Aus dem Department für Pathobiologie

der Veterinärmedizinischen Universität Wien

(Departmentsprecher: Univ.-Prof. Dr.rer.nat. Armin Saalmüller)

Fach: Anatomie

MAKROSKOPISCH UND MIKROSKOPISCH ANATOMISCHE UNTERSUCHUNGEN DER GELENKE DER VORDEREXTREMITÄT DES AFRIKANISCHEN ELEFANTEN (LOXODONTA AFRICANA, BLUMENBACH 1797)

INAUGURAL-DISSERTATION

zur Erlangung der Würde eines

DOCTOR MEDICINAE VETERINARIAE

der Veterinärmedizinischen Universität Wien

Vorgelegt von

Mag. med. vet. Lisa Maria Elsäßer

Wien, im März 2011

Danksagung

Meinen wissenschaftlichen Betreuern, A. Univ. Prof. Dr. Gerhard Forstenpointner und A. Univ. Prof. Dr. Gerald Weissengruber, danke ich herzlich für ihre fachkundige Betreuung.

Den Mitarbeitern des Departments für Makroanatomie (Anatomie) der Veterinärmedizinischen Universität Wien, insbesondere Herrn Helmut Dier und Herrn Leopold Habeler.

Dr. Gunter Florian Egger und Dr. Kirsti Witter und den Mitarbeitern der Abteilung Mikroanatomie der Veterinärmedizinischen Universität Wien.

Prof. Herman B. Groenewald, Prof. John T. Soley, Mr. Leon de Villiers (†), Department of Anatomy and Physiology der Faculty of Veterinary Science, University of Pretoria in Südafrika.

A. Univ. Prof. Dr. Sibylle Kneissl, Klinik für Bildgebende Diagnostik der Veterinärmedizinischen Universität Wien, danke ich sehr herzlich für die intensive und motivierende Unterstützung.

Den Mitarbeitern des Department of Radiology, Faculty of Veterinary Science, University of Pretoria, South Africa.

Dr. Eva Polsterer für die exzellenten Zeichnungen.

Dr. Anna Kübber-Heiss vom Institut für Pathologie der Veterinärmedizinischen Universität Wien.

der Tierärztlichen Ordination des Tiergarten Schönbrunn, Dipl. Tzt. Thomas Voracek und Dr. Hanna Vielgrader und dem Tiergarten Schönbrunn, Dr. Harald Schwammer für die zur Verfügung gestellten Krankengeschichten der von dort stammenden Elefantenfüße.

Der größte Dank gilt meiner Familie für deren mentale und finanzielle Unterstützung.

Gewidmet

Mag. med. vet. Christiane Krepp (†)

28.11.1979 - 3.5.2006

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS:

Abb.	Abbildung
A – E Komplex	Articular – Epiphyseal Cartilage Complex
Art.	Articulatio
Artt.	Articulationes
bzw.	beziehungsweise
ca.	cirka
cm	Zentimeter
CT	Computertomographie
d. h.	das heißt
engl.	englisch
et al.	et alii
HE	Hämatoxylin-Eosin (Histologie)
HE	Haunsfield – Einheiten (Computertomographie)
kV	Kilovolt
lat.	lateral
Lig.	Ligamentum
Ligg.	Ligamenta
M.	Musculus
Mc.	Metacarpalknochen

mA	Milliampere
mAs	Milliamperesekunden (Zeit und mA)
med.	medial
Mm.	Musculi
mm	Millimeter
MRT	Magnetresonanztomographie
m/s	Meter pro Sekunde
NAV	Nomina Anatomica Veterinaria
Oc.	Os carpi bzw. carpale
PBS	Phosphate Buffered Saline
Proc.	Processus
Procc.	Processus (Plural)
prof.	profundus
supf.	superficialis
Tab.	Tabelle
&	und
V	Volt
v. a.	vor allem
z. B.	zum Beispiel

INHALTSVERZEICHNIS

1 EINLEITUNG 1

2 LITERATURÜBERSICHT 4

2.1 Lokomotion 4

2.2 Anatomie des Bewegungsapparates der Vordergliedmaße 5

2.2.1 Stellung der Vordergliedmaße 5

2.3 Untersuchungen mittels bildgebender Verfahren 8

2.4 Vergleichende Anatomie der Gelenke der Vorderextremität bei Säugetieren 9

2.4.1 Schultergelenk (Articulatio humeri) 11

2.4.2 Ellbogengelenk (Articulatio cubiti) 14

2.4.3 Verbindungen von Radius und Ulna (Articulationes radioulnares) 16

2.4.4 Carpalgelenk (Articulatio carpi) 18

2.4.5 Zehengelenke (Artt. metacarpophalangeae, interphalangeae proximales, interphalangeae distales) 23

3 MATERIAL UND METHODE 28

3.1 Probenentnahme für die histologischen Untersuchungen 29

3.2 Untersuchung mittels bildgebender Verfahren 33

4 ERGEBNISSE 35

4.1 Articulatio humeri 35

4.2 Articulatio cubiti 41

4.3 Articulationes radioulnares 45

4.4 Articulatio carpi 46

4.4.1 Articulatio antebrachiocarpea 47

4.4.2 Articulatio mediocarpea 48

4.4.3 Articulatio carpometacarpea 48

4.5 Zehengelenke 58

4.5.1 Articulationes metacarpophalangeae 64

4.5.2 Articulationes interphalangeae proximales 65

4.5.3 Articulationes interphalangeae distales 66

4.6 Histologische Ergebnisse 68

4.6.1 Knorpelschichtdicke 68

4.6.2 Gelenkknorpel 68

4.6.3 Gelenkkapselfalten 70

4.6.4 „Ligamentum elasticum craniale“ 72

4.6.5 Phalanx distalis der fünften Zehe beim juvenilen Afrikanischen Elefanten 73

4.6.6 Präpollex beim Afrikanischen Elefanten 74

4.7 Pathologisch-anatomische Befunde 75

4.8 Untersuchungen mittels bildgebender Verfahren (Röntgen, CT, MRT) 83

4.8.1 Schultergelenk 83

4.8.2 Ellbogengelenk 88

4.8.3 Manus 90

4.8.4 Computertomographische dreidimensionale Darstellung des Schultergelenkes 93

4.8.5. Computertomographische dreidimensionale Darstellung des Ellbogengelenkes 95

4.8.6. Computertomographische dreidimensionale Darstellung des Carpus 96

5. DISKUSSION 97

5.1. Articulatio humeri 98

5.2. Articulatio cubiti 101

5.3. Articulatio radioulnaris 102

5.4. Articulatio carpi 104

5.5. Zehen 105

5.6. Mikroskopisch-anatomische Darstellung des Gelenkknorpels 106

5.7. Pathologisch-anatomische Befunde 107

6. ZUSAMMENFASSUNG 110

7. SUMMARY 112

8. LITERATURVERZEICHNIS 113

1 EINLEITUNG

Recent vorkommende Vertreter der Ordnung Proboscidea sind den Gattungen Elephas und Loxodonta zuzuordnen.

Die Gattung Elephas besteht aus der Art Elephas maximus (Asiatischer Elefant) mit den Unterarten Elephas maximus bengalensis, Elephas maximus hirsutus (Malaya-Elefant), Elephas maximus maximus (Ceylon-Elefant) und Elephas maximus sumatranus (Sumatra-Elefant). Die Gattung Loxodonta besteht aus den Arten Loxodonta cyclotis (Waldelefanten) und Loxodonta africana (Afrikanischer Elefant) mit den Unterarten Loxodonta africana africana (Kapelefant) und Loxodonta africana oxyotis (Steppenelefant) (SHOSHANI, 2000, 2005; FELDHOFF, 2005; WILSON und REEDER, 2005).

Als größte lebende Landsäugetiere erreichen adulte Afrikanische Elefantenbullen bei einer Schulterhöhe von 3 - 4 Metern ein Gewicht von bis zu 7000 kg (SHOSHANI, 1992, 2000). Elefanten absolvieren kilometerlange Wanderungen vor allem im Schritt und Passgang. Dem Elefanten wird darüber hinaus eine sehr gute Schwimmfähigkeit zugesprochen (SHOSHANI, 1992). KROLL (1947) interpretierte den Leitsatz von NAUCK (1938): *„Je schwerer das Tier, desto gestreckter ist das Bein“* dahingehend, dass es dadurch zur Einsparung von Kräften kommt. Auch NICKEL et al. (2003) folgerten, dass das gestreckte und verlängerte Bein einen Hebelarm darstellt, der eine verhältnismäßig schnelle Fortbewegung der großen Körpermasse ermöglicht.

Bedingt durch diese enorme Körpermasse sind strukturelle Modifikationen der Extremitäten notwendig. Nach den Angaben von GAWRILENKO (1924), MIKOTA et al. (1994a) und WEISSENGRUBER et al. (2004, 2008) liegt beim Elefanten eine Semi-Plantigradie der Hinterextremität vor, die sich aufgrund des Körpergewichtes zu keiner echten Digitigradie entwickeln kann. Die Vorderextremität ist hingegen als semidigitigrad zu bezeichnen (MIKOTA et al., 1994a; FOWLER und MIKOTA, 2006; WEISSENGRUBER et al., 2004, 2008).

Beide Vorderextremitäten tragen etwa 60% des Gesamtgewichtes des Elefanten (ALEXANDER et al., 1979).

Nach SIKES (1971, zitiert nach SIEGAL-WILLOTT et al. [2008]) und MIKOTA et al. (1994b) sind juvenile Asiatische Elefanten zwischen 5 und 10 Jahren und Jugendliche zwischen 10 und 20 Jahren alt; von 20 bis 40 Jahren werden sie zu den Adulten gezählt und ab 40 Jahren zu den Senioren.

Die heute in Zoos lebenden Elefanten haben bei weitem nicht die Lebenserwartung von wildlebenden Elefanten. Meist liegen die Ursachen dafür in haltungsbedingten Schäden am Bewegungsapparat (RUTHE, 1961; HITTMAIR und VIELGRADER, 2000; GAGE, 2001; BENZ, 2005; FOWLER und MIKOTA, 2006). Bei den in Zoos lebenden Asiatischen Elefanten ist auffallend häufig die Vorderextremität von orthopädischen Problemen betroffen (SIEGAL-WILLOTT et al., 2008).

Anatomische Untersuchungen zu den Gelenken fehlen in der greifbaren Literatur fast vollständig, sind jedoch für eine Diagnose, Therapie und Prophylaxe unabdingbar.

Röntgen, Computertomographie und Magnetresonanztomographie wurden bisher beim Elefanten kaum angewendet; sie könnten allerdings in Zukunft die schwierige Diagnostik zur Feststellung von Lahmheitsursachen beim Elefanten erleichtern (FLACH et al., 1994; GAGE, 1999; HITTMAIR und VIELGRADER, 2000; HUTCHINSON et al., 2005, 2008).

Als Grundhypothese für diese Arbeit wurde angenommen, dass der Elefant durch seine extreme Bauform und große Körpermasse besondere Einrichtungen im Gelenkbereich und der Stabilität dienende Strukturen aufweisen müsste.

Ziele der vorliegenden Arbeit sind die anatomische bzw. pathologisch-anatomische Darstellung der Gelenke der Vorderextremitäten des Afrikanischen Elefanten mit den Methoden der makroskopischen Anatomie und mittels bildgebender Verfahren sowie die Typisierung ausgewählter Gewebeproben mit den Methoden der Histologie. Zusätzlich wurden der Aufbau und die Dicke des Gelenkknorpels ausgewählter Gelenkabschnitte der Vorderextremität untereinander und mit entsprechenden Angaben zu Gelenkknorpeln der Hinterextremität aus der Literatur verglichen. Als Hypothese wurde angenommen, dass hier keine Unterschiede zu erwarten seien.

2 LITERATURÜBERSICHT

2.1 Lokomotion

Die Bewegungsmuster des Elefanten entsprechen weitgehend jenen anderer großgebauter Quadrupeden. Bei einer schnelleren Fortbewegung wird die Schrittzahl und die Schrittlänge erhöht, bei noch höheren Geschwindigkeiten erweitern sie die Schrittlänge nochmals (HUTCHINSON et al., 2006). Der Hauptunterschied zu anderen Tieren ist, dass ein Elefant auch bei Geschwindigkeiten von bis zu 6,8 m/s (Asiatischer Elefant) und 4,2 m/s (Afrikanischer Elefant) niemals eine Schwebephase aufweist (HUTCHINSON et al., 2006). ALEXANDER et al. (1979) beschrieben die Maximalgeschwindigkeit des Afrikanischen Elefanten mit 4 - 4,5 m/s. Elefanten bewegen sich ausschließlich in lateralen Schrittfolgen (einzelne Fußung oder paarweise) fort, d. h. sie bewegen sich entgegen den Annahmen von HILDEBRAND (1965, 1966, 1976) niemals im Trab (HUTCHINSON et al., 2006).

Der Elefant entspricht aufgrund seiner enormen Körpergröße und den säulenförmigen Extremitäten (HOWELL, 1944; GAMBARYAN, 1974) einem „graviportalen“ Typus (GREGORY, 1912; COOMBS, 1978; SHOSHANI, 2000; HUTCHINSON et al., 2006). Die Extremitäten sind auffallend gestreckt und die Längenzunahme einzelner Gliedmaßenelemente erfolgte proximal. Im Unterschied dazu erfolgt die Längenzunahme z. B. beim Pferd weiter distal, was der Fortbewegung in höheren Geschwindigkeiten dient. Das Pferd wird zum „cursorialen“ Typus gerechnet (GREGORY, 1912; COOMBS, 1978; CHRISTIANSEN, 2002). Die Funktion der Vorderextremität ist im Unterschied zur Hintergliedmaße mehr die eines stützenden Pendels (HUTCHINSON et al., 2003). Dabei ist der Energieaufwand zur Fortbewegung beim Elefanten geringer als bei jedem anderen lebenden Tier (LANGMAN et al., 1995). Ein weiterer Unterschied zwischen typischen Huftieren und Elefanten ist, dass beim Elefanten die Zehennägel nicht das Körpergewicht tragen (FOWLER und MIKOTA, 2006).

2.2 **Anatomie des Bewegungsapparates der Vordergliedmaße**

Die Osteologie des Elefanten beschrieb MARIAPPA (1955a, 2005) beim Asiatischen Elefanten, KROLL (1947) beim Waldelefanten und EALES (1929) und SMUTS und BEZUIDENHOUT (1993) beim Afrikanischen Elefanten. Die Myologie des Elefanten wurde von WINDLE und PARSONS (1901), MARIAPPA (1955b, 2005), EALES (1928), SHINDO und MORI (1956), HOLM NIELSEN (1965) und WEISSENGRUBER et al. (2004) erläutert. Die Arthrologie des Elefanten dokumentierten MIALL und GREENWOOD (1879), NEUVILLE (1946), MARIAPPA (1955a, 2005), SMUTS und BEZUIDENHOUT (1993), MIKOTA et al. (1994a), FORSTENPOINTNER et al. (2001), EGGER (2005), WEISSENGRUBER et al. (2006a, b) und EGGER et al. (2007).

Bei den Säugetieren kann eine rudimentäre knorpelige 6. Zehe vorkommen (NAUCK, 1938; SMUTS und BEZUIDENHOUT, 1993; FOWLER und MIKOTA, 2006), die beim Elefanten als Präpollex bzw. Prähallux bezeichnet wird.

Durch Sohlenkissen wird das Gewicht auf die gesamte Sohle verteilt (RAMSAY und HENRY, 2001) und Stöße gedämpft (WEISSENGRUBER et al., 2006b). Sie bestehen aus fibrösem Bindegewebe und Fettgewebe. Es sind ein großes, metacarpales und drei kleinere Sohlenkissen für die Zehen ausgebildet (WEISSENGRUBER et al., 2006b).

2.2.1 Stellung der Vordergliedmaße

Die auffallend gestreckten Gelenke der Vorderextremität (Abb. 1) beschrieb SCHWERDA (2003) beim Afrikanischen Elefanten in Bewegung. Beim Schultergelenk sind die Winkelmesswerte 204° - 150° (Auffußwinkel – Abfußwinkel) und beim Ellbogengelenk 172° - 174°. Die Winkel des Carpus betragen zwischen 184° und 167° (SCHWERDA, 2003).

SHOSHANI (1992) verglich die vertikal ausgerichteten Extremitäten des Elefanten mit Tischbeinen und merkte an, dass zur Stabilitätserhöhung die Markhöhlen der langen Röhrenknochen durch dichte Spongiosa ersetzt sind (SHOSHANI, 1992; FOWLER und MIKOTA, 2006).

Auch unter Belastung bleibt der Winkel des Metacarpus relativ vertikal (FOWLER und MIKOTA, 2006), im Gegensatz zum Winkel des Schulter- und Ellbogengelenkes, die bei Belastung beinahe überstrecken.

Über die Sohlenkissen haben die Phalanges der Vorderextremität im Vergleich zur Hinterextremität mehr Bodenkontakt. Dies spricht für eine stabilisierende Anpassung an die größere Beanspruchung der Vorderextremität im Vergleich zur Hinterextremität (WEISSENGRUBER et al., 2006b). Unter Belastung spreizen sich die ansonsten eher vertikal gestellten Zehen und verteilen das Gewicht auf die Sohlenballen (WEISSENGRUBER et al., 2006b) (Abb. 2). Dadurch werden die Sohlenkissen flachgedrückt und die Phalanges nehmen eine schrägere Stellung ein (FOWLER und MIKOTA, 2006).

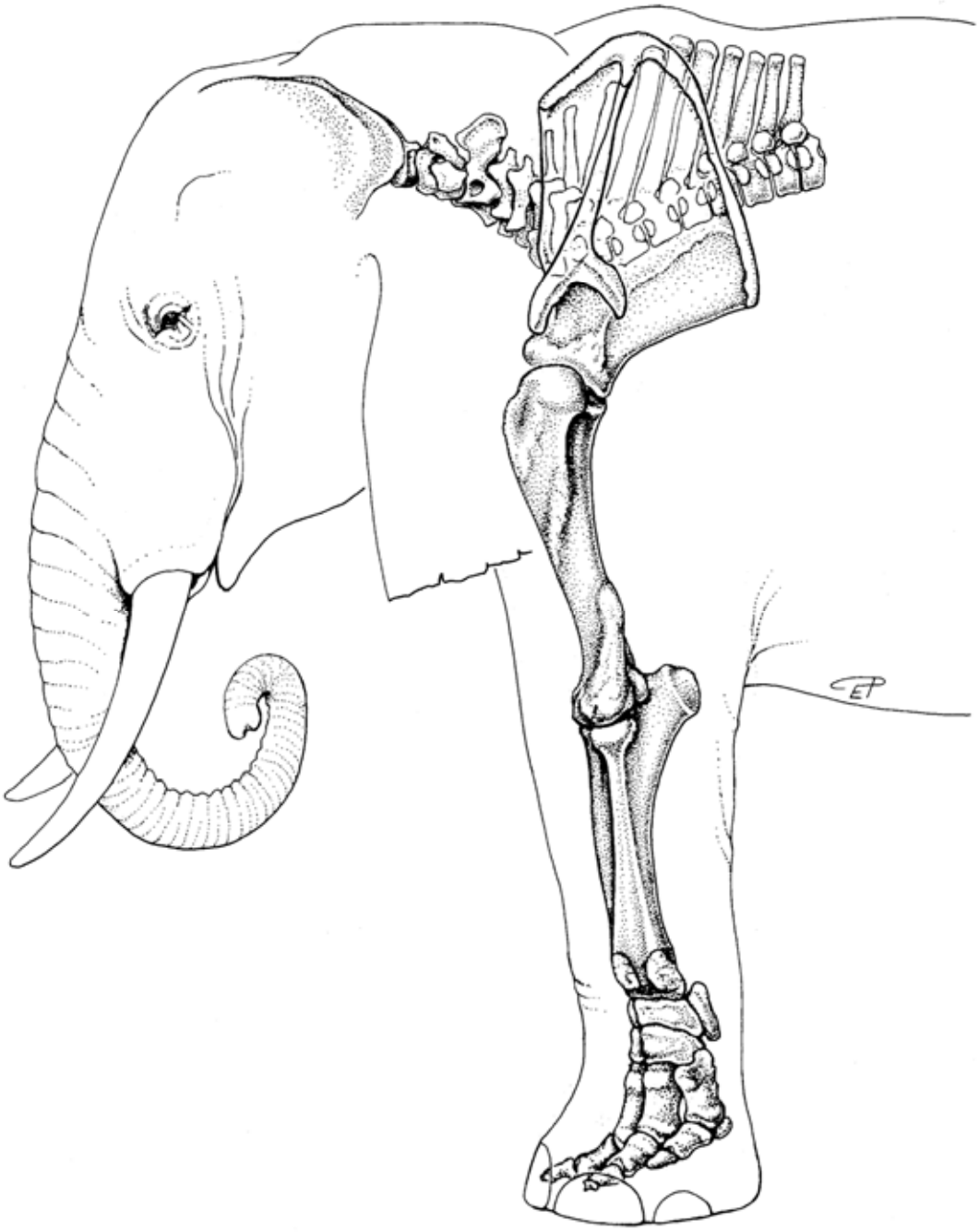

Abb. 1: Linke Vorderextremität, adulter Afrikanischer Elefant. Ansicht von lateral zur Darstellung der auffallend gestreckten Gelenke der Vorderextremität. Zeichnung: Dr. Eva Polsterer, Institut für Anatomie, Veterinärmedizinische Universität Wien.

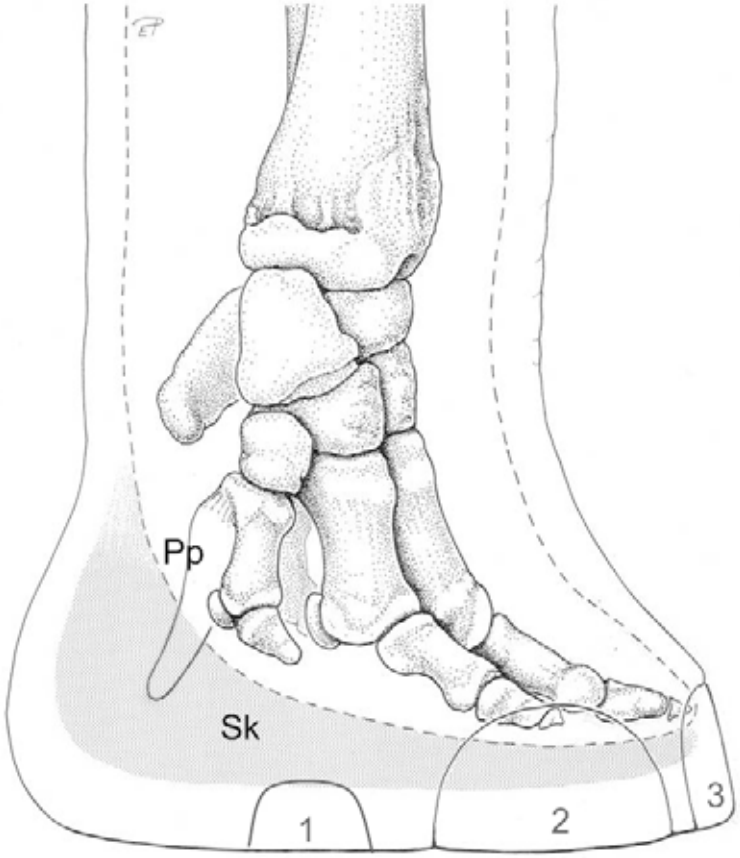

Abb. 2: Linke Hand, adulter Afrikanischer Elefant. Ansicht von medial. Pp Präpollex, Sk Sohlenkissen. 1, 2, 3 Zehennägel der ersten, zweiten und der dritten Zehe.

2.3 Untersuchungen mittels bildgebender Verfahren

Die moderne bildgebende Diagnostik wird auch beim Elefanten immer wichtiger zur weiterführenden Diagnostik von Fußproblemen. MIKOTA et al. (1994a) erläuterten die „Medizinische Versorgung des Elefanten“, und ergänzten ihre Schilderungen 2006 um chirurgische Eingriffe beim Elefanten (FOWLER und MIKOTA, 2006). HILL (1938) beschrieb das Exterieur eines Asiatischen Elefantenfetus und fertigte Röntgenbilder an. Der adulte Ellbogen eines Asiatischen Elefanten wurde von FLACH et al. (1994) dargestellt. HITTMAIR und VIELGRADER (1999, 2000) diagnostizierten diverse pathologische Veränderungen der distalen Extremitäten von Afrikanischen Elefanten anhand von Röntgenbildern.

Die distalen Extremitäten von juvenilen Asiatischen Elefanten wurden von SIEGAL-WILLOTT et al. (2008) zur Bestimmung des Zeitpunktes des Epiphysenfugenschlusses bzw. der Ossifikation der Zehenknochen radiologisch untersucht, wodurch die Altersbestimmung und die Diagnose von häufig auftretenden pathologischen Veränderungen erleichtert wurde.

Die Knochen der Vorder- und Hinterextremitäten des Asiatischen Elefanten verkalken bereits beim Fetus, distal allerdings deutlich später als proximal (MARIAPPA, 2005). Der Zeitpunkt des Epiphysenfugenschlusses der humanen Hand / des humanen Fußes erfolgt bei männlichen Individuen später als bei weiblichen (WHITAKER et al., 2002). Dem stimmten SIEGAL-WILLOTT et al. (2008) den Asiatischen Elefanten betreffend und FOWLER (2001) den Afrikanischen und den Asiatischen Elefanten betreffend zu und sahen darin eine Erklärung für die besondere Größe männlicher Afrikanischer Elefanten. Für ihre biomechanischen Lokomotionsanalysen führten HUTCHINSON et al. (2005, 2008) Computertomographie, Magnetresonanztomographie und sonographische Messungen durch. WEISSENGRUBER et al. (2004, 2006a, b) und EGGER et al. (2008) untersuchten bei Loxodonta africana die anatomischen Besonderheiten des Elefantenfußes inklusive der Histologie der Sohlenkissen und stellten die anatomischen Gegebenheiten zeichnerisch mittels Computertomographie (CT) und Magnetresonanztomographie (MRT) dar.

2.4 Vergleichende Anatomie der Gelenke der Vorderextremität bei Säugetieren

NICKEL et al. (2003) beschrieben drei Fußungsarten bei Haussäugetieren:

- Plantigrad beim Sohlengänger, wie z. B. Bär und Mensch, deren gesamter Fuß auftritt;
- digitigrad beim Zehengänger, wie z. B. Fleischfresser;
- unguligrad beim Zehenspitzengänger, wie z. B. Pferd, Wiederkäuer und Schwein.

Durch die Aufrichtung des Fußes kommt es während der Phylogenese zu einer Reduktion der Strahlen. Hier unterscheidet man wiederum zwischen der Entstehung von Paarzehern (Artiodaktyla) mit gleichmäßig ausgebildetem 3. und 4. Strahl, und Unpaarzehern (Perissodaktyla) mit einem dominanten 3. Strahl (RUTHE, 1961; SALZERT, 1972; NICKEL et al., 2003).

An der Zehenspitze kommt es zu Modifikationen, wie z. B. Nägel und Kissen, die unter anderem in der vorliegenden Arbeit bzw. in der Publikation von WEISSENGRUBER et al. (2006b) beim Afrikanischen Elefanten untersucht wurden. Der Aufbau der Extremitätenspitze bei den Proboscidea ist jenem mancher Perissodactyla (z. B. Tapir und Nashorn) sehr ähnlich (pentadaktyl und plantigrad) (RUTHE, 1961). Bei den sogenannten Subungulaten, zu denen die Elefanten gehören, fanden jedoch einige Modifikationen statt:

- Die Vorderextremität trägt mit Rüssel und Kopf eindeutig mehr Gewicht (60%) als die etwas schwächer ausgebildete Hinterextremität (ALEXANDER et al., 1979).
- Um den schweren Körper zu tragen, sind Vorder- und Hinterextremitäten vertikal aufgerichtet und gestreckt und Humerus und Femur (Stylopodium) sehr lang (RUTHE, 1961; VERSLUYS, 1971).
- Das Autopodium (Manus) ist im Vergleich zu anderen Tieren in der Relation zur Körpergröße am kürzesten.

Die Zehenknochen des Elefanten sind nicht allseitig wie z. B. beim Menschen von äußerer Haut umgeben. Palmar werden die Zehen von einem Sohlenkissen unterlagert, das aus Fettgewebe und fibrösem Bindegewebe besteht. Diese Kissen dienen v. a. zur Stoßdämpfung, aber auch zur Stabilisierung. Aufgrund des gehäuften Vorkommens von Vater-Pacinischen Tastkörpern und von Meissner Körperchen wird angenommen, dass die überraschend hoch sensiblen Sohlen des Elefanten auch sensorische Aufgaben übernehmen (RAMSAY und HENRY, 2001; WEISSENGRUBER et al., 2006b).

2.4.1 Schultergelenk (Articulatio humeri)

Das Schulter- oder Buggelenk ist ein einfaches Gelenk, eine Articulatio simplex. Es ist bei Haussäugetieren kongruent und seiner Form nach ein Kugelgelenk (Articulatio sphaeroidea) (NICKEL et al., 2003). MARIAPPA (1955a) beschrieb das Schultergelenk des Asiatischen Elefanten als Enarthrose (Nussgelenk).

Die kleinere und relativ flache Cavitas glenoidalis scapulae, deren freier Rand von einem faserknorpeligen Saum (Labrum glenoidale) vergrößert wird, artikuliert mit dem konvexen Caput humeri (LIEBICH et al., 2009b). Beim Menschen können von diesem Labrum glenoidale ausgehend meniskoide Falten ausgebildet sein (TILLMANN, 2002b).

Die Cavitas glenoidalis der Scapula des Elefanten ist in craniocaudaler Richtung elliptisch und flach (MARIAPPA, 1955a; SMUTS und BEZUIDENHOUT, 1993). Das Caput humeri ist in craniocaudale Richtung längsoval und undeutlich durch ein Collum humeri vom Corpus abgesetzt (MARIAPPA, 1955a, SMUTS und BEZUIDENHOUT, 1993).

Die Gelenkkapsel (Capsula articularis) ist weit, sie besitzt beim Fleischfresser zwei craniale und eine caudolaterale, beim Pferd drei craniale und zwei caudolaterale Ausbuchtungen (NICKEL et al., 2003; LIEBICH et al., 2009b).

Die Ligg. glenohumeralia der Haussäugetiere sind aus kollagenen und elastischen Fasern bestehende Gelenkkapselverstärkungen, die beim Pferd in der cranialen und als Besonderheit beim Hund in der medialen und lateralen Wand der Schultergelenkkapsel vorkommen (NICKEL et al., 2003; NAV, 2005). Das Lig. glenohumerale mediale des Hundes trennt den Recessus m. subscapularis in einen lateralen und einen medialen Teil (GANZBERGER et al., 1995). Beim Menschen können cranial drei Verstärkungen beschrieben werden, nämlich die Ligg. glenohumeralia superius, mediale und inferius. Ein Lig. coracohumerale zieht vom Processus coracoideus über den proximalen Teil des Sulcus intertubercularis zu den Tubercula majus und minus. Ein Lig. coracoglenoidale stellt das Rudiment des M. pectoralis minor dar (DRENCKHAHN, 1994b; TILLMANN, 2002b).

Am Schultergelenk von Haussäugetieren sind Endsehnen von Muskeln als kontraktile Spannbänder anstelle von Seitenbändern ausgebildet, nämlich medial jene des M. subscapularis und lateral die Sehne des M. infraspinatus, die vom M. supraspinatus unterstützt wird. Somit wird das Schultergelenk funktionell zu einem Wechselgelenk (NICKEL et al., 2003; LIEBICH et al., 2009b).

MARIAPPA (1955a, 2005) definierte am Schultergelenk des Asiatischen Elefanten folgende Bänder:

Ein Lig. coracohumerale verläuft schräg und breiter werdend vom Proc. coracoideus zur Tuberositas medialis humeri.

Die Tuberositas lateralis und medialis werden durch ein Lig. transversum humeri miteinander verbunden und die Bizepssehne im Sulcus intertubercularis gehalten. Das Ligamentum transversum humeri wird entsprechend der NAV (2005) in der vorliegenden Arbeit als „Retinaculum transversum“ bezeichnet.

Ein craniales, ein laterales und ein caudales Lig. glenohumerale entspringen von der Cavitas glenoidalis und setzen cranial am Tuberculum majus, lateral an der Gelenkkapsel und caudal am Humerus an.

Ein Lig. capsulare verläuft als Kapselverstärkung zwischen Cavitas glenoidalis und Caput humeri. Lateral und cranial ist es stärker entwickelt als medial. Sein Faserverlauf ist zirkulär (MARIAPPA, 1955a).

Als Besonderheit ist am Schultergelenk des Menschen eine sogenannte Rotatorenmanschette ausgeprägt. Sie wird von den Mm. supraspinatus, infraspinatus, teres minor und subscapularis gebildet. Die Fasern der beteiligten Muskeln strahlen in die Gelenkkapsel ein und sind mit ihr bis zu ihrem Ansatz am Humerus untrennbar verbunden, was eine Spannung der Kapsel bewirkt (TILLMANN, 2003). Beim Elefanten bedeckt eine dicke Faszie die distalen Enden der Mm. supraspinatus, infraspinatus und deltoideus und setzt an der Spina scapulae und am Knorpel der Scapula an (MARIAPPA, 2005).

Ein dickes fasziales Band zieht vom Acromion über den M. supraspinatus und bedeckt breiter werdend den M. biceps brachi cranial. Distal des M. deltoideus teilt es sich, wobei beide Äste lateral und medial entlang dem M. brachioradialis verlaufen. Der laterale Ast breitet sich über dem M. triceps brachi und den Extensoren des Unterarmes aus und setzt am Epicondylus lateralis humeri und am Olecranon an. Der mediale Ast bedeckt ebenfalls breiter werdend die Flexoren des Unterarmes (MARIAPPA, 2005).

Die Ursprungssehne des **M. biceps brachii** weist von Tierart zu Tierart strukturelle Unterschiede auf. Bei den Hausfleischfressern, beim Schwein und beim Schaf verläuft sie innerhalb der Gelenkkapsel und ist von einem Mesotendineum, einer Ausstülpung der Membrana synovialis, umhüllt. Die Bizepssehne ist bei Ziege, Rind, Pferd und z. B. auch beim Tapir von einer Bursa intertubercularis unterlagert und befindet sich außerhalb der Gelenkkapsel (WELCKER, 1878 zitiert nach NAUCK, 1938; NICKEL et al., 2003). Beim humanen Schultergelenk wird die Bizepssehne im Sulcus intertubercularis von einer Ausstülpung der Gelenkkapsel umhüllt (Vagina synovialis intertubercularis). Diese Struktur wird von einem Retinaculum transversum, das sich quer über den Sulcus intertubercularis erstreckt, in Lage gehalten (DRENCKHAHN, 1994b; NAV, 2005). Der M. biceps brachii des Elefanten entspringt sehnig lateral am Processus coracoideus scapulae, zieht durch den Sulcus intertubercularis humeri, wo er vom Retinaculum transversum bedeckt wird (EALES, 1928; SHINDO und MORI, 1956; MARIAPPA, 2005). Distal des Sulcus intertubercularis humeri wird der M. biceps brachii zu einem langgezogenen Muskel, dessen Endsehne sich distal des Ellbogens teilt und medial an Radius bzw. Ulna ansetzt (EALES, 1928; SHINDO und MORI, 1956; MARIAPPA, 2005). Weiters verbindet sich ein dritter sehniger Teil als **Lacertus fibrosus** mit der Vorderarmfaszie (EALES, 1928), ohne sich wie z. B. beim Pferd mit dem M. ext. carpi radialis zu vereinigen (EALES, 1928; SCHALLER und FORSTENPOINTNER, 1987).

MARIAPPA (1955b, 2005) beschrieb zwei Muskeln der Gelenkkapsel. Ein sehr kleiner cranialer und ein gut ausgebildeter caudaler M. capsularis, der bisher nur bei PATTERSON und DUN (1912) als „M. subglenoidalis“ unter dem M. subscapularis liegend beschrieben wurde (MARIAPPA, 1955b).

Der „**M. capsularis posterior**“ (MARIAPPA, 1955a) entspringt proximal der Cavitas glenoidalis und wird bis zu seinem Ansatz caudal am Humerus breiter. Der „**M. capsularis anterior**“ ist ein schmaler dreieckiger Muskel, der vom Processus coracoideus zur Schultergelenkkapsel zieht (MARIAPPA, 1955a, 2005). In der Veterinäranatomie wird ein kleiner M. articularis humeri caudal des Schultergelenkes bei Rind, Schwein und Pferd beschrieben (SCHALLER, 2007).

Durch die längsovale Form des Caput humeri und der Cavitas glenoidalis beim Elefanten ist die Hauptbewegung des Schultergelenkes eine Flexion bzw. Extension, daneben besteht eine geringe Adduktions- bzw. Abduktionsmöglichkeit (BLAIR, 1710; MARIAPPA, 1955a, 2005).

2.4.2 Ellbogengelenk (Articulatio cubiti)

Bei den Haussäugetieren und beim Elefanten handelt es sich hier um ein zusammengesetztes Scharniergelenk (Ginglymus), bestehend aus der Articulatio humeroradialis, der Articulatio humeroulnaris und der Articulatio radioulnaris proximalis (BLAIR, 1710; MARIAPPA, 1955a, 2005; TILLMANN, 2002; NAV, 2005). Die Trochlea des Condylus humeri artikuliert mit der Fovea articularis (TILLMANN, 2002a) bzw. capitis (SMUTS und BEZUIDENHOUT, 1993) des Radius bzw. der Incisura trochlearis der Ulna, die gemeinsam von einer Gelenkkapsel umgeben werden (SMUTS und BEZUIDENHOUT, 1993; TILLMANN, 2002a). Die prominenten Humeruscondylen sind beim Asiatischen Elefanten durch eine flache „Fossa intercondylaris“ getrennt (MARIAPPA, 1955a).

Die **Gelenkkapsel** ist cranial dick und caudal dünn. Sie setzt um die Fossa olecrani caudal und um die Fossa supratrochlearis cranial am Humerus an. Die Synovialmembran ist um den Gelenkspalt sehr dick (MARIAPPA, 2005).

Gelenkbänder:

Das Lig. collaterale cubiti laterale ist bei allen Haussäugetieren zweischenkelig, nur beim Pferd einschenkelig ausgebildet.

Das Lig. collaterale cubiti mediale ist beim Fleischfresser, bei den Wiederkäuern und beim Pferd zweischenkelig, bei den beiden letzteren bildet der craniale Schenkel das Rudiment des M. pronator teres (GHETIE und RIGA, 1944/45; NICKEL et al., 2003; NAV, 2005; SCHALLER, 2007).

Beim Hund befindet sich medial am Ellbogengelenk das mit der Gelenkkapsel verwachsene elastische Lig. olecrani (NICKEL et al., 2003; NAV, 2005; SCHALLER, 2007).

Inkongruenzen im Gelenk werden beim humanen Ellbogengelenk durch fettreiches Bindegewebe bzw. Ausstülpungen der Gelenkkapsel, die viel Fett enthalten, ausgeglichen. Hier sind auch vermehrt Synovialzotten ausgebildet (TILLMANN, 2002).

Das Lig. anulare radii fixiert den Radius an der Ulna und vergrößert die Gelenkfläche des proximalen Radius. Es ist nur bei Tieren ausgebildet, deren Unterarm Supinations- und Pronationsbewegungen ausführen kann (NAUCK, 1938; NAV, 2005; SCHALLER, 2007). Beim Menschen ist es ein starkes Band mit kontinuierlichem Übergang in die Gelenkkapsel (TILLMANN, 2002; DAUBER, 2008).

Beim Asiatischen Elefanten beschrieb MARIAPPA (2005) folgende Bandstrukturen:

Das dünne, nach distal breiter werdende Lig. collaterale cubiti laterale und das dicke und breite Lig. collaterale cubiti mediale. Das „Lig. elasticum craniale“ besteht beim Asiatischen Elefanten aus dicken elastischen Fasern, die cranial die Gelenkkapsel stärken (MARIAPPA, 2005).

Zu den **Muskeln** des Ellbogengelenkes werden der M. brachialis, der M. biceps brachii, der M. triceps brachii und der M. tensor fasciae antebrachii gezählt. Sie entspringen an Humerus bzw. Scapula und setzen proximal an Radius bzw. Ulna an. Somit sind sie ein- bzw. zweigelenkig. Durch eingelagerte Sehnen wird die Stützfunktion verstärkt (SALOMON, 1987; NICKEL et al., 2003; LIEBICH et al., 2009b).

Der **M. tensor fasciae antibrachii** des Elefanten ist ein langer und flacher Muskel, der aponeurotisch cranial des Ursprunges des Caput longum des M. triceps brachii an der Fossa infraspinata der Scapula entspringt und sehnig mit den Endsehnen der Capiti mediale und longum des M. triceps brachii verbunden am Olecranon ansetzt (MARIAPPA, 2005). Der sehr kräftige **M. triceps brachii** besteht aus einem Caput longum, einem Caput laterale und einem Caput mediale (EALES, 1928; SHINDO und MORI, 1956; MARIAPPA, 2005).

Die sehr tiefe Fossa olecrani des Humerus des Elefanten erleichtert die Aufnahme des Olecranons und somit eine starke Streckung des Ellenbogengelenkes. Cranial nimmt die Fossa radialis bei starker Beugung den Radius auf (VERSLUYS, 1971; NICKEL et al., 2003).

Beim Elefanten ist die Lage von Humerus und Radius bzw. Ulna zueinander annähernd vertikal. Beim Gehen wird diese Winkelung sogar cranial konvex, weil Radius bzw. Ulna aus dem Ellenbogengelenk „subluxieren“ (RUTHE, 1961).

Funktionell stellt das Ellbogengelenk durch eine Bewegungsreduktion auf Flexion und Extension ein Wechselgelenk dar (NICKEL et al., 2003).

2.4.3 Verbindungen von Radius und Ulna (Articulationes radioulnares)

Radius und Ulna sind bei den Haussäugetieren über die Articulatio radioulnaris proximalis und beim Vorhandensein einer vollständig ausgebildeten Ulna (Fleischfresser) über die Articulatio radioulnaris distalis verbunden (DRENCKHAHN, 1994b; NICKEL et al., 2003). Beim Elefanten ist die Ulna fast fünfmal schwerer als der Radius, beide Unterarmknochen sind in Pronationsstellung fixiert (MARIAPPA, 1955a, 2005; SMUTS und BEZUIDENHOUT, 1993; SCHWERDA, 2003).

Beim **proximalen Radioulnargelenk** artikulieren die Incisura radialis ulnae, die Circumferentia articularis radii, sowie beim Menschen und beim Fleischfresser zusätzlich das Lig. anulare radii (SMUTS und BEZUIDENHOUT, 1993; DRENCKHAHN, 1994b; TILLMANN, 2002; NICKEL et al., 2003).

Über eine gemeinsame Capsula articularis steht die Articulatio radioulnaris proximalis bei den Haussäugetieren mit dem Ellbogengelenk in offener Verbindung (NICKEL et al., 2003). Die proximale Artikulationsfläche der Unterarmknochen ist beim Asiatischen Elefanten schmal und länglich (MARIAPPA, 1955a). Das proximale Radioulnargelenk wird auch beim Asiatischen Elefanten von der Gelenkkapsel des Ellbogengelenkes miteingeschlossen (MARIAPPA, 2005).

Die **Articulatio radioulnaris distalis** steht bei den Haussäugetieren mit dem Carpalgelenk in offener Verbindung (NICKEL et al., 2003). Beim Asiatischen Elefanten ist laut MARIAPPA (2005) das distale Radioulnargelenk eine Diarthrose, wobei die „abgeflachten" Epiphysen von Radius und Ulna miteinander kommunizieren. Die distale Gelenkfläche des Radius bzw. der Ulna ist beim Asiatischen Elefanten „oval" und deutlich größer als die der Articulatio radioulnaris proximalis. Die Gelenkkapsel umgrenzt die Gelenkfläche eng und enthält kurze Fasern (MARIAPPA, 1955a).

Die „**Articulatio radioulnaris media"** stellt eine Syndesmose zwischen Radius und Ulna dar (MARIAPPA, 1955a, 2005). Die Unterarmknochen der Haussäugetiere und des Elefanten werden durch die Membrana interossea antebrachii verbunden, welche bei Wiederkäuern und beim Pferd im Alter verknöchert und beide Unterarmknochen in Pronationsstellung fixiert (NICKEL et al., 2003; MARIAPPA, 1955a, 2005). Ein Lig. anulare radii ist nur beim Fleischfresser und beim Menschen ausgebildet. Es verläuft von einem Proc. coronoideus ulnae zum anderen um den Radius. Beim Fleischfresser verbindet das Lig. radioulnare cranial die distalen Enden von Radius und Ulna miteinander (NICKEL et al., 2003). Beim Menschen fehlt ein Lig. radioulnare wegen der weitgehend uneingeschränkten Pronations- bzw. Supinationsbeweglichkeit der Hand (HENSCHEL, 1972).

Muskeln:

Die Muskeln der Radioulnargelenke sind bei einer starren Verbindung zwischen Radius und Ulna sehr schwach ausgebildet (SALOMON, 1987; NICKEL et al., 2003).

Der **M. brachioradialis** und der **M. supinator** bewirken eine Supination, der **M. pronator teres** und der **M. pronator quadratus** eine Pronation. Sie sind jedoch nur beim Fleischfresser voll entwickelt (NICKEL et al., 2003; LIEBICH et al., 2009b).

Beim Elefanten ist ein **M. brachioradialis** ausgebildet, der vom Tuberculum majus humeri zum Radius zieht (MIALL und GREENWOOD, 1879; SHINDO und MORI, 1956). Der **M. supinator** zieht von der Faszie des M. brachialis bzw. vom Collum humeri zum Os carpi intermedium (EALES, 1928; MARIAPPA, 1955b). Der **M. pronator teres** des Asiatischen Elefanten wird als gut entwickelter Muskel beschrieben, der mit dem medialen Kollateralband des Ellbogens verwachsen ist. Er entspringt am Epicondylus medialis des Humerus und inseriert caudomedial der Radiusmitte (MIALL und GREENWOOD, 1879; SHINDO und MORI., 1956; MARIAPPA, 2005). Nach HOLM NIELSEN (1965) fehlt dem Asiatischen Elefanten ein **M. pronator quadratus**.

2.4.4 Carpalgelenk (Articulatio carpi)

Die Articulatio carpi ist ein zusammengesetztes Gelenk, das aus drei Gelenketagen besteht.

Proximal befindet sich die Articulatio antebrachiocarpea, wo beim Asiatischen Elefanten die distalen Enden von Radius und Ulna mit den Ossa carpi radiale, intermedium, ulnare und accessorium artikulieren (MARIAPPA, 1955a). Distal gelenken in der straffen Articulatio carpometacarpea die distalen Gelenkflächen der distalen Carpalknochen, bestehend aus den Ossa carpalia I, II, III und IV, mit den proximalen Gelenkflächen der Ossa metacarpalia I, II, III, IV und V (MARIAPPA, 1955a). Die proximale Reihe der Carpalknochen ist mit der distalen in der Articulatio mediocarpea gelenkig verbunden. Innerhalb einer Gelenkreihe kommunizieren die Knochen im Allgemeinen über straffe Articulationes intercarpeae (NICKEL et al., 2003; LIEBICH et al., 2009b). Beim Asiatischen Elefanten artikuliert die Facies articularis carpea der Ulna mit dem dorsolateralen Teil des Os carpi intermedium, dem Os carpi ulnare und dem Os carpi accessorium (MARIAPPA, 1955a; SMUTS und BEZUIDENHOUT, 1993) und die Trochlea des Radius mit dem Os carpi radiale und dem Os carpi intermedium (SMUTS und BEZUIDENHOUT, 1993).

Die beiden proximalen Gelenke sind Wechsel- bzw. Walzengelenke (Flexion und Extension) und werden beim Asiatischen Elefanten als Ginglymus bezeichnet, während die Articulatio carpometacarpea ein straffes Gelenk darstellt (MARIAPPA, 1955a; NICKEL et al., 2003; LIEBICH et al., 2009b).

Die Metacarpalknochen der Haussäugetiere und des Elefanten sind proximal durch synoviale Articulationes intermetacarpeae verbunden, die beim Fleischfresser und beim Schwein noch eine gewisse Beweglichkeit besitzen. Bei den Wiederkäuern, beim Pferd und beim Elefanten sind die Hauptmittelfußknochen mit den Knochen der Nebenstrahlen straff über Ligg. metacarpeae verbunden und bilden somit Syndesmosen (MARIAPPA, 1955a; NICKEL et al., 2003).

Der Carpus besteht ursprünglich aus vier proximalen und vier distalen Knochen, die proximal mit dem Radius bzw. der Ulna und distal mit den Metacarpalknochen gelenkig verbunden sind (SCHLOSSER, 1890). Eine Stabilitätserhöhung der Handwurzel erfolgt bei Raubtieren durch die Verschiebung der abaxialen Carpalknochen zur Medianen hin (SCHLOSSER, 1890). Bei Huftieren wird dieser Effekt durch ein Verschieben der zweiten zur ersten Reihe, und durch Rückbildung der abaxialen Carpalien in der Reihenfolge: 1, 5, 2, 4 (NAUCK, 1938) bzw. 1, 5, 4, 2 (LEUTHARDT, 1891; zitiert nach NAUCK [1938]) erreicht. SMUTS und BEZUIDENHOUT (1993) beschrieben am Carpus des Elefanten acht Carpalknochen, die in zwei Reihen angeordnet sind. Die proximale Reihe besteht von medial nach lateral aus den Ossa carpi radialis, intermedium, ulnare und accessorium. Die distale Reihe besteht von medial nach lateral aus den Ossa carpalia I, II, III und IV. Es sind fünf Metacarpalknochen vorhanden, wobei das Os metacarpale III am stärksten und längsten ausgebildet ist, gefolgt von den Ossa metacarpalia II und IV und den Ossa metacarpalia I und V (MARIAPPA, 1955a; SMUTS und BEZUIDENHOUT, 1993). GAWRILENKO (1924) und WEBER (1928) beschrieben die Evolution des Carpus der „Proboscidier“ besonders im Hinblick auf die seriale bzw. aseriale Anordnung der Carpalknochen und die Reduktion der abaxialen Knochenteile bzw. Stärkung der Mittelachse. Eine sogenannte seriale Anordnung bedeutet, dass ein Knochen der proximalen Reihe nur mit einem der distalen gelenkt.

Die seriale Anordnung der Carpalknochen beim Afrikanischen Elefanten wurde von NEUVILLE (1946), RUTHE (1961), DUBROVO und JAKUBOWSKI (1988) und SHOSHANI (2000) beschrieben.

GARUTT et al. (1951) fanden eine aseriale Anordnung der Carpalknochenreihen bei Mammuthus primigenius (Wollhaarmammut, BLUMENBACH 1799), ANDREWS und COOPER (1928) und DUBROVO und JAKUBOWSKI (1988) bei Elephas antiquus (Europäischer Waldelephant) und KROLL (1947) bei E. maximus.

Eine weitere Ansicht ist, dass der Carpus des Elefanten (Elephas africanus, Elephas indicus und Elephas primigenius) eine teils seriale und teils aseriale Anordnung besitzt (WEITHOFER, 1889). Diese Entwicklung einer ursprünglich serialen Anordnung in eine sekundär aseriale Anordnung begründete WEITHOFER (1889) durch die Verschiebung der proximalen Carpalknochen nach medial. Der aseriale Carpus besitzt mehr Festigkeit (WEITHOFER, 1889). GAWRILENKO (1924) erklärte die Reduktion der 1. Zehe durch die Entwicklung der „Proboscidier“ von der Semi-Plantigradie zur Digitigradie. Dadurch wird die Vorderextremität bei „Elephas indicus“ und Loxodonta africana tetradactyl. Auch die sekundär aseriale Anordnung der Carpalknochen des Asiatischen Elefanten soll mit einer Reduktion von Strahlen in Zusammenhang stehen (GAWRILENKO, 1924). Bei Haussäugetieren ist die Anordnung der Carpalknochen aserial (NICKEL et al., 2003).

Gelenkkapsel:

Die Gelenkkapsel der Articulatio antebrachiocarpea ist dorsal weit ausgebuchtet und umfasst beim Fleischfresser und beim Schwein auch die Art. radioulnaris distalis (NICKEL et al., 2003). Die Capsula articularis der Articulatio mediocarpea ist ebenfalls ausgebuchtet, jene der distalen Etage hingegen straff (NICKEL et al., 2003).

Gelenkbänder:

Dorsal wird die Gelenkkapsel beim Menschen und bei den Haussäugetieren von einem Retinaculum extensorum verstärkt, palmar von einem Retinaculum flexorum. Beide verbinden sich mit den Sehnenscheidenfibrosae der Streck- bzw. Beugesehnen.

Seitlich am Carpalgelenk sind bei den Haussäugetieren starke Ligg. collateralia entwickelt. Beim Fleischfresser wird nur der proximale Gelenkspalt von Seitenbändern überbrückt (NICKEL et al., 2003; LIEBICH et al., 2009b). Beim Asiatischen Elefanten sind ein laterales und ein mediales Kollateralband ausgebildet (MARIAPPA, 2005).

Das Lig. radiocarpeum dorsale verkehrt beim Fleischfresser und beim Wiederkäuer dorsal zwischen dem Radius und dem Os carpi ulnare.

Das Lig. carpi palmare profundum besteht aus den eng untereinander verbundenen Ligg. radiocarpeum palmare, ulnocarpeum palmare und carpi radiatum (NICKEL et al., 2003).

Zur Befestigung des Os carpi accessorium sind bei den Haussäugetieren folgende Bänder ausgebildet (NICKEL et al., 2003): Das Lig. accessorioulnare liegt am weitesten proximal. Es strahlt beim Fleischfresser gemeinsam mit dem Lig. accessoriocarpoulnare in das Lig. ulnocarpeum palmare ein. Zudem ist das Os carpi accessorium über das Lig. accessoriocarpoulnare mit dem Os carpi ulnare bzw. beim Schwein und beim Wiederkäuer zusätzlich mit dem Os carpi intermedium verbunden. Das Lig. accessoriometacarpeum inseriert am lateralen Os metacarpale bzw. beim Fleischfresser mit einem weiteren Schenkel am Os metacarpale IV (NICKEL et al., 2003). Wiederkäuer und Pferd besitzen als Verbindung zum Os carpale IV ein Lig. accessorioquartale (NICKEL et al., 2003).

Zu den kreuz und quer verlaufenden und teilweise miteinander verwachsenen Intercarpalbändern (Ligg. intercarpea) zählen folgende Strukturen: Die transversal bzw. quer zur Gliedmassenlängsachse verlaufenden Ligg. intercarpea dorsalia sind bei allen Haussäugetieren und beim Asiatischen Elefanten ausgebildet, proximodistal verlaufende Ligg. intercarpea dorsalia fehlen dem Pferd (NICKEL et al., 2003; MARIAPPA, 2005; NAV,

2005). Die Ligg. intercarpea palmaria sind unterschiedlich stark und teils schwer von anderen Bändern wie dem Lig. radio- bzw. ulnocarpeum palmare oder dem Lig. carpi radiatum zu isolieren (NICKEL et al., 2003; NAV, 2005).

Beim Asiatischen Elefanten werden die Carpalknochen wie folgt durch Bänder verbunden (MARIAPPA, 1955a, 2005): Vom Os carpi ulnare zum Os metacarpale V, vom Os carpi accessorium zum Os metacarpale V, vom Os carpale IV zum Os metacarpale IV und V, vom Os carpale I zum Os metacarpale II, vom Os carpale IV zum Os metacarpale III, vom Os carpi radialis zum Os carpale I und vom Os carpale I zum Os metacarpale I.

Palmar am Os carpale III und am Os carpale IV entspringende Bänder setzen strahlenförmig an allen Carpalknochen an. MARIAPPA beschrieb vom Os carpale III ausgehend folgende Bänder: Ein Band zum Os carpi accessorium, eines zum Os carpi ulnare, eines zum Os carpi intermedium, eines zum Os carpi radialis und jeweils ein Band zu jedem Metacarpalknochen. Ein weiteres Band entspringt am Os carpale I und zieht zum Os metacarpale II (MARIAPPA, 1955a, 2005).

Bei den Haussäugetieren sind die einzelnen Carpalknochen durch kurze und starke Ligg. intercarpea interossea untereinander verbunden (NICKEL et al., 2003). Beim Asiatischen Elefanten sind ebenfalls kurze Ligg. intercarpea interossea ausgebildet, drei in der proximalen Reihe, vier in der distalen Reihe (MARIAPPA, 2005).

Zur straffen Verbindung der Ossa carpalia mit den Metacarpalknochen befinden sich bei den Haussäugetieren dorsal bzw. palmar die Ligg. carpometacarpeae (NICKEL et al., 2003).

Die Metacarpalknochen sind beim Elefanten im Gegensatz zu den Metatarsalknochen eher vertikal angeordnet (SHOSHANI, 2000; FOWLER und MIKOTA, 2006). Zwischen den Metacarpalknochen beschrieb MARIAPPA (2005) beim Asiatischen Elefanten syndesmotische Verbindungen.

Lange und spindelförmige Muskeln sorgen bei den Haussäugetieren für eine fast ausschließliche Extension und Flexion des Carpus. Zu diesen Muskeln zählen die Mm. extensor carpi radialis, extensor carpi ulnaris, flexor carpi radialis und flexor carpi ulnaris (SALOMON, 1987; NICKEL et al., 2003; LIEBICH et al., 2009b).

Die Unterarmfaszie des Elefanten besteht aus einem superfizialen Teil, der aus dicken und elastischen Fasern besteht, und einem sehr dicken tiefen Teil, der Septen zwischen die dort liegenden Muskeln bildet. Ein schräges Band zieht vom lateralen Epicondylus humeri zur distalen Ulna und trennt somit den M. dig. communis und den M. ext digiti V (MARIAPPA, 1955b).

2.4.5 Zehengelenke (Artt. metacarpophalangeae, interphalangeae proximales, interphalangeae distales)

Die fünf Zehen des Elefanten sind durch kollagenes Bindegewebe eng miteinander verbunden (EALES, 1928; NEUVILLE, 1935).

BLAIR (1710) beschrieb erstmals den Präpollex als rudimentäre sechste Zehe, die nach seinen Angaben aus mehreren Zehengliedern besteht. Der Präpollex besteht nach den Angaben von MARIAPPA (2005) beim Fetus aus hyalinem Knorpel. Nach WEISSENGRUBER et al. (2006b) erhöht der Präpollex die Stabilität des Carpus. Der Präpollex ist nach HUTCHINSON et al. (2008) knorpelig aufgebaut, der jedoch mit zunehmendem Alter mehr und mehr verkalkt. Nach MILLER et al. (2007) ist die Funktion des Präpollex unter Belastung bzw. Bewegung die einer „axialen Kompression“. Über den relativ stark ausgebildeten Präpollex werden die Kräfte, die bei Belastung auf die Hand wirken, vertikal gerichtet, auf die Sohlenkissen übertragen und von diesen abgefangen (MILLER et al., 2007).

Die ursprüngliche Anzahl der Phalanges bei Säugetieren ist 2-3-3-3-3 (NAUCK, 1938). Die Reduktion der Zehenanzahl führt NAUCK (1938) allgemein auf Digitigradie, die kurze und dicke Form der Phalanges des Elefanten auf die starke Belastung zurück.

MARIAPPA (2005) beschrieb die Reduktion der Anzahl der Glieder der ersten und der fünften Zehe auf zwei Phalanges. Die lateralen Zehenknochen sind tendenziell stärker ausgebildet als die medialen, die dritte Zehe ist am stärksten und somit als Hauptzehe zu betrachten (MILLER et al., 2007).

Beim Afrikanischen Elefanten beschrieben SMUTS und BEZUIDENHOUT (1993) fünf Zehen, wobei nur an der zweiten, der dritten und der vierten Zehe alle drei Zehenglieder entwickelt sind. Die Phalanges distales artikulieren nicht direkt mit den entsprechenden Phalanges mediae. Die distalen Zehenglieder sind mit dem Corium des zugehörigen Zehennagels fest verbunden (WEISSENGRUBER et al., 2006b) und von den Phalanges mediae durch ein relativ dickes Bindegewebskissen getrennt (SMUTS und BEZUIDENHOUT, 1993). Die erste Zehe besteht aus einer Phalanx mit nur einem Sesambein (SMUTS und BEZUIDENHOUT, 1993). Alle anderen Zehengrundgelenke beinhalten jeweils zwei Sesambeine palmar der Trochlea der Ossa metacarpalia II - V. Da eine Phalanx distalis der fünften Zehe fehlt, endet die Phalanx media der fünften Zehe in einer axial gerichteten stumpfen Spitze (SMUTS und BEZUIDENHOUT, 1993). PERRAULT (1734) beschrieb das Vorhandensein von fünf Nägeln am Vorderfuß eines adulten Indischen Elefanten. FOWLER und MIKOTA (2006) beschrieben an der Hand des Afrikanischen Elefanten vier Zehennägel. Die Anlage von vier bzw. fünf Nägeln am Vorderfuß scheint jedoch individuell unterschiedlich zu sein (SHOSHANI, 2000; RAMSAY und HENRY, 2001; MILLER et al., 2007; SIEGAL-WILLOTT et al., 2008).

Die fünf Articulationes metacarpophalangeae des Elefanten bilden einen Ginglymus und inkludieren die zugehörigen Sesambeine (MARIAPPA, 1955a, 2005). Hier artikulieren die Trochleae der Metacarpalknochen mit den proximalen sattelförmigen Artikulationsflächen der Phalanges proximales (MARIAPPA, 1955a, 2005). Die palmare Artikulationsfläche der Metacarpalknochen ist von der weiter dorsal gelegenen Trochlea durch eine transversale Kante getrennt und gelenkt mit den Sesambeinen (MARIAPPA, 1955a, 2005). Die Gelenkkapsel ist dick und bildet zwei Recessus, je einen proximal und einen distal der Sesambeine (MARIAPPA, 1955a, 2005).

Die Sesambeine sind untereinander durch aus fibrösem Knorpel bestehende Bänder verbunden, die eine palmare Führungsrinne für die Endsehnen des tiefen Zehenbeugers bilden (MARIAPPA, 1955a, 2005).

Die proximalen Zehengelenke der zweiten, dritten und vierten Zehe bilden einen Ginglymus und besitzen eine dicke Gelenkkapsel (MARIAPPA, 1955a, 2005).

Die fünf distalen Zehengelenke der zweiten, der dritten und der vierten Zehe bilden ebenfalls einen Ginglymus mit einer besonders engen und dicken Gelenkkapsel (MARIAPPA, 1955a, 2005). MARIAPPA (1955a, 2005) zählte hierzu auch jene Gelenke, die die beiden Phalanges der ersten und der fünften Zehe miteinander bilden. Die Zehen werden durch dicke Interdigitalbänder untereinander verbunden, die als Syndesmosen bezeichnet werden können (SMUTS und BEZUIDENHOUT, 1993, MARIAPPA, 1955a, 2005).

Muskeln:

Die Muskulatur der Hand wird prinzipiell in lange und kurze Zehenmuskeln unterteilt (SALOMON, 1987; NICKEL et al., 2003; LIEBICH et al., 2009b). Aufgrund der Verminderung der Zehenzahl bei Huftieren und der Einschränkung der Beweglichkeit kam es zu einer weitgehenden Reduktion der Muskelfunktion auf Extension und Flexion (SALOMON, 1987; NICKEL et al., 2003; LIEBICH et al., 2009b).

Die **langen Zehenmuskeln** sind die Mm. extensores digitorum communis, digitorum lateralis, pollicis longus, abductor pollicis longus, flexores digitorum superficialis und digitorum profundus (LIEBICH et al., 2009b).

Beim Elefanten entspringt der **M. extensor digitorum communis** am Epicondylus lateralis des Humerus, erweitert sich am Carpus zu einer breiten Sehne und teilt sich am Metacarpus in vier Äste (MIALL und GREENWOOD, 1879; EALES, 1928; MARIAPPA, 1955b, 2005).

Der **M. ext. digiti V** ist ein dicker, runder Muskel, der als fleischige Sehne vom Epicondylus lateralis humeri und vom medioproximalen Ulnarand entspringt. Sein dicker Muskelbauch wird zu einer runden Sehne, die zur fünften Zehe zieht und medial am proximalen und distalen Zehenglied der 5. Zehe inseriert (SHINDO und MORI, 1956; MARIAPPA, 1955b, 2005).

Der **M. ext. indicis et pollicis** entspringt, bedeckt vom M. ext. dig. communis, lateroproximal an der Ulna und teilt sich am Metacarpus in einen medialen Ast, der sich mit der Strecksehne verbindet, und einen lateralen Ast, der sich mit der Abspaltung des M. ext. dig. communis zur zweiten Zehe verbindet (MIALL und GREENWOOD, 1879; MARIAPPA, 1955b, 2005).

Der **M. flex. digitorum communis** (MARIAPPA, 1955b, 2005) ist ein dicker Muskel mit drei Köpfen: Ein superfizialer Kopf entspringt caudal am Olecranon und verbindet sich am Carpus mit einem größeren Kopf, der am „Condylus medialis“ des Humerus entspringt und am Carpus sehnig wird. Der dritte Kopf ist schmal und entspringt in der Tiefe am Condylus medialis humeri und verbindet sich ebenfalls am Carpus mit den beiden anderen Köpfen. Die Beugesehne teilt sich distal der Metacarpalknochen in fünf runde Sehnen, die durch Faszienblätter über die Ossa sesamoidea ziehen und palmar an den distalen Phalanges aller fünf Zehen inserieren.

Als „**M. palmaris longus“** bezeichneten EALES (1928), SHINDO und MORI (1956) und MARIAPPA (1955b, 2005) einen dicken runden Muskel, der am Epicondylus medialis des Humerus entspringt und sich in einen caudalen Teil, der sich mit dem M. flex. carpi ulnaris verbindet, und in einen cranialen Teil, der am Carpus zu einer breiten Sehne wird, spaltet. Der „M. palmaris longus“ zieht unter dem palmaren „Lig. anulare“ durch und wird vom Zehenkissen bedeckt, mit dem er in enger Verbindung steht. Die Sehne des „M. palmaris longus“ teilt sich in fünf Teile auf und inseriert palmar an der distalen Phalanx jeder Zehe (MIALL und GREENWOOD, 1879; EALES, 1928; SHINDO und MORI, 1956; MARIAPPA, 1955b, 2005).

Die Muskeln der fünften Zehe sind einerseits der dünne **M. abductor digiti V**, der medial am Os carpi accessorium bzw. am Os carpale IV „über eine Faszie“ entspringt und an den Ossa sesamoidea der fünften Zehe inseriert, und der ebenso dünne **M. flex. digiti V**, der ebenfalls über eine „Faszie“ am Os carpale IV entspringt und an den Ossa sesamoidea der fünften Zehe ansetzt. Der **M. opponens digiti V** ist ein dünner, „konischer“ Muskel, bedeckt vom M. abductor digiti V, der ebenfalls von der Fascie des Os carpale IV entspringt und palmar am Caput des Os metacarpale V ansetzt (SHINDO und MORI, 1956; MARIAPPA, 1955b, 2005). Anstatt mehrerer **Mm. lumbricales** ist beim Elefanten nur ein sehr dünner Muskel, bedeckt vom M. flex. dig. V, ausgebildet, der aus der Beugesehne auf Höhe des Os carpi accessorium entspringt und am von der Beugesehne gebildeten Faszienblatt der vierten Zehe inseriert (MARIAPPA, 2005). Beim Elefanten sind vier dicke **Mm. interossei palmares** palmar der Ossa metacarpalia I, II, III und IV ausgebildet, die an der palmaren Fascie des Carpus bzw. an den Basen der Metacarpalknochen entspringen und am Caput der jeweiligen Metacarpalia zwischen den Zehen ansetzen. Die Mm. interossei für die erste und die zweite Zehe sind am stärksten ausgebildet (MARIAPPA, 2005).

Die fünfte Zehe wird nach den Angaben von MARIAPPA (1955b, 2005) von 7 Muskeln bewegt, die sich in zwei Extensoren, drei Flexoren, in einen Abduktor und einen „Opponens“ (Gegensteller) gliedern. Die erste Zehe wird von vier Muskeln bewegt, zwei Extensoren und zwei Flexoren (MARIAPPA, 1955b, 2005).

Die **Faszien** an der Vorderextremität des Elefanten sind kaum mit jenen anderer Säugetiere vergleichbar: Sie sind sehr stark ausgeprägt und formen besonders dicke elastische Membranen um die benachbarten Muskeln (MARIAPPA, 1955b, 2005).

3 MATERIAL UND METHODE

Es standen 7 Vorderextremitäten von juvenilen (Alter ca. 3 – 12 Monate) Individuen zur Verfügung, die am Department für Anatomie und Physiologie der Veterinärmedizinischen Fakultät Onderstepoort, Universität Pretoria, Südafrika in Formalin gelagert waren. Diese Tiere wurden während der regulären Keulungsprojekte der 1990er Jahre im Krüger Nationalpark (Südafrika) getötet. Die Extremitäten konnten keinem Geschlecht zugeordnet werden.

Die in Südafrika untersuchten Vorderextremitäten wurden am Department für Anatomie der Veterinärmedizinischen Fakultät Onderstepoort der Universität Pretoria über einen Zeitraum von mehreren Jahren in 30 %igem Formalin gelagert. Ein bis zwei Tage vor Beginn der Präparationen wurden sie unter fließendem Wasser gespült.

Die beiden Vorderextremitäten einer 46-jährigen Elefantenkuh aus dem Schönbrunner Tiergarten, Wien, wurden am Institut für Anatomie der Veterinärmedizinischen Universität Wien präpariert.

Darüber hinaus wurden drei distale Extremitätenenden von adulten Afrikanischen Elefanten untersucht, die von Prof. Dr. Hans Geyer aus dem Veterinäranatomischen Institut der Universität Zürich zur Verfügung gestellt wurden.

Mazerierte Knochenpräparate der Vorderextremitäten einer 37-jährigen Elefantenkuh (Schönbrunner Tiergarten) und Knochenpräparate der bereits oben genannten 46-jährigen Elefantenkuh (Schönbrunner Tiergarten), die nach einer für die vorliegende Arbeit durchgeführten Sektion mazeriert wurden, standen für makroskopisch-anatomische Untersuchungen zur Verfügung.

Alle Gelenke wurden nach den Methoden der makroskopischen Anatomie präpariert und die Ergebnisse schriftlich, fotografisch (Nikon Coolpix SQ, Tokio, Japan, und Casio Exilim EX-Z1050, Tokio, Japan) und zeichnerisch dokumentiert.

Vom Schulter-, Ellbogengelenk und Carpus des 46-jährigen Individuums aus dem Tiergarten Schönbrunn, wurden computertomographische und magnetresonanztomographische Aufnahmen an der Universitätsklinik für Bildgebende Diagnostik der Veterinärmedizinischen Universität Wien hergestellt.

Pathologische Veränderungen wurden in Zusammenarbeit mit Dr. Anna Kübber-Heiss vom Institut für Pathologie und forensische Veterinärmedizin der Veterinärmedizinischen Universität Wien dokumentiert.

Die verwendete anatomische Nomenklatur folgt in der Regel den Angaben in der Nomina Anatomica Veterinaria (NAV, 2005), der Illustrated Veterinary Anatomical Nomenclature (SCHALLER, 2007), bzw. der TERMINOLOGIA ANATOMICA (1998).

3.1 Probenentnahme für die histologischen Untersuchungen

Zur Identifizierung von Gewebearten und zur mikroskopisch-anatomischen Darstellung der Gelenkknorpelschichten wurden die Gelenke zweier Vorderextremitäten und die Phalanges distales der fünften Zehe von zwei weiteren juvenilen Afrikanischen Elefanten einer histologischen Untersuchung am Institut für Histologie und Embryologie der Veterinärmedizinischen Universität Wien unterzogen (Abb. 3, Abb. 4 und Abb. 5). Im Schulter- und Ellbogengelenk wurden pro Gelenkfläche drei von cranial nach caudal durchgehende, ca. 1 cm breite und 0,5 cm dicke Knorpelstreifen (Abb. 3) entnommen. Weiters wurden Proben aus den distalen Gelenkflächen von Radius und Ulna (Abb. 4) und allen Gelenkflächen der Zehengelenke der dritten Zehe entnommen (Abb. 5).

Zur Identifikation der beteiligten Gewebe wurden folgende Strukturen ebenfalls histologisch untersucht: Der Präpollex, die Phalanx distalis der fünften Zehe, die Gelenkkapselfalte zwischen der proximalen und der distalen Reihe des Carpalgelenkes und das sogenannte „Lig. elasticum“ cranial am Ellbogengelenk.

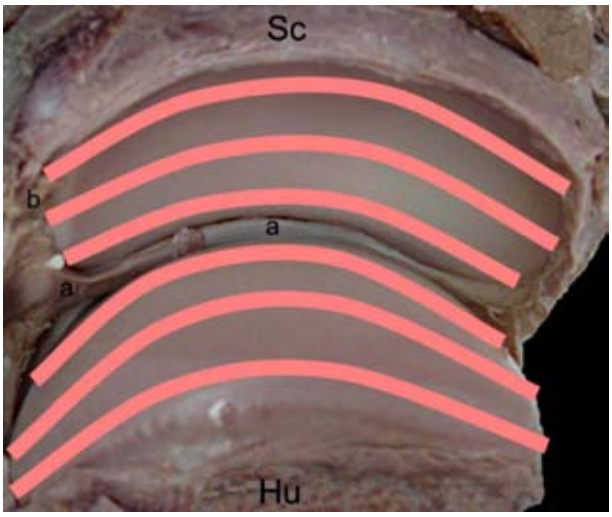

Abb. 3: Rechtes Schultergelenk, adulter Afrikanischer Elefant. Ansicht von medial. Hu Humerus, Sc Scapula. a Gelenkkapselfalte, b Synovialzotten. Rosa: Streifenförmige Probenentnahme für histologische Untersuchungen.

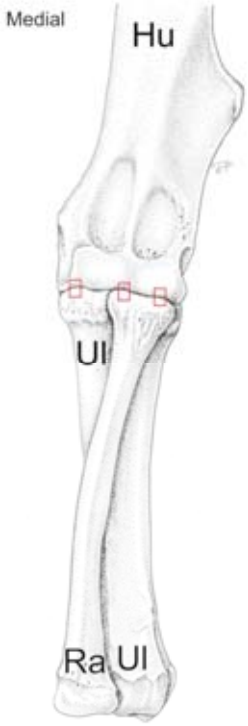

Abb. 4: Distales Ende des Humerus, Radius und Ulna (linke Extremität), adulter Afrikanischer Elefant. Ansicht von cranial. Hu Humerus, Ra Radius, Ul Ulna. Rot: Probenentnahmestellen für histologische Untersuchungen.

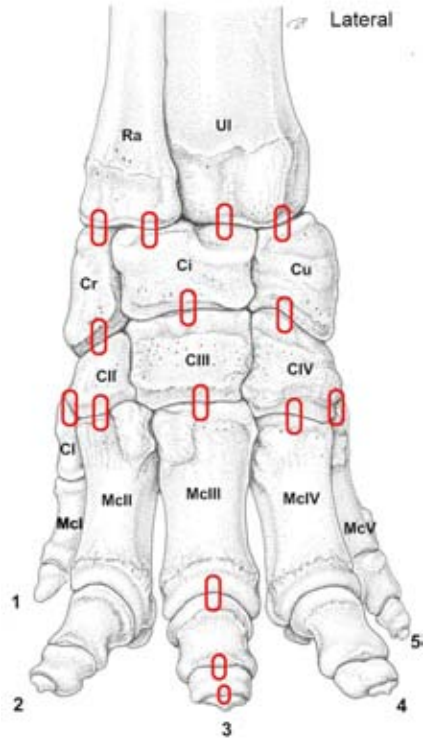

Abb. 5: Knochen eines linken distalen Extremitätenendes, adulter Afrikanischer Elefant. Ansicht von dorsal. 1-2-3-4-5 Zehe 1-2-3-4-5, Ci Os carpi intermedium, Cu Os carpi ulnare, Cr Os carpi radiale, CII – III - IV Ossa carpalia II - III - IV, McI – II – III – IV – V Ossa metacarpalia I – II – III – IV – V, Ra Radius, Ul Ulna. Rot: Probenentnahmestellen für histologische Untersuchungen.

Bearbeitung der Gewebeproben:

Alle Proben für die histologischen Untersuchungen wurden zuerst in einer aus gleichen Teilen Ameisensäure- (125 ml konzentrierte Ameisensäure in 125 ml destilliertem Wasser) und Natriumzitratlösung (50 g Natriumzitrat in 250 ml destilliertem Wasser) bestehenden Lösung über einen Zeitraum von ca. vier Wochen entkalkt. Dies geschah auch mit den nicht mineralstoffhältigen Abschnitten, da das Vorhandensein von Kalk in den Proben nicht ausgeschlossen werden konnte und damit die Ergebnisse nicht durch unterschiedliche Bearbeitung verfälscht werden, obwohl nach KIVIRANTA et al. (1984) keine signifikante Veränderungen in der Anfärbbarkeit von Knorpeln nach der Entkalkung mittels Ameisensäurelösung festgestellt werden konnte. Danach erfolgte das Beizen in 5 %iger Natriumsulfatlösung und die Spülung unter fließendem Wasser.

Die Präparate wurden in einer aufsteigenden Alkoholreihe entwässert und in Paraplast® (SPI Supplies, München, Deutschland) eingebettet.

Nach dem Schneiden in ca. 3 - 5 µm dicke Schnitte, wurden die Präparate auf einem entfetteten Objektträger mittels Mayers Hämatoxylin und Eosin Färbung (HE-Färbung) gefärbt. Zur Darstellung der elastischen Fasern des „Ligamentum elasticum craniale“ wurde eine Resorcinfuchsin-Elastika-Färbung (WEIGERT, 1898) durchgeführt. Alle Färbungen wurden nach den Anweisungen in ROMEIS (1989) durchgeführt.

Dokumentation der lichtmikroskopischen Befunde:

Zur Evaluierung der Ergebnisse stand ein Polyvar-Mikroskop (Reichert-Jung, Wien, Österreich) und zur Dokumentation der Befunde eine Digitalkamera (Nikon D 100, Tokio, Japan) zur Verfügung.

Um Vergleichswerte zu den Ergebnissen der Meßwerte am Elefantenkniegelenkknorpel und bovinen Kniegelenkknorpel von EGGER (2005) zu gewinnen, wurde eine Vermessung der Knorpelschichtdicke mittels Kreuztisches eines Standard-Lichtmikroskops (Nikon SE, Tokio, Japan) an allen Gelenkknorpelschnitten vorgenommen. Hierzu wurde der Mittelwert aus je 3 in regelmäßigen Abständen gemessenen Linien berechnet. Es wurden solche Schnitte zur Messung herangezogen, bei denen auch der subchondrale Knochen mit angeschnitten war. Da zum Untersuchungszeitpunkt nur juvenile Afrikanische Elefantengelenkknorpel zur Verfügung standen, umfasst die gemessene Knorpelschichtdicke den Gelenkknorpel-Epiphysenknorpelkomplex. Es wurde darauf geachtet, dass die Messlinien im rechten Winkel zur Gelenkoberfläche gelegt wurden. Die Zoneneinteilung des Gelenkknorpels wurde in der vorliegenden Arbeit anhand morphologischer Unterscheidungsmöglichkeiten getroffen. Als Basis wurden die Arbeiten von CARLSON et al. (1985), SALOMON (1987), DRENCKHAHN (1994a), TILLMANN (2003a), EGGER (2005), EGGER et al. (2008) und LIEBICH et al. (2009a) herangezogen. Dabei wurden die Einteilungen des A–E Komplex von CARLSON et al. (1985) mit jenen des Gelenkknorpels der nachhergenannten Autoren kombiniert und die intermediäre Zone betreffend zusammengefasst (Abb. 22).

3.2 Untersuchung mittels bildgebender Verfahren

Zur optischen Darstellung von Schulter-, Ellbogengelenk und Hand wurde eine Computertomographie (CT) der Gelenke der linken Vorderextremität einer 46-jährigen Elefantenkuh mit einem Computertomographen der 3. Generation des Typs CT HiSpeed (Fa. General Electric) durchgeführt. Die Stellung der Gelenke entsprach aufgrund der Untersuchung der frisch aufgetauten Präparate, die außerdem nur die direkt um das Gelenk liegenden Strukturen beinhalteten, nicht zur Gänze der in-vivo-Stellung. Das Schultergelenk war in leichter Beugestellung und das Ellbogengelenk in nahezu gestreckter Stellung. Die transversale Schichtung erfolgte senkrecht auf die Spina scapulae bzw. auf die Trochlea humeri. Die Schichtung wurde mit einer Schichtdicke von 2 – 3 mm und einem Schichtabstand von 3 mm mit 120 - 140 kV und 60 -100 mA durchgeführt. Die Dokumentation erfolgte mittels Multiformatkamera (DryViewTM Laser Imaging Film, Eastman Kodak Co) und digital auf CD ROM. Die Bilder wurden im Weichteil- (mittlere Fensterlage 50 - 80 HE, Fensterbreite 300 - 500 HE) und im Knochenfenster (mittlere Fensterlage 300 HE, Fensterbreite 1500 - 2000 HE) ausgewertet.

Zum Schluss wurden die gewonnenen Daten auf eine Workstation überspielt und 3-dimensional rekonstruiert.

Die Magnetresonanztomographie (MRT) erfolgte im Niederfeldsystem (0,23 Tesla) mit dem Gerät Outlook, Gold Performance® (Philips Medizinische Systeme). Die Untersuchung des linken Schulter- und des linken Ellbogengelenkes erfolgte nach einem standardisierten Protokoll mittels Spin Echo- (SE) oder Gradienten Echo-Technik (GRE) in T1-, T2-, T2* und Protonengewichtung in transversaler, sagittaler oder dorsaler Schnittebene. Die verwendeten Sequenzparameter sind in Tab. 1 zusammengefasst.

Tab. 1: Sequenzparameter Magnetresonanztomographie (MRT).

Gewichtung	TR (ms)	TE/TI (ms)	Flipwinkel (Grad)	FOV (cm)	Matrix (cm)	Ebene
Schichtdicke/-abstand						
Spin Echo T1 4.5/4.5	10 - 450	5 - 25	90	24 – 39.9 x 30 - 40	216 – 430 x 180 - 346	sagittal, dorsal
FSE PD	4000	22	90	37.8 x 37.8	250 x 250	dorsal
STIR 5.0 / 5.0	1137 - 1200	16 / 70	90	34 – 39.8 x 39.8 - 40	250 – 300 x 250 - 256	sagittal, dorsal
CBASS 3D T2* 2.5 / 2.5	10	5		24 x 40	360 x 216	sagittal
Fast Spin Echo T2 3D 5.5 / 5.5	3000 - 5800	22 - 140	90	36.2 – 39.9 / 35 – 39.9	250 – 360 x 192 - 360	sagittal, dorsal

*** mit multiplanarer Bildrekonstruktion**

Zur Darstellung der Gelenke der Vorderextremität der 46-jährigen Elefantenkuh aus dem Tiergarten Schönbrunn, Wien, wurden an der Klinik für Bildgebende Diagnostik der Veterinärmedizinischen Universität Wien Röntgebilder im lateromedialen Strahlengang bei 90 KV und 2,6 mAs angefertigt. Die Präparate waren tiefgefroren und wurden zwei Tage vor der Untersuchung aufgetaut. An der Faculty of Veterinary Science, Onderstepoort, der University of Pretoria, South Africa, wurden folgende Gelenke röntgenologisch untersucht:

- Schultergelenk:
  - Lateromedial: 50 V (Volt), 4 mAs
  - Craniocaudal: 50 V, 4,5 mAs
- Ellbogengelenk:
  - Lateriomedial: 52 V, 4 mAs
  - Craniocaudal: 52 V, 4 mAs
- Carpalgelenk, Zehen:
  - Mediolateral: 56 V, 4 mAs
  - Dorsopalmar: 56 V, 4 mAs
  - Dorsopalmar, leicht tangential: 46 V, 4 mAs.

4 ERGEBNISSE

4.1 Articulatio humeri

Die artikulierenden Knochenenden des Schultergelenkes waren die konkave Cavitas glenoidalis der Scapula und das konvexe Caput humeri (Abb. 48, Abb. 49, Abb. 50 und Abb. 51). Von ventral bzw. dorsal betrachtet, waren beide Gelenkflächen längsoval (längere Achse craniocaudal). An der Scapula war ein Labrum glenoidale ausgebildet; dadurch kam es vor allem cranial und caudal zu einer weiter nach distal reichenden Umfassung des Caput humeri.

Gelenkkapsel:

Die Gelenkkapsel war v. a. medial sehr straff und setzte ca. 1 cm distal des Gelenkknorpelrandes um das Caput humeri an. Nach cranial nahm die Kapseldicke zu. Die Gelenkkapsel bildete drei Recessus aus:

- Caudolateral der Pars caudalis des Tuberculum majus bis zum Ansatz des „M. capsularis posterior“ (benannt nach MARIAPPA [2005]). Das Ligamentum glenohumerale überkreuzte den Recessus lateral.
- Ein Recessus befand sich lateral an der Furche zwischen Caput humeri und Pars caudalis des Tuberculum majus.

Im Sulcus intertubercularis befand sich eine weitlumige Ausstülpung der Gelenkkapsel, welche bis zum Übergang der Ursprungssehne des M. biceps brachii in den Muskelbauch nach distal reichte. Diese Ausformung der Sehnenscheide des M. biceps brachii stellte sich bei juvenilen und adulten Individuen unterschiedlich dar (Abb. 8 und Abb. 9):

- Bei den juvenilen Individuen umgab die Ausstülpung der Gelenkkapsel die Bizepssehne zur Gänze, d. h. die Umschlagslinien von der äußeren in die innere Membran der Sehnenscheide (Mesotendineum) lagen unmittelbar aneinander und der Recessus stand mit dem eigentlichen Gelenk in offener Verbindung (Abb. 6, Abb. 7 und Abb. 8).
- Beim adulten Individuum war diese synoviahältige Aussackung kleinlumiger und die Umschlagslagen von der äußeren in die innere Membran berührten einander nicht, sondern waren über eine Distanz von ca. 3 cm cranial der Bizepssehne durch Bindegewebe voneinander getrennt (Abb. 9).

Die Fasern der Gelenkkapsel verliefen lateral und medial in craniocaudaler Richtung. An der Innenfläche der Gelenkkapsel war eine schmale Gelenkkapselfalte erkennbar, die cranial, medial und lateral dicker als caudal war. Cranial und caudal befanden sich auf der Gelenkkapselfalte Synovialzotten (Abb. 3).

Unter der Endsehne des M. infraspinatus, kurz vor ihrem Ansatz an der Pars caudalis des Tuberculum majus, lag ein ca. 4 x 4 cm großer Schleimbeutel. In die Membran dieser Bursa strahlten einzelne Fasern der Mm. infraspinatus und teres minor ein. Der Schleimbeutel stand mit der Höhle des Schultergelenkes nicht in Verbindung.

Bänder:

Das Ligamentum coracohumerale bestand aus zwei Teilen, die am Processus coracoideus entsprangen. Der schmale, mediale Teil verlief vom Processus coracoideus schräg in caudodistaler Richtung bis zu seinem Ansatz am caudalen Rand des Tuberculum minus (Abb. 6). Der kräftige, fächerförmige, laterale Teil setzte distal der Gelenkkapsel am Collum humeri an und war mit der Gelenkkapsel innig verbunden.

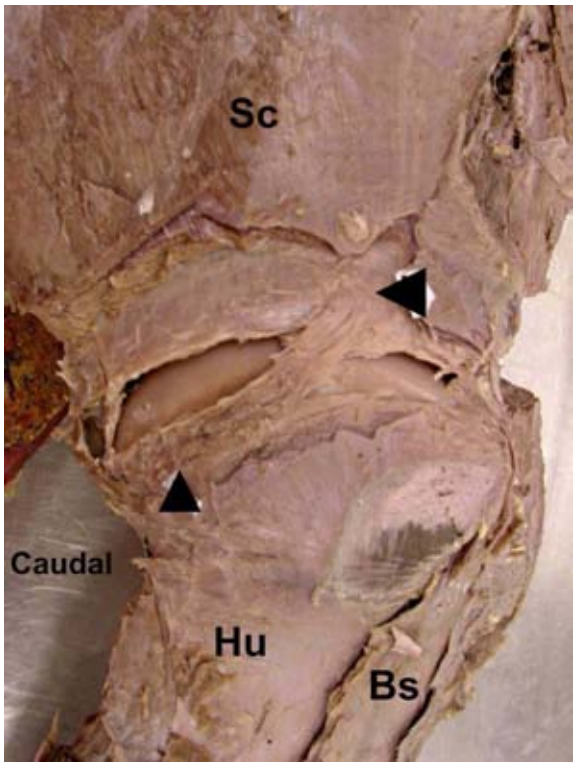

Abb. 6: Linkes Schultergelenk, juveniler Afrikanischer Elefant. Ansicht von medial: Lig. coracohumerale freipräpariert und Verlauf mit schwarzen Pfeilspitzen markiert, Gelenkkapsel eröffnet. Bs Bizepssehne, Hu Humerus, Sc Scapula.

Cranial der Ursprungssehne des M. biceps brachii war ein querverlaufendes Retinaculum transversum erkennbar, das den Sulcus intertubercularis zwischen Tuberculum minus und Pars cranialis des Tuberculum majus überspannte (Abb. 7, Abb. 8 und Abb. 9). Es war lateral und medial mit der Sehnenscheide der Bizepssehne bindegewebig verbunden.

Das dicke Lig. glenohumerale craniale entsprang lateral am Rand der Cavitas glenoidalis und zog breiter werdend über die Gelenkkapsel, die durch das Lig. glenohumerale craniale verstärkt wurde, und setzte an der Pars cranialis des Tuberculum humeri an.

Das Lig. glenohumerale laterale war ebenso ein kräftiges Band, das von der lateralen Kante der Cavitas glenoidalis nach caudodistal verlief. Es bildete eine Kapselverstärkung und setzte breit gefächert am Collum humeri an.

Caudal war ein dünnes, aber breites Lig. glenohumerale caudale als Kapselverstärkung ausgebildet, das vom M. articularis humeri caudal bedeckt wurde. Es entsprang am caudalen Rand der Cavitas glenoidalis bzw. am Tuberculum infraglenoidale und wurde bis zu seinem Ansatz distal des Gelenkspaltes breiter (Abb. 7).

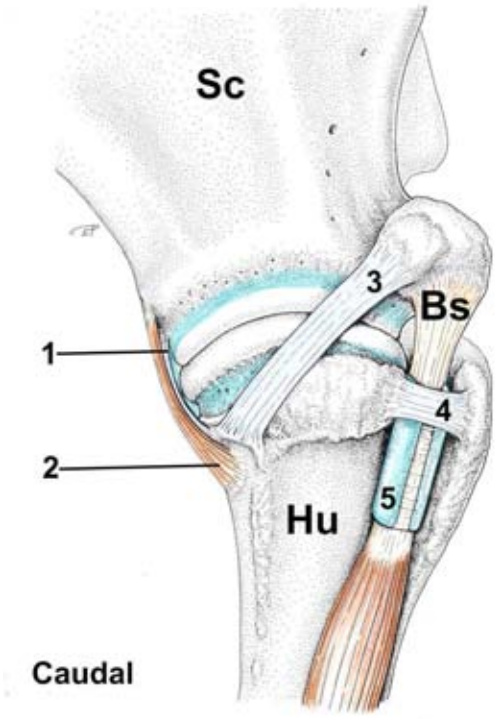

Abb. 7: Linkes Schultergelenk, adulter Afrikanischer Elefant. Ansicht von medial: Bs Bizepssehne, Hu Humerus, Sc Scapula. 1 Lig. glenohumerale caudale, 2 M. articularis humeri, 3 Lig. coracohumerale, 4 Retinaculum transversum, 5 Sehnenscheide der Bizepssehne. Blau: Ansatz der Gelenkkapsel bzw. manschettenförmige Ausstülpung der Gelenkkapsel um Bizepssehne.

Muskeln:

Der **M. infraspinatus** entsprang in der Fossa infraspinata und überquerte das Schultergelenk lateral. Er wurde vor seinem Ansatz an der Pars caudalis des Tuberculum majus von einer geräumigen Bursa unterlagert. Auf Höhe des Gelenkspaltes war er mit der Gelenkkapsel verbunden.

Der **M. subscapularis** zog von der Fossa subscapularis kommend medial über das Schultergelenk. Im distalen Scapuladrittel wurde er zu einer kräftigen und breiten Sehne. Ohne Verbindung zur Gelenkkapsel inserierte er medial am Tuberculum minus humeri.

Der **M. coracobrachialis** entsprang am Tuberculum supraglenoidale und zog medial über das Schultergelenk. Die breite und kräftige Ursprungssehne des M. coracobrachialis war nicht mit der Gelenkkapsel verbunden. Der M. coracobrachialis setzte am Epicondylus medialis humeri an.

Der **M. articularis humeri** stellte einen nach distal breiter werdenden, craniocaudal abgeflachten Muskel dar, der am Tuberculum infraglenoidale der Scapula entsprang und caudal am Collum humeri ansetzte.

Die dünne **„Pars profunda“** des **M. supraspinatus** war nur beim adulten Elefanten als tiefe Abspaltung des M. supraspinatus erkennbar. Sie entsprang am Collum scapulae, verlief cranial über das Schultergelenk und inserierte zwischen Pars cranialis und Pars caudalis des Tuberculum majus.

Die Sehne des M. biceps brachii entsprang am Tuberculum supraglenoidale. Sie verlief cranial über das Schultergelenk, dann im Sulcus intertubercularis, wo sie von der oben beschriebenen Ausstülpung der Schultergelenkkapsel (Abb. 8 und Abb. 9) umgeben wurde. Distal des Sulcus intertubercularis ging die Sehne in einen Muskelbauch über und setzte, craniomedial mit der Gelenkkapsel des Ellbogens verwachsen, am Processus coronoideus medialis der Ulna cranial an.

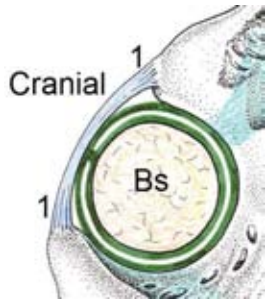

Abb. 8: Bizepssehne, juveniler Afrikanischer Elefant. Transversalschnitt, Ansicht von proximal: Bs Bizepssehne. 1 Retinaculum transversum. Grün: manschettenförmige Ausstülpung der Gelenkkapsel um Bizepssehne.

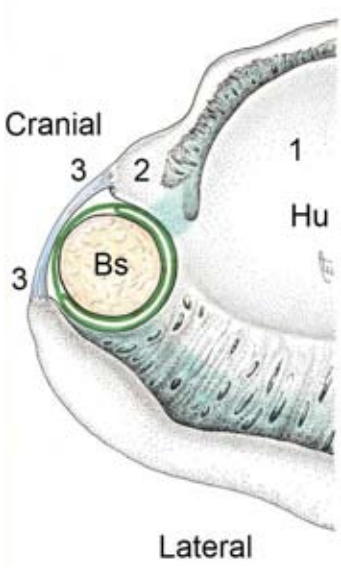

Abb. 9: Bicepssehne, linker Humerus, adulter Afrikanischer Elefant. Transversalschnitt, Ansicht von proximal: Bs Bizepssehne, Hu Humerus. 1 Caput humeri, 2 Tuberculum minus, 3 Retinaculum transversum. Grün: manschettenförmige Ausstülpung der Gelenkkapsel um Bizepssehne.

Das Schultergelenk stellte ein Kugelgelenk mit eingeschränkter Beweglichkeit dar. Die Cavitas glenoidalis scapulae umgriff das Caput humeri cranial und caudal fast zur Gänze. Die Beweglichkeit beschränkte sich in erster Linie auf Flexion und Extension. Eine Abduktion bzw. Adduktion war zumindest passiv durch die Einschränkung durch Bänder, Muskeln und Sehnen kaum möglich.

4.2 **Articulatio cubiti**

Das Ellbogengelenk des Elefanten war ein zusammengesetztes Gelenk, das aus der Articulatio humeroradialis und der Articulatio humeroulnaris bestand. Die Trochlea humeri artikulierte mit der Fovea capitis radii bzw. ulnae und der Incisura trochlearis der Ulna. Die Ulna war im Vergleich zum kleinen Radius sehr mächtig (Abb. 10). Die Gelenkfläche des Condylus humeri, die Trochlea, war durch eine sagittale Furche in einen kleineren lateralen und einen größeren medialen Teil getrennt. Die Fovea capitis radii war in der proximalen Ansicht annähernd dreieckig und leicht konkav. Die Gelenkflächen an der Ulna zur distalen Unterstützung des Humerus waren medial um etwa das Doppelte größer als lateral (Abb. 10 und Abb. 52).

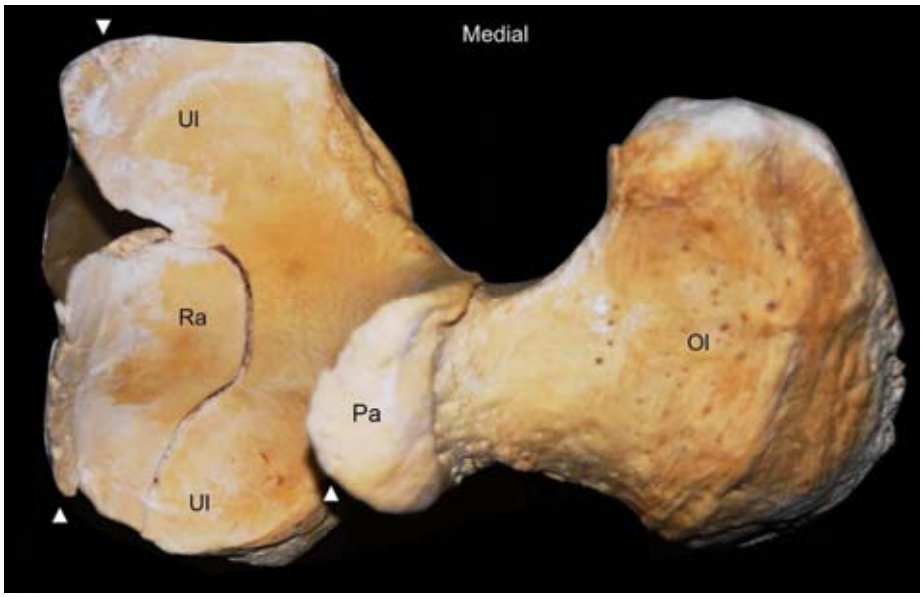

Abb. 10: Linker Unterarm, adulter Afrikanischer Elefant. Ansicht von proximal. Ol Olecranon, Ra Radius, Ul Ulna. Weiße Pfeilspitzen: pathologische Veränderungen.

Gelenkkapsel:

Die Gelenkkapsel des Ellbogengelenkes war auffallend dick. Craniomedial wurde sie durch den einstrahlenden M. biceps brachii verstärkt.

Cranial in der Gelenkkapsel waren Faserbündel („Lig. elasticum craniale“ nach MARIAPPA [1955a]) makroskopisch erkennbar, die überwiegend von medioproximal nach laterodistal verliefen (Abb. 12). Besonders lateral, medial und caudal waren Kapselverstärkungen nachweisbar.

Medial und lateral waren Falten der Gelenkkapsel angelegt (Abb. 11). Beide Kapselfalten reichten bis zu 5 mm zwischen die Gelenkflächen an Humerus und Ulna und erstreckten sich über die gesamte laterale bzw. mediale Seite.

Auch am Ellbogengelenk war ein weiter cranialer Gelenkrecessus vorhanden, der sich nach proximal bzw. distal ca. 1 - 2 cm über den Gelenkspalt hinaus erstreckte. Der caudale Recessus schloss die gesamte Fossa olecrani des Humerus mit ein.

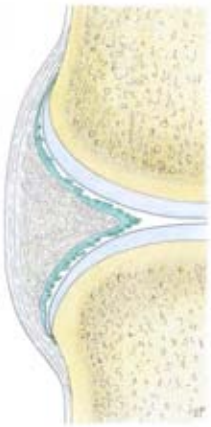

Abb. 11: Schematische Darstellung des Aufbaus einer Gelenkkapselfalte.

Bänder:

Das Lig. collaterale mediale bestand aus zwei Schenkel: Der craniale Schenkel (”Lig. collaterale med. obliquum”) entsprang am Epicondylus medialis humeri und setzte cranial am Processus coronoideus medialis der Ulna an (Abb. 12). Der caudale Schenkel wurde vom sehnigen M. pronator teres überkreuzt, entsprang distal am Epicondylus medialis des Humerus und verlief mit der Gelenkkapsel breit verwachsen zum Processus coronoideus medialis der Ulna.

Das Lig. collaterale laterale war ein nach distal breiter werdendes Band, das vom distalen Ende des mächtigen Epicondylus lateralis humeri zum Processus coronoideus lateralis der Ulna zog.

Ein kräftiges, als Lig. humeroulnare bezeichnetes und oberflächlich liegendes Band entsprang am Epicondylus lateralis humeri und inserierte zweischenkelig einerseits am Proc. styloideus ulnae und andererseits an der Ulna, cranial des Sulcus m. extensoris digitorum lateralis.

Muskeln:

Der sehnige **M. pronator teres** zog vom Epicondylus medialis des Humerus zu seinem Ansatz medial am Übergang vom proximalen zum mittleren Radiusdrittel. Beim adulten Elefanten war er mit der Gelenkkapsel verwachsen, bei den juvenilen Individuen hingegen nicht.

Der **M. flexor carpi radialis** entsprang sehnig am Epicondylus medialis humeri caudal des M. pronator teres. Am Ursprung wurde er von einer Bursa unterlagert (Abb. 12). Sein kräftiger Muskelbauch verlief medial über die Articulatio cubiti. Eine Sehnenscheide umgab die Sehne des M. flexor carpi radialis im Bereich des Carpalgelenkes. Er setzte schließlich am Os carpi radiale an.

Der **M. anconeus** wurde vom Caput laterale des M. triceps brachii bedeckt. Er entsprang caudal des Epicondylus lateralis des Humerus und zog als breiter, kurzer Muskel dreiteilig zur Ulna. Distal des Ellbogengelenkspaltes strahlte der M. anconeus in die Ellbogengelenkkapsel ein.

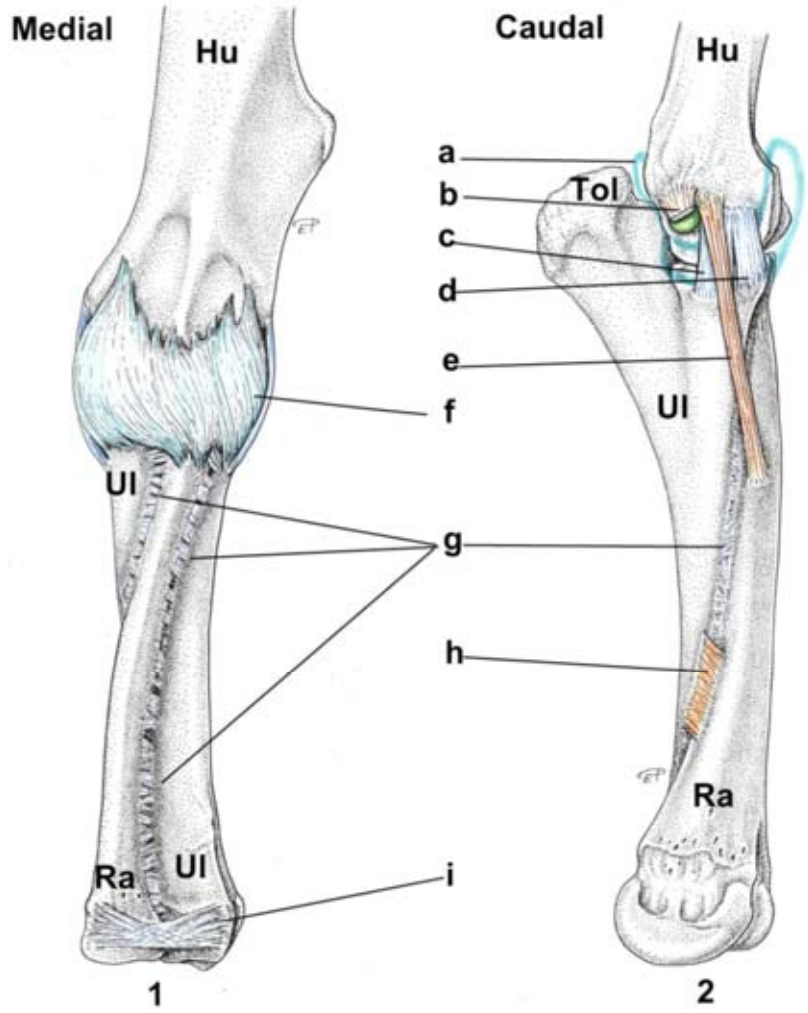

Abb. 12: Linkes Ellbogengelenk, Verbindungen zwischen Radius und Ulna, adulter Afrikanischer Elefant. 1: Ansicht von cranial. 2: Ansicht von medial: Hu Humerus, Ra Radius, Ul Ulna, Tol Tuber olecrani. a Gelenkkapsel, b (grün) Bursa unter Ursprung des M. flexor carpi radialis, c Lig. collaterale med., d Lig. collaterale med. obliquum, e M. pronator teres, f Faserverlauf der Kapselverstärkung, g Membrana interossea antebrachii, h M. pronator quadratus, i Lig. radioulnare. Blau: Gelenkkapsel.

Der **M. triceps brachii** war ein starker dreiköpfiger Muskel. Das Caput laterale entsprang distolateral des Caput humeri und inserierte gemeinsam mit den Capita longum und mediale am Olecranon. Das mächtige Caput longum entsprang caudodistal an der Scapula bzw. in der Fossa infraspinata. Das Caput mediale war der schwächste Kopf, es hatte seinen Ursprung caudomedial am Humerus und strahlte auch in die Gelenkkapsel des Ellbogengelenkes ein.

Die **Mm. flexores digitales profundus** und **superficialis** entsprangen caudodistal am Epicondylus medialis des Humerus. Hier waren beide Muskeln mit der Gelenkkapsel verwachsen.

Das Ellbogengelenk des Elefanten bildete ein Scharniergelenk (Ginglymus) bzw. ein Wechselgelenk, da die Bewegungsmöglichkeit durch Muskeln und Bänder auf Extension und Flexion beschränkt wurde.

4.3 Articulationes radioulnares

Zwischen den beiden Unterarmknochen Radius und Ulna waren ein proximales und ein distales Radioulnargelenk ausgebildet.

Die **Articulatio radioulnaris proximalis** stellte ein straffes Synovialgelenk knapp distal des Gelenkspaltes der Articulatio cubiti dar. Hier artikulierten die Incisura radialis der Ulna mit der Circumferentia articularis des Radius. Diese Gelenkhöhle kommunizierte mit jener des Ellbogengelenkes.

Das Lig. anulare radii verlief zwischen den Procc. coronoidei ulnae und bedeckte den Radius cranial. Die von proximal kommende craniale Kapselverstärkung des Ellbogengelenkes strahlte in das Lig. anulare radii ein.

Die **Articulatio radioulnaris distalis** bildete ein straffes Synovialgelenk zwischen der Incisura ulnaris des Radius und der Circumferentia articularis der Ulna. Obwohl das Articulatio radioulnaris distalis von der Gelenkkapsel des Carpalgelenkes cranial bedeckt wurde, bestand keine Kommunikation mit der Höhle des Carpalgelenkes. Beide Gelenke wurden durch die Membrana interossea antebrachii vollständig voneinander getrennt. Craniodistal hielt ein fächerförmiges Ligamentum radioulnare Radius und Ulna zusammen (Abb. 12).

Radius und Ulna waren sehr eng miteinander verbunden. Es war eine starke Membrana interossea antebrachii ausgebildet, die allerdings von Gefäßen durchbrochen wurde.

Muskeln:

Der **M. brachialis** entsprang caudolateral am Collum humeri, zog vom M. brachioradialis bedeckt über laterocranial unter den M. extensor carpi radialis und inserierte craniomedial am proximalen Ende von Radius bzw. Ulna.

Der **M. brachioradialis** entsprang proximal des Ursprunges des M. brachialis am Collum humeri, lag anfangs unter dem Caput laterale des M. triceps brachii und wurde am Carpus sehnig. Die Endsehne des M. brachioradialis unterkreuzte die Mm. abductor pollicis longus und extensor indicis und setzte am Os carpi intermedium an.

Der **M. extensor indicis (M. extensor digiti I et II)** entsprang craniolateral an den Unterarmknochen entlang dem Spatium antebrachii, jedoch mehr an der Ulna. Der Hauptansatz erfolgte dorsomedial am Caput des Os metacarpale II. Ein schmaler Schenkel, der sich auf Höhe des Corpus des Os metacarpale II abspaltete, inserierte dorsomedial am Corpus des Os metacarpale I.

Der **M. abductor pollicis longus** entsprang craniomedial entlang dem Spatium antebrachii mit zahlreicheren Fasern zum Radius als zur Ulna.

Ein **M. pronator quadratus** ist in der distalen Hälfte des Unterarmes erkennbar (Abb. 12). Der Muskelbauch war stark sehnig durchsetzt und sein Faserverlauf schräg in mediodistaler Richtung. Bei den untersuchten adulten Individuen war die Verbindung zwischen Radius und Ulna verkalkt bzw. verknöchert.

4.4 **Articulatio carpi**

Beim Carpalgelenk handelte es sich um ein zusammengesetztes Gelenk, das aus drei Gelenketagen bestand.

4.4.1 Articulatio antebrachiocarpea

Hier artikulierten die Facies articulares carpeae der Ulna bzw. des Radius und die Facies articulares der antebrachialen Reihe der Carpalknochen. Diese stellten von medial nach lateral das Os carpi radiale, das Os carpi intermedium, das Os carpi ulnare und das Os carpi accessorium dar (Abb. 54 und Abb. 55).

Die leicht konvexe Facies articularis distalis des Radius wurde durch eine transversale Kante in eine dorsale und eine palmare geteilt. Eine sagittale Kante trennte den palmaren Anteil in eine mediale Seite und eine flache laterale Seite.

Eine nach lateral breiter werdende Kante teilte die Facies articularis distalis der Ulna in einen dorsalen und einen palmaren Teil. Eine von mediodistal nach lateroproximal ziehende Kante unterteilte die nach dorsal gerichtete Gelenkfläche der Ulna abermals (Abb. 13, Abb. 14 und Abb. 15).

Mit dem Radius artikulierten das medial liegende Os carpi radiale, dessen proximale Gelenkfläche leicht konkav war, und das weiter lateral liegende Os carpi intermedium. Die proximale Gelenkfläche des Os carpi intermedium war trapezförmig und leicht konkav. Die Ulna artikulierte mit dem größten Knochen der antebrachialen Reihe, dem Os carpi ulnare, und dem lateropalmar gelegenen Os carpi accessorium, dessen querovale Gelenkfläche zur Ulna durch einen transversalen Kamm von der größeren ebenfalls querovalen Gelenkfläche zum Os carpi ulnare getrennt wurde. Die dreieckige Gelenkfläche des Os carpi ulnare war dorsal leicht konvex und palmar leicht konkav.

Die Articulatio antebrachiocarpea stellte infolge der eingeschränkten Bewegungsmöglichkeit (Flexion und Extension) ein Scharniergelenk (Ginglymus) dar.

4.4.2 Articulatio mediocarpea

Hier artikulierten die antebrachiale Reihe der Carpalknochen mit den Ossa carpalia I-IV.

Die Facies articularis distalis des Os carpi radiale war dreieckig und wurde durch eine sagittale Erhebung in eine nach mediodistal gerichtete Hälfte, die mit dem Os carpale I artikulierte, und eine konkave, nach lateral zeigende Hälfte, die mit dem Os carpale II gelenkte, unterteit. Die dreieckige Facies articularis distalis des Os carpi intermedium war dorsal breiter und konvex, palmar jedoch konkav. Die Facies articularis distalis des Os carpi ulnare bestand aus einer dorsalen, leicht konvexen Fläche, die mit dem Os metacarpale IV gelenkte und durch einen dorsopalmaren Kamm von einer schmaleren, dorsopalmaren Gelenkfläche, die mit dem Os metacarpale V artikulierte, getrennt wurde.

Die Facies articularis proximalis des kleinen Os carpale I wurde durch einen hohen Sagittalkamm in eine mediopalmare Gelenkfläche zum Os carpi radiale und eine viereckige laterodorsale Gelenkfläche zum Os carpale II unterteilt. Die Facies articularis proximalis des Os carpale II artikulierte mit dem Os carpi radiale und glich einem rechtwinkligen Dreieck, dessen lateropalmare Kante s-förmig gekrümmt war und eine ebenfalls s-förmige Erhebung aufwies. Die palmare Hälfte der annähernd quadratischen Facies articularis proximalis des Os carpale III war konvex, die dorsale leicht konkav. Die ovale proximale Gelenkfläche des Os carpale IV war mediolateral gerichtet, palmar konvex und dorsal konkav. Die Articulatio mediocarpea bildete wie die Articulatio antebrachiocarpea einen Ginglymus.

4.4.3 Articulatio carpometacarpea

Die gelenkbildenden Knochen waren die Ossa carpalia II-IV und die Ossa metacarpalia II-V. Die ansonsten flache Facies articularis distalis des Os carpale II war durch einen Sagittalkamm in eine mediale Hälfte, die mit dem Os carpale I artikulierte, und eine laterale Hälfte, die mit dem Os metacarpale II artikulierte, geteilt. Auch die Facies articularis distalis des Os carpale III war durch einen Sagittalkamm unterteilt.

Die kleinere mediale Gelenkfläche des Os carpale III gelenkte mit dem Os metacarpale II, die laterale, ebenfalls flache Gelenkfläche mit dem Os metacarpale III. Die ansonsten flache Facies articularis distalis des Os carpale IV wurde durch zwei Sagittalkämme dreigeteilt: Die schmale nach laterodistal zeigende Gelenkfläche artikulierte mit dem Os metacarpale V, der größte nach distal gerichtete mittlere Teil mit dem Os metacarpale IV und der nach mediodistal zeigende Teil des Os carpale IV mit dem Os metacarpale III. Die proximale Artikulationsfläche des Os metacarpale II bestand aus vier konkaven, durch scharfe Knochenkämme voneinander getrennten Gelenkflächen: Eine mediale zum Os carpale I, eine proximomediale zum Os carpale II, eine proximolaterale zum Os carpale III und eine laterale zum Os metacarpale III. Das Os metacarpale III bildete den größten Metacarpalknochen, seine proximale Facies articularis bestand aus vier, durch Knochenkämme geteilte und leicht konkave Gelenkflächen: Eine mediale zum Os metacarpale II, eine proximomediale, große Fläche zum Os carpale III, eine proximolaterale zum Os carpale IV und eine laterale zum Os metacarpale IV. Die proximale Gelenkfläche des Os metacarpale IV bestand aus drei leicht konkaven Abschnitten, die mit dem Os metacarpale III, dem Os carpale IV und dem Os metacarpale V artikulierten. Das Os metacarpale V war kürzer als die anderen Metacarpalknochen und artikulierte über drei konkave Gelenkflächen einerseits medial mit dem Os metacarpale IV, andererseits über eine große, konkave Fläche mit dem Os carpale IV und weiters über eine kleine, laterale Gelenkfläche mit dem Os carpi ulnare.

Bei der Articulatio carpometacarpea handelte es sich um ein straffes Gelenk.

Die Articulatio carpometacarpea der 1. Zehe besaß eine eigenständige Gelenkkapsel und die Gelenkhöhle hatte keine Verbindung zum Carpalgelenk. Die Facies articularis distalis des Os carpale I artikulierte mit der Facies articularis proximalis des Os metacarpale I in Form eines Sattelgelenkes.

Die Articulationes intercarpeae zwischen benachbarten Carpalknochen stellten in erster Linie straffe Gelenke dar.

Die Articulationes intermetacarpeae waren straffe Syndesmosen zwischen den Basen der Metacarpalknochen.

In der Articulatio ossis carpi accessorii artikulierte das Os carpi accessorium mit der palmaren Gelenkfläche des Os carpi ulnare.

Gelenkkapsel:

Die Gelenkkapsel des gesamten Carpalgelenkes setzte proximal der Articulatio radioulnaris distalis und distal der Articulationes intermetacarpeae an (Abb. 13). Dorsal war die Gelenkkapsel weit, während sie palmar straff und mit allen beteiligten Knochenoberflächen verwachsen war.

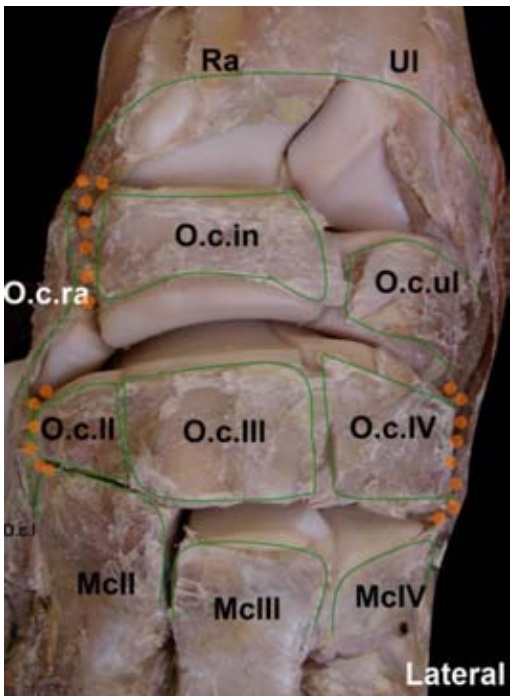

Abb. 13: Linker Carpus, juveniler Afrikanischer Elefant. Ansicht von dorsal. O.c.I - IV Ossa carpalia I - IV, O.c.in Os carpi intermedium, O.c.ra Os carpi radiale, O.c.ul Os carpi ulnare, McII Os metacarpale II, McIII Os metacarpale III, McIV Os metacarpale IV, Ra Radius, Ul Ulna. Grün: Anhaftung der Gelenkkapsel, orange: mögliche Kommunikation zwischen den Etagen (siehe Text).

Die Gelenkkapsel war vor allem palmar sehr dick und es waren deutliche Faserzüge erkennbar (Abb. 17).

Dorsal bildete die Gelenkkapsel im Raum zwischen Radius bzw. Ulna und den Knochen der antebrachialen Reihe eine Gelenkkapselfalte aus (Abb. 14).

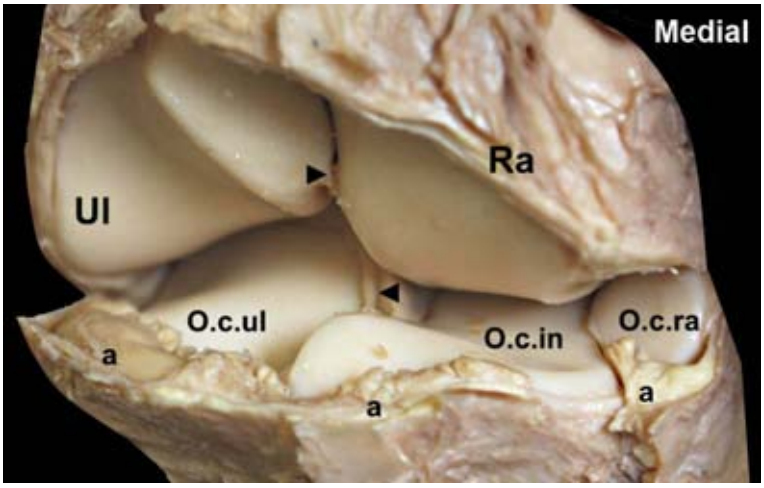

Abb. 14: Rechter Carpus, juveniler Afrikanischer Elefant. Ansicht auf die Articulatio antebrachiocarpea von craniomedial: O.c.in Os carpi intermedium, O.c.ra Os carpi radiale, O.c.ul Os carpi ulnare, Ra Radius, Ul Ulna. a Gelenkkapselfalte. Schwarze Pfeilspitzen: intraartikuläre Bänder.

Eine besonders dicke Kapselfalte befand sich dorsal in der Articulatio mediocarpea. Sie war in ihren zentralen Abschnitten dicker als in ihren medialen und lateralen. Diese Falte füllte den dorsalen Spaltraum zwischen den Knochen der proximalen und der distalen Reihe aus (Abb. 15).

Eine schmale Gelenkkapselfalte füllte den dorsalen Spaltraum zwischen den Ossa carpalia II, III und IV und den Ossa metacarpalia II, III und IV aus.

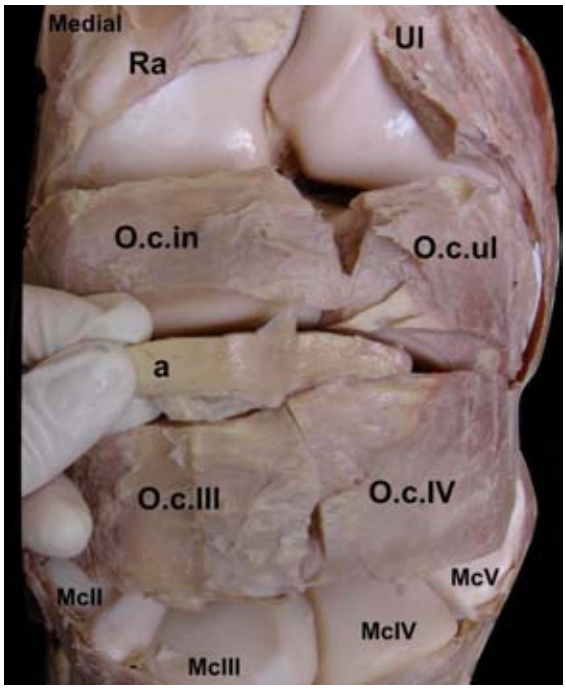

Abb. 15: Linker Carpus, juveniler Afrikanischer Elefant zur Darstellung der Gelenkkapselfalte (a). Ansicht von craniolateral. McII Os metacarpale II, McIII Os metacarpale III, McIV Os metacarpale IV, McV Os metacarpale V, O.c.in Os carpi intermedium, O.c.ul Os carpi ulnare, Ra Radius, Ul Ulna. a Gelenkkapselfalte.

Bänder:

Das Lig. collaterale laterale war ein breites und dickes Band, das sich vom Processus styloideus der Ulna zum Os metacarpale V erstreckte und an den Ossa carpi ulnare und carpale IV angeheftet war.

Das Lig. collaterale mediale war deutlich dünner als das Lig. collaterale carpi laterale. Es verlief entlang der Medialseite des Carpus vom Radius zum Os metacarpale I; mit Anheftungen an den Ossa carpi radiale und carpale I.

Ein Retinaculum flexorum erstreckte sich vom Os carpi accessorium über die Mm. flexores digitales superficialis und profundus bis zum Os carpi radiale. Das Retinaculum flexorum begrenzte mit der proximalen Reihe der Carpalknochen einen Canalis carpi, durch welchen Gefäße und Nerven zogen, die von einer dicken Fettschicht umgeben waren. Ein eigenständiges, „tiefes“ Retinaculum flexorum entsprang medioproximal am Os carpi accessorium und zog über den M. flexor digitorum profundus an das Os carpi intermedium.

Ein Retinaculum extensorum lag dorsal am Carpus und hielt die Extensoren bzw. ihre Sehnenscheiden.

Intraartikuläre Bänder:

Die Carpalknochen einer Reihe wurden durch Ligg. intercarpea interossea miteinander verbunden. Beim 46-jährigen Individuum waren die einzelnen Carpalknochen infolge einer Verknöcherung der Ligg. intercarpea interossea miteinander verwachsen und auch nach einer durchgeführten Mazeration kaum voneinander trennbar. Von dorsal nach palmar durchgehend ausgebildete Ligg. intercarpea interossea verhinderten bei fünf von sieben untersuchten juvenilen Vorderextremitäten Afrikanischer Elefanten eine mögliche Kommunikation der proximalen mit der mittleren Carpalgelenketage. Bei zwei von sieben untersuchten juvenilen Carpalgelenken war eine Kommunikation aller Gelenketagen, durch einen ca. 1 cm breiten Spalt dorsal der Ligg. intercarpea interossea zwischen dem Os carpi radiale und dem Os carpi intermedium möglich (Abb. 13).

Bei allen untersuchten juvenilen Individuen bestand eine offene Verbindung zwischen mittlerer und distaler Gelenketage. Ligg. intercarpea interossea waren zwischen dem Os carpi radiale und dem Os carpale II nicht durchgehend vorhanden, sondern ließen einen dorsalen Durchgang von ca. 1 cm zu. Ebenso verhielten sich die Ligg. intercarpea interossea lateral zwischen dem Os carpale IV und dem Os metacarpale V.

Beim adulten Carpus wurde diese Kommunikation durch Bindegewebe und Verknöcherungen der Carpalknochen untereinander verhindert.

Ein starkes, intraartikuläres, einheitliches Lig. radiocarpeum et ulnocarpeum verband den Radius bzw. die Ulna mit dem lateroproximalen Rand des Os carpi intermedium bzw. dem medioproximalen Rand des Os carpi ulnare (Abb. 14).

Weitere intraartikuläre Bänder verbanden palmar die laterodistale Kante des Os carpi intermedium bzw. die mediodistale Kante des Os carpi ulnare mit der lateroproximalen Kante des Os carpale III (eventuell einem lig. carpi radiatum entsprechend) bzw. der medioproximalen Kante des Os carpale IV.

Dorsale Bänder:

Dorsal wurden die Carpalknochen durch Ligg. intercarpea dorsalia verbunden. Diese Bänder verliefen in transversaler Richtung (Abb. 16).

Das Lig. radiocarpometacarpeum dorsale stellte ein Band dar, welches am Os carpi radiale, am Os carpale II und zweischenkelig am Os metacarpale II ansetzte (Abb. 16).

Ligg. carpometacarpea dorsalia waren medial zwischen dem Os carpale I und dem Os metacarpale I, sowie lateral zwischen dem Os carpale IV und dem Os metacarpale V ausgebildet. Sie verbanden die distalen Carpalknochen mit den Knochen des Metacarpus (O. c. II – M. c. II, O.c. III – M. c. III, O. c. IV – M. c. IV).

Ligg. intermetacarpeae dorsalia verbanden die Basen der Metacarpalknochen miteinander.

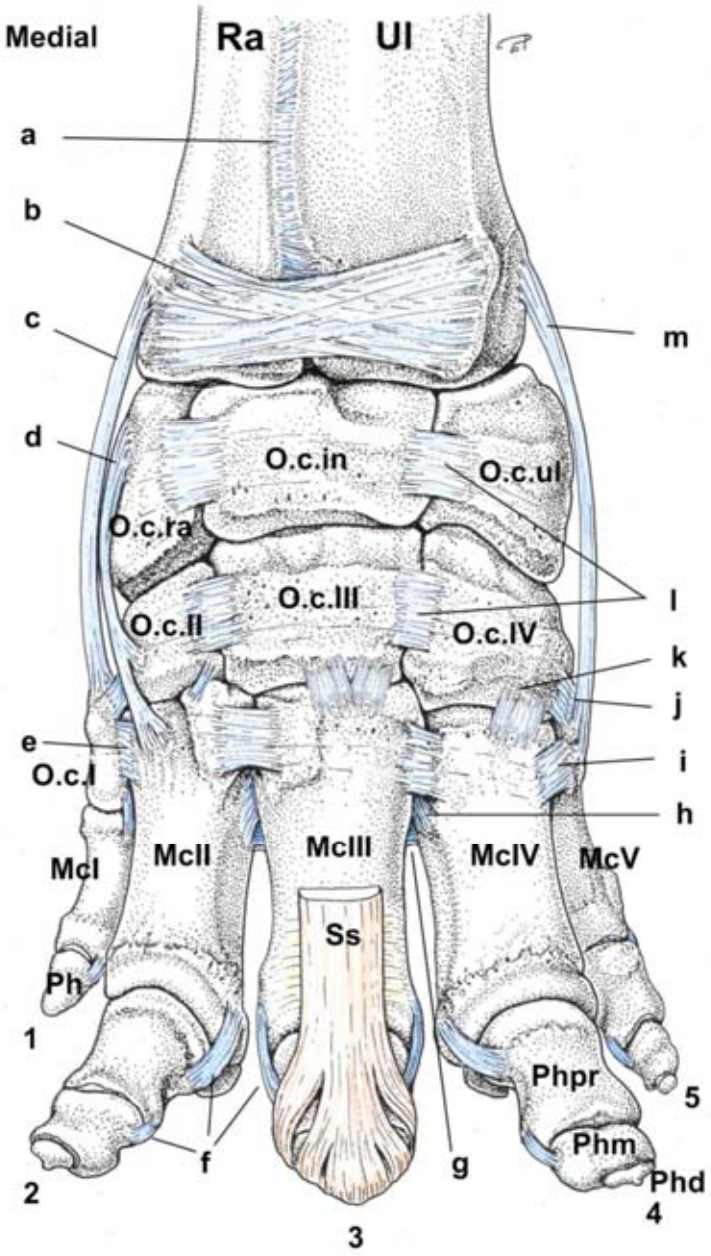

Abb. 16: Linkes distales Extremitätenende, adulter Afrikanischer Elefant. Ansicht von dorsal. 1-2-3-4-5 Zehe 1-2-3-4-5, O.c.in Os carpi intermedium, O.c.ra Os carpi radiale, O.c.ul Os carpi ulnare, O.c.I Os carpale I, O.c.II Os carpale II, O.c.III Os carpale III, O.c.IV Os carpale IV, McI Os metacarpale I, McII Os metacarpale II, McIII Os metacarpale III, McIV Os metacarpale IV, McV Os metacarpale V, Ph Phalanx 1, Phpr Phalanx proximalis, Phm Phalanx media, Phd Phalanx distalis, Ra Radius, Ss Strecksehne, Ul Ulna. a Membrana interossea, b Lig. radioulnare, c Lig. collaterale mediale, d Lig. radiocarpometacarpeum dorsale, e Lig. carpometacarpeum dorsale, f Ligg. collateralia, g Ligg. metacarpea interossea, h Ligg. metacarpea dorsalia, i Ligg. intermetacarpea dorsalia, k Lig. carpometacarpeum dorsale, j und l Ligg. intercarpea dorsalia, m Lig. collaterale laterale.

Palmare Bänder:

Besonders der proximale Teil des palmaren Bandapparates war sehr dick und mit der Gelenkkapsel verwachsen. Da hier alle Bänder mehr oder weniger verwachsen waren und sich zu einer palmaren Bandmasse verbanden, war eine Isolierung einzelner Bänder in manchen Präparaten schwierig (Abb. 17).

Das Lig. radiocarpeum palmare zog von der Trochlea radii zu den Ossa carpi intermedium und ulnare.

Das Lig. ulnocarpeum palmare entsprang dem Caput ulnae und setzte an den Ossa carpi radiale, intermedium und ulnare an.

Das Lig. accessorioulnare bestand aus einem lateralen und einem medialen Schenkel, die gleich dick waren. Es verlief vom proximalen Rand des Os carpi accessorium zum Caput ulnae. Das Lig. accessoriocarpoulnare entsprang am Os carpi accessorium und setzte am Os carpi ulnare bzw. Os carpale I an. Das dünne Lig. accessorioquartale erstreckte sich vom Os carpi accessorium zum Os carpale IV. Das Lig. accessoriometacarpeum teilte sich kurz nach seinem Ursprung am Os carpi accessorium in einen dünnen, lateralen und einen dicken, medialen Schenkel. Sein lateraler Schenkel setzte an der Basis des Os metacarpale V an, der mediale Schenkel an der Basis des Os metacarpale IV.

Die Ligg. intermetacarpeae palmaria verliefen transversal entlang der Basen der Metacarpalknochen und bildeten in ihrer Gesamtheit einen scharfen distalen Rand des gesamten palmaren Bandapparates.

Die Ligg. carpometacarpea palmaria waren zwischen benachbarten Carpal- und Metacarpalknochen ausgebildet bzw. waren sie Bestandteile des palmaren Bandapparates.

Die Ligg. metacarpea palmaria verbanden die Basen der Metacarpalknochen miteinander.

Die Ligg. metacarpea interossea verliefen transversal zwischen den Basen der Metacarpalknochen.

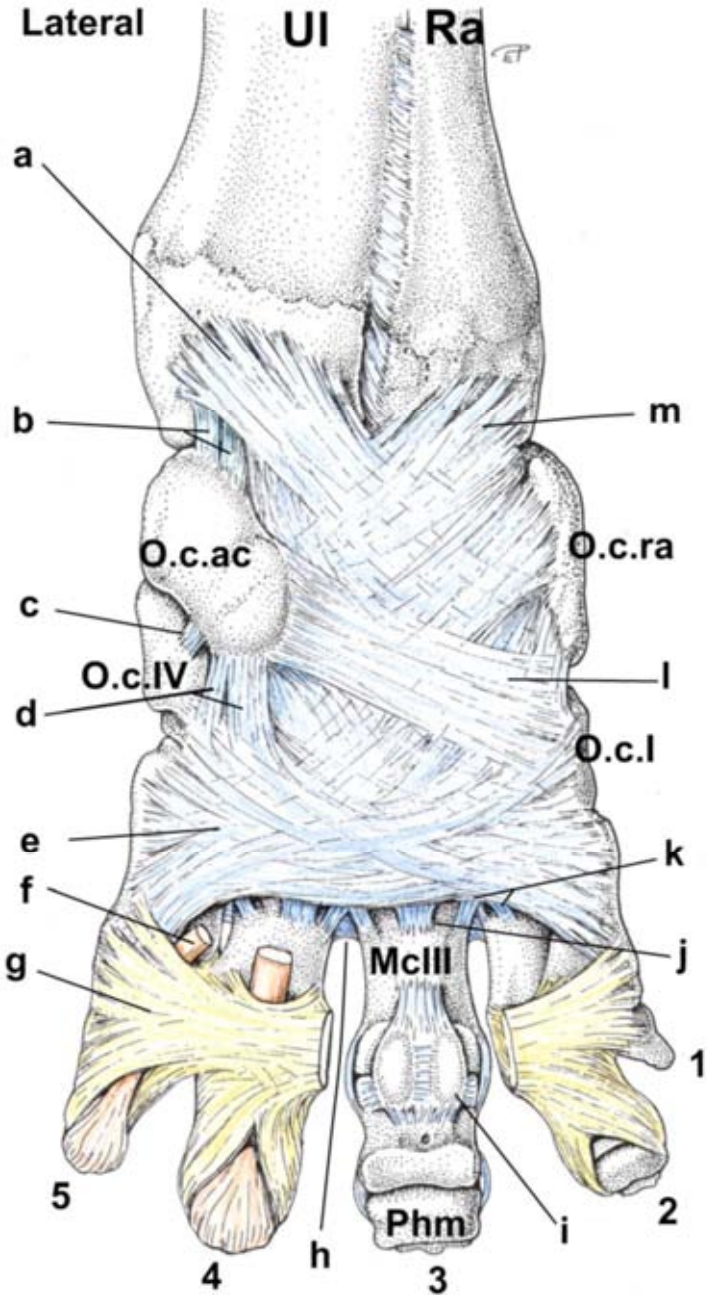

Abb. 17: Linkes distales Extremitätenende, adulter Afrikanischer Elefant, Darstellung der palmaren Bandmassen. Ansicht von palmar. 1-2-3-4-5 Zehe 1-2-3-4-5, O.c.ac Os carpi accessorium, O.c.ra Os carpi radiale, O.c.I Os carpale I, O.c.IV Os carpale IV, McIII Os metacarpale III, Phm Phalanx media III, Ra Radius, Ul Ulna. a Lig. ulnocarpeum palmare, b Lig. accessorioulnare, c Lig. accessorioquartale, d Lig. accessoriometacarpeum, e Ligg. intermetacarpea palmaria, f tiefe Beugesehne, g Ligg. metacarpalia transversalia superficialia, h Ligg. metacarpea interossea, i Sesambeine mit Ligg. intersesamoidea, Ligg. sesamoidea collateralia, j Ligg. carpometacarpea palmaria, k Ligg. metacarpea palmaria, l Lig. accessoriocarporadiale, m Lig. radiocarpeum palmare.

4.5 **Zehengelenke**

An der Schultergliedmaße des Afrikanischen Elefanten waren 6 Strahlen ausgebildet. Davon waren die Zehen zwei, drei und vier voll entwickelt (je 3 Phalanges), die erste und die fünfte Zehe bestanden nur aus einer reduzierten Anzahl von Zehengliedern. Die Phalanges der dritten Zehe waren deutlich stärker als jene der zweiten und vierten Zehe.

Der sechste Strahl stellte die rudimentäre sechste Zehe, den Präpollex, dar (s. u.). Bei den untersuchten Individuen waren stets fünf Zehennägel ausgebildet. Der Zehennagel der ersten Zehe war kleiner als jener der anderen. Der Raum zwischen den Phalanges wurde mit Bindegewebe und Fett ausgefüllt. Zwischen den Zehennägeln befand sich ein schmaler Streifen Haut. Der Sohlendurchmesser des untersuchten 46-jährigen Individuums betrug 34 cm (lateromedial) bzw. 37 cm (craniocaudal); der Sohlenumfang betrug 121 cm.

Die Metacarpalknochen waren annähernd vertikal gestellt.

Der **Präpollex** stellte einen rudimentären 6. Strahl dar, der syndesmotisch mit der Basis des ersten Metacarpalknochen verbunden war. Seine proximale Basis war breiter, sein distales Ende spitz zulaufend und es reichte in laterodistaler Richtung bis in das Ballenkissen (Abb. 18 und Abb. 19). Er war bei den untersuchten juvenilen Individuen rein knorpelig. Bei beiden untersuchten adulten Afrikanischen Elefanten war der Präpollex knöchern.

An der Anheftung des Präpollex am Os metacarpale I waren folgende Strukturen beteiligt:

- Ein Band verlief vom lateropalmaren Rand des Os metacarpale I zur Basis des Präpollex.
- Der Ursprung des **M. interosseus I** (siehe unten).
- Ein weiteres Band verlief lateral von der Basis des Präpollex zu den Ossa carpalia II und III.

Abb. 18: Präpollex einer rechten Hand, juveniler Afrikanischer Elefant. Ansicht von palmar. Spitze des Präpollex nach lateral verschoben. 1-2-3-4-5 Zehe 1-2-3-4-5, McI Os metacarpale I, Pp Präpollex.

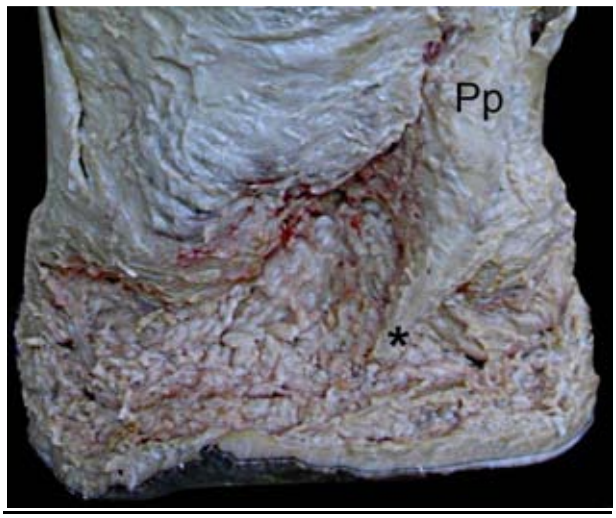

Abb. 19: Präpollex einer linken Hand, adulter Afrikanischer Elefant. Ansicht von palmar. Pp Präpollex, * distale Spitze des Präpollex.

Eine knöcherne Phalanx proximalis war an allen fünf Zehen, eine Phalanx media an der 2., 3., 4. und 5. Zehe und eine Phalanx distalis an der 2., 3. und 4. Zehe ausgebildet. Die Phalanx distalis der 5. Zehe verhielt sich unterschiedlich:

Bei fünf von sieben untersuchten juvenilen Individuen war eine knorpelige Phalanx distalis der 5. Zehe auch makroskopisch zu erkennen. Bei zwei von sieben untersuchten juvenilen Individuen konnte mit Hilfe der histologischen Untersuchung in einem Präparat Bindegewebe, im anderen Faserknorpel nachgewiesen werden. Bei allen vier untersuchten adulten Vorderextremitäten war die Phalanx distalis der 5. Zehe knöchern ausgebildet.

Muskeln:

Der **M. extensor digiti I et II (M. extensor indicis)** entsprang lateral an der Ulna und mit einigen wenigen Fasern über das Spatium antebrachii proximal am Radius. Craniomedial verlief der M. abductor pollicis longus, mit dem er teilweise verwachsen war. Der M. extensor digiti I et II wurde proximal des Carpus vom M. extensor digitorum communis bedeckt. Der Hauptansatz erfolgte dorsomedial am Caput des Os metacarpale II. Ein schmaler Schenkel, der sich auf Höhe des Corpus des Os metacarpale II abspaltete, inserierte dorsomedial am Corpus des Os metacarpale I.

Der **M. abductor pollicis longus** hatte seinen Ursprung cranial an Radius und Ulna. Lateral war er mit dem M. ext. digiti I et II verbunden. Seine Endsehne überkreuzte im distalen Radiusbereich die Sehnen der Mm. brachioradialis und extensor carpi radialis, verlief nach medial und setzte medial am Corpus des Os metacarpale I an.

Der **M. extensor digitorum communis** spaltete sich im Bereich des distalen Radioulnargelenkes in einen dicken, medialen und einen schmalen, lateralen Teil. Der mediale Teil spaltete sich an der Basis der Ossa metacarpalia II bzw. III in einen medialen Schenkel zur zweiten Zehe und einen dickeren, lateralen Schenkel zur dritten Zehe. Vom medialen Schenkel wurde an der Basis des Os metacarpale II ein Verbindungsast zum M. extensor digiti I et II abgegeben. Der dünnere, laterale Teil des M. extensor digitorum communis lief zur vierten Zehe. Von diesem Teil spaltete sich auf Höhe des Caput des Os metacarpale IV ein schmaler Schenkel zur fünften Zehe ab, der am Caput der Phalanx proximalis inserierte (Abb. 20).

Die platten Endsehnen des M. extensor digitorum communis waren dorsal mit den Gelenkkapseln der Zehengelenke der zweiten, dritten, vierten und fünften Zehe verwachsen. Ihr Ansatz war einerseits fächerförmig an den Phalanges distales der 2. bis 5. Zehe, andererseits setzten an den drei Hauptzehen (2 bis 4) Fasern am Caput der Phalanx proximalis, sowie medial und lateral an den Phalanges mediae der 2. bis 4. Zehe an (Abb. 16). Die abaxialen Ansätze waren dicker als die axialen, somit war z. B. an der zweiten Zehe der mediale und an der vierten Zehe der laterale Ansatz stärker (Abb. 20).

Der **M. extensor digitorum lateralis** entsprang am distalen Ende des Epicondylus lateralis humeri am Processus coronoideus lateralis und craniolateral am Schaft der Ulna. Ab dem Carpus war der M. extensor digitorum lateralis sehnig und wurde hier von einer Sehnenscheide umhüllt. Er inserierte am lateralen, proximalen Sesambein der fünften Zehe bzw. an der Basis der Phalanx proximalis.

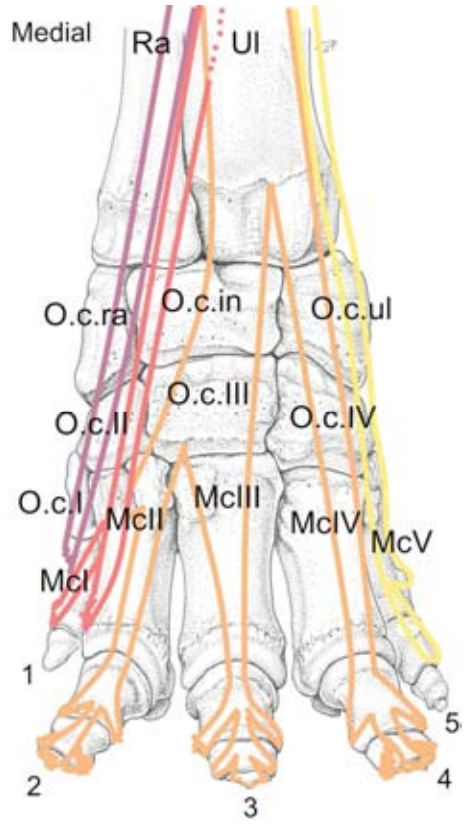

Abb. 20: Linke Hand, adulter Afrikanischer Elefant, Darstellung der dorsalen Muskulatur. Ansicht von dorsal. 1-2-3-4-5 Zehe 1-2-3-4-5, O.c.in Os carpi intermedium, O.c.ra Os carpi radiale, O.c.ul Os carpi ulnare, O.c.I Os carpale I, O.c.II Os carpale II, O.c.III Os carpale III, O.c.IV Os carpale IV, McI Os metacarpale I, McII Os metacarpale II, McIII Os metacarpale III, McIV Os metacarpale IV, McV Os metacarpale V, Ra Radius, Ul Ulna. Muskeln bzw. Endsehnen von medial nach lateral: lila: M. abductor pollicis longus, rot: M. ext. indicis, orange: M. extensor digitorum communis, gelb: M. ext. dig. lat..

Die **Beugesehnen** waren deutlich stärker entwickelt als die Strecksehnen. Die **oberflächliche Beugesehne** strahlte in die Ligg. metacarpalia transversalia ein und spaltete sich distal der Sesambeine fächerförmig auf, um an den Phalanges der 1. bis 5. Zehe lateral und medial anzusetzen. Die oberflächliche Beugesehne bildete eine Art „Aponeurosis palmaris“. Die tiefe Beugesehne spaltete sich proximal in fünf Endsehnen, die durch die Ligg. metacarpalia transversalia zur ersten, zweiten, dritten, vierten bzw. fünften Zehe zogen. Die Endsehnen der tiefen Beugesehne waren jeweils proximal und distal der Articulationes metacarpophalangeae bzw. der Articulationes phalangeae proximales bindegewebig mit den Phalanges (1 bis 5) verbunden und mit den betreffenden Gelenkkapseln verwachsen.

Die tiefen Beugesehnen setzten ähnlich den Strecksehnen fächerförmig um die distalen Zehenglieder jeder Zehe an.

Die Endsehnen der Beuger und Strecker verbanden sich lateral und medial der Articc. interphalangeae proximales bzw. distales miteinander und umhüllten so die Phalanges (Abb. 16 und Abb. 17).

Palmare tiefe Zehenmuskeln:

Der gefiederte **M. interosseus I** entsprang an der Basis des Os metacarpale I bzw. am proximalen Rand des Präpollex. Der M. interosseus der ersten Zehe setzte am proximalen Rand des proximalen Sesambeines der ersten Zehe an.

Die **Mm. interossei II, III und IV** hatten ihren Ursprung an den Basen der Ossa metacarpalia II, III bzw. IV. Es handelte sich um gefiederte Muskeln, deren Muskelfasern miteinander verwachsen waren. Sie spalteten sich kurz vor ihrem Ansatz am Proximalrand des lateralen bzw. medialen proximalen Sesambeines in zwei Schenkel.

Der **M. interosseus V** ging mit seinem lateralen Teil auf Höhe des distalen Randes des Os carpi accessorium aus den palmaren Bandmassen am Carpalgelenk hervor. Sein medialer Teil entsprang mediodistal seines lateralen Teiles und, von ihm bedeckt, auf Höhe des proximalen Randes des Os metacarpale IV aus den Ligg. intermetacarpeae palmaria. Der laterale Anteil war mehrfach gefiedert, besaß einen kräftigen Muskelbauch und inserierte am proximalen Rand des lateralen Sesambeines der fünften Zehe. Der ebenfalls mehrfach gefiederte mediale Teil hatte seinen Ansatz am proximalen Rand des medialen Sesambeines der fünften Zehe.

Der dünne **M. abductor digiti I brevis** ging von lateroproximal der Basis des Os metacarpale I aus den Ligg. intermetacarpeae palmaria hervor und setzte am proximalen Rand der Phalanx proximalis der ersten Zehe an.

Der mehrfach gefiederte **M. abductor digiti II** hatte seinen Ursprung lateropalmar der Basis des Os metacarpale II aus den Ligg. intermetacarpeae palmaria und setzte lateroproximal an der Phalanx proximalis der zweiten Zehe an.

Die **Mm. flexores breves III** und der mehr oberflächlich gelegene **IV** entsprangen distal aus dem Retinaculum flexorum und waren bis zu den Basen der Metacarpalknochen miteinander verschmolzen. Dann trennten sie sich, um distopalmar am Os metacarpale III bzw. IV anzusetzen.

Der dünne **M. adductor digiti IV** entsprang an der Basis des Os metacarpale IV aus den Ligg. intermetacarpeae palmaria, war gefiedert und inserierte mediopalmar an der Basis der Phalanx proximalis der vierten Zehe.

Der **M. adductor digiti V** hatte seinen Ursprung mediopalmar am Os carpi accessorium. Er war kräftig und gefiedert und wurde vom medialen Teil des M. interosseus V bedeckt. Er setzte am proximalen Rand der Phalanx proximalis der fünften Zehe an.

4.5.1 Articulationes metacarpophalangeae

Bei den untersuchten Afrikanischen Elefanten waren stets fünf Zehengrundgelenke ausgebildet. Es artikulierten die Trochlea der Metacarpalknochen mit der Fovea articularis der entsprechenden Phalanx proximalis. Die Trochlea der Metacarpalknochen wurde durch eine tansversale Leiste in eine dorsale, die mit der Fovea articularis der Phalanx proximalis artikulierte, und eine palmare Hälfte, zur Artikulation mit den Sesambeinen, geteilt. Bei paarig angelegten Sesambeinen (Zehe 2 bis 5) wurde die palmare Artikulationsfläche durch einen Sagittalkamm geteilt. Die Gelenkkapseln der Articulationes metacarpophalangeae waren dick und setzten eng um die gelenkbildenden Knochenenden an.

Die Sesambeine der zweiten, dritten, vierten und der fünften Zehe waren paarig angelegt. An der ersten Zehe war nur ein Sesambein vorhanden.

An den Sesambeinen hefteten die Ligg. metacarpalia transversalia und die Ligg. intersesamoidea an und sie dienten der tiefen Beugesehne als Gleitkörper.

Die proximalen und die distalen Sesambeinbänder waren kräftig. Die proximalen entsprangen an den Corpora der Ossa metacarpalia und zogen zu den Sesambeinen. Die distalen setzten an den entsprechenden Phalanges proximales an. Ligg. intersesamoidea verbanden die Sesambeine untereinander. Die Ligg. sesamoidea collateralia verankerten die Sesambeine an den Metacarpalknochen bzw. stärker an den Phalanges proximales (Abb. 17).

Die fünf Zehengrundgelenke waren in Form von Sattelgelenken zwischen den Metacarpalknochen und den Phalanges proximales angelegt.

Kollateralbänder waren lateral und medial an den Artt. metacarpophalangeae der zweiten, dritten, vierten und der fünften Zehe und am Art. carpometacarpea der ersten Zehe angelegt.

4.5.2 Articulationes interphalangeae proximales

Zwischen der distalen Spitze der knöchernen Phalanx (proximalis) der ersten Zehe und einer Ansammlung von faserreichem Bindegewebe fand sich bei allen untersuchten Individuen eine synoviahältige Gelenkhöhle ohne Ausbildung eines weiteren artikulierenden Knochens. Medial und lateral waren Kollateralbänder angelegt.

Die Artt. interphalangeae proximales der restlichen vier Zehen stellten Sattelgelenke dar. Die Gelenkflächen der Phalanges mediae waren transversal konvex, die Gelenkflächen der Phalanges proximales transversal konkav. Die transversale Ausdehnung der Gelenkflächen war länger als die sagittale. Die Beweglichkeit war auf Extension und Flexion beschränkt. An der fünften Zehe befand sich nur medial an der Phalanx proximalis eine Gelenkfläche. Lateral und medial verliefen Kollateralbänder.

An den drei Hauptzehen (zweite, dritte und vierte) waren dorsal und palmar schmale Kapselfalten ausgebildet, die zwischen die Gelenkflächen ragten.

4.5.3 Articulationes interphalangeae distales

Hier artikulierten die Phalanges mediae und distales der zweiten, dritten und vierten Zehe.

Die Phalanges distales der zweiten, dritten und vierten Zehe waren plump stäbchenförmig und wiesen im Bereich der Zehenachsen Auftreibungen auf (Abb. 16). Kräftige, kreisförmige Kapselfalten reichten weit in den Gelenkspalt hinein.

Im Zehenendgelenk der zweiten und der vierten Zehe trennte eine keilförmige nach palmar breiter werdende Gelenkkapselfalte die Gelenkflächen fast vollständig voneinander, nur dorsal bestand bei den untersuchten adulten Elefanten eine kleine Kontaktfläche.

Die Gelenkkapselfalte des Endgelenkes der dritten Zehe umgab bei den adulten Elefanten die Gelenkfläche der Phalanx distalis ringförmig. Bei den untersuchten juvenilen Individuen teilte die Gelenkkapselfalte das Gelenk in zwei Etagen.

Die Phalanx distalis der fünften Zehe war bei beiden untersuchten adulten Individuen knöchern. Bei fünf der untersuchten juvenilen Elefanten war sie makroskopisch eindeutig nachweisbar. Bei zwei Individuen konnte makroskopisch keine Phalanx distalis an der fünften Zehe nachgewiesen werden. Die histologische Untersuchung bei diesen beiden juvenilen Individuen zeigte bei einem Tier eine knorpelige Phalanx distalis, beim anderen weder Knorpel- noch Knochengewebe. Eine mit Synovia gefüllte Höhle des Zehenendgelenkes der fünften Zehe war stets vorhanden. Bei jenen Individuen, wo eine knöcherne Phalanx distalis der fünften Zehe ausgebildet war, war die Gelenkhöhle durch eine Gelenkkapselfalte in zwei Etagen geteilt.

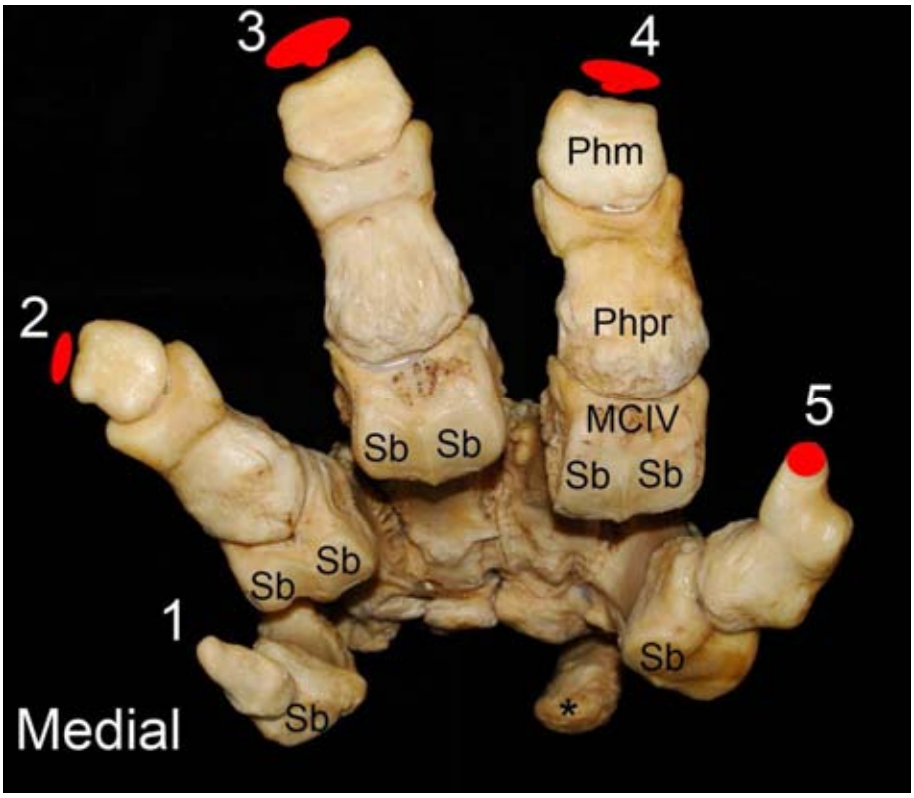

Abb. 21: Knochen der linken Hand, adulter Afrikanischer Elefant. Ansicht von distal. 1-2-3-4-5 Zehe 1-2-3-4-5, McIV Os metacarpale IV, Phm Phalanx media, Phpr Phalanx proximalis, Sb Gelenkflächen für Sesambeine. Rot: Phalanges distales (eingefügt), * Os carpi accessorium.

4.6 **Histologische Ergebnisse**

4.6.1 Knorpelschichtdicke

Tab. 2: Messung der Knorpelschichtdicke bei juvenilen Afrikanischen Elefanten. Mittelwert (mm) Gelenkknorpel – Epiphysenknorpel – Komplexe.

Gelenk	Gelenkknorpel	Mittelwert (mm)
Schultergelenk	Scapula	3,7
	Humerus	4,7
Ellbogengelenk	Humerus	3,6
	Radius	4,5
	Ulna	2,6
Karpalgelenk	Ulna	4,5
	Radius	6
Zehe III	Phalanx prox., med., dist.	3,3

4.6.2 Gelenkknorpel

Der Gelenkknorpel der untersuchten juvenilen Elefanten zeigte in der HE – Färbung ein überwiegend eosinophiles Bild, lediglich in Knochennähe wurde die Grundsubstanz basophiler. Der Gelenkknorpel konnte in folgende Zonen eingeteilt werden (Tab. 3):

1. Oberflächenzone : Hier befanden sich im Schnittpräparat ovale bzw. spindelförmige, abgeplattete Knorpelzellen. Die Zellen lagen nicht im Verband, waren jedoch zahlreicher als im restlichen Knorpel vorhanden und parallel zur Knorpeloberfläche angeordnet.
2. Übergangszone: Die Zellen waren teils rund wie in der intermediären Zone, teils spindelförmig wie in der Oberflächenzone. Die Anzahl der in dieser Zone befindlichen Zellen war geringer als die der intermediären Zone.

3. Intermediäre Zone (radiäre Zone und ruhende Zone): Hier war der Übergang von den kleinen runden Zellen der radiären Zone in die runden mittelgroßen Einzelzellen der ruhenden Reservezone. Es konnte kein Unterschied zwischen einer radiären und einer ruhenden Zohne festgestellt werden, daher wurden beide Zonen zur intermediären Zone zusammengefasst. Die Zellen waren teils paarweise angeordnet (Chondrone) und die Matrix war aufgrund der Maskierung von Fasern durch die Matrix homogen.

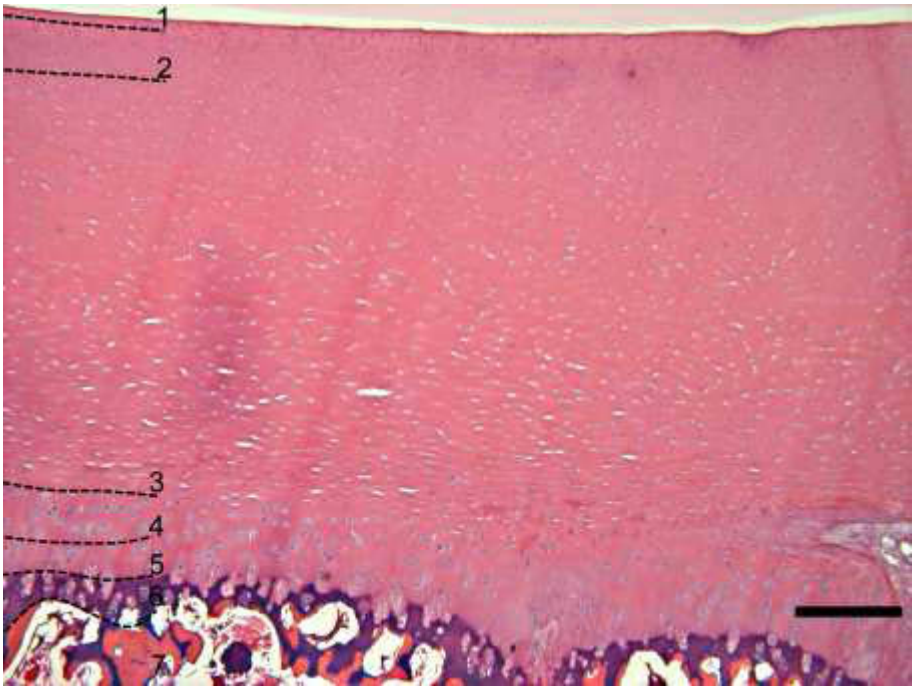

Abb. 22: Gelenkknorpel des Os carpi ulnare, juveniler Afrikanischer Elefant, Darstellung der Zonen des Gelenkknorpels. HE - Färbung. 1 Oberflächenzone, 2 Übergangszone, 3 intermediäre Zone, 4 proliferierende Zone, 5 hypertrophe Zone, 6 kalzifizierende Zone, 7 subchondraler Knochen. Maßstab - 100µm.

4. Proliferierende Zone (Säulenknorpel): Hier waren radiär angeordnete Chondrozytensäulen vorhanden, die bis zu 10 (meist 5 bis 6) Zellen beinhalteten. Die Zellen waren klein und rund, jedoch größer als jene der oberflächlichen Zonen. Sie wurden zur Oberfläche hin flacher und kleiner.

5. Hypertrophe Zone (Blasenknorpel): In dieser Zone befanden sich große und blasenförmige Zellen, die sich in Gruppen teils säulenartig, aber auch nebeneinander anordneten. Die Gruppen bestanden aus bis zu 16 Zellen.
6. Kalzifizierende Zone (Eröffnungszone): Diese Zone färbte sich in der HE - Färbung stark basophil an. Die kalzifizierten Knorpelzellen waren groß und rund und gruppierten sich zu Gruppen von bis zu 9 Zellen.

Tab. 3: Os carpi ulnare, juveniler Afrikanischer Elefant, Beispiel für die Dickenverteilung der Gelenkknorpelzonen in Prozent (%) (vgl. Abb. 22).

Zone	Prozent (%)
Oberflächenzone	1,3
Übergangszone	7,6
Intermediäre Zone	72,9
Proliferierende Zone	8
Hypertrophe Zone	6,8
Kalzifizierende Zone	3,4

4.6.1 Gelenkkapselfalten

Entgegen der ursprünglichen Vermutung, dass es sich hierbei um „Menisci“ handelt, konnten in den von juvenilen Afrikanischen Elefanten gewonnenen Proben (Carpus) keine Knorpelzellen nachgewiesen werden. Vielmehr bestanden diese Falten aus Fettgewebe, wobei Fettzellen mit straffen Bindegewegszügen zu Läppchen zusammengefasst wurden. Diese Einheiten wurden von straffem Bindegewebe und einer Lamina synovialis umgeben, von welcher Synovialzotten ins Gelenk ragten (Abb. 11, Abb. 23 und Abb. 24).

Abb. 23: Gelenkkapselfalte eines Carpalgelenkes, juveniler Afrikanischer Elefant. HE - Färbung. * Fettläppchen. Pfeilspitzen Synovialzotten. Maßstab – 100 µm.

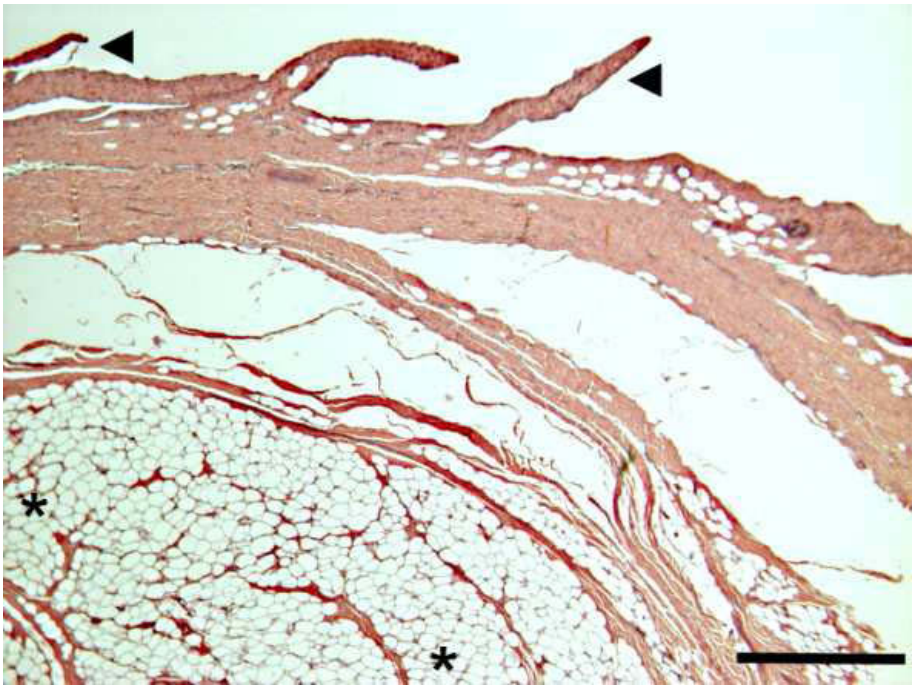

Abb. 24: Gelenkkapselfalte eines Carpalgelenkes, juveniler Afrikanischer Elefant. HE - Färbung. * Fettläppchen, Pfeilspitzen Synovialzotten. Maßstab – 100 µm.

4.6.2 „Ligamentum elasticum craniale“

Da der Aufbau des „Ligamentum elasticum craniale“ aus elastischen Fasern aufgrund der makroskopischen Befunde bezweifelt wurde, wurden hiervon Proben für eine histologische Untersuchung genommen. Demnach bestand dieser Abschnitt der Gelenkkapsel aus straffem, kollagenfasrigem Bindegewebe mit nur wenigen elastischen Fasern, was durch die Resorcinfuchsin Färbung deutlich wurde (Abb. 26). Der Faserverlauf war parallel und wellenförmig (Abb. 26 und Abb. 27).

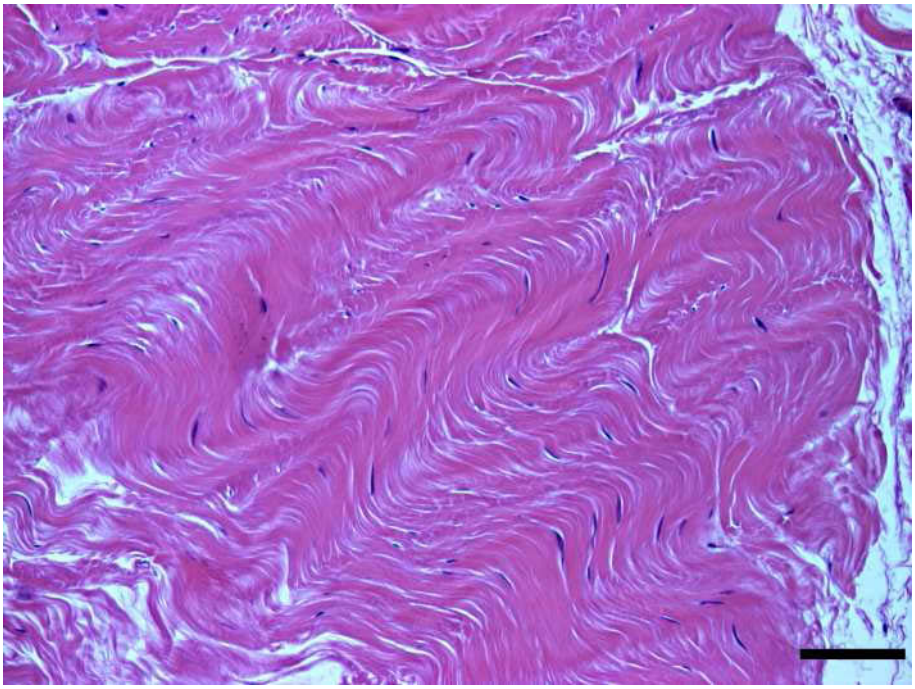

Abb. 25: „Lig. elasticum craniale“, juveniler Afrikanischer Elefant. HE - Färbung. Maßstab – 100 µm.

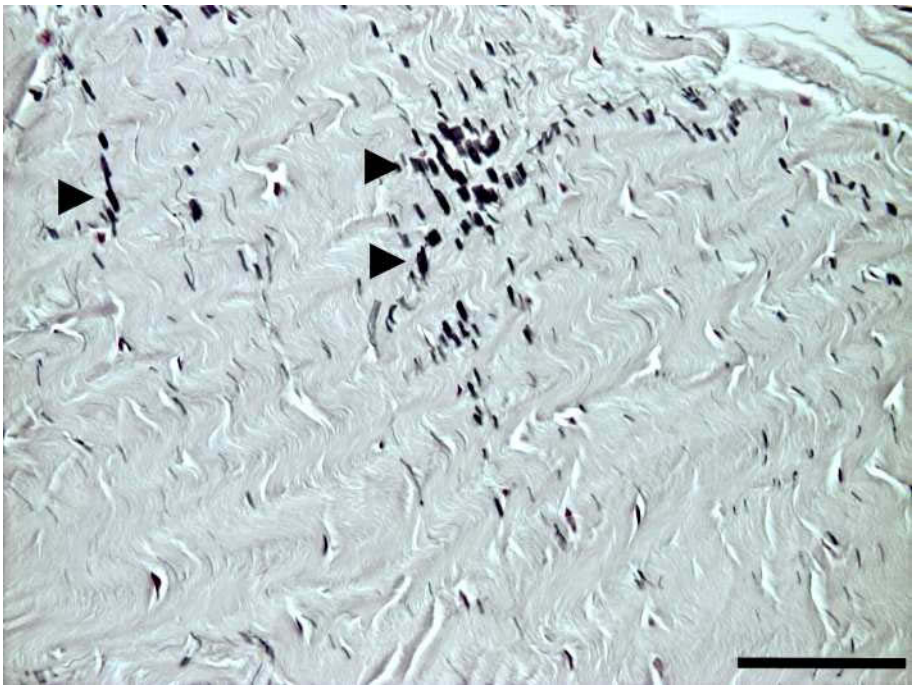

Abb. 26: „Lig. elasticum craniale“, juveniler Afrikanischer Elefant. Elastica (Resorcinfuchsin) Färbung. Pfeilspitzen markieren die wenigen elastischen Fasern im straffen kollagenen Bindegewebe. Maßstab = 100 µm.

4.6.3 Phalanx distalis der fünften Zehe beim juvenilen Afrikanischen Elefanten

Da bei zwei der sieben untersuchten juvenilen Elefanten makroskopisch keine Phalanx distalis V sichtbar war bzw. weil palpatorisch härteres Gewebe festgestellt wurde, wurde eine histologische Untersuchung veranlasst. Die Phalanx distalis der fünften Zehe eines der beiden histologisch untersuchten juvenilen Präparate bestand aus Faserknorpel, der von Bindegewebe dicht umschlossen wurde (Abb. 27). Beim anderen juvenilen Präparat konnte histologisch nur Bindegewebe nachgewiesen werden.

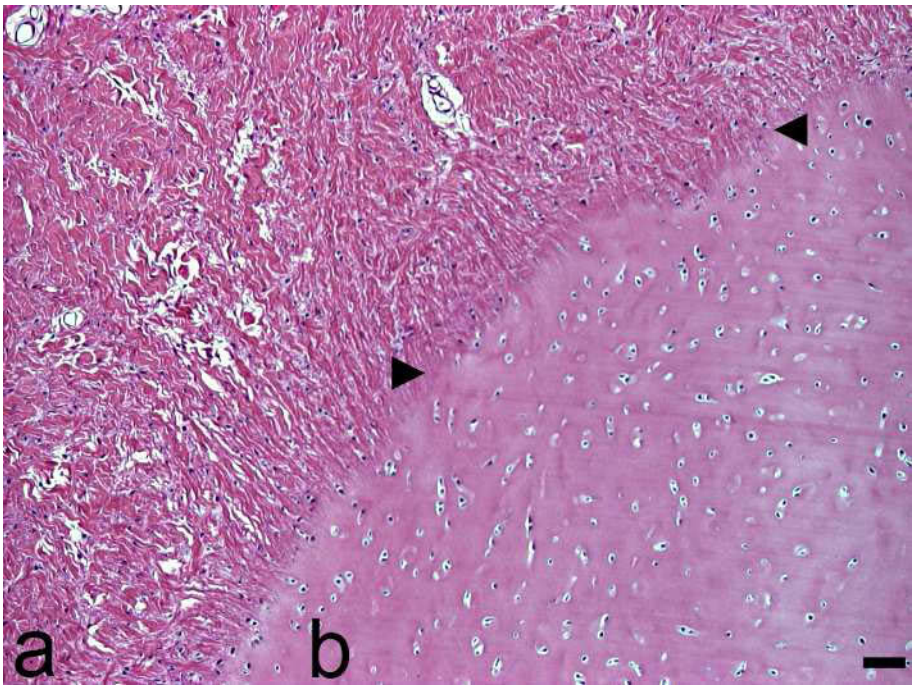

Abb. 27: Phalanx distalis einer fünften Zehe, juveniler Afrikanischer Elefant. HE - Färbung. a Bindegewebe, b Faserknorpel. Pfeilspitzen markieren das Hineinziehen von Bindegewebsfasern in den Faserkknorpel. Maßstab - 100µm.

4.6.4 Präpollex beim Afrikanischen Elefanten

Die Präpollices der präparierten adulten Afrikanischen Elefanten waren stets knöchern. Um den histologischen Aufbau eines juvenilen Präpollex zu zeigen, wurden Gewebeproben entnommen. Der juvenile Präpollex bestand aus hyalinem Knorpel, der von einem Perichondrium umgeben und durch dieses mit dem umliegenden Bindegewebe verbunden war. Auch Blutgefäße befanden sich im Knorpel. Eine Kalzifizierung konnte bei den untersuchten Präparaten von Jungtieren nicht festgestellt werden (Abb. 28).

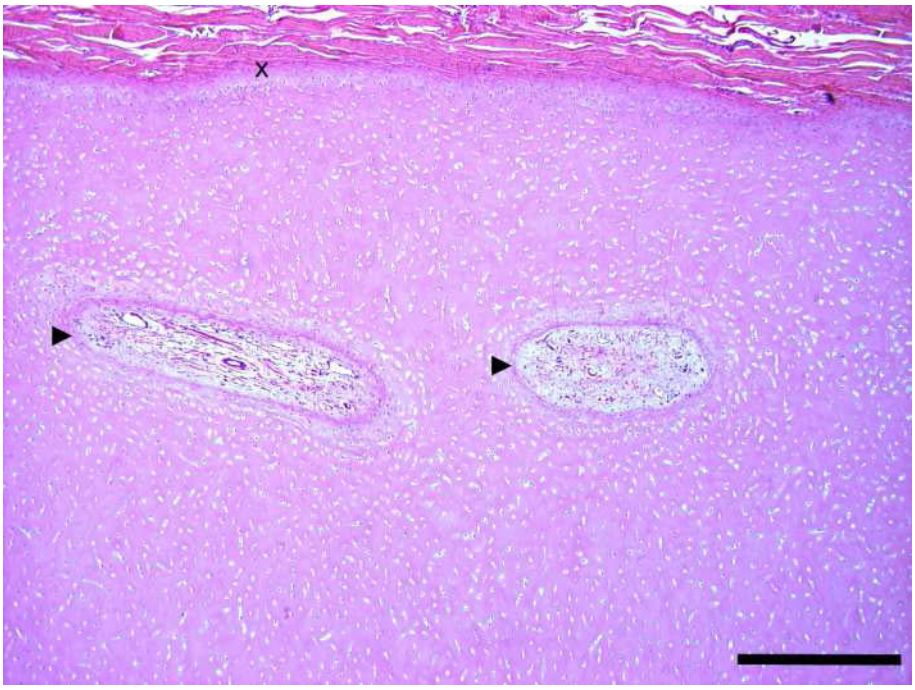

Abb. 28: Präpollex, juveniler Afrikanischer Elefant. HE - Färbung. x Perichondrium mit dem umliegenden Bindegewebe, Pfeilspitzen Blutgefäßkanäle im Faserknorpel. Maßstab - 100µm.

4.7 Pathologisch-anatomische Befunde

An beiden untersuchten adulten Elefanten konnten in nahezu allen Gelenken hochgradige Arthrosen festgestellt werden.

Im Schultergelenk der 46-jährigen Elefantenkuh waren Knorpelusuren sichtbar. Medial um den Humeruskopf nach caudal ziehend konnte eine fingerbreite Furche dargestellt werden (Abb. 39). Die Ränder des Caput humeri waren exostotisch.

Am adulten Schultergelenk fielen die unregelmäßig begrenzten Gelenkflächen auf. Der Rand der Cavitas glenoidalis war besonders cranial und medial unregelmäßig begrenzt. Caudal an der Gelenkfläche des Caput humeri befand sich ein großer Knorpeldefekt. Die zentralen Knorpelusuren strahlten zu allen Seiten aus. Die Synovialmembran bzw. Synovialzotten waren insbesondere lateral teilweise verkalkt (Abb. 29).

Abb. 29: Cavitas glenoidalis eines linken Schulterblatts, adulter Afrikanischer Elefanten. Ansicht von distal. Schwarze Pfeilspitzen pathologische Veränderungen.

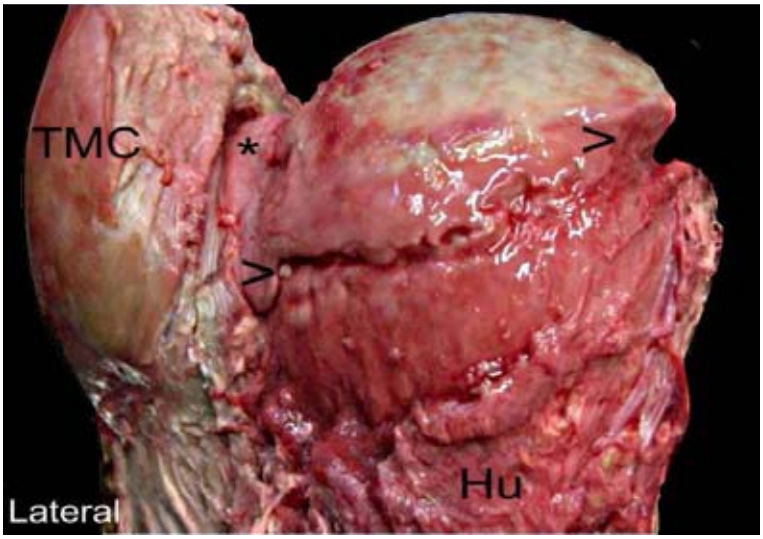

Abb. 30: Caput humeri eines linken Oberarmes, adulter Afrikanischer Elefant. Ansicht von caudal. H Humerus, TMC Pars caudalis des Tuberculum majus. * Sulcus zwischen Caput humeri und Pars caudalis des Tuberculum majus. Schwarze Pfeilspitzen pathologische Veränderungen.

Die arthrotischen Veränderungen waren am Ellbogengelenk deutlich stärker ausgeprägt als am Schultergelenk. Sie äußerten sich unter anderem durch Ausziehungen und Verbreiterungen gelenkbildender Knochenenden.

Am distalen linken Humerus des untersuchten 46-jährigen Elefanten waren tiefgreifende Knorpelläsionen lateral und craniomedial vorhanden, wobei die craniomedialen Läsionen sogar den subchondralen Knochen betrafen. Im lateralen Bereich war der Gelenkknorpel des Humerus bindegewebig (über dem subchondralen Knochen) ersetzt. In Abb. 31 wird die subchondrale Reaktion des Knochens auf die Abnutzungserscheinungen in der Incisura trochlearis der Ulna (vgl. Abb. 32) deutlich.

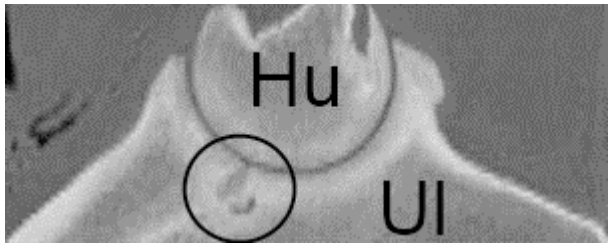

Abb. 31: CT eines linken Ellbogengelenkes, adulter Afrikanischer Elefant. Hu Humerus, Ul Ulna. schwarzer Kreis Knochenveränderung.

Diese pathologisch - anatomischen Veränderungen können als mittel- bis hochgradige Arthrose der Articulatio cubiti angesprochen werden.

An der Ulna waren hutkrempenartige Knochenveränderungen (Pommersche Randwülste) und starke Unregelmäßigkeiten im Bereich der gelenkbildenden Knochenränder erkennbar. Es konnten weiters zwei Knorpelusuren craniozentral der Fovea capitis radii bzw. ulnae dargestellt werden. Streifig - flächige Knorpeldefekte befanden sich medial in der Incisura trochlearis der linken Ulna des 46-jährigen Elefanten, lateral davon waren multiple Knorpelläsionen sichtbar (Abb. 32).

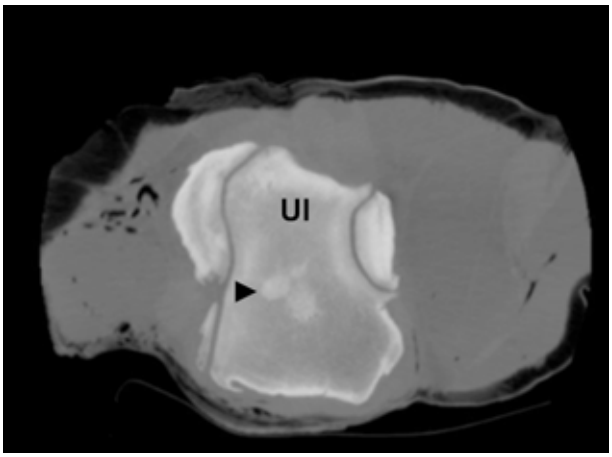

Abb. 32: CT eines linken Ellbogengelenkes, adulter Afrikanischer Elefant. Ul Ulna Incisura trochlearis. Schwarze Pfeilspitze zentrale Knorpelläsionen.

Radius und Ulna waren bei den untersuchten juvenilen Individuen bindegewebig verbunden, bei beiden adulten Individuen (37 und 46 Jahre alt) waren sie durch die Verknöcherung der Membrana interossea in Pronationsstellung verwachsen, auch der M. pronator quadratus und das Lig. radioulnare waren verknöchert.

Die augenscheinlichste pathologische Veränderung im Bereich des Carpus war bei beiden adulten Individuen (37 und 46 Jahre alt) die Verschmelzung des Os carpi radiale mit dem Os carpi intermedium; das Os carpi intermedium war gegenüber dem Os carpi ulnare noch geringgradig beweglich. An allen gelenkbildenden Knochenoberflächen des Carpalgelenkes, insbesondere aber an den zentralen lasttragenden Elementen, konnten Knorpelusuren festgestellt werden. Die dorsalen Kanten der zentralen Carpalknochen waren deutlich exostotisch (Abb. 33). Ähnlich stark ausgeprägte Exostosen konnten bei beiden untersuchten adulten Individuen an beiden Vorderextremitäten gefunden werden.

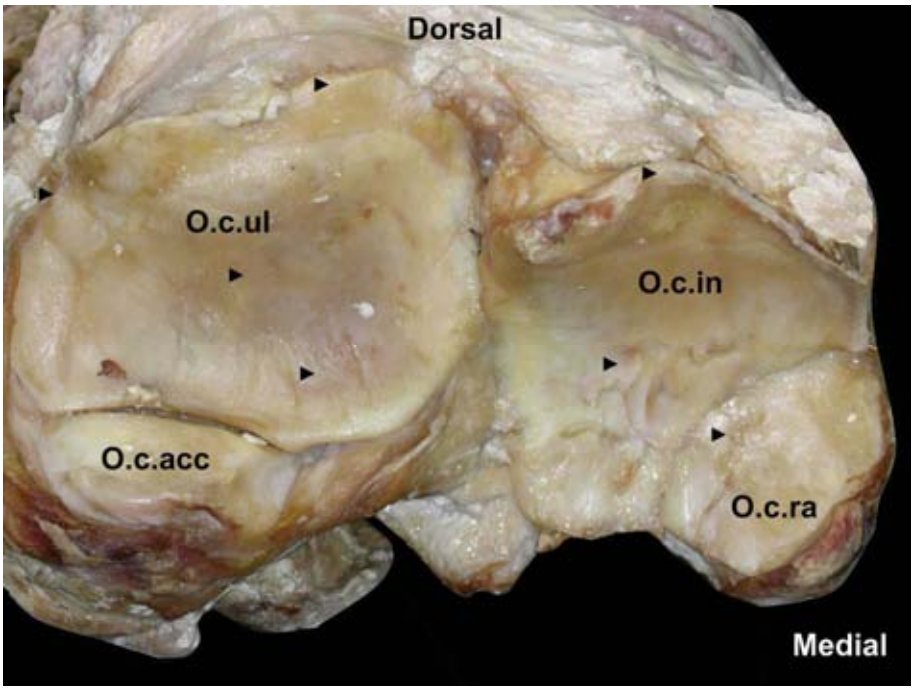

Abb. 33: Linker Carpus, adulter Afrikanischer Elefant. Ansicht von proximal. O.c.acc Os carpi accessorium, O.c.in Os carpi intermedium, O.c.ra Os carpi radiale, O.c.ul Os carpi ulnare. Schwarze Pfeilspitzen Pathologische Veränderungen wie Knorpelusuren und Exostosen.

Dorsalwülste an den Knochen der proximalen Gelenkreihe waren deutlich exostotisch ausgezogen.

Die Knochen der Articulationes mediocarpeae von beiden untersuchten adulten Individuen, bildeten dorsal starke, unebene Randwülste aus. Auffallend war an dieser Stelle auch die massive Zottenbildung der Gelenkkapsel.

Eine tropfenförmige Exostose war am Os carpi radiale ausgebildet, die nach lateral bis zum Os carpale intermedium reichte. Ein vergleichbarer Osteophyt reichte vom Os carpi ulnare zum Os carpi intermedium (Abb. 34).

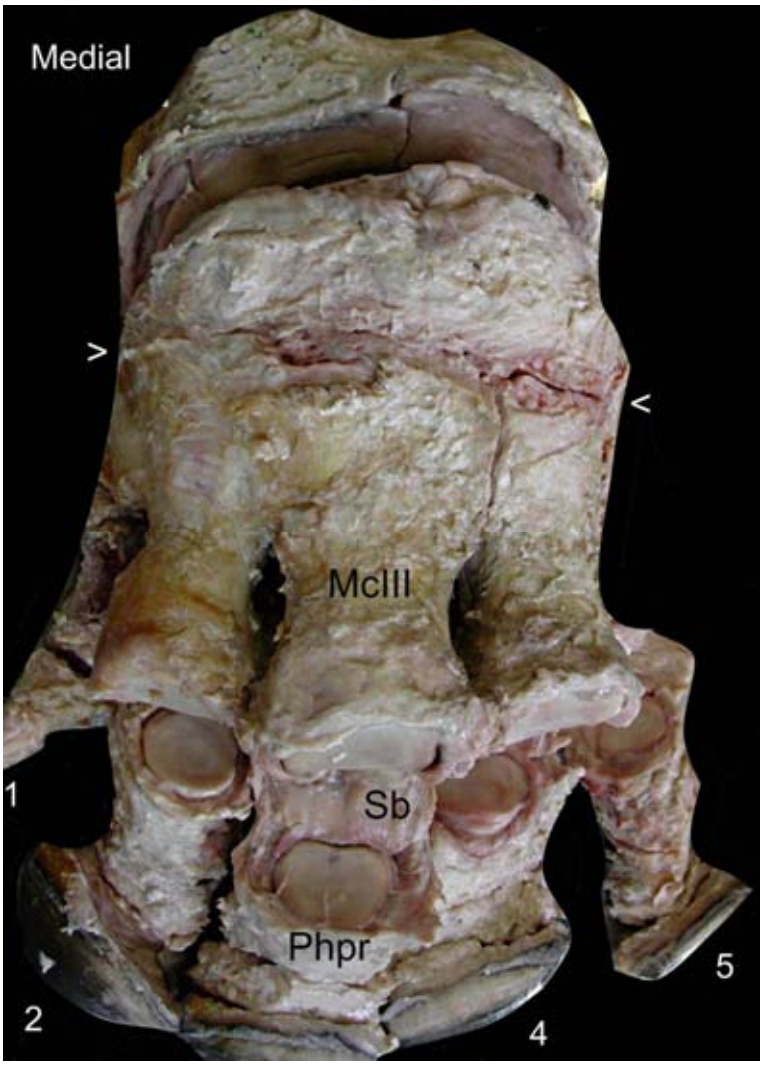

Abb. 34: Linke Hand, adulter Afrikanischer Elefant. Ansicht von dorsal. Articulatio carpometacarpea zwischen den weißen Pfeilspitzen. 1-2-4-5 Zehe 1-2-4-5, McIII Os metacarpale III, Phpr Phalanx proximalis, Sb Sesambein. Schwarze Pfeilspitzen tropfenartige knöcherne Exostosen, weiße Pfeilspitzen verwachsener Gelenkspalt des Articulatio carpometacarpea.

Die Knochen der distalen Carpalgelenkreihe bei beiden adulten Individuen (37 und 46 Jahre alt) waren annähernd vollständig miteinander verwachsen: Ausgeprägte Dorsalwülste waren medial zur Gänze miteinander verwachsen, während lateral noch ein Gelenkspalt darstellbar war. Die Knochen der metacarpalen Reihe und die Basen der Metacarpalknochen waren ebenfalls unbeweglich verwachsen (Abb. 34 und Abb. 55).

Die distale Gelenkfläche des Os metacarpale I der linken Hand des 46-jährigen Elefanten zur Phalanx proximalis I zeigte palmar eine tiefe Knorpelläsion, auch an der Gelenkfläche des Sesambeines wurde eine zentrale Knorpelusur sichtbar (Abb. 35). Caudomedial der Gelenkfläche des Os metacarpale I zum Sesambein zeigend befand sich ebenfalls eine tiefe Knorpelusur.

Die distalen Gelenkflächen der Ossa metacarpalia II, III und IV der 46-jährigen Elefantenkuh zeigten unterschiedlich stark ausgeprägte Knorpelläsionen (Abb. 35 und Abb. 36). An der Gelenkfläche des medialen Sesambeines der 4. linken Zehe war ebenfalls eine Knorpelusur vorhanden.

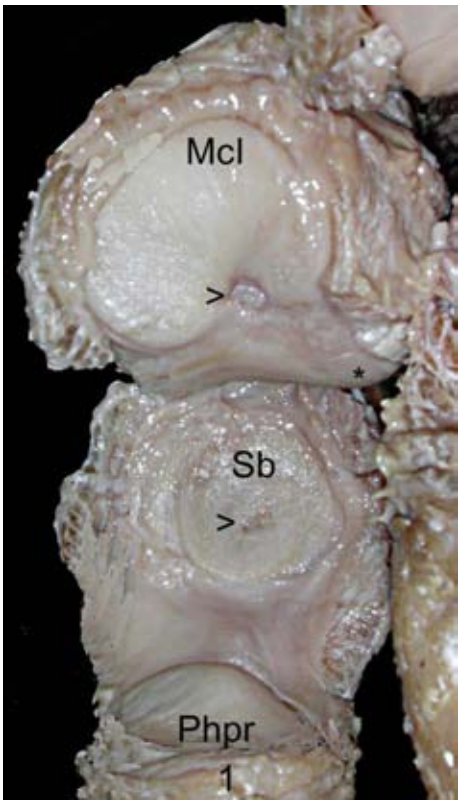

Abb. 35: Articulatio metacarpophalangea der ersten Zehe der linken Hand, adulter Afrikanischer Elefant. Ansicht von dorsal. Knochen auseinandergeklappt. 1 Zehe 1, Mc1 Os metacarpale der ersten Zehe, * palmare Gelenkfläche des Os metacarpale I zum Sesambein, Phpr Phalanx proximalis, Sb Sesambein. Schwarze Pfeilspitzen: Knorpelusuren.

Ein tiefer Knorpeldefekt befand sich zentral am Sagittalkamm der Trochlea des Metacarpalknochens der dritten Zehe der 46-jährigen Elefantenkuh (Abb. 36).

Die Gelenkflächen der Articulationes interphalangeae proximales der zweiten, dritten und der vierten Zehe des 46-jährigen Elefanten zeigten dorsopalmar orientierte Knorpelrillen.

Unter den distalen Zehengelenken des 46-jährigen Elefanten konnten nur zwei tiefe Knorpelusuren medial an der Facies articularis distalis der Phalanx media der vierten Zehe festgestellt werden.

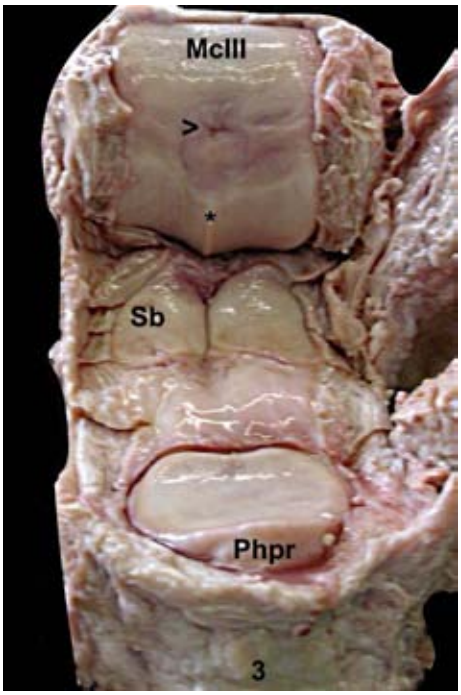

Abb. 36: Articulatio metacarpophalangea der dritten Zehe der linken Hand, adulter Afrikanischer Elefant. Ansicht von dorsal. 3 Zehe 3, McIII Os metacarpale III, Phpr Phalanx proximalis der dritten Zehe, Sb mediales Sesambein, * Sagittaler Knochenkamm des McIII. Schwarze Pfeilspitze Knorpeldefekt.

4.8 Untersuchungen mittels bildgebender Verfahren (Röntgen, CT, MRT)

4.8.1 Schultergelenk

Die Röntgenbilder eines juvenilen Humerus zeigten, dass sowohl das Caput humeri als auch das Tuberculum majus des Afrikanischen Elefanten einen eigenen Verknöcherungskern besitzen (Abb. 38).

Im Bereich der distalen Humerusepiphyse waren ein mediales und ein laterales Ossifikationszentrum erkennbar.

Abb. 37: Röntgenbild eines rechten Schultergelenkes, juveniler Afrikanischer Elefant, lateromedialer Strahlengang. 50 V und 4 mAs. Hu Humerus, Sc Scapula.

Abb. 38: Röntgenbild eines rechten Schultergelenkes, juveniler Afrikanischer Elefant, im craniocaudalen Strahlengang. 50 V und 4,5 mAs. Hu Humerus, Sc Scapula. X eigenständige Knochenkerne des Caput humeri bzw. des Tuberculum majus.

Im Röntgenbild des Schultergelenkes eines adulten Elefanten (46 Jahre alt) war caudal am Caput humeri eine Furche erkennbar, die im Kapitel 4.7 näher beschrieben wird (Abb. 39, Abb. 40 und Abb. 41). Dabei handelte es sich um eine fokale Einziehung der Gelenkkalotte mit zartem Sklerosasaum.

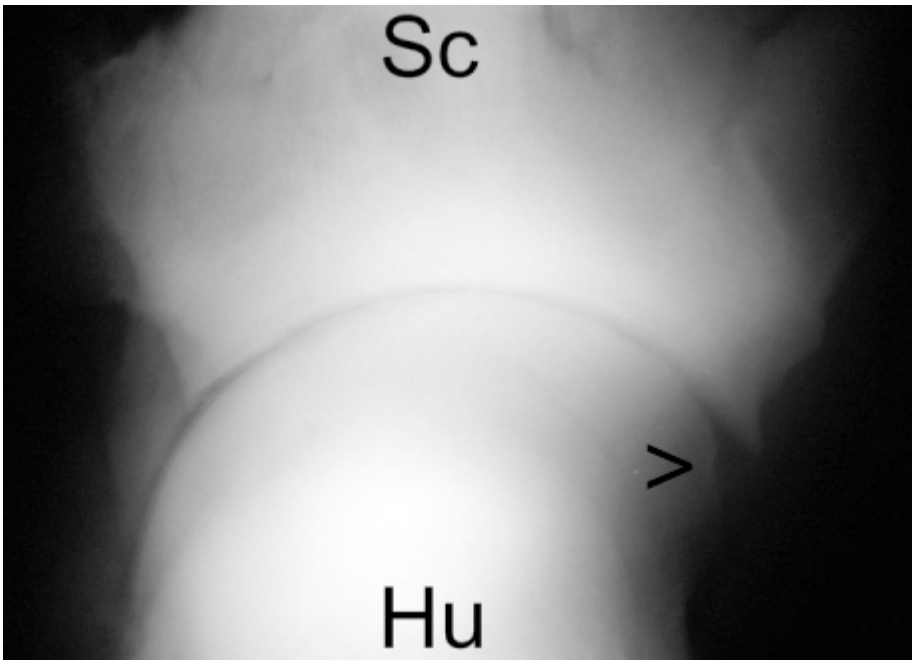

Abb. 39: Röntgenbild eines rechten Schultergelenkes, adulter Afrikanischer Elefant, lateromedialer Strahlengang. 90 KV und 2,6 mAs. Hu Humerus, Sc Scapula. Schwarze Pfeilspitze caudaler Sulcus des Caput humeri.

In der Darstellung des Schultergelenkes im Magnetresonanztomographen war der Gelenkspalt als weiße Linie erkennbar. Daß er lateral und caudal deutlich breiter war als zentral, könnte möglicherweise durch die Lagerung zustande gekommen sein (Abb. 40 und Abb. 41).

Abb. 40: Dorsales MR-Tomogramm eines linken Schultergelenkes, adulter Afrikanischer Elefant. In T2-Gewichtung mit Fettunterdrückung (STIR, TR: 1200 ms, TE 16 ms, TI: 70 ms; links) und in T2-Gewichtung (Spin Echo, TR: 5800 ms, TE: 140 ms; rechts). Hu Humerus, Sc Scapula. weißer Kreis synoviagefüllter caudomedialer Sulcus des Caput humeri.

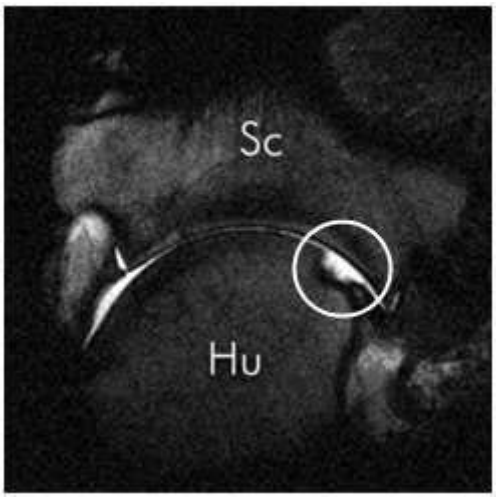

Abb. 41: Sagittales MR-Tomogramm einer linken Schulter, adulter Afrikanischer Elefant. In T2-Gewichtung mit Fettunterdrückung (STIR, TR: 1200 ms, TE 16 ms, TI: 70 ms; links) und in T2-Gewichtung (Spin Echo, TR: 5800 ms, TE: 140 ms; rechts). Hu Humerus, Sc Scapula. weißer Kreis synoviagefüllter caudomedialer Sulcus des Caput humeri.

4.8.2 Ellbogengelenk

Das distale Humerusende zeigte beim juvenilen Elefanten eine weite Epiphysenfuge. Eine Epiphysenfuge an den proximalen Enden der Antebrachialknochen konnte röntgenologisch nicht dargestellt werden. Das Tuber olecrani war nicht vollständig verknöchert (Abb. 42 und Abb. 43).

Abb. 42: Röntgenbild eines rechten Ellbogengelenkes, juveniler Afrikanischer Elefant, mediolateraler Strahlengang. 52 V und 4 mAs. Hu Humerus, Ra Radius, Ul Ulna.

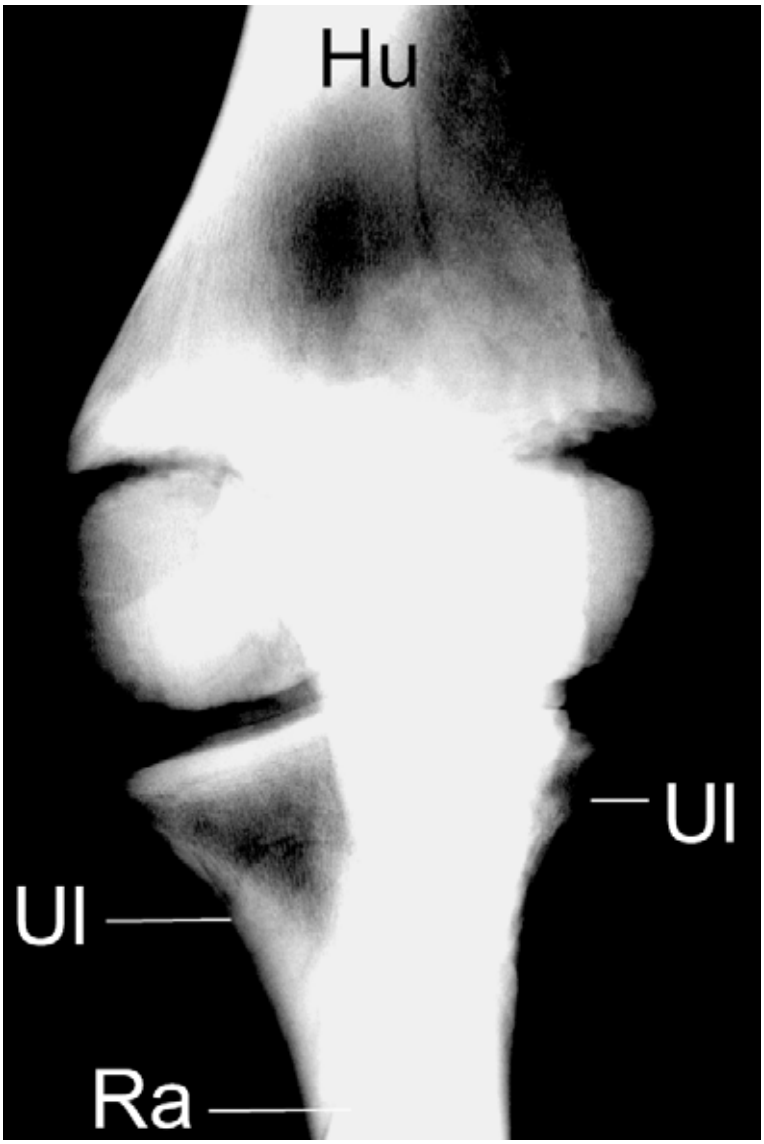

Abb. 43: Röntgenbild eines rechten Ellbogengelenkes, juveniler Afrikanischer Elefant, craniocaudaler Strahlengang. 52 V und 4 mAs. Hu Humerus, Ra Radius, Ul Ulna.

Die Darstellung des Ellbogengelenkes des 46-jährigen Elefanten im Magnetresonanztomographen zeigte ein mächtiges Olecranon (Abb. 45) und Knorpelusuren des Condylus humeri medialis (Abb. 44).

Abb. 44: Dorsales MR-Tomogramm eines linken Ellbogens, adulter Afrikanischer Elefant. In T1-Gewichtung (Spin Echo, TR: 450 ms, TE: 25 ms). Hu Humerus, Ra Radius, Ul Ulna. Weißer Kreis Knorpelusuren.

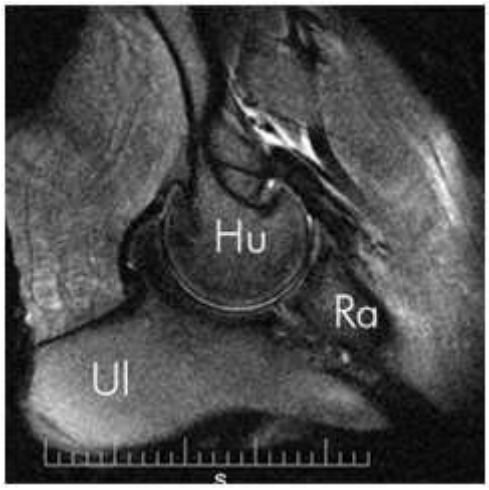

Abb. 45: Sagittales MR-Tomogramm eines linken Ellbogens, adulter Afrikanischer Elefant. In T1-Gewichtung (Spin Echo, TR: 450 ms, TE: 25 ms). Hu Humerus, Ra Radius, Ul Ulna.

4.8.3 Manus

In der Röntgenaufnahme der Hand eines juvenilen Elefanten fiel auf, dass die zentralen Handwurzelknochen (Ossa carpi intermedium, carpi ulnare, carpale III und carpale IV) stärker verkalkt waren (Abb. 46 und Abb. 47). Eine deutliche distale Epiphysenfuge war an den Ossa metacarpalia II, III, und IV sichtbar.

Abb. 46: Röntgenbild einer linken Hand, juveniler Afrikanischer Elefant, mediolateraler Strahlengang. 56 V und 4 mAs. Mc Metacarpus, Sb Sesambeine, Ul Ulna.

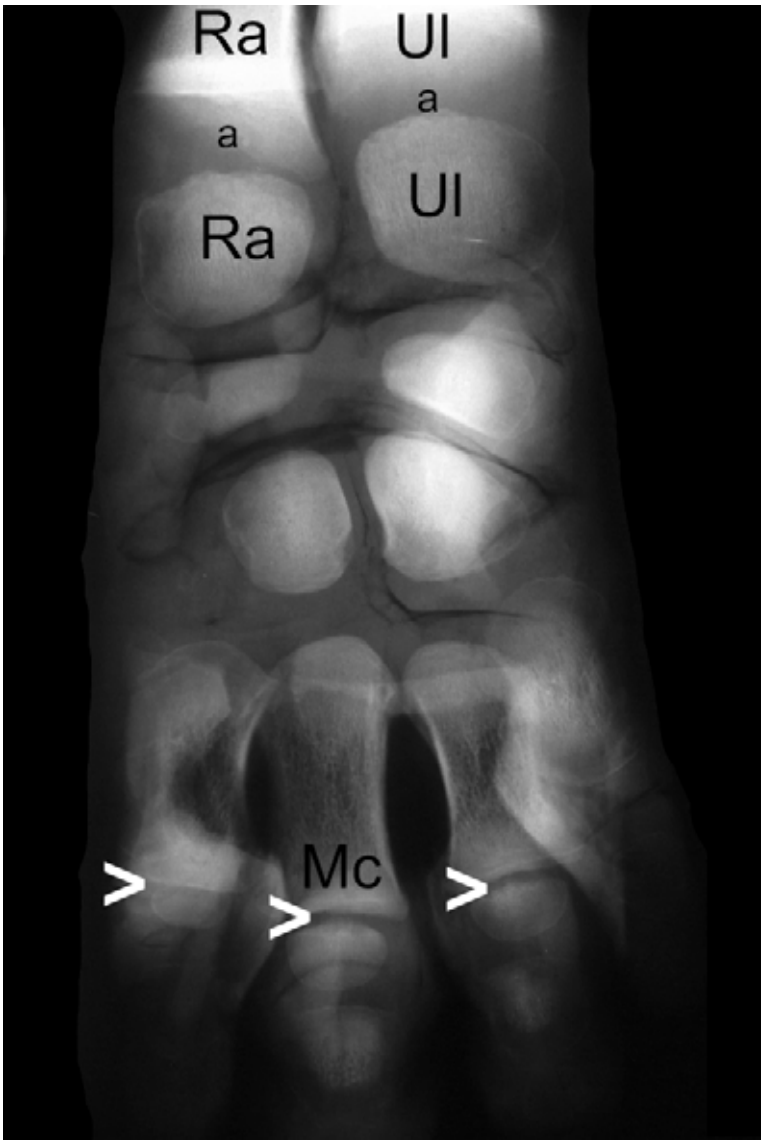

Abb. 47: Röntgenbild einer linken Hand, juveniler Afrikanischer Elefant, dorsopalmarer Strahlengang. 56 V und 4 mAs. a Epiphysenfuge, Mc Metacarpus III, Ra Radius, Ul Ulna. Deutlicher Weichteilschatten. Weiße Pfeilspitzen distale Epiphysenfuge der Metacarpalknochen.

4.8.4 Computertomographische dreidimensionale Darstellung des Schultergelenkes

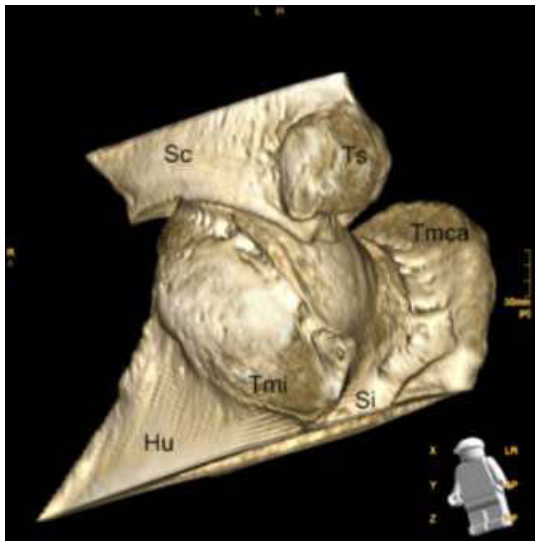

Abb. 48: Computertomographische dreidimensionale Rekonstruktion eines linken Schultergelenkes, adulter Afrikanischer Elefant. Ansicht von craniomedial. Hu Humerus, Sc Scapula, Si Sulcus intertubercularis, Tmca Pars caudalis des Tuberculum majus, Tmi Tuberculum minus, Ts Tuberculum supraglenoidale.

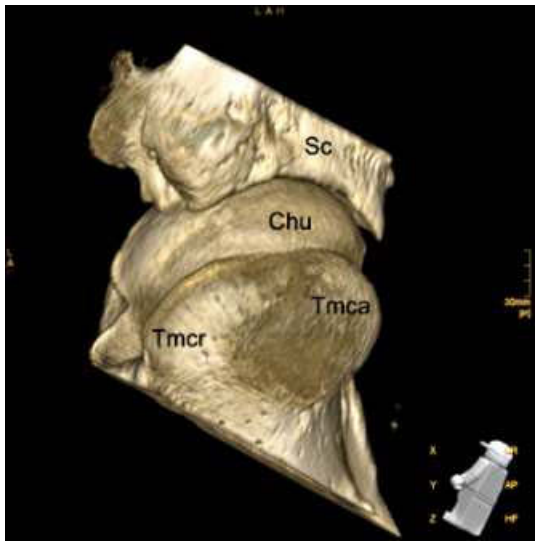

Abb. 49: Computertomographische dreidimensionale Rekonstruktion eines linken Schultergelenkes, adulter Afrikanischer Elefant. Ansicht von craniolateral. Chu Caput humeri, Sc Scapula, Tmca Pars caudalis des Tuberculum majus, Tmcr Pars cranialis des Tuberculum majus.

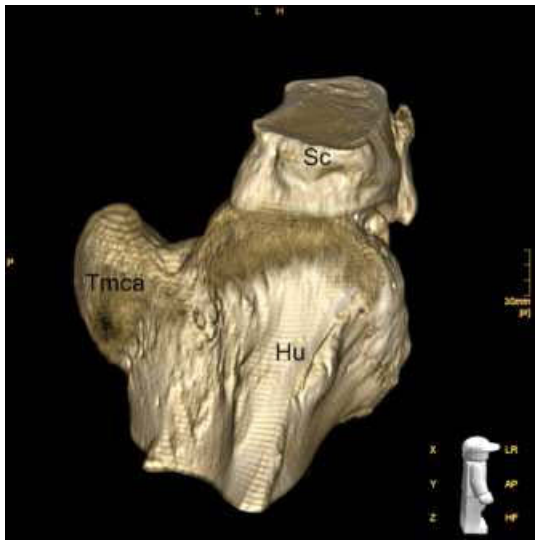

Abb. 50: Computertomographische dreidimensionale Rekonstruktion eines linken Schultergelenkes, adulter Afrikanischer Elefant. Ansicht von caudal. Hu Humerus, Sc Scapula, Tmca Pars caudalis des Tuberculum majus.

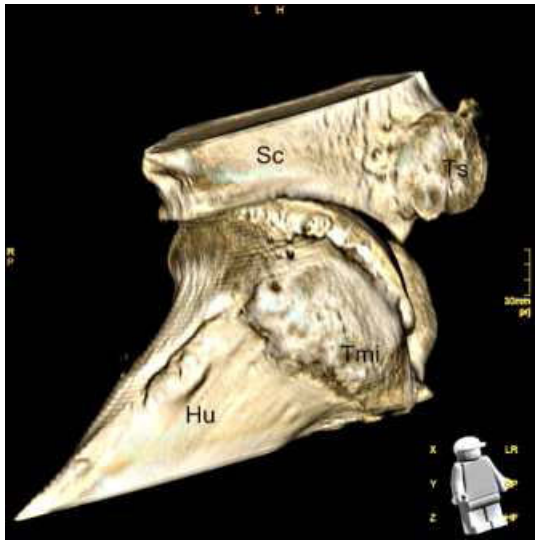

Abb. 51: Computertomographische dreidimensionale Rekonstruktion eines linken Schultergelenkes, adulter Afrikanischer Elefant. Ansicht von medial. Hu Humerus, Sc Scapula, Tmi Tuberculum minus, Ts Tuberculum supraglenoidale.

4.8.5. Computertomographische dreidimensionale Darstellung des Ellbogengelenkes

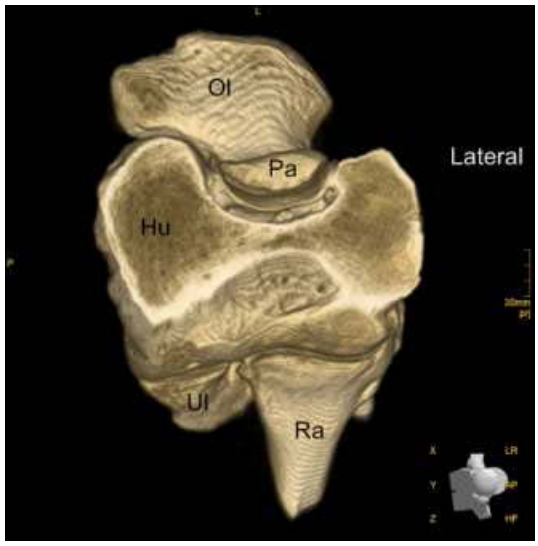

Abb. 52: Computertomographische dreidimensionale Rekonstruktion eines linken Ellbogengelenkes, adulter Afrikanischer Elefant. Ansicht von cranioproximal. Hu Humerus, Ol Olecranon, Pa Processus anconeus, Ra Radius, Ul Ulna.

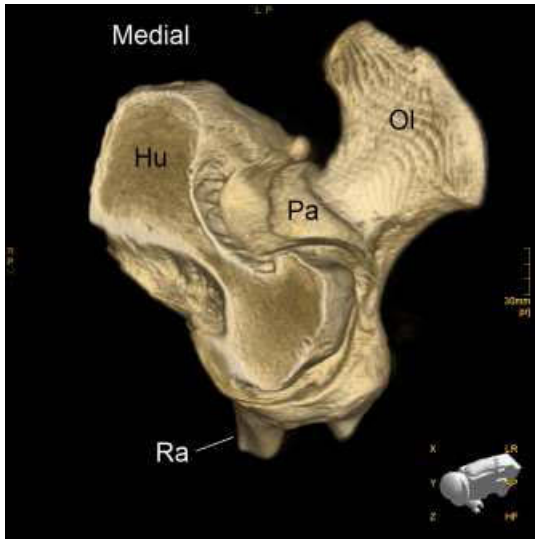

Abbildung 53: Computertomographische dreidimensionale Rekonstruktion eines linken Ellbogengelenkes, adulter Afrikanischer Elefant. Ansicht von lateroproximal. Hu Humerus, Ol Olecranon, Pa Processus anconeus, Ra Radius.

4.8.6. Computertomographische dreidimensionale Darstellung des Carpus

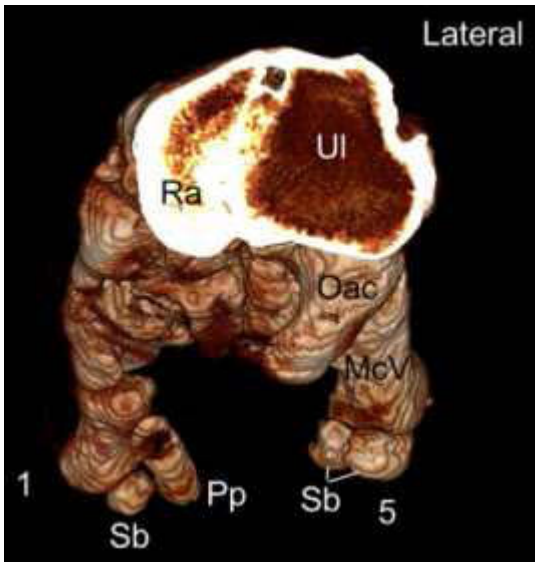

Abb. 54: Computertomographische dreidimensionale Rekonstruktion einer rechten Hand, adulter Afrikanischer Elefant. Ansicht von palmoproximal. 1 erste Zehe, 5 fünfte Zehe, McV Os metacarpale der fünften Zehe, Oac Os carpi accessorium, Pp Präpollex, Ra Radius, Sb Sesambein, Ul Ulna.

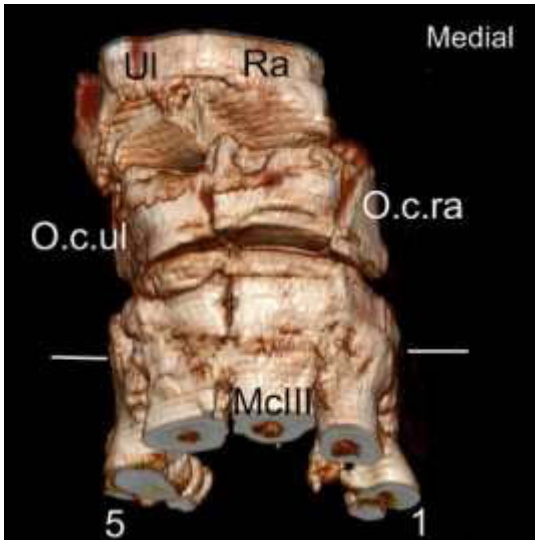

Abb. 55: Computertomographische dreidimensionale Rekonstruktion einer rechten Hand, adulter Afrikanischer Elefant. Ansicht von dorsal. 1 erste Zehe, 5 fünfte Zehe, McIII Os metacarpale III, O.c.ra Os carpi radiale, O.c.ul Os carpi ulnare, Ra Radius, Ul Ulna. Die weiße Linie zeigt die Ebene der knöchernen Verwachsungen zwischen der distalen Reihe der Carpalknochen und den Metacarpalknochen.

5 DISKUSSION

Die Stellung der Vordergliedmaßen des Afrikanischen Elefanten ist nach den vorliegenden Ergebnissen auffallend gerade. Die Winkelung des Schultergelenkes beträgt ca. 170°, jene des Ellbogens und des Carpus ca. 180°. Unter Belastung kann das Ellbogengelenk wahrscheinlich über 180° hinaus gestreckt werden. Dies entspricht auch den Angaben von GAMBARYAN (1974) und SCHWERDA (2003). Während bei den cursorialen Ungulaten im Laufe der Evolution distale Skelettelemente verlängert wurden (GAMBARYAN, 1974; SCHWERDA, 2003), fand bei den Elefanten eine relative Längenzunahme der proximalen Elemente statt.

RUTHE (1961) bezeichnete die Fußstellung beim Elefanten als semi- bzw. digitigrad. Die Vorderextremität des Elefanten wird aufgrund der Stellung der Zehenknochen und aufgrund des Vorhandenseins eines Sohlenkissens als semidigitigrad bezeichnet (MIKOTA et al., 1994a; FOWLER und MIKOTA, 2006; WEISSENGRUBER et al., 2004, 2006b), was auch nach den Ergebnissen der vorliegenden Untersuchung bestätigt werden kann.

An der Vorderextremität des Afrikanischen Elefanten sind die außergewöhnlich stark ausgebildeten Faszien auffallend. Bereits MARIAPPA (1955b) beschrieb die bei wahrscheinlich keinem anderen Säugetier gleichermaßen ausgebildeten Faszien der Vorderextremität des Asiatischen Elefanten. Auch bei den für die vorliegende Arbeit untersuchten Individuen, insbesondere bei den adulten Tieren, konnte festgestellt werden, dass Muskeln oft sehnig durch- bzw. überzogen bzw. Muskeln untereinander durch kräftige Faszien verbunden sind.

Die Gelenke der Vorderextremität des Afrikanischen Elefanten sind durchwegs kongruent. In einigen Randbereichen verschiedener Gelenke sind Kapselfalten ausgebildet. Dies ist z. B. im Schultergelenk (cranial, medial, lateral), im Ellbogengelenk (lateral, medial) und im Carpalgelenk (Kapselfalten dorsal im Bereich der Articulatio antebrachiocarpea, der Articulatio mediocarpea bzw. der Articulatio carpometacarpea) der Fall.

In den Articulationes interphalangeae proximales der zweiten, dritten und vierten Zehe waren schmale Kapselfalten dorsal und palmar angelegt. Die Gelenkkapselfalten der Articulationes interphalangeae distales waren besonders im palmaren Bereich ausgeprägt; bei den juvenilen Elefanten trennten die Kapselfalten die artikulierenden Knochenenden vollständig voneinander. Meniskoide Falten stellen Vorstufen von echten Menisken dar (DRENCKHAHN, 1994a) und dürften auch ähnliche Funktionen erfüllen.

5.1 **Articulatio humeri**

Der Typus des Schultergelenkes des Asiatischen Elefanten wurde von MARIAPPA (1955a, 2005) als „enarthrosis“ bezeichnet, wobei aber sehr wahrscheinlich nur ein Kugelgelenk gemeint ist, da eine „enarthrosis“ im Englischen auch als einfaches „ball and socket – joint“ beschrieben wird (Merriam Webster Medical Dictionary - online, letzter Zugriff: 21.10.2010). Im deutschen anatomischen Sprachgebrauch wird die Enarthrose (Nußgelenk) als Sonderform des Kugelgelenkes aufgefasst, bei der ein konvexer Gelenkkörper mehr als zur Hälfte von einem konkaven umgriffen wird (TILLMANN, 2002a; NICKEL et al., 2003). Nach den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit handelt es sich beim Schultergelenk des Afrikanischen Elefanten um ein einfaches Kugelgelenk, wobei jedoch die Beweglichkeit eingeschränkt ist. Hierbei handelt es sich wohl um einen Übersetzungsfehler aus dem Englischen, da Mariappa mit der von ihm bezeichneten „enarthrosis“ wahrscheinlich ein Kugelgelenk im allgemeinen Sinn meinte.

Beim Menschen und bei den Haussäugetieren wird die Cavitas glenoidalis durch ein faserknorpeliges Labrum glenoidale vergrößert (LIEBICH et al., 2009b). Auch beim Afrikanischen Elefanten ist ein Labrum glenoidale ausgebildet, das den Humeruskopf cranial und caudal besonders weit umgreift.

Das Lig. coracohumerale besteht nach den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit beim Afrikanischen Elefanten aus zwei Teilen. MARIAPPA (2005) beschrieb beim Asiatischen Elefanten allerdings nur ein einheitliches Lig. coracohumerale.

Ligg. collateralia konnten bei den für die vorliegende Arbeit untersuchten Schultergelenken von Afrikanischen Elefanten nicht nachgewiesen werden. Ein Fehlen von Kollateralbändern wurde auch beim Asiatischen Elefanten (MARIAPPA, 2005) und bei bestimmten Haussäugetieren (NICKEL et al., 2003; LIEBICH et al., 2009b) beschrieben.

Anstelle von Bändern sind am Schultergelenk von Haussäugetieren Endsehnen bestimmter Muskeln, wie der Mm. subscapularis und infraspinatus, als Verstärkungseinrichtungen ausgebildet. Durch diese Muskeln wird die Beweglichkeit des Schultergelenkes deutlich eingeschränkt; nur beim Fleischfresser sind Abduktions- und Adduktionsbewegungen möglich (NICKEL et al., 2003). Beim Afrikanischen Elefanten umgreift das Labrum glenoidale das Caput humeri cranial und caudal fast zur Gänze. Die passive Beweglichkeit am Präparat beschränkt sich hauptsächlich auf Flexion und Extension, eine Abduktion bzw. Adduktion erscheint aber in geringem Maße möglich. Beim Asiatischen Elefanten ist nach MARIAPPA (2005) keine Abduktion möglich, da vier Bänder (Lig. coracohumerale, Ligg. glenohumeralia craniale, laterale und caudale) die Schultergelenkkapsel verstärken und somit die Beweglichkeit der Vorderextremität einschränken.

Der Aufbau der synovialen Hilfseinrichtung der Ursprungssehne des M. biceps brachii im Sulcus intertubercularis ist nach den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit bei juvenilen und adulten Afrikanischen Elefanten unterschiedlich: Bei den juvenilen Individuen umgibt eine Ausstülpung der Gelenkkapsel die Bizepssehne in ihrem Verlauf durch den Sulcus intertubercularis vollständig, beim adulten Individuum liegen die Umschlagslinien dieser Aussackung ca. 3 cm voneinander entfernt. EALES (1928) beschrieb, dass beim Afrikanischen Elefanten die Bizepssehne mit der Gelenkkapsel verwachsen sei. Beim Asiatischen Elefanten ist die Bizepssehne im Sulcus intertubercularis von der Gelenkkapsel „bedeckt“ (MIALL und GREENWOOD, 1879; SHINDO und MORI, 1956). Die Bicepssehne beim Menschen befindet sich ohne Mesotendineum innerhalb der Gelenkkapsel (SCHALLER und FORSTENPOINTNER, 1987; DRENCKHAHN, 1994b). Bei den Fleischfressern bildet die Gelenkkapsel eine Kapselsehnenscheide aus (NICKEL et al., 2003; LIEBICH et al., 2009b). Die Ursprungssehne der Bizepssehne wird beim Hauswiederkäuer von einer Bursa unterlagert.

Beim Pferd ist eine große Bursa intertubercularis zwischen der Sehne und dem Humerus angelegt, die sich medial und lateral um die Bizepssehne nach cranial ausdehnt (SCHALLER und FORSTENPOINTNER, 1987; NICKEL et al., 2003; LIEBICH et al., 2009b). Diese Bursen haben keine Verbindung zur Gelenkhöhle. WINDLE und PARSONS (1901) beschrieben, dass die Ursprungssehne des M. biceps brachii bei Ungulaten außerhalb der Schultergelenkkapsel verlaufen kann, bei „Artiodactyla“ (Rind, Schaf, Antilope, Elefant) jedoch immer innerhalb der Kapsel. Bei juvenilen Hunden bzw. beim menschlichen Embryo kann ein Mesotendineum ausgebildet sein, welches im Laufe des Lebens fenestriert wird und dann komplett verschwindet (SCHALLER und FORSTENPOINTNER, 1987).

MARIAPPA (2005) beschrieb beim Asiatischen Elefanten ein „Lig. transversum humeri“ welches nach den Ergebnissen der vorliegenden Untersuchung beim Afrikanischen Elefanten ebenfalls vorkommt und als „Retinaculum transversum“ (NAV, 2005) bezeichnet wird. Da nach der Meinung der meisten Autoren (mit Ausnahme der Beschreibung von LIEBICH et al. [2009b], s. u.) bei den Haussäugetieren eine Überbrückung des Sulcus intertubercularis durch ein Band fehlt, gibt es in der Bildnomenklatur hierfür keine Bezeichnung. LIEBICH et al. (2009b) beschrieben ein „Lig. transversum humeri“ beim Fleischfresser, das zwischen den Tubercula majus und minus verläuft und die Bizepssehne im Sulcus intertubercularis hält. In der Humananatomie findet man an dieser Stelle eine als „Lig. transversum humeri“ (DRENCKHAHN, 1994b; TERMINOLOGIA ANATOMICA, 1998) bzw. „Lig. transversale humerale“ (TILLMANN, 2002) bezeichnete Struktur.

MARIAPPA (1955a, 2005) beschrieb zwei Muskeln der Gelenkkapsel: Einen sehr kleinen, cranialen „M. capsularis anterior“ und einen gut ausgebildeten, caudalen „M. capsularis posterior“. Der in der vorliegenden Arbeit als **M. articularis humeri** bezeichnete Muskel entspricht dem von MARIAPPA (1955a, 2005) erwähnten „M. capsularis posterior“ bzw. dem von PATTERSON und DUN (1912) als „M. subglenoidalis“ bezeichneten Muskel. SHINDO und MORI (1956) erkannten beim Asiatischen Elefanten lediglich eine Zweiteilung des M. subscapularis, wobei sich diese Teile proximal des Schultergelenkes wieder vereinten und eng mit der Gelenkkapsel verwachsen waren.

EALES (1928) beschrieb beim Afrikanischen Elefanten, dass der tiefe Teil des M. subscapularis, der „M. subglenoidalis“, fehlt. HOLM NIELSEN (1965) erwähnte diesen Muskel auch beim Asiatischen Elefanten nicht. Die Ursache für die unterschiedlichen Ergebnisse ist wohl die geringe Größe des M. articularis humeri, wodurch er leicht übersehen werden kann.

5.2 **Articulatio cubiti**

Die Gelenkfläche des Condylus humeri, die Trochlea, ist durch eine sagittale Furche in einen kleineren, lateralen und einen größeren, medialen Teil unterteilt. SMUTS und BEZUIDENHOUT (1993) erwähnten einen kleinen, medialen und einen großen, lateralen Teil, was allerdings den Abbildungen in ihrer Arbeit widerspricht.

Die besondere Dicke der Gelenkkapsel des Ellbogengelenkes soll hier hervorgehoben werden; sie wurde auch von MARIAPPA (2005) beim Asiatischen Elefanten erwähnt.

In den histologischen Untersuchungen des „Lig. elasticum craniale“ (MARIAPPA, 1955a) konnte festgestellt werden, dass es beim Afrikanischen Elefanten aus straffem Bindegewebe mit zahlreichen, parallel verlaufenden kollagenen Fasern und nur wenigen elastischen Fasern besteht. MARIAPPA (2005) stellte fest, dass das „Lig. elasticum craniale“ beim Asiatischen Elefanten aus dicken elastischen Fasern aufgebaut ist. Ob der Aufbau dieses „Lig. elasticum craniale“ tatsächlich artspezifisch unterschiedlich ist und möglicherweise mit dem höheren Körpergewicht des Afrikanischen Elefanten in Zusammenhang steht, oder ob die Bezeichnung dieser Struktur als „elastisches Band“ insbesondere beim Afrikanischen Elefanten überdacht werden sollte, müsste durch weiterführende Untersuchungen abgeklärt werden. Der in der vorliegenden Arbeit dokumentierte wellenförmige Verlauf der kollagenen Fasern könnte artefiziell (Probenentnahme, Fixierung) sein und ist wahrscheinlich durch eine Fixierung ohne Spannung entstanden.

Das in der vorliegenden Arbeit als Lig. humeroulnare bezeichnete Band wurde von HOLM NIELSEN (1965) beim Asiatischen Elefanten als „Lig. humero-antebrachiale“ bezeichnet und entspricht auch den Beschreibungen von MIALL und GREENWOOD (1879). Ein entsprechendes Band wurde von keinem weiteren Autor beschrieben. Da das Band nur an der Ulna ansetzt, ist die Bezeichnung als „Lig. humeroulnare“ gerechtfertigt.

5.3 **Articulatio radioulnaris**

Nach den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit ist die Ulna deutlich stärker ausgebildet als der Radius. Dies widerspricht der Aussage von RUTHE (1961), der Radius und Ulna bei Elefanten als gleich stark beschrieb.

Nach den vorliegenden Untersuchungen sind beim Afrikanischen Elefanten ein proximales und ein distales Radioulnargelenk ausgebildet, die beide straffe Synovialgelenke darstellen. Die Gelenkhöhle des proximalen Radioulnargelenkes des Afrikanischen Elefanten kommuniziert mit der Ellbogengelenkhöhle, jene des distalen Radioulnargelenkes allerdings nicht mit der Carpalgelenkhöhle. Beim Asiatischen Elefanten ist laut MARIAPPA (2005) für jedes der drei Gelenketagen des Carpus eine eigenständige Gelenkkapsel ausgebildet, wodurch eine Kommunikation untereinander verhindert wird. Das distale Radioulnargelenk ist von einer engen Gelenkkapsel umschlossen (MARIAPPA, 2005). MARIAPPA (2005) beschrieb auch eine „Articulatio radioulnaris media“, die in Form einer Syndesmose (Membrana interossea) ausgebildet ist. Nach NICKEL et al. (2003) steht die Articulatio radioulnaris distalis bei den Haussäugetieren mit dem Carpalgelenk in Verbindung.

Radius und Ulna waren bei den für die vorliegende Arbeit untersuchten, juvenilen Tieren bindegewebig verbunden, bei beiden adulten Individuen (37 und 46 Jahre alt) waren sie infolge einer Verknöcherung der Membrana interossea verwachsen. Bei den adulten Afrikanischen Elefanten waren sowohl der M. pronator quadratus als auch das Lig. radioulnare verknöchert. Das Ligamentum radioulnare kommt unter den Haussäugern nur bei Fleischfressern vor (NICKEL et al., 2003) und ist kurz, dick und knorpelhart (HENSCHEL,

1973). Beim Elefanten ist die Verwachsung der Unterarmknochen bzw. Verknöcherung von Bändern und Muskeln wohl eine Entwicklung zur Stabilisierung der Extremität bei eingeschränkter Beweglichkeit. SHINDO und MORI (1956) beschrieben beim Asiatischen Elefanten die Fixation des Unterarmes in Pronationsstellung, die eine Aktivität des M. pronator teres unnötig macht. Der sehnige **M. pronator teres** ist nach den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit beim adulten Elefanten mit der Gelenkkapsel verwachsen, bei den juvenilen Individuen hingegen nicht. Einen rein sehnigen Aufbau des M. pronator teres beschrieb HOLM NIELSEN (1965) auch beim Asiatischen Elefanten, während er von MARIAPPA (1955b), MIALL und GREENWOOD (1879) bei Asiatischen Elefanten und von WINDLE und PARSONS (1901) bei Ungulaten als muskulös bezeichnet wurde. Der M. pronator teres ist nach ANDERSON (1883), PATTERSON und DUN (1912) und MARIAPPA (1955b) sehr gut entwickelt, bei dem von EALES (1928) untersuchten fetalen Afrikanischen Elefanten war kein M. pronator teres zu finden. NICKEL et al. (2003) beschrieben beim Menschen, Fleischfresser, Schwein und Wiederkäuer einen deutlich ausgebildeten M. pronator teres, beim Pferd ist der M. pronator teres rudimentär und ligamentös.

Der **M. pronator quadratus** als Synergist des M. pronator teres kommt nach NICKEL et al. (2003) nur beim Fleischfresser und beim Menschen quer zwischen Radius und Ulna verlaufend vor und unterstützt die Einwärtsdrehung des Unterarmes und der Hand. Nach den vorliegenden Untersuchungsergebnissen ist auch beim Afrikanischen Elefanten ein M. pronator quadratus erkennbar, dessen mittlerer Abschnitt stark sehnig ist. Bei den für die vorliegende Arbeit untersuchten adulten Individuen war er verknöchert. Nach den Angaben der meisten Autoren fehlt der M. pronator quadratus beim Elefanten (EALES, 1928; SHINDO und MORI, 1956; HOLM NIELSEN, 1965; SHOSHANI, 1992; MARIAPPA, 2005). MIALL und GREENWOOD (1879), WINDLE und PARSONS (1901) und HOLM NIELSEN (1965) beschrieben ein unbenanntes Band, das sich von der Insertionsstelle des M. pronator teres medial zwischen den Ossa antebrachii bis zum Processus styloideus radii erstreckt und dem M. pronator quadratus entsprechen könnte.

Die eingeschränkte Beweglichkeit und starre Verbindung der Unterarmknochen beim Elefanten entspricht den Verhältnissen bei Huftieren (z. B. NICKEL et al., 2003), wenngleich eine Reduktion der Ulna beim Elefanten nicht eingetreten ist.

Während bei den „Urungulaten“ noch eine leichte Pronation und Supination möglich gewesen sein soll, sind bei den rezenten Rüsseltieren Radius und Ulna in Dauerpronationsstellung überkreuzt und durch Bänder fixiert (KROLL, 1947; RUTHE, 1961; STARCK, 1979; SHOSHANI, 1996). Diese Aussage trifft allerdings beim Jungtier nur bedingt zu. Da nach den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit der M. pronator quadratus beim juvenilen Elefanten muskulös ist, kann von einer, wenn auch geringgradigen Bewegungsmöglichkeit der Unterarmknochen gegeneinander ausgegangen werden.

5.4 **Articulatio carpi**

Über die Anzahl der Carpalknochen beim Elefanten sind sich viele Autoren (BLAIR, 1710; PFITZNER, 1887; EALES, 1929; RUTHE, 1961) uneinig. Die für die vorliegende Arbeit sezierten Carpalgelenke bestandenen stets aus 8 Carpalknochen, die in zwei Reihen angeordnet waren. BLAIR (1710) beschrieb 6 Carpalknochen, die zweireihig angelegt sind, und einen Ginglymus formen. Der 6. Metacarpalknochen ist nach BLAIR (1710) am zweiten Carpalknochen fixiert. Dem widersprechen die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung, da stets fünf Metacarpalknochen vorhanden waren. Eine mögliche Erklärung für die unterschiedlichen Befunde könnte sein, dass BLAIR (1710) den Präpollex als Metacarpalknochen betrachtete. EALES (1929) beschrieb beim Fötus (Afrikanischer Elefant) ein Os carpi centrale. Auch PFITZNER (1887) und RUTHE (1961) erkannten bei jungen Asiatischen Elefanten ein Os carpi centrale, das mit dem Os carpi radiale verschmelzen soll. Bei keinem der für die vorliegende Arbeit untersuchten Jungtiere konnte das Vorkommen eines Os carpi centrale nachgewiesen werden, was allerdings auch daran liegen könnte, dass die Tiere schon zu alt waren.

Eine dicke Gelenkkapselfalte füllt den Spaltraum dorsal zwischen Radius bzw. Ulna und den Knochen der antebrachialen Reihe aus. HENSCHEL (1973) und andere Autoren beschrieben beim Menschen einen Discus articularis, der den Radius und den Proc. styloideus der Ulna verbindet. Da die Gelenkkapselfalte beim Afrikanischen Elefanten keine Verbindung zwischen Knochen herstellt, könnte die Funktion im Ausgleich von Inkongruenzen liegen.

Die Artt. antebrachiocarpea und mediocarpea beim Elefanten wurden als Ginglymus, das distale einfach als Arthrose bezeichnet (GÜSSGEN, 1988). Zitiert wurde hier MARIAPPA (1955a), der in seiner in englischer Sprache verfassten Arbeit das distale Carpalgelenk als „arthrodia“ beschrieb. Nach dem Merriam Webster Medical Dictionary (http://www.merriam-webster.com/ - letzter Zugriff: 21.10.2010) steht die englische Bezeichnung „arthrodia“ für ein planes Gelenk. Hierbei handelt es sich wahrscheinlich um einen Übersetzungsfehler von GÜSSGEN (1988).

5.5 **Zehen**

FOWLER und MIKOTA (2006) fanden beim Afrikanischen Elefanten nur vier Zehennägel am Vorderfuß. Dies widerspricht den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit, da bei allen untersuchten Vorderextremitäten Afrikanischer Elefanten stets fünf Zehennägel vorhanden waren.

EALES (1929) beschrieb die Lage des Präpollex am Os carpale II und dem Os metacarpale I. Bei den für diese Arbeit untersuchten Tieren war der Präpollex jedoch stets syndesmotisch mit der Basis des ersten Metacarpalknochen verbunden.

FOWLER und MIKOTA (2006) vermuteten, dass die Phalanx distalis der dritten Zehe nicht mit der Phalanx media in Kontakt stehe, da die Phalanx distalis am Zehennagel angeheftet ist. Dies widerspricht den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit; demnach sind die Phalanges media und distalis an der zweiten und vierten Zehe bzw. bei juvenilen Individuen auch an der dritten Zehe lediglich durch Kapselfalten eines synovialen Gelenkes voneinander getrennt.

In der Articulatio interphalangea distalis der dritten Zehe bei den hier untersuchten adulten Afrikanischen Elefanten sind die überknorpelten Knochenenden in direktem Kontakt.

5.6 Mikroskopisch-anatomische Darstellung des Gelenkknorpels

Die für die vorliegende Arbeit durchgeführten Schichtdickenmessungen am Gelenkknopel vom Afrikanischen Elefanten ergaben Messwerte von 2,6 bis 6 mm. Bei konvexen Gelenkkörpern war der Gelenkknorpel durchwegs zentral dicker, bei konkaven in der Peripherie, was bereits bei Haussäugetieren beschrieben wurde (SALOMON, 1987; NICKEL et al., 2003; LIEBICH et al., 2009a). In der Untersuchung von EGGER (2005) war der Knorpel der Tibiakondylen doppelt so dick wie jener der Femurkondylen. Die Dicke des Kniegelenkknorpels bei juvenilen Afrikanischen Elefanten betrug zwischen 6,7 mm und 11,2 mm (EGGER et al., 2008). EGGER et al. (2008) führten die unerwartet geringe Knorpeldicke im Elefantenknie auf die ausgeprägte Kongruenz zurück. Beim Menschen variiert die Knorpeldicke je nach Größe des Gelenkes von 1 bis 4 mm, wobei die Beanspruchung des jeweiligen Gelenkes eine Rolle spielt (DRENCKHAHN, 1994a). So beträgt sie an den humanen Fingergelenken etwa 1 mm, am Hüftgelenk 2 bis 3 mm, und an der Facies articularis patellae sogar 7 bis 8 mm (TILLMANN, 2003a). Der Gelenkknorpel von Tieren erreicht eine Dicke von wenigen Millimetern (NICKEL et al., 2003), im Kniegelenk des Hausrindes wurden Werte von 1,8 mm bis 4,2 mm gemessen (EGGER, 2005). Nach den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit sind die cranialen bzw. dorsalen Knorpelschichten deutlich dicker als die caudalen bzw. palmaren, was für eine größere Beanspruchung der cranialen bzw. dorsalen Gelenkteile spricht.

Die in der vorliegenden Arbeit untersuchten Gelenkknorpelpräparate zeigten ein auffallend eosinophiles und somit proteoglykanarmes Bild. Ein vermehrtes Vorkommen von Proteoglykanen (wie z. B. Hyaluronsäure) führt in erster Linie aufgrund erhöhter Wasserbindung zu einer erhöhten Festigkeit (LODISH et al., 2004; MANSOUR, 2004).

Allerdings spricht die Häufung von auffallend dicken Fasern um die Chondrone für eine ausreichende Festigung des Gelenkknorpels (EGGER, 2005). Die Unterscheidung zwischen schwarzen Retikulinfasern und braunen Kollagenfasern gestaltet sich aber als schwierig. Daher kann nicht davon ausgegangen werden, dass es ich bei den oben beschriebenen Fasern eindeutig um retikuläre Fasern handelt. EGGER (2005) führte zwar elektronenmikroskopische Aufnahmen der von ihm untersuchten Gelenke durch, stellte aber nur ein Vorkommen von dicken Kollagenfasern fest, bei denen er vermutete, dass es sich um Kollagen Typ I - Fasern handeln könnte. Eine biochemische Knorpelanalyse wurde jedoch nicht durchgeführt. Zur Faserdifferenzierung wäre eine immunhistologische Untersuchung mittels Antikörpern oder eine elektronenmikroskopische Dickenmessung nötig. Da keine Antikörper gegen Elefantenretikulin zur Verfügung stehen, könnte man die Retikulinfasern eventuell über Kreuzreaktionen mit humanen Retikulinantikörpern identifizieren. Dies war für die vorliegenden Untersuchungen nicht möglich, da hierfür frisches Material benötigt wird und es sich bei den zur Verfügung stehenden Gelenken um jahrelang in Formalinbädern gelagerte Präparate handelte.

5.7 Pathologisch-anatomische Befunde

Degenerativ-entzündliche Gelenkserkrankungen (Osteoarthritiden) stellen die Hauptursache medizinischer Probleme bei Elefanten in Gefangenschaft dar, wenngleich sie auch bei wildlebenden Individuen vorkommen (FOWLER und MIKOTA, 2006). Prädisponierend scheinen Bewegungsmangel, ein harter Boden, die gestreckte Stellung der Extremitäten von Elefanten und die Größe der Tiere zu sein. Infolge einer Arthritis kann es zu einer Ankylosenbildung kommen, wenn der Gelenkknorpel zerstört ist und periartikuläre sowie artikuläre Knochenbrücken durch Proliferation die angrenzenden Knochen verbinden. Ankylosen werden in erster Linie an Orten minimaler Bewegungen, wie im Hand- bzw. Fußwurzelgelenk, ausgebildet (FOWLER und MIKOTA, 2006).

Die pathologischen Veränderungen im Schultergelenk der 46-jährigen Elefantenkuh waren mehrere Knorpelusuren und eine raue Knorpeloberfläche. Die Synovialzotten waren teilweise verknöchert, was für eine chronische Entzündung spricht (metaplastische Verknöcherung).

Bei beiden untersuchten adulten Elefantenkühen war eine tiefe Furche laterocaudal um das Caput humeri, die auch mithilfe der Magnetresonanztomographie (Abb. 40 und Abb. 41) nachgewiesen werden konnte, am mazerierten Humerus ersichtlich. Eine durch Arthrosen bedingte Vermehrung von Synovia bewirkt eine Dehnung der Gelenkkapsel, wodurch es zu Taschenbildungen und „Auswaschungen“ von Knochen kommen kann (BUCKWALTER et al., 1997). Diese Dehnung könnte aber auch infolge des Auftauens der tiefgefrorenen Präparate und durch die damit verbundene Vermehrung von Gelenkflüssigkeit entstanden sein. Die Größe dieser Furche spricht dafür, dass sie intra vitam entstanden ist und auch bei den hier untersuchten adulten Elefanten auf eine Änderung der Druckverhältnisse innerhalb des Gelenkes im Zusammenhang mit einer Arthrose bzw. chronischer Arthritis zurückzuführen ist.

Die Verknöcherung der Synovialmembran lateral im Schultergelenk der 46-jährigen Elefantenkuh könnte ebenso infolge einer chronischen Entzündung entstanden sein.

Die arthrotischen Veränderungen am Ellbogengelenk waren deutlich stärker als am Schultergelenk. Sie äußerten sich durch Ausziehungen und Verbreiterungen der Ränder von Gelenkflächen sowie Knorpelläsionen, die in manchen Abschnitten auch den Knochen betrafen. Der Gelenkknorpel war stellenweise durch Bindegewebe ersetzt.

Die pathologischen Veränderungen am Carpalgelenk waren bei beiden untersuchten adulten Individuen ähnlich: Die Carpalknochen der distalen Reihe waren abschnittsweise über dorsale Knochenwülste miteinander verbunden. Die schwere Arthrose des rechten Carpalgelenkes der 37-jährigen Elefantenkuh konnte bereits vor Jahren in einer von HITTMAIR und VIELGRADER (1999) durchgeführten Untersuchung intra vitam radiologisch festgestellt werden. Ein ähnliches Bild zeigte sich auch bei den Mittelhandknochen.

Die Gelenkflächen der Articulatio metacarpophalangea der 1. und der 3. Zehe zeigten tiefe Knorpelusuren. Eine tiefe Knorpelusur caudomedial an der distalen Gelenkfläche des Os metacarpale I kam nur an der linken Hand der 46-jährigen Elefantenkuh vor.

Die 37-jährige Elefantenkuh zeigte Lahmheiten (VORACEK, 2010), die von den behandelnden Tierärzten auf eine Arthritis zurückgeführt wurden. Am rechten Vorderfuß wurden röntgenologisch außerdem osteomyelitische Veränderungen infolge einer Abszedierung zwischen der zweiten und dritten Zehe festgestellt (HITTMAIR und VIELGRADER, 1999). Die 46-jährige Elefantenkuh litt unter einer Nagelbetteiterung der dritten Zehe an der linken Vorderextremität und an Arthrosen beider Carpalgelenke (VORACEK, 2010). Dieses Tier konnte letztendlich nicht mehr selbständig aufstehen und musste somit euthanasiert werden.

Abschließend kann festgestellt werden, dass hochgradige pathologische Veränderungen an den Gelenken der für die vorliegende Arbeit untersuchten adulten Individuen nachgewiesen werden konnten. Ein Vergleich dieser Veränderungen an den Gelenken des Afrikanischen Elefanten mit dem Phänomen der sogenannten „Altersarthrose“, die beim Menschen, aber auch bei anderen Säugetieren (DÄMMRICH, 1991; SIEGAL - WILLOTT et al., 2008; MORAILLON et al., 2010) vorkommt, liegt daher auf der Hand und sollte bei zukünftigen Untersuchungen nicht außer Acht gelassen werden.

6 ZUSAMMENFASSUNG

Der Afrikanische Elefant stellt mit einem Gewicht von bis zu 7000 kg das größte Landsäugetier dar.

Die säulenförmigen, kaum gewinkelten Vorderextremitäten unterstützen einen Großteil dieser enormen Körpermasse, deren Gelenke hier erstmals anatomisch dargestellt werden.

Es gelangten elf Vorderextremitäten von adulten und juvenilen Afrikanischen Elefanten beiderlei Geschlechts aus dem Tiergarten Schönbrunn (Wien, Österreich) und dem Department of Anatomy and Physiology der Faculty of Veterinary Science (University of Pretoria, Südafrika) zur Untersuchung.

In manchen Gelenken (Schultergelenk, Ellbogengelenk, Carpalgelenk, Articulationes interphalangeae distales) kamen große Falten, die von der Gelenkkapsel ihren Ausgang nahmen, vor. Diese Falten bestanden aus straffem Bindegewebe und Fettzellen; sie dürften daher keiner starken mechanischen Belastung ausgesetzt sein.

Der Gelenkknorpel aller untersuchten Gelenke zeigte ein auffällig eosinophiles und proteoglykanarmes Bild. Dickenmessungen an Gelenkknorpeln ergaben Werte zwischen 2,6 und 6 mm. Bei konvexen Gelenkkörpern war der Gelenkknorpel zentral, bei konkaven in der Peripherie dicker.

Die Ursprungssehne des M. biceps brachii war beim juvenilen Afrikanischen Elefanten im Sulcus intertubercularis vollständig von einer Ausstülpung der Gelenkkapsel umgeben, während diese Sehnenscheide beim adulten Tier die Sehne cranial nicht vollständig umfasste.

Die besonders dicke Gelenkkapsel des Ellbogengelenkes wurde cranial durch ein zusätzliches Band unterstützt, welches aus straffem Bindegewebe mit zahlreichen, parallel verlaufenden kollagenen Fasern und nur wenigen elastischen Fasern bestand.

Der Bandapparat des Carpalgelenkes war insbesondere auf der palmaren Seite durch eine dicke, plattenartige Verstärkung der Gelenkkapsel gekennzeichnet.

Der Präpollex und die Phalanx distalis der fünften Zehe bestanden bei den juvenilen Individuen aus Faserknorpel, während bei den adulten Tieren Knochengewebe nachweisbar war.

Abgesehen vom geringen Proteoglykangehalt des Gelenkknorpels und der annähernd gestreckten Stellung wiesen die Gelenke der Vorderextremität des Afrikanischen Elefanten keine von anderen größeren Säugetieren abweichende strukturelle Besonderheiten auf, die auf eine außergewöhnliche mechanische Belastung schließen lassen.

7 SUMMARY

Reaching a weight up to 7000 kilograms the African elephant represents the largest terrestrial mammal. The scarcely bent column-like frontlimbs support the main part of its huge body mass. In order to provide a new and detailed anatomical description of these joints eleven hindlimbs of juvenile and adult African elephants were examined. The specimens were provided by the Department of Anatomy and Physiology, Faculty of Veterinary Science, University of Pretoria, South Africa, and the Zoo Schönbrunn, Vienna, Austria. In shoulder, elbow, carpal and distal interphalangeal joints large capsular folds were discernible. These folds consisted mainly of coarse connective and adipose tissue and therefore it is very unlikely that they are involved on a large scale in load uptake. The articular cartilages of all joints examined showed pronounced acidophilic staining properties and contained a low concentration of proteoglycans. Articular cartilages were between 2.6 and 6 millimeters thick. In convex joint surfaces cartilages were thicker in central parts, whereas in concave ones the cartilage of peripheral parts was thicker. In juvenile elephants the tendon of origin of the Musculus biceps brachii within the Sulcus intertubercularis of the humerus was completely surrounded by a tendon sheath formed by the capsular membrane of the shoulder joint. Contrary to this in adults the tendon sheath surrounded the tendon incompletely at its cranial surface. Besides a markedly thick joint capsule the elbow joint revealed at its cranial surface an additional ligament which consisted mainly of collagenous fibres. The ligamentous apparatus of the carpal joint formed a thick layer of connective tissue reinforcing the capsular membrane especially at the palmar aspect of the joint. In juvenile elephants Prepollex and Phalanx distalis of the fifth toe consisted of fibrocartilage, whereas in adults bone tissue could be proved. Apart from the low concentration of proteoglycans within the articular cartilage and the mainly straight position of the frontlimb no other structural peculiarities in the joints of African elephants could be detected which might be related to huge mechanical stresses.

8 LITERATURVERZEICHNIS

ALEXANDER, R. McN., Maloiy, G. M. O., Hunter, B., Jayes, A. S., Nturibi; J. (1979): Mechanical stresses in fast locomotion of buffalo (Syncerus caffer) and elephant (Loxodonta Africana). J. Zool., London, **189**, 135-144.

ANDERSON, R. J. (1883): A contribution to the anatomy of the Indian elephant. Journal of Anatomy and Physiology **17**, 491-494.

ANDREWS, C. W., COOPER, C. F. (1928): On Specimen Of Elephas Antiquus from Upnar, with further notes on the teeth and skeleton. Nat. Hist. Mus. Pub., 1-34.

BENZ, A. (2005): The elephant´s hoof: Macroscopic and microscopic morphology of defined locations under consideration of pathological changes. Inaugural-Dissertation, Veterinär-Anatomisches Institut der Vetsuisse-Fakultät Universtät Zürich.

BLAIR, P. (1710): Osteographia elephantine. Philos. Trans. R. Soc. Lond. **27**, 51-168.

BUCKWALTER, J. A., MANKIN, H. J. (1997): Instructional Course Lectures, The American Academy of Orthopaedic Surgeons - Articular Cartilage. Part II: Degeneration and Osteoarthrosis, Repair, Regeneration, and Transplantation. J. Bone Joint Surg. Am. **79**, 612-32.

CARLSON, C. S., HILLEY, H. D., HENRIKSON, C. K. (1985): Ultrastructure of normal epiphyseal cartilage of the articular-epiphyseal cartilage complex in growing swine. American Jounal of Veterinary research, Vol. **46**, 306-313.

CHRISTIANSEN, P. (2002): Locomotion in terrestrial mammals: the influence of body mass, limb length and bone proportions on speed. Zool. J. Linn. Soc. **136**, 685-714.

COOMBS, W. P. (1978): Theoretical aspects of cursorial adaptations in dinosaurs. Q. Rev. Biol. **53**, 393-415.

DAUBER, W. (2008): Feneis´ Bild-Lexikon der Anatomie. 10. Auflage. Georg Thieme Verlag Stuttgart und New York.

DÄMMRICH, K. (1991): Skelett. IN: DÄMMRICH, K., DROMMER, W., KÖHLER, H., MESSOW, C., POHLENS, P., SCHULZ, L. C. (Hrsg.), TRAUTWEIN, G.: Pathologie der Haustiere, Teil **1**, 679 – 682.

DELLMANN, G. D., EURELL, J. A. (1988): Textbook of Veterinary Histology. 5th Edition, Lippincott Williams & Wilkins.

DRENCKHAHN, D. (1994a): Allgemeine Gelenklehre, Arthrologie. In: DRENCKHAHN, D. (Hrsg.), BENNINGHOFF, A.: Anatomie, Makroskopische Anatomie, Embryologie und Histologie des Menschen. Bd. **1**, 16. Aufl., Urban und Schwarzenberg München Wien Baltimore, 93-208.

DRENCKHAHN, D. (1994b): Skelett- und Muskelsystem. In: DRENCKHAHN, D. (Hrsg.), BENNINGHOFF, A.: Anatomie, Makroskopische Anatomie, Embryologie und Histologie des Menschen. Bd. **1**, 16. Aufl., Urban und Schwarzenberg München Wien Baltimore, 254-340.

DUBROVO, I. A., JAKUBOWSKI, G. (1988): The carpus morphology of the forest elephant (Palaeoloxodon) and its significance for taxonomy. Prace Muzeum Ziemi **40**, Warszawa, Prace Paleozoologiczne, 65-83.

EALES, N. B. (1928): The anatomy of a foetal African elephant, Elephas africanas (Loxodonta Africana). Transactions of the Royal Society of Edinburgh **55**, 609-642.

EALES, N. B. (1929): Anatomy of a foetal African elephant, Elephas africanus (Loxodonta Africana. Trans. Roy. Soc. Edin. **56**, 203-246.

EGGER, G. F. (2005): Makroskopisch- und mikroskopisch-anatomische Untersuchungen am Kniegelenk des Afrikanischen Elefanten (Loxodonta africana) unter besonderer Berücksichtigung des Gelenkknorpels, Dissertation Veterinärmedizinische Universität Wien.

EGGER, G. F., WITTER, K., FORSTENPOINTNER, G., WEISSENGRUBER, G. (2008): ArticularCartilage in the Knee Joint of the African Elephant, Loxodontra africana, Blumenbach 1797. Journal of Morphology **269**, Issue 1, 118-127.

FLACH, E. J., MAGUIRE, L., PEAD, M., THORNTON, S. (1994): Radiography of the Elbow of an Asian Elephant. Verh. ber. Erkr. Zootiere **36**, 185-188.

FELDHOFF, K. (2005): http://www.tierseiten.com/ruesseltiere/ruesseltiersystematik.html Last Update: 2005-11-24, Accessed: 2010-10-21.

FORSTENPOINTNER, G., WEISSENGRUBER, G., KUEBBER-HEISS, A., HITTMAIR, K., KONAR, M. (2001): Morphological features of the stifle joint of the African elephant (Loxodonta africana, Blumenbach 1797). J. Morph. **248**, 230.

FOWLER, M. E. (2001): An Overview of Foot Conditions in Asian and African Elephants. In: CSUTI, B., SARGENT, E. L., BECHERT, U. S. (Ed.): The Elephant´s Foot: Prevention Asian and African Elephants. Iowa State University Press Iowa USA, 3-7.

FOWLER, M. E., MIKOTA, S. K. (2006): Biology, Medicine, and Surgery of Elephants. Blackwell Publishing.

GAGE, L. J. (1997): Techniques for radiographing the elephant foot and carpus using a portable equine radiographic unit. Proc. Amer. Assoc. of Zoo Vet., 190.

GAMBARYAN, P. P. (1974): How mammals run: anatomical adaptations. Hasted Press, John Wiley & Sons New York, Keter Publishing House Jerusalem Ltd., 186-187.

GANZBERGER, K., FORSTENPOINTNER, G., KÖNIG, H. E. (1995): Untersuchungen zur Morphologie des Ligamentum glenohumerale mediale am Schultergelenk des Hundes. Tierärztliche Praxis **23**, F. K. Schattauer Verlagsgesellschaft mbH, Stuttgart-New York, 75-79.

GAWRILENKO, A. (1924): Die Evolution des Carpus bei den Proboscidiern. Anat. Anz. Jena **58**, 218-244.

GHETIE, V., RIGA, J. TH. (1944/45): Die funktionelle Struktur der Ligamenta collateralia am Ellbogen und an den Sprunggelenken des Pferdes. Anatomischer Anzeiger Jena **95**, Gustav Fischer Verlag, 271-285.

GREGORY, W. K. (1912): Notes on the principles of quadrupedal locomotion and the mechanisms of the limbs in hoofed animals. Ann. NY Acad. Sci. **22**, 267-292:

GÜSSGEN, B. (1988): Vergleichende Zusammenstellung der Literaturbefunde über die Anatomie des Indischen und Afrikanischen Elefanten als Grundlage für tierärztliches Handeln. Dissertation an der Tierärztlichen Hochschule Hannover.

HENSCHEL, E. (1972): Funktion und vergleichend-anatomische Bedeutung des Lig. radioulnare der Karnivoren. Anat. Anz. **133**, 445-449.

HILDEBRAND, M. (1965): Symmetrical gaits of horses. Science **191**, 701-708.

HILDEBRAND, M. (1966): Analysis of the symmetrical gaits of tetrapods. Folia Biotheor. **6**, 9-22.

HILDEBRAND, M. (1976): Analysis of tetrapod gaits: general considerations and symmetrical gaits. In: STEIN, P. S. G. (Eds.), SMART, D. G.: Neural Control of Locomotion. New York Plenum Press, 203-236.

HITTMAIR, K., VIELGRADER, H. (1999): Radiography of elephant limbs. Verh. Ber. Erkrg. Zootiere **39**, 135-137.

HITTMAIR, K. M., VIELGRADER, H. D. (2000): Radiographic diagnosis of lameness in African elephants (Loxodonta Africana). Veterinary Radiology and Ultrasound **42**, 511-515.

HOLM NIELSEN, E. (1965): Die Muskulatur der Vordergliedmaße bei Elephas indicus. Anat. Anz. **117**, 171-192.

HOWELL, A. B. (1944): Speed in Animals: Their Specialization for Running and Leaping. University of Chicago Press.

HUTCHINSON, J. R., FAMINI, D., LEIR, R., KRAM, R. (2003): Are fast-moving elephants really running? Nature **422**, 493-494.

HUTCHINSON, J. R., HILDEBRANDT, T., FRITSCH, G. (2005): CT, MRI, and ultrasound imaging of elephant limbs for biomechanical analysis of locomotion. Proceedings of th 9th International Mammalogical Congress (IMC 9), July 31-August 5, Sapporo, Japan, 194.

HUTCHINSON, J. R., MILLER, C., FRITSCH, G., HILDEBRAND, T. (2008): The Anatomical Foundation for Multidisciplinary Studies of Animal Limb Function: Examples from Dinosaur and Elephant Limb Imaging Studies. In: ENDO, H., FREY, R. (Eds.): Anatomical Imaging: Towards a New Morphology. Springer Tokyo Berlin Heidelberg New York, 23-38.

HUTCHINSON, J. R., SCHWERDA, D., FAMINI, D., DALE, R., FISCHER, M., KRAM, R. (2006): The locomotor kinematics of Asian and African elephants: changes with size and speed. In: Journal of Experimental Biology **209**, 3812-3827.

JUNQUEIRA, L. C., CANEIRO, J. (1996): Histologie. 4. Aufl., Springer, Berlin. 140-217.

KIVIRANTA, I., TAMMI, M., JURVELIN, J., SÄÄMÄNEN, A.-M., HELMINEN, H. J. (1984): Fixation, decalcification and tissue processing effects on articular cartilage proteoglycans. Histochem. **80**, 569-573.

KROLL, W. (1947): Der Waldelefant von Crumstadt. Ein Beitrag zur Osteologie der Waldelephanten. Elephas (Palaeoloxodon) antiquus. Falconer & Cautley.

LANGMAN, V. A., ROBERTS, T. J., BLACK, J., MALOIY, G. M. O., HEGLUND, N. C., WEBER, J.-M., KRAM, R., TAYLOR, C. R. (1995): Moving cheaply: Energetics of walking in the African Elephant. Journal of Experimental Biology **198**, 629-632.

LIEBICH, H. G. (2004): Binde- und Stützgewebe (Texus connectivus). In: LIEBECH, H.-G. (Hrsg.): Funktionelle Histologie der Haussäugetiere. 4. Auflage, Schattauer Verlag Stuttgart. 52-84.

LIEBICH, H.-G., FORSTENPOINTNER, G., KÖNIG, H. E. (2009a): Einführung und allgemeine Anatomie. In: KÖNIG, H. E., LIEBICH, H.-G. (Hrsg.): Anatomie der Haussäugetiere. 4. Aufl., Schattauer Verlag Stuttgart, 1-46.

LIEBICH, H.-G., MAIERL, J., KÖNIG, H. E. (2009b): Vorder- oder Schultergliedmaßen (Membra thoracica). In: KÖNIG, H. E., LIEBICH, H.-G. (Hrsg.): Anatomie der Haussäugetiere. 4. Aufl., Schattauer Verlag Stuttgart, 141-210.

LODISH, H., BERK, A., MATSUDAIRA, P., KAISER, SH. A., KRIEGER, M., SCOTT, M. P., ZIPURSKY, S. L., DARNELL, J. (2004): Molecular Cell Biology. 5th Ed., W.H. Freeman and Company New York.

MARIAPPA, D. (1955a): The anatomy of a Foetal Indian Elephant, Part I: The Bones and Joints of the Fore-limb. Indian Vet. J., Madras **32**, 94-104.

MARIAPPA, D. (1955b): The anatomy of a Foetal Indian Elephant, Part II: The Muscles, Nerves and Blood Bessels of the Fore-limb. Indian Vet. J. Madras **32**, 170-202.

MARIAPPA, D. (2005): Anatomy and histology of the Indian elephant. Oak Park MI, Indira Publishing House, 1-190.

MANSOUR, J. M. (2004): Biomechanics of cartilage. In: OATIS, C. A. (Ed.): Kinesiology: The Mechanics and Pathomechanics of Human Movement. Lippincott Williams and Wilkins, 66–79.

Merriam Webster Medical Dictionary – online: http://www.merriam-webster.com, letzter Zugriff: 21.10.2010.

MIALL, L.C., GREENWOOD, A.F. (1878): The anatomy of the Indian Elephant, Studies in comparative Anatomy, 2, London, Macmillan, zit. nach WINDLE und PARSONS (1901) und nach PATTERSON und DUN (1912).

MIALL, L. C., GREENWOOD, A. F. (1879): The anatomy of the Indian elephant. Journal of Anatomy and Physiology **12**, 261-287.

MIKOTA, S. K., SARGENT, E. L., RANGLACK, G. S. (1994a): The Musculoskeletal System. In: Medical management of the elephant. Indira Publishing House, 137-150.

MIKOTA, S. K., SARGENT, E. L., RANGLACK, G. S. (1994b): The reproductive system. In: Medical management of the elephant. Indira Publishing House, 159-186.

MILLER, C. E., BASU, X., FRITSCH, G., HILDEBRANDT, T., HUTCHINSON, J. R. (2007): Ontogenetic scaling of foot musculoskeletal anatomy in elephants. J. R. Soc. Interface **5**, 465-475.

MORAILLON, R., LEGEAY, Y., BOUSSARIE, D. (2010): Therapielexikon der Kleintierpraxis. 1. Auflage. Urban & Fischer Verlag.

NAUCK, E. TH. (1938): Extremitätenskelett der Tetrapoden. In: BOLK, L., GÖPPERT, E., KALLIUS, E., LUBOSCH, W. (Hrsg.) Handbuch der vergleichenden Anatomie der Wirbeltiere. Bd. **5**, Urban und Schwarzenberg, Berlin und Wien, 71-248.

NAV (2005): Nomina Anatomica Veterinaria. 5th Ed., World Ass. Vet. Anat., Hannover Columbia Gent Sapporo.

NEUVILLE, H. (1935): Sur quelques caractères anatomiques du pied des Éléphants. Arch. Mus. Natl. Hist. Nat. Paris **13**, 111-184.

NEUVILLE, H. (1946): Sur quelques caracteres differentiels du carpe et du tarse chez les proboscidiens. Mammalia **10**, 122-128.

NICKEL, R., SCHUMMER, A., SEIFERLE, E. (2003): Lehrbuch der Anatomie der Haustiere. Bd. 1 Bewegungsapparat, 8. Aufl. Parey Verlag.

PATTERSON, A. M., DUN, R. C. (1912): The genito-urinary system oft he female Indian elephant. J. Anat. and Physiol. **32**, 583-604.

PERRAULT, C. (1734): Description anatomique d´un elephant, Memoires de L´Academie Royal des Sciences, Paris, **3**, 91-156

PFITZNER, W. (1887): Her Pfitzner demonstriert Hand- und Fußskelette einiger Säugetiere. Kurzer Bericht über die Sitzungen der vereinigten 5. und 9. Sektion für Zool. und Anat. 60. Versammlung dtsch. Naturforscher und Ärzte in Wiesbaden, 760-763.

RAMSAY, E. C., HENRY, R. W. (2001): Anatomy of the elephant foot. In: CSUTI, B., SARGENT, E. L. BECHERT, U. S. (Ed.): The Elephant´s Foot: Prevention and Care of Foot Conditions in Captive Asian and African Elephants. Iowa State University Press USA, 9-1.

ROMEIS, B. (1989): Mikroskopische Technik. BÖCK, P. (Hrsg.), 17. Aufl., Urban & Schwarzenberg Verlag München Wien.

RUTHE, H. (1961): Fußleiden der Elefanten. Dissertation, Wiss. Z. Humboldt-Univ. Berlin, Math.-Naturwiss. Reihe **10**, 471-516.

SALOMON, F.-V. (1987): Bewegungssystem. In: GÜNTHER, M., SALOMON, F.-V., GUTTE, G.: Morphologie landwirtschaftlicher Nutztiere. Quelle & Meyer Heidelberg Wiesbaden, 78-134.

SALZERT, W. (1972): Elefanten. Ihre Pathologie und den Tiergärtner interessierende physiologische Daten. Dissertation, Tierärztliche Hochschule Hannover.

SCHALLER, O., FORSTENPOINTNER, G. (1987): Beziehungen der Bicepssehne zum Schultergelenk bei Haussäugetieren. Schweiz. Arch. Tierheilk. **129**, 617-627.

SCHALLER, O. (2007): Illustrated Veterinary Anatomical Nomenclature. 2nd Edition, Enke Verlag Stuttgart.

SCHLOSSER, M. (1890): Über die Modifikationen des Extremitätenskeletts bei den einzelnen Säugetierstämmen. Biologisches Zentralblatt **9**, 684-729.

SCHNORR, B., KRESSIN, M. (2006): Embryologie der Haustiere. 5. Auflage. Enke Verlag Stuttgart. 228-237.

SCHWERDA, D. (2003): Analyse kinematischer Parameter der Lokomotion von Loxodonta Africana (Proboscidea: Elephantidae). Diplomarbeit, Institut für spezielle Zoologie und Evolutionsbiologie mit Phyletischem Museum der Friedrich-Schiller-Universität Jena.

SHINDO, T., MORI, M. (1956): Musculature of Indian elephant. Part I. Musculature of the forelimb. Okajimas Folia Anat. Jpn. **28**, 89-113.

SHOSHANI, J. (1992): Anatomy and physiology, Majestic creatures of the wild. Emmaus, Pennsylvania Rodale Press, 66-81.

SHOSHANI, J. (1996): Skeletal and other basic anatomical features of elephants. In: TASSY, P. (Eds.): The Proboscidea: Evolution and Palaeoecology of Elephants and Their Relatives. Oxford Universitary Press, 1-472.

SHOSHANI, J. (Ed.) (2000): Elephants. Checkmark Books.

SHOSHANI, J. (2005): Order Proboscidea. In: WILSON, D. E. (Eds.), REEDER, D. A. M.: Mammal species of the world: A Taxonomic and Geographic Reference. 3rd Ed., Vol. **1**, The Johns Hopkins University Press, Baltimore, 90-91.

SIEGAL-WILLOTT, J., ISAZA, R., JOHNSON, R., BLAIK, M. (2008): Distal limb radiography, ossification, and growth plate closure in the juvenile asian elephant (Elephas maximus). Journal of Zoo and Wildlife Medicine **39** [3], 320-334.

SMUTS, M. M., BEZUIDENHOUT, A. J. (1993): Osteology of the thoracic limb of the African elephant (Loxodonta Africana). Onderstepoort Journal of Veterinary Research **60** [1], 1-14.

STARCK, D. (1979): Das Skeletsystem. In: STARCK, D.: Vergleichende Anatomie der Wirbeltiere auf evolutionsbiologischer Grundlage. Band **2**, Berlin Heidelberg New York, 654-731.

TERMINOLOGIA ANATOMICA (1998): Thieme Verlag Stuttgart.

TILLMANN, B. (2002a): Skelettsystem. In: TILLMANN, B. (Hrsg.): Rauber-Kopsch. Anatomie des Menschen. Lehrbuch und Atlas. Bd. **1**, 3. Aufl., Thieme Verlag Stuttgart New York, 52-128.

TILLMANN, B. (2002b): Obere Extremität. In: TILLMANN, B. (Hrsg.): Rauber-Kopsch. Anatomie des Menschen. Lehrbuch und Atlas. Bd. **1**, 3. Aufl., Thieme Verlag Stuttgart New York, 309-444.

VERSLUYS, J., (1971): Das Skelet. In: IHLE, J. E. W., VAN KAMPEN, P. N., NIERSTRASZ, H. F.: Vergleichende Anatomie der Wirbeltiere. Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, 58-328.

VORACEK, T. (2010): persönliche Mitteilung und Untersuchungsprotokolle des Tiergartens Schönbrunn.

WEBER, M. (1928): Die Säugetiere. 2. Aufl., Verlag Fischer, Jena.

WEISSENGRUBER, G. E., FORSTENPOINTNER, G. (2004): Musculature oft he crus and pes oft he African elephant (Loxodonta africana): insight into semiplantigrade limb architecture. Anat. Embryol. **204**, 451-461.

WEISSENGRUBER, G. E., FUSS, F. K., EGGER, G., STANEK, G., HITTMAIR, K. M., FORSTENPOINTNER, G. (2006a): The elephant knee joint: morphological and biomechanical considerations. J. Anat. **208**, 59-72.

WEISSENGRUBER, G. E., EGGER, G. F.; HUTCHINSON, J. R., GROENEWALD, H. B., ELSÄSSER, L. M., FAMINI, D., FORSTENPOINTNER, G. (2006b): The structure of the cushions in the feet of African elephants (Loxodonta africana). Journal of Anatomy **209**, 781-792.

WEITHOFER, K. A. (1889): Einige Bemerkungen über den Carpus der Proboscidier, Gegenbaurs morpholog. Jahrbuch, 507-516.

WILSON, D. E., REEDER, D. M. (2005): Mammal species of the world. A Taxonomic and Geographic Reference. 3rd Edition, Volume **1**, Johns Hopkins University Press, Baltimore, 90-91.

WINDLE, B. C. A., PARSONS, F. G. (1901): On the muscles of the ungulate. Proceedings of the Zoologigal Society, 656-704.