(6): p. 267-71.
11. Maiese, A., et al., *When the hidden features become evident: the usefulness of PMCT in a strangulation-related death*. Leg Med (Tokyo), 2014. **16**(6): p. 364-6.
12. Betz, P. and W. Eisenmenger, *Frequency of throat-skeleton fractures in hanging*. Am J Forensic Med Pathol, 1996. **17**(3): p. 191-3.
13. Clement, R., J.P. Guay, and A. Sauvageau, *Fracture of the neck structures in suicidal hangings: a retrospective study on contributing variables*. Forensic Sci Int, 2011. **207**(1-3): p. 122-6.

14. Khokhlov, V.D., *Injuries to the hyoid bone and laryngeal cartilages: effectiveness of different methods of medico-legal investigation*. Forensic Sci Int, 1997. **88**(3): p. 173-83.
15. Saternus, K.S., et al., *Traumatology of the superior thyroid horns in suicidal hanging--an injury analysis*. Leg Med (Tokyo), 2013. **15**(3): p. 134-9.
16. (AWMF), A.d.W.M.F. *S1-Leitlinie: Die rechtsmedizinische Leichenöffnung*. 2012 29.01.2017]; Available from: [http://www.awmf.org/uploads/tx\\_szleitlinien/054-0011\\_S1\\_Leichen%C3%B6ffnung\\_2012-12.pdf](http://www.awmf.org/uploads/tx_szleitlinien/054-0011_S1_Leichen%C3%B6ffnung_2012-12.pdf).
17. Naimo, P., et al., *The use of computed tomography in determining developmental changes, anomalies, and trauma of the thyroid cartilage*. Forensic Sci Med Pathol, 2013. **9**(3): p. 377-85.
18. Robinson, S., et al., *Multidetector row computed tomography of the injured larynx after trauma*. Semin Ultrasound CT MR, 2009. **30**(3): p. 188-94.
19. Becker, M., et al., *Imaging of laryngeal trauma*. Eur J Radiol, 2014. **83**(1): p. 142-54.
20. Yen, K., et al., *Strangulation signs: initial correlation of MRI, MSCT, and forensic neck findings*. J Magn Reson Imaging, 2005. **22**(4): p. 501-10.
21. Wullenweber, R., V. Schneider, and T. Grumme, *[A computer-tomographical examination of cranial bullet wounds (author's transl)]*. Z Rechtsmed, 1977. **80**(3): p. 227-46.
22. Schumacher, M., et al., *[Intravital and postmortal CT examinations in cerebral gunshot injuries]*. Rofo, 1983. **139**(1): p. 58-62.
23. Donchin, Y., et al., *Utility of postmortem computed tomography in trauma victims*. J Trauma, 1994. **37**(4): p. 552-5; discussion 555-6.
24. Roberts, I.S., et al., *Post-mortem imaging as an alternative to autopsy in the diagnosis of adult deaths: a validation study*. Lancet, 2012. **379**(9811): p. 136-42.
25. Thali, M.J., et al., *Virtopsy, a new imaging horizon in forensic pathology: virtual autopsy by postmortem multislice computed tomography (MSCT) and magnetic resonance imaging (MRI)--a feasibility study*. J Forensic Sci, 2003. **48**(2): p. 386-403.
26. Thali, M., *[Virtual autopsy (virtopsy) in forensic science: from the scalpel to the scanner]*. Pathologe, 2011. **32 Suppl 2**: p. 292-5.

27. Daly, B., et al., *Comparison of whole-body post mortem 3D CT and autopsy evaluation in accidental blunt force traumatic death using the abbreviated injury scale classification*. Forensic Sci Int, 2013. **225**(1-3): p. 20-6.
28. Scholing, M., et al., *The value of postmortem computed tomography as an alternative for autopsy in trauma victims: a systematic review*. Eur Radiol, 2009. **19**(10): p. 2333-41.
29. Thomsen, A.H., et al., *An alternative approach to computerized tomography (CT) in forensic pathology*. Forensic Sci Int, 2009. **183**(1-3): p. 87-90.
30. Flach, P.M., M.J. Thali, and T. Germerott, *Times have changed! Forensic radiology--a new challenge for radiology and forensic pathology*. AJR Am J Roentgenol, 2014. **202**(4): p. W325-34.
31. Levy, A.D., H.T. Harcke, and C.T. Mallak, *Postmortem imaging: MDCT features of postmortem change and decomposition*. Am J Forensic Med Pathol, 2010. **31**(1): p. 12-7.
32. Le Blanc-Louvry, I., et al., *Post-mortem computed tomography compared to forensic autopsy findings: a French experience*. Eur Radiol, 2013. **23**(7): p. 1829-35.
33. Poulsen, K. and J. Simonsen, *Computed tomography as routine in connection with medico-legal autopsies*. Forensic Sci Int, 2007. **171**(2-3): p. 190-7.
34. Andenmatten, M.A., et al., *Gunshot injuries detected by post-mortem multislice computed tomography (MSCT): a feasibility study*. Leg Med (Tokyo), 2008. **10**(6): p. 287-92.
35. Dirnhofer, R., et al., *VIRTOPSY: minimally invasive, imaging-guided virtual autopsy*. Radiographics, 2006. **26**(5): p. 1305-33.
36. Thali, M.J., et al., *VIRTOPSY - the Swiss virtual autopsy approach*. Leg Med (Tokyo), 2007. **9**(2): p. 100-4.
37. *Virtopsy*. 29.01.2017]; Available from: <http://www.virtopsy.com/about-virtopsy>.
38. Ebert, L.C., et al., *Virtobot--a multi-functional robotic system for 3D surface scanning and automatic post mortem biopsy*. Int J Med Robot, 2010. **6**(1): p. 18-27.
39. Ebert, L.C., et al., *Virtobot 2.0: the future of automated surface documentation and CT-guided needle placement in forensic medicine*. Forensic Sci Med Pathol, 2014. **10**(2): p. 179-86.

40. H.-R. Duncker, W.K., *Atemsystem*, in *Anatomie: Makroskopische Anatomie, Histologie, Embryologie, Zellbiologie*, D. Drenckhahn, Editor. 2008, Elsevier, Urban & Fischer: München. p. 548-556.
41. H., W.A., *Kopf, Cranium und Hals, Collum*, in *Waldeyer: Anatomie des Menschen*, P.F. Anderhuber F., Streicher J., Editor. 2012, Walter de Gruyter GmbH & Co. KG: Berlin/Boston. p. 844ff.
42. Tillmann, B.N., *Organe der Atmung*, in *Anatomie*, B.N.T. Karl Zilles, Editor. 2010, Springer Medizin Verlag: Heidelberg. p. 403-413.
43. Paulsen, F.u.W., J., ed. *Sobotta Atlas der Anatomie des Menschen: Kopf, Hals und Neuroanatomie*. Vol. 23. 2010, Elsevier Urban & Fischer München.
44. Schmidt, H.-M., *Kopf und Hals*, in *Anatomie: Makroskopische Anatomie, Histologie, Embryologie, Zellbiologie*, D. Drenckhahn, Editor. 2008, Elsevier, Urban & Fischer: München. p. 513ff.
45. Koebke, J. and K.S. Saternus, [*Morphology of the adult human hyoid bone*]. *Z Rechtsmed*, 1979. **84**(1): p. 7-18.
46. Paulsen, F.u.W., J., *Sobotta Atlas der Anatomie des Menschen: Tabellen zu Muskeln, Gelenken und Nerven*, F.u.W. Paulsen, J., Editor. 2010, Elsevier Urban & Fischer München. p. 15f.
47. *2 Halsorgane*, in *Anatomie*, G. Aumüller, et al., Editors. 2010, Georg Thieme Verlag: Stuttgart. p. 826ff.
48. Leon, X., et al., *Foramen thyroideum: a comparative study in embryos, fetuses, and adults*. *Laryngoscope*, 1997. **107**(8): p. 1146-50.
49. Gilliam, C. and G. Renner, *The thyroid foramen: a case report and literature review of a largely unrecognized laryngeal anomaly*. *Ear Nose Throat J*, 2009. **88**(3): p. E4-7.
50. Di Nunno, N., et al., *Anomalies and alterations of the hyoid-larynx complex in forensic radiographic studies*. *Am J Forensic Med Pathol*, 2004. **25**(1): p. 14-9.
51. Advenier, A.S., et al., *Laryngeal anomalies: Pitfalls in adult forensic autopsies*. *Med Sci Law*, 2014. **54**(1): p. 1-7.
52. Brenner, M., *Morphometrische Untersuchungen an Zungenbein und Kehlkopfskelett unter rechtsmedizinischem Aspekt*, in *Institut für Rechtsmedizin*. 2004, Ludwig-Maximilians-Universität München: München. p. 93.
53. Ito, K., et al., *Morphological study of the human hyoid bone with three-dimensional CT images -Gender difference and age-related changes*. *Okajimas Folia Anat Jpn*, 2012. **89**(3): p. 83-92.

54. El Amm, C.A. and A. Denny, *Hyoid bone abnormalities in Pierre Robin patients*. J Craniofac Surg, 2008. **19**(1): p. 259-63.
55. Gok, E., I.M. Kafa, and R. Fedakar, *Unusual variation of the hyoid bone: bilateral absence of lesser cornua and abnormal bone attachment to the corpus*. Surg Radiol Anat, 2012. **34**(6): p. 567-9.
56. Eagle, W.W., *Elongated styloid process; further observations and a new syndrome*. Arch Otolaryngol, 1948. **47**(5): p. 630-40.
57. Werhun, E.L., et al., *Stylohyoid syndrome, also known as Eagle syndrome: an uncommon cause of facial pain*. Ear Nose Throat J, 2014. **93**(9): p. 384-5.
58. Murtagh, R.D., J.T. Caracciolo, and G. Fernandez, *CT findings associated with Eagle syndrome*. AJNR Am J Neuroradiol, 2001. **22**(7): p. 1401-2.
59. Rechtweg, J.S. and M.K. Wax, *Eagle's syndrome: a review*. Am J Otolaryngol, 1998. **19**(5): p. 316-21.
60. Turk, L.M. and D.A. Hogg, *Age changes in the human laryngeal cartilages*. Clinical Anatomy, 1993. **6**(3): p. 154-162.
61. Ajmani, M.L., *A metrical study of the laryngeal skeleton in adult Nigerians*. J Anat, 1990. **171**: p. 187-91.
62. de la Grandmaison, G.L., A. Banasr, and M. Durigon, *Age estimation using radiographic analysis of laryngeal cartilage*. Am J Forensic Med Pathol, 2003. **24**(1): p. 96-9.
63. O'Bannon, R.P. and O.H. Grunow, *The larynx and pharynx radiologically considered*. South Med J, 1954. **47**(4): p. 310-6.
64. Ahmad, M., R. Madden, and L. Perez, *Triticeous cartilage: prevalence on panoramic radiographs and diagnostic criteria*. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod, 2005. **99**(2): p. 225-30.
65. Hatley, W., E. Samuel, and G. Evison, *THE PATTERN OF OSSIFICATION IN THE LARYNGEAL CARTILAGES: A RADIOLOGICAL STUDY*. Br J Radiol, 1965. **38**: p. 585-91.
66. Carter, L.C., *Discrimination between calcified triticeous cartilage and calcified carotid atheroma on panoramic radiography*. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod, 2000. **90**(1): p. 108-10.
67. Kamikawa, R.S., et al., *Study of the localization of radiopacities similar to calcified carotid atheroma by means of panoramic radiography*. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod, 2006. **101**(3): p. 374-8.

68. de la Grandmaison, G.L., S. Krimi, and M. Durigon, *Frequency of laryngeal and hyoid bone trauma in nonhomicidal cases who died after a fall from a height*. Am J Forensic Med Pathol, 2006. **27**(1): p. 85-6.
69. Hajiioannou, J.K., V. Florou, and P. Kousoulis, *Superior thyroid cornu anatomical variation causing globus pharyngeous and Dysphagia*. Case Rep Med, 2010. **2010**: p. 142928.
70. Browning, S.T. and H.B. Whittet, *A new and clinically symptomatic variant of thyroid cartilage anatomy*. Clin Anat, 2000. **13**(4): p. 294-7.
71. Lin, D., N. Fischbein, and D.W. Eisele, *Odynophagia secondary to variant thyroid cartilage anatomy*. Dysphagia, 2005. **20**(3): p. 232-4.
72. Raikos, A. and G.K. Paraskevas, *The thyroid foramen: a systematic review and surgical considerations*. Clin Anat, 2013. **26**(6): p. 700-8.
73. Ortug, C., T. Gunduz, and B. Sam, *The incidence of the foramen thyroideum in Turkish population*. Surg Radiol Anat, 2005. **27**(6): p. 491-4.
74. Birkent, H., et al., *An unusual case of anterior and posterior laryngeal cleft together: combined cleft of larynx*. Eur Arch Otorhinolaryngol, 2012. **269**(1): p. 345-8.
75. Schild, J.A. and M.F. Mafee, *Ventral cleft of the larynx in an adult. Case report*. Ann Otol Rhinol Laryngol, 1989. **98**(1 Pt 1): p. 66-9.
76. Keen, J.A. and J. Wainwright, *Ossification of the thyroid, cricoid and arytenoid cartilages*. S Afr J Lab Clin Med, 1958. **4**(2): p. 83-108.
77. Knopke, S., et al., *Pseudarthroses of the cornu of the thyroid cartilage*. Otolaryngol Head Neck Surg, 2010. **143**(2): p. 186-9.
78. Cukurova, I. and E.A. Cetinkaya, *Radionecrosis of the larynx: case report and review of the literature*. Acta Otorhinolaryngol Ital, 2010. **30**(4): p. 205.
79. Kim, D.I., et al., *Morphometrics of the hyoid bone for human sex determination from digital photographs*. J Forensic Sci, 2006. **51**(5): p. 979-84.
80. Miller, K.W., P.L. Walker, and R.L. O'Halloran, *Age and sex-related variation in hyoid bone morphology*. J Forensic Sci, 1998. **43**(6): p. 1138-43.
81. Balseven-Odabasi, A., et al., *Age and sex estimation by metric measurements and fusion of hyoid bone in a Turkish population*. J Forensic Leg Med, 2013. **20**(5): p. 496-501.
82. Mukhopadhyay, P.P., *Morphometric features and sexual dimorphism of adult hyoid bone: a population specific study with forensic implications*. J Forensic Leg Med, 2010. **17**(6): p. 321-4.

83. Mukhopadhyay, P.P., *Determination of sex from an autopsy sample of adult hyoid bones*. Med Sci Law, 2012. **52**(3): p. 152-5.
84. Kindschuh, S.C., T.L. Dupras, and L.W. Cowgill, *Determination of sex from the hyoid bone*. Am J Phys Anthropol, 2010. **143**(2): p. 279-84.
85. Leksan, I., et al., *Morphological classification and sexual dimorphism of hyoid bone: new approach*. Coll Antropol, 2005. **29**(1): p. 237-42.
86. Shimizu, Y., et al., *Age-related morphological changes in the human hyoid bone*. Cells Tissues Organs, 2005. **180**(3): p. 185-92.
87. Loth, A., et al., *Analysis of Hyoid-Larynx Complex Using 3D Geometric Morphometrics*. Dysphagia, 2015. **30**(3): p. 357-64.
88. D'Souza, D.H., S.S. Harish, and J. Kiran, *Fusion in the hyoid bone: usefulness and implications*. Med Sci Law, 2010. **50**(4): p. 197-9.
89. Gupta, A., et al., *Study of age of fusion of hyoid bone*. Leg Med (Tokyo), 2008. **10**(5): p. 253-6.
90. Harjeet, K., et al., *Time of fusion of greater cornu with body of hyoid bone in Northwest Indians*. Leg Med (Tokyo), 2010. **12**(5): p. 223-7.
91. Dang-Tran, K.D., et al., *Thyroid cartilage ossification and multislice computed tomography examination: a useful tool for age assessment?* J Forensic Sci, 2010. **55**(3): p. 677-83.
92. Turkmen, S., et al., *Age-dependent structural and radiological changes in the larynx*. Clin Radiol, 2012. **67**(11): p. e22-6.
93. Claassen, H., et al., *Special pattern of endochondral ossification in human laryngeal cartilages: X-ray and light-microscopic studies on thyroid cartilage*. Clin Anat, 2014. **27**(3): p. 423-30.
94. Garvin, H.M., *Ossification of laryngeal structures as indicators of age*. J Forensic Sci, 2008. **53**(5): p. 1023-7.
95. Sugiyama, S., et al., *Estimation of age from soft X-ray findings of Japanese females thyroid cartilages*. Nihon Hoigaku Zasshi, 1995. **49**(4): p. 236-41.
96. Stiebler, A. and H. Maxeiner, *[Non-strangulation-induced injuries of the larynx and hyoid bone]*. Beitr Gerichtl Med, 1990. **48**: p. 309-15.
97. Maxeiner, H., E. Ehrlich, and C. Schyma, *Neck injuries caused by being run over by a motor vehicle*. J Forensic Sci, 2000. **45**(1): p. 31-5.
98. Bux, R., et al., *Laryngohyoid fractures after agonal falls: not always a certain sign of strangulation*. Forensic Sci Int, 2006. **156**(2-3): p. 219-22.

99. Porr, J., M. Laframboise, and M. Kazemi, *Traumatic hyoid bone fracture - a case report and review of the literature*. J Can Chiropr Assoc, 2012. **56**(4): p. 269-74.
100. Kim, J.D., et al., *Traumatic laryngeal fracture in a collegiate basketball player*. Sports Health, 2013. **5**(3): p. 273-5.
101. Bechman, S.M., *Laryngeal fracture in a high school football player*. J Athl Train, 1993. **28**(3): p. 217-20.
102. Godin, A., C. Kremer, and A. Sauvageau, *Fracture of the cricoid as a potential pointer to homicide. A 6-year retrospective study of neck structures fractures in hanging victims*. Am J Forensic Med Pathol, 2012. **33**(1): p. 4-7.
103. Green, H., et al., *Fractures of the hyoid bone and laryngeal cartilages in suicidal hanging*. J Clin Forensic Med, 2000. **7**(3): p. 123-6.
104. Bockholdt, B., M. Hempelmann, and H. Maxeiner, *Experimental investigations of fractures of the upper thyroid horns*. Leg Med (Tokyo), 2003. **5 Suppl 1**: p. S252-5.
105. Suarez-Penaranda, J.M., et al., *Characterization of lesions in hanging deaths*. J Forensic Sci, 2008. **53**(3): p. 720-3.
106. Weintraub, C.M., *Fractures of the hyoid bone*. Med Leg J, 1961. **29**: p. 209-16.
107. Oh, J.H., et al., *Isolated cricoid fracture associated with blunt neck trauma*. Emerg Med J, 2007. **24**(7): p. 505-6.
108. Eisenmenger W., G.E., *Verbrechen - Strafe - Resozialisierung: Festschrift für Heinz Schöch zum 70. Geburtstag am 20. August 2010*. 2010, Berlin: Walter de Gruyter.
109. Wintterer, A., *Kehlkopfverletzungen tödlich verunglückter Kraftfahrzeuginsassen*, in *Institut für Rechtsmedizin*. 2004, Ludwig-Maximilians-Universität München: München.
110. G. Bongartz, S.J.G., A.G. Jurik, M. Leonardi, E. van Persijn van Meerten, R. Rodríguez, K. Schneider, A. Calzado, J. Geleijns, K.A. Jessen, W. Panzer, P. C. Shrimpton, G. Tosi, *European Guidelines for Multislice Computed Tomography*. 2004.
111. Alqahtani, E., et al., *Triticeous Cartilage CT Imaging Characteristics, Prevalence, Extent, and Distribution of Ossification*. Otolaryngol Head Neck Surg, 2016. **154**(1): p. 131-7.
112. Ubelaker, D.H., *Hyoid fracture and strangulation*. J Forensic Sci, 1992. **37**(5): p. 1216-22.

113. Claassen, H., et al., *Androgen receptors and gender-specific distribution of alkaline phosphatase in human thyroid cartilage*. *Histochem Cell Biol*, 2006. **126**(3): p. 381-8.
114. (AWMF), A.d.W.M.F. *S1-Leitlinie: Radiologische Diagnostik im Kopf-Hals-Bereich*. 2015 29.01.2017]; Available from:  
[http://www.awmf.org/uploads/tx\\_szleitlinien/039-093l\\_S1\\_Radiologische\\_Diagnostik\\_Kopf\\_Hals-Bereich\\_2015-05.pdf](http://www.awmf.org/uploads/tx_szleitlinien/039-093l_S1_Radiologische_Diagnostik_Kopf_Hals-Bereich_2015-05.pdf).
115. *Diagnostische Referenzwerte für diagnostische und interventionelle Röntgenanwendungen* B.f. Strahlenschutz, Editor. 2016: Salzgitter.
116. *Dosisgrenzwerte im Strahlenschutz*. 2016 21.07.2016 08.02.2017]; Available from:  
[http://www.bfs.de/DE/themen/ion/strahlenschutz/grenzwerte/grenzwerte\\_node.html](http://www.bfs.de/DE/themen/ion/strahlenschutz/grenzwerte/grenzwerte_node.html).

# 11. ANHANG

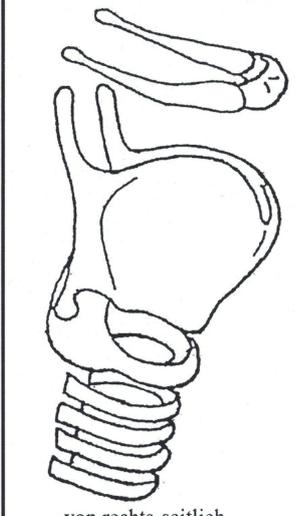
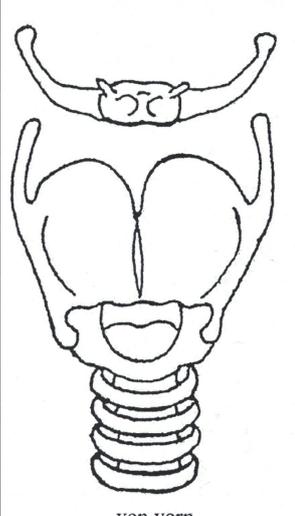
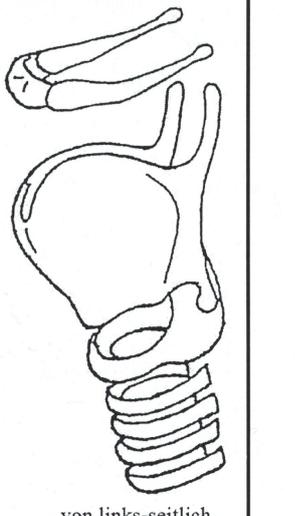
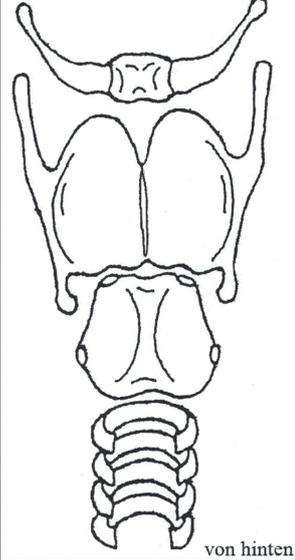
## 11.1 Dokumentationsblatt für die Ergebnisse der Feinpräparation

Institut für Rechtsmedizin der Universität München

Zusatzuntersuchung zum vorläufigen Gutachten der GS ...../20....., vom ..... . 20.....

Gerichtsmedizinische Untersuchung der Leiche des/der ....., ..... Jahre alt

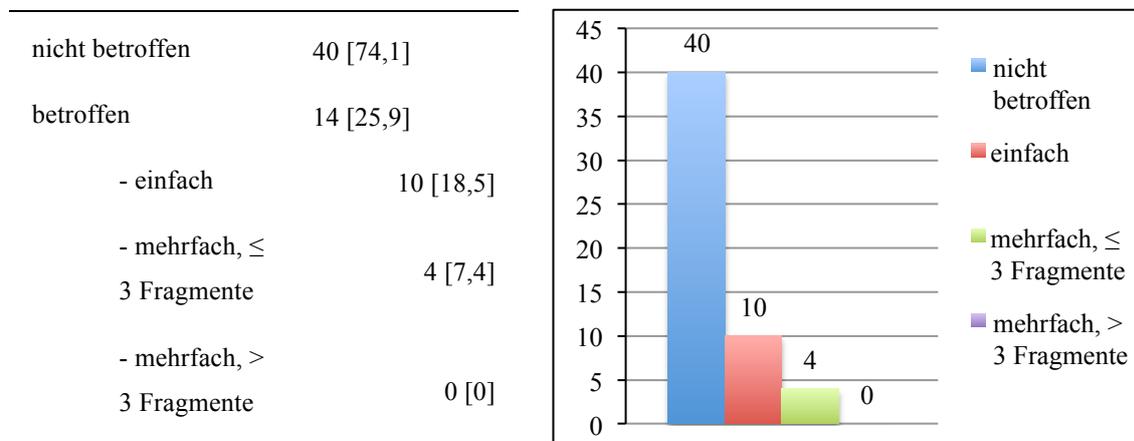
Schema des Zungenbeins, der Kehlkopfknorpel und der Luftröhre

 <p>von rechts-seitlich</p>	 <p>von vorn</p>	 <p>von links-seitlich</p>
 <p>von vorn nach hinten, gekippt</p>  <p>von hinten nach vorn, gekippt</p>	 <p>von hinten</p>	<p>— Verletzungen</p> <p>+ Kompressionszone</p> <p>- Dehnungszone</p> <p>▭ Einblutungszone</p> <p>▭ Verknöcherungszone</p> <p>Unterschrift</p>

© E. Mischin, 1994

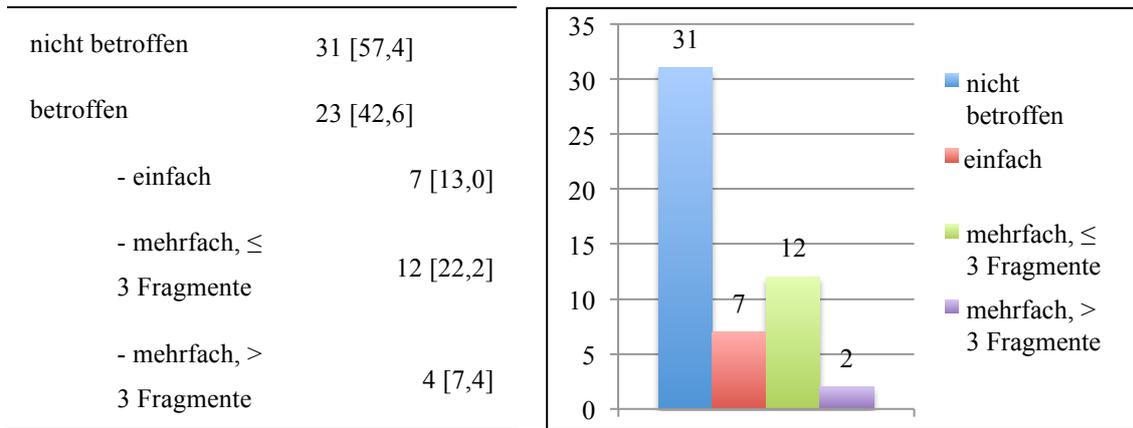
## 11.2 Verletzungshäufigkeiten anhand der PMCT

### 11.2.1 Grad und Lokalisation der Frakturen des Zungenbeins



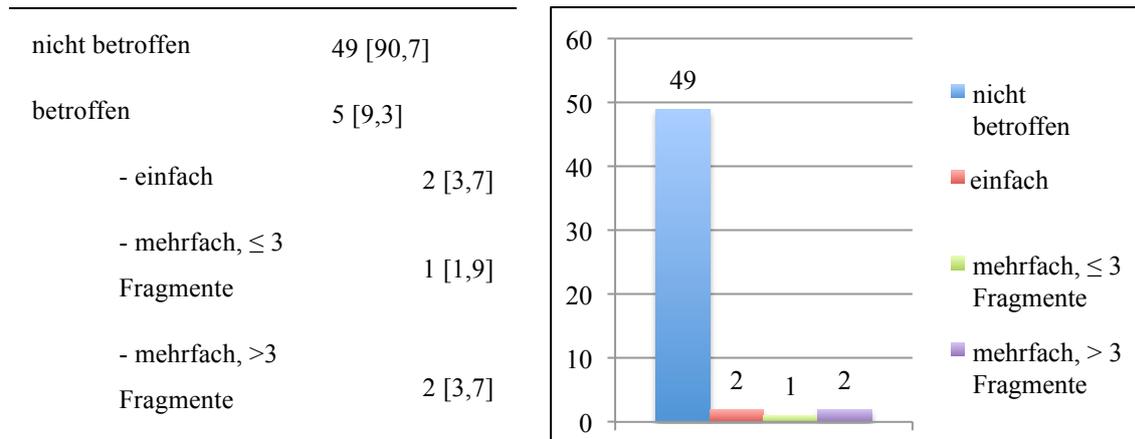
	Corpus	rechtes Horn corpusnah	linkes Horn corpusnah	rechtes Horn okzipital	linkes Horn okzipital
nicht betroffen	52 (96,3%)	51 (94,4%)	52 (96,3%)	50 (92,6%)	48 (88,9%)
betroffen	2 (3,7%)	3 (5,6%)	2 (5,6%)	4 (7,4%)	6 (11,1%)
- Fissur (unvollständig)	0 (0,0%)	0 (0,0%)	2 (3,7%)	1 (1,9%)	1 (1,9%)
- vollständige Fraktur (nicht disloziert)	0 (0,0%)	1 (1,9%)	0 (0,0%)	0 (0,0%)	0 (0,0%)
- dislozierte Fraktur	2 (3,7%)	2 (3,7%)	0 (0,0%)	3 (5,6%)	5 (9,3%)

## 11.2.2 Grad und Lokalisation der Frakturen des Schilddknorpels



	Mittellinie	rechtes Schild	linkes Schild	
nicht betroffen	51 (94,9%)	47 (87,0%)	51 (92,6%)	
betroffen	3 (5,6%)	7 (13,0%)	3 (5,6%)	
- Fissur (unvollständig)	1 (1,9%)	2 (3,7%)	2 (3,7%)	
- vollständige Fraktur (nicht disloziert)	1 (1,9%)	4 (7,4%)	0 (0,0%)	
- dislozierte Fraktur	1 (1,9%)	1 (1,9%)	1 (1,9%)	
	rechtes oberes Horn	linkes oberes Horn	rechtes unteres Horn	linkes unteres Horn
nicht betroffen	40 (74,1%)	38 (70,4%)	52 (96,3%)	51 (94,4%)
betroffen	14 (25,9%)	16 (29,6%)	2 (3,7%)	3 (5,6%)
- Fissur (unvollständig)	2 (3,7%)	2 (3,7%)	0 (0,0%)	2 (3,7%)
- vollständige Fraktur (nicht disloziert)	3 (5,6%)	5 (9,3%)	0 (0,0%)	1 (1,9%)
- dislozierte Fraktur	9 (16,7%)	9 (16,7%)	2 (3,7%)	0 (0,0%)

### 11.2.3 Grad und Lokalisation der Frakturen des Ringknorpels



	<b>Mittellinie rostral</b>	<b>Mittellinie okzipital</b>	<b>seitlich rechts</b>	<b>seitlich links</b>
nicht betroffen	50 (92,6%)	53 (98,1%)	49 (90,7%)	52 (96,3%)
betroffen	4 (7,4%)	1 (1,9%)	5 (9,3%)	2 (3,7%)
- Fissur (unvollständig)	2 (3,7%)	0 (0,0%)	0 (0,0%)	1 (1,9%)
- vollständige Fraktur (nicht disloziert)	1 (1,9%)	1 (1,9%)	3 (5,6%)	1 (1,9%)
- dislozierte Fraktur	1 (1,9%)	0 (0,0%)	2 (3,7%)	0 (0,0%)

## 12. EIDESSTATTLICHE VERSICHERUNG

Laura Kaiser

---

Name, Vorname

Ich erkläre hiermit an Eides statt,

dass ich die vorliegende Dissertation mit dem Thema

VERLETZUNGEN UND VERKNÖCHERUNG DES LARYNX IM POST MORTEM  
COMPUTERTOMOGRAMM IN KORRELATION MIT OBDUKTION UND  
FEINPRÄPARATION

selbständig verfasst, mich außer der angegebenen keiner weiteren Hilfsmittel bedient und alle Erkenntnisse, die aus dem Schrifttum ganz oder annähernd übernommen sind, als solche kenntlich gemacht und nach ihrer Herkunft unter Bezeichnung der Fundstelle einzeln nachgewiesen habe.

Ich erkläre des Weiteren, dass die hier vorgelegte Dissertation nicht in gleicher oder in ähnlicher Form bei einer anderen Stelle zur Erlangung eines akademischen Grades eingereicht wurde.

---

München, 01.04.2019

Ort, Datum

---

Laura Isabel Kaiser

Doktorandin

## 13. DANKSAGUNG

Für die vielseitige Unterstützung bei der Anfertigung der Dissertation möchte ich meinen besonderen Dank aussprechen an:

Herrn Prof. Dr. Dr. rer. biol. hum. Dipl. inform. Stefan Wirth Wirth für die initiale Überlassung des Promotionsthemas.

Frau PD Dr. Karla Treitl für die Übernahme der Betreuung und die hervorragende Betreuung und Unterstützung im Rahmen der Datenerfassung und -auswertung sowie ihre Hilfsbereitschaft und Geduld bei dem Verfassen der Arbeit und allen aufkommenden Fragen.

Herrn Dr. Michael Scherr für die ausgezeichnete und engagierte Betreuung über die gesamte Zeit der Promotion hinweg. Ebenso für die umfassende Einführung in die Thematik und weitere Betreuung trotz des Arbeitsplatzwechsels. Und nicht zuletzt dafür, dass er die Begeisterung am Fach der Radiologie bei mir geweckt hat.

Herrn Dr. E. Gazov für die freundliche und hilfsbereite Betreuung und Unterstützung von rechtsmedizinischer Seite sowie das Überlassen der Präparationsergebnisse, ohne die diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre. Ebenso für die Zeit, die er sich für die Erläuterung der Präparationstechnik sowie -ergebnisse und deren Interpretation genommen hat.

Auch den radiologisch technischen Assistenten der Klinik und Poliklinik für Radiologie der LMU, die mit ihrer Unterstützung die CT-Untersuchungen ermöglicht haben.

Meinen Eltern und meinem Lebenspartner für die ständige Unterstützung und Ermutigung in allem.