

Aus der Klinik und Poliklinik für kleine Haustiere
des Fachbereichs Veterinärmedizin
der Freien Universität Berlin

**Vergleichende Untersuchungen zur Zusammensetzung, Dichte und mechanischen
Belastbarkeit sowie zum histologischen Aufbau der langen Röhrenknochen von
Greifvögeln und Eulen**

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Grades eines
Doktors der Veterinärmedizin
an der
Freien Universität Berlin

vorgelegt von
Britta Schuhmann, geb. Horn
Tierärztin
aus Gifhorn

Berlin 2011

Journal-Nr. 3497

Gedruckt mit Genehmigung des Fachbereichs Veterinärmedizin
der Freien Universität Berlin

Dekan: Univ.-Prof. Dr. Leo Brunnberg
Erster Gutachter: Univ.-Prof. Dr. Leo Brunnberg
Zweiter Gutachter: Univ.-Prof. Dr. Hafez Mohamed Hafez
Dritter Gutachter: Univ.-Prof. Dr. Johannes Handler

Deskriptoren (nach CAB-Thesaurus):

birds, Falconiformes, owls, bones, bone ash, bone mineralization, bone density, bone strength, torsional strength, histology

Tag der Promotion: 28.10.2011

Bibliografische Information der *Deutschen Nationalbibliothek*

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

ISBN: 978-3-86387-073-7

Zugl.: Berlin, Freie Univ., Diss., 2011

Dissertation, Freie Universität Berlin

D 188

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches, oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Warenbezeichnungen, usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

This document is protected by copyright law.

No part of this document may be reproduced in any form by any means without prior written authorization of the publisher.

Alle Rechte vorbehalten | all rights reserved

© Mensch und Buch Verlag 2011

Choriner Str. 85 - 10119 Berlin

verlag@menschundbuch.de – www.menschundbuch.de

Meinen Eltern

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---------------------------------------------------------------------|----|
| Inhaltsverzeichnis | I |
| Abkürzungsverzeichnis | IV |
| 1 Einleitung | 1 |
| 2 Literaturübersicht | 2 |
| 2.1 Greifvögel und Eulen als Patienten | 2 |
| 2.2 Anatomie und Histologie von Vogelknochen | 3 |
| 2.2.1 Allgemeines | 3 |
| 2.2.2 Osteologie | 3 |
| 2.2.2.1 Knochenarten | 3 |
| 2.2.2.2 Knochengewebe | 4 |
| 2.2.2.3 Aufbau des reifen Röhrenknochens | 5 |
| 2.2.2.4 Knochenwachstum | 8 |
| 2.2.3 Gewicht und Kortexdicke | 9 |
| 2.3 Chemische Zusammensetzung von Vogelknochen | 10 |
| 2.3.1 Trockensubstanz | 10 |
| 2.3.2 Rohasche | 10 |
| 2.3.3 Rohfett | 12 |
| 2.3.4 Mengenelemente | 12 |
| 2.3.4.1 Kalzium und Phosphor | 12 |
| 2.3.4.2 Magnesium | 15 |
| 2.3.4.3 Weitere Mengenelemente | 16 |
| 2.3.5 Spurenelemente | 16 |
| 2.3.5.1 Kupfer | 16 |
| 2.3.5.2 Zink | 17 |
| 2.4 Knochendichte | 19 |
| 2.5 Mechanische Belastbarkeit | 21 |
| 2.5.1 Grundlagen der Biomechanik | 21 |
| 2.5.2 Mechanische Eigenschaften der langen Röhrenknochen von Vögeln | 23 |
| 2.5.3 Werte zur mechanischen Belastbarkeit von Vogelknochen | 28 |
| 2.6 Korrelation der Knochenparameter | 29 |
| 3 Material und Methoden | 30 |
| 3.1 Probenmaterial | 30 |
| 3.2 Probenentnahme und Aufbereitung | 31 |
| 3.3 Mechanische Belastbarkeit | 31 |
| 3.4 Gewicht und Kortexdicke | 33 |
| 3.5 Dichtebestimmung | 33 |
| 3.6 Analyse der Knochenzusammensetzung | 34 |
| 3.6.1 Trockensubstanz | 34 |
| 3.6.2 Rohfett | 35 |
| 3.6.3 Rohasche | 35 |
| 3.6.4 Mineralstoffbestimmung | 36 |
| 3.6.4.1 Probenvorbereitung | 36 |
| 3.6.4.2 Phosphor | 36 |
| 3.6.4.3 Kalzium | 36 |
| 3.6.4.4 Magnesium, Kupfer und Zink | 37 |
| 3.7 Histologische Untersuchungen | 37 |
| 3.7.1 Vorbereitung der Proben | 37 |
| 3.7.2 Einbettung | 38 |

| | | |
|---------|----------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.7.3 | Schneiden | 38 |
| 3.7.4 | Vorbereitung auf die Färbung | 39 |
| 3.7.5 | Histologische Färbungen | 39 |
| 3.7.6 | Auswertung der histologischen Schnitte | 41 |
| 3.8 | Statistische Auswertung | 41 |
| 3.8.1 | Korrelationen der Knochenparameter | 42 |
| 4 | Ergebnisse | 44 |
| 4.1 | Daten der Vögel | 44 |
| 4.2 | Makroskopische Beurteilung der intakten Knochen | 45 |
| 4.3 | Gewicht der Diaphyse und Kortexdicke | 45 |
| 4.4 | Knochendichte | 48 |
| 4.5 | Knochenzusammensetzung | 50 |
| 4.5.1 | Trockensubstanz | 50 |
| 4.5.2 | Rohfett | 52 |
| 4.5.3 | Rohasche | 53 |
| 4.5.4 | Mineralstoffe | 56 |
| 4.5.4.1 | Kalzium | 56 |
| 4.5.4.2 | Phosphor | 58 |
| 4.5.4.3 | Magnesium | 60 |
| 4.5.4.4 | Kupfer | 62 |
| 4.5.4.5 | Zink | 64 |
| 4.6 | Mechanische Belastbarkeit | 65 |
| 4.6.1 | Maximales Drehmoment | 65 |
| 4.6.2 | Steifigkeit | 68 |
| 4.7 | Zusammenhang der Ergebnisse | 70 |
| 4.7.1 | Korrelation der Humerusparameter | 70 |
| 4.7.2 | Korrelation der Tibiotarsusparameter | 74 |
| 4.7.3 | Korrelation der Untersuchungsergebnisse von Humerus und Tibiotarsus | 76 |
| 4.7.4 | Einfluss des Ernährungszustandes | 77 |
| 4.8 | Histologischer Aufbau von Humerus und Tibiotarsus bei Mäusebussarden | 78 |
| 5 | Diskussion | 85 |
| 5.1 | Patientengut | 85 |
| 5.2 | Gewicht der Knochendiaphyse und Kortexdicke | 85 |
| 5.3 | Chemische Zusammensetzung der Knochen | 86 |
| 5.3.1 | Trockensubstanz | 86 |
| 5.3.2 | Rohasche | 87 |
| 5.3.3 | Rohfett | 88 |
| 5.3.4 | Mineralstoffe | 88 |
| 5.3.4.1 | Kalzium | 88 |
| 5.3.4.2 | Phosphor | 89 |
| 5.3.4.3 | Magnesium | 90 |
| 5.3.4.4 | Kupfer | 91 |
| 5.3.4.5 | Zink | 92 |
| 5.4 | Knochendichte | 92 |
| 5.5 | Mechanische Belastbarkeit | 93 |
| 5.6 | Korrelationen der verschiedenen Parameter | 95 |
| 5.7 | Histologischer Aufbau des reifen Knochens | 96 |
| 5.8 | Schlussfolgerung | 97 |
| 6 | Zusammenfassung | 99 |
| 7 | Summary | 102 |
| 8 | Literaturverzeichnis | 105 |

| | | |
|----|-----------------------|-----|
| 9 | Abbildungsverzeichnis | 124 |
| 10 | Tabellenverzeichnis | 125 |
| 11 | Anhang | 128 |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|-----------------------------------------------|---------------------------------------------|
| AgNO ₃ | Silbernitrat |
| BMD | Bone mineral density |
| bzw. | beziehungsweise |
| ca. | circa |
| Ca | Kalzium |
| cm ³ | Kubikzentimeter |
| Cu | Kupfer |
| DEXA | Dual-Röntgenabsorptiometrie |
| EW | Einzelwert |
| EZ | Ernährungszustand |
| F | Kraft |
| g | Gramm |
| GwDiaphyse | Gewicht der Diaphyse |
| IL-6 | Interleukin-6 |
| kg | Kilogramm |
| l | Liter |
| <i>m</i> | Masse |
| M | Drehmoment |
| m ³ | Kubikmeter |
| max. | maximal |
| M _{max} | maximales Drehmoment |
| MEA | Methylmetacrylat |
| mg | Milligramm |
| Mg | Magnesium |
| min | Minute |
| ml | Milliliter |
| <i>m</i> _{Luft} | Masse an Luft |
| mm | Millimeter |
| <i>m</i> _{Wasser} | Masse unter Wasser |
| MW | Mittelwert |
| MW ± SD | Mittelwert ± Standardabweichung |
| µl | Mikroliter |
| µm | Mikrometer |
| n | Gruppengröße |
| N | Newton |
| Na ₂ S ₂ O ₃ | Natriumthiosulfat |
| nm | Nanometer |
| Nm | Newtonmeter |
| Nr. | Nummer |
| p | Überschreitungswahrscheinlichkeit |
| P | Phosphor |
| PGE ₂ | Prostaglandin E ₂ |
| ppm | parts per million |
| pQCT | periphere, quantitative Computertomographie |
| <i>ρ</i> _{Wasser} | Dichte des Wassers |
| PWS | Phosphorwolframsäure |
| r | Kraftarm |
| Ra | Rohasche |

| | |
|--------|---------------------------------------|
| Rf | Rohfett |
| ρ | Dichte |
| r_s | Korrelationskoeffizient nach Spearman |
| TNF | Tumornekrosefaktor |
| TS | Trockensubstanz |
| V | Volumen |
| z. B. | zum Beispiel |
| Zn | Zink |
| ° | Grad |
| °C | Grad Celsius |
| % | Prozent |

1 Einleitung

Das große öffentliche Interesse und der Naturschutz führen dazu, dass zunehmend frei lebende Greifvögel und Eulen mit Verletzungen in tierärztlichen Praxen vorgestellt werden. Der häufigste Vorstellungsgrund sind Traumata, bei denen viele Tiere eine oder mehrere Frakturen erleiden (FIX und BARROWS, 1990; HATT et al., 1996; PUNCH, 2001)

Das Ziel jeder Behandlung eines wildlebenden Greifvogels ist eine erfolgreiche Wiederauswilderung (HOWARD und REDIG, 1993). Nur vollständig gesunde und belastbare Vögel können ausgewildert werden (COLES, 1988; ISENBÜGEL, 1988; HUCKABEE, 2000). Das bedeutet, dass bei jeder Erkrankung also auch bei einer Gliedmaßenfraktur eine vollständige Wiederherstellung der Anatomie und Funktion angestrebt werden muss. Nur eine optimale chirurgische Versorgung ermöglicht später die erfolgreiche Wiederauswilderung. Erscheint dieses Ziel nicht erreichbar, ist in Hinsicht auf den personellen und finanziellen Aufwand sowie das Wohlbefinden des verletzten Tieres eine schmerzlose Tötung vorzuziehen (HUCKABEE, 2000; PUNCH, 2001).

Im Gegensatz zu den intensiver erforschten Ziervögeln und dem Nutzgeflügel liegen nur wenige Untersuchungen zur Frakturversorgung und Rehabilitation frei lebender Greifvögel und Eulen vor (SPINK, 1978; HOWARD und REDIG, 1993; HATT et al., 1996; REDIG, 2001; HARCOURT-BROWN, 2002; HARRIS und SLEEMAN, 2007). Basisdaten zur Knochenzusammensetzung, der Knochendichte, dem histologischen Aufbau der Knochen und der mechanischen Belastbarkeit intakter Knochen von Greifvögeln und Eulen fehlen bisher. Nur in wenigen wissenschaftlichen Arbeiten wurden einzelne Aspekte dieser Basisdaten bei Greifvögeln und Eulen untersucht (WEISKE, 1889; FOWLER, 1981; CUBO und CASINOS, 2000). Diese Daten sind jedoch notwendig, um ein genaues Verständnis der Knochenphysiologie und der Besonderheiten von Greifvögeln zu erhalten und damit die Grundlage für eine optimale chirurgische Frakturversorgung zu schaffen.

Ziel dieser Arbeit war es, an zwei Greifvogel- und einer Eulenart die Dichte, die mechanische Belastbarkeit und die chemische Zusammensetzung als charakteristische Eigenschaften der langen Röhrenknochen zu ermitteln sowie den histologischen Aufbau zu beschreiben.

2 Literaturübersicht

2.1 Greifvögel und Eulen als Patienten

Frei lebende Greifvögel und Eulen werden meist in den Monaten Juni bis September aufgefunden. In dieser Zeit machen unerfahrene, verunglückte Jungvögel oder auch als Waisen angesehene Jungtiere einen großen Teil des Patientenaufkommens aus (ISENBÜGEL, 1988; SCHUSTER, 1996). Häufigster Vorstellungsgrund sind Traumata (FIX und BARROWS, 1990; HARRIS und SLEEMAN, 2007). WENDELL et al. (2002) geben an, dass Traumata auch die höchste Sterblichkeitsrate bedingen. In verschiedenen Untersuchungen waren bei 66,3 % bis 82,1 % der vorgestellten, frei lebenden Greifvögel und Eulen Traumata nachweisbar (FIX und BARROWS, 1990; DEEM et al., 1998; PUNCH, 2001; WENDELL et al., 2002; HARRIS und SLEEMAN, 2007). Die Ursachen der Traumata waren in den Untersuchungen von FIX und BARROWS (1990) zu 65 % auf den Einfluss des Menschen zurückzuführen. Sie umfassten unter anderem Anflüge gegen verschiedene Hindernisse wie z. B. Fahrzeuge, Hochspannungsleitungen, Eisenbahnen, Windräder, Zäune und Fenster sowie Stromschläge und illegale Verfolgung durch Abschüsse oder Fallen. Als weitere Verletzungsursachen sind das Verfangen in Netzen oder Stacheldraht sowie das Fallen in Schornsteine beschrieben (FIX und BARROWS, 1990; DEEM et al., 1998; KRONE et al., 2002; WENDELL et al., 2002; COUSQUER, 2005; MÜLLER et al., 2007). Ursachen natürlicher Traumata umfassten Revierkämpfe, Fressfeinde, Kainismus und Verletzungen durch jagende Haus- und Wildtiere (DEEM et al., 1998; KRONE et al., 2002; MEBS und SCHMIDT, 2006; MÜLLER et al., 2007). Ein geringerer Anteil von Greifvögeln und Eulen wurde aufgrund von Abmagerung, Missbildungen, Infektionen und Parasitosen vorgestellt (ISENBÜGEL, 1988; HATT et al., 1996; DEEM et al., 1998; KRONE et al., 2002; HARRIS und SLEEMAN, 2007; MÜLLER et al., 2007). Vergiftungen, z. B. mit Blei, Quecksilber oder Organophosphaten, sind weitere anthropogen bedingte Krankheits- oder Todesursachen (KRONE et al., 2002; MÜLLER et al., 2007).

Verschiedene Untersuchungen ergaben, dass zwischen 46 % und 74 % der aufgrund eines Traumas vorgestellten Patienten eine oder mehrere Frakturen aufwiesen (ISENBÜGEL, 1988; FIX und BARROWS, 1990; HATT et al., 1996; PUNCH, 2001; MÜLLER et al., 2007). HATT et al. (1996) stuften nur ein Drittel der Frakturen als therapiewürdig ein. Alte, offene Frakturen sowie Frakturen von Becken, Wirbeln oder Frakturen mit Gelenkbeteiligung wurden als nicht therapierbar angesehen. Offene Frakturen hatten eine schlechtere Prognose als geschlossene (MÜLLER et al., 2007). Je nach Untersuchung konnten zwischen 21 % und 60 % der frei lebenden Greifvögel und Eulen wieder ausgewildert werden (ISENBÜGEL, 1988; FIX und BARROWS, 1990; HATT et al., 1996; DEEM et al., 1998; COUSQUER, 2005; MÜLLER et al.,

2007). Von den Vögeln, deren Frakturen als behandlungswürdig eingestuft wurden, wurden 53 % wieder freigelassen (HATT et al., 1996). HOWARD und REDIG (1993) geben die Zahl ausgewilderter, orthopädischer Patienten mit 30 % bis 50 % an.

2.2 Anatomie und Histologie von Vogelknochen

2.2.1 Allgemeines

Die funktionelle Anpassung an das Fliegen und an das Laufen auf den Hinterextremitäten führte bei den Vögeln zu charakteristischen Veränderungen des Körperbaus (SCHWARZE und SCHRÖDER, 1972). Zu den Anpassungen gehören unter anderem eine Konzentration des Gewichts und damit des Schwerpunktes in die Mitte des Körpers, das Fehlen einer Harnblase, ein spezielles Atmungs- und Fortpflanzungssystem sowie die Ausbildung von Federn (SCHOLTYSSEK und DOLL, 1978). Das Skelett der Vögel unterscheidet sich deutlich von dem der Säugetiere, obwohl größtenteils die gleichen Knochen vorhanden sind (SALOMON, 1993). Bei den verschiedenen Vogelarten ist der Skelettaufbau vergleichbar (KÖNIG und LIEBICH, 2001). In Bezug auf die Körpermasse ist das Skelett der Vögel deutlich leichter als das der Säugetiere. Es macht nur 4,5 % des Gesamtgewichts des Vogelkörpers aus. Eine Gewichtsreduktion wird unter anderem durch die tierartlich unterschiedlich starke Pneumatisierung verschiedener Knochen, wie z. B. Humerus und Sternum erreicht. Zudem stülpen sich vogelartig unterschiedlich die Luftsäcke des Atmungstraktes in die Markhöhlen der langen Röhrenknochen aus. Bei Vogelarten mit gutem Flugvermögen, wie z. B. Störchen und Neuweltgeiern, ist dies besonders ausgeprägt (SCHWARZE und SCHRÖDER, 1972). Greifvögel weisen unter den Vögeln einen der höchsten Pneumatisierungsgrade auf (HERZOG, 1968). Die Pneumatisierung unterliegt sowohl bei den verschiedenen Vogelarten als auch bei den Individuen einer Art deutlichen Schwankungen (HERZOG, 1968; HOGG, 1984). Als weitere Anpassungen an das Fliegen sind die Anzahl der Knochen verringert und einige Knochen miteinander verschmolzen. Die Brustwirbel sind bei einigen Vogelarten zum Notarium versteift. Im Bereich des Rückens sind die Wirbel zum sogenannten Synsakrum verschmolzen (HERZOG, 1968).

2.2.2 Osteologie

2.2.2.1 Knochenarten

Wie beim Säuger gibt es beim Vogel drei verschiedene Knochenformen: Die langen Knochen oder Röhrenknochen, die platten Knochen und die kurzen Knochen (NICKEL et al., 1973). Außerdem kommen drei Arten von Knochen vor. Neben dem kompakten und dem spongiösen

Knochen gibt es bei adulten weiblichen Vögeln zusätzlich den medullären Knochen (NICKEL et al., 1992), der den gesamten Markraum ausfüllen kann (FOWLER, 1981). Der medulläre Knochen, dessen Bildung von Androgenen und Östrogenen gesteuert wird, fungiert als Kalziumdepot während der Legeperiode (KRAMPITZ et al., 1983). Während der Mineralisation der Eischale wird der medulläre Knochen mobilisiert (FOWLER, 1981). Der medulläre Knochen wird vor bzw. während der Kalzifizierung jedes Eies intensiv auf- und abgebaut (BLOOM et al., 1941). Nach Ablage des letzten Eies wird der medulläre Knochen abgebaut (BLOOM et al., 1941).

Auch während der Mauser wird in den langen Röhrenknochen die Knochensubstanz umgebaut. Im Verlauf des Mauserzyklus kommt es zu einer Resorption von Knochensubstanz, um Mineralien für die Bildung neuer Federn freizusetzen. Dies trifft insbesondere auf Geflügel zu, bei dem alle Federn innerhalb kurzer Zeit gemausert werden (MEISTER, 1951). Während dieser Zeit sind die Tiere vollständig flugunfähig (GLUTZ VON BLOTZHEIM et al., 1994). Greifvögel und Eulen müssen durchgehend ihre Flugfähigkeit aufrecht erhalten, weshalb die Mauser des Großgefieders über einen langen Zeitraum verläuft und immer nur einzelne Großgefiederfedern verloren und ersetzt werden (GLUTZ VON BLOTZHEIM et al., 1989). Beim Habicht (*Accipiter gentilis*) erstreckt sich die Mauser beispielsweise über fünf Monate. Ein Einfluss der Mauser auf die Knochensubstanz ist aus diesem Grund nicht zu erwarten.

2.2.2.2 Knochengewebe

Das Knochengewebe erfüllt unterschiedliche Aufgaben im Organismus. Einerseits fungiert es als Stütze und schützt die Organe, andererseits hat es metabolische Funktionen (LIEBICH, 1999). Der strukturelle Aufbau der Knochenmatrix ist bei allen Wirbeltierspezies vergleichbar, die Mechanismen von Knochenaufbau und Knochenumbau lassen sich so vom Säuger auf den Vogel übertragen.

Der mineralische Anteil des Knochens dient der Neutralisation von Kompressionskräften, die organischen Komponenten gewährleisten Stabilität gegen Dreh- und Biegekräfte (LOVERIDGE et al., 1991). Neben den mechanischen Aufgaben fungieren Knochen als Speicher für Teile des Mineralstoffhaushaltes, vor allem von Kalzium und Phosphor (LIEBICH, 1999).

Die Grundsubstanz von Vogelknochen wird zu ca. 50 % aus Mineralien und zu jeweils 25 % aus Wasser und organischen Verbindungen gebildet (NICKEL et al., 1992). Kalziumphosphat und Kalziumkarbonat sind die häufigsten anorganischen Bestandteile, die größtenteils in Form von Hydroxylapatitkristallen vorliegen. Weitere anorganische Bestandteile der

Knochengrundsubstanz sind Nitrat, Natrium, Magnesium, Fluor und Spurenelemente (KRAMPITZ et al., 1983). Durch den hohen Mineralanteil sind Vogelknochen sehr spröde, hart und splintern leicht (COLES, 1988). Der organische Anteil der Knochengrundsubstanz (Ossein) wird zu 90 % bis 95 % aus Kollagen gebildet. Die weiteren Komponenten sind größtenteils Glycosaminoglykane und Proteoglykane (KRAMPITZ et al., 1983).

Das Knochengewebe der Vögel setzt sich wie bei Säugern aus Zellen und mineralisierter Knochengrundsubstanz zusammen (NICKEL et al., 1992). Vier Arten von Knochenzellen sind bei allen Tierarten bekannt: Osteoprogenitorzellen, Osteoblasten, Osteozyten und Osteoklasten (REECE, 2005). Osteoprogenitorzellen sind flache Zellen, die direkt dem Periost und Endost anliegen. Sie differenzieren sich bei Bedarf zu Osteoblasten (KRAMPITZ et al., 1983). Osteoblasten sind mononukleäre Zellen und haben eine zylindrische bis kubische Gestalt (KRAMPITZ et al., 1983). Sie dienen der Knochenbildung, indem sie durch Sekretion von Kollagen und Grundsubstanz eine mineralstoffarme Vorstufe des Knochens, das Osteoid, produzieren. Außerdem sind die Osteoblasten durch den Transport von Kalzium in die Knochen an der Mineralisation der Knochenmatrix beteiligt (SCHOLTYSEK und DOLL, 1978; KRAMPITZ et al., 1983; REECE, 2005). Nach der Mineralisation werden aus den Osteoblasten Osteozyten. Diese haben in Hinsicht auf Größe und Form ein polymorphes Erscheinungsbild, liegen flach zwischen den Knochenlamellen und sind von mineralisierter Matrix umgeben. Die Osteozyten sind untereinander und mit den Osteoblasten durch dendritische Fortsätze in den Knochenkanälchen verbunden (KRAMPITZ et al., 1983; LIEBICH, 1999). Osteozyten bauen den Knochen durch Resorption und Synthese um (REECE, 2005). Die Knochenresorption erfolgt durch die Osteoklasten, die als vielkernige Riesenzellen mit variabler Form in Erscheinung treten (LIEBICH, 1999). Ihre Vorläufer sind Stammzellen aus blutproduzierenden Geweben wie Milz und Knochenmark, die sich zu Monozyten differenzieren, um dann miteinander zu Osteoklasten zu verschmelzen (REECE, 2005).

2.2.2.3 Aufbau des reifen Röhrenknochens

Die langen Röhrenknochen bestehen aus den beiden Epiphysen oder Knochenenden und der Diaphyse, dem Knochenschaft. Im Bereich der Diaphyse befindet sich die Markhöhle, die beim Vogel je nach Knochen mit Knochenmark oder Ausstülpungen von Luftsäcken gefüllt ist (NICKEL et al., 1973). Epiphysen und Diaphyse sind histologisch unterschiedlich aufgebaut.

Der Knochen wird außer an den Epiphysen von der Knochenhaut, dem Periost, bedeckt. Das Periost wird aus zwei Schichten gebildet, die beim Vogel jedoch schlecht voneinander

unterscheidbar sind. Die äußere Schicht besteht aus Bindegewebe, die innere Schicht enthält viele Zellen wie z. B. Osteoblasten und undifferenzierte Zellen sowie Nerven und Gefäße (NICKEL et al., 1992). Vom Periost ausgehend kommt es durch die Osteoblasten zu aktiver Knochenablagerung, z. B. nach Frakturen (STARCK und CHINSAMY, 2002).

Der Innenraum des Knochens, die Spongiosabälkchen und die Knochenkanäle werden von Endost überzogen (LIEBICH, 1999). Das Endost besteht aus einer dünnen Schicht flacher Bindegewebszellen, liegt eng am Knochen an und grenzt den Knochen vom Markraum ab (NICKEL et al., 1992).

Die Epiphyse langer Röhrenknochen besteht aus einer dünnen Knochenrinde (Kortikalis), deren Fasern längs verlaufen. Die Kortikalis umgibt die Spongiosa (Substantia spongiosa) (NICKEL et al., 1973). Die Spongiosa besteht aus schwammartig angeordneten Knochenbälkchen (NICKEL et al., 1973) und ist an den Epiphysen der Röhrenknochen, den Schädelknochen und den Wirbelkörpern zu finden (SALOMON, 1993). Die Epiphysen der Röhrenknochen sind großen Torsions- und Druckbelastungen ausgesetzt (HERZOG, 1968). Die Knochenbälkchen der Spongiosa sind entsprechend der mechanischen Beanspruchung des Knochens angeordnet (BONSER, 1995). Ihre Architektur variiert je nach Belastung und reagiert sensibel auf entsprechende Veränderungen (PONTZER et al., 2006).

Die Diaphysen der langen Röhrenknochen bestehen aus Kompakta, neben Substantia compacta, kompaktem bzw. kortikalem Knochen auch Kortikalis genannt. Histologisch ähnelt die Kompakta der mittleren Diaphyse bei Vögeln dem Lamellenknochen der Säuger (MEISTER, 1951). Sie scheint entwicklungsgeschichtlich zwischen den Knochen von Reptilien und Säugern zu liegen (MOYLE und WALKER, 1986). Die Kompakta ist bei Vögeln nicht so deutlich differenziert wie bei Säugern und weist eine geringere Organisation der Osteone auf (MOYLE und WALKER, 1986). Das Knochengewebe der Vögel wird als fibrolamellärer Knochen mit hoher Gefäßversorgung definiert (STARCK und CHINSAMY, 2002). Die Dicke der Kompakta variiert knochen- und vogelspezifisch. So ist die Kompakta des Tibiotarsus bei Rotschwanzbussarden signifikant dicker als die des Humerus (DEGERNES et al., 1998).

Der strukturelle Grundbaustein der langen Röhrenknochen ist das Osteon oder Havers-System (NICKEL et al., 1973). Jedes der längs zur Knochenachse ausgerichteten Osteone enthält einen Zentralkanal, durch den Blutgefäße, Nerven und teils auch Lymphgefäße und Bindegewebe ziehen (STARCK und CHINSAMY, 2002). Mehrere konzentrische Knochenlamellen sind um den Zentralkanal angeordnet. Jede Lamelle ist aus parallel oder spiralförmig zur Querachse des Knochens angeordneten und miteinander verbundenen Kollagenfasern aufgebaut (WEINER und TRAUB, 1992). Die Kollagenfasern bestehen aus Kollagen I und liegen als Tripel-Helix-

Molekül vor. Durch die Änderung der Verlaufsrichtung von Lamelle zu Lamelle bilden sich spitzwinklig kreuzende Gitter (WEINER und TRAUB, 1992). Zwischen den Lamellen dieses dreidimensionalen Netzwerks liegen die Knochenzellen und die Karbonat-Apatit-Kristalle (WEINER und TRAUB, 1992). Sowohl die Lamellen als auch die Osteone sind entsprechend der mechanischen Belastung ausgerichtet und verlaufen daher in den langen Röhrenknochen longitudinal (TAYLOR et al., 2003). Durch die Anordnung der Kollagenfasern und die Verbindung der Knochenlamellen untereinander entsteht eine Stabilität gegen Zug- und Druckbelastungen (LIEBICH, 1999). Die länglichen Osteone breiten sich konzentrisch aus und bilden Knochenblätter, die sich mit flachen Gefäßsinus abwechseln (DE MARGERIE et al., 2005). Die erste Generation der Osteone (primäre Osteone) wird abgebaut und durch neue sekundäre Osteone ersetzt. Sekundäre Osteone sind gleich aufgebaut aber weniger mineralisiert als die primären. Sie sind beim Vogel seltener und im Knochenschaft nur proximal und distal (MOYLE und WALKER, 1986).

Volkman'sche Kanäle bilden die Querverbindungen zwischen Periost und Endost sowie den Knochenlamellen und verlaufen quer durch die Osteone. Es handelt sich um Knochenkanäle, die Blutgefäße und Zytoplasmafortsätze des Endosts enthalten (LIEBICH, 1999). Sie verbinden die Markhöhle mit der Oberfläche des Knochens und ermöglichen den Eintritt von periostalen Blutgefäßen in den Knochen (NICKEL et al., 1992). Die Kanäle sind mit Osteoid ausgekleidet, das Osteoblasten enthält. Im Bereich der Markhöhle ist der Durchmesser kleiner als am Periost. Mit zunehmendem Alter werden die Kanäle durch die Synthese von Knochengewebe kleiner (STARCK und CHINSAMY, 2002).

Die Diaphyse langer Röhrenknochen, also die Kompakta, besteht bei Vögeln histologisch aus vier Schichten. Die äußerste Schicht liegt unmittelbar dem Periost an. Sie besteht aus ringförmig verlaufendem Lamellenknochen mit parallel zueinander angeordneten Fasern und einer geringen Anzahl von Osteonen. Die darunter liegende Schicht besteht insbesondere aus primärem vaskulären Knochen, der geflecht- oder netzartig ohne einheitliche Orientierung des Knochengewebes aufgebaut ist. Die dritte Schicht enthält primäre und sekundäre, längs zur Knochenachse angeordnete Osteone (MCALISTER und MOYLE, 1983; LETERRIER und NYS, 1992; DE MARGERIE et al., 2004). DE MARGERIE et al. (2005) beschreiben den Knochen in dieser Schicht als laminar. Laminarer Knochen enthält gestreckte, parallel zur Knochenoberfläche verlaufende Kanäle und umlaufend angeordnete Fasern. Im Vergleich der langen Röhrenknochen weisen Knochen mit dünneren Wänden und runderem Querschnitt, wie der Humerus, einen höheren Anteil an laminarem Knochengewebe auf. Der Tibiotarsus und andere durch einen dickeren Kortex und weniger runden Querschnitt gekennzeichnete

Knochen enthalten dagegen kaum laminares Gewebe. Die vierte Schicht ist, ähnlich der ersten Schicht, aus dicht gepacktem, ringförmig verlaufenden Lamellenknochen mit parallel zueinander ausgerichteten Fasern aufgebaut und liegt dem Endost an. Sie enthält nur wenige Osteone, ist breiter als die äußere Schicht und enthält längere Volkmann'sche Kanäle (MCALISTER und MOYLE, 1983; LETERRIER und NYS, 1992; DE MARGERIE et al., 2005).

Die Markhöhle ist entweder pneumatisiert oder enthält Knochenmark. Die Diaphyse weist im Gegensatz zur Epiphyse keine Spongiosa auf (NICKEL et al., 1973). Im roten Knochenmark findet die Erythropoese, die Bildung der roten Blutzellen (Erythrozyten), statt (HERZOG, 1968). Mit zunehmendem Alter wird das rote Knochenmark zu gelbem Mark (KÖNIG und LIEBICH, 2001).

2.2.2.4 Knochenwachstum

Der Wachstums- und Reifungsprozess von Vogelknochen unterscheidet sich deutlich von dem der Säuger (FOWLER, 1981). Im Vergleich zum Säuger sind Wachstum und Ossifikation bezogen auf das Lebensalter deutlich früher abgeschlossen (SALOMON, 1993). Knochen können entweder durch primäre (desmale) oder sekundäre (chondrale) Ossifikation entstehen (KRAMPITZ et al., 1983). Die langen Röhrenknochen von Vögeln werden durch chondrale Ossifikation gebildet, die bereits beim Embryo beginnt (SIMSA und ORNAN, 2007). Für einen Großteil der Knochen ist beim Vogel ein knorpeliges Vorläufermodell angelegt, das im Verlauf der Individualentwicklung knöchern ersetzt wird (NICKEL et al., 1992). Flügelknochen und Os femoris sind ohne epiphyseale Ossifikationszentren (FOWLER, 1981). Bei diesen Knochen entsteht im Laufe der Individualentwicklung in der Mitte der Knochenanlage durch perichondrale Ossifikation ein knöcherner Mantel aus primitivem Geflechtknochen. Durch diesen Mantel ist kein Dickenwachstum mehr möglich. Es kommt zum Längenwachstum des knorpeligen Vorläufermodells und zur Verlängerung des perichondralen Knochenmantels in Richtung der Gelenke (KÖNIG und LIEBICH, 2001). Wenn das Wachstumspotential des Knorpels erschöpft ist, wandert Markgewebe in den Epiphysenknorpel ein und der Knorpel wird beginnend an der Diaphyse in Richtung der Gelenke durch Knochen ersetzt (FOWLER, 1981). Während der weiteren Entwicklung wird dieser Knochen zum Lamellenknochen umgebaut (KÖNIG und LIEBICH, 2001).

Der Tibiotarsus und der Tarsometatarsus haben ähnlich den Knochen von Säugern sekundäre, epiphyseale Ossifikationszentren. Das Längenwachstum ist verglichen mit den anderen Knochen schneller und geht von diesen Ossifikationszentren von der Epiphyse aus. Ist die Kapazität der Wachstumszonen erschöpft, ossifiziert der Knorpel (FOWLER, 1981). Bei

Hühnern ist die Ossifikation im Alter von 190 Lebenstagen abgeschlossen (PRATT, 1961). Bei den meisten Greifvogel- und Eulenarten ist dies bereits 60 Tage nach dem Schlupf der Fall und die Knochen sind ab diesem Alter ausgereift (FOWLER, 1981). Die Skelettreife ist im Allgemeinen von der Wachstumsrate der Vögel abhängig. Die Skelette langsam wachsender Jungvögel sind mikroskopisch stärker ossifiziert bzw. kalzifiziert als die schnell wachsender Arten (STARCK und CHINSAMY, 2002; BLOM und LILJA, 2004). Nesthocker weisen ein schnelleres Knochenwachstum auf als Nestflüchter. Die Knochen langbeiniger Vogelarten wachsen im Gegensatz zu kurzbeinigen ebenfalls schneller. In den Wachstumsfugen selbst finden sich mikroskopisch jedoch keine Unterschiede (KEMBER et al., 1990). Die Wachstumsgeschwindigkeiten der verschiedenen Knochen unterscheiden sich zwischen den Vogelarten. Humerus und Tibiotarsus wachsen meist am schnellsten (POURLIS et al., 1998). Die Schnelligkeit von Knochenwachstum und Knochenaufbau sind außerdem von Umweltfaktoren wie Nahrungsangebot, Zusammensetzung des Futters und Belastung der Knochen abhängig (HAVIVI und WOLF, 1967). Von der im Vergleich zu Säugern stärkeren Verknöcherung des Vogelskelettes sind nur der hyaline Gelenkknorpel, die Zwischenwirbelscheiben und die Menisken ausgenommen (SALOMON, 1993).

2.2.3 Gewicht und Kortexdicke

In der Literatur sind nur wenige Daten zu Gewicht und Kortexdicke einzelner Knochen verschiedener Vogelarten verfügbar. In Tabelle 1 sind einige Werte aus der Literatur aufgeführt.

Tabelle 1: Literaturangaben zum Knochengewicht im Vergleich zum Gesamtgewicht verschiedener Vogelarten

| Vogelart | Knochen | Körpergewicht (g) | Gewicht Knochen (g) | Quelle |
|--------------|-------------|-------------------|---------------------|-------------------------------|
| Masthähnchen | Humerus | 1736 | 8 ± 0,85 | (RODENHOFF und BRONSCH, 1971) |
| Broiler | Tibiotarsus | Keine Angaben | 6,41 | (YALCIN et al., 2001) |
| Japanwachtel | Tibiotarsus | 115,08 | 0,35 | (LIU et al., 2003) |

YALCIN et al. (2001) konnten bei Broilern eine Zunahme verschiedener morphologischer Parameter des Tibiotarsus (Länge, laterale und mediale Kortexdicke, proximale und distale Breite, distale Kondylenhöhe) mit zunehmendem Alter nachweisen. Das Gewicht der Knochen wurde durch das Körpergewicht, das Alter, die Abstammung und die Rasse

beeinflusst. Zwischen den morphologischen Parametern und dem Geschlecht, der Abstammung und der Rasse bestand kein Zusammenhang.

Pneumatisierte Knochen haben eine geringere Kortexdicke als mit Knochenmark gefüllte Knochen (SUHAI et al., 2006). Distale Knochenkortizes waren bei Krähen (*Corvus corone cornix*) und Elstern (*Pica pica*) dicker als proximale (SUHAI et al., 2006). Regelmäßige Bewegung führte bei wachsenden Hühnern zu einer größeren Kortexdicke im Vergleich zu Tieren, die ohne Bewegungsmöglichkeiten gehalten wurden (BIEWENER und BERTRAM, 1994). Absolute Werte zur Kortexdicke waren nicht verfügbar.

2.3 Chemische Zusammensetzung von Vogelknochen

Die Knochenzusammensetzung unterscheidet sich bei den verschiedenen Wirbeltierarten (AERSSENS et al., 1998). Sie ändert sich in Abhängigkeit vieler Faktoren wie z. B. Futter, Umweltbedingungen, Geschlecht, Alter und Rasse (FIELD et al., 1974).

2.3.1 Trockensubstanz

Die Trockensubstanz entspricht der Masse des Knochens nach Wasserentzug und wird in Prozent (%) bezogen auf die Feuchtmasse angegeben. Sie umfasst sowohl anorganische als auch organische Stoffe (KIRCHGEBNER, 1997). Der Trockensubstanzgehalt des Tibiotarsus von Broilern lag zwischen 45 % und 88 % (YALCIN et al., 2001). KORFMANN (2003) wies bei Mastputern einen Trockensubstanzgehalt des Os femoris von 87 % nach. In beiden Untersuchungen konnte nachgewiesen werden, dass die Trockenmasse im Verlauf des Wachstums anstieg. WEISKE (1889) untersuchte von einem Falken und einem Bussard nicht genannter Art Knochensammelproben aller Knochen. Der Trockensubstanzgehalt für den Falken lag bei 74,37 %, der des Bussards bei 77,16 %. Herkunft, Alter, Geschlecht und Ernährung der Tiere wurden nicht angegeben.

2.3.2 Rohasche

Nach Verbrennung der organischen Bestandteile der Trockensubstanz verbleibt die Rohasche, die in Prozent (%) der Trockenmasse angegeben wird (KIRCHGEBNER, 1997).

Der Rohaschegehalt verschiedener Vogelarten ist unabhängig vom untersuchten Knochen vergleichbar. Weibliche, adulte Hühner wiesen im Tibiotarsus einen Rohaschegehalt von 70,3 % der Trockensubstanz auf, der damit höher lag als bei männlichen adulten Tieren der gleichen Rasse mit 63,74 % (RATH et al., 1999). In einer vergleichenden Untersuchung von 16 Wirbeltierarten hatten Gänse einen geringgradig höheren Aschegehalt in einem Gemisch

aus Tibiotarsi und Ossa femorum als Hühner (70,7 % zu 69,6 % der Trockensubstanz) (BILTZ und PELLEGRINO, 1969). Der Rohaschegehalt des Gesamtskelettes von Papageien und Sittichen unterschied sich ebenfalls nur geringgradig. Sittiche (Wellen- und Nymphensittiche) und Papageien (Agaporniden, Amazonen und Graupapageien) wiesen Werte zwischen 58,2 % und 59,8 % der Trockensubstanz auf. Kanarienvögel wichen mit einem Wert von 62 % etwas ab (RABEHL, 1995). WEISKE (1889) ermittelte in einer Sammelprobe aller Knochen eines Falken einen Rohaschegehalt von 64,1 % der Trockensubstanz und in der eines Bussards von 63,6 % der Trockensubstanz. Tabelle 2 zeigt eine Auswahl über die in der Literatur angegebenen Rohaschegehalte von Knochen verschiedener Vogelarten.

Tabelle 2: Literaturangaben zum Rohaschegehalt verschiedener Vogelarten und Knochen als Einzelwert (EW), Messbereich, Mittelwert oder Mittelwert mit Standardabweichung

| Vogelart | Knochen | Rohaschegehalt (%) | Quelle |
|----------------|--------------------------------------|--------------------|-------------------------------|
| Wellensittich | Gesamtskelett | 59,6 ± 6,2 | (RABEHL, 1995) |
| Agapornide | Gesamtskelett | 58,2 ± 1,4 | (RABEHL, 1995) |
| Nymphensittich | Gesamtskelett | 59,8 ± 6,7 | (RABEHL, 1995) |
| Amazonen | Gesamtskelett | 58,3 ± 1,8 | (RABEHL, 1995) |
| Graupapagei | Gesamtskelett | 58,3 ± 2,5 | (RABEHL, 1995) |
| Kanarienvogel | Gesamtskelett | 62 ± 7,1 | (RABEHL, 1995) |
| Falke | Gesamtskelett | 64,1 (EW) | (WEISKE, 1889) |
| Bussard | Gesamtskelett | 63,6 (EW) | (WEISKE, 1889) |
| Huhn | Tibiotarsi und Ossa femorum gemischt | 47,7 | (THORP und WADDINGTON, 1997) |
| Masthähnchen | Humerus | 57,6 | (RODENHOFF und BRONSCH, 1971) |
| Mastputer | Os femoris | 70 | (KORFMANN, 2003) |
| Puter | Os femoris | 68,1 | (CRESPO et al., 2002) |
| Huhn | Os femoris | 65 | (AERSSENS et al., 1998) |
| Henne | Humerus | 62,4 - 63,8 | (KIM et al., 2004) |
| | Tibiotarsus | 64,6 - 68 | |
| Henne | Tibiotarsus | 70,3 | (RATH et al., 1999) |
| Hahn | Tibiotarsus | 63,7 | (RATH et al., 1999) |
| Hahn | Tibiotarsi und Ossa femorum gemischt | 70,7 | (BILTZ und PELLEGRINO, 1969) |
| Gans | Tibiotarsi und Ossa femorum gemischt | 69,6 | (BILTZ und PELLEGRINO, 1969) |

LETERRIER und NYS (1992) konnten an Hühnern nachweisen, dass mit zunehmendem Alter der Rohaschegehalt von Hühnerknochen ansteigt. Der Rohaschegehalt des Tibiotarsus von Wachteln wurde von der Fütterung beeinflusst. Je nach Fettgehalt der Nahrung variierte der Rohaschegehalt zwischen 39 % und 44 % der Trockensubstanz, wobei der Anteil der Rohasche der Knochen mit dem Fettgehalt des Futters anstieg (LIU et al., 2003). WOHL et al. (1998) konnten bei Hühnern dagegen mit einer Erhöhung der Fettgehalte im Futter keine Veränderung des Rohaschegehalts herbeiführen. Die Werte lagen in allen Untersuchungsgruppen um 65 % der Trockensubstanz.

2.3.3 Rohfett

Zum Rohfett werden verschiedene Stoffe gezählt, die in Ether löslich sind. Nur ein Teil des Rohfettes besteht demnach aus wirklichem Fett, also Triglyzeriden (KIRCHGEBNER, 1997). Die Angabe erfolgt meist in Prozent (%) der Trockensubstanz. Der Fettgehalt von Knochen (Synsakraum, Wirbel, Rippen und Ossa femorum) bleibt bei Hühnern im Gegensatz zu Säugetieren während des Wachstums gleich (FIELD et al., 1974). Der Humerus von Mastgeflügel enthält ca. 2,6 - 3,1 mg/g Rohfett, dies entspricht 26 - 31 % der Trockensubstanz (RODENHOFF und BRONSCH, 1971). Die Sammelprobe aller Knochen eines Falken wies einen Rohfettgehalt von 17,7 %, die eines Bussards von 16,7 % der Trockensubstanz auf (WEISKE, 1889).

2.3.4 Mengenelemente

Als Mengenelemente werden essentielle Substanzen bezeichnet, deren mittlerer Gehalt im Körper über 50 mg/kg Körpermasse beträgt. Dazu zählen die Mineralstoffe Kalzium, Phosphor, Magnesium, Natrium, Kalium, Chlor und Schwefel (KIRCHGEBNER, 1997). Der Anteil an Mengen- und Spurenelementen ist bei allen Wirbeltieren proportional zur Menge der Knochenasche und korreliert negativ mit dem Gehalt an Kollagen (BILTZ und PELLEGRINO, 1969).

2.3.4.1 Kalzium und Phosphor

Im Skelett der Wirbeltiere sind über 99 % des Gesamtkalziums und ungefähr 80 % des Gesamtphosphors des tierischen Organismus lokalisiert (DRESSLER, 1971). Kalzium und Phosphor sind als Apatitkristalle der Hauptbestandteil der mineralischen Knochensubstanz. Sie sind an der Mineralisierung des wachsenden Skelettes und dem lebenslangen Umbau des Knochens beteiligt. Der Knochen dient als Speicher für Kalzium und Phosphor (DRESSLER,

1971; KRAMPITZ et al., 1983). An der Regulation des Kalziumhaushaltes des Vogels sind wie beim Säuger Parathormon, Kalzitonin und Vitamin D₃ beteiligt (KRAMPITZ et al., 1983). Kalzium und Phosphor liegen bei allen Tierarten im gesamten Organismus und damit auch im Skelett in einem Verhältnis von ungefähr 2:1 vor (BILTZ und PELLEGRINO, 1969; RABEHL, 1995). Die adäquate Versorgung über die Nahrung ist ebenso wichtig für den Stoffwechsel wie das ausgewogene Verhältnis der Stoffe. Ein absoluter Mangel an Kalzium und Phosphor in der Nahrung führt zu einem Abbau von Knochensubstanz, der sich bei ausgewachsenen Tieren als Osteodystrophie manifestiert. Bei Jungtieren entsteht durch Mängel im Kalzium-Phosphor-Stoffwechsel eine Rachitis, unabhängig davon, ob sie durch Kalzium-, Phosphor- oder Vitamin D-Mangel bedingt ist (DRESSLER, 1971).

RABEHL (1995) wies bei mehreren Ziervogelarten im Gesamtskelett einen Kalziumgehalt von 200 - 212 g/kg Rohasche und einen Phosphorgehalt von 102 - 108 g/kg Rohasche mit einem durchschnittlichen Ca-P-Verhältnis im Knochen von 1,9:1 nach. Lediglich das Skelett von Wellensittichen enthielt einen höheren Kalziumwert von 227 g/kg Rohasche und einen niedrigeren Phosphorwert von 91,6 g/kg Rohasche. Das Kalzium-Phosphor-Verhältnis im Knochen betrug bei ihnen 2,5:1. In einer Sammelprobe aller langen Röhrenknochen von insgesamt 46 adulten Wildvögeln, unter denen auch 20 Greifvögel waren, wurde ein Kalziumgehalt von 228,6 g/kg Rohasche und ein Phosphorgehalt von 109,7 g/kg Rohasche nachgewiesen (CUBO und CASINOS, 2000). Weitere Angaben aus der Literatur sind Tabelle 3 zu entnehmen.

Tabelle 3: Literaturangaben zum Kalzium- und Phosphorgehalt in der Rohasche von Knochen verschiedener Vogelarten als Einzelwert (EW), Mittelwert oder Mittelwert mit Standardabweichung

| Vogelart | Knochen | Kalzium (g/kg) | Phosphor (g/kg) | Quelle |
|----------------|--------------------------------------|----------------|-----------------|-------------------------------|
| Falke | Gesamtskelett | 328,9 (EW) | | (WEISKE, 1889) |
| Bussard | Gesamtskelett | 325,4 (EW) | | (WEISKE, 1889) |
| Wildvögel | Sammelprobe | 228,6 | 109,7 | (CUBO und CASINOS, 2000) |
| Wellensittich | Gesamtskelett | 227 ± 13,4 | 91,6 ± 8,5 | (RABEHL, 1995) |
| Agapornide | Gesamtskelett | 204 ± 5,8 | 107 ± 2,5 | (RABEHL, 1995) |
| Nymphensittich | Gesamtskelett | 212 ± 27,6 | 106 ± 1,9 | (RABEHL, 1995) |
| Amazone | Gesamtskelett | 205 ± 8,3 | 108 ± 4,9 | (RABEHL, 1995) |
| Graupapagei | Gesamtskelett | 200 ± 11,3 | 108 ± 3,9 | (RABEHL, 1995) |
| Kanarienvogel | Gesamtskelett | 206 ± 39,9 | 102 ± 10,6 | (RABEHL, 1995) |
| Amsel | Tibiotarsus | 61,8 | | (BILBY und WIDDOWSON, 1971) |
| Drossel | Tibiotarsus | 62,7 | | (BILBY und WIDDOWSON, 1971) |
| Masthähnchen | Humerus | 214,6 | 104,0 | (RODENHOFF und BRONSCH, 1971) |
| Mastputer | Os femoris | 236,59 | 125,42 | (KORFMANN, 2003) |
| Puter | Os femoris | 354 | 167 | (CRESPO et al., 2002) |
| Wachtel | Tibiotarsus | 139 - 162 | 65 - 75 | (LIU et al., 2003) |
| Hahn | Tibiotarsi und Ossa femorum gemischt | 236,1 | 118,5 | (BILTZ und PELLEGRINO, 1969) |
| Gans | Tibiotarsi und Ossa femorum gemischt | 269,4 | 119,9 | (BILTZ und PELLEGRINO, 1969) |

Der Kalziumgehalt der Knochen steigt bei Geflügel mit dem Alter der Tiere an (FIELD et al., 1974). Während KORFMANN (2003) bei Putern einen altersbedingten Anstieg des Phosphorgehalts im Knochen feststellte, wiesen TAYLOR et al. (1960) bei Hühnern einen Abfall um 0,26 % mit steigendem Alter nach. Im Gegensatz zu Säugetieren variierte der Gehalt an Kalzium und Phosphor in der Rohasche zwischen den verschiedenen Knochen beim Geflügel kaum (TAYLOR et al., 1960; FIELD et al., 1974). Die Ossa femorum von 31 Wochen alten, männlichen Hühnern wiesen signifikant weniger Kalzium und Phosphor auf als die weiblicher Tiere (VO et al., 1978).

2.3.4.2 Magnesium

Ca. 60 % des im Körper enthaltenen Magnesiums befinden sich im Skelett. Ein Drittel des im Knochen befindlichen Magnesiums ist fest in das Apatitgitter eingebaut, während der restliche Anteil elektrostatisch an die Apatitkristalle gebunden wird (DRESSLER, 1971).

Der Gehalt von Magnesium in der Rohasche ist bei vielen Wirbeltieren vergleichbar (BILTZ und PELLEGRINO, 1969). Dies trifft auch auf die meisten Vogelarten zu (Tab. 4). Der Magnesiumgehalt verschiedener Ziervogelarten (Sittiche, Papageien und Kanarienvögel) lag zwischen 2550 mg/kg und 3920 mg/kg Rohasche (RABEHL, 1995). Eine Sammelprobe der langen Röhrenknochen von 46 Wildvögeln verschiedener Arten wies einen Magnesiumgehalt von 3600 mg/kg Rohasche auf (CUBO und CASINOS, 2000).

Tabelle 4: Literaturangaben zum Magnesiumgehalt in der Rohasche von Knochen verschiedener Vogelarten als Einzelwert (EW), Mittelwert oder Mittelwert mit Standardabweichung

| Vogelart | Knochen | Magnesium (mg/kg) | Quelle |
|----------------|--------------------------------------|-------------------|-------------------------------|
| Falke | Gesamtskelett | 4700 (EW) | (WEISKE, 1889) |
| Bussard | Gesamtskelett | 6100 (EW) | (WEISKE, 1889) |
| Wildvögel | Sammelprobe | 3600 | (CUBO und CASINOS, 2000) |
| Wellensittich | Gesamtskelett | 2940 ± 310 | (RABEHL, 1995) |
| Agapornide | Gesamtskelett | 3500 ± 360 | (RABEHL, 1995) |
| Nymphensittich | Gesamtskelett | 3360 ± 330 | (RABEHL, 1995) |
| Amazone | Gesamtskelett | 2550 ± 250 | (RABEHL, 1995) |
| Graupapagei | Gesamtskelett | 3370 ± 410 | (RABEHL, 1995) |
| Kanarienvogel | Gesamtskelett | 3920 ± 450 | (RABEHL, 1995) |
| Masthähnchen | Humerus | 4181 | (RODENHOFF und BRONSCH, 1971) |
| Hahn | Os femoris | 2300 | (VO et al., 1978) |
| Henne | Os femoris | 2900 | (VO et al., 1978) |
| Hahn | Tibiotarsi und Ossa femorum gemischt | 3700 | (BILTZ und PELLEGRINO, 1969) |
| Gans | Tibiotarsi und Ossa femorum gemischt | 4000 | (BILTZ und PELLEGRINO, 1969) |
| Huhn | Keine Angabe | 5100 | (NICKEL et al., 1973) |

Die Magnesiumgehalte der einzelnen Knochen eines Vogels unterscheiden sich nicht wesentlich. Im Verlauf des Alters sinkt der Anteil des Magnesiums im Knochen nur

unwesentlich (TAYLOR et al., 1960). Der Magnesiumgehalt des Os femoris war bei männlichen Hühnern signifikant niedriger als bei weiblichen Tieren (VO et al., 1978).

Geflügel hat im Vergleich zu Säugetieren einen geringeren Magnesiumbedarf (DRESSLER, 1971). Eine Überversorgung mit Magnesium führt zu Ossifikationsstörungen (DRESSLER, 1971), die sich in verkürzten, verdickten und gebogenen Knochen mit dem histologischen Bild von rachitischen Läsionen zeigen (LEE et al., 1980). Eine bedarfsgerechte Zufuhr von Magnesium hat durch eine Verbesserung der Kupfer- und Zinkablagerung im Knochen dagegen einen antirachitischen Effekt (LUO et al., 1992). Bei einer Überversorgung mit Phosphor wirkt Magnesium ebenfalls antirachinogen (DRESSLER, 1971).

2.3.4.3 Weitere Mengenelemente

Ungefähr 40 % des Gesamtnatriums und 5 % des Gesamtkaliums des Organismus befinden sich im Knochen. Das Skelett dient dabei vorrangig als Speicher. Über- und Unterversorgung mit diesen Mineralstoffen haben keinen Einfluss auf die Zusammensetzung oder Belastbarkeit der Knochen (DRESSLER, 1971). Der Natriumgehalt von Hühnerknochen beträgt 0,8 - 1 % der Rohasche (TAYLOR et al., 1960) bzw. 6,1 mg/g der Trockensubstanz (BILTZ und PELLEGRINO, 1969) und der Kaliumgehalt 0,4 - 0,5 % der Rohasche (TAYLOR et al., 1960).

2.3.5 Spurenelemente

Spurenelemente sind Stoffe, deren Konzentration unter 50 mg je kg Körpergewicht liegt. Ein Teil der Spurenelemente ist essentiell und muss über die Nahrung zugeführt werden (KIRCHGEBNER, 1997). Im Skelett vorkommende Spurenelemente sind Kupfer, Zink, Mangan und Molybdän (DRESSLER, 1971).

2.3.5.1 Kupfer

Kupfer ist als Kofaktor von Enzymen an der Bildung der Querverbindungen zwischen Kollagenfasern beteiligt (RUCKER et al., 1969). Als Teil von Redoxketten beeinflusst es außerdem das Knochenwachstum (DRESSLER, 1971). Der Großteil des Kupfers ist an den organischen Anteil des Knochens gebunden (HILL, 1965).

Der Gehalt von Kupfer in der Rohasche verschiedener Vogelarten ist in Tabelle 5 angegeben. Das Skelett von Wellensittichen enthielt im Vergleich zu anderen Ziervogelarten (Kanarienvogel, Agapornide, Nymphensittich, Amazone und Graupapagei) mit 11,5 mg/kg Rohasche mehr Kupfer (RABEHL, 1995).

Nach Angaben von DOYLE (1979) variiert der Kupfergehalt in allen Körpergeweben deutlich bei verschiedenen Tierarten und Altersgruppen. Die Knochen von Eintagsküken enthielten signifikant mehr Kupfer als die von drei Wochen alten Küken (HILL, 1965). Das Geschlecht hatte bei Hühnern keinen Einfluss auf den Kupfergehalt der Knochen (HILL, 1965; VO et al., 1978).

Eine Unterversorgung mit Kupfer resultiert in einem reduzierten Knochenwachstum (DRESSLER, 1971) und brüchigen Knochen (RUCKER et al., 1975; OPSAHL et al., 1982). Diese Veränderungen scheinen auf einer Reduktion der Aktivität verschiedener Enzyme zu beruhen, die zu einer geringeren Quervernetzung des Kollagens im Knochen führt (RUCKER et al., 1969). Im Gegensatz zu älteren Hühnern, bei denen eine gleichmäßige Verteilung des Kupfers im Knochen besteht, ist bei Eintagsküken die Kupferkonzentration in den Epiphysen, die einen höheren organischen Anteil aufweisen, fast doppelt so hoch wie in der Diaphyse (HILL, 1965).

2.3.5.2 Zink

Zink beeinflusst als Kofaktor von Enzymen das Skelettwachstum (DRESSLER, 1971). Tabelle 5 gibt den Zinkgehalt der Rohasche verschiedener Vogelarten wieder.

Tabelle 5: Ausgewählte Literaturangaben zum Kupfer- und Zinkgehalt in der Rohasche von Knochen verschiedener Vogelarten als Mittelwert oder Mittelwert mit Standardabweichung

| Vogelart | Knochen | Kupfer (mg/kg) | Zink (mg/kg) | Quelle |
|----------------|---------------|-------------------|-----------------|-------------------------------|
| Wellensittich | Gesamtskelett | 11,5 ± 1,7 | 298 ± 76,4 | (RABEHL, 1995) |
| Agapornide | Gesamtskelett | 8,7 ± 0,4 | 237 ± 23,2 | (RABEHL, 1995) |
| Nymphensittich | Gesamtskelett | 9,1 ± 2,5 | 236 ± 48,1 | (RABEHL, 1995) |
| Amazone | Gesamtskelett | 8,2 ± 0,7 | 205 ± 38,1 | (RABEHL, 1995) |
| Graupapagei | Gesamtskelett | 8,1 ± 1,0 | 208 ± 32,1 | (RABEHL, 1995) |
| Kanarienvogel | Gesamtskelett | 9,4 ± 1,0 | 696 ± 219 | (RABEHL, 1995) |
| Eintagsküken | Beinknochen | 9,61 | | (HILL, 1965) |
| Huhn | Tibiotarsus | 2,54 | | (HILL, 1965) |
| Hahn | Tibiotarsus | | 25,5 | (WEDEKIND und BAKER, 1990) |
| Hahn | Tibiotarsus | 7 | 713 | (SOUTHERN und BAKER, 1983) |
| Masthähnchen | Humerus | 10,0 | 167 | (RODENHOFF und BRONSCH, 1971) |
| Hahn | Os femoris | 3,55 | 121,6 | (VO et al., 1978) |
| Henne | Os femoris | 3,44 | 211,92 | (VO et al., 1978) |
| Puter | Os femoris | 1,1 | 184,4 | (CRESPO et al., 2002) |
| Masthähnchen | Tibiotarsus | 6,0 | | (LEDOUX et al., 1991) |

In der zugänglichen Literatur gab es keine Hinweise auf den Einfluss des Alters auf den Zinkgehalt in Knochen von Vögeln. Die Ossa femorum männlicher Hühner enthielten signifikant weniger Zink als die weiblicher (VO et al., 1978). Bei Menschen wurde kein signifikanter Einfluss von Alter und Geschlecht auf den Zinkgehalt der Knochen festgestellt (LAPPALAINEN et al., 1982).

Ein Zinkmangel führt bei Geflügel zu Knochenanomalien, wie verkürzten Röhrenknochen und verdickten Sprunggelenken (HOEKSTRA, 1969). Bei Fasanenküken verursachte eine Zinkunterversorgung eine laterale Verbiegung der Tarsometatarsi (COOK et al., 1984). Die Deformation der Beinknochen beim Zinkmangelsyndrom entsteht vermutlich durch eine Reduzierung des Kollagenstoffwechsels (STARCHER et al., 1980). Eine Überversorgung mit Zink bewirkt eine Reduktion der Wachstumsrate und eine höhere Zinkkonzentration in den Körpergeweben (SOUTHERN und BAKER, 1983). Zink und Kupfer wirken bei oraler Aufnahme antagonistisch. Hohe Zinkgaben reduzieren die Ablagerung von Kupfer im Gewebe. Dagegen kann Kupfer zum Teil die Symptome eines Zinkmangels abschwächen (SOUTHERN und BAKER, 1983).

2.4 Knochendichte

Die Dichte, auch als Massendichte oder spezifisches Gewicht bezeichnet, ist eine der kennzeichnenden Eigenschaften eines Stoffes. Sie ist temperaturabhängig. Physikalisch ist die Dichte ρ als Quotient aus Masse m und Volumen V definiert (KAMKE und WALCHER, 1994). Sie wird in kg/m^3 angegeben.

Die Dichte eines Knochens wird auch als Knochenmineraldichte oder BMD (bone mineral density) bezeichnet. Die Knochendichte wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst, wie z. B. Alter, Geschlecht, Wachstumsrate und Fütterung. Mit zunehmendem Alter steigt die Knochendichte bei Hühnern an (LETERRIER und NYS, 1992; RATH et al., 1999). Weibliche Tiere weisen eine höhere Knochendichte auf als männliche (RATH et al., 1999; ZULAUF-FISCHER et al., 2006). LETERRIER und NYS (1992) konnten bei Hühnerrassen mit einer geringeren Wachstumsrate eine höhere Knochendichte feststellen als bei Rassen mit einer hohen Wachstumsrate. Mit steigendem Anteil an Kalzium und Phosphor in der Nahrung steigt die Knochendichte (ONYANGO et al., 2003), während sie bei reduziertem Kalziumgehalt der Nahrung absinkt (SCHREIWEIS et al., 2003). An verschiedenen Stellen des Os femoris von Putern konnten keine Unterschiede der Knochendichte festgestellt werden (CRESPO et al., 2002). SHAHNAZARI et al. (2006) wiesen an Tibiotarsi von Legehennen jedoch eine Zunahme der Knochendichte von distal nach proximal nach. Osteopetrose führte bei Hühnern zu einer verminderten Knochendichte (BILTZ und PELLEGRINO, 1965).

Die dreidimensionale Struktur der Knochen beeinflusst die Knochendichte. Die Breite und die Anzahl der Knochenbälkchen korrelierten positiv mit der Knochendichte, der Abstand der Knochenbälkchen zueinander dagegen negativ (MARTINEZ-CUMMER et al., 2006). Die Knochendichte korrelierte außerdem mit der Trockensubstanz, dem Rohascheanteil, der Knochenzusammensetzung und der mechanischen Belastbarkeit (ZHANG und COON, 1997; ZOTTI et al., 2003). Der Zusammenhang der Dichte mit der Frakturwahrscheinlichkeit von Knochen variierte bei den verschiedenen Säuger- und Vogelspezies (AERSSSENS et al., 1998). Verschiedene Methoden werden zur Messung der Knochendichte eingesetzt, deren Ergebnisse aber nicht vergleichbar sind (FLEMING et al., 2004; KORVER et al., 2004; MARTINEZ-CUMMER et al., 2006). Eine sehr gute Übereinstimmung der Dichtemessungen konnte zwischen der klassischen Auftriebsmethode nach dem archimedischen Prinzip und den modernen Verfahren der Dual-Röntgenabsorptiometrie (DEXA) und der peripheren, quantitativen Computertomographie (pQCT) festgestellt werden. Die beiden modernen Methoden weisen demnach eine hohe Genauigkeit auf (KIM et al., 2004; KORVER et al., 2004; SCHREIWEIS et al., 2005). Darüber hinaus sind beide Methoden nicht-invasiv und können problemlos an

lebenden, anästhesierten Tieren angewendet werden (HESTER et al., 2004; KORVER et al., 2004). Allerdings wird mit dem DEXA-Verfahren nicht die reale, physikalische Dichte gemessen, sondern lediglich die absorbierte Menge an Röntgenstrahlen. Daraus wird der Mineralgehalt pro Fläche berechnet (JOHNSTON et al., 1991). Deshalb werden bei der DEXA häufig keine Werte für die Dichte angegeben, sondern die Abweichung des Errechneten vom Normalen. Mit der pQCT wird dagegen die tatsächliche physikalische Dichte anhand der Schwächung von Röntgenstrahlen aus mehreren Winkeln errechnet. Allerdings ist die Methode aufwändig, zeitintensiv und mit einer höheren Strahlenbelastung verbunden. Sie ist im Gegensatz zu den anderen Methoden auf einzelne Messpunkte in einem Knochen beschränkt (KORVER et al., 2004). Mit der klassischen Auftriebsmethode nach dem archimedischen Prinzip erhält man wie bei der pQCT die physikalische also reelle Dichte eines Stoffes ohne Ungenauigkeiten durch technische Geräte und Umrechnung in Kauf nehmen zu müssen. Diese Methode ist jedoch invasiv und kann nicht an lebenden Tieren angewendet werden.

Die Knochendichte von Menschen liegt bei etwa $1,2 \text{ g/cm}^3$ (KAMKE und WALCHER, 1994). HERZOG (1968) gibt die Dichte von Vogelknochen mit $1,8 \text{ g/cm}^3$ an. Bei weiblichen, eierlegenden Wellensittichen wurde am Tibiotarsus eine Knochendichte von $0,55 \text{ g/cm}^3$, bei männlichen von $0,36 \text{ g/cm}^3$ gemessen (ZULAUF-FISCHER et al., 2006). Die Ergebnisse verschiedener Knochendichtemessungen am Tibiotarsus verschiedener Vogelarten aus der Literatur sind in Tabelle 6 wiedergegeben.

Tabelle 6: Literaturangaben zum Mittelwert der Knochendichte des Tibiotarsus verschiedener Vogelarten

| Vogelart | Dichte (g/cm^3) | Methode | Quelle |
|------------------|----------------------------|------------------|-------------------------------|
| Henne (Legeruhe) | 0,55 | Auftriebsmethode | (KIM et al., 2004) |
| Henne (Wildtyp) | 0,46 | Auftriebsmethode | (KIM et al., 2004) |
| Hahn | 1,14 | Auftriebsmethode | (LETERRIER und NYS, 1992) |
| Henne | 1,35 | Auftriebsmethode | (ZHANG und COON, 1997) |
| Legehennen | 1,35 | Auftriebsmethode | (SHAHNAZARI et al., 2006) |
| Hahn | 1,54 | Auftriebsmethode | (RATH et al., 1999) |
| Henne | 1,79 | Auftriebsmethode | (RATH et al., 1999) |
| Henne | 0,70 | pQCT | (FLEMING et al., 2004) |
| Wellensittich | 0,55 | pQCT | (ZULAUF-FISCHER et al., 2006) |

2.5 Mechanische Belastbarkeit

2.5.1 Grundlagen der Biomechanik

Die Knochenfestigkeit entspricht der mechanischen Belastbarkeit, der Stabilität oder der Bruchfestigkeit von Knochen. Ist die mechanische Belastbarkeit reduziert, erhöht sich das Frakturrisiko (RATH et al., 2000). Eine Kraft oder Belastung, die auf einen Knochen einwirkt, resultiert in einer Deformation des Materials (SCHWARZ, 1991). Die Belastungen, denen ein Knochen widerstehen muss, umfassen Druck, Zug, Scherung, Biegung und Torsion (NORDIN und FRANKEL, 1980). Daran angepasst werden zur Prüfung der mechanischen Belastbarkeit von Knochen vier verschiedene Belastbarkeitstests (Druck, Zug, Biegung und Torsion) unterschieden. Die Torsionsprüfung beansprucht den gesamten Knochen und bildet die Basis aller mechanischen Tests (KAMKE und WALCHER, 1994).

Die Belastbarkeit von Knochen hängt von der Ausrichtung ihrer Mikrostruktur und der Richtung der einwirkenden Belastung ab. Solche Materialien werden als anisotrop bezeichnet (RADASCH, 1999). Aufgrund der longitudinalen Ausrichtung der Kollagenfasern können lange Röhrenknochen prinzipiell eher eine Belastung entlang ihrer Achse als senkrecht einwirkenden Kräften widerstehen (SCHWARZ, 1991). Knochen ist außerdem ein biphasisches Material, das sowohl elastische als auch plastische Eigenschaften aufweist (SCHWARZ, 1991). Das mechanische Verhalten eines Knochens während einer Belastung lässt sich anhand einer Kraft-Dehnungs-Kurve darstellen (Abb. 1). Zu Beginn der Belastung kommt es zu einer elastischen Deformation. Endet die Belastung, kehrt der Knochen unverändert in seinen Ausgangszustand zurück. Wird der Fließpunkt am Ende der elastischen Verformung überschritten, ist die Deformation permanent. Ab diesem Zeitpunkt steigt die Deformation mit der Belastung progressiv an. Dieses Verhalten des Knochens wird als plastische Verformung bezeichnet. Wird die maximale Belastbarkeit des Materials überschritten, kommt es zum Versagen also zum Bruch des Knochens (SCHWARZ, 1991; KAMKE und WALCHER, 1994; RADASCH, 1999).

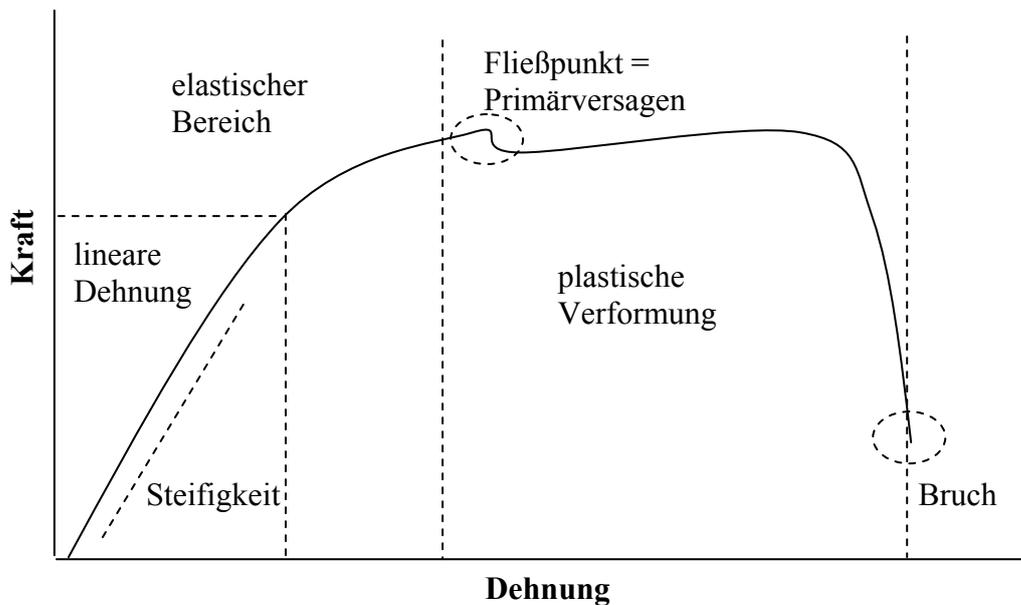


Abbildung 1: Kraft-Dehnungs-Diagramm (dimensionslos) eines elastischen Materials (modifiziert nach SCHWARZ, 1991)

Aus einer Kraft-Dehnungs-Kurve kann die mechanische Belastbarkeit eines Knochens als Gesamtheit beurteilt werden (NORDIN und FRANKEL, 1980). Die Belastbarkeit oder Bruchfestigkeit eines Knochens lässt sich aus der aufgewendeten Kraft bis zum Versagen ermitteln. Der Bereich unterhalb der Kurve entspricht der Energie, die der Knochen während der Belastung absorbieren kann (NORDIN und FRANKEL, 1980).

In der Torsionsprüfung wird als Parameter der Belastbarkeit das maximale Drehmoment bestimmt. Das Drehmoment (M) ist das Vektorprodukt aus der einwirkenden Kraft (F) und dem Kraftarm (r) (KAMKE und WALCHER, 1994).

$$\vec{M} = \vec{F} \cdot \vec{r}$$

Der lineare Verlauf im elastischen Bereich der Kraft-Dehnungs-Kurve entspricht der Steifigkeit. Die Steifigkeit beschreibt den Zusammenhang zwischen der einwirkenden Last, also der Belastung des Knochens, und der elastischen Verformung, also der Belastbarkeit des Knochens. Sie entspricht der Fähigkeit des Knochens, der Deformation zu widerstehen (NORDIN und FRANKEL, 1980) und wird als Quotient von Belastung und Deformation (KAMKE und WALCHER, 1994) angegeben. Bei Torsionsversuchen wird die Steifigkeit häufig in $\text{Nm}/^\circ$ angegeben, bei Druck, Zug und Biegung meist in N/mm .

Die Belastbarkeit, die Steifigkeit und die absorbierte Energie, die sich aus der Kraft-Dehnungs-Kurve ergeben, erlauben einen Vergleich verschiedener Knochen in ihrer Gesamtheit unabhängig von Größe, Geometrie und morphologischen Besonderheiten (RADASCH, 1999). Mit einer Veränderung der Größe, der Form oder der Zusammensetzung

der Knochen verändern sich die Belastbarkeit, die Steifigkeit und die absorbierte Energie (NORDIN und FRANKEL, 1980).

Die Kraft, mit der ein Knochen in Torsion belastet werden kann, ist geringer als die bei Kompression oder Zug. Bei der Torsionsbelastung bilden sich Mikrorisse durch intralamelläres Splintern im Kortex. Die Belastbarkeit bis zum Versagen hängt unter anderem davon ab, wie sich diese Mikrorisse bei wiederholter Belastung ausbreiten. Manche Risse können ohne große Beeinträchtigung der Stabilität fast über die gesamte Länge des Knochens verlaufen. Das Versagen findet meistens statt, wenn die Risse in einem Winkel von ca. 45° zur Längsachse des Knochens verlaufen (TAYLOR et al., 2003).

2.5.2 Mechanische Eigenschaften der langen Röhrenknochen von Vögeln

Die mechanischen Eigenschaften eines Knochens sind neben physikalischen Faktoren wie Länge, Form und Masse sowie strukturellem Aufbau auch von der Zusammensetzung der Knochenminerale abhängig (RATH et al., 2000; BONSER und CASINOS, 2003). Die unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften von Knochen entstehen durch den Mineralisationsgrad, die Porosität und den Umbau der Haver'schen Systeme durch Mobilisation und Ablagerung von Knochenmineralien (CURREY, 1975). Sie sind auch von der Funktion des Knochens, seiner Beanspruchung, der Größe des Tieres und dessen Lebensweise abhängig (CURREY, 1975; ROACH et al., 1989).

Kollagen bildet als Strukturgeber die Grundlage für die Bruchfestigkeit von Vogelknochen. Die Hydroxylapatitkristalle sind dagegen für die Druckfestigkeit (Widerstand gegen Kompression) der Knochen verantwortlich (RATH et al., 2000). Pneumatisierte Knochen weisen eine geringere Biegsamkeit auf als Knochen, die mit Knochenmark gefüllt sind (CASINOS und CUBO, 2001). Auch der relative Anteil von spongiösem und kompaktem Knochen beeinflusst die Belastbarkeit eines Knochens (ROACH et al., 1989). Kompakter Knochen verleiht dem Knochen seine generelle Belastbarkeit und Steifigkeit (CARTER und SPENGLER, 1982). Spongiosa erreicht nur maximal 90 % der Stabilität des angrenzenden kompakten Knochens. Bei Vögeln wird vermutet, dass diese geringere Stabilität durch die spätere Entwicklung des spongiösen Knochengewebes und der unterschiedlichen Belastung der Bereiche verursacht wird (BONSER, 1995). Ein krankheitsbedingter Verlust spongiösen Knochens führt jedoch dazu, dass ein Knochen schneller frakturiert (PASSI und GEFEN, 2005), da der spongiöse Knochen die auf den Kortex einwirkenden Kräfte absorbiert und über den Knochen verteilt (CARTER und SPENGLER, 1982).

Einen Einfluss auf die Belastbarkeit von Knochen hat auch der Knochenquerschnitt (SCHWARZ, 1991). Der Querschnitt langer Röhrenknochen hat die Form eines „runden Quadrats“ oder eines „Dreiecks mit runden Ecken“ (SCHWARZ, 1991). Diese Form ist ein Kompromiss, um eine optimale Belastbarkeit gegen Torsions- und Biegekräfte zu erreichen, da ein Zylinder Torsion und ein Quadrat Biegung am besten widerstehen kann (SCHWARZ, 1991). Eine weitere Anpassung ist die tubuläre Struktur der langen Röhrenknochen. Tubuläre Strukturen sind sowohl gegenüber Biegung als auch Torsion stabiler als solide Materialien (NORDIN und FRANKEL, 1980).

Die Belastbarkeit variiert innerhalb eines Knochens, zwischen den verschiedenen Knochen eines Individuums und dem Knochentyp (KNOTT und BAILEY, 1999; PIENKOWSKI et al., 1999; BONSER und CASINOS, 2003). Allerdings korrelierten die Belastbarkeiten von Humerus und Tibiotarsus des gleichen Individuums bei Hühnern miteinander (KNOWLES et al., 1993). Beim Vergleich der mechanischen Belastbarkeit der beiden Humeri eines Individuums bei Hühnern waren die Knochen einer Seite fast doppelt so stark wie die der anderen Seite (FLEMING et al., 1999). Die Variation innerhalb eines Knochens spiegelt lokale strukturelle Unterschiede wider (SCHWARZ, 1991). So ist die Härte des mineralischen Anteils in der Mitte des Knochens am größten und nimmt in Richtung der Epiphysen ab (BONSER, 1995). Die Belastbarkeit der Knochentypen entspricht in hohem Maße ihren verschiedenen Funktionen (CURREY, 1975; KNOTT und BAILEY, 1999). Die langen Röhrenknochen von Flügeln und Beinen werden bei Vögeln auf unterschiedliche Weise belastet (CUBO und CASINOS, 1998). Der mikro- und makrostrukturelle Aufbau wird am stärksten durch die Torsionsbelastung beeinflusst (DE MARGERIE et al., 2005). Generell wirken auf die Knochen der Beine vor allem Biege- und Axialkräfte (entlang der Knochenachse verlaufende Kräfte), während die Knochen der Flügel meist durch Torsion und Biegung beansprucht werden (CUBO und CASINOS, 1998). Allerdings weisen bei der Betrachtung einzelner Knochen sowohl Humerus und Ulna als auch Os femoris strukturelle Charakteristika gegen Torsionsbelastung auf, während Tibiotarsus und Tarsometatarsus sowie Radius und Karpometakarpus eher Biege- und Axialkräften widerstehen. Zu diesen strukturellen Besonderheiten zählen dünne Kortizes, ein runder Querschnitt, schräg verlaufende Kollagenfasern und sogenanntes laminares Knochengewebe (DE MARGERIE et al., 2005). Die Diaphyse von Knochen mit dünneren Kortizes und runderem Querschnitt wie z. B. der Humerus enthalten mehr laminares Knochengewebe, durch dessen Aufbau und langsamere Wachstumsrate eine höhere Torsionsstabilität erreicht wird (DE MARGERIE et al., 2004). Die Kortizes des Tibiotarsus sind dicker und der Querschnitt des Knochens ist weniger kreisförmig. Solche Knochen enthalten kaum laminares Gewebe. Hier

ermöglicht die Ausrichtung der Kollagenfasern mehr Widerstand gegen Biegung und mittige Belastung (DE MARGERIE et al., 2005). Der Tibiotarsus weist dadurch im Vergleich zu allen anderen Knochen eines Vogels eine der höchsten Widerstandsfähigkeiten gegen Biegungskräfte auf (CUBO und CASINOS, 2000).

Bei Hühnern konnte festgestellt werden, dass viele Faktoren wie Alter, Rasse, Gewicht, Haltung, Belastung und Legeperiode einen Einfluss auf die mechanische Belastbarkeit von Knochen haben (RATH et al., 2000). Zahlreiche biotische und abiotische Faktoren wirken auf den Knochenstoffwechsel, das Knochenwachstum und den Knochenaufbau ein und beeinflussen damit ebenfalls die mechanische Belastbarkeit (RATH et al., 2000). Die Knochen weiblicher, adulter Hühner wiesen eine höhere mechanische Belastbarkeit auf als die männlicher, adulter Tiere. Bei jungen Hühnern hatte das Geschlecht dagegen keinen Einfluss auf die mechanischen Knocheneigenschaften (RATH et al., 1999). Die Kompakta wachsender Säugetiere kann mehr Energie aufnehmen und sich stärker elastisch deformieren. Knochen adulter Tiere weisen eine höhere Belastbarkeit und Steifigkeit auf (SCHWARZ, 1991). SCHREIWEIS et al. (2005) konnten bei Hühnern keinen Effekt des Alters auf die Bruchfestigkeit von Knochen feststellen, während YALCIN et al. (2001), LETERRIER und NYS (1992) sowie FLEMING et al. (1998) einen Anstieg der mechanischen Belastbarkeit bei Hühnern mit dem Alter nachweisen konnten. Die widersprüchlichen Aussagen könnten auf der geringen Probenzahl von SCHREIWEIS et al. (2005) beruhen (pro Gruppe n=5). Als Ursache für den Anstieg der mechanischen Belastbarkeit mit dem Alter gilt die Massenzunahme der Knochen während des Wachstums, mit der auch die Festigkeit der Knochen proportional steigt (RATH et al., 2000). Außerdem nehmen der Mineralisationsgrad und der Gehalt an Kollagenquerverbindungen mit dem Alter zu (CARTER und SPENGLER, 1982).

Neben dem Alter hatte auch das Körpergewicht von Hennen und Putern einen Einfluss auf die Bruchfestigkeit der Knochen (KNOWLES et al., 1993; CRESPO et al., 2000). Bei Mastgeflügel erhöhte sich mit der Gewichtszunahme das Risiko von Frakturen (CRESPO et al., 2000). KNOWLES et al. (1993) sowie CRESPO et al. (2000) konnten zeigen, dass zwischen der Rasse und der mechanischen Belastbarkeit von Knochen kein Zusammenhang besteht. Im Gegensatz zu einigen Säugern sind bei Vögeln bisher keine erblichen Knochendefekte bekannt (RATH et al., 2000). Allerdings haben Rassen mit langsamerem Wachstum belastbarere Knochen. Eine hohe Wachstumsrate führt zu einer geringeren Knochendichte sowie größerer Porosität und damit weniger belastbaren Knochen (LETERRIER und NYS, 1992).

Bewegung ist während des Wachstums notwendig, damit die Knochen eine angemessene Form und Struktur entwickeln (BIEWENER und BERTRAM, 1994). Für den Erhalt der kortikalen Knochenmasse bei adulten Tieren ist Bewegung ebenfalls notwendig (RATH et al., 2000). Bewegungsmöglichkeiten führen bei Hühnern zu einer erhöhten Bruchfestigkeit der langen Röhrenknochen, da die Stabilität der Knochen von ihrer Belastung abhängt. So wiesen Hühner in Volieren- bzw. Bodenhaltung eine höhere Knochenfestigkeit auf als Tiere in Käfighaltung (VINCENT et al., 1990; FLEMING et al., 1994). Die Unterschiede der Stabilität sind vermutlich auf die höhere Dicke des Kortex und weniger auf Veränderungen der Knochensubstanz zurückzuführen (VINCENT et al., 1990). Inaktivität trägt bei Hühnern zum Verlust von strukturellem Knochengewebe und zum Entstehen von Osteoporose bei (FLEMING et al., 1994). Im Verlauf der Legeperiode weisen Hühner einen starken Verlust an Spongiosa auf, der eine deutliche Abnahme der Bruchfestigkeit der Knochen zur Folge hat (FLEMING et al., 1998).

Beim Nutzgeflügel wird die mechanische Belastbarkeit maßgeblich durch die Fütterung beeinflusst (VITS, 2005). Für die Knochenfestigkeit spielt vor allem der Kalziumgehalt des Futters eine wichtige Rolle (VITS, 2005). Untersuchungen von FROST und ROLAND (1991) sowie HESTER et al. (2004) ergaben, dass mit dem Kalziumgehalt der Nahrung auch die Belastbarkeit der Knochen steigt. Bei Reduktion des Kalziumgehalts im Futter sank die Bruchfestigkeit der Knochen (MOYLE und WALKER, 1986; SCHREIWEIS et al., 2003). Ein kalziumarmes Nahrungsangebot aufgrund eines nährstoffarmen Bodens führte bei Kohlmeisen (*Parus major*) und anderen im Wald lebenden Passeriformes im Freiland zu einer hohen Rate an Eierschalendefekten sowie Jungtieren mit Rachitis und Knochendformationen (GRAVELAND, 1996). Andere Autoren konnten keinen Einfluss des Kalziumgehalts im Futter auf die Belastbarkeit der Knochen von Gänsen und Hühnern feststellen (MCALISTER und MOYLE, 1983; WILSON, 1991). Der Kalziumgehalt des Knochens hatte keinen Einfluss auf seine Biegsamkeit (CUBO und CASINOS, 2000).

Eine zusätzliche Versorgung mit Phosphor erhöhte die Knochenstabilität (HEMME, 2004), während die Biegsamkeit des Knochens mit sinkendem Phosphorgehalt der Nahrung nachließ (CUBO und CASINOS, 2000). Andere Studien konnten dagegen keinen Zusammenhang zwischen der Phosphorversorgung und der mechanischen Belastbarkeit von Knochen nachweisen (FROST und ROLAND, 1991; WILSON, 1991). FROST und ROLAND (1991) stellten fest, dass eine Reduktion des Phosphorgehalts im Futter bei Fütterung einer kalziumarmen Diät die Belastbarkeit der Knochen negativ beeinflusste. Sie schlossen daraus, dass eine bedarfsgerechte Phosphorversorgung auch ohne direkten Zusammenhang essentiell für die

mechanische Belastbarkeit von Knochen ist. Ein ausgewogenes Kalzium-Phosphor-Verhältnis im Futter führte zu einer höheren Belastbarkeit der Knochen als bei Tieren mit einer unausgewogenen Diät (HULAN et al., 1985; FROST und ROLAND, 1991).

Ein geringerer Magnesiumgehalt der Knochen resultiert in einer geringeren Belastbarkeit bei Biegung (CUBO und CASINOS, 2000). Eine Unterversorgung mit Kupfer geht bei Küken mit einem reduzierten Knochenwachstum (DRESSLER, 1971), mit einer höheren Brüchigkeit und einer reduzierten Torsionsstabilität einher. Vor dem Versagen zeigt der Knochen eine geringere Fähigkeit sich zu verbiegen (RUCKER et al., 1975; OPSAHL et al., 1982).

Verschiedene Vitamine, wie Vitamin B₆, C, D, E und K, sind bei Geflügel an der Synthese von Komponenten der Knochenmatrix beteiligt (RATH et al., 2000). Ein Mangel an Vitamin E und Selen reduzierte die biomechanische Kraft eines Knochens beim Kaninchen ebenso wie eine Überversorgung mit Selen (TURAN et al., 1997). Entsprechende Angaben zu Vögeln waren in der zugänglichen Literatur nicht zu finden. Vitamin C-Mangel führt bei allen Säugerspezies zu brüchigeren Knochen (ROACH et al., 1989). Eine Zugabe von Ascorbinsäure zum Futter hatte bei normal ernährten Hühnern keinen Einfluss auf die Belastbarkeit von Knochen (FLEMING et al., 1998). Eine Gabe von Vitamin K über das Futter bewirkte dagegen bei legenden Hühnern eine Zunahme des Spongiosavolumens (FLEMING et al., 1998).

Der Fettgehalt der Futtermittel hat unterschiedliche Effekte auf den Knochen und seine mechanische Belastbarkeit. Hoch gesättigte Fettsäuren reduzieren die Absorption von Kalzium im Magen-Darm-Trakt und haben damit einen nachteiligen Einfluss auf die Mineralisation des Skelettes (WOHL et al., 1998). Bei adulten Hähnen änderte sich in diesem Zusammenhang nur die Zusammensetzung der Spongiosa (WOHL et al., 1998). Verschiedene Fettarten in der Ration führten bei Wachteln teilweise zu einer erhöhten Kortexdicke, einer erhöhten Knochendichte sowie einem erhöhten Mineralgehalt und damit auch zu belastbareren Knochen. LIU et al. (2003) erklären diesen Einfluss einzelner Fette auf Knochen durch die Senkung der Prostaglandin E₂-Synthese, da das PGE₂ die Knochenresorption induziert.

Medullärer Knochen, der nur bei weiblichen Tieren während der Legeperiode auftritt, hat eine geringere Stabilität im Vergleich mit Spongiosa und Kortikalis (FLEMING et al., 1998; KNOTT und BAILEY, 1999). Während RATH et al. (1999) bei weiblichen Broilern keinen Einfluss des medullären Knochens auf die mechanische Belastbarkeit feststellen konnten, konnten FLEMING et al. (1998; 1999) nachweisen, dass große Mengen medullären Knochens beim Huhn, vor allem in sonst pneumatisierten Knochen wie dem Humerus, mit einer erhöhten Knochenstabilität einhergehen.

Bei Säugern beeinflussen Stress und Krankheitsprozesse wie z. B. Infektionen, Entzündungen, Endokrinopathien, Intoxikationen, Knochenzysten und Neoplasien die Bruchfestigkeit von Knochen (CARTER und SPENGLER, 1982; SCHWARZ, 1991). Infektionen wie Osteomyelitis oder Osteonekrosen führen bei Geflügel durch einen lokalen Verlust an Knochensubstanz zu einem Verlust mechanischer Belastbarkeit (REECE, 1992). Sowohl Tumornekrosefaktor (TNF) als auch Interleukin-6 (IL-6) steigern als Teile der Entzündungskaskade die Knochenresorption. Trotz fehlender, weiterer Untersuchungen beeinflussen sie damit vermutlich auch bei Vögeln den Metabolismus und die Stabilität der Knochen (RATH et al., 2000).

2.5.3 Werte zur mechanischen Belastbarkeit von Vogelknochen

Ein Vergleich der in der Literatur verfügbaren Werte zur mechanischen Belastbarkeit ist schwierig, da sich Methoden und Versuchsaufbau häufig deutlich unterscheiden. Meist wurde nur ein mechanischer Test durchgeführt. Ergebnisse verschiedener mechanischer Tests, wie z. B. Torsion oder Biegung, repräsentieren alle einen Aspekt der mechanischen Belastbarkeit von Knochen, sind allerdings nicht direkt miteinander vergleichbar. Tabelle 7 gibt die Ergebnisse einiger Studien zur mechanischen Belastbarkeit von Vogelknochen wieder. Aufgrund der verschiedenen Tests haben die Werte unterschiedliche Einheiten.

Tabelle 7: Literaturangaben zur mechanischen Belastbarkeit von Vogelknochen als Mittelwert mit Standardabweichung (MW \pm SD)

| Vogelart | Knochen | Methode | Messwert | MW \pm SD | Quelle |
|----------------------------------|-------------|---------|-------------|-----------------------|---------------------------|
| Henne | Radius | Druck | Bruchkraft | 187 \pm 17 N | (WILSON, 1991) |
| Henne | Radius | Druck | Bruchkraft | 392 \pm 54 N | (WILSON, 1991) |
| Henne | Humerus | Biegung | Bruchkraft | 215 \pm 7,5 N | (FLEMING et al., 1999) |
| Henne | Humerus | Biegung | Bruchkraft | 132 \pm 0,3 N | (FLEMING et al., 2000) |
| Henne | Tibiotarsus | Biegung | Bruchkraft | 264 \pm 6,1 N | (FLEMING et al., 2000) |
| Hahn | Tibiotarsus | Biegung | Steifigkeit | 147,5 \pm 15,2 N/mm | (LETERRIER und NYS, 1992) |
| Puter | Os femoris | Torsion | Drehmoment | 63,0 \pm 3,0 Nm | (CRESPO et al., 2000) |
| | | | Winkel | 13,0 \pm 0,4° | |
| | | | Steifigkeit | 5,4 \pm 0,3 Nm/° | |
| Puter, Futter- restriktion | Os femoris | Torsion | Drehmoment | 45,8 \pm 3,2 Nm | (CRESPO et al., 2000) |
| | | | Winkel | 11,7 \pm 0,3° | |
| | | | Steifigkeit | 4,3 \pm 0,37 Nm/° | |

2.6 Korrelation der Knochenparameter

Die Parameter der Knochenzusammensetzung, der Dichte, der mechanischen Belastbarkeit und des morphologischen Aufbaus sind miteinander in unterschiedlicher Weise verbunden. Die stärkste positive Korrelation besteht zwischen dem Mineralstoffgehalt eines Knochens und seiner Dichte (SCHREIWEIS et al., 2005). Außerdem korreliert der Rohaschegehalt positiv mit der Dichte (ZOTTI et al., 2003), dem Mineralstoffgehalt (ZOTTI et al., 2003), der Belastbarkeit an verschiedenen radial und longitudinal verteilten Punkten eines Knochens (BONSER und CASINOS, 2003) und der mechanischen Belastbarkeit (RATH et al., 1999). SCHREIWEIS et al. (2005) konnten eine positive Korrelation des Mineralstoffgehalts mit der mechanischen Belastbarkeit nachweisen. CUBO und CASINOS (2000) konnten dagegen keine Korrelation des Kalziumgehalts eines Knochens mit seiner Biegekraft feststellen. Wie auch die radiologisch messbare Dichte (FLEMING et al., 1994) korreliert die Knochendichte positiv mit der mechanischen Belastbarkeit (AERSSSENS et al., 1998; RATH et al., 1999; ZOTTI et al., 2003). Die Bruchfestigkeit zeigt außerdem eine positive Korrelation mit dem Gehalt an Kollagen-Querverbindungen (RATH et al., 1999).

3 Material und Methoden

3.1 Probenmaterial

Für die eigenen Untersuchungen wurden der rechte Humerus und der rechte Tibiotarsus von 53 Greifvögeln und neun Eulen verwendet, die in der Klinik und Poliklinik für kleine Haustiere wegen infauster Prognose euthanasiert werden mussten oder starben. Euthanasiert wurden Tiere unter anderem mit Frakturen, Luxationen, Wirbelsäulentraumata, neurologischen Ausfällen und irreversiblen Augenschäden. Bei den meisten Fällen handelte es sich um Folgen akuter Traumata.

Es wurden die Knochen von Mäusebussarden (*Buteo buteo*) und Seeadlern (*Haliaeetus albicilla*) entnommen, die als Vertreter einer großen und einer kleinen Greifvogelart dienen. Von den Eulenarten wurden die Knochen von Schleiereulen (*Tyto alba*) untersucht.

Da nicht genügend Knochen von adulten Seeadler- und Schleiereulenpatienten vorlagen, wurden auch Tiere untersucht, die tot aufgefunden wurden.

Es wurden das Alter und Geschlecht bestimmt. Die Altersbestimmung der Mäusebussarde und der Seeadler erfolgte anhand von Federmerkmalen, Iris- und Schnabelfarbe nach FORSMAN (1998). Mäusebussarde wurden als juvenil eingestuft, wenn ihr Großgefiederwachstum abgeschlossen war und sie ein Jugendgefieder aufwiesen. Mit Beginn der ersten Mauser im auf den Schlupf folgenden Jahr galten die Tiere als adult. Als Stichtag wurde dazu der 30.04. festgelegt. Die beiden juvenilen Seeadler der Studie wiesen ein Jugendkleid auf und wurden beide im August ihres Schlupfjahres vorgestellt. Als adult galten Seeadler nach Ausbildung des Alterskleides im vierten oder fünften Lebensjahr. Eine sichere Unterscheidung der Altersgruppen bei den Eulen ist nach Abschluss des Großgefiederwachstums nicht mehr möglich, weshalb alle Eulen, die nicht mehr sicher als Nestlinge oder Ästlinge zu erkennen waren, als adult eingestuft wurden (GLUTZ VON BLOTZHEIM et al., 1989).

Das Geschlecht wurde bei allen Tieren postmortal durch die visuelle Beurteilung der Gonaden bestimmt.

Die Vogelarten, das Alter und das Geschlecht sind in Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 8: Aufteilung der Vögel in Versuchsgruppen nach Vogelart, Alter und Geschlecht

| Vogelart | Alter | Geschlecht | Anzahl |
|--------------|---------|------------|--------|
| Mäusebussard | Juvenil | Männlich | 10 |
| | | Weiblich | 10 |
| | Adult | Männlich | 10 |
| | | Weiblich | 10 |
| Seeadler | Juvenil | Männlich | 1 |
| | | Weiblich | 1 |
| | Adult | Männlich | 6 |
| | | Weiblich | 5 |
| Schleiereule | Adult | Männlich | 4 |
| | | Weiblich | 5 |

Anhand des Gewichts und der Palpation des Brustmuskels wurde von jedem Tier der Ernährungszustand bestimmt. Es wurden drei verschiedene Ernährungszustände unterschieden. Vögel mit einer gut entwickelten, rundlichen Brustmuskulatur auf beiden Seiten des Brustbeinkamms hatten einen sehr guten bis guten Ernährungszustand. Bei einem etwas hervortretenden Brustbeinkamm und einer abgeflacht erscheinenden Brustmuskulatur wurde der Ernährungszustand als mäßig bezeichnet. War der Brustbeinkamm deutlich palpabel und die Muskulatur zu großen Teilen abgebaut, galt der Vogel als abgemagert.

Zu jedem Tier wurden Daten zu etwaigen Erkrankungen und der Aufenthaltsdauer in menschlicher Obhut erhoben.

3.2 Probenentnahme und Aufbereitung

Die Knochen wurden ohne Beschädigung der Knochensubstanz entnommen. Federn und Weichteilgewebe wurden weitestgehend manuell entfernt, so dass nur die Sehnenansatzstellen am Knochen verblieben. Die Lagerung der so vorbereiteten Knochen erfolgte bis zur weiteren Aufarbeitung luftdicht in Plastiktüten bei -20°C .

Vor der Analyse wurden die Knochen zum Schutz vor Austrocknung in feuchte Tücher eingewickelt und über zwölf Stunden bei Zimmertemperatur aufgetaut.

3.3 Mechanische Belastbarkeit

Die mechanische Belastbarkeit wurde im Biomechanik Prüflabor des Julius Wolff Instituts der Charité Berlin untersucht. Zur Bestimmung der mechanischen Belastbarkeit langer

Röhrenknochen wurde die Torsionsstabilität mit einer Zwick 1445 Material-Prüfmaschine (Zwick GmbH & Co. KG, Ulm, Deutschland) ermittelt (Abb. 2).

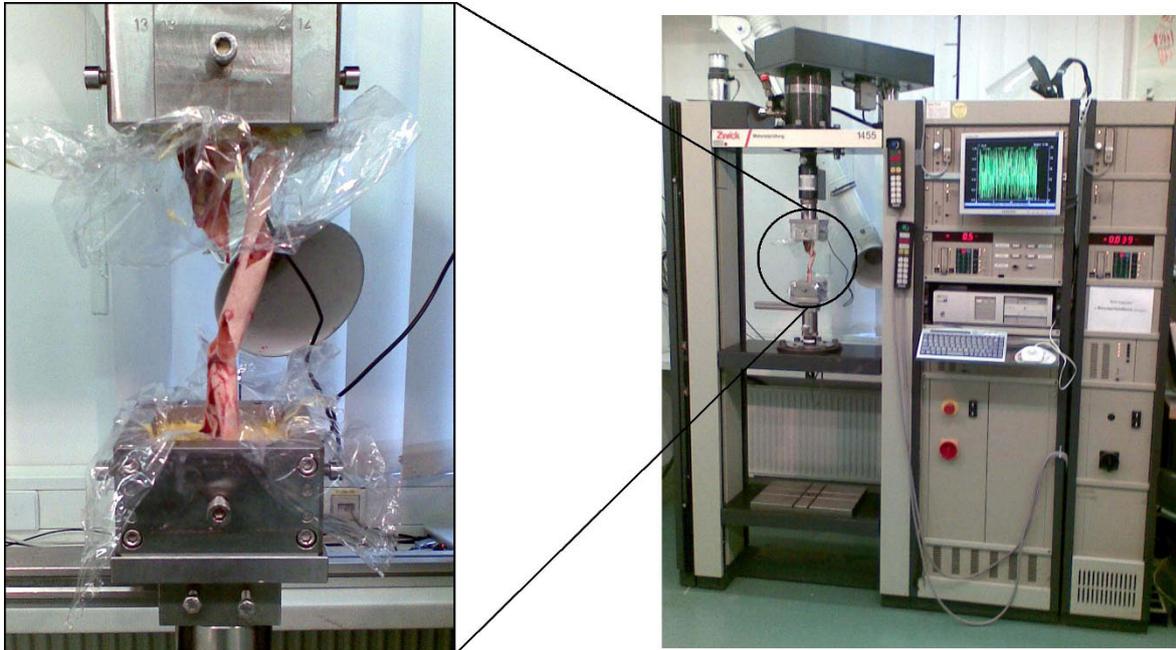


Abbildung 2: Materialprüfmaschine mit eingespanntem Humerus eines Seeadlers nach dem Torsionsversuch

Dazu wurde der intakte Knochen an den Epiphysen mit Technovit 3040 (Heraeus Kulzer GmbH, Wehrheim, Deutschland) in Halterungen eingebettet, mit Schrauben fixiert und achsengerecht in die Materialprüfmaschine eingespannt. Die Torsion wurde bei einer Geschwindigkeit von $10^\circ/\text{min}$ bis zum Versagen (Bruch) getestet. Gemessen wurden Torsions-Winkel ($^\circ$), aufgewendete Kraft (N) und maximales Drehmoment (Nm). Die Daten wurden von der Materialprüfmaschine ausgewertet und ein Moment-Winkel-Diagramm der Messungen in Microsoft Excel 2000 erstellt. Das maximale Drehmoment in Nm und die Steifigkeit in $\text{Nm}/^\circ$ der verschiedenen Knochen wurden zwischen den beiden Knochen eines Individuums und den Individuen untereinander verglichen. Die Steifigkeit wurde mit Microsoft Excel 2000 anhand einer Steigungs- oder Regressionsgeraden im linearen Bereich der Moment-Winkel-Kurve des jeweiligen Torsionsversuches bestimmt (Abb. 3).

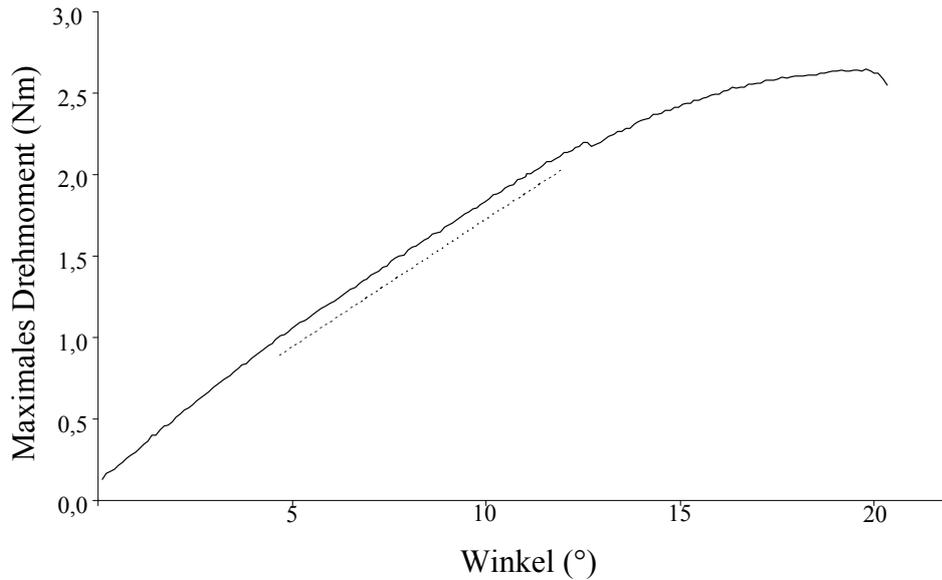


Abbildung 3: Moment-Winkel-Kurve des Torsionsversuches am Humerus eines männlichen, juvenilen Mäusebussards mit Steigungsgeraden (gestrichelte Linie)

3.4 Gewicht und Kortexdicke

Vor den weiteren Analysen wurden die in Technovit 3040 eingegossenen Epiphysen mit einer Knochensäge abgetrennt und das Gewicht der Diaphysen mit einer Präzisionswaage (Sartorius 2024 MP, Sartorius AG, Göttingen, Deutschland) (Wägebereich max. 100 g, Ablesebereich 0,01 mg) bestimmt. In der Mitte der Diaphyse wurde die Dicke des Kortex (in mm) an fünf nach dem Zufallsprinzip ausgewählten Stellen mit einem Präzisions-Messschieber (ohne Herstellerangaben) gemessen und der Mittelwert der fünf Messungen errechnet.

3.5 Dichtebestimmung

Die Dichtebestimmung erfolgte mit der klassischen Auftriebsmethode nach dem archimedischen Prinzip. Die Gewichtskraft eines in Wasser eingetauchten Objekts entspricht dabei der Gewichtskraft des verdrängten Wassers (Prinzip von Archimedes).

Dazu wurde die Masse eines beliebigen Knochenstücks aus der Diaphyse des Knochens mit der Präzisionswaage (Sartorius 2024 MP, Sartorius AG, Göttingen, Deutschland) an der Luft (m_{Luft}) bestimmt. Danach wurde die frei hängende Waagschale in ein mit Wasser gefülltes Plastikgefäß getaucht und das gleiche Knochenstück erneut unter Wasser (m_{Wasser}) gewogen. Anhand der Differenz ($m_{\text{Luft}} - m_{\text{Wasser}}$) wurde die Gewichtskraft des in das Wasser eingetauchten Knochenstücks bestimmt.

Da die Dichte des Wassers (ρ_{Wasser}) temperaturabhängig ist, wurde bei jeder Messung die Temperatur erfasst. Die entsprechende Wasserdichte (ρ_{Wasser}) wurde aus den Tabellen der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Braunschweig übernommen (BETTIN und SPIEWECK, 1990).

Die physikalische Dichte des Knochens wurde wie folgt berechnet:

$$\rho = \frac{m_{Luft}}{m_{Luft} - m_{Wasser}} \cdot \rho_{Wasser}$$

3.6 Analyse der Knochenzusammensetzung

Die Diaphysen der Knochen wurden nach den Versuchen zur mechanischen Belastbarkeit und den Dichtemessungen für die Analysen der Knochenzusammensetzung am Institut für Tierernährung der FU Berlin weiterverwendet.

Die Diaphysen wurden mit einer Knochenschere grob zerkleinert. Die Knochen von Mäusebussarden und Eulen wurden anschließend mit einer Schwingmühle (MM200, Retsch GmbH, Haan, Deutschland), die mit Metallkugeln bestückt wurde, zerkleinert und homogenisiert. Die Knochen der Seeadler wurden aufgrund ihrer größeren Härte mit einer elektrischen Mühle (ohne Herstellerangaben) zu Knochenmehl verarbeitet.

3.6.1 Trockensubstanz

Die Trockensubstanz ist der Bestandteil einer Substanz, die nach Abzug des Rohwassers übrig bleibt. Zur Bestimmung der Trockensubstanz wurde ein Teil der Knochenprobe in vorgetrocknete, ausgewogene Glastiegel eingewogen und für vier Stunden bei 103°C im Wärmeschrank (Heraeus ST5042, Heraeus Holding, Hanau, Deutschland) getrocknet. Das Gewicht der Probe wurde mehrfach bis zur Gewichtskonstanz kontrolliert. Bei Gewichtskonstanz wurden die Proben für 30 Minuten im Exsikkator (Duran Group, Mainz, Deutschland) ausgekühlt und erneut gewogen. Die Einwaage abzüglich des Endgewichts der Probe ergab den Feuchtigkeitsanteil der Probe in Gramm (g). Aus diesem Wert und der Einwaage wurde die Trockensubstanz (TS) in Prozent bestimmt (NAUMANN und BASSLER, 1976).

$$TS = \frac{\text{Einwaage}}{(\text{Einwaage} - \text{Endgewicht})} \cdot 100\%$$

Es wurde bei jeder Probe eine Doppelbestimmung durchgeführt und daraus der mittlere Trockensubstanzgehalt bestimmt.

3.6.2 Rohfett

Vor den weiteren Untersuchungen zur Knochenzusammensetzung wurde der Rohfettgehalt einzelner Knochen ermittelt, um zu prüfen, ob eine Entfettung der Knochen zur Bestimmung der Mineralstoffgehalte notwendig ist. Durch die Rohfettbestimmung ist der Bezug der Mineralstoffanteile auf die fettfreie Trockensubstanz möglich.

Aus den Gruppen der juvenilen und adulten Mäusebussarde, der adulten Seeadler und der Schleiereulen wurden stichprobenartig 19 Knochen von weiblichen und männlichen Tieren untersucht. Von einem Tier wurde immer nur ein Knochen verwendet.

Zur Bestimmung des Rohfettgehalts wurde ein Anteil des Knochenmehls nach der Trockensubstanzbestimmung in eine Filtertüte gewogen und die genaue Einwaage protokolliert. Nach dem Prinzip der diskontinuierlichen Extraktion bei Siedehitze (NAUMANN und BASSLER, 1976) wurde das Rohfett mit Petrolether im Soxhlet-Apparat (Extraction System B-811, Büchi Labortechnik AG, Flawil, Schweiz) extrahiert. Danach wurde der Auffangbehälter für eine Stunde in einen Wärmeschrank (Heraeus LUT6050F, Heraeus Holding, Hanau, Deutschland) bei 100°C sowie für 30 Minuten in einen Exsikkator (Duran Group, Mainz, Deutschland) verbracht und anschließend mit dem enthaltenen Fett ausgewogen. Aus dem Fettgehalt im Auffangbehälter und der Einwaage wurde der Rohfettgehalt (Rf) der getrockneten Probe bestimmt.

$$Rf = \frac{\text{Extraktion}}{\text{Einwaage}} \cdot 100\%$$

3.6.3 Rohasche

Um den Rohaschegehalt der Knochen zu ermitteln, wurde ein Anteil der getrockneten Knochenproben in ausgeglühte Tontöpfe mit bekanntem Gewicht eingewogen und für mehr als acht Stunden im Muffelofen (Heraeus thermiconP, Heraeus Holding, Hanau, Deutschland) auf 550°C erhitzt. Dadurch werden alle organischen Bestandteile verbrannt, so dass nur die Rohasche verbleibt. Zum Auskühlen wurden die Proben für eine halbe Stunde in den Exsikkator (Duran Group, Mainz, Deutschland) verbracht und erneut ausgewogen. Der Rohaschegehalt (Ra) bezogen auf die Trockensubstanz wurde wie folgt berechnet:

$$Ra = \frac{\text{Endgewicht}}{\text{Einwaage}} \cdot 100\%$$

3.6.4 Mineralstoffbestimmung

3.6.4.1 Probenvorbereitung

Zur Bestimmung des Mineralstoffgehalts in der Rohasche, die der anorganischen Knochensubstanz entspricht, wurden 100 - 200 mg einer Rohascheprobe im Porzellantiegel mit 6 ml rauchender Salzsäure versetzt und 18 ml Aqua bidest hinzu gegeben. Die genaue Einwaage aller Proben wurde protokolliert. Der Probenansatz wurde für 40 - 50 Minuten im Sandbad bei 220°C erhitzt. Nach Abkühlung wurde der Ansatz in 50 ml-Messkolben überführt und bis zur Markierung mit Aqua bidest aufgefüllt. Danach wurden die Proben vor der weiteren Verarbeitung durch einen Selecta Faltenfilter (Nr. 595 ½, Schleicher und Schüll, Maidstone, Großbritannien) in Plastikflaschen überführt.

3.6.4.2 Phosphor

Der Phosphorgehalt der Knochen wurde mit der Vanadatmolybdatmethode nach NAUMANN und BASSLER (1976) bestimmt. Eine Eichkurve lag für das verwendete Verfahren bereits vor. Vor jeder Messung wurde zusätzlich eine Standardreihe angesetzt.

Von den wie in Kapitel 3.6.4.1 beschriebenen vorbereiteten Proben wurden 250 µl mit 5 ml der Phosphorreagenz Nitrovanadatmolybdat und 15 ml Aqua bidest versetzt und gut durchmischt. Nach 10 Minuten Inkubation bei Zimmertemperatur wurden die Probenlösungen photometrisch im Spectrophotometer (Ultrospec 2000, Pharmacia Biotech, Wien, Österreich) bei einer Wellenlänge von 436 nm gegen den Reagenzleerwert gemessen und die Phosphorkonzentration mit Hilfe des Standards in g/kg Trockensubstanz errechnet.

3.6.4.3 Kalzium

Zur Verdünnung auf den für die Messung optimalen Gehalt von 2 bis 6 ppm wurden 50 µl jeder der wie in Kapitel 3.6.4.1 beschriebenen vorbereiteten Probe mit einer Kalzium-Blindlösung auf 10 ml aufgefüllt. Zur Eliminierung von Störionen wurde der Blindlösung Schinkelpuffer mit Lanthan (Cäsiumchlorid-Lanthanchlorid-Pufferlösung, Merck, Darmstadt, Deutschland) beigemischt. Die Kalziumbestimmung erfolgte nach dem Additionsverfahren. Bei diesem Verfahren werden die Probenlösungen vom Messgerät mit Lösungen bekannter Konzentrationen aufgefüllt. Aus dem Vergleich der Messwerte mit der Konzentration wird die unbekannte Probenkonzentration berechnet. Die Proben wurden mit dem Atomabsorptionsspektrophotometer AAS vario 6 (Analytik Jena, Jena, Deutschland), das für die Untersuchung jedes Elements mit der entsprechenden Hohlkathoden-Lampe als Primärlichtquelle bestückt werden muss, gegen den Blindwert über der Flamme gemessen

(NAUMANN und BASSLER, 1976). Die Daten dieser Messungen wurden auf eine zuvor erstellte Eichkurve einer Kalziumstandardlösung (10 mg/l) bezogen. Die Angabe der Kalziumkonzentration erfolgte in g/kg Trockensubstanz.

3.6.4.4 Magnesium, Kupfer und Zink

Die Konzentrationen von Magnesium, Kupfer und Zink wurden atomabsorptionsspektrophotometrisch gemessen (NAUMANN und BASSLER, 1976). Die Messungen erfolgten gegen den Blindwert mit dem AAS vario 6 (Analytik Jena, Jena, Deutschland) über der Flamme. Das Gerät wurde jeweils mit der entsprechenden elementspezifischen Hohlkathoden-Lampe (Analytik Jena, Jena, Deutschland) als Strahlungsquelle für das zu untersuchende Mineral bestückt. Für die Bestimmung von Magnesium mussten 100 µl jeder vorbereiteten Probe mit einer Eisen-Magnesium-Blindlösung auf 10 ml verdünnt werden. Die Ergebnisse der Messungen wurden auf die zuvor bekannten Eichkurven bezogen. Für die Erstellung der Eichkurven wurden eine Magnesiumstandardlösung (1 mg/l), eine Kupferstandardlösung (10 mg/l) und eine Zinkstandardlösung (10 mg/l) angemischt. Die Angabe der Konzentrationen von Magnesium, Kupfer und Zink erfolgte in mg/kg Trockensubstanz.

3.7 Histologische Untersuchungen

3.7.1 Vorbereitung der Proben

Die histologischen Untersuchungen wurden im Labor für Histologie und Immunhistologie des Julius Wolff Instituts der Charité Berlin durchgeführt. Es wurden exemplarisch zwei adulte, männliche Mäusebussarde mit gutem und sehr gutem Ernährungszustand untersucht. Es wurden männliche Tiere ausgewählt, um das Vorkommen von medullärem Knochen in den histologischen Schnitten auszuschließen. Der rechte Humerus und der rechte Tibiotarsus wurden mit einem kleinen Trennschleifer (keine Herstellerangabe) in zwei große Endstücke und ein kleines Mittelstück zerteilt, so dass von diesen Knochen Längs- und Querschnitte angefertigt werden konnten.

Die Entwässerung der Proben erfolgte nach dem Auftauen bei Raumtemperatur in einer aufsteigenden Alkoholreihe mit sieben Stufen (Tab. 9), die jeweils sieben Tage umfassten.

Tabelle 9: Alkoholkonzentration der Alkoholreihe zur Entwässerung der Mäusebussardknochen

| Stufe | Ethanolgehalt |
|---------|---------------|
| 1 | 70 % |
| 2, 3 | 80 % |
| 4 | 96 % |
| 5, 6, 7 | 100 % |

Nach jeweils sieben Tagen wurden die Ethanolverdünnungen verworfen und neu angesetzt. Die Verdünnungen des Ethanols wurden aus 100 %igem Ethanol mit destilliertem Wasser hergestellt (ROMEIS, 1989). Die Präparate wurden vollständig mit Ethanol bedeckt und in luftdichten Gläsern auf einem Horizontalschüttler (HS 501 digital, IKA Labortechnik, Staufen, Deutschland) gelagert. Die Bewegungen des Schüttlers stellen eine permanente Durchmischung des Ethanols sicher. Nach Abschluss der Entwässerung wurden die Proben für vier Stunden in Xylol eingelegt und danach sofort eingebettet.

3.7.2 Einbettung

Die Herstellung und der Gebrauch der Lösungen für die Einbettung erfolgten nach den Angaben des Herstellers (Heraeus Kulzer, Wehrheim, Deutschland). Die Proben wurden für drei Tage in die Präinfiltrationslösung (Technovit 9100 mit Härter 1) und anschließend für 14 Tage in die Infiltrationslösung (Technovit 9100 mit Härter 2 und Pulver) verbracht. Die Einbettung erfolgte in größenangepassten Gefäßen unter Luftabschluss. Das visköse Polymerisationsgemisch aus Methylmetacrylat [10:1 Mischung aus Stammlösung A (Technovit 9100 mit Härter 1 und Pulver) und Stammlösung B (Technovit 9100 mit Härter 2 und Regler)] wurde in ausreichender Dicke in die Gefäße gegossen und die Proben möglichst blasenfrei mit der anzuschneidenden Seite auf den Boden gelegt. Nach einer Aushärtungsphase von 48 Stunden bei 0°C wurden die Proben auf das Schneiden vorbereitet. Mit einem Schleif- und Poliersystem (Jean Wirtz Phoenix 3000, Buehler, Düsseldorf, Deutschland) wurde der überschüssige Kunststoff unter ständiger Wasserkühlung entfernt. Für einen optimalen Halt beim Schneiden wurden die Proben anschließend mit Technovit 3040 (Heraeus Kulzer, Wehrheim, Deutschland) aufgeblickt.

3.7.3 Schneiden

Die 6 µm dicken histologischen Schnitte wurden unter ständiger Benetzung mit Schneideflüssigkeit (Octoxinol 0,5 %, Triton X-100, Merck, Darmstadt, Deutschland) mit

einem Hartschnitt-Mikrotom (Leica SM 25005, Leica Microsystems AG, Wetzlar, Deutschland) angefertigt. Vor dem Aufziehen der Schnitte wurden die Objektträger mit 70 %igem Ethanol beschichtet. Die Schnitte wurden aufgelegt und nochmals mit 70 %igem Ethanol überzogen. Um Falten in den Präparaten zu verhindern wurden die Schnitte mit einer Strecklösung aus 70 %igem Ethanol und 2-Butoxyethyl-Acetat (1:4) behandelt. Eine Kisol-Folie sowie ein saugstarker Filter wurden aufgelegt, um die aufeinandergestapelten Schnitte zu trennen und die Präparate für 24 Stunden unter Schraubzwingendruck in einer Presse bei 60°C im Wärmeschrank (Function line B12, Heraeus Holding, Hanau, Deutschland) getrocknet.

3.7.4 Vorbereitung auf die Färbung

Zur Vorbereitung auf die Färbung musste das Polymerisationsgemisch aus den Schnitten entfernt werden. Die Schnitte wurden dreimal für jeweils eine halbe Stunde in ein Methylmetacrylat-Tauchbad (MEA, Merck, Darmstadt, Deutschland) eingelegt. Durch die Tauchbäder wurde der Kunststoff vollständig aus dem Knochengewebe gelöst, um dieses für die Farbstoffe zugänglich zu machen. Danach erfolgte die Rehydrierung der Schnitte in einer absteigenden Alkoholreihe. Dafür wurden die Schnitte für eine bis drei Minuten in Küvetten mit Alkoholkonzentrationen von 100 %, 96 %, 80 % und 70 % getaucht und abschließend für die gleiche Zeitdauer in Aqua bidest verbracht. Nach der Rehydrierung konnten die verschiedenen histologischen Färbungen vorgenommen werden.

3.7.5 Histologische Färbungen

Die histologischen Färbungen erfolgten nach den Protokollen von ROMEIS (1989). Alle verwendeten Färbelösungen stammten von der Firma Merck (Darmstadt, Deutschland).

Trichromfärbung nach Masson-Goldner

Diese Färbung dient dem Nachweis von kollagenem Bindegewebe. Die Zellkerne färben sich schwarz an, während das Zytoplasma ziegelrot gefärbt ist. Bindegewebe sowie saure Mucosubstanzen stellen sich grün dar. Das Osteoid erscheint rot (ROMEIS, 1989).

Die Färbung wurde nach folgendem Protokoll durchgeführt:

Kernfärbung mit Weigerts Eisenhämatoxylin für 2 - 4 Minuten

Auswaschen unter fließendem Leitungswasser für 10 Minuten

Färben in Säurefuchsin-Ponceau für 5 Minuten

Spülen in 1 %iger Essigsäure

Differenzieren in Phosphormolybdänsäure-Orange G für 15 - 30 Minuten

Spülen in 1 %iger Essigsäure

Gegenfärben mit Lichtgrün für 10 Minuten

Spülen in 1 %iger Essigsäure

Kombinierte von-Kossa / Safranin-O-Färbung

Diese Färbung ermöglicht die Unterscheidung von mineralisiertem und nicht-mineralisiertem Gewebe. Mineralisiertes Knorpel- und Knochengewebe wird schwarz angefärbt, die Mineralisationsfronten erscheinen schwarz granuliert. Nicht-mineralisierter Knochen, hyaliner Knorpel und Zellkerne werden in verschiedenen Rottönen dargestellt (ROMEIS, 1989).

Folgendes Färbeprotokoll wurde verwendet:

Färbung mit 3 %iger wässriger Silbernitratlösung (AgNO_3) für 10 Minuten

3x Spülen in Aqua bidest

Reduktion mit Natriumthiosulfat-Lösung ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) für 5 Minuten

Auswaschen mit Leitungswasser für 10 Minuten

5x in Aqua bidest eintauchen

Färbung mit Safranin-O für 8 Minuten

5x in Aqua bidest eintauchen

Movat's Pentachrom-Färbung

Mit dieser Knorpel-Färbung werden mineralisierter Knochen sowie Kollagen leuchtend gelb angefärbt. Mineralisierter Knorpel erscheint blau-grün, während anderes Knorpelgewebe rötlich bis gelb aussieht. Osteoid stellt sich dunkelrot, elastische Fasern und Zytoplasma dagegen rötlich dar. Zellkerne sind blauschwarz gefärbt, die sauren Glukosaminoglykane leuchtend blau (ROMEIS, 1989).

Die Färbung erfolgte nach folgendem Protokoll:

Färbung in Alcainblau für 10 Minuten

Auswaschen mit Leitungswasser für 5 Minuten

Einbringen in alkalischen Ethylalkohol für 1 Stunde

Auswaschen mit Leitungswasser für 10 Minuten

1x in Aqua bidest eintauchen

Färbung mit Weigerts Eisenhämatoxylin für 10 Minuten

Spülen mit Aqua bidest

Auswaschen mit Leitungswasser für 15 Minuten

Färbung mit Brillant Crocein-Säurefuchsin für 10 - 15 Minuten
Kurz Spülen in 0,5 %iger Essigsäure
Einbringen in 5 %ige Phosphorwolframsäure (PWS) für 20 Minuten
Bewegen in 0,5 %iger Essigsäure für 2 Minuten
Entwässern in 100 %igem Alkohol für 3x 5 Minuten
Färbung mit Saffron du Gâtinais für 1 Stunde

Nach den histologischen Färbungen wurden die Präparate erneut in einer Alkoholreihe entwässert und in Xylol verbracht. Zur dauerhaften Konservierung mussten die Schnitte mit Deckgläsern geschützt und mit dem Einschlussharz Vitroclud (Langenbrinck, Emmendingen, Deutschland) eingedeckt werden.

3.7.6 Auswertung der histologischen Schnitte

Die histologischen Präparate wurden mit einem Mikroskop (Axioskop 40, Carl Zeiss, Göttingen, Deutschland) mit den vorhandenen Objektiven (A-Plan 5x/0,12, 10x/0,25, 20x/0,45 und 100x/1,25 Oil) ausgewertet und die entsprechenden Bilder mittels einer angeschlossenen Kamera (AxioCam, Carl Zeiss, Göttingen, Deutschland) aufgezeichnet. Die Bearbeitung der Bilder erfolgte mit den Programmen Axio Vision Version 4.6.3.0 (Carl Zeiss, Göttingen, Deutschland) und Photoshop 5.0 (Adobe Systems, San Jose, USA).

3.8 Statistische Auswertung

Mit Ausnahme der histologischen Auswertung wurden alle Daten mit der Statistiksoftware SPSS 15.0 (SPSS, Chicago, USA) ausgewertet. Es wurden Minimum, Maximum und Median der Werte ermittelt. Unterschiede zwischen den Arten, den Geschlechtern und den Altersgruppen wurden mittels Mann-Whitney-U-Test auf ihre Signifikanz überprüft. Der Mann-Whitney-Test ist ein nicht-parametrischer Homogenitätstest, in dem zwei unabhängige Gruppen miteinander verglichen werden. Der p-Wert oder auch Überschreitungswahrscheinlichkeit ist die Kennzahl zur Auswertung statistischer Tests. Liegt der p-Wert unterhalb des festgelegten Signifikanzniveaus, kann davon ausgegangen werden, dass sich die beiden verglichenen Werte voneinander unterscheiden. Die statistische Signifikanz der Unterschiede zwischen den Humeri und den Tibiotarsi wurde mit dem Wilcoxon-Test geprüft. Der Wilcoxon-Test ist ein nicht-parametrischer Test, mit dem zwei miteinander verbundene Gruppen verglichen werden. Bei einem $p < 0,05$ wurde von einem signifikanten Unterschied ausgegangen.

Aufgrund der geringen Fallzahlen und der Durchführung mehrerer statistischer Tests ohne Anpassung des Signifikanzniveaus ist die Irrtumswahrscheinlichkeit (eine Nullhypothese wird fälschlicherweise abgelehnt) erhöht. Da die vorliegende Arbeit beschreibend ist, konnte dieser Faktor vernachlässigt werden.

Bei geringen Probenzahlen wurden die Ergebnisse als Liniendiagramme aus Einzelpunkten mit Angabe des Median dargestellt (Drop-Line Diagramme). Ein Liniendiagramm zeigt den Zusammenhang von zwei Merkmalen. Jeder Messwert wird als Einzelpunkt dargestellt, der Median als eine Linie innerhalb der Einzelpunkte. Korrelationen wurden als Scatterplot (Streudiagramm) ausgewertet. Ein Streudiagramm stellt Wertepaare von zwei Merkmalen in Form einer Punktwolke dar. Bei den Gruppen der Mäusebussarde war darüber hinaus auch eine Darstellung als Boxplot (Kastengraphik) möglich. Innerhalb der Box wird der Bereich zwischen 25 % und 75 % dargestellt (Werte zwischen erstem und drittem Quartil), also 50 % der Werte. Der Median ist als horizontale Linie innerhalb der Box angegeben. Die Whisker, also die von der Box abgehenden Linien, geben die Minimal- und Maximalwerte an, wenn keine Ausreißer oder Extremwerte vorliegen. Ausreißer werden als Kreis dargestellt (\circ), Extremwerte als Stern (*). Wenn es Ausreißer oder Extremwerte gibt, repräsentieren die Whisker Werte bis zu maximal 1,5 Interquartilsabständen. Als Ausreißer werden Werte bezeichnet, die nicht in die Messreihe passen. Diese sind so definiert, dass sie größer als 1,5 Interquartilsabstände sind. Extremwerte sind dagegen größer als drei Interquartilsabstände und liegen damit außerhalb der normalen Streuung.

3.8.1 Korrelationen der Knochenparameter

Etwaige Beziehungen einzelner Parameter und der Einfluss des Ernährungszustandes auf die Parameter wurden über den Korrelationskoeffizienten nach Spearman (r_s) geprüft. Die Korrelation ist das Maß einer Abhängigkeit zwischen zwei Merkmalen. Der Korrelationskoeffizient nach Spearman wird bei mindestens ordinal skalierten Merkmalen angewendet, deren Zusammenhang monoton (monoton wachsend oder monoton fallend), aber nicht linear sein muss. Der Korrelationskoeffizient liegt in einem Wertebereich von -1 bis +1. Ein positives Vorzeichen bedeutet, dass hohe Werte des einen Merkmals jeweils einem hohen Wert des anderen Merkmals entsprechen. Ein Korrelationskoeffizient nahe 0 zeigt, dass kein Zusammenhang besteht. Werte nahe 1 repräsentieren einen starken Zusammenhang der beiden Merkmale. Ab einem Korrelationskoeffizienten über 0,25 gibt SPSS 15.0 den Zusammenhang der beiden Merkmale als signifikant ($p < 0,05$) an. Oberhalb eines Korrelationskoeffizienten von 0,395 ist p kleiner als 0,001.

Die Prüfung der Korrelationen zwischen den verschiedenen Knochenparametern wurde an bereits in der Literatur geprüfte Zusammenhänge angelehnt. Der Rohaschegehalt wies eine Korrelation zu den Mineralstoffkonzentrationen auf (BILTZ und PELLEGRINO, 1969; ZOTTI et al., 2003). Die Dichte korrelierte mit dem Trockensubstanzgehalt, dem Rohaschegehalt und den Mineralstoffkonzentrationen (ZHANG und COON, 1997; ZOTTI et al., 2003; SCHREIWEIS et al., 2005). Die mechanische Belastbarkeit wurde neben physikalischen Faktoren wie z. B. der Masse des Knochens auch vom Rohaschegehalt und den Mineralstoffkonzentrationen beeinflusst (RATH et al., 1999; RATH et al., 2000; BONSER und CASINOS, 2003; SCHREIWEIS et al., 2005). Außerdem ist in mehreren Quellen ein Bezug der Knochendichte zur mechanischen Belastbarkeit angegeben (ZHANG und COON, 1997; AERSSSENS et al., 1998; RATH et al., 1999; ZOTTI et al., 2003).

Die Ernährung und das Gewicht der Vögel beeinflussten den Rohaschegehalt (WOHL et al., 1998; LIU et al., 2003), die Mineralstoffzusammensetzung (DRESSLER, 1971; LIU et al., 2003) und die mechanische Belastbarkeit der Knochen (KNOWLES et al., 1993; CRESPO et al., 2000; CUBO und CASINOS, 2000; LIU et al., 2003; VITS, 2005).

4 Ergebnisse

4.1 Daten der Vögel

Insgesamt wurden 62 Vögel untersucht. Dabei handelte es sich um 40 Mäusebussarde, 13 Seeadler und neun Schleiereulen, die im Zeitraum von Februar 2006 bis Februar 2008 in der Klinik und Poliklinik für kleine Haustiere der FU Berlin als Patienten vorgestellt oder tot eingeliefert wurden. Das Alter und Geschlecht der Tiere sind in Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 10: Alter und Geschlecht der Greifvogel- und Eulenarten

| Vogelart | Männlich | | Weiblich | | Gesamt |
|--------------|----------|-------|----------|-------|--------|
| | Juvenil | Adult | Juvenil | Adult | |
| Mäusebussard | 10 | 10 | 10 | 10 | 40 |
| Seeadler | 1 | 6 | 1 | 5 | 13 |
| Schleiereule | 0 | 4 | 0 | 5 | 9 |

Das Körpergewicht und der Ernährungszustand der Greifvögel und Eulen sind in den Tabellen 11 und 12 angegeben.

Tabelle 11: Körpergewicht (g) der Vögel

| Vogelart | Geschlecht | Anzahl | Median | Minimum | Maximum |
|--------------|------------|--------|--------|---------|---------|
| Mäusebussard | Männlich | 20 | 603 | 470 | 925 |
| | Weiblich | 20 | 808 | 435 | 990 |
| Seeadler | Männlich | 7 | 3498 | 2686 | 4537 |
| | Weiblich | 6 | 4964 | 3110 | 6075 |
| Schleiereule | Männlich | 4 | 293 | 270 | 320 |
| | Weiblich | 5 | 360 | 268 | 404 |

Tabelle 12: Ernährungszustand der Vögel

| Vogelart | Anzahl | Sehr gut - gut | Mäßig | Schlecht |
|--------------|--------|----------------|-------|----------|
| Mäusebussard | 40 | 11 | 8 | 21 |
| Seeadler | 13 | 3 | 3 | 7 |
| Schleiereule | 9 | 7 | 0 | 2 |
| Gesamt | 62 | 21 | 11 | 30 |

Der Aufenthalt in menschlicher Obhut war bei den meisten Tieren kurz und betrug bei 48 Vögeln (77,4 %) unter vier Tagen, bei sieben Vögeln (11,3 %) zwischen vier und 14

Tagen, bei zwei Vögeln (3,2 %) zwischen 15 und 25 Tagen und bei vier Tieren (6,5 %) zwischen 26 und 52 Tagen. Nur ein Tier (1,6 %) wurde länger als zwei Monate (148 Tage) in der Klinik und in einer Auswilderungsstation gehalten.

4.2 Makroskopische Beurteilung der intakten Knochen

Die Form der Knochen der Mäusebussarde, Seeadler und Schleiereulen unterschied sich makroskopisch nicht. Die Humeri waren bei den Tieren pneumatisiert, der Markraum der Tibiotarsi dagegen mit Knochenmark ausgefüllt. Das Knochenmark der Mäusebussarde und Seeadler war relativ fest, feucht und dunkelrot gefärbt. Die Schleiereulen wiesen ein brüchiges, fettiges und gelbliches Knochenmark auf. Die Fibula eines weiblichen, adulten Seeadlers war im Bereich des Caput fibulae kallusartig verdickt und in diesem Bereich mit dem Tibiotarsus verwachsen.

4.3 Gewicht der Diaphyse und Kortexdicke

Das Gewicht der Diaphysen wurde bei den Knochen nach Abtrennen der Epiphysen bestimmt (Tab. 13 und 14). Der Median der einzelnen Arten ohne Berücksichtigung von Alter und Geschlecht befindet sich in den Tabellen 49 und 50 im Anhang.

Tabelle 13: Gewicht (g) der Humerusdiaphysen

| Vogelart | Alter | Geschlecht | Anzahl | Median | Minimum | Maximum |
|--------------|---------|------------|--------|--------|---------|---------|
| Mäusebussard | Juvenil | Männlich | 10 | 2,46 | 1,41 | 3,03 |
| | | Weiblich | 10 | 2,26 | 1,79 | 3,16 |
| | Adult | Männlich | 10 | 2,80 | 2,53 | 3,17 |
| | | Weiblich | 10 | 3,60 | 2,33 | 3,88 |
| Seeadler | Juvenil | Männlich | 1 | 15,51 | | |
| | | Weiblich | 1 | 10,55 | | |
| | Adult | Männlich | 6 | 17,85 | 14,25 | 19,24 |
| | | Weiblich | 5 | 22,99 | 19,59 | 32,68 |
| Schleiereule | Adult | Männlich | 4 | 0,75 | 0,67 | 0,89 |
| | | Weiblich | 5 | 0,95 | 0,85 | 1,01 |

Das Gewicht der Humerusdiaphysen war bei Schleiereulen signifikant niedriger als bei Mäusebussarden (Mann-Whitney-Test, $p < 0,001$) sowie bei den Mäusebussarden und bei den Schleiereulen signifikant niedriger als bei den Seeadlern (jeweils $p < 0,001$). Die Humerusdiaphysen der juvenilen Mäusebussarde waren signifikant leichter als die der adulten

Mäusebussarde ($p < 0,001$). Die männlichen Seeadler wiesen jeweils signifikant leichtere Humerusdiaphysen auf als die weiblichen Tiere ($p = 0,004$). Kein statistisch signifikanter Geschlechtsunterschied war bei Mäusebussarden und Schleiereulen erkennbar (Mäusebussarde $p = 0,213$; Schleiereulen $p = 0,053$).

Tabelle 14: Gewicht (g) der Tibiotarsusdiaphysen

| Vogelart | Alter | Geschlecht | Anzahl | Median | Minimum | Maximum |
|--------------|---------|------------|--------|--------|---------|---------|
| Mäusebussard | Juvenil | Männlich | 10 | 1,61 | 1,08 | 2,09 |
| | | Weiblich | 10 | 1,46 | 1,10 | 2,14 |
| | Adult | Männlich | 10 | 1,77 | 1,59 | 2,19 |
| | | Weiblich | 10 | 2,29 | 1,53 | 2,69 |
| Seeadler | Juvenil | Männlich | 1 | 8,39 | | |
| | | Weiblich | 1 | 8,60 | | |
| | Adult | Männlich | 6 | 8,51 | 6,90 | 9,64 |
| | | Weiblich | 5 | 13,84 | 11,44 | 30,91 |
| Schleiereule | Adult | Männlich | 4 | 0,88 | 0,69 | 0,89 |
| | | Weiblich | 5 | 0,92 | 0,76 | 1,24 |

Die Diaphysen der Tibiotarsi waren bei Schleiereulen signifikant leichter ($p < 0,001$) als bei Mäusebussarden. Schleiereulen und Mäusebussarde wiesen signifikant leichtere Tibiotarsusdiaphysen auf als Seeadler (jeweils $p < 0,001$). Die Diaphysen der Tibiotarsi waren bei juvenilen Mäusebussarden signifikant leichter als bei adulten Mäusebussarden ($p = 0,001$). Ein geschlechtsspezifischer Unterschied war bei Seeadlern nachweisbar. Die männlichen Tiere hatten leichtere Diaphysen der Tibiotarsi ($p = 0,004$). Adulte Schleiereulen und Mäusebussarde wiesen keinen signifikanten Unterschied der Geschlechter auf (Mäusebussarde $p = 0,379$; Schleiereulen $p = 0,413$).

Die Gewichte der Diaphysen von Humeri und Tibiotarsi wiesen bei den drei Arten eine positive Korrelation auf (Korrelationskoeffizienten nach Spearman, Mäusebussarde $r_s = 0,787$, $p < 0,001$; Seeadler $r_s = 0,890$, $p < 0,001$; Schleiereulen $r_s = 0,845$, $p < 0,001$). Das Gewicht der Diaphysen der Humeri und der Tibiotarsi unterschied sich bei Mäusebussarden und Seeadlern signifikant (Wilcoxon-Test, jeweils $p < 0,001$). Aus den Tabellen 13 und 14 ist ersichtlich, dass die Humerusdiaphysen schwerer waren als die der Tibiotarsi. Schleiereulen wiesen keinen signifikanten Unterschied im Diaphysengewicht der beiden Knochen auf ($p = 0,484$).

Die Dicke der Kortizes wurde aus dem Mittelwert von fünf Messungen unterschiedlicher Stellen der Diaphysen ermittelt. Die Ergebnisse sind in den Tabellen 15 und 16 angegeben, der Median der einzelnen Arten ohne Berücksichtigung von Alter und Geschlecht befindet sich in den Tabellen 49 und 50 im Anhang.

Tabelle 15: Kortexdicke (mm) der Humeri

| Vogelart | Alter | Geschlecht | Anzahl | Median | Minimum | Maximum |
|--------------|---------|------------|--------|--------|---------|---------|
| Mäusebussard | Juvenil | Männlich | 10 | 0,68 | 0,49 | 0,93 |
| | | Weiblich | 10 | 0,69 | 0,57 | 0,98 |
| | Adult | Männlich | 10 | 0,69 | 0,57 | 0,76 |
| | | Weiblich | 10 | 0,74 | 0,64 | 0,79 |
| Seeadler | Juvenil | Männlich | 1 | 1,22 | | |
| | | Weiblich | 1 | 0,69 | | |
| | Adult | Männlich | 6 | 1,59 | 1,27 | 1,80 |
| | | Weiblich | 5 | 1,54 | 1,30 | 1,64 |
| Schleiereule | Adult | Männlich | 4 | 0,49 | 0,47 | 0,52 |
| | | Weiblich | 5 | 0,50 | 0,47 | 0,53 |

Die Kortizes der Humeri von Schleiereulen waren signifikant dünner als die von Mäusebussarden und Seeadlern (jeweils $p < 0,001$). Die Humeruskortizes von Mäusebussarden waren signifikant dünner als die von Seeadlern ($p < 0,001$). Es war kein signifikanter Unterschied zwischen den Kortexdicken der Humeri juveniler und adulter Mäusebussarde feststellbar ($p = 0,401$). Bei keiner der drei Arten war ein signifikanter Unterschied zwischen den Geschlechtern erkennbar (Mäusebussarde $p = 0,279$; Seeadler $p = 0,537$; Schleiereulen $p = 0,556$).

Tabelle 16: Kortexdicke (mm) der Tibiotarsi

| Vogelart | Alter | Geschlecht | Anzahl | Median | Minimum | Maximum |
|--------------|---------|------------|--------|--------|---------|---------|
| Mäusebussard | Juvenil | Männlich | 10 | 0,60 | 0,52 | 0,72 |
| | | Weiblich | 10 | 0,63 | 0,49 | 0,71 |
| | Adult | Männlich | 10 | 0,65 | 0,60 | 0,71 |
| | | Weiblich | 10 | 0,69 | 0,59 | 0,78 |
| Seeadler | Juvenil | Männlich | 1 | 1,07 | | |
| | | Weiblich | 1 | 1,01 | | |
| | Adult | Männlich | 6 | 1,34 | 1,01 | 1,53 |
| | | Weiblich | 5 | 1,39 | 1,26 | 1,67 |
| Schleiereule | Adult | Männlich | 4 | 0,54 | 0,48 | 0,57 |
| | | Weiblich | 5 | 0,48 | 0,47 | 0,62 |

Die Kortizes der Tibiotarsi waren bei Schleiereulen signifikant dünner als bei Mäusebussarden und Seeadlern (jeweils $p < 0,001$). Mäusebussarde hatten signifikant dünnere Kortizes der Tibiotarsi als Seeadler ($p < 0,001$). Zwischen den Altersgruppen der Mäusebussarde konnte ein signifikanter Unterschied festgestellt werden (juvenil < adult; $p = 0,015$). Keine der Arten wies einen Geschlechtsunterschied auf (Mäusebussarde $p = 0,232$; Seeadler $p = 0,429$; Schleiereulen $p = 0,556$).

Die Kortexdicken von Humeri und Tibiotarsi korrelierten nur bei den Mäusebussarden positiv miteinander ($r_s = 0,374$, $p = 0,018$). Bei Seeadlern ($r_s = 0,363$, $p = 0,223$) und Schleiereulen ($r_s = -0,190$, $p = 0,624$) war keine Korrelation feststellbar. Die Kortexdicken der Humeri unterschieden sich bei Mäusebussarden signifikant von denen der Tibiotarsi ($p < 0,001$). Die Kortexdicken der Humeri waren dabei größer als die der Tibiotarsi (Tab. 15 und 16). Die Kortexdicken der Humeri und Tibiotarsi von Seeadlern und Schleiereulen wiesen keinen signifikanten Unterschied auf (Seeadler $p = 0,180$; Schleiereulen $p = 0,268$).

4.4 Knochendichte

Die Dichte der Knochen wurde mit einem Standardverfahren über Auswiegen an Luft und unter Wasser ermittelt. Die Ergebnisse sind in den Tabellen 17 und 18 dargestellt, der Median der einzelnen Arten ohne Berücksichtigung von Alter und Geschlecht befindet sich in den Tabellen 49 und 50 im Anhang.

Tabelle 17: Dichte (g/cm³) der Humeri

| Vogelart | Alter | Geschlecht | Anzahl | Median | Minimum | Maximum |
|--------------|---------|------------|--------|--------|---------|---------|
| Mäusebussard | Juvenil | Männlich | 10 | 1,90 | 1,49 | 2,02 |
| | | Weiblich | 10 | 1,78 | 1,55 | 1,99 |
| | Adult | Männlich | 10 | 1,96 | 1,64 | 2,11 |
| | | Weiblich | 10 | 2,00 | 1,55 | 2,07 |
| Seeadler | Juvenil | Männlich | 1 | 1,91 | | |
| | | Weiblich | 1 | 1,79 | | |
| | Adult | Männlich | 6 | 1,99 | 1,93 | 2,00 |
| | | Weiblich | 5 | 1,98 | 1,97 | 2,02 |
| Schleiereule | Adult | Männlich | 4 | 2,01 | 1,90 | 2,08 |
| | | Weiblich | 5 | 2,00 | 1,91 | 2,15 |

Die Humerusdichte von Mäusebussarden war signifikant niedriger als die von Seeadlern und Schleiereulen (Mäusebussarde im Vergleich mit Seeadlern $p=0,031$; Mäusebussarde im Vergleich mit Schleiereulen $p=0,004$). Zwischen den Dichten der Humeri von Seeadlern und Schleiereulen bestand kein signifikanter Unterschied ($p=0,091$). Bei Mäusebussarden wiesen die juvenilen Tiere signifikant niedrigere Humerusdichten auf als adulte Tiere ($p=0,025$). Bei keiner der drei Arten war ein signifikanter Geschlechtsunterschied der Humerusdichte feststellbar (Mäusebussarde $p=0,745$; Seeadler $p=0,429$; Schleiereulen $p=0,730$).

Tabelle 18: Dichte (g/cm³) der Tibiotarsi

| Vogelart | Alter | Geschlecht | Anzahl | Median | Minimum | Maximum |
|--------------|---------|------------|--------|--------|---------|---------|
| Mäusebussard | Juvenil | Männlich | 10 | 1,80 | 1,22 | 1,99 |
| | | Weiblich | 10 | 1,69 | 1,57 | 1,99 |
| | Adult | Männlich | 10 | 1,91 | 1,49 | 2,12 |
| | | Weiblich | 10 | 1,89 | 1,37 | 2,03 |
| Seeadler | Juvenil | Männlich | 1 | 1,87 | | |
| | | Weiblich | 1 | 1,92 | | |
| | Adult | Männlich | 6 | 2,00 | 1,81 | 2,02 |
| | | Weiblich | 5 | 2,00 | 1,76 | 2,04 |
| Schleiereule | Adult | Männlich | 4 | 1,89 | 1,64 | 1,96 |
| | | Weiblich | 5 | 1,98 | 1,80 | 2,05 |

Die Dichte der Tibiotarsi von Mäusebussarden war geringer als die von Seeadlern ($p=0,002$). Zwischen den Dichten der Tibiotarsi bei Mäusebussarden und Schleiereulen sowie Seeadlern

und Schleiereulen gab es keinen signifikanten Unterschied (Mäusebussarde im Vergleich mit Schleiereulen $p=0,075$; Seeadler im Vergleich mit Schleiereulen $p=0,357$). Bei den Mäusebussarden wiesen die juvenilen Tiere signifikant niedrigere Tibiotarsusdichten auf als die adulten Tiere ($p=0,037$). Bei keiner der Vogelarten war ein signifikanter Unterschied zwischen den Geschlechtern nachweisbar (Mäusebussarde $p=0,291$; Seeadler $p=0,792$; Schleiereulen $p=0,413$).

Die Dichte der Humeri und die der Tibiotarsi korrelierten bei keiner der drei Arten miteinander (Mäusebussarde $r_s=0,883$, $p=0,883$; Seeadler $r_s=0,394$, $p=0,183$; Schleiereulen $r_s=-0,008$, $p=0,983$). Bei Mäusebussarden und Seeadlern gab es keinen signifikanten Unterschied der Dichten von Humeri und Tibiotarsi (Mäusebussarde $p=0,093$; Seeadler $p=0,779$). Die Dichten der Humeri und Tibiotarsi waren bei Schleiereulen dagegen signifikant verschieden ($p=0,015$). Wie aus den Tabellen 17 und 18 ersichtlich ist, war die Dichte der Humeri größer als die der Tibiotarsi.

4.5 Knochenzusammensetzung

4.5.1 Trockensubstanz

Die Trockensubstanz entspricht dem Anteil organischer und anorganischer Bestandteile des Knochens nach Austrocknung. Die Ergebnisse der Trockensubstanzbestimmung sind in den Tabellen 19 und 20 angegeben, der Median der einzelnen Arten ohne Berücksichtigung von Alter und Geschlecht befindet sich in den Tabellen 49 und 50 im Anhang.

Tabelle 19: Trockensubstanzgehalt (%) der Humeri

| Vogelart | Alter | Geschlecht | Anzahl | Median | Minimum | Maximum |
|--------------|---------|------------|--------|--------|---------|---------|
| Mäusebussard | Juvenil | Männlich | 10 | 85,8 | 80,5 | 90,1 |
| | | Weiblich | 10 | 84,7 | 80,7 | 88,5 |
| | Adult | Männlich | 10 | 88,2 | 85,1 | 91,2 |
| | | Weiblich | 10 | 88,6 | 82,8 | 91,2 |
| Seeadler | Juvenil | Männlich | 1 | 86,1 | | |
| | | Weiblich | 1 | 85,9 | | |
| | Adult | Männlich | 6 | 89,8 | 89,1 | 90,0 |
| | | Weiblich | 5 | 89,5 | 88,7 | 90,1 |
| Schleiereule | Adult | Männlich | 4 | 88,4 | 87,5 | 90,8 |
| | | Weiblich | 5 | 88,3 | 88,0 | 90,3 |

Humeri von Mäusebussarden wiesen einen signifikant niedrigeren Trockensubstanzgehalt als die von Seeadlern und Schleiereulen auf (Mäusebussarde im Vergleich mit Seeadlern $p=0,001$; Mäusebussarde im Vergleich mit Schleiereulen $p=0,004$). Zwischen den Trockensubstanzgehalten der Humeri von Seeadlern und Schleiereulen war kein signifikanter Unterschied erkennbar ($p=0,791$). Juvenile Mäusebussarde wiesen einen signifikant geringeren Trockensubstanzgehalt der Humeri auf als adulte Mäusebussarde ($p=0,001$). Bei keiner der drei Arten konnte ein signifikanter, geschlechtsspezifischer Unterschied des Trockensubstanzgehalts der Humeri nachgewiesen werden (Mäusebussarde $p=0,829$; Seeadler $p=1,0$; Schleiereulen $p=0,730$).

Tabelle 20: Trockensubstanzgehalt (%) der Tibiotarsi

| Vogelart | Alter | Geschlecht | Anzahl | Median | Minimum | Maximum |
|--------------|---------|------------|--------|--------|---------|---------|
| Mäusebussard | Juvenil | Männlich | 10 | 86,2 | 76,7 | 89,0 |
| | | Weiblich | 10 | 84,1 | 79,2 | 88,8 |
| | Adult | Männlich | 10 | 87,7 | 85,3 | 89,6 |
| | | Weiblich | 10 | 87,9 | 84,8 | 89,3 |
| Seeadler | Juvenil | Männlich | 1 | 84,6 | | |
| | | Weiblich | 1 | 84,8 | | |
| | Adult | Männlich | 6 | 88,8 | 84,6 | 89,9 |
| | | Weiblich | 5 | 89,0 | 82,3 | 89,4 |
| Schleiereule | Adult | Männlich | 4 | 88,7 | 87,5 | 90,6 |
| | | Weiblich | 5 | 88,3 | 87,7 | 89,6 |

Der Trockensubstanzgehalt der Tibiotarsi von Mäusebussarden war signifikant geringer als der von Schleiereulen ($p=0,005$). Die Tibiotarsi von Mäusebussarden und Seeadlern ($p=0,148$) sowie von Seeadlern und Schleiereulen ($p=0,324$) wiesen keinen signifikanten Unterschied im Trockensubstanzgehalt auf. Juvenile Mäusebussarde hatten einen signifikant niedrigeren Trockensubstanzgehalt in den Tibiotarsi als adulte Tiere ($p=0,004$). Bei keiner Art waren signifikante, geschlechtsspezifische Unterschiede des Trockensubstanzgehalts der Tibiotarsi erkennbar (Mäusebussarde $p=0,262$; Seeadler $p=0,429$; Schleiereulen $p=0,905$).

Der Trockensubstanzgehalt von Humeri korrelierte bei allen drei Arten positiv mit dem Trockensubstanzgehalt der Tibiotarsi (Mäusebussarde $r_s=0,448$, $p=0,004$; Seeadler $r_s=0,759$, $p=0,003$; Schleiereulen $r_s=0,983$, $p<0,001$) (Abb. 4). Nur bei Seeadlern unterschied sich der Trockensubstanzgehalt der Humeri signifikant von dem der Tibiotarsi ($p=0,001$). Der Trockensubstanzgehalt von Humeri war höher als der von Tibiotarsi (Tab. 19 und 20). Bei

Mäusebussarden ($p=0,202$) und Schleiereulen ($p=0,17$) war dagegen kein signifikanter Unterschied des Trockensubstanzgehalts der beiden Knochen nachweisbar.

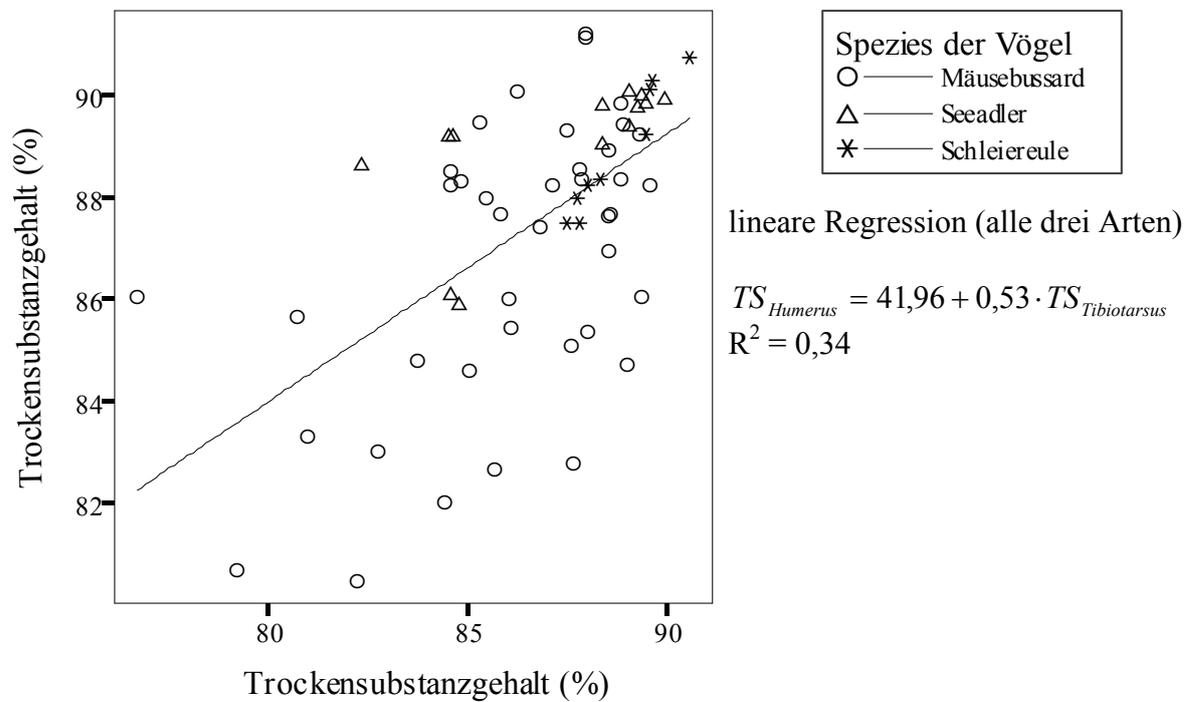


Abbildung 4: Scatterplot der Trockensubstanzgehalte der Humeri (TS_{Humerus}) und der Tibiotarsi ($TS_{\text{Tibiotarsus}}$) der drei Arten mit Regressionsgerade für alle drei Arten (Einzelpunkte ○, △, *; Regressionsgerade —)

4.5.2 Rohfett

Insgesamt wurde der Rohfettgehalt stichprobenartig von 19 Knochen (11 Humeri und 8 Tibiotarsi verschiedener Tiere) untersucht. Der Fettgehalt war bei Greifvögeln und Eulen sehr gering. Tabelle 21 gibt die einzelnen Rohfettgehalte der 19 Knochen wieder. Der Median der einzelnen Arten ohne Berücksichtigung von Alter und Geschlecht befindet sich in den Tabellen 49 und 50 im Anhang.

Tabelle 21: Rohfettgehalt (% der TS) der 19 Knochen

| Vogelart | Alter | Geschlecht | Rohfettgehalt Humerus | Rohfettgehalt Tibiotarsus |
|--------------|---------|------------|--------------------------|------------------------------|
| Mäusebussard | Juvenil | Männlich | 0,2 | 0,3 |
| | Juvenil | Weiblich | 0,2 | 0,2 |
| | Juvenil | Weiblich | 0,3 | |
| | Adult | Männlich | 0,5 | 0,9 |
| | Adult | Männlich | 0,4 | |
| | Adult | Weiblich | 1,5 | 0,4 |
| Seeadler | Adult | Männlich | 0,02 | 1,2 |
| | Adult | Männlich | 0,2 | |
| | Adult | Weiblich | 0,3 | 0,03 |
| Schleiereule | Adult | Männlich | 1,7 | 1,3 |
| | Adult | Weiblich | 1,0 | 0,1 |

Da die Knochen Rohfettgehalte unter 2 % aufwiesen (Median = 0,28 %), konnte er bei den weiteren Untersuchungen vernachlässigt werden. Der so entstehende Fehler war verglichen zum Probenentnahmefehler und zum Analysefehler irrelevant. Die Ergebnisse der Mineralstoffbestimmung können damit entweder auf die Trockensubstanz oder auch bei den nicht entfetteten Knochen direkt auf die fettfreie Trockensubstanz bezogen werden.

4.5.3 Rohasche

Der Rohaschegehalt eines Knochens entspricht dem Anteil aller anorganischen Bestandteile. Die Untersuchungsergebnisse sind in den Tabellen 22 und 23 dargestellt, der Median der einzelnen Arten ohne Alter und Geschlecht zu berücksichtigen, befindet sich in den Tabellen 49 und 50 im Anhang.

Tabelle 22: Rohaschegehalt (% der TS) der Humeri

| Vogelart | Alter | Geschlecht | Anzahl | Median | Minimum | Maximum |
|--------------|---------|------------|--------|--------|---------|---------|
| Mäusebussard | Juvenil | Männlich | 10 | 62,7 | 57,6 | 63,8 |
| | | Weiblich | 10 | 62,5 | 58,3 | 66,0 |
| | Adult | Männlich | 10 | 67,4 | 66,4 | 68,2 |
| | | Weiblich | 10 | 66,8 | 63,4 | 67,9 |
| Seeadler | Juvenil | Männlich | 1 | 58,2 | | |
| | | Weiblich | 1 | 56,0 | | |
| | Adult | Männlich | 6 | 61,5 | 59,8 | 62,6 |
| | | Weiblich | 5 | 61,2 | 59,0 | 62,1 |
| Schleiereule | Adult | Männlich | 4 | 67,8 | 65,3 | 68,4 |
| | | Weiblich | 5 | 65,8 | 65,1 | 69,3 |

Der Rohaschegehalt der Humeri von Seeadlern war signifikant niedriger als der der Mäusebussarde ($p < 0,001$). Die Humeri von Schleiereulen wiesen einen signifikant höheren Rohascheanteil auf als die von Mäusebussarden ($p = 0,016$) und Seeadlern ($p < 0,001$). Der Rohaschegehalt von Humeri juveniler Mäusebussarde war signifikant niedriger als der adulter ($p < 0,001$). Es war bei keiner Art ein signifikanter, geschlechtsspezifischer Unterschied feststellbar (Mäusebussarde $p = 0,626$; Seeadler $p = 0,429$; Schleiereulen $p = 0,556$).

Tabelle 23: Rohaschegehalt (% der TS) der Tibiotarsi

| Vogelart | Alter | Geschlecht | Anzahl | Median | Minimum | Maximum |
|--------------|---------|------------|--------|--------|---------|---------|
| Mäusebussard | Juvenil | Männlich | 10 | 62,6 | 58,4 | 64,9 |
| | | Weiblich | 10 | 62,0 | 59,8 | 64,4 |
| | Adult | Männlich | 10 | 67,9 | 64,8 | 69,9 |
| | | Weiblich | 10 | 66,2 | 65,5 | 67,2 |
| Seeadler | Juvenil | Männlich | 1 | 56,9 | | |
| | | Weiblich | 1 | 57,8 | | |
| | Adult | Männlich | 6 | 59,6 | 59,0 | 61,9 |
| | | Weiblich | 5 | 60,0 | 57,1 | 61,5 |
| Schleiereule | Adult | Männlich | 4 | 65,8 | 64,4 | 67,8 |
| | | Weiblich | 5 | 65,3 | 62,4 | 66,4 |

Der Rohaschegehalt der Tibiotarsi von Seeadlern war signifikant niedriger als der von Mäusebussarden und Schleiereulen (jeweils $p < 0,001$). Bei Mäusebussarden und Schleiereulen war kein signifikanter Unterschied des Rohaschegehalts der Tibiotarsi erkennbar ($p = 0,585$).

Juvenile Mäusebussarde wiesen einen signifikant niedrigeren Rohaschegehalt der Tibiotarsi auf als adulte Tiere ($p < 0,001$) (Abb. 5). Bei keiner Art war ein signifikanter Geschlechtsunterschied des Rohaschegehalts der Tibiotarsi feststellbar (Mäusebussarde $p = 0,358$; Seeadler $p = 1,000$; Schleiereulen $p = 0,413$).

Die Rohaschegehalte von Humeri und Tibiotarsi korrelierten bei Mäusebussarden positiv miteinander ($r_s = 0,802$, $p < 0,001$). Bei Seeadlern ($r_s = 0,396$, $p = 0,181$) und Schleiereulen ($r_s = 0,483$, $p = 0,187$) war dagegen keine signifikante Korrelation nachweisbar. Humeri und Tibiotarsi von Mäusebussarden ($p = 0,747$) und Seeadlern ($p = 0,133$) zeigten keinen signifikanten Unterschied des Rohascheanteils. Die Rohaschegehalte von Humeri und Tibiotarsi unterschieden sich bei Schleiereulen signifikant ($p = 0,021$) und waren bei den Humeri höher (Tab. 22 und 23).

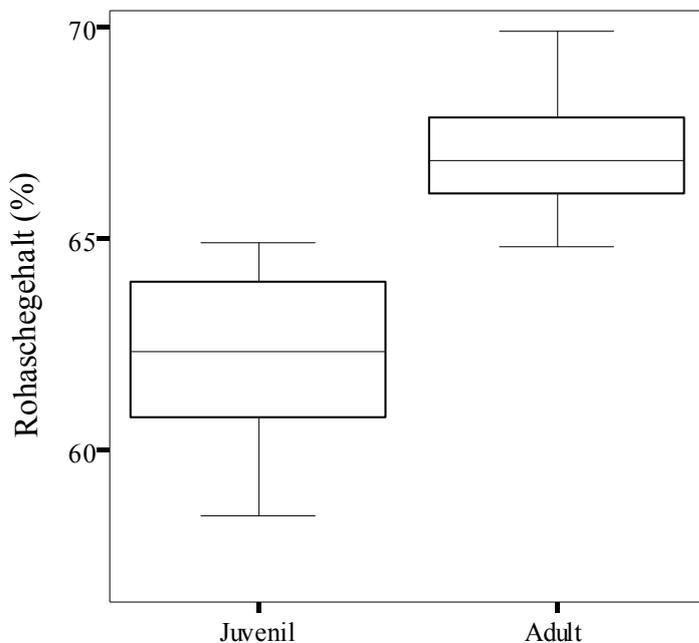


Abbildung 5: Boxplot des Rohaschegehalts der Tibiotarsi der juvenilen und adulten Mäusebussarde

4.5.4 Mineralstoffe

4.5.4.1 Kalzium

Die Kalziumkonzentrationen von Humeri und Tibiotarsi sind in den Tabellen 24 und 25 angegeben, der Median der einzelnen Arten ohne Alter und Geschlecht zu beachten, befindet sich in den Tabellen 49 und 50 im Anhang.

Tabelle 24: Kalziumgehalt (g/kg Rohasche) der Humeri

| Vogelart | Alter | Geschlecht | Anzahl | Median | Minimum | Maximum |
|--------------|---------|------------|--------|--------|---------|---------|
| Mäusebussard | Juvenil | Männlich | 10 | 204 | 193 | 232 |
| | | Weiblich | 10 | 204 | 185 | 258 |
| | Adult | Männlich | 10 | 260 | 234 | 274 |
| | | Weiblich | 10 | 241 | 206 | 258 |
| Seeadler | Juvenil | Männlich | 1 | 201 | | |
| | | Weiblich | 1 | 180 | | |
| | Adult | Männlich | 6 | 223 | 214 | 240 |
| | | Weiblich | 5 | 225 | 201 | 230 |
| Schleiereule | Adult | Männlich | 4 | 228 | 204 | 244 |
| | | Weiblich | 5 | 246 | 246 | 253 |

Der Kalziumgehalt der Humeri war bei Seeadlern signifikant niedriger als bei Schleiereulen ($p=0,007$). Es war kein signifikanter Unterschied zwischen den Kalziumgehalten der Humeri von Mäusebussarden und Seeadlern ($p=0,218$) sowie von Mäusebussarden und Schleiereulen ($p=0,393$) nachweisbar. Die Humeri juveniler Mäusebussarde enthielten signifikant weniger Kalzium als die adulter Tiere ($p<0,001$) (Abb. 6). Es war kein signifikanter, geschlechtsspezifischer Unterschied bei Mäusebussarden ($p=0,297$) und Seeadlern ($p=0,662$) feststellbar. Die Humeri männlicher Schleiereulen enthielten signifikant weniger Kalzium als die weiblicher Tiere ($p=0,016$).

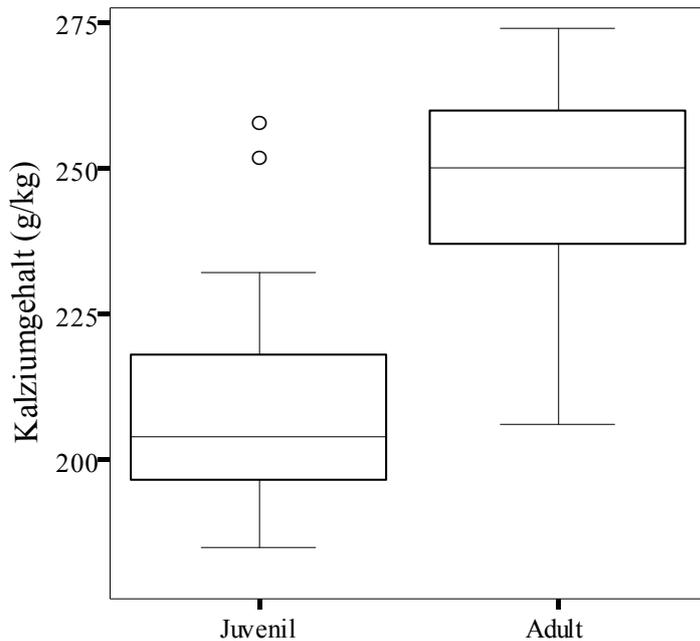


Abbildung 6: Boxplot des Kalziumgehalts in der Rohasche der Humeri der juvenilen und adulten Mäusebussarde; Ausreißer (○)

Tabelle 25: Kalziumgehalt (g/kg Rohasche) der Tibiotarsi

| Vogelart | Alter | Geschlecht | Anzahl | Median | Minimum | Maximum |
|--------------|---------|------------|--------|--------|---------|---------|
| Mäusebussard | Juvenil | Männlich | 10 | 220 | 202 | 242 |
| | | Weiblich | 10 | 227 | 211 | 242 |
| | Adult | Männlich | 10 | 245 | 230 | 262 |
| | | Weiblich | 10 | 239 | 231 | 253 |
| Seeadler | Juvenil | Männlich | 1 | 238 | | |
| | | Weiblich | 1 | 215 | | |
| | Adult | Männlich | 6 | 217 | 208 | 239 |
| | | Weiblich | 5 | 237 | 213 | 248 |
| Schleiereule | Adult | Männlich | 4 | 236 | 221 | 239 |
| | | Weiblich | 5 | 241 | 229 | 250 |

Zwischen den Kalziumgehalten in Tibiotarsi von Mäusebussarden und Seeadlern ($p=0,186$), Mäusebussarden und Schleiereulen ($p=0,423$) sowie Seeadlern und Schleiereulen ($p=0,088$) bestand kein signifikanter Unterschied. Juvenile Mäusebussarde hatten einen signifikant niedrigeren Kalziumgehalt in Tibiotarsi als adulte Tiere ($p<0,001$). Keine der drei Arten wies

im Hinblick auf das Geschlecht signifikante Unterschiede auf (Mäusebussarde $p=0,914$; Seeadler $p=0,247$; Schleiereulen $p=0,086$).

Die Kalziumgehalte von Humeri und Tibiotarsi korrelierten bei Mäusebussarden und Schleiereulen positiv (Mäusebussarde $r_s=0,343$, $p<0,001$; Schleiereulen $r_s=0,712$, $p=0,031$). Bei Seeadlern bestand keine signifikante Korrelation ($r_s=-0,207$, $p=0,498$). Es gab bei keiner der drei Arten einen signifikanten Unterschied des Kalziumgehalts in Humeri und Tibiotarsi (Mäusebussarde $p=0,214$; Seeadler $p=0,126$; Schleiereulen $p=0,326$).

4.5.4.2 Phosphor

Die Tabellen 26 und 27 geben die Phosphorgehalte in Humeri und Tibiotarsi wieder. Der Median der einzelnen Arten ohne das Alter und Geschlecht zu beachten, befindet sich in den Tabellen 49 und 50 im Anhang.

Tabelle 26: Phosphorgehalt (g/kg Rohasche) der Humeri

| Vogelart | Alter | Geschlecht | Anzahl | Median | Minimum | Maximum |
|--------------|---------|------------|--------|--------|---------|---------|
| Mäusebussard | Juvenil | Männlich | 10 | 105,94 | 93,27 | 112,05 |
| | | Weiblich | 10 | 107,00 | 100,90 | 117,23 |
| | Adult | Männlich | 10 | 116,65 | 112,48 | 120,81 |
| | | Weiblich | 10 | 116,77 | 111,09 | 122,57 |
| Seeadler | Juvenil | Männlich | 1 | 101,03 | | |
| | | Weiblich | 1 | 94,72 | | |
| | Adult | Männlich | 6 | 103,06 | 99,21 | 108,75 |
| | | Weiblich | 5 | 103,84 | 98,99 | 106,81 |
| Schleiereule | Adult | Männlich | 4 | 118,40 | 116,71 | 118,55 |
| | | Weiblich | 5 | 117,61 | 112,11 | 122,53 |

Sowohl Mäusebussarde ($p=0,003$) als auch Seeadler ($p<0,001$) hatten signifikant geringere Phosphorgehalte in der Rohasche der Humeri als Schleiereulen. Seeadler wiesen signifikant niedrigere Phosphorgehalte in Humeri auf als Mäusebussarde ($p<0,001$). Der Phosphorgehalt in Humeri juveniler Mäusebussarde war signifikant geringer als der bei adulten Tieren ($p<0,001$). Keine der drei Arten ließ einen signifikanten Geschlechtsunterschied des Phosphorgehalts in Humeri aufdecken (Mäusebussarde $p=0,646$; Seeadler $p=0,931$; Schleiereulen $p=0,905$).

Tabelle 27: Phosphorgehalt (g/kg Rohasche) der Tibiotarsi

| Vogelart | Alter | Geschlecht | Anzahl | Median | Minimum | Maximum |
|--------------|---------|------------|--------|--------|---------|---------|
| Mäusebussard | Juvenil | Männlich | 10 | 102,59 | 101,45 | 111,03 |
| | | Weiblich | 10 | 105,15 | 102,67 | 115,45 |
| | Adult | Männlich | 10 | 116,95 | 111,81 | 117,97 |
| | | Weiblich | 10 | 112,93 | 104,66 | 117,39 |
| Seeadler | Juvenil | Männlich | 1 | 96,90 | | |
| | | Weiblich | 1 | 93,18 | | |
| | Adult | Männlich | 6 | 103,14 | 101,61 | 103,73 |
| | | Weiblich | 5 | 100,65 | 98,68 | 109,00 |
| Schleiereule | Adult | Männlich | 4 | 117,02 | 115,50 | 120,15 |
| | | Weiblich | 5 | 114,13 | 111,97 | 116,34 |

Der Phosphorgehalt in Tibiotarsi war bei Mäusebussarden ($p=0,006$) und Seeadlern ($p<0,001$) signifikant niedriger als bei Schleiereulen. Tibiotarsi enthielten bei Mäusebussarden signifikant mehr Phosphor als bei Seeadlern ($p<0,001$). Tibiotarsi juveniler Mäusebussarde wiesen signifikant geringere Phosphorgehalte auf als die adulten Tiere ($p<0,001$). Es war kein signifikanter Geschlechtsunterschied bei Mäusebussarden ($p=0,725$) und Seeadlern ($p=0,177$) erkennbar. Tibiotarsi männlicher Schleiereulen enthielten signifikant weniger Phosphor als die weiblichen Tiere ($p=0,05$) (Abb. 7).

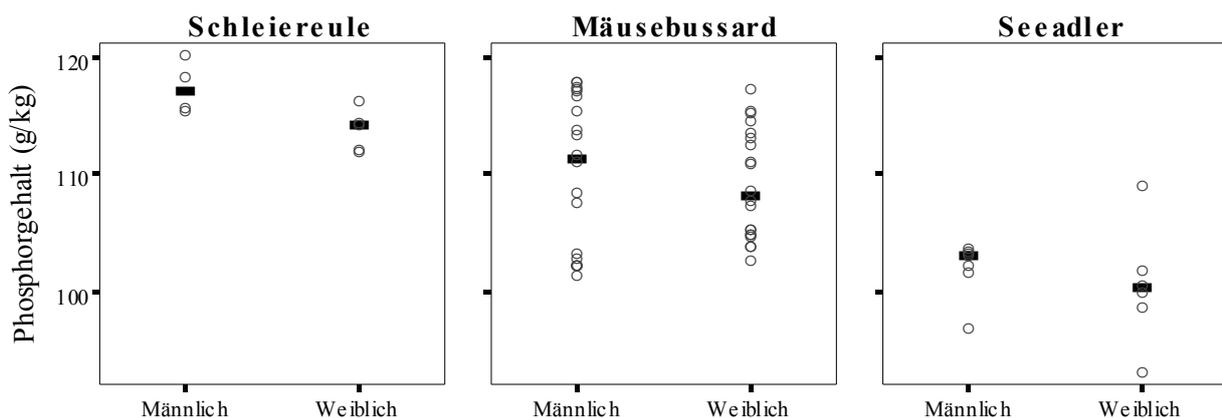


Abbildung 7: Drop-Line-Diagramme der Phosphorgehalte in Rohasche von Tibiotarsi der drei Vogelarten (Einzelpunkte \circ ; Median —)

Der Phosphorgehalt in Humeri korrelierte bei Mäusebussarden positiv mit dem in Tibiotarsi ($r_s=0,832$, $p<0,001$). Für Seeadler ($r_s=0,734$, $p=0,734$) und Schleiereulen ($r_s=0,600$, $p=0,088$) konnte keine Korrelation festgestellt werden. Phosphorgehalte in Humeri und Tibiotarsi unterschieden sich bei Mäusebussarden ($p=0,018$) und Schleiereulen ($p=0,028$) signifikant. Sie waren in Humeri höher (Tab. 26 und 27). Seeadler wiesen keinen signifikanten Unterschied des Phosphorgehalts in beiden Knochen auf ($p=0,133$).

Das Verhältnis Kalziumkonzentration zu Phosphorkonzentration in Humeri und Tibiotarsi betrug etwa 2:1 (Tab. 28). Alter und Geschlecht hatten keinen signifikanten Einfluss darauf.

Tabelle 28: Verhältnis des Medians der Kalziumkonzentration (Ca) zum Median der Phosphorkonzentration (P) in Rohasche von Humeri und Tibiotarsi

| Vogelart | Anzahl | Ca:P Humerus | Ca:P Tibiotarsus |
|--------------|--------|-----------------|---------------------|
| Mäusebussard | 40 | 2,1:1 | 2,1:1 |
| Seeadler | 13 | 2,1:1 | 2,3:1 |
| Schleiereule | 9 | 2,1:1 | 2,0:1 |
| Insgesamt | 62 | 2,1:1 | 2,1:1 |

4.5.4.3 Magnesium

In Tabelle 29 sind die Magnesiumgehalte der Humeri und in Tabelle 30 die der Tibiotarsi angegeben, der Median der einzelnen Arten ohne Alter und Geschlecht zu berücksichtigen ist in den Tabellen 49 und 50 im Anhang zusammengestellt.

Tabelle 29: Magnesiumgehalt (mg/kg Rohasche) der Humeri

| Vogelart | Alter | Geschlecht | Anzahl | Median | Minimum | Maximum |
|--------------|---------|------------|--------|--------|---------|---------|
| Mäusebussard | Juvenil | Männlich | 10 | 3745 | 3030 | 4640 |
| | | Weiblich | 10 | 3725 | 3560 | 4720 |
| | Adult | Männlich | 10 | 3300 | 2990 | 3560 |
| | | Weiblich | 10 | 3400 | 2690 | 3630 |
| Seeadler | Juvenil | Männlich | 1 | 3660 | | |
| | | Weiblich | 1 | 3300 | | |
| | Adult | Männlich | 6 | 2515 | 2390 | 2810 |
| | | Weiblich | 5 | 2580 | 2150 | 2730 |
| Schleiereule | Adult | Männlich | 4 | 3575 | 3180 | 3640 |
| | | Weiblich | 5 | 3650 | 3430 | 3810 |

Der Magnesiumgehalt in Humeri von Seeadlern war signifikant niedriger als bei Mäusebussarden und Schleiereulen (jeweils $p < 0,001$). Zwischen Mäusebussarden und Schleiereulen bestand kein signifikanter Unterschied der Magnesiumkonzentration in Rohasche von Humeri ($p = 0,423$). Humeri juveniler Mäusebussarde enthielten signifikant mehr Magnesium als die adulter Tiere ($p < 0,001$). Keine der drei Arten wies einen signifikanten Geschlechtsunterschied auf (Mäusebussarde $p = 0,213$; Seeadler $p = 0,792$; Schleiereulen $p = 0,111$).

Tabelle 30: Magnesiumgehalt (mg/kg Rohasche) der Tibiotarsi

| Vogelart | Alter | Geschlecht | Anzahl | Median | Minimum | Maximum |
|--------------|---------|------------|--------|--------|---------|---------|
| Mäusebussard | Juvenil | Männlich | 10 | 3270 | 2980 | 3680 |
| | | Weiblich | 10 | 3660 | 3160 | 3980 |
| | Adult | Männlich | 10 | 3370 | 2940 | 3550 |
| | | Weiblich | 10 | 3305 | 2730 | 3600 |
| Seeadler | Juvenil | Männlich | 1 | 2510 | | |
| | | Weiblich | 1 | 2830 | | |
| | Adult | Männlich | 6 | 2435 | 2230 | 2750 |
| | | Weiblich | 5 | 2540 | 2280 | 2730 |
| Schleiereule | Adult | Männlich | 4 | 3725 | 3210 | 4150 |
| | | Weiblich | 5 | 3720 | 3510 | 3970 |

Mäusebussarde ($p = 0,002$) und Seeadler ($p < 0,001$) wiesen signifikant geringere Magnesiumkonzentrationen in Tibiotarsi auf als Schleiereulen. Mäusebussarde wiesen eine

signifikant höhere Magnesiumkonzentration in Rohasche von Tibiotarsi auf als Seeadler ($p < 0,001$). Es war kein signifikanter altersspezifischer Unterschied bei Mäusebussarden feststellbar ($p = 0,060$). Tibiotarsi männlicher Mäusebussarde wiesen einen signifikant niedrigeren Magnesiumgehalt auf als die weiblicher Tiere ($p = 0,021$). Bei Seeadlern und Schleiereulen war kein signifikanter Geschlechtsunterschied nachweisbar (Seeadler $p = 0,329$; Schleiereulen $p = 0,905$).

Die Magnesiumgehalte in Humeri und Tibiotarsi korrelierten bei Mäusebussarden und Schleiereulen positiv miteinander (Mäusebussarde $r_s = 0,568$, $p < 0,001$; Schleiereulen $r_s = 0,706$, $p = 0,034$). Bei den Seeadlern bestand kein signifikanter Zusammenhang ($r_s = 0,465$, $p = 0,109$). Der Magnesiumgehalt in Humeri unterschied sich bei Mäusebussarden signifikant von dem in Tibiotarsi ($p = 0,029$). Die Tabellen 29 und 30 zeigen, dass der Magnesiumgehalt in Humeri höher war als der in Tibiotarsi. Seeadler wiesen keinen signifikanten Unterschied des Magnesiumgehalts zwischen den beiden Knochen auf ($p = 0,173$). Humeri und Tibiotarsi von Schleiereulen enthielten signifikant unterschiedliche Mengen an Magnesium ($p = 0,021$) mit weniger Magnesium in Asche von Humeri (Tab. 29 und 30).

4.5.4.4 Kupfer

Der Kupfergehalt in Rohasche von Humeri und Tibiotarsi ist in den Tabellen 31 und 32 angegeben, der Median der einzelnen Arten ohne Alter und Geschlecht zu berücksichtigen befindet sich in den Tabellen 49 und 50 im Anhang.

Tabelle 31: Kupfergehalt (mg/kg Rohasche) der Humeri

| Vogelart | Alter | Geschlecht | Anzahl | Median | Minimum | Maximum |
|--------------|---------|------------|--------|--------|---------|---------|
| Mäusebussard | Juvenil | Männlich | 10 | 6,47 | 4,88 | 10,40 |
| | | Weiblich | 10 | 6,26 | 5,26 | 8,84 |
| | Adult | Männlich | 10 | 6,10 | 5,59 | 9,85 |
| | | Weiblich | 10 | 6,02 | 5,05 | 17,10 |
| Seeadler | Juvenil | Männlich | 1 | 8,35 | | |
| | | Weiblich | 1 | 7,09 | | |
| | Adult | Männlich | 6 | 5,69 | 5,34 | 6,81 |
| | | Weiblich | 5 | 5,68 | 4,55 | 16,60 |
| Schleiereule | Adult | Männlich | 4 | 9,05 | 8,34 | 25,90 |
| | | Weiblich | 5 | 8,60 | 7,05 | 27,50 |

Humeri von Mäusebussarden ($p < 0,001$) und Seeadlern ($p = 0,001$) enthielten signifikant weniger Kupfer als die von Schleiereulen. Zwischen dem Kupfergehalt in Humeri von Mäusebussarden und Seeadlern war keine signifikante Differenz feststellbar ($p = 0,570$). Mäusebussarde wiesen keinen signifikanten Altersunterschied auf ($p = 0,695$). Bei keiner Art war ein signifikanter Geschlechtsunterschied nachweisbar (Mäusebussarde $p = 0,978$; Seeadler $p = 1,000$; Schleiereulen $p = 0,730$).

Tabelle 32: Kupfergehalt (mg/kg Rohasche) der Tibiotarsi

| Vogelart | Alter | Geschlecht | Anzahl | Median | Minimum | Maximum |
|--------------|---------|------------|--------|--------|---------|---------|
| Mäusebussard | Juvenil | Männlich | 10 | 6,16 | 4,34 | 8,88 |
| | | Weiblich | 10 | 5,87 | 4,13 | 7,23 |
| | Adult | Männlich | 10 | 6,03 | 5,22 | 7,85 |
| | | Weiblich | 10 | 5,25 | 4,69 | 7,04 |
| Seeadler | Juvenil | Männlich | 1 | 7,40 | | |
| | | Weiblich | 1 | 5,13 | | |
| | Adult | Männlich | 6 | 5,65 | 4,44 | 6,29 |
| | | Weiblich | 5 | 5,28 | 4,82 | 15,00 |
| Schleiereule | Adult | Männlich | 4 | 12,70 | 11,50 | 14,80 |
| | | Weiblich | 5 | 17,20 | 7,09 | 19,90 |

Tibiotarsi von Mäusebussarden und Seeadlern enthielten signifikant weniger Kupfer als die von Schleiereulen (jeweils $p < 0,001$). Zwischen Mäusebussarden und Seeadlern bestand kein signifikanter Unterschied ($p = 0,852$). Es konnte bei Mäusebussarden auch kein signifikanter Altersunterschied festgestellt werden ($p = 0,839$). Keine Art wies einen signifikanten geschlechtsspezifischen Unterschied auf (Mäusebussarde $p = 0,229$; Seeadler $p = 0,931$; Schleiereulen $p = 0,730$).

Der Kupfergehalt in Humeri korrelierte bei Mäusebussarden positiv mit dem in Tibiotarsi ($r_s = 0,328$, $p = 0,039$). Bei Seeadlern und Schleiereulen war keine signifikante Korrelation feststellbar (Seeadler $r_s = 0,313$, $p = 0,297$; Schleiereulen $r_s = 0,427$, $p = 0,252$). Humeri und Tibiotarsi von Mäusebussarden enthielten signifikant unterschiedliche Mengen an Kupfer ($p = 0,011$). In Humeri waren höhere Kupfergehalte messbar (Tab. 31 und 32). Zwischen den Kupfergehalten in Humeri und Tibiotarsi von Seeadlern ($p = 0,064$) und Schleiereulen ($p = 0,515$) war kein signifikanter Unterschied entdeckbar.

4.5.4.5 Zink

In den Tabellen 33 und 34 sind die Zinkgehalte in Rohasche von Humeri und Tibiotarsi angegeben, der Median der einzelnen Arten ohne Berücksichtigung von Alter und Geschlecht befindet sich in den Tabellen 49 und 50 im Anhang.

Tabelle 33: Zinkgehalt (mg/kg Rohasche) der Humeri

| Vogelart | Alter | Geschlecht | Anzahl | Median | Minimum | Maximum |
|--------------|---------|------------|--------|--------|---------|---------|
| Mäusebussard | Juvenil | Männlich | 10 | 193 | 166 | 237 |
| | | Weiblich | 10 | 214 | 180 | 278 |
| | Adult | Männlich | 10 | 216 | 181 | 253 |
| | | Weiblich | 10 | 209 | 192 | 230 |
| Seeadler | Juvenil | Männlich | 1 | 286 | | |
| | | Weiblich | 1 | 291 | | |
| | Adult | Männlich | 6 | 278 | 261 | 295 |
| | | Weiblich | 5 | 266 | 193 | 286 |
| Schleiereule | Adult | Männlich | 4 | 170 | 156 | 216 |
| | | Weiblich | 5 | 185 | 166 | 198 |

Schleiereulen wiesen signifikant geringere Zinkwerte in Humeri auf als Mäusebussarde ($p=0,002$) und Seeadler ($p<0,001$). Humeri von Mäusebussarden enthielten signifikant weniger Zink als die von Seeadlern ($p<0,001$). Ein signifikanter Altersunterschied konnte bei Mäusebussarden nicht nachgewiesen werden ($p=0,372$). Bei keiner Art war ein signifikanter Geschlechtsunterschied feststellbar (Mäusebussarde $p=0,194$; Seeadler $p=0,247$; Schleiereulen $p=0,413$).

Tabelle 34: Zinkgehalt (mg/kg Rohasche) der Tibiotarsi

| Vogelart | Alter | Geschlecht | Anzahl | Median | Minimum | Maximum |
|--------------|---------|------------|--------|--------|---------|---------|
| Mäusebussard | Juvenil | Männlich | 10 | 214 | 182 | 254 |
| | | Weiblich | 10 | 242 | 192 | 290 |
| | Adult | Männlich | 10 | 221 | 189 | 250 |
| | | Weiblich | 10 | 222 | 204 | 249 |
| Seeadler | Juvenil | Männlich | 1 | 274 | | |
| | | Weiblich | 1 | 201 | | |
| | Adult | Männlich | 6 | 274 | 263 | 287 |
| | | Weiblich | 5 | 273 | 220 | 280 |
| Schleiereule | Adult | Männlich | 4 | 186 | 164 | 212 |
| | | Weiblich | 5 | 202 | 177 | 215 |

Sowohl bei Mäusebussarden als auch Seeadlern waren signifikant höhere Zinkgehalte in Tibiotarsi nachweisbar als bei Schleiereulen (jeweils $p < 0,001$). Tibiotarsi von Mäusebussarden wiesen einen signifikant niedrigeren Zinkgehalt auf als die von Seeadlern ($p < 0,001$). Bei Mäusebussarden war kein signifikanter altersspezifischer Unterschied feststellbar ($p = 0,745$). Bei keiner Art war ein signifikanter Geschlechtsunterschied des Zinkgehalts feststellbar (Mäusebussarde $p = 0,185$; Seeadler $p = 0,792$; Schleiereulen $p = 0,296$). Der Zinkgehalt der Humeri und der der Tibiotarsi korrelierten bei Mäusebussarden und Schleiereulen positiv (Mäusebussarde $r_s = 0,594$, $p < 0,001$; Schleiereulen $r_s = 0,904$, $p = 0,001$). Bei Seeadlern bestand kein signifikanter Zusammenhang ($r_s = 0,514$, $p = 0,072$). Die Zinkgehalte von Humeri und Tibiotarsi unterschieden sich bei Mäusebussarden und Schleiereulen signifikant (Mäusebussarde $p < 0,001$; Schleiereulen $p = 0,013$). Der Zinkgehalt in Rohasche der Humeri war niedriger (Tab. 33 und 34). Seeadler wiesen keinen signifikanten Unterschied des Zinkgehalts der beiden Knochen auf ($p = 0,649$).

4.6 Mechanische Belastbarkeit

4.6.1 Maximales Drehmoment

Die mechanische Belastbarkeit entspricht der Bruchfestigkeit eines Knochens. Sie wird in der Torsion über das maximale Drehmoment bestimmt. Die Daten sind in den Tabellen 35 und 36 dargestellt, der Median für die einzelnen Arten ohne Berücksichtigung von Alter und Geschlecht befindet sich in den Tabellen 49 und 50 im Anhang.

Tabelle 35: Maximales Drehmoment (Nm) der Humeri

| Vogelart | Alter | Geschlecht | Anzahl | Median | Minimum | Maximum |
|--------------|---------|------------|--------|--------|---------|---------|
| Mäusebussard | Juvenil | Männlich | 10 | 2,22 | 1,45 | 2,65 |
| | | Weiblich | 10 | 2,26 | 1,18 | 3,24 |
| | Adult | Männlich | 10 | 2,74 | 2,33 | 3,37 |
| | | Weiblich | 10 | 3,19 | 2,02 | 3,79 |
| Seeadler | Juvenil | Männlich | 1 | 14,20 | | |
| | | Weiblich | 1 | 9,13 | | |
| | Adult | Männlich | 6 | 21,71 | 18,93 | 25,52 |
| | | Weiblich | 5 | 29,21 | 22,58 | 29,93 |
| Schleiereule | Adult | Männlich | 4 | 1,01 | 0,36 | 1,50 |
| | | Weiblich | 5 | 1,01 | 0,82 | 1,39 |

Von den drei Arten wiesen Schleiereulen das niedrigste maximale Drehmoment in Humeri auf (jeweils $p < 0,001$), vor Mäusebussarden (Mäusebussarde im Vergleich mit Seeadlern, $p < 0,001$) und Seeadlern. Juvenile Mäusebussarde hatten ein signifikant niedrigeres maximales Drehmoment als adulte Tiere ($p < 0,001$) (Abb. 8). Das maximale Drehmoment der Humeri war bei männlichen Seeadlern signifikant niedriger als das weiblicher Tiere ($p = 0,017$). Mäusebussarde und Schleiereulen wiesen keinen signifikanten Geschlechtsunterschied im Hinblick auf das maximale Drehmoment auf (Mäusebussarde $p = 0,323$; Schleiereulen $p = 1,000$).

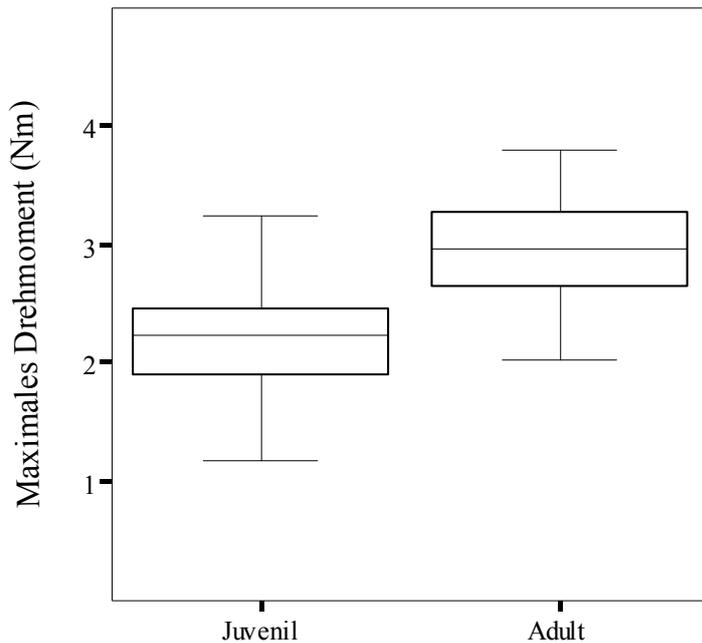


Abbildung 8: Boxplot des maximalen Drehmoments der Humeri von juvenilen und adulten Mäusebussarden

Tabelle 36: Maximales Drehmoment (Nm) der Tibiotarsi

| Vogelart | Alter | Geschlecht | Anzahl | Median | Minimum | Maximum |
|--------------|---------|------------|--------|--------|---------|---------|
| Mäusebussard | Juvenil | Männlich | 10 | 1,18 | 0,46 | 1,45 |
| | | Weiblich | 10 | 1,20 | 0,79 | 1,71 |
| | Adult | Männlich | 10 | 1,41 | 0,53 | 1,99 |
| | | Weiblich | 10 | 1,79 | 1,17 | 2,40 |
| Seeadler | Juvenil | Männlich | 1 | 4,87 | | |
| | | Weiblich | 1 | 7,16 | | |
| | Adult | Männlich | 6 | 8,04 | 5,73 | 9,09 |
| | | Weiblich | 5 | 12,47 | 12,17 | 14,34 |
| Schleiereule | Adult | Männlich | 4 | 0,50 | 0,29 | 0,52 |
| | | Weiblich | 5 | 0,59 | 0,45 | 0,99 |

Das maximale Drehmoment der Tibiotarsi war bei Schleiereulen signifikant niedriger als das von Mäusebussarden und Seeadlern (jeweils $p < 0,001$) und das von Mäusebussarden ebenfalls signifikant niedriger als das von Seeadlern ($p < 0,001$). Juvenile Mäusebussarde hatten ein signifikant niedrigeres maximales Drehmoment als adulte Tieren ($p = 0,005$). Ebenso war es bei männlichen Seeadlern signifikant niedriger als bei weiblichen Tieren ($p = 0,004$). Bei den

anderen Arten wurde kein signifikanter geschlechtsspezifischer Unterschied festgestellt (Mäusebussarde $p=0,152$; Schleiereulen $p=0,086$).

Die maximalen Drehmomente der Humeri und der Tibiotarsi korrelierten bei Mäusebussarden und Seeadlern positiv (Mäusebussarde $r_s=0,486$, $p=0,002$; Seeadler $r_s=0,852$, $p<0,001$). Bei Schleiereulen war kein signifikanter Zusammenhang feststellbar ($r_s=0,633$, $p=0,067$). Bei allen drei Arten unterschied sich das maximale Drehmoment der Humeri signifikant von dem der Tibiotarsi (Mäusebussarde $p<0,001$; Seeadler $p=0,001$; Schleiereulen $p=0,008$) mit einem höheren maximalen Drehmoment der Humeri (Tab. 35 und 36).

4.6.2 Steifigkeit

Die Steifigkeit wurde mit Hilfe einer Steigungsgeraden im linearen Bereich der Kurve jedes Torsionsversuches ermittelt. Die Daten sind in den Tabellen 37 und 38 dargestellt. Der Median einzelner Arten ohne Berücksichtigung von Alter und Geschlecht befindet sich in den Tabellen 49 und 50 im Anhang.

Tabelle 37: Steifigkeit (Nm/°) der Humeri

| Vogelart | Alter | Geschlecht | Anzahl | Median | Minimum | Maximum |
|--------------|---------|------------|--------|--------|---------|---------|
| Mäusebussard | Juvenil | Männlich | 10 | 0,13 | 0,12 | 0,20 |
| | | Weiblich | 10 | 0,19 | 0,10 | 0,24 |
| | Adult | Männlich | 10 | 0,22 | 0,19 | 0,26 |
| | | Weiblich | 10 | 0,24 | 0,17 | 0,29 |
| Seeadler | Juvenil | Männlich | 1 | 0,85 | | |
| | | Weiblich | 1 | 0,56 | | |
| | Adult | Männlich | 6 | 1,17 | 0,80 | 1,43 |
| | | Weiblich | 5 | 1,60 | 1,32 | 1,80 |
| Schleiereule | Adult | Männlich | 4 | 0,08 | 0,05 | 0,09 |
| | | Weiblich | 5 | 0,07 | 0,06 | 0,09 |

Die Steifigkeit von Humeri war bei Schleiereulen signifikant geringer als die bei Mäusebussarden und Seeadlern (jeweils $p<0,001$), während sie bei Mäusebussarden signifikant geringer als bei Seeadlern war ($p<0,001$). Juvenile Mäusebussarde hatten eine signifikant geringere Steifigkeit der Humeri als adulte Tiere ($p<0,001$). Ebenso war sie bei männlichen Seeadlern signifikant geringer als bei weiblichen ($p=0,017$). Bei den beiden anderen Arten war kein signifikanter geschlechtsspezifischer Unterschied nachweisbar (Mäusebussarde $p=0,119$; Schleiereulen $p=0,905$).

Tabelle 38: Steifigkeit (Nm/°) der Tibiotarsi

| Vogelart | Alter | Geschlecht | Anzahl | Median | Minimum | Maximum |
|--------------|---------|------------|--------|--------|---------|---------|
| Mäusebussard | Juvenil | Männlich | 10 | 0,06 | 0,05 | 0,08 |
| | | Weiblich | 10 | 0,06 | 0,04 | 0,09 |
| | Adult | Männlich | 10 | 0,11 | 0,06 | 0,16 |
| | | Weiblich | 10 | 0,12 | 0,07 | 0,16 |
| Seeadler | Juvenil | Männlich | 1 | 0,23 | | |
| | | Weiblich | 1 | 0,30 | | |
| | Adult | Männlich | 6 | 0,30 | 0,29 | 0,56 |
| | | Weiblich | 5 | 0,58 | 0,57 | 0,70 |
| Schleiereule | Adult | Männlich | 4 | 0,03 | 0,01 | 0,03 |
| | | Weiblich | 5 | 0,03 | 0,02 | 0,05 |

Die Steifigkeit der Tibiotarsi von Schleiereulen war signifikant geringer als die von Mäusebussarden und Seeadlern (jeweils $p < 0,001$), bei Mäusebussarden signifikant geringer als bei Seeadlern ($p < 0,001$). Juvenile Mäusebussarde wiesen eine signifikant geringere Steifigkeit auf als adulte Tiere ($p < 0,001$) und männliche Seeadler eine signifikant geringere als weibliche Tiere ($p = 0,004$). Bei Mäusebussarden und Schleiereulen war kein signifikanter Geschlechtsunterschied nachweisbar (Mäusebussarde $p = 0,462$; Schleiereulen $p = 0,413$) (Abb. 9).

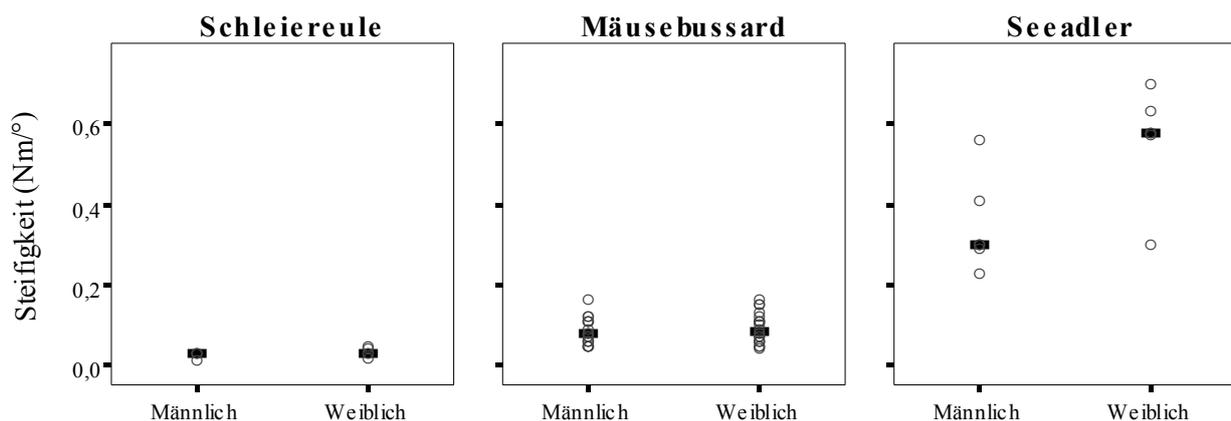


Abbildung 9: Drop-Line-Diagramme der Steifigkeit der Tibiotarsi von männlichen und weiblichen Tieren der drei Vogelarten (Einzelpunkte ○; Median —)

Die Steifigkeit der Humeri korrelierte bei Mäusebussarden und Seeadlern positiv mit der der Tibiotarsi (Mäusebussarde $r_s=0,793$, $p<0,001$; Seeadler $r_s=0,768$, $p=0,002$). Bei Schleiereulen war keine signifikante Korrelation feststellbar ($r_s=0,524$, $p=0,147$). Die Steifigkeit von Humeri und Tibiotarsi war bei allen drei Arten signifikant unterschiedlich (Mäusebussarde $p<0,001$; Seeadler $p=0,001$; Schleiereulen $p=0,007$). Aus den Tabellen 37 und 38 ist ersichtlich, dass die Steifigkeit der Humeri größer war als die der Tibiotarsi.

4.7 Zusammenhang der Ergebnisse

Der Grad der Abhängigkeit zwischen den verschiedenen Parametern der Knochenzusammensetzung, der Dichte und der mechanischen Belastbarkeit wurde über den Korrelationskoeffizienten nach Spearman (r_s) festgestellt. Die Korrelationen unterschieden sich bei den Gruppen der juvenilen Mäusebussarde, der adulten Mäusebussarde, der Seeadler und der Schleiereulen.

4.7.1 Korrelation der Humerusparameter

Die Korrelation der Dichte der Humeri mit den Parametern der Knochenzusammensetzung ist in Tabelle 39 dargestellt. Bei den Gruppen bestanden unterschiedliche signifikante Korrelationen bei den Mineralstoffen.

Tabelle 39: Korrelationskoeffizient nach Spearman (r_s) und p-Werte (p) der Dichte der Humeri der Vogelarten dieser Studie mit verschiedenen Parametern der Knochenzusammensetzung (signifikante Korrelationen hervorgehoben *)

| Parameter | Juvenile Mäusebussarde | | Adulte Mäusebussarde | | Seeadler | | Schleiereulen | |
|----------------------|------------------------|--------|----------------------|--------|----------|--------|---------------|-------|
| | r_s | p | r_s | p | r_s | p | r_s | p |
| Trocken- substanz | 0,54 | 0,126 | 0,356 | 0,123 | 0,494 | 0,086 | 0,151 | 0,698 |
| Rohasche | 0,350 | 0,130 | -0,023 | 0,922 | 0,539 | 0,057 | 0,151 | 0,698 |
| Kalzium | 0,654* | 0,002* | -0,171 | 0,472 | 0,265 | 0,381 | -0,051 | 0,896 |
| Phosphor | -0,092 | 0,700 | 0,520* | 0,019* | 0,296 | 0,326 | -0,101 | 0,796 |
| Magnesium | -0,475* | 0,034* | 0,258 | 0,272 | -0,746* | 0,003* | -0,232 | 0,548 |
| Kupfer | 0,336 | 0,118 | -0,580 | 0,007 | -0,310 | 0,302 | -0,429 | 0,250 |
| Zink | -0,341 | 0,141 | 0,265 | 0,258 | 0,042 | 0,891 | -0,114 | 0,770 |

Die Korrelationen des Rohaschegehalts in Humeri sind in Tabelle 40 wiedergegeben. In den Gruppen waren verschiedene signifikante Korrelationen nachweisbar. Der Kalziumgehalt korrelierte bei juvenilen und adulten Mäusebussarden positiv zum Rohaschegehalt. Bei adulten Mäusebussarden, Seeadlern und Schleiereulen war eine positive Korrelation zum Phosphorgehalt nachweisbar.

Tabelle 40: Korrelationskoeffizient nach Spearman (r_s) und p-Werte (p) des Rohaschegehalts in Humeri der Vogelarten dieser Studie mit verschiedenen Parametern der Knochenzusammensetzung (signifikante Korrelationen hervorgehoben *)

| Parameter | Juvenile Mäusebussarde | | Adulte Mäusebussarde | | Seeadler | | Schleiereulen | |
|-----------|------------------------|--------|----------------------|--------|----------|--------|---------------|--------|
| | r_s | p | r_s | p | r_s | p | r_s | p |
| Kalzium | 0,531* | 0,016* | 0,524* | 0,018* | 0,527 | 0,064 | -0,458 | 0,215 |
| Phosphor | 0,442 | 0,051 | 0,478* | 0,033* | 0,813* | 0,001* | 0,733* | 0,025* |
| Magnesium | -0,088 | 0,712 | 0,122 | 0,608 | -0,280 | 0,354 | -0,703* | 0,035* |
| Kupfer | -0,082 | 0,731 | 0,226 | 0,339 | -0,275 | 0,364 | 0,517 | 0,154 |
| Zink | -0,067 | 0,779 | 0,237 | 0,315 | -0,072 | 0,816 | -0,326 | 0,391 |

In Tabelle 41 ist die Korrelation des maximalen Drehmoments der Humeri mit den anderen Parametern wiedergegeben. Bei juvenilen und adulten Mäusebussarden sowie Seeadlern korrelierte das Gewicht der Diaphyse positiv mit dem maximalen Drehmoment. Außerdem bestanden weitere, verschiedene Korrelationen.

Tabelle 41: Korrelationskoeffizient nach Spearman (r_s) und p-Werte (p) des maximalen Drehmoments der Humeri der Vogelarten dieser Studie mit morphologischen Parametern, Dichte und verschiedenen Parametern der Knochenzusammensetzung (signifikante Korrelationen hervorgehoben *)

| Parameter | Juvenile Mäusebussarde | | Adulte Mäusebussarde | | Seeadler | | Schleiereulen | |
|------------------|------------------------|--------|----------------------|--------|----------|---------|---------------|-------|
| | r_s | p | r_s | p | r_s | p | r_s | p |
| Gewicht Diaphyse | 0,480* | 0,032* | 0,516* | 0,020* | 0,863* | <0,001* | 0,300 | 0,433 |
| Kortexdicke | -0,420 | 0,065 | 0,585* | 0,007* | 0,434 | 0,138 | 0,220 | 0,569 |
| Dichte | 0,421 | 0,064 | 0,297 | 0,203 | 0,402 | 0,173 | 0,185 | 0,634 |
| Rohasche | 0,533* | 0,016* | 0,203 | 0,390 | 0,214 | 0,482 | 0,650 | 0,058 |
| Kalzium | 0,623* | 0,003* | -0,342 | 0,140 | 0,474 | 0,101 | -0,068 | 0,862 |
| Phosphor | 0,356 | 0,124 | 0,158 | 0,506 | 0,313 | 0,297 | 0,150 | 0,700 |
| Magnesium | -0,214 | 0,365 | 0,077 | 0,747 | -0,615* | 0,025* | -0,092 | 0,814 |
| Kupfer | 0,005 | 0,985 | -0,096 | 0,686 | -0,253 | 0,405 | -0,050 | 0,898 |
| Zink | -0,109 | 0,648 | 0,026 | 0,915 | -0,254 | 0,402 | -0,510 | 0,160 |

Aus Tabelle 42 ist die Korrelation der Steifigkeit der Humeri mit morphologischen Parametern, Dichte und Parametern der Knochenzusammensetzung ersichtlich. In den Gruppen waren signifikante Korrelationen der Steifigkeit mit verschiedenen Parametern aufzudecken.

Tabelle 42: Korrelationskoeffizient nach Spearman (r_s) und p-Werte (p) der Steifigkeit der Humeri der Vogelarten dieser Studie mit morphologischen Parametern, Dichte und verschiedenen Parametern der Knochenzusammensetzung (signifikante Korrelationen hervorgehoben *)

| Parameter | Juvenile Mäusebussarde | | Adulte Mäusebussarde | | Seeadler | | Schleiereulen | |
|-------------|---------------------------|--------|-------------------------|--------|----------|--------|---------------|-------|
| | r_s | p | r_s | p | r_s | p | r_s | p |
| Gewicht | 0,223 | 0,345 | 0,111 | 0,641 | 0,760* | 0,003* | 0,173 | 0,726 |
| Diaphyse | | | | | | | | |
| Kortexdicke | -0,257 | 0,274 | 0,499* | 0,025* | 0,287 | 0,343 | 0,035 | 0,929 |
| Dichte | 0,386 | 0,092 | 0,162 | 0,495 | 0,394 | 0,183 | 0,091 | 0,817 |
| Rohasche | 0,450* | 0,047* | 0,022 | 0,927 | 0,171 | 0,577 | 0,598 | 0,089 |
| Kalzium | 0,617* | 0,004* | -0,066 | 0,782 | 0,407 | 0,168 | -0,043 | 0,912 |
| Phosphor | 0,287 | 0,220 | 0,053 | 0,824 | 0,281 | 0,352 | 0,282 | 0,462 |
| Magnesium | -0,205 | 0,386 | -0,220 | 0,352 | -0,605* | 0,027* | -0,077 | 0,843 |
| Kupfer | 0,040 | 0,869 | -0,005 | 0,982 | -0,171 | 0,577 | 0,017 | 0,965 |
| Zink | 0,007 | 0,976 | 0,212 | 0,370 | -0,280 | 0,355 | -0,386 | 0,304 |

4.7.2 Korrelation der Tibiotarsusparameter

Die Korrelation der Dichte von Tibiotarsi mit Parametern der Knochenzusammensetzung ist in Tabelle 43 angegeben. Die Dichte korrelierte in den Gruppen jeweils mit einem der Mineralstoffe, allerdings unterschied sich diese Korrelation bei den Gruppen

Tabelle 43: Korrelationskoeffizient nach Spearman (r_s) und p-Werte (p) der Dichte der Tibiotarsi der Vogelarten dieser Studie mit verschiedenen Parametern der Knochenzusammensetzung (signifikante Korrelationen hervorgehoben *)

| Parameter | Juvenile Mäusebussarde | | Adulte Mäusebussarde | | Seeadler | | Schleiereulen | |
|----------------------|---------------------------|--------|-------------------------|--------|----------|--------|---------------|--------|
| | r_s | p | r_s | p | r_s | p | r_s | p |
| Trocken- substanz | 0,307 | 0,188 | -0,165 | 0,488 | 0,485 | 0,093 | 0,650 | 0,058 |
| Rohasche | -0,069 | 0,772 | 0,301 | 0,197 | 0,397 | 0,179 | 0,217 | 0,576 |
| Kalzium | -0,672* | 0,001* | -0,040 | 0,868 | 0,215 | 0,480 | 0,117 | 0,765 |
| Phosphor | -0,079 | 0,740 | 0,226 | 0,337 | 0,519 | 0,069 | -0,083 | 0,831 |
| Magnesium | -0,206 | 0,384 | 0,043 | 0,856 | 0,073 | 0,812 | -0,510 | 0,160 |
| Kupfer | 0,054 | 0,820 | -0,570* | 0,009* | -0,425 | 0,148 | 0,895* | 0,001* |
| Zink | -0,014 | 0,955 | 0,127 | 0,593 | 0,571* | 0,042* | 0,200 | 0,606 |

In Tabelle 44 sind die Korrelationen des Rohaschegehalts von Tibiotarsi dargestellt. Bei den Tieren aller Gruppen korrelierte die Rohasche mit dem Phosphorgehalt. Weitere Korrelationen variierten in den Gruppen.

Tabelle 44: Korrelationskoeffizient nach Spearman (r_s) und p-Werte (p) des Rohaschegehalts der Tibiotarsi der Vogelarten dieser Studie mit verschiedenen Parametern der Knochenzusammensetzung (signifikante Korrelationen hervorgehoben *)

| Parameter | Juvenile Mäusebussarde | | Adulte Mäusebussarde | | Seeadler | | Schleiereulen | |
|-----------|---------------------------|--------|-------------------------|---------|----------|--------|---------------|--------|
| | r_s | p | r_s | p | r_s | p | r_s | p |
| Kalzium | 0,236 | 0,317 | 0,315 | 0,176 | 0,231 | 0,448 | -0,150 | 0,700 |
| Phosphor | 0,445* | 0,049* | 0,726* | <0,001* | 0,654* | 0,015* | 0,667* | 0,050* |
| Magnesium | -0,075 | 0,755 | 0,233 | 0,324 | 0,347 | 0,246 | -0,778* | 0,014* |
| Kupfer | 0,254 | 0,280 | 0,174 | 0,462 | -0,665* | 0,013* | 0,477 | 0,194 |
| Zink | -0,122 | 0,609 | 0,136 | 0,569 | 0,060 | 0,845 | 0,000 | 1,000 |

In Tabelle 45 ist die Korrelation des maximalen Drehmoments der Tibiotarsi mit den anderen Parametern angegeben. Bei den Seeadlern und den Schleiereulen bestand eine signifikante, positive Korrelation zum Gewicht der Diaphyse. Bei den juvenilen Mäusebussarden war keine signifikante Korrelation nachweisbar.

Tabelle 45: Korrelationskoeffizient nach Spearman (r_s) und p-Werte (p) des maximalen Drehmoments der Tibiotarsi der Vogelarten dieser Studie mit morphologischen Parametern, Dichte und verschiedenen Parametern der Knochenzusammensetzung (signifikante Korrelationen hervorgehoben *)

| Parameter | Juvenile Mäusebussarde | | Adulte Mäusebussarde | | Seeadler | | Schleiereulen | |
|------------------|------------------------|-------|----------------------|--------|----------|--------|---------------|--------|
| | r_s | p | r_s | p | r_s | p | r_s | p |
| Gewicht Diaphyse | 0,253 | 0,297 | 0,126 | 0,597 | 0,676* | 0,011* | 0,820* | 0,007* |
| Kortexdicke | 0,190 | 0,437 | 0,262 | 0,265 | 0,349 | 0,242 | 0,204 | 0,598 |
| Dichte | -0,042 | 0,864 | -0,178 | 0,454 | 0,273 | 0,367 | 0,383 | 0,308 |
| Rohasche | 0,407 | 0,084 | -0,465* | 0,004* | 0,500 | 0,082 | 0,333 | 0,381 |
| Kalzium | 0,031 | 0,901 | -0,354 | 0,125 | 0,143 | 0,642 | 0,450 | 0,224 |
| Phosphor | 0,411 | 0,081 | -0,620* | 0,004* | 0,088 | 0,775 | -0,250 | 0,516 |
| Magnesium | -0,312 | 0,194 | -0,103 | 0,665 | 0,234 | 0,442 | -0,377 | 0,318 |
| Kupfer | 0,444 | 0,057 | -0,115 | 0,629 | -0,357 | 0,231 | 0,234 | 0,544 |
| Zink | -0,052 | 0,833 | -0,369 | 0,109 | 0,060 | 0,845 | 0,167 | 0,668 |

Die Korrelation der Steifigkeit der Tibiotarsi mit den anderen Parametern ist in Tabelle 46 wiedergegeben. Bei den Mäusebussarden war keine signifikante Korrelation der Steifigkeit nachweisbar. Bei den Seeadlern und Schleiereulen korrelierte die Steifigkeit signifikant mit dem Gewicht der Diaphyse.

Tabelle 46: Korrelationskoeffizient nach Spearman (r_s) und p-Werte (p) der Steifigkeit der Tibiotarsi der Vogelarten dieser Studie mit morphologischen Parametern, Dichte und verschiedenen Parametern der Knochenzusammensetzung (signifikante Korrelationen hervorgehoben *)

| Parameter | Juvenile Mäusebussarde | | Adulte Mäusebussarde | | Seeadler | | Schleiereulen | |
|------------------|------------------------|-------|----------------------|-------|----------|--------|---------------|--------|
| | r_s | p | r_s | p | r_s | p | r_s | p |
| Gewicht Diaphyse | -0,004 | 0,988 | 0,037 | 0,875 | 0,675* | 0,011* | 0,825* | 0,006* |
| Kortexdicke | 0,429 | 0,067 | -0,066 | 0,781 | 0,450 | 0,123 | 0,336 | 0,377 |
| Dichte | 0,252 | 0,298 | -0,215 | 0,362 | 0,017 | 0,957 | 0,164 | 0,673 |
| Rohasche | 0,246 | 0,309 | -0,005 | 0,982 | 0,421 | 0,152 | 0,493 | 0,178 |
| Kalzium | -0,173 | 0,480 | -0,064 | 0,788 | 0,073 | 0,814 | 0,329 | 0,388 |
| Phosphor | 0,209 | 0,390 | -0,234 | 0,321 | 0,025 | 0,935 | 0,037 | 0,926 |
| Magnesium | -0,024 | 0,923 | 0,104 | 0,662 | 0,127 | 0,679 | -0,495 | 0,175 |
| Kupfer | 0,319 | 0,184 | 0,331 | 0,154 | -0,187 | 0,541 | 0,018 | 0,963 |
| Zink | -0,292 | 0,226 | -0,044 | 0,854 | -0,153 | 0,617 | 0,128 | 0,743 |

4.7.3 Korrelation der Untersuchungsergebnisse von Humerus und Tibiotarsus

Die Zusammenhänge der ermittelten Ergebnisse der Humeri und Tibiotarsi sind jeweils in den entsprechenden Unterkapiteln 4.3 bis 4.6 angegeben.

4.7.4 Einfluss des Ernährungszustandes

Bei keinem der Tiere hatte der Ernährungszustand einen signifikanten Einfluss auf die verschiedenen Knochenparameter des Humerus. Die Korrelation des Ernährungszustandes mit den Parametern der Humeri ist in Tabelle 47 angegeben.

Tabelle 47: Korrelationskoeffizient nach Spearman (r_s) und p-Werte (p) des Ernährungszustandes der Vogelarten dieser Studie mit verschiedenen Parametern der Knochenzusammensetzung und der mechanischen Belastbarkeit der Humeri (signifikante Korrelationen hervorgehoben *)

| Parameter | Juvenile Mäusebussarde | | Adulte Mäusebussarde | | Seeadler | | Schleiereulen | |
|--------------------|---------------------------|-------|-------------------------|-------|----------|-------|---------------|-------|
| | r_s | p | r_s | p | r_s | p | r_s | p |
| Rohasche | -0,159 | 0,503 | 0,199 | 0,399 | -0,278 | 0,357 | 0,311 | 0,416 |
| Kalzium | 0,028 | 0,906 | 0,388 | 0,091 | -0,149 | 0,627 | -0,105 | 0,787 |
| Phosphor | -0,156 | 0,510 | -0,070 | 0,769 | -0,073 | 0,814 | 0,414 | 0,268 |
| Magnesium | 0,063 | 0,791 | 0,023 | 0,925 | 0,327 | 0,276 | -0,416 | 0,266 |
| Kupfer | 0,098 | 0,680 | 0,199 | 0,401 | -0,073 | 0,814 | 0,311 | 0,416 |
| Zink | -0,147 | 0,536 | 0,047 | 0,845 | 0,250 | 0,411 | -0,364 | 0,336 |
| Max. Drehmoment | -0,252 | 0,284 | -0,013 | 0,955 | -0,369 | 0,214 | 0,207 | 0,593 |
| Steifigkeit | -0,231 | 0,326 | -0,151 | 0,524 | -0,379 | 0,201 | 0,053 | 0,892 |

Der Ernährungszustand der Vögel hatte bei juvenilen Mäusebussarden und Schleiereulen keinen signifikanten Einfluss auf die Parameter der Tibiotarsi. Adulte Mäusebussarde wiesen eine signifikante positive Korrelation des Ernährungszustandes mit dem Rohaschegehalt der Tibiotarsi auf. Beim Ernährungszustand der Seeadler war eine signifikante negative Korrelation zum maximalen Drehmoment der Tibiotarsi erkennbar. Die Ergebnisse sind in Tabelle 48 dargestellt.

Tabelle 48: Korrelationskoeffizient nach Spearman (r_s) und p-Werte (p) des Ernährungszustandes der Vogelarten dieser Studie mit verschiedenen Parametern der Knochenzusammensetzung und der mechanischen Belastbarkeit der Tibiotarsi (signifikante Korrelationen hervorgehoben *)

| Parameter | Juvenile Mäusebussarde | | Adulte Mäusebussarde | | Seeadler | | Schleiereulen | |
|-----------------|------------------------|-------|----------------------|--------|----------|--------|---------------|-------|
| | r_s | p | r_s | p | r_s | p | r_s | p |
| Rohasche | 0,136 | 0,568 | 0,481* | 0,032* | -0,079 | 0,798 | 0,518 | 0,154 |
| Kalzium | -0,339 | 0,144 | 0,176 | 0,459 | 0,091 | 0,768 | -0,311 | 0,416 |
| Phosphor | -0,237 | 0,314 | 0,431 | 0,054 | -0,151 | 0,622 | 0,207 | 0,593 |
| Magnesium | 0,256 | 0,275 | 0,048 | 0,842 | 0,021 | 0,945 | -0,208 | 0,591 |
| Kupfer | -0,063 | 0,792 | 0,023 | 0,921 | -0,067 | 0,829 | 0,364 | 0,336 |
| Zink | -0,265 | 0,258 | 0,082 | 0,731 | -0,139 | 0,650 | -0,207 | 0,593 |
| Max. Drehmoment | -0,181 | 0,458 | -0,413 | 0,070 | -0,569* | 0,042* | 0,104 | 0,791 |
| Steifigkeit | -0,063 | 0,797 | -0,284 | 0,225 | -0,455 | 0,118 | 0,000 | 1,000 |

4.8 Histologischer Aufbau von Humerus und Tibiotarsus bei Mäusebussarden

Histologisch sind Humerus und Tibiotarsus nahezu identisch aufgebaut. In beiden Knochen ist die Spongiosa, vor allem in der Epiphyse, vergleichbar angeordnet und die Diaphyse weist einen vierschichtigen Aufbau auf. Allerdings unterschieden sich Humerus und Tibiotarsus in der Dicke der Kompakta und der Form des Querschnitts. Der Humerus war im Querschnitt runder und die Kompakta dünner, während die des Tibiotarsus dicker und im Querschnitt eher oval war. Weiter unterschieden sie sich in der Menge des laminaren Knochengewebes. Laminares Knochengewebe enthielt der Humerus mehr, während es dem Tibiotarsus nahezu fehlte, dieser aber eine gleichmäßigere Ausrichtung der Kollagenfasern aufwies. Der Markraum vom Humerus war luftgefüllt (Abb. 11, 13 und 14), während der des Tibiotarsus Knochenmark enthielt (Abb. 10 und 15).

Die aus Kompakta bestehende Diaphyse war außen von dünnem Periost bedeckt und an der Innenfläche mit Endost ausgekleidet. Sowohl Periost als auch Endost bestanden aus flachen Bindegewebszellen und das Endost erschien dünner. Anhand von Farbunterschieden konnten beim Periost eine äußere, zellarme und eine innere, zellreiche Schicht differenziert werden. In der Diaphyse konnten in Humerus und Tibiotarsus vier Knochenschichten abgegrenzt werden (Abb. 10 und 11).



Abbildung 10: Längsschnitt der Tibiotarsusdiaphyse eines adulten, männlichen Mäusebussards (Trichrom-Färbung, 200fache Vergrößerung), Zerreißungsartefakte in der marknahen Kompakta

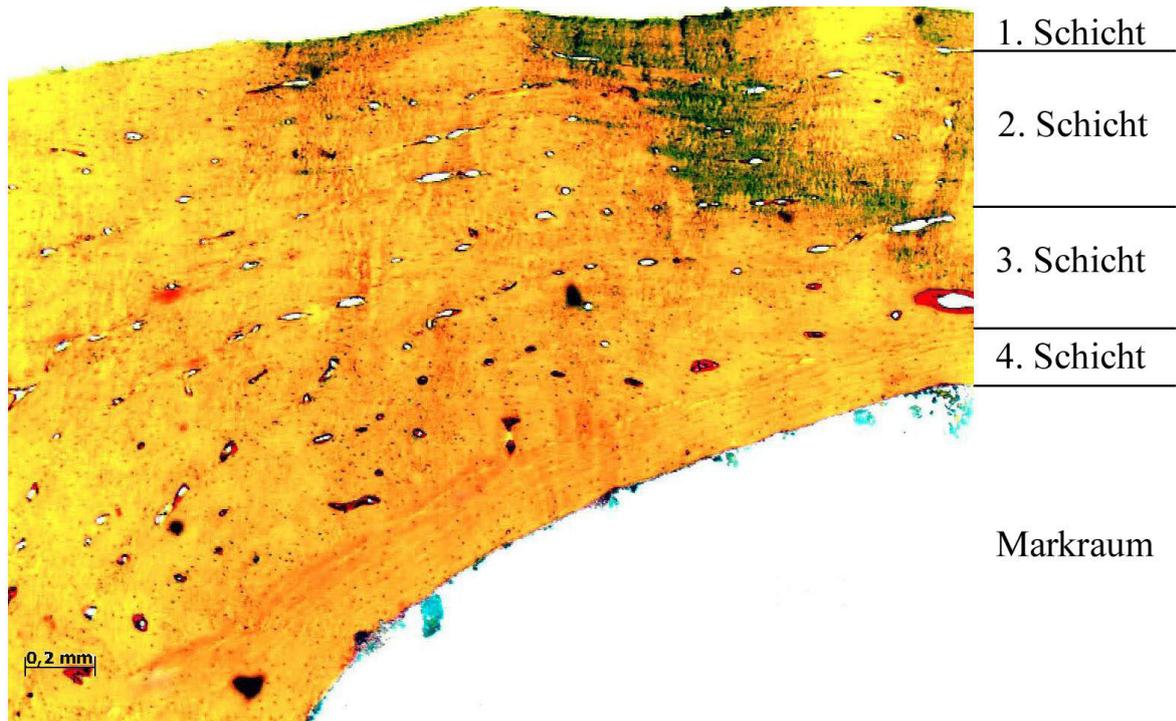


Abbildung 11: Längsschnitt der Humerusdiaphyse eines adulten, männlichen Mäusebussards (Pentachrom-Färbung, 50fache Vergrößerung)

Die äußerste Schicht der Diaphyse wurde von parallel zur Knochenoberfläche und Periost verlaufendem, eng gepackten, ringförmig orientierten Lamellenknochen gebildet. Die Knochenlamellen wiesen eine gleichmäßige Verteilung über die gesamte äußere Schicht auf. In der folgenden Schicht war der Knochen geflechtartig aufgebaut, ohne eine klare Anordnung aufzuweisen und entsprach dem Bild eines retikulären Knochens. Diese Schicht sieht im Längsschnitt wellenförmig mit einer annähernd symmetrischen Verteilung von Knochenkanälen aus. Den Übergang der ersten zur zweiten Schicht sowie den geflechtartigen Aufbau der zweiten Schicht zeigt Abbildung 12.



Abbildung 12: Längsschnitt der Humerusdiaphyse eines adulten, männlichen Mäusebussards (Pentachrom-Färbung, 200fache Vergrößerung)

Die dritte Schicht wies eine gleichförmige, teppich- oder gewebeartige Knochenstruktur auf, die als laminarer Knochen beschrieben werden kann. Sie enthielt längs zum Knochen angeordnete primäre Osteone oder Haver'sche Systeme mit dem typischen Zentralkanal mit Blutgefäß. Die Knochenblätter wechselten sich mit planen Gefäßsinus ab. In dieser Schicht verliefen zudem anastomosierende Gefäßkanäle, die Volkmann'schen Kanäle. Das Gefäßnetzwerk war schichtweise und vorwiegend parallel zum Periost angeordnet. In Richtung Epiphysen waren wenige sekundäre Osteone zu finden, die geringer mineralisiert waren als primäre Osteone.

Die vierte Schicht entsprach im Aufbau größtenteils der ersten. Sie verlief parallel zum Endost und bestand auch aus eng gepacktem, ringförmig verlaufenden Lamellenknochen mit longitudinalem Faserverlauf mit nur wenigen Osteonen. Sie erschien etwas breiter als die äußere Schicht. In Abbildung 13 sind im Querschnitt die dritte und die vierte Schicht dargestellt. Besonders die kompaktere Anordnung und der unterschiedlich ausgerichtete, longitudinale Faserverlauf der inneren Schicht im Vergleich zur dritten Schicht, die die typischen primären Osteone enthält, sind sichtbar.

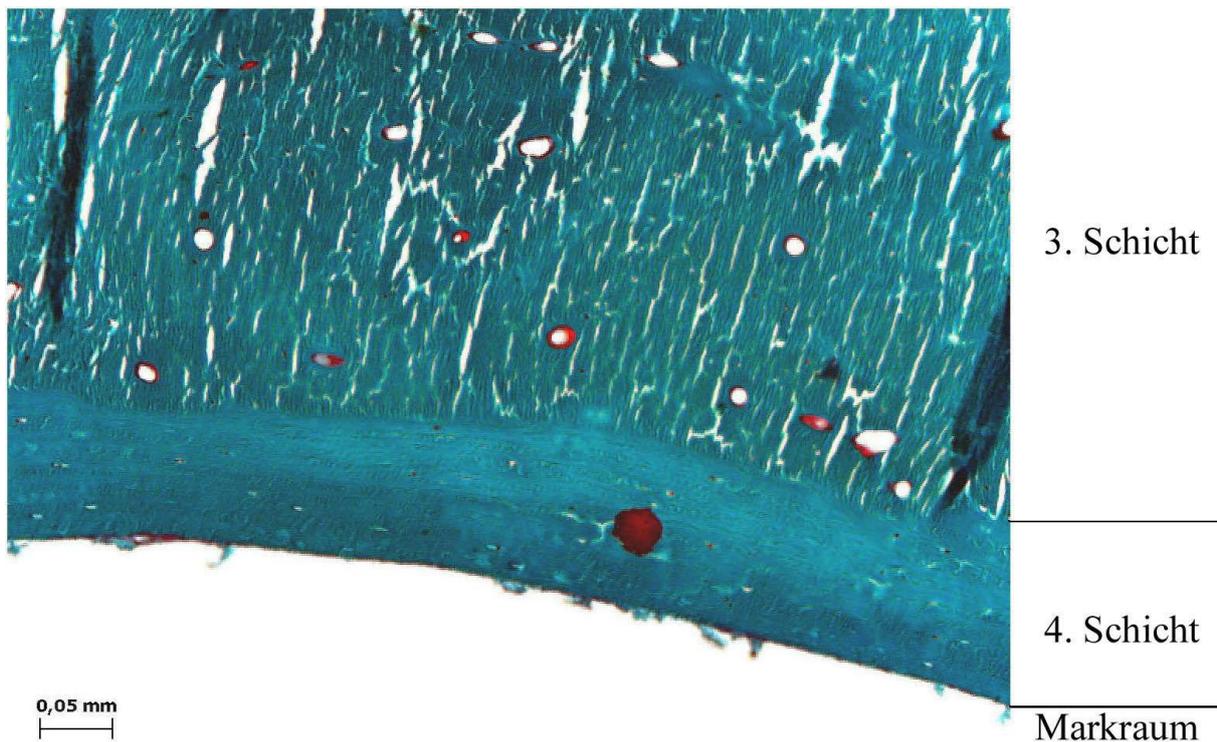


Abbildung 13: Querschnitt der Humerusdiaphyse eines adulten, männlichen Mäusebussards (Trichrom-Färbung, 100fache Vergrößerung), Zerreißungsartefakte in der 3. Schicht

Die Epiphyse der Knochen war im Gegensatz zur Diaphyse nicht von Periost bedeckt. Am Übergang der Diaphyse zur Epiphyse geht das Periost in die Gelenkkapsel über. Die Epiphysen bestanden aus Spongiosa, die von einer dünnen Knochenrinde umgeben war. Diese Knochenrinde (Kortikalis) war längs ausgerichtet. Die Spongiosa stellte sich als ein Netzwerk aus Knochenröhrchen oder Knochenbälkchen dar und enthielt nur wenig Osteoid. In Abbildung 14 sind eine Gelenkfläche sowie die Anordnung der Spongiosa in der distalen Epiphyse des Humerus dargestellt.



Abbildung 14: Längsschnitt durch die distale Humerusepiphyse eines adulten, männlichen Mäusebussards (Pentachrom-Färbung, 50fache Vergrößerung)

Während durch die Trichrom- und die Pentachromfärbung Details des histologischen Aufbaus der Knochen herausgearbeitet wurden, brachte die kombinierte von Kossa/Safranin-O-Färbung durch Schwarzfärbung der mineralisierten Knochenanteile den Nachweis, dass der Großteil der Knochensubstanz bei den Vögeln mineralisiert war (Abb. 15).



Abbildung 15: Längsschnitt durch den distalen Tibiotarsus eines adulten, männlichen Mäusebussards [von Kossa/Safranin-O-Färbung, Vergrößerung: Lupe (schwarz = mineralisierte Knochensubstanz, rot = nicht-mineralisierte Knochenanteile)]

5 Diskussion

5.1 Patientengut

Ziel dieser Arbeit war es, Basisdaten zu Knochenzusammensetzung, Knochendichte, histologischem Aufbau und mechanischer Belastbarkeit langer Röhrenknochen von Mäusebussarden, Seeadlern und Schleiereulen unterschiedlichen Alters und Geschlechts zu ermitteln. In der Studie wurden jeweils rechter Humerus und rechter Tibiotarsus von insgesamt 62 Vögeln (40 Mäusebussarde, 13 Seeadler und neun Schleiereulen) dahingehend untersucht. Das Geschlechterverhältnis war bei den Tieren der drei Vogelarten ausgewogen. Bei Mäusebussarden wurde außerdem die gleiche Anzahl juveniler und adulter Tiere untersucht.

Die Tiere, deren Knochen untersucht wurden, waren wegen infauster Prognose euthanasiert worden oder sind verstorben. Ob die Ergebnisse der Studie durch die Erkrankungen der Vögel beeinflusst sind, ist nicht sicher auszuschließen. Es ist nicht zulässig für eine derartige Studie gesunde Tiere zum Vergleich zu töten. Die Gefangenschaftsdauer der Vögel der Studie war so kurz (im Durchschnitt acht Tage), so dass dadurch kaum die zuvor genannten Parameter zu beeinflussen waren.

Erkrankte, frei lebende Greifvögel und Eulen werden wohl erst einige Zeit nach Krankheitsbeginn aufgefunden, deswegen war es wichtig den Ernährungszustand der Tiere zu erheben. Bei keinem Tier der drei Arten erschienen die analysierten Parameter des Humerus durch den Ernährungszustand beeinflusst. Am Tibiotarsus dagegen war bei adulten Mäusebussarden eine signifikant positive Korrelation mit dem Rohaschegehalt und bei Seeadlern eine signifikant negative Korrelation zum maximalen Drehmoment feststellbar. Diese Korrelationen waren zuvor signifikant aber so gering, dass sie wohl keine klinische Relevanz haben. Bedacht werden muss, dass beim Hausgeflügel sowohl die Zusammensetzung des Futters als auch das Gewicht der Vögel die Zusammensetzung und mechanische Belastbarkeit langer Röhrenknochen beeinflussen (WOHL et al., 1998; CUBO und CASINOS, 2000; LIU et al., 2003).

5.2 Gewicht der Knochendiaphyse und Kortexdicke

Schleiereulen wiesen das geringste und Seeadler das höchste Knochengewicht auf. Die Differenz der Diaphysengewichte bei den drei Arten ergibt sich aus den unterschiedlichen Größen und Gewichten. Sowohl bei Mäusebussarden als auch bei Seeadlern war der Humerus schwerer als der Tibiotarsus. Das ist ebenfalls dem Größenunterschied der Knochen geschuldet. In Übereinstimmung mit YALCIN et al. (2001) konnte zumindest für den

Mäusebussard nachgewiesen werden, dass mit höherem Alter auch das Knochengewicht höher war. Im Hinblick auf das Geschlecht waren nur von Seeadlern die Diaphysen beider Knochen bei männlichen Tieren signifikant leichter als bei weiblichen. Dies ergibt sich, weil bei dieser Vogelart Weibchen größer sind (MEBS und SCHMIDT, 2006), während dieser sexuelle Größendimorphismus bei Mäusebussarden und Schleiereulen deutlich geringer ausgeprägt ist (MEBS und SCHMIDT, 2006; MEBS und SCHERZINGER, 2008). Damit lässt sich gut erklären, dass bei diesen Spezies im Hinblick auf das Geschlecht Diaphysengewichte nicht signifikant voneinander abweichen.

Die Dicke der Kortizes von Humerus und Tibiotarsus nahm mit zunehmender Größe der Spezies zu (Schleiereule < Mäusebussard < Seeadler). Dies kann dadurch bedingt sein, dass größere Knochen auch dickere Kortizes als kleinere haben (YALCIN et al., 2001). YALCIN et al. (2001) stellten an bis zu 48 Tage alten Broilern fest, dass juvenile Tiere dünnere Kortizes haben als adulte. Dies trifft für Mäusebussarde nach der vorliegenden Studie nicht zu, da kein signifikanter Unterschied der Kortexdicke von Humeri juveniler und adulter Tiere gefunden wurde. Ob dieses Ergebnis Broiler-Küken – juvenile Mäusebussarde aussagekräftig ist, muss offen bleiben, da Broiler mit 48 Tagen keinesfalls ausgewachsen sind, während juvenile Mäusebussarde bereits als ausgewachsen anzusehen sind. Die Kortexdicke der Tibiotarsi von Mäusebussarden war dagegen bei juvenilen Tieren signifikant geringer als bei adulten. Das Geschlecht hatte bei keiner der drei Arten im Hinblick auf diesen Parameter eine Signifikanz, wie das auch schon für Broiler festgestellt wurde (YALCIN et al., 2001). SUHAI et al. (2006) fanden bei Nebelkrähen und Elstern, dass pneumatisierte Knochen eine geringere Kortexdicke aufweisen als markgefüllte Knochen. Dies widerspricht nach den eigenen Untersuchungen den Ergebnissen von Mäusebussarden. Deren pneumatisierte Humeri hatten dickere Kortizes als die markgefüllten Tibiotarsi. Dieser Unterschied war signifikant aber gering, so dass er vermutlich keine Relevanz hat. Bei den Seeadlern und Schleiereulen unterschieden sich die Kortexdicken von Humeri und Tibiotarsi nicht.

5.3 Chemische Zusammensetzung der Knochen

5.3.1 Trockensubstanz

Die Trockensubstanzgehalte von 77 % und 91 % der drei Vogelarten dieser Studie waren deutlich höher als die in der Literatur mit 45 % und 88 % bei bis zu 48 Tage alten Broiler-Küken angegebenen (YALCIN et al., 2001). Juvenile Mäusebussarde hatten einen signifikant niedrigeren Trockensubstanzgehalt der Tibiotarsi als adulte Tiere. Im Median war der Trockensubstanzgehalt jedoch auch bei juvenilen Mäusebussarden deutlich höher als bei

Broilern. Der Trockensubstanzgehalt in Knochensammelproben eines Falken betrug 74 %, der eines Bussards 77 % (WEISKE, 1889). Greifvogelknochen enthalten somit weniger Wasser als die von Broilern. Ob diese Ergebnisse haltungs- oder fütterungsabhängig sind oder dem jungen Alter der Broiler geschuldet sind, muss offen bleiben, da in der zugänglichen Literatur keine weiteren Angaben zum Trockensubstanzgehalt gefunden werden konnten.

Der Trockensubstanzgehalt in Knochen juveniler Mäusebussarde war signifikant niedriger als bei adulten. Dies stimmte mit Untersuchungen von YALCIN et al. (2001) und KORFMANN et al. (2003) an Broilern und Putern überein. Während des Wachstums werden die Knochen mineralisiert (NICKEL et al., 1992), so dass mit dem Alter ihr Mineralstoffgehalt steigt (FIELD et al., 1974; KORFMANN, 2003) und somit (KIRCHGEBNER, 1997) gut der altersbedingte Anstieg an Trockensubstanz erklärbar ist.

5.3.2 Rohasche

Nach RATH et al. (1999) sind in Knochen verschiedener Vogelarten die Rohaschegehalte vergleichbar. Bei den drei Vogelarten der eigenen Studie betragen sie 60 % bis 68 %. Die in Humeri und Tibiotarsi von Seeadlern waren signifikant niedriger als die bei Mäusebussarden und Schleiereulen. Allerdings entsprechen die Ergebnisse denen anderer Vogelarten. Für Sittiche und Papageien (Wellensittiche, Nymphensittiche, Agaporniden, Amazonen, Graupapageien) betragen die Rohaschegehalte 58 % bis 60 % (RABEHL, 1995), bei einem Falken und Bussard 64 % (WEISKE, 1889) und bei Hühnern und Puten 60 % bis 70 % (CRESPO et al., 2002; KIM et al., 2004).

Unterschiede ergaben sich dagegen in der eigenen Studie im Hinblick auf das Alter. Bei juvenilen Mäusebussarden war der Rohaschegehalt in Humeri und Tibiotarsi signifikant geringer als der adulter Vögel. Dies deckt sich mit Ergebnissen von LETERRIER und NYS (1992), bei denen an Hühnerknochen mit zunehmendem Alter der Rohaschegehalt ebenfalls ansteigt und der zunehmenden Mineralisierung im Laufe des Wachstums geschuldet ist (NICKEL et al., 1992). Interessant ist, dass weibliche Hühner einen höheren Rohaschegehalt aufweisen als männliche (RATH et al., 1999), während dies bei den Vogelarten dieser Studie ohne Signifikanz war. Der Rohaschegehalt ist vom Mineralstoffgehalt geprägt (KIRCHGEBNER, 1997), dies könnte den geschlechtsspezifischen Unterschied bei Hühnern erklären, der durch die intensive Legetätigkeit weiblicher Tiere verursacht sein kann. Allerdings geben RATH et al. (1999) nicht an, ob die Hühner ihrer Studie Eier legten, auch wenn sie einer kommerziellen Haltung entnommen wurden und medullären Knochen aufwiesen, die eine Eiablage wahrscheinlich sein lassen. Nach RATH et al. (1999) sind die Rohaschegehalte verschiedener

Knochen eines Tieres vergleichbar, wie dies auch für Mäusebussarde und Seeadler an Humeri und Tibiotarsi festgestellt wurde. Allerdings war für Schleiereulen in Humeri ein signifikant höherer Rohaschegehalt als in Tibiotarsi festzustellen.

5.3.3 Rohfett

Der Rohfettgehalt wurde aus 19 Knochen verschiedener Tiere bestimmt. Mit weniger als 2 % der Trockensubstanz war er bei den drei Vogelarten sehr niedrig, so dass dies bei den weiteren Untersuchungen vernachlässigt wurde, weil sich daraus verglichen mit unvermeidbaren Probenentnahme- und Analysefehlern nur geringgradige Ungenauigkeiten ergeben dürften. Im Median lag der Rohfettgehalt in Knochen von Schleiereulen mit 1 % der Trockensubstanz höher als der in Mäusebussard- und Seeadlerknochen mit 0,3 % und 0,2 %. In der Literatur sind diese Werte bei Mastgeflügel mit 26 % bis 31 % der Trockensubstanz (RODENHOFF und BRONSCH, 1971) und Greifvögeln (WEISKE, 1889) (Bussard 17 %, Falke 18 %) wesentlich höher. Der Rohfettgehalt in Knochen ist abgesehen von individuellen Schwankungen auch fütterungsabhängig. Das Nahrungsspektrum unterscheidet sich bei Geflügel und karnivoren Greifvögeln erheblich. WEISKES (1889) Ergebnisse beruhen auf je einem Bussard und Falken ohne Herkunftsangaben. Denkbar ist, dass diese Tiere in Volieren gehalten wurden und anders als in der Wildbahn gefüttert wurden. In der vorliegenden Studie wurden die zu untersuchenden Knochen sorgfältig gereinigt und Weichgewebe sowie Knochenmark möglichst entfernt. Anzunehmen ist, dass damit auch der Rohfettgehalt reduziert wurde, da die Studien an Gesamtskeletten wohl zu höheren Rohfettgehalten führen würden, da insbesondere gelbes Knochenmark älterer Tiere viel Fett enthält (KÖNIG und LIEBICH, 2001).

Nach FIELD et al. (1974) variiert der Rohfettgehalt in Knochen von Hühnern altersabhängig nicht. Die eigenen Ergebnisse wurden im Hinblick auf Geschlecht und Alter wegen geringer Fallzahl nicht statistisch analysiert.

5.3.4 Mineralstoffe

5.3.4.1 Kalzium

Nach den eigenen Studien betrug der Kalziumgehalt in Humeri und Tibiotarsi im Median zwischen 204 und 260 g/kg Rohasche. Dies ist vergleichbar mit dem Kalziumgehalt von Ziervögeln mit 200 bis 221 g/kg (RABEHL, 1995), Wildvögeln mit 229 g/kg (CUBO und CASINOS, 2000), Mastputern mit 237 g/kg (KORFMANN, 2003), Hühnern mit 236 g/kg und Gänsen mit 269 g/kg (BILTZ und PELLEGRINO, 1969).

Übereinstimmend mit Untersuchungen an Geflügel (FIELD et al., 1974) war der Kalziumgehalt in Knochen juveniler Mäusebussarde geringer als in denen adulter. Dies ist als Folge der fortschreitenden Mineralisierung während des Wachstums und Älterwerdens zu sehen (FIELD et al., 1974; NICKEL et al., 1992). In den eigenen Untersuchungen konnten geschlechtsrelevant in Humeri und Tibiotarsi von Mäusebussarden und Seeadlern keine Differenzen im Kalziumgehalt entdeckt werden. Interessant ist dagegen, dass VO et al. (1978) allerdings in Ossa femorum männlicher adulter Hühner weniger Kalzium fanden als in denen weiblicher. Dies trifft in den eigenen Untersuchungen signifikant in gleicher Weise auch für Humeri von Schleiereulen zu. Die vermehrte Kalziumeinlagerung in Humeri weiblicher Tiere könnte infolge der Fortpflanzungsaktivitäten entstehen, da während der Legeperiode hormonell bedingt die Kalziumdepots im medullären Knochen angelegt und mit jeder Eiablage mobilisiert werden (KRAMPITZ et al., 1983). Dies konnte mit den eigenen Fällen von weiblichen Schleiereulen nicht analysiert werden, da okkult bleiben musste, ob diese Vögel vor dem Tod Eier gelegt haben, zumal sie außerhalb der arttypischen Fortpflanzungszeit aufgefunden wurden und makroskopisch kein medullärer Knochen erkennbar war.

Bei Geflügel fanden TAYLOR et al. (1960) und FIELD et al. (1974) nur geringe Kalziumdifferenzen in verschiedenen Knochen. Dies deckt sich mit den eigenen Ergebnissen, da in Humeri und Tibiotarsi der drei Vogelarten keine signifikanten Kalziumdifferenzen gefunden wurden.

5.3.4.2 Phosphor

Die Phosphorgehalte in Rohasche von Humeri und Tibiotarsi differierten bei den drei Vogelarten der Studie signifikant (Seeadler < Mäusebussarde < Schleiereulen). Im Median lag die Phosphorkonzentration in Humeri bei 103,1 bis 118,4 g/kg Rohasche und in Tibiotarsi bei 100,7 bis 117,0 g/kg Rohasche. Diese Daten stimmen gut mit anderen Vogelarten überein. Ziervögel weisen Phosphorkonzentrationen von 102 bis 108 g/kg Rohasche (RABEHL, 1995), Wildvögel von 110 g/kg Rohasche (CUBO und CASINOS, 2000) und verschiedene Geflügelarten von 104 bis 167 g/kg Rohasche auf (BILTZ und PELLEGRINO, 1969; RODENHOFF und BRONSCH, 1971; CRESPO et al., 2002; KORFMANN, 2003).

Bei den eigenen juvenilen Mäusebussarden war der Phosphorgehalt in Humeri und Tibiotarsi signifikant geringer als der der adulten. Dies stimmt mit Ergebnissen von KORFMANN (2003) bei Putern überein. Sie wiesen alterskorreliert höhere Phosphorgehalte des Os femoris auf. Dies dürfte der zunehmenden Mineralisation von Knochen während des Wachstums und der Reifung des Skeletts geschuldet sein (NICKEL et al., 1992).

Im Hinblick auf das Geschlecht konnten in Humeri bei den drei Vogelarten keine Signifikanzen im Phosphorgehalt aufgedeckt werden, während dieser in Tibiotarsi recht variabel war. Männliche Schleiereulen wiesen im Tibiotarsus einen niedrigeren Phosphorgehalt auf als weibliche. Dies fanden VO et al. (1978) auch bei Hühnern, ohne dass dies erklärt werden kann.

Beim Geflügel differieren Phosphorgehalte in verschiedenen Knochen kaum (TAYLOR et al., 1960; FIELD et al., 1974). Dagegen enthielten Humeri von Mäusebussarden und Schleiereulen signifikant mehr Phosphor als Tibiotarsi. Nach FIELD et al. (1974) variiert der Phosphorgehalt in Rohasche von verschiedenen Knochen eines Säugetiers verglichen zum Geflügel erheblich. Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit lassen artspezifische Unterschiede vermuten.

Das Kalzium-Phosphor-Verhältnis beträgt für alle Tier- und damit auch Vogelarten etwa 2:1 (BILTZ und PELLEGRINO, 1969). Bei verschiedenen Papageienarten und Kanarienvögeln beträgt es im Durchschnitt 1,9:1 (RABEHL, 1995). Die eigenen Studienergebnisse bei einem Median des Kalzium-Phosphor-Verhältnisses von 2:1 bis 2,3:1 decken sich damit. Ob Alter und Geschlecht das Kalzium-Phosphor-Verhältnis mit beeinflussen, kann nicht beantwortet werden, zumal dazu auch Angaben in der Literatur fehlen. Bekannt ist, dass bei Vögeln die Konzentration von Kalzium und Phosphor mit zunehmendem Alter steigt und in Knochen weiblicher Tiere höher ist (FIELD et al., 1974; VO et al., 1978; KORFMANN, 2003), so dass das Kalzium-Phosphor-Verhältnis physiologisch wohl nur wenig schwankt.

5.3.4.3 Magnesium

BILTZ und PELLEGRINO (1969) geben an, dass der Magnesiumgehalt in Rohasche bei der Mehrzahl von verschiedenen Wirbeltieren vergleichbar hoch ist, während er bei Vögeln als sehr variabel angegeben ist. Die Magnesiumkonzentration in Knochen von Ziervögeln beträgt 2550 bis 3920 mg/kg Rohasche (RABEHL, 1995), von Wildvögeln 3600 mg/kg Rohasche (CUBO und CASINOS, 2000) und von verschiedenen Geflügelarten 2300 bis 4181 mg/kg Rohasche (BILTZ und PELLEGRINO, 1969; RODENHOFF und BRONSCH, 1971; VO et al., 1978). Der Magnesiumgehalt im Skelett eines Falken betrug 4700 mg/kg Rohasche (WEISKE, 1889). In der vorliegenden Studie lag er zwischen 2435 und 3745 mg/kg Rohasche vergleichbar zu denen der Literatur.

Beim Geflügel nimmt der Magnesiumanteil im Knochen mit zunehmendem Alter etwas ab (TAYLOR et al., 1960). Humeri juveniler Mäusebussarde wiesen bei den eigenen Ergebnissen einen höheren Magnesiumgehalt auf als die adulter Mäusebussarde. In Tibiotarsi konnte dagegen keine alterskorrelierte Abnahme der Magnesiumkonzentration bei Mäusebussarden

nachgewiesen werden. Nach Untersuchungen von VO et al. (1978) enthielten Ossa femorum männlicher Hühner weniger Magnesium als die weiblicher. Seeadler und Schleiereulen wiesen im Hinblick auf den Magnesiumgehalt weder im Humerus noch im Tibiotarsus auch das Geschlecht beachtend keine Signifikanzen auf. Dagegen konnte in Tibiotarsi männlicher Mäusebussarde ein signifikant niedrigerer Magnesiumgehalt als bei weiblichen nachgewiesen werden. Nach VO et al. (1978) sind die höheren Mineralstoffgehalte in Knochen weiblicher Hühner Folge der Legetätigkeit und hormoneller Besonderheiten, während Greifvögel und Eulen keine so intensive Legetätigkeit aufweisen und bei ihnen Mineralstoffgehalte wohl keine großen geschlechtsspezifischen Unterschiede haben.

Nach TAYLOR et al. (1960) sind Magnesiumgehalte einzelner Knochen eines Vogels etwa gleich. Das bestätigen die eigenen Studien an Humeri und Tibiotarsi von Seeadlern, während Humeri von Mäusebussarden und Tibiotarsi von Schleiereulen signifikant mehr Magnesium enthielten, allerdings nur in geringem Maße. Da nur ein Drittel des Magnesiums in Knochen fest ins Apatitgitter eingebaut ist (DRESSLER, 1971), können Knochenumbau und Schwankungen des Blutmagnesiumspiegels, z. B. durch Nahrungsaufnahme, den Gehalt im Knochen beeinflussen. Damit ließen sich die unterschiedlichen Magnesiumgehalte in verschiedenen Knochen von Mäusebussarden und Schleiereulen erklären.

5.3.4.4 Kupfer

In Knochen von Schleiereulen ließ sich signifikant mehr Kupfer als in denen von Mäusebussarden und Seeadlern finden. Trotz signifikanter Unterschiede bei den drei Vogelarten decken sich diese Ergebnisse mit 5,3 bis 17,2 mg/kg Rohasche etwa mit denen der Literatur. Nach RABEHL (1995) enthält das Skelett von Ziervögeln eine Kupferkonzentration von 8,1 bis 9,4 mg/kg Rohasche und das von Hühnern im Mittel 2,5 bis 10 mg/kg Rohasche (HILL, 1965; RODENHOFF und BRONSCH, 1971; LEDOUX et al., 1991). Diese Differenzen könnten fütterungskorreliert sein. Zudem muss bedacht werden, dass der Kupfergehalt maßgeblich vom Anteil der organischen Knochensubstanz abhängt, da daran der größte Teil des Kupfers gebunden ist (HILL, 1965). Da jüngere Tiere einen höheren organischen Knochenanteil haben, können sie auch höhere Kupferkonzentrationen aufweisen. Ob im Hinblick auf organische Knochensubstanz Artunterschiede bestehen, kann nicht beantwortet werden.

Nach DOYLE (1979) variiert der Kupfergehalt in Knochen altersrelevant sehr und nimmt nach HILL (1965) mit höherem Alter ab. Zumindest für Mäusebussarde konnte dahingehend kein signifikanter Altersunterschied festgestellt werden. HILL (1965) untersuchte Tiere im Alter

von einem Tag und drei Wochen ohne sie mit ausgewachsenen bzw. adulten Tieren zu vergleichen. In der vorliegenden Studie wurden juvenile Tiere, die das Großgefiederwachstum und Körperwachstum abgeschlossen hatten, analysiert, ohne dass dabei Altersspezifika entdeckt wurden. Ebenso konnten, wie in der Literatur zu Hühnern, kein signifikanter Geschlechtsunterschied der Kupferkonzentration nachgewiesen werden (HILL, 1965; VO et al., 1978).

5.3.4.5 Zink

Der Zinkgehalt in Hühnerknochen variiert nach Literaturangaben mit 25,5 mg/kg Rohasche (WEDEKIND und BAKER, 1990) bis 713 mg/kg Rohasche (SOUTHERN und BAKER, 1983) erheblich. Dies gilt auch für Sittiche und Papageien mit 205 bis 298 mg/kg Rohasche (RABEHL, 1995), für Puter mit 184,4 mg/kg (CRESPO et al., 2002) und für Hühner mit 167 mg/kg (RODENHOFF und BRONSCH, 1971). Auch bei den drei Vogelarten der eigenen Studien wurden signifikante Unterschiede (Schleiereulen < Mäusebussarde < Seeadler) gefunden, obwohl die Medianwerte für diese drei Vogelarten mit 170 bis 278 mg/kg Rohasche sich mit denen in der Literatur vergleichen lassen. Diese Unterschiede lassen sich mit Futter (SOUTHERN und BAKER, 1983; COOK et al., 1984) und Artunterschieden erklären. Wie auch beim Menschen (LAPPALAINEN et al., 1982) konnten in der vorliegenden Arbeit bei den drei Vogelarten weder ein Alters- noch ein Geschlechtseinfluss auf den Zinkgehalt in den Knochen nachgewiesen werden, während er bei männlichen Hühnern in Ossa femorum geringer war als bei weiblichen (VO et al., 1978). VO et al. (1978) führen dies auf die Legetätigkeit weiblicher Tiere zurück.

5.4 Knochendichte

In der vorliegenden Arbeit wurde die physikalische Knochendichte klassisch mit der Auftriebsmethode nach dem archimedischen Prinzip korrekt ermittelt, wie das methodisch nur an isolierten Knochen toter Tiere möglich ist. Die gewonnenen Werte sind aber durchaus als Basisdaten anzusehen, da sie auch mit Ergebnissen moderner, nicht-invasiver Verfahren wie der Dual-Röntgenabsorptiometrie (DEXA) und der peripheren, quantitativen Computertomographie (pQCT) übereinstimmen (KIM et al., 2004; KORVER et al., 2004; SCHREIWEIS et al., 2005). Künftig lassen sich auf Grundlage der eigenen Ergebnisse auch die an lebenden Tieren mit der pQCT gewonnenen Daten gut vergleichen.

Die Knochendichte von Humeri und Tibiotarsi bei Mäusebussarden war signifikant niedriger als die von Seeadlern. Dies traf auch für die Humeri von Mäusebussarden zu, deren Dichte

niedriger war als die der Schleiereulen. In der Literatur sind Werte von $0,36 \text{ g/cm}^3$ für Wellensittiche (ZULAUF-FISCHER et al., 2006) bis zu 1,1 und $1,8 \text{ g/cm}^3$ für Geflügel angegeben (HERZOG, 1968; LETERRIER und NYS, 1992; ZHANG und COON, 1997; RATH et al., 1999; FLEMING et al., 2004; KIM et al., 2004; SHAHNAZARI et al., 2006). Die Medianwerte betragen in den eigenen Studien 1,69 bis $2,01 \text{ g/cm}^3$. Sie entsprechen damit den Angaben der Literatur im oberen Bereich oder sind etwas höher. Greifvögel und Eulen haben sehr stabile und belastbare Knochen, die wohl der höheren Knochendichte geschuldet sind (LETERRIER und NYS, 1992). Zur Knochendichte trägt auch ihr Gehalt an Rohasche und Knochenmineralien bei (ZHANG und COON, 1997; ZOTTI et al., 2003). Der hohe Mineralisierungsgrad der Knochen der eigenen Studie ist histologisch belegt.

Nach LETERRIER und NYS (1992) sowie RATH et al. (1999) nimmt die Knochendichte bei Hühnern mit steigendem Alter zu, wie dies in der vorliegenden Arbeit auch bei Mäusebussarden nachgewiesen werden konnte. Nach RATH et al. (1999) und ZULAUF-FISCHER et al. (2006) ist die Knochendichte bei weiblichen Hühnern und Wellensittichen höher als bei männlichen. Dies bestätigen die Ergebnisse der drei Vogelarten der eigenen Untersuchungen nicht. ZULAUF-FISCHER et al. (2006) analysierten Wellensittiche während der Legetätigkeit, RATH et al. (1999) analysierten Hühner im Alter von 72 Wochen, ohne dass sie die Legeaktivität angaben. In der Legeperiode werden Mineralstoffe vermehrt in Knochen eingelagert (KRAMPITZ et al., 1983), so dass die Knochendichte ansteigt (SCHREIWEIS et al., 2005). Die weiblichen, adulten Tiere der eigenen Analysen wurden bis auf einen Mäusebussard außerhalb der arttypischen Fortpflanzungszeit aufgefunden und sie wiesen makroskopisch keinen medullären Knochen auf.

5.5 Mechanische Belastbarkeit

Die mechanische Belastbarkeit wird nicht selten mit Torsionsversuchen geprüft, da dabei der gesamte Knochen getestet wird (KAMKE und WALCHER, 1994). Torsionsversuche ergeben zudem zwei Messwerte, die im Ergebnis verschiedene mechanische Eigenschaften ausdrücken. Das maximale Drehmoment spiegelt die Belastbarkeit des Knochens wider (KAMKE und WALCHER, 1994), während die Steifigkeit den Zusammenhang zwischen der Belastung eines Knochens und seiner elastischen Verformung beschreibt (NORDIN und FRANKEL, 1980). Bei Vögeln werden besonders die Knochen der Flügel durch Torsionskräfte belastet (CUBO und CASINOS, 1998). Zudem beeinflusst die Torsionsbelastung maßgeblich den mikro- und makrostrukturellen Aufbau der Knochen (DE MARGERIE et al., 2005).

Die eigenen Ergebnisse können nur unter Vorbehalt mit Literaturangaben verglichen werden, da nur von CRESPO et al. (2000) für das maximale Drehmoment (Mittelwert 63 Nm) und die Steifigkeit (Mittelwert 5,4 Nm/°) von Ossa femorum von Putern Angaben zu finden waren.

Die mechanische Belastbarkeit steigt mit dem Körpergewicht (KNOWLES et al., 1993), wie auch in der vorliegenden Arbeit nachgewiesen wurde. Maximales Drehmoment als auch die Steifigkeit sind bei Schleiereulen am geringsten und bei Seeadlern am höchsten.

Die Knochen adulter Tiere weisen bei Säugetieren eine höhere Belastbarkeit und Steifigkeit auf, während die Kompakta jüngerer Tiere sich stärker elastisch deformieren kann (SCHWARZ, 1991). Die höhere mechanische Belastbarkeit von Hühnerknochen mit zunehmendem Alter stellten LETERRIER und NYS (1992), FLEMING et al. (1998) und YALCIN et al. (2001) fest. Dies stimmt mit den eigenen Ergebnissen überein. Sowohl Humeri als auch Tibiotarsi juveniler Mäusebussarde wiesen eine signifikant niedrigere mechanische Belastbarkeit auf als die adulter Tiere. Niedriger waren sowohl maximale Drehmomente als auch Steifigkeit beider Knochen. Erklärbar ist dies durch die Gewichtszunahme der Knochen mit dem Alter, dabei nimmt die Festigkeit proportional zu (RATH et al., 2000). Auch der Mineralisationsgrad und Gehalt an Kollagenquerverbindungen steigen mit dem Alter und bedingen eine höhere Belastbarkeit (CARTER und SPENGLER, 1982; NICKEL et al., 1992).

Nach RATH et al. (1999) haben adulte männliche Hühner, wie auch männliche Seeadler der eigenen Studie, eine signifikant geringere mechanische Belastbarkeit von Humeri und Tibiotarsi als weibliche. Dies konnte für Mäusebussarde und Schleiereulen geschlechtsspezifisch nicht nachgewiesen werden. Weibliche Seeadler sind größer und schwerer als männliche (MEBS und SCHMIDT, 2006), so dass die höhere mechanische Belastbarkeit der Knochen weiblicher Tiere damit erklärt werden kann. Mäusebussarde und Schleiereulen unterscheiden sich geschlechtsspezifisch in Hinsicht auf Größe weniger (GLUTZ VON BLOTZHEIM et al., 1989), so dass ihre mechanische Belastbarkeit der Knochen kaum differiert.

Verschiedene Knochen eines Tieres weisen unterschiedliche Belastbarkeiten auf. Nach KNOTT und BAILEY (1999) sind Humeri von Hühnern stabiler als Tibiotarsi. Auch die Humeri der drei Vogelarten dieser Studie hatten ein signifikant höheres maximales Drehmoment und Steifigkeit als Tibiotarsi. Dies ist durch lokale strukturelle Unterschiede (SCHWARZ, 1991) und unterschiedliche Funktionen bzw. Belastungen der Knochen bedingt (CURREY, 1975; KNOTT und BAILEY, 1999). Je nach Belastungsart ändert sich der mikro- und makrostrukturelle Aufbau der Knochen (DE MARGERIE et al., 2005). Strukturelle Anpassungen

sind unter anderem die Dicke der Kortizes, die Form des Querschnitts, der Verlauf der Kollagenfasern und der Anteil des laminaren Knochengewebes (DE MARGERIE et al., 2005).

Die mechanische Belastbarkeit von Humeri und Tibiotarsi eines Vogels korrelieren bei Hühnern (KNOWLES et al., 1993), wie das auch in den eigenen Studien an drei Vogelarten sowohl für das maximale Drehmoment als auch die Steifigkeit nachzuweisen war.

5.6 Korrelationen der verschiedenen Parameter

Die Korrelationen der verschiedenen Parameter, die an den langen Röhrenknochen Humerus und Tibiotarsus festgestellt wurden, differierten bei den drei Vogelarten teilweise erheblich, so dass daraus keine verallgemeinernde Aussagen getroffen werden können.

ZOTTI et al. (2003) wiesen eine positive Korrelation der Rohasche mit dem gesamten Mineralstoffgehalt eines Knochens nach, ohne die Mineralstoffe einzeln zu prüfen. In den vorliegenden Untersuchungen korrelierte der Gehalt an Rohasche beider Knochen bei den drei Vogelarten positiv mit dem Phosphorgehalt. Die Humeri der Mäusebussarde wiesen eine positive Korrelation der Rohasche zum Kalziumgehalt auf. Kalzium und Phosphor sind Hauptbestandteile der Mineralstoffe eines Knochens und damit der Rohasche, so dass diese Korrelation plausibel ist. Die Rohasche von Schleiereulen hatte sowohl in Humeri als auch Tibiotarsi eine negative Korrelation zum Magnesiumgehalt. Dies kann nicht erklärt werden.

Weitere Mineralstoffe wiesen je nach Gruppe und Knochen verschiedene, jedoch nur vereinzelt nachweisbare Korrelationen mit anderen Mineralstoffgehalten auf. Inwieweit dies klinisch relevant ist und wodurch sie verursacht werden bleibt unbeantwortet.

Die Knochendichte bei Hühnern und Putern korrelierte mit der Trockensubstanz, dem Rohascheanteil, der chemischen Zusammensetzung des Knochens (ZHANG und COON, 1997; ZOTTI et al., 2003) und dem Mineralstoffgehalt (SCHREIWEIS et al., 2005). In der vorliegenden Arbeit konnten dagegen nur einzelne oder keine Korrelationen der Knochendichte zu den Parametern der Knochenzusammensetzung festgestellt werden. Dies könnten Artspezifika sein, da sich die Literaturangaben auf Geflügel beziehen. Denkbar ist aber auch, dass Lebensweise und Ernährung dies mit beeinflussen.

Maximales Drehmoment und Steifigkeit als Parameter der mechanischen Belastbarkeit korrelierten bei den drei Vogelarten und bei beiden Knochen sehr. Physikalische Faktoren, wie Länge und Gewicht eines Knochens, beeinflussen seine mechanische Belastbarkeit (RATH et al., 2000; BONSER und CASINOS, 2003). Die eigenen Untersuchungen bestätigen das, da Gewicht von Humeri- und Tibiotarsidiaphysen der drei Vogelarten mit beiden Parametern der mechanischen Belastbarkeit korrelierten. Bei adulten Mäusebussarden korrelierte zudem die

Kortexdicke der Humeri mit den Parametern der mechanischen Belastbarkeit. Mehrere Studien konnten eine Korrelation der Knochendichte mit der mechanischen Belastbarkeit nachweisen (ZHANG und COON, 1997; AERSSSENS et al., 1998; RATH et al., 1999; ZOTTI et al., 2003), die speziesabhängig variierte (AERSSSENS et al., 1998). In der vorliegenden Arbeit konnte dieser Zusammenhang nicht nachgewiesen werden. Dies dürfte speziesspezifisch sein. Entgegen Literaturangaben (RATH et al., 1999; BONSER und CASINOS, 2003) waren in der vorliegenden Arbeit nur vereinzelt Korrelationen des Rohascheanteils mit der mechanischen Belastbarkeit feststellbar. Die mechanischen Eigenschaften eines Knochens werden in Untersuchungen bei Hühnern auch durch den Gehalt an Mineralstoffen beeinflusst (RATH et al., 2000; BONSER und CASINOS, 2003; SCHREIWEIS et al., 2005). In den eigenen Untersuchungen waren dagegen nur vereinzelt Korrelationen der mechanischen Belastbarkeit mit dem Kalzium-, Phosphor- und Magnesiumgehalt der Knochen nachweisbar. Ob es sich dabei um speziesabhängige Zusammenhänge handelt, muss in weiterführenden Untersuchungen geklärt werden.

Nicht nur das Körpergewicht beeinflusst bei Hennen und Putern die Bruchfestigkeit eines Knochens (KNOWLES et al., 1993; CRESPO et al., 2000), sondern beim Nutzgeflügel auch das Futter (VITS, 2005). Bei juvenilen Mäusebussarden und Schleiereulen konnten dagegen keine Korrelationen zwischen dem Ernährungszustand und den verschiedenen Knochenparametern festgestellt werden. Die Parameter, die an Humeri gewonnen wurden, wiesen bei Seeadlern ebenfalls keine signifikanten Korrelationen zum Ernährungszustand auf. Der Ernährungszustand adulter Mäusebussarde beeinflusste den Trockensubstanzgehalt von Humeri und Tibiotarsi negativ. Vorstellbar ist, dass mit abnehmendem Körpergewicht Knochensubstanz mobilisiert wurde und diese Korrelation verursacht wird. Unklar bleibt, dass dies für Seeadler und Schleiereulen nicht zutrifft.

5.7 Histologischer Aufbau des reifen Knochens

Nach LIEBICH (1999) und STARCK und CHINSAMY (2002) ist ein Röhrenknochen unabhängig vom spezifischen einzelnen Knochen recht uniform aufgebaut. Dies bestätigen die vorliegenden histologischen Studien an Humeri und Tibiotarsi männlicher adulter Mäusebussarde. Die Epiphysen bestanden aus einer längs ausgerichteten Kortikalis und Spongiosa. Die Diaphysen waren außen von dünnem Periost bedeckt und innen von Endost ausgekleidet. Periost und Endost bestanden aus flachen Bindegewebszellen (NICKEL et al., 1992). Die zweigeteilte Schichtung des Periosts wird beim Vogel als schwer erkennbar

beschrieben (NICKEL et al., 1992). Diese Schichtung konnte beim Mäusebussard durch Farbunterschiede bestätigt werden.

Die Kompakta der Diaphyse (MEISTER, 1951) wies sowohl am Humerus als auch am Tibiotarsus vier Schichten auf, wie das für Vogelarten beschrieben ist (MCALISTER und MOYLE, 1983; LETERRIER und NYS, 1992; DE MARGERIE et al., 2005). Die äußerste Schicht lag dem Periost an und wurde aus eng gepacktem, ringförmig verlaufendem Lamellenknochen mit nur wenigen Osteonen gebildet. Die Zweite stellte sich geflechtartig ohne einheitliche Orientierung dar, und die Dritte war längs orientiert, gleichmäßig angeordnet und enthielt die primären Osteone und Knochenlamellen. Sekundäre, also weniger mineralisierte, Osteone waren, wie in der Literatur bei Gänsen angegeben (MOYLE und WALKER, 1986), auch in den vorliegenden Untersuchungen seltener und nur proximal und distal in der Diaphyse zu finden. Diese Knochenschicht konnte entsprechend DE MARGERIE et al. (2005) als laminar bezeichnet werden. Sie war am Humerus ausgeprägter als am Tibiotarsus. Die vierte, innere Schicht war breiter und ähnelte der ersten.

An Rotschwanzbussarden wurde festgestellt, dass die Dicke der Kompakta knochenspezifisch variiert (DEGERNES et al., 1998). Von Tibiotarsi in der vorliegenden Arbeit war sie wie bei Rotschwanzbussarden dicker als die der Humeri. Humeri, die vor allem Torsionskräften ausgesetzt sind, zeichnen sich im Rahmen struktureller Anpassungen, z. B. durch dünnere Kortizes, aus (DE MARGERIE et al., 2005). Nach den eigenen Befunden sind Humeri von Mäusebussarden im Durchschnitt nahezu rund und Tibiotarsi eher oval. Tibiotarsi haben Biegungs- und Axialkräften zu widerstehen (DE MARGERIE et al., 2004), entsprechend der Anforderung passen sie sich im Bereich der Diaphyse mit dickeren Kortizes und einem weniger kreisförmigen Querschnitt an (DE MARGERIE et al., 2005). Exakt dies konnte mit den Studien an Humeri und Tibiotarsi von Mäusebussarden wie in der Literatur beschrieben als strukturelle Anpassung an Torsions- und Flexionsbelastung bestätigt werden. Der Mineralstoffgehalt in Vogelknochen ist sehr hoch (COLES, 1988). Mit der kombinierten von Kossa/Safranin-O-Färbung konnte gezeigt werden, dass die Knochensubstanz von Mäusebussarden weitestgehend mineralisiert ist, dies bestätigt und ergänzt vogelspezifisch die Literatur, die allgemein einen hohen Rohascheanteil von 60 % bis 70 % nennt (WEISKE, 1889; RABEHL, 1995; CRESPO et al., 2002; KIM et al., 2004).

5.8 Schlussfolgerung

In dieser Schrift sind Basisdaten von Knochenzusammensetzung, Knochendichte, histologischem Aufbau und mechanischer Belastbarkeit erarbeitet worden, um zur

Knochenphysiologie und zu artspezifischen Besonderheiten langer Röhrenknochen von Greifvögeln und Eulen beizutragen. Sie sind Grundlage, dieses bedenkend, um Osteosyntheseverfahren für derartige Patienten zu entwickeln.

6 Zusammenfassung

Ziel der Studien war, an zwei Greifvogelarten und einer Eulenart die Zusammensetzung, Dichte und mechanische Belastbarkeit sowie bei adulten Mäusebussarden den histologischen Aufbau langer Röhrenknochen zu ermitteln. Es wurden rechte Humeri und rechte Tibiotarsi von 53 Greifvögeln [Mäusebussard (*Buteo buteo*) n=20 ♂, n=20 ♀, Seeadler (*Haliaeetus albicilla*) n=7 ♂, n=6 ♀] und neun Schleiereulen (*Tyto alba*) [n=4 ♂, n=5 ♀] untersucht. Je 50 % der Mäusebussarde waren juvenil bzw. adult.

Im Hinblick auf die Parameter wurden zwischen den Arten, den Geschlechtern, den Altersgruppen und den Knochen Unterschiede untersucht. Soweit möglich wurde der Ernährungszustand mit bedacht und etwaige Korrelationen der Parameter erstellt.

Die Knochendichte von Humeri betrug im Median zwischen 1,9 g/cm³ (Mäusebussard) und 2,0 g/cm³ (Schleiereule), die der Tibiotarsi zwischen 1,8 g/cm³ (Mäusebussard) und 2,0 g/cm³ (Seeadler). Von Humeri war sie bei Mäusebussarden signifikant niedriger als von Seeadlern und Schleiereulen (p=0,031, p=0,004). In Tibiotarsi war sie auch von Mäusebussarden signifikant niedriger als von Seeadlern (p=0,002). Humeri von Schleiereulen wiesen eine signifikant höhere Dichte als Tibiotarsi auf (p=0,015).

Der Trockensubstanzgehalt (TS) von Humeri variierte im Median zwischen 87,6 % (Mäusebussard) und 89,5 % (Seeadler), der der Tibiotarsi zwischen 87 % (Mäusebussard) und 88,4 % (Seeadler). Beide Knochen von Mäusebussarden hatten einen signifikant geringeren TS-Gehalt als die von Schleiereulen (Humerus p=0,004, Tibiotarsus p=0,005). Humeri von Mäusebussarden hatten einen signifikant niedrigeren TS-Gehalt als die von Seeadlern (p=0,001). Der TS-Gehalt der Humeri von Seeadlern war signifikant höher als der der Tibiotarsi (p=0,001). Der Gehalt an Knochenrohasche (Ra) der beiden Knochen von Seeadlern war signifikant niedriger als der von Mäusebussarden und Schleiereulen (jeweils p<0,001). Humeri von Mäusebussarden enthielten signifikant geringere Mengen an Ra als die von Schleiereulen (p=0,016). Humeri von Schleiereulen enthielten signifikant mehr Ra als ihre Tibiotarsi (p=0,021). Die Rohfettgehalte waren mit unter 2 % der Trockensubstanz bei den drei Arten der Studie auffallend niedrig.

Die Humeri von Seeadlern wiesen einen signifikant niedrigeren Kalziumgehalt auf (Median 220 g/kg Ra) als die von Schleiereulen (Median 246 g/kg Ra) (p=0,007), während bei den Tibiotarsi keine Artspezifika aufgedeckt wurden. Keine der drei Vogelarten hatten

signifikante Unterschiede im Kalziumgehalt der Humeri und Tibiotarsi. Beide Knochen von Seeadlern enthielten signifikant weniger Phosphor (Humeri 103,5 g/kg Ra, Tibiotarsi 101,7 g/kg Ra) als die von Mäusebussarden und Schleiereulen (jeweils $p < 0,001$). Die von Mäusebussarden hatten signifikant niedrigere Werte als die von Schleiereulen (Humerus $p = 0,003$, Tibiotarsus $p = 0,006$). Humeri von Mäusebussarden und Schleiereulen hatten einen signifikant höheren Phosphorgehalt als Tibiotarsi ($p = 0,018$, $p = 0,028$). Das Kalzium-Phosphor-Verhältnis betrug bei den drei Vogelarten ca. 2:1. Humeri und Tibiotarsi von Seeadlern wiesen im Median mit 2590 mg/kg Ra und 2510 mg/kg Ra Magnesium signifikant niedrigere Gehalte auf als die von Mäusebussarden und Schleiereulen (jeweils $p < 0,001$). Der Magnesiumgehalt in Tibiotarsi war von Mäusebussarden (Median 3395 mg/kg Ra) signifikant niedriger als von Schleiereulen (Median 3720 mg/kg Ra) ($p = 0,002$). Bei Mäusebussarden enthielten Humeri signifikant mehr Magnesium als Tibiotarsi ($p = 0,029$), bei Schleiereulen dagegen Tibiotarsi mehr als Humeri ($p = 0,021$). Beide Knochen von Schleiereulen enthielten im Median signifikant mehr Kupfer (Humeri 8,7 mg/kg Ra, Tibiotarsi 12,7 mg/kg Ra) als die von Mäusebussarden und Seeadlern (jeweils $p \leq 0,001$). Humeri von Mäusebussarden hatten einen signifikant höheren Kupfergehalt als Tibiotarsi ($p = 0,011$). Seeadler wiesen mit einem Median von 278 mg/kg Ra (Humeri) und 273 mg/kg Ra (Tibiotarsi) den signifikant höchsten Zinkgehalt in beiden Knochen auf (jeweils $p < 0,001$), Schleiereulen mit 185 mg/kg Ra (Humeri) und 199 mg/kg Ra (Tibiotarsi) den niedrigsten (Humerus $p = 0,002$, Tibiotarsus $p < 0,001$). Humeri von Mäusebussarden und Schleiereulen enthielten signifikant weniger Zink als Tibiotarsi ($p < 0,001$, $p = 0,013$).

Die mechanische Belastbarkeit wurde im Torsionsversuch überprüft. Maximales Drehmoment und Steifigkeit beider Knochen waren bei Schleiereulen signifikant am niedrigsten und bei Seeadlern am höchsten (jeweils $p < 0,001$). Die Humeri wiesen bei den drei Arten eine signifikant höhere mechanische Belastbarkeit auf als die Tibiotarsi.

Histologisch wurde an Knochen zweier männlicher, adulter Mäusebussarde ein gut mit anderen Vogelarten vergleichbarer Knochenaufbau entdeckt. Die Knochensubstanz war vorwiegend mineralisiert. Die Epiphysen wiesen eine längs ausgerichtete Kortikalis mit Spongiosa auf. Die Kompakta der Diaphyse von Humeri und Tibiotarsi war vierschichtig aufgebaut. Der Humerus war pneumatisiert, der Tibiotarsus mit Knochenmark gefüllt. Beide Knochen wiesen strukturelle Anpassungen an die Torsions- und die Flexionsbelastung auf.

In den vorliegenden Untersuchungen konnten einige Unterschiede zu bereits vorhandenen Daten bei anderen Vogelarten festgestellt werden, die wohl artspezifische Besonderheiten sind.

7 Summary

Comparative investigations in bone composition, bone mineral density, mechanical properties and histological structure of long bones of free-living raptors and owls

The objectives of the present study were to assess bone composition, bone mineral density and mechanical properties of the long bones of two raptor and one owl species as well as to investigate the histological structure. The right humerus and the right tibiotarsus of 53 raptors [common buzzard (*Buteo buteo*) n=20 ♂, n=20 ♀, white-tailed sea eagle (*Haliaeetus albicilla*) n=7 ♂, n=6 ♀] and nine barn owls (*Tyto alba*) [n=4 ♂, n=5 ♀] were examined. In the common buzzards 50 % of the animals were juvenile and 50 % were adult.

For all parameters statistical analysis was performed for species specific differences, the influence of age, the gender and differences between the bones. The influence of the nutritional status as well as the correlation between the parameters was evaluated.

The median bone mineral density (BMD) of the humeri ranged from 1.9 g/cm³ (common buzzards) to 2.0 g/cm³ (white-tailed sea eagles) and from 1.8 g/cm³ (common buzzards) to 2.0 g/cm³ (white-tailed sea eagles) in the tibiotarsi. The BMD of the humeri was significantly lower in common buzzards than in white-tailed sea eagles and barn owls (p=0.031, p=0.004). In the tibiotarsi the BMD of the common buzzards was lower compared to the BMD in white-tailed sea eagles (p=0.002). In barn owls the BMD of the humeri was significantly higher compared to the BMD of the tibiotarsi (p=0.015).

The median dry matter of the humeri ranged from 87.6 % (common buzzards) to 89.5 % (white-tailed sea eagles), the median dry matter of the tibiotarsi ranged from 87 % (common buzzards) to 88.4 % (white-tailed sea eagles). The dry matter of both bones of the common buzzards was significantly lower than in the bones of the barn owls (humerus p=0.004, tibiotarsus p=0.005). The humeri of the common buzzards had significantly less dry matter than those of the white-tailed sea eagles (p=0.001). The humeri of the white-tailed sea eagles had a significantly higher content of dry matter than the tibiotarsi (p=0.001). The percentage of bone ash of both bones was significantly lower in the white-tailed sea eagles than in the common buzzards and the barn owls (each with p<0.001). The humeri of the common buzzards contained significantly less bone ash than those of the barn owls (p=0.016). In the

barn owls humeri had significantly more ash compared to the tibiotarsi ($p=0.021$). The content of crude fat was lower than 2 % of the dry matter in all bones.

In humeri significantly lower values of calcium (median 220 g/kg ash) were detected in white-tailed sea eagles than in barn owls (median 246 g/kg ash) ($p=0.007$), in tibiotarsi no significant differences between the species were observed. None of the species had a significant difference in the calcium content of humerus and tibiotarsus. Both bones of the white-tailed sea eagles had significantly lower levels of phosphorus (humeri 103.5 g/kg ash, tibiotarsi 101.7 g/kg ash) compared to the bones of the other two species (each with $p<0.001$). In common buzzards both bones displayed significantly lower phosphorus levels than in barn owls (humerus $p=0.003$, tibiotarsus $p=0.006$). The humeri of common buzzards and barn owls contained significantly more phosphorus than the tibiotarsi ($p=0.018$, $p=0.028$). The calcium-phosphorus ratio was about 2:1 in all three species. The magnesium content was found to be significantly lower in the white-tailed sea eagles (humeri 2590 mg/kg ash, tibiotarsi 2510 mg/kg ash) than in the common buzzards and barn owls (each with $p<0.001$). The tibiotarsi of the common buzzards (median 3395 mg/kg ash) contained significantly less magnesium than those of the barn owls (median 3720 mg/kg ash) ($p=0.002$). In the common buzzards the content of magnesium was significantly higher in the humeri compared to the tibiotarsi ($p=0.029$), in the barn owls the tibiotarsi contained significantly more magnesium than the humeri ($p=0.021$). In comparison both bones of the barn owls contained significantly higher levels of copper (humeri 8.7 mg/kg ash, tibiotarsi 12.7 mg/kg ash) than the bones of the common buzzards and the white-tailed sea eagles (each with $p\leq 0.001$). In the common buzzards the copper content of the humeri was significantly higher than in the tibiotarsi ($p=0.011$). The zinc content was highest in the bones of the white-tailed sea eagles with a median of 278 mg/kg ash (humeri) and 273 mg/kg ash (tibiotarsi) (each with $p<0.001$) and lowest in the barn owls with 185 mg/kg ash (humeri) and 199 mg/kg ash (tibiotarsi) (humerus $p=0.002$, tibiotarsus $p<0.001$). The humeri of common buzzards and barn owls had significantly lower zinc levels compared to the tibiotarsi ($p<0.001$, $p=0.013$).

The mechanical properties of the long bones were investigated by testing torsional strength. The maximum torque and the stiffness of both bones were the lowest in the barn owls and highest in the white-tailed sea eagles (each significantly with $p<0.001$). Humeri were significantly stronger than tibiotarsi.

The histological evaluation of the long bones of two male, adult common buzzards revealed a similar structure compared to other bird species. Most components of the bone were mineralized. The epiphysis was formed by compact bone filled with trabecular bone. The diaphysis consisted of cortical bone which was formed by four different layers. The humerus was pneumatized and the tibiotarsus marrow-filled. Both bones showed structural adaptations known to be associated with torsional and bending forces.

The present study investigated important bone characteristics that are suspected to be species specific.

8 Literaturverzeichnis

AERSSSENS, J.; BOONEN, S.; LOWET, G.; DEQUEKER, J. (1998):

Interspecies differences in bone composition, density, and quality: potential implications for in vivo bone research.

Endocrinology. 139(2), 663-670.

BETTIN, H.; SPIEWECK, F. (1990):

Die Dichte des Wassers als Funktion der Temperatur nach Einführung der Internationalen Temperaturskala von 1990.

PTB-Mitteilungen(3/90), 195-196.

BIEWENER, A. A.; BERTRAM, J. E. (1994):

Structural response of growing bone to exercise and disuse.

J Appl Physiol. 76(2), 946-955.

BILBY, L. W.; WIDDOWSON, E. M. (1971):

Chemical composition of growth in nestling blackbirds and thrushes.

Br J Nutr. 25(1), 127-134.

BILTZ, R. M.; PELLEGRINO, E. D. (1965):

Avian osteopetrotic bone. A correlation of its chemical composition with its roentgenographic and histological appearance.

J Bone Joint Surg Am. 47(7), 1365-1377.

BILTZ, R. M.; PELLEGRINO, E. D. (1969):

The chemical anatomy of bone. I. A comparative study of bone composition in sixteen vertebrates.

J Bone Joint Surg Am. 51(3), 456-466.

BLOM, J.; LILJA, C. (2004):

A comparative study of growth, skeletal development and eggshell composition in some species of birds.

J Zool. 262(4), 361-369.

BLOOM, W.; BLOOM, M. A.; MCLEAN, F. C. (1941):
Calcification and ossification. Medullary bone changes in the reproductive cycle of female pigeons.
Anat Rec. 81(4), 443-475.

BONSER, R. H. (1995):
Longitudinal variation in mechanical competence of bone along the avian humerus.
J Exp Biol. 198(1), 209-212.

BONSER, R. H.; CASINOS, A. (2003):
Regional variation in cortical bone properties from broiler fowl - a first look.
Br Poult Sci. 44(3), 350-354.

CARTER, D. R.; SPENGLER, D. M. (1982):
Biomechanics of fracture.
In: Summer-Smith, G. (Hrsg.): Bone in clinical orthopedics.
Saunders, Philadelphia, S. 305-334.

CASINOS, A.; CUBO, J. (2001):
Avian long bones, flight and bipedalism.
Comp Biochem Physiol A Mol Integr Physiol. 131(1), 159-167.

COLES, B. H. (1988):
Innere Medizin und Chirurgie bei Vögeln.
Gustav Fischer, Stuttgart.

COOK, M. E.; SUNDE, M. L.; STAHL, J. L.; HANSON, L. E. (1984):
Zinc deficiency in pheasant chicks fed practical diets.
Avian Dis. 28(4), 1102-1109.

COUSQUER, G. (2005):
Ophthalmological findings in free-living tawny owls (*Strix aluco*) examined at a wildlife veterinary hospital.
Vet Rec. 156(23), 734-739.

CRESPO, R.; STOVER, S. M.; SHIVAPRASAD, H. L.; CHIN, R. P. (2002):
Microstructure and mineral content of femora in male turkeys with and without fractures.
Poult Sci. 81(8), 1184-1190.

CRESPO, R.; STOVER, S. M.; TAYLOR, K. T.; CHIN, R. P.; SHIVAPRASAD, H. L.
(2000):
Morphometric and mechanical properties of femora in young adult male turkeys with and
without femoral fractures.
Poult Sci. 79(4), 602-608.

CUBO, J.; CASINOS, A. (1998):
Biomechanical significance of cross-sectional geometry of avian long bones.
Eur J Morphol. 36(1), 19-28.

CUBO, J.; CASINOS, A. (2000):
Mechanical properties and chemical composition of avian long bones.
Eur J Morphol. 38(2), 112-121.

CURREY, J. D. (1975):
The effects of strain rate, reconstruction and mineral content on some mechanical properties
of bovine bone.
J Biomech. 8(1), 81-86.

DE MARGERIE, E.; ROBIN, J. P.; VERRIER, D.; CUBO, J.; GROSCOLAS, R.;
CASTANET, J. (2004):
Assessing a relationship between bone microstructure and growth rate: a fluorescent labelling
study in the king penguin chick (*Aptenodytes patagonicus*).
J Exp Biol. 207(5), 869-879.

DE MARGERIE, E.; SANCHEZ, S.; CUBO, J.; CASTANET, J. (2005):
Torsional resistance as a principal component of the structural design of long bones:
comparative multivariate evidence in birds.
Anat Rec A Discov Mol Cell Evol Biol. 282(1), 49-66.

DEEM, S. L.; TERRELL, S. P.; FORRESTER, D. J. (1998):

A retrospective study of morbidity and mortality of raptors in Florida: 1988-1994.

J Zoo Wildl Med. 29(2), 160-164.

DEGERNES, L. A.; ROE, S. C.; ABRAMS, C. F., JR. (1998):

Holding power of different pin designs and pin insertion methods in avian cortical bone.

Vet Surg. 27(4), 301-306.

DOYLE, J. J. (1979):

Toxic and essential elements in bone - a review.

J Anim Sci. 49(2), 482-497.

DRESSLER, D. (1971):

Mineralische Elemente in der Tierernährung.

Eugen Ulmer, Stuttgart.

FIELD, R. A.; RILEY, M. L.; MELLO, F. C.; CORBRIDGE, M. H.; KOTULA, A. W. (1974):

Bone composition in cattle, pigs, sheep and poultry.

J Anim Sci. 39(3), 493-499.

FIX, A. S.; BARROWS, S. Z. (1990):

Raptors rehabilitated in Iowa during 1986 and 1987: a retrospective study.

J Wildl Dis. 26(1), 18-21.

FLEMING, R. H.; KORVER, D.; MCCORMACK, H. A.; WHITEHEAD, C. C. (2004):

Assessing bone mineral density in vivo: digitized fluoroscopy and ultrasound.

Poult Sci. 83(2), 207-214.

FLEMING, R. H.; MCCORMACK, H. A.; MCTEIR, L.; WHITEHEAD, C. C. (1998):

Medullary bone and humeral breaking strength in laying hens.

Res Vet Sci. 64(1), 63-67.

FLEMING, R. H.; MCCORMACK, H. A.; MCTEIR, L.; WHITEHEAD, C. C. (1999):
Directional asymmetry in laying hen humeral breaking strength.
Br Poult Sci. 40(Suppl 1), 45-46.

FLEMING, R. H.; MCCORMACK, H. A.; WHITEHEAD, C. C. (1998):
Bone structure and strength at different ages in laying hens and effects of dietary particulate
limestone, vitamin K and ascorbic acid.
Br Poult Sci. 39(3), 434-440.

FLEMING, R. H.; MCCORMACK, H. A.; WHITEHEAD, C. C. (2000):
Prediction of breaking strength in osteoporotic avian bone using digitized fluoroscopy, a low
cost radiographic technique.
Calcif Tissue Int. 67(4), 309-313.

FLEMING, R. H.; WHITEHEAD, C. C.; ALVEY, D.; GREGORY, N. G.; WILKINS, L. J.
(1994):
Bone structure and breaking strength in laying hens housed in different husbandry systems.
Br Poult Sci. 35(5), 651-662.

FORSMAN, D. (1998):
The raptors of Europe and the Middle East. A handbook of field identification.
University Press, Princeton.

FOWLER, M. E. (1981):
Ossification of long bones in raptors.
In: Cooper, J. E.; Greenwood, A. (Hrsg.): Recent advances in the study of raptor disease.
Chiron Publications, Keighley, S. 75-82.

FROST, T. J.; ROLAND, D. A. (1991):
The influence of various calcium and phosphorus levels on tibia strength and eggshell quality
of pullets during peak production.
Poult Sci. 70(4), 963-969.

GLUTZ VON BLOTZHEIM, U.; BAUER, K.; BEZZEL, E. (1989):
Handbuch der Vögel Mitteleuropas. Band 4: *Falconiformes*. 2. Aufl.
Aula-Verlag, Wiesbaden.

GLUTZ VON BLOTZHEIM, U.; BAUER, K.; BEZZEL, E. (1994):
Handbuch der Vögel Mitteleuropas. Band 5: Galliformes. 2. Aufl.
Aula-Verlag, Wiesbaden.

GRAVELAND, J. (1996):
Calcium deficiency in wild birds.
Vet Q. 18(Suppl 3), 136-137.

HARCOURT-BROWN, N. H. (2002):
Orthopedic conditions that affect the avian pelvic limb.
Vet Clin North Am Exot Anim Pract. 5(1), 49-81.

HARRIS, M. C.; SLEEMAN, J. M. (2007):
Morbidity and mortality of bald eagles (*Haliaeetus leucocephalus*) and peregrine falcons
(*Falco peregrinus*) admitted to the wildlife center of Virginia, 1993-2003.
J Zoo Wildl Med. 38(1), 62-66.

HATT, J. M.; BAUMGARTNER, R.; ISENBÜGEL, E. (1996):
Diagnostik und medizinische Betreuung von Greifvögeln in einer Zusammenstellung der
Fälle von 1985-1994.
Schweiz Arch Tierheilkd. 138(9), 434-440.

HAVIVI, E.; WOLF, G. (1967):
Vitamin A, sulfation and bone growth in the chick.
J Nutr. 92(4), 467-473.

HEMME, A. (2004):

Untersuchungen an Broilern zum Einfluss verschiedener anorganischer P-Quellen im Futter auf Leistung, P-Retention, P-Gehalte im Blut sowie die Zusammensetzung und Bruchfestigkeit von Knochen.

Vet. Med. Diss. Hannover.

HERZOG, K. (1968):

Anatomie und Flugbiologie der Vögel.

Gustav Fischer, Stuttgart.

HESTER, P. Y.; SCHREIWEIS, M. A.; ORBAN, J. I.; MAZZUCO, H.; KOPKA, M. N.; LEDUR, M. C.; MOODY, D. E. (2004):

Assessing bone mineral density in vivo: dual energy X-ray absorptiometry.

Poult Sci. 83(2), 215-221.

HILL, R. (1965):

The manganese and copper of chick bone.

Br J Nutr. 19(1), 163-170.

HOEKSTRA, W. G. (1969):

Skeletal and skin lesions of zinc-deficiency chickens and swine. Possible relationship to "connective tissue diseases" of man.

Am J Clin Nutr. 22(9), 1268-1277.

HOGG, D. A. (1984):

The distribution of pneumatization in the skeleton of the adult domestic fowl.

J Anat. 138(4), 617-629.

HOWARD, J. D.; REDIG, P. T. (1993):

Analysis of avian fracture repairs: implications for captive and wild birds.

Proceedings of the Association of Avian Veterinarians. 31. August - 4. September 1993.

Nashville, Tennessee, S. 78-82.

HUCKABEE, J. R. (2000):

Raptor therapeutics.

Vet Clin North Am Exot Anim Pract. 3(1), 91-116.

HULAN, H. W.; DE GROOTE, G.; FONTAINE, G.; DE MUNTER, G.; MCRAE, K. B.;
PROUDFOOT, F. G. (1985):

The effect of different totals and ratios of dietary calcium and phosphorus on the performance and incidence of leg abnormalities of male and female broiler chickens.

Poult Sci. 64(6), 1157-1169.

ISENBÜGEL, E. (1988):

Medizinische Betreuung und Auswilderung verunfallter Greifvögel.

Berl. Münch. Tierärztl. Wschr. 101, 310-315.

JOHNSTON, C. C., JR.; SLEMENDA, C. W.; MELTON, L. J., 3RD (1991):

Clinical use of bone densitometry.

N Engl J Med. 324(16), 1105-1109.

KAMKE, D.; WALCHER, W. (1994):

Physik für Mediziner.

B.G. Teubner, Stuttgart.

KEMBER, N. F.; KIRKWOOD, J. K.; DUIGNAN, P. J.; GODFREY, D.; SPRATT, D. J.
(1990):

Comparative cell kinetics of avian growth plates.

Res Vet Sci. 49(3), 283-288.

KIM, W. K.; FORD, B. C.; MITCHELL, A. D.; ELKIN, R. G.; LEACH, R. M. (2004):

Comparative assessment of bone among wild-type, restricted ovulator and out-of-production hens.

Br Poult Sci. 45(4), 463-470.

KIRCHGEBNER, M. (1997):

Tierernährung. 10. Aufl.

DLG, München.

KNOTT, L.; BAILEY, A. J. (1999):

Collagen biochemistry of avian bone: comparison of bone type and skeletal site.

Br Poult Sci. 40(3), 371-379.

KNOWLES, T. G.; BROOM, D. M.; GREGORY, N. G.; WILKINS, L. J. (1993):

Effect of bone strength on the frequency of broken bones in hens.

Res Vet Sci. 54(1), 15-19.

KÖNIG, H. E.; LIEBICH, H.-G. (2001):

Anatomie und Propädeutik des Geflügels. 1. Aufl.

Schattauer, Stuttgart.

KORFMANN, M. A. (2003):

Zur Skelettentwicklung und Wachstumsdynamik der Beckengliedmaße bei Mastputern (makroskopische, mikroskopische, radiologische, osteodensitometrische und mineralstoffanalytische Verlaufsuntersuchungen).

Vet. Med. Diss. Berlin.

KORVER, D. R.; SAUNDERS-BLADES, J. L.; NADEAU, K. L. (2004):

Assessing bone mineral density in vivo: quantitative computed tomography.

Poult Sci. 83(2), 222-229.

KRAMPITZ, G.; ENBERGS, H.; PETERSEN, B. K. (1983):

Knochen- und Knorpelaufbau, Kalkstoffwechsel.

In: Mehner, A.; Hartfiel, W. (Hrsg.): Handbuch der Geflügelphysiologie.

Karger, Basel, S. 163-217.

KRONE, O.; LANGGEMACH, T.; SÖMMER, P.; KENNTNER, N. (2002):

Krankheiten und Todesursachen von Seeadlern (*Haliaeetus albicilla*) in Deutschland.

Corax. 19(Sonderheft 1), 102-108.

LAPPALAINEN, R.; KNUUTTILA, M.; LAMMI, S.; ALHAVA, E. M.; OLKKONEN, H. (1982):

Zn and Cu content in human cancellous bone.

Acta Orthop Scand. 53(1), 51-55.

LEDOUX, D. R.; HENRY, P. R.; AMMERMAN, C. B.; RAO, P. V.; MILES, R. D. (1991):

Estimation of the relative bioavailability of inorganic copper sources for chicks using tissue uptake of copper.

J Anim Sci. 69(1), 215-222.

LEE, S. R.; BRITTON, W. M.; ROWLAND, G. N. (1980):

Magnesium toxicity: bone lesions.

Poult Sci. 59(11), 2403-2411.

LETERRIER, C.; NYS, Y. (1992):

Composition, cortical structure and mechanical properties of chicken tibiotarsi: effect of growth rate.

Br Poult Sci. 33(5), 925-939.

LIEBICH, H.-G. (1999):

Funktionelle Histologie der Haussäugetiere. 3. Aufl.

Schattauer, Stuttgart.

LIU, D.; VEIT, H. P.; WILSON, J. H.; DENBOW, D. M. (2003):

Long-term supplementation of various dietary lipids alters bone mineral content, mechanical properties and histological characteristics of Japanese quail.

Poult Sci. 82(5), 831-839.

LOVERIDGE, N.; THOMPSON, B. M.; FARQUHARSON, C. (1991):

Bone growth and turnover.

Proceedings of the 23rd Symposium of Poultry Science. 18.-20. September 1991. Edinburgh, S. 3-17.

LUO, L.; TONG, J. M.; HUANG, J. C. (1992):

Effects of dietary chloride and magnesium on the incidence of tibial dyschondroplasia in chickens fed on Chinese practical diets.

Br Poult Sci. 33(3), 603-611.

MARTINEZ-CUMMER, M. A.; HECK, R.; LEESON, S. (2006):

Use of axial X-ray microcomputed tomography to assess three-dimensional trabecular microarchitecture and bone mineral density in single comb white leghorn hens.

Poult Sci. 85(4), 706-711.

MCALISTER, G. B.; MOYLE, D. D. (1983):

Some mechanical properties of goose femoral cortical bone.

J Biomech. 16(8), 577-589.

MEBS, T.; SCHERZINGER, W. (2008):

Die Eulen Europas. 2. Ausgabe.

Kosmos, Stuttgart.

MEBS, T.; SCHMIDT, D. (2006):

Die Greifvögel Europas, Nordafrikas und Vorderasiens.

Kosmos, Stuttgart.

MEISTER, W. (1951):

Changes in histological structure of the long bones of birds during the molt.

Anat Rec. 111(1), 1-21.

MOYLE, D. D.; WALKER, M. W., JR. (1986):

The effects of a calcium deficient diet on the mechanical properties and morphology of goose bone.

J Biomech. 19(8), 613-625.

MÜLLER, K.; ALTENKAMP, R.; BRUNNBERG, L. (2007):

Morbidity of free-ranging white-tailed sea eagles (*Haliaeetus albicilla*) in Germany.

J Avian Med Surg. 21(4), 265-274.

NAUMANN, C.; BASSLER, R. (1976):

Methodenbuch Band III, Die chemische Untersuchung von Futtermitteln.

VDLUFA, Darmstadt.

NICKEL, R.; SCHUMMER, A.; SEIFERLE, E. (1973):

Lehrbuch der Anatomie der Haustiere

Band V: Anatomie der Vögel. 1. Aufl.

Paul Parey, Berlin.

NICKEL, R.; SCHUMMER, A.; SEIFERLE, E. (1992):

Lehrbuch der Anatomie der Haustiere

Band V: Anatomie der Vögel. 2. Aufl.

Paul Parey, Berlin.

NORDIN, M.; FRANKEL, V. H. (1980):

Basic biomechanics of the skeletal system.

Lea & Febiger, Philadelphia.

ONYANGO, E. M.; HESTER, P. Y.; STROSHINE, R.; ADEOLA, O. (2003):

Bone densitometry as an indicator of percentage tibia ash in broiler chicks fed varying dietary calcium and phosphorus levels.

Poult Sci. 82(11), 1787-1791.

OPSAHL, W.; ZERONIAN, H.; ELLISON, M.; LEWIS, D.; RUCKER, R. B.; RIGGINS, R. S. (1982):

Role of copper in collagen cross-linking and its influence on selected mechanical properties of chick bone and tendon.

J Nutr. 112(4), 708-716.

PASSI, N.; GEFEN, A. (2005):

Trabecular bone contributes to strength of the proximal femur under mediolateral impact in the avian.

J Biomech Eng. 127(1), 198-203.

PIENKOWSKI, D.; DOERS, T. M.; MAITRA, R.; MONIER-FAUGERE, M.-C.; MALLUCHE, H. H. (1999):

BMD and the mechanical competence of bones in the canine skeleton.
Osteol. 8(4), 186-194.

PONTZER, H.; LIEBERMAN, D. E.; MOMIN, E.; DEVLIN, M. J.; POLK, J. D.; HALLGRIMSSON, B.; COOPER, D. M. (2006):

Trabecular bone in the bird knee responds with high sensitivity to changes in load orientation.
J Exp Biol. 209(1), 57-65.

POURLIS, A. F.; MAGRAS, I. N.; PETRIDIS, D. (1998):

Ossification and growth rates of the limb long bones during the prehatching period in the quail (*Coturnix coturnix japonica*).
Anat Histol Embryol. 27(1), 61-63.

PRATT, C. W. (1961):

The effect of age on the arrangement of fibres in the bone matrix of the femur of the domestic fowl.
J Anat. 95, 110-122.

PUNCH, P. I. (2001):

A retrospective study of the success of medical and surgical treatment of wild Australian raptors.
Aust Vet J. 79(11), 747-752.

RABEHL, N. (1995):

Untersuchungen zur Körperzusammensetzung und deren Entwicklung bei verschiedenen Ziervogelarten (Kanarien, Wellensittiche, Agaporniden, Nymphensittiche, Amazonen und Graupapageien).
Vet. Med. Diss. Hannover.

RADASCH, R. M. (1999):

Biomechanics of bone and fractures.
Vet Clin North Am Small Anim Pract. 29(5), 1045-1082.

RATH, N. C.; BALOG, J. M.; HUFF, W. E.; HUFF, G. R.; KULKARNI, G. B.; TIERCE, J. F. (1999):

Comparative differences in the composition and biomechanical properties of tibiae of seven- and seventy-two-week-old male and female broiler breeder chickens.

Poult Sci. 78(8), 1232-1239.

RATH, N. C.; HUFF, G. R.; HUFF, W. E.; BALOG, J. M. (2000):

Factors regulating bone maturity and strength in poultry.

Poult Sci. 79(7), 1024-1032.

REDIG, P. T. (2001):

Effective methods for management of avian fractures and other orthopaedic problems.

Proceedings of the 6th European AAV-DVG Conference and 4th Scientific ECAMS Meeting, Avian Medicine and Surgery. 07.-10. März. München, S. 26-42.

REECE, R. L. (1992):

The role of infectious agents in leg abnormalities in growing birds.

In: Whitehead, C. C. (Hrsg.): Bone biology and skeletal disorders in poultry.

Carfax Publishers, Abingdon, S. 231-263.

REECE, W. O. (2005):

Functional anatomy and physiology of domestic animals. 3. Aufl.

Lippincott Williams & Wilkins, Baltimore.

ROACH, H. I.; SHEARER, J. R.; ARCHER, C. (1989):

The choice of an experimental model. A guide for research workers.

J Bone Joint Surg Br. 71(4), 549-553.

RODENHOFF, G.; BRONSCH, K. (1971):

Die Zusammensetzung der Humerus-Kompakta bei Mastgeflügel mit und ohne Skelettanomalien.

Zentralbl Veterinarmed A. 18(3), 234-242.

ROMEIS, B. (1989):

Mikroskopische Technik. 17. Aufl.

Urban & Schwarzenberg, München.

RUCKER, R. B.; PARKER, H. E.; ROGLER, J. C. (1969):

Effect of copper deficiency on chick bone collagen and selected bone enzymes.

J Nutr. 98(1), 57-63.

RUCKER, R. B.; PARKER, H. E.; ROGLER, J. C. (1969):

The effects of copper on collagen cross-linking.

Biochem Biophys Res Commun. 34(1), 28-33.

RUCKER, R. B.; RIGGINS, R. S.; LAUGHLIN, R.; CHAN, M. M.; CHEN, M.; TOM, K.
(1975):

Effects of nutritional copper deficiency on the biomechanical properties of bone and arterial elastin metabolism in the chick.

J Nutr. 105(8), 1062-1070.

SALOMON, F.-V. (1993):

Lehrbuch der Geflügelanatomie.

Gustav Fischer, Jena.

SCHOLTYSSSEK, S.; DOLL, P. (1978):

Nutz- und Ziergeflügel.

Eugen Ulmer, Stuttgart.

SCHREIWEIS, M. A.; ORBAN, J. I.; LEDUR, M. C.; HESTER, P. Y. (2003):

The use of densitometry to detect differences in bone mineral density and content of live White Leghorns fed varying levels of dietary calcium.

Poult Sci. 82(8), 1292-1301.

SCHREIWEIS, M. A.; ORBAN, J. I.; LEDUR, M. C.; MOODY, D. E.; HESTER, P. Y. (2005):

Validation of dual-energy X-ray absorptiometry in live White Leghorns.
Poult Sci. 84(1), 91-99.

SCHUSTER, S. (1996):

Untersuchung zu Häufigkeit, Lokalisation und Art von Frakturen beim Vogel.
Vet. Med. Diss. Gießen.

SCHWARZ, P. D. (1991):

Biomechanics of fractures and fracture fixation.
Semin Vet Med Surg (Small Anim). 6(1), 3-15.

SCHWARZE, E.; SCHRÖDER, L. (1972):

Kompendium der Geflügelanatomie. 2. Aufl.
Gustav Fischer, Stuttgart.

SHAHNAZARI, M.; SHARKEY, N. A.; FOSMIRE, G. J.; LEACH, R. M. (2006):

Effects of strontium on bone strength, density, volume, and microarchitecture in laying hens.
J Bone Miner Res. 21(11), 1696-1703.

SIMSA, S.; ORNAN, E. M. (2007):

Endochondral ossification process of the turkey (*Meleagris gallopavo*) during embryonic and juvenile development.
Poult Sci. 86(3), 565-571.

SOUTHERN, L. L.; BAKER, D. H. (1983):

Zinc toxicity, zinc deficiency and zinc-copper interrelationship in *Eimeria acervulina*-infected chicks.
J Nutr. 113(3), 688-696.

SPINK, R. R. (1978):

Fracture repair in rehabilitation of raptors.
Vet Med Small Anim Clin. 73(11), 1451-1455.

STARCHER, B. C.; HILL, C. H.; MADARAS, J. G. (1980):

Effect of zinc deficiency on bone collagenase and collagen turnover.

J Nutr. 110(10), 2095-2102.

STARCK, J. M.; CHINSAMY, A. (2002):

Bone microstructure and developmental plasticity in birds and other dinosaurs.

J Morphol. 254(3), 232-246.

SUHAI, B.; GASPARIK, M.; CSORBA, G.; GERICS, B.; HORVATH, G. (2006):

Wall thickness of gas- and marrow-filled avian long bones: measurements on humeri, femora and tibiotarsi in crows (*Corvus corone cornix*) and magpies (*Pica pica*).

J Biomech. 39(11), 2140-2144.

TAYLOR, D.; O'REILLY, P.; VALLET, L.; LEE, T. C. (2003):

The fatigue strength of compact bone in torsion.

J Biomech. 36(8), 1103-1109.

TAYLOR, T. G.; MOORE, J. H.; HERTELENDY, F. (1960):

Variations in the mineral composition of individual bones of the skeleton of the domestic fowl.

Br J Nutr. 14(1), 49-57.

THORP, B. H.; WADDINGTON, D. (1997):

Relationships between the bone pathologies, ash and mineral content of long bones in 35-day-old broiler chickens.

Res Vet Sci. 62(1), 67-73.

TURAN, B.; BALCIK, C.; AKKAS, N. (1997):

Effect of dietary selenium and vitamin E on the biomechanical properties of rabbit bones.

Clin Rheumatol. 16(5), 441-449.

VINCENT, J. F.; LATHAM, P.; MARSDEN, S. (1990):

Strength of bones in chickens.

Vet Rec. 127(8), 219.

VITS, A. (2005):

Evaluierung von Kleingruppenhaltung und ausgestalteten Käfigen für Legehennen hinsichtlich wirtschaftlicher und gesundheitlicher Parameter mit besonderer Berücksichtigung von Legeleistung, Eiqualität und Knochenfestigkeit.

Vet. Med. Diss. Hannover.

VO, K. V.; BOONE, M. A.; TORRENCE, A. K. (1978):

Electrolyte content of blood and bone in chickens subjected to heat stress.

Poult Sci. 57(2), 542-544.

WEDEKIND, K. J.; BAKER, D. H. (1990):

Zinc bioavailability in feed-grade sources of zinc.

J Anim Sci. 68(3), 684-689.

WEINER, S.; TRAUB, W. (1992):

Bone structure: from angstroms to microns.

FASEB J. 6(3), 879-885.

WEISKE, H. (1889):

Untersuchungen über Qualität und Quantität der Vogel-Knochen und Federn in verschiedenen Altersstadien.

Landwirtschaftliche Versuchs-Stationen. 36, 81-103.

WENDELL, M. D.; SLEEMAN, J. M.; KRATZ, G. (2002):

Retrospective study of morbidity and mortality of raptors admitted to Colorado State University Veterinary Teaching Hospital during 1995 to 1998.

J Wildl Dis. 38(1), 101-106.

WILSON, J. H. (1991):

Bone strength of caged layers as affected by dietary calcium and phosphorus concentrations, reconditioning, and ash content.

Br Poult Sci. 32(3), 501-508.

WOHL, G. R.; LOEHRKE, L.; WATKINS, B. A.; ZERNICKE, R. F. (1998):

Effects of high-fat diet on mature bone mineral content, structure, and mechanical properties.

Calcif Tissue Int. 63(1), 74-79.

YALCIN, S.; OZKAN, S.; COSKUNER, E.; BILGEN, G.; DELEN, Y.; KURTULMUS, Y.; TANYALCIN, T. (2001):

Effects of strain, maternal age and sex on morphological characteristics and composition of tibial bone in broilers.

Br Poult Sci. 42(2), 184-190.

ZHANG, B.; COON, C. N. (1997):

The relationship of various tibia bone measurements in hens.

Poult Sci. 76(12), 1698-1701.

ZOTTI, A.; RIZZI, C.; CHIERICATO, G.; BERNARDINI, D. (2003):

Accuracy and precision of dual-energy x-ray absorptiometry for ex vivo determination of mineral content in turkey poult bones.

Vet Radiol Ultrasound. 44(1), 49-52.

ZULAUF-FISCHER, I.; LIESEGANG, A.; HAESSIG, M.; CLAUSS, M.; HATT, J. M. (2006):

Differences in bone mineral content and density between male and female budgerigars (*Melopsittacus undulatus*) during the non-reproductive season.

J Vet Med A Physiol Pathol Clin Med. 53(9), 456-457.

9 Abbildungsverzeichnis

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 1: Kraft-Dehnungs-Diagramm (dimensionslos) eines elastischen Materials (modifiziert nach SCHWARZ, 1991) | 22 |
| Abbildung 2: Materialprüfmaschine mit eingespanntem Humerus eines Seeadlers nach dem Torsionsversuch | 32 |
| Abbildung 3: Moment-Winkel-Kurve des Torsionsversuches am Humerus eines männlichen, juvenilen Mäusebussards mit Steigungsgeraden (gestrichelte Linie) | 33 |
| Abbildung 4: Scatterplot der Trockensubstanzgehalte der Humeri (TS_{Humerus}) und der Tibiotarsi ($TS_{\text{Tibiotarsus}}$) der drei Arten mit Regressionsgerade für alle drei Arten (Einzelpunkte \circ , Δ , \times ; Regressionsgerade —) | 52 |
| Abbildung 5: Boxplot des Rohaschegehalts der Tibiotarsi der juvenilen und adulten Mäusebussarde | 55 |
| Abbildung 6: Boxplot des Kalziumgehalts in der Rohasche der Humeri der juvenilen und adulten Mäusebussarde; Ausreißer (\circ) | 57 |
| Abbildung 7: Drop-Line-Diagramme der Phosphorgehalte in Rohasche von Tibiotarsi der drei Vogelarten (Einzelpunkte \circ ; Median —) | 59 |
| Abbildung 8: Boxplot des maximalen Drehmoments der Humeri von juvenilen und adulten Mäusebussarden | 67 |
| Abbildung 9: Drop-Line-Diagramme der Steifigkeit der Tibiotarsi von männlichen und weiblichen Tieren der drei Vogelarten (Einzelpunkte \circ ; Median —) | 69 |
| Abbildung 10: Längsschnitt der Tibiotarsusdiaphyse eines adulten, männlichen Mäusebussards (Trichrom-Färbung, 200fache Vergrößerung), Zerreißungsartefakte in der marknahen Kompakta | 79 |
| Abbildung 11: Längsschnitt der Humerusdiaphyse eines adulten, männlichen Mäusebussards (Pentachrom-Färbung, 50fache Vergrößerung) | 80 |
| Abbildung 12: Längsschnitt der Humerusdiaphyse eines adulten, männlichen Mäusebussards (Pentachrom-Färbung, 200fache Vergrößerung) | 81 |
| Abbildung 13: Querschnitt der Humerusdiaphyse eines adulten, männlichen Mäusebussards (Trichrom-Färbung, 100fache Vergrößerung), Zerreißungsartefakte in der 3. Schicht | 82 |
| Abbildung 14: Längsschnitt durch die distale Humerusepiphyse eines adulten, männlichen Mäusebussards (Pentachrom-Färbung, 50fache Vergrößerung) | 83 |
| Abbildung 15: Längsschnitt durch den distalen Tibiotarsus eines adulten, männlichen Mäusebussards [von Kossa/Safranin-O-Färbung, Vergrößerung: Lupe (schwarz = mineralisierte Knochensubstanz, rot = nicht-mineralisierte Knochenanteile)] | 84 |

10 Tabellenverzeichnis

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabelle 1: Literaturangaben zum Knochengewicht im Vergleich zum Gesamtgewicht verschiedener Vogelarten..... | 9 |
| Tabelle 2: Literaturangaben zum Rohaschegehalt verschiedener Vogelarten und Knochen als Einzelwert (EW), Messbereich, Mittelwert oder Mittelwert mit Standardabweichung..... | 11 |
| Tabelle 3: Literaturangaben zum Kalzium- und Phosphorgehalt in der Rohasche von Knochen verschiedener Vogelarten als Einzelwert (EW), Mittelwert oder Mittelwert mit Standardabweichung | 14 |
| Tabelle 4: Literaturangaben zum Magnesiumgehalt in der Rohasche von Knochen verschiedener Vogelarten als Einzelwert (EW), Mittelwert oder Mittelwert mit Standardabweichung | 15 |
| Tabelle 5: Ausgewählte Literaturangaben zum Kupfer- und Zinkgehalt in der Rohasche von Knochen verschiedener Vogelarten als Mittelwert oder Mittelwert mit Standardabweichung | 18 |
| Tabelle 6: Literaturangaben zum Mittelwert der Knochendichte des Tibiotarsus verschiedener Vogelarten | 20 |
| Tabelle 7: Literaturangaben zur mechanischen Belastbarkeit von Vogelknochen als Mittelwert mit Standardabweichung (MW \pm SD)..... | 28 |
| Tabelle 8: Aufteilung der Vögel in Versuchsgruppen nach Vogelart, Alter und Geschlecht.. | 31 |
| Tabelle 9: Alkoholkonzentration der Alkoholreihe zur Entwässerung der Mäusebussardknochen | 38 |
| Tabelle 10: Alter und Geschlecht der Greifvogel- und Eulenarten..... | 44 |
| Tabelle 11: Körpergewicht (g) der Vögel | 44 |
| Tabelle 12: Ernährungszustand der Vögel | 44 |
| Tabelle 13: Gewicht (g) der Humerusdiaphysen..... | 45 |
| Tabelle 14: Gewicht (g) der Tibiotarsusdiaphysen | 46 |
| Tabelle 15: Kortexdicke (mm) der Humeri..... | 47 |
| Tabelle 16: Kortexdicke (mm) der Tibiotarsi | 48 |
| Tabelle 17: Dichte (g/cm^3) der Humeri..... | 49 |
| Tabelle 18: Dichte (g/cm^3) der Tibiotarsi | 49 |
| Tabelle 19: Trockensubstanzgehalt (%) der Humeri..... | 50 |
| Tabelle 20: Trockensubstanzgehalt (%) der Tibiotarsi | 51 |
| Tabelle 21: Rohfettgehalt (% der TS) der 19 Knochen..... | 53 |
| Tabelle 22: Rohaschegehalt (% der TS) der Humeri | 54 |
| Tabelle 23: Rohaschegehalt (% der TS) der Tibiotarsi | 54 |
| Tabelle 24: Kalziumgehalt (g/kg Rohasche) der Humeri..... | 56 |
| Tabelle 25: Kalziumgehalt (g/kg Rohasche) der Tibiotarsi | 57 |
| Tabelle 26: Phosphorgehalt (g/kg Rohasche) der Humeri | 58 |
| Tabelle 27: Phosphorgehalt (g/kg Rohasche) der Tibiotarsi..... | 59 |
| Tabelle 28: Verhältnis des Medians der Kalziumkonzentration (Ca) zum Median der Phosphorkonzentration (P) in Rohasche von Humeri und Tibiotarsi | 60 |
| Tabelle 29: Magnesiumgehalt (mg/kg Rohasche) der Humeri | 61 |
| Tabelle 30: Magnesiumgehalt (mg/kg Rohasche) der Tibiotarsi | 61 |
| Tabelle 31: Kupfergehalt (mg/kg Rohasche) der Humeri..... | 62 |
| Tabelle 32: Kupfergehalt (mg/kg Rohasche) der Tibiotarsi..... | 63 |
| Tabelle 33: Zinkgehalt (mg/kg Rohasche) der Humeri..... | 64 |
| Tabelle 34: Zinkgehalt (mg/kg Rohasche) der Tibiotarsi | 65 |
| Tabelle 35: Maximales Drehmoment (Nm) der Humeri..... | 66 |
| Tabelle 36: Maximales Drehmoment (Nm) der Tibiotarsi..... | 67 |
| Tabelle 37: Steifigkeit ($\text{Nm}/^\circ$) der Humeri | 68 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabelle 38: Steifigkeit (Nm/°) der Tibiotarsi | 69 |
| Tabelle 39: Korrelationskoeffizient nach Spearman (r_s) und p-Werte (p) der Dichte der Humeri der Vogelarten dieser Studie mit verschiedenen Parametern der Knochenzusammensetzung (signifikante Korrelationen hervorgehoben *) | 70 |
| Tabelle 40: Korrelationskoeffizient nach Spearman (r_s) und p-Werte (p) des Rohaschegehalts in Humeri der Vogelarten dieser Studie mit verschiedenen Parametern der Knochenzusammensetzung (signifikante Korrelationen hervorgehoben *) | 71 |
| Tabelle 41: Korrelationskoeffizient nach Spearman (r_s) und p-Werte (p) des maximalen Drehmoments der Humeri der Vogelarten dieser Studie mit morphologischen Parametern, Dichte und verschiedenen Parametern der Knochenzusammensetzung (signifikante Korrelationen hervorgehoben *) | 72 |
| Tabelle 42: Korrelationskoeffizient nach Spearman (r_s) und p-Werte (p) der Steifigkeit der Humeri der Vogelarten dieser Studie mit morphologischen Parametern, Dichte und verschiedenen Parametern der Knochenzusammensetzung (signifikante Korrelationen hervorgehoben *)..... | 73 |
| Tabelle 43: Korrelationskoeffizient nach Spearman (r_s) und p-Werte (p) der Dichte der Tibiotarsi der Vogelarten dieser Studie mit verschiedenen Parametern der Knochenzusammensetzung (signifikante Korrelationen hervorgehoben *) | 74 |
| Tabelle 44: Korrelationskoeffizient nach Spearman (r_s) und p-Werte (p) des Rohaschegehalts der Tibiotarsi der Vogelarten dieser Studie mit verschiedenen Parametern der Knochenzusammensetzung (signifikante Korrelationen hervorgehoben *) | 74 |
| Tabelle 45: Korrelationskoeffizient nach Spearman (r_s) und p-Werte (p) des maximalen Drehmoments der Tibiotarsi der Vogelarten dieser Studie mit morphologischen Parametern, Dichte und verschiedenen Parametern der Knochenzusammensetzung (signifikante Korrelationen hervorgehoben *) | 75 |
| Tabelle 46: Korrelationskoeffizient nach Spearman (r_s) und p-Werte (p) der Steifigkeit der Tibiotarsi der Vogelarten dieser Studie mit morphologischen Parametern, Dichte und verschiedenen Parametern der Knochenzusammensetzung (signifikante Korrelationen hervorgehoben *)..... | 76 |
| Tabelle 47: Korrelationskoeffizient nach Spearman (r_s) und p-Werte (p) des Ernährungszustandes der Vogelarten dieser Studie mit verschiedenen Parametern der Knochenzusammensetzung und der mechanischen Belastbarkeit der Humeri (signifikante Korrelationen hervorgehoben *) | 77 |
| Tabelle 48: Korrelationskoeffizient nach Spearman (r_s) und p-Werte (p) des Ernährungszustandes der Vogelarten dieser Studie mit verschiedenen Parametern der Knochenzusammensetzung und der mechanischen Belastbarkeit der Tibiotarsi (signifikante Korrelationen hervorgehoben *) | 78 |
| Tabelle 49: Median der verschiedenen Untersuchungsparameter der Humeri der einzelnen Vogelarten ohne Berücksichtigung von Alter und Geschlecht | 128 |
| Tabelle 50: Median der verschiedenen Untersuchungsparameter der Tibiotarsi der einzelnen Vogelarten ohne Berücksichtigung von Alter und Geschlecht | 128 |
| Tabelle 51: Vogelart, Alter, Geschlecht, Gewicht, Ernährungszustand (EZ) und Dauer der Haltung in Gefangenschaft (Haltung) der 62 untersuchten Vögel..... | 129 |
| Tabelle 52: Gewicht der Diaphyse (GwDiaphyse), Kortexdicke, Knochendichte (BMD), maximales Drehmoment (M_{max}), maximaler Winkel und Steifigkeit der Humeri der 62 untersuchten Vögel..... | 130 |
| Tabelle 53: Trockensubstanz (TS), Rohasche, Rohfett, Kalzium-, Phosphor-, Magnesium- (Mg), Kupfer- und Zinkgehalt der Humeri der 62 untersuchten Vögel..... | 131 |
| Tabelle 54: Gewicht der Diaphyse (GwDiaphyse), Kortexdicke, Knochendichte (BMD), maximales Drehmoment (M_{max}), maximaler Winkel und Steifigkeit der Tibiotarsi der 62 untersuchten Vögel..... | 133 |

Tabelle 55: Trockensubstanz (TS), Rohasche, Rohfett, Kalzium-, Phosphor-, Magnesium-
(Mg), Kupfer- und Zinkgehalt der Tibiotarsi der 62 untersuchten Vögel..... 134

11 Anhang

Tabelle 49: Median der verschiedenen Untersuchungsparameter der Humeri der einzelnen Vogelarten ohne Berücksichtigung von Alter und Geschlecht

| Parameter | Mäusebussard (n=40) | Seeadler (n=13) | Schleiereule (n=9) |
|-----------------------------|------------------------|--------------------|-----------------------|
| Gewicht Diaphyse (g) | 2,69 | 18,97 | 0,87 |
| Kortexdicke (mm) | 0,70 | 1,51 | 0,50 |
| Dichte (g/cm ³) | 1,91 | 1,98 | 2,00 |
| Trockensubstanz (%) | 87,6 | 89,5 | 88,3 |
| Rohfett (%) | 0,3 | 0,2 | 1,4 |
| Rohasche (%) | 64,7 | 61,1 | 67,2 |
| Kalzium (g/kg Ra) | 225 | 220 | 246 |
| Phosphor (g/kg Ra) | 112,41 | 103,52 | 118,33 |
| Magnesium (mg/kg Ra) | 3485 | 2590 | 3640 |
| Kupfer (mg/kg Ra) | 6,14 | 5,76 | 8,65 |
| Zink (mg/kg Ra) | 207 | 278 | 185 |
| max. Drehmoment (Nm) | 2,54 | 22,58 | 1,01 |
| Steifigkeit (Nm/°) | 0,20 | 1,32 | 0,07 |

Tabelle 50: Median der verschiedenen Untersuchungsparameter der Tibiotarsi der einzelnen Vogelarten ohne Berücksichtigung von Alter und Geschlecht

| Parameter | Mäusebussard (n=40) | Seeadler (n=13) | Schleiereule (n=9) |
|-----------------------------|------------------------|--------------------|-----------------------|
| Gewicht Diaphyse (g) | 1,75 | 9,45 | 0,88 |
| Kortexdicke (mm) | 0,65 | 1,33 | 0,52 |
| Dichte (g/cm ³) | 1,80 | 1,99 | 1,91 |
| Trockensubstanz (%) | 87,0 | 88,4 | 88,3 |
| Rohfett (%) | 0,3 | 0,6 | 0,7 |
| Rohasche (%) | 64,9 | 59,7 | 65,3 |
| Kalzium (g/kg Ra) | 235 | 230 | 239 |
| Phosphor (g/kg Ra) | 109,72 | 101,73 | 115,50 |
| Magnesium (mg/kg Ra) | 3395 | 2510 | 3720 |
| Kupfer (mg/kg Ra) | 5,85 | 5,28 | 12,70 |
| Zink (mg/kg Ra) | 219 | 273 | 199 |
| max. Drehmoment (Nm) | 1,33 | 8,95 | 0,52 |
| Steifigkeit (Nm/°) | 0,08 | 0,41 | 0,03 |

Tabelle 51: Vogelart, Alter, Geschlecht, Gewicht, Ernährungszustand (EZ) und Dauer der Haltung in Gefangenschaft (Haltung) der 62 untersuchten Vögel

| Vogelart | Nr. | Alter | Geschlecht | Gewicht (g) | EZ | Haltung (Tage) |
|--------------|----------|----------|------------|-------------|----------|----------------|
| Mäusebussard | 3998 | männlich | adult | 670 | schlecht | 52 |
| Mäusebussard | 4058 | weiblich | adult | 990 | sehr gut | 32 |
| Mäusebussard | 4070 | weiblich | adult | 840 | schlecht | 1 |
| Mäusebussard | 4073 | weiblich | adult | 825 | gut | 2 |
| Mäusebussard | 4083 | männlich | adult | 525 | schlecht | 12 |
| Mäusebussard | 4084 | weiblich | juvenil | 800 | mäßig | 12 |
| Mäusebussard | 4204 | männlich | adult | 575 | schlecht | 2 |
| Mäusebussard | 4224 | männlich | adult | 610 | schlecht | 1 |
| Mäusebussard | 4459 | weiblich | adult | 820 | mäßig | 2 |
| Mäusebussard | 4964 | männlich | adult | 470 | schlecht | 1 |
| Mäusebussard | 4988 | weiblich | juvenil | 530 | schlecht | 1 |
| Mäusebussard | 4997 | männlich | juvenil | 640 | schlecht | 46 |
| Mäusebussard | 4998 | männlich | juvenil | 530 | schlecht | 2 |
| Mäusebussard | 5006 | männlich | adult | 815 | gut | 25 |
| Mäusebussard | 5016 | weiblich | juvenil | 460 | schlecht | 1 |
| Mäusebussard | 5226 | männlich | adult | 800 | gut | 4 |
| Mäusebussard | 5227 | männlich | juvenil | 700 | mäßig | 1 |
| Mäusebussard | 5283 | weiblich | adult | 960 | sehr gut | 2 |
| Mäusebussard | 5291 | weiblich | juvenil | 800 | mäßig | 16 |
| Mäusebussard | 5297 | weiblich | adult | 900 | gut | 1 |
| Mäusebussard | 5319 | männlich | adult | 832 | gut | 1 |
| Mäusebussard | 5340 | männlich | adult | 925 | sehr gut | 1 |
| Mäusebussard | 5346 | männlich | juvenil | 760 | gut | 1 |
| Mäusebussard | 5348 | männlich | juvenil | 560 | schlecht | 2 |
| Mäusebussard | 5369 | weiblich | adult | 990 | sehr gut | 2 |
| Mäusebussard | 5371 | weiblich | juvenil | 590 | schlecht | 1 |
| Mäusebussard | 5389 | männlich | adult | 550 | schlecht | 9 |
| Mäusebussard | 5394 | weiblich | adult | 550 | schlecht | 2 |
| Mäusebussard | 5591 | männlich | juvenil | 680 | mäßig | 1 |
| Mäusebussard | 5596 | weiblich | adult | 920 | gut | 2 |
| Mäusebussard | 6065 | weiblich | adult | 815 | mäßig | 4 |
| Mäusebussard | 6104 | weiblich | juvenil | 550 | schlecht | 4 |
| Mäusebussard | 6132 | weiblich | juvenil | 435 | schlecht | 3 |
| Mäusebussard | 6216 | weiblich | juvenil | 790 | mäßig | 4 |
| Mäusebussard | 6218 | männlich | juvenil | 595 | schlecht | 32 |
| Mäusebussard | 6244 | weiblich | juvenil | 824 | mäßig | 1 |
| Mäusebussard | 6463 | weiblich | juvenil | 510 | schlecht | 2 |
| Mäusebussard | B 283/06 | männlich | juvenil | 505 | schlecht | 0 |
| Mäusebussard | B 38/08 | männlich | juvenil | 590 | schlecht | 4 |
| Mäusebussard | 598/07 | männlich | juvenil | 537 | schlecht | 2 |
| Seeadler | 4077 | männlich | adult | 3498 | schlecht | 1 |
| Seeadler | 4119 | männlich | adult | 4300 | mäßig | 13 |
| Seeadler | 4999 | weiblich | juvenil | 3110 | schlecht | 6 |
| Seeadler | 5023 | männlich | juvenil | 3210 | schlecht | 3 |
| Seeadler | B 11/04 | weiblich | adult | 4125 | sehr gut | 0 |
| Seeadler | B 33/04 | weiblich | adult | 5554 | mäßig | 0 |
| Seeadler | B 118/04 | weiblich | adult | 6075 | mäßig | 0 |
| Seeadler | B 144/05 | männlich | adult | 2686 | schlecht | 0 |
| Seeadler | B 28/06 | weiblich | adult | 5358 | gut | 0 |
| Seeadler | B 31/06 | männlich | adult | 3295 | schlecht | 0 |
| Seeadler | B 37/06 | männlich | adult | 4537 | gut | 0 |
| Seeadler | B 41/06 | weiblich | adult | 4570 | schlecht | 0 |
| Seeadler | B 113/06 | männlich | adult | 3630 | schlecht | 0 |
| Schleiereule | 4071 | männlich | adult | 305 | gut | 148 |
| Schleiereule | 4904 | männlich | adult | 280 | gut | 8 |
| Schleiereule | 5477 | weiblich | adult | 268 | schlecht | 1 |

Fortsetzung Tabelle 51: Vogelart, Alter, Geschlecht, Gewicht, Ernährungszustand (EZ) und Dauer der Haltung in Gefangenschaft (Haltung) der 62 untersuchten Vögel

| Vogelart | Nr. | Alter | Geschlecht | Gewicht (g) | EZ | Haltung (Tage) |
|--------------|----------|----------|------------|-------------|----------|----------------|
| Schleiereule | 6776 | männlich | adult | 270 | schlecht | 14 |
| Schleiereule | B 259/07 | weiblich | adult | 380 | gut | 0 |
| Schleiereule | B 262/07 | weiblich | adult | 360 | gut | 0 |
| Schleiereule | B 271/07 | weiblich | adult | 334 | gut | 0 |
| Schleiereule | B 13/08 | weiblich | adult | 404 | gut | 0 |
| Schleiereule | B 29/08 | männlich | adult | 320 | gut | 0 |

Tabelle 52: Gewicht der Diaphyse (GwDiaphyse), Kortexdicke, Knochendichte (BMD), maximales Drehmoment (M_{\max}), maximaler Winkel und Steifigkeit der Humeri der 62 untersuchten Vögel

| Vogelart | Nr. | GwDiaphyse (g) | Kortexdicke (mm) | BMD (g/cm^3) | M_{\max} (Nm) | max. Winkel ($^\circ$) | Steifigkeit ($\text{Nm}/^\circ$) |
|--------------|----------|----------------|------------------|--------------------------------|-----------------|--------------------------|------------------------------------|
| Mäusebussard | 3998 | 2,53 | 0,70 | 1,99 | 2,71 | 15,62 | 0,21 |
| Mäusebussard | 4058 | 3,88 | 0,73 | 2,07 | 3,45 | 16,97 | 0,22 |
| Mäusebussard | 4070 | 3,51 | 0,71 | 2,05 | 3,10 | 16,83 | 0,23 |
| Mäusebussard | 4073 | 3,18 | 0,74 | 2,01 | 3,12 | 14,42 | 0,29 |
| Mäusebussard | 4083 | 2,72 | 0,68 | 1,96 | 2,73 | 17,24 | 0,19 |
| Mäusebussard | 4084 | 3,16 | 0,72 | 1,95 | 3,24 | 17,16 | 0,24 |
| Mäusebussard | 4204 | 3,13 | 0,65 | 1,91 | 3,08 | 17,32 | 0,20 |
| Mäusebussard | 4224 | 3,12 | 0,73 | 1,68 | 2,74 | 12,43 | 0,26 |
| Mäusebussard | 4459 | 3,69 | 0,75 | 1,67 | 3,3 | 16,42 | 0,22 |
| Mäusebussard | 4964 | 2,66 | 0,72 | 2,01 | 2,95 | 13,83 | 0,24 |
| Mäusebussard | 4988 | 2,43 | 0,68 | 1,55 | 2,04 | 16,95 | 0,17 |
| Mäusebussard | 4997 | 1,74 | 0,93 | 1,81 | 2,02 | 23,64 | 0,13 |
| Mäusebussard | 4998 | 1,92 | 0,60 | 1,91 | 2,60 | 16,37 | 0,2 |
| Mäusebussard | 5006 | 2,71 | 0,57 | 1,95 | 2,33 | 12,82 | 0,22 |
| Mäusebussard | 5016 | 2,56 | 0,61 | 1,71 | 2,03 | 19,79 | 0,13 |
| Mäusebussard | 5226 | 2,74 | 0,66 | 1,64 | 2,35 | 14,21 | 0,20 |
| Mäusebussard | 5227 | 1,97 | 0,52 | 1,93 | 1,80 | 19,89 | 0,13 |
| Mäusebussard | 5283 | 3,73 | 0,79 | 2,00 | 3,56 | 15,92 | 0,25 |
| Mäusebussard | 5291 | 3,03 | 0,58 | 1,85 | 2,42 | 15,96 | 0,18 |
| Mäusebussard | 5297 | 2,92 | 0,67 | 2,00 | 2,02 | 12,03 | 0,17 |
| Mäusebussard | 5319 | 3,12 | 0,76 | 1,96 | 2,86 | 17,27 | 0,24 |
| Mäusebussard | 5340 | 3,17 | 0,73 | 2,11 | 3,37 | 15,34 | 0,24 |
| Mäusebussard | 5346 | 2,37 | 0,49 | 1,83 | 2,31 | 23,00 | 0,12 |
| Mäusebussard | 5348 | 2,61 | 0,63 | 1,55 | 2,48 | 17,26 | 0,16 |
| Mäusebussard | 5369 | 3,74 | 0,76 | 1,87 | 2,59 | 13,58 | 0,21 |
| Mäusebussard | 5371 | 2,78 | 0,69 | 1,99 | 2,59 | 16,44 | 0,19 |
| Mäusebussard | 5389 | 2,85 | 0,67 | 1,83 | 2,39 | 14,72 | 0,19 |
| Mäusebussard | 5394 | 3,68 | 0,79 | 1,77 | 3,79 | 20,69 | 0,25 |
| Mäusebussard | 5591 | 2,57 | 0,68 | 2,02 | 2,27 | 15,65 | 0,16 |
| Mäusebussard | 5596 | 2,66 | 0,69 | 1,99 | 3,25 | 13,57 | 0,29 |
| Mäusebussard | 6065 | 2,33 | 0,64 | 1,55 | 2,98 | 14,88 | 0,24 |
| Mäusebussard | 6104 | 2,06 | 0,82 | 1,61 | 1,20 | 14,64 | 0,10 |
| Mäusebussard | 6132 | 1,79 | 0,77 | 1,63 | 1,18 | 11,20 | 0,12 |
| Mäusebussard | 6216 | 1,95 | 0,98 | 1,64 | 2,21 | 15,21 | 0,20 |
| Mäusebussard | 6218 | 1,41 | 0,81 | 1,49 | 1,46 | 13,59 | 0,12 |
| Mäusebussard | 6244 | 2,09 | 0,63 | 1,92 | 2,35 | 14,46 | 0,20 |
| Mäusebussard | 6463 | 1,95 | 0,57 | 1,89 | 2,31 | 11,45 | 0,23 |
| Mäusebussard | B 283/06 | 3,03 | 0,75 | 1,90 | 1,45 | 15,56 | 0,12 |
| Mäusebussard | B 38/08 | 2,62 | 0,68 | 1,89 | 2,65 | 19,33 | 0,17 |
| Mäusebussard | 598/07 | 2,54 | 0,73 | 1,96 | 2,16 | 17,99 | 0,13 |
| Seeadler | 4077 | 18,08 | 1,67 | 1,99 | 25,52 | 19,89 | 1,43 |

Fortsetzung Tabelle 52: Gewicht der Diaphyse (GwDiaphyse), Kortexdicke, Knochendichte (BMD), maximales Drehmoment (M_{\max}), maximaler Winkel und Steifigkeit der Humeri der 62 untersuchten Vögel

| Vogelart | Nr. | GwDiaphyse (g) | Kortexdicke (mm) | BMD (g/cm^3) | M_{\max} (Nm) | max.Winkel ($^\circ$) | Steifigkeit ($\text{Nm}/^\circ$) |
|--------------|----------|----------------|------------------|--------------------------------|-----------------|-------------------------|------------------------------------|
| Seeadler | 4119 | 19,24 | 1,49 | 1,99 | 24,63 | 19,93 | 1,43 |
| Seeadler | 4999 | 10,55 | 0,69 | 1,79 | 9,13 | 20,89 | 0,56 |
| Seeadler | 5023 | 15,51 | 1,22 | 1,91 | 14,2 | 23,44 | 0,85 |
| Seeadler | B 11/04 | 21,79 | 1,54 | 1,97 | 22,58 | 23,55 | 1,32 |
| Seeadler | B 33/04 | 32,68 | 1,30 | 1,98 | 26,06 | 22,96 | 1,50 |
| Seeadler | B 118/04 | 23,38 | 1,62 | 1,98 | 29,41 | 27,02 | 1,60 |
| Seeadler | B 144/05 | 18,91 | 1,51 | 1,99 | 19,20 | 28,57 | 0,80 |
| Seeadler | B 28/06 | 19,59 | 1,31 | 2,02 | 29,21 | 20,08 | 1,80 |
| Seeadler | B 31/06 | 14,25 | 1,27 | 1,93 | 18,93 | 22,74 | 1,02 |
| Seeadler | B 37/06 | 17,61 | 1,71 | 1,99 | 21,67 | 27,93 | 0,96 |
| Seeadler | B 41/06 | 22,99 | 1,64 | 1,97 | 29,93 | 21,58 | 1,62 |
| Seeadler | B 113/06 | 16,50 | 1,80 | 2,00 | 21,75 | 20,21 | 1,32 |
| Schleiereule | 4071 | 0,73 | 0,47 | 2,08 | 1,11 | 14,28 | 0,09 |
| Schleiereule | 4904 | 0,67 | 0,50 | 1,90 | 0,36 | 7,88 | 0,05 |
| Schleiereule | 5477 | 0,85 | 0,53 | 2,08 | 0,85 | 18,36 | 0,06 |
| Schleiereule | 6776 | 0,76 | 0,52 | 1,99 | 1,50 | 18,81 | 0,09 |
| Schleiereule | B 259/07 | 0,95 | 0,53 | 1,99 | 1,39 | 18,97 | 0,09 |
| Schleiereule | B 262/07 | 1,01 | 0,47 | 2,15 | 1,01 | 18,69 | 0,07 |
| Schleiereule | B 271/07 | 0,87 | 0,48 | 1,91 | 0,82 | 14,57 | 0,07 |
| Schleiereule | B 13/08 | 0,89 | 0,48 | 2,02 | 1,28 | 20,66 | 0,08 |
| Schleiereule | B 29/08 | 0,98 | 0,50 | 2,00 | 0,91 | 15,06 | 0,06 |

Tabelle 53: Trockensubstanz (TS), Rohasche, Rohfett, Kalzium-, Phosphor-, Magnesium- (Mg), Kupfer- und Zinkgehalt der Humeri der 62 untersuchten Vögel

| Vogelart | Nr. | TS (%) | Rohasche (%) | Rohfett (%) | Kalzium (g/kg) | Phosphor (g/kg) | Mg (mg/kg) | Kupfer (mg/kg) | Zink (mg/kg) |
|--------------|------|--------|--------------|-------------|----------------|-----------------|------------|----------------|--------------|
| Mäusebussard | 3998 | 88,24 | 66,44 | | 116,52 | 266 | 3300 | 5,93 | 203 |
| Mäusebussard | 4058 | 91,23 | 66,94 | 1,45 | 122,57 | 212 | 3190 | 5,41 | 213 |
| Mäusebussard | 4070 | 88,30 | 66,56 | | 118,04 | 250 | 3460 | 5,26 | 199 |
| Mäusebussard | 4073 | 87,67 | 67,37 | | 118,84 | 252 | 3400 | 6,49 | 217 |
| Mäusebussard | 4083 | 88,56 | 66,67 | 0,52 | 113,35 | 234 | 3560 | 5,59 | 207 |
| Mäusebussard | 4084 | 87,43 | 64,97 | | 115,36 | 252 | 3640 | 8,84 | 215 |
| Mäusebussard | 4204 | 86,93 | 68,02 | 0,40 | 115,95 | 250 | 3300 | 7,17 | 192 |
| Mäusebussard | 4224 | 85,10 | 68,24 | | 117,64 | 268 | 3230 | 6,07 | 235 |
| Mäusebussard | 4459 | 88,91 | 67,88 | | 117,22 | 258 | 3340 | 17,10 | 202 |
| Mäusebussard | 4964 | 87,97 | 67,49 | | 116,78 | 274 | 3080 | 9,85 | 225 |
| Mäusebussard | 4988 | 84,80 | 61,83 | | 106,57 | 206 | 4160 | 7,38 | 211 |
| Mäusebussard | 4997 | 82,68 | 62,32 | | 112,05 | 208 | 4640 | 6,98 | 182 |
| Mäusebussard | 4998 | 84,73 | 63,78 | | 107,25 | 210 | 3770 | 4,88 | 188 |
| Mäusebussard | 5006 | 88,21 | 66,36 | | 116,33 | 258 | 3300 | 6,58 | 189 |
| Mäusebussard | 5016 | 83,04 | 61,90 | 0,17 | 108,27 | 194 | 4720 | 7,74 | 180 |
| Mäusebussard | 5226 | 89,49 | 67,21 | | 112,48 | 264 | 2990 | 6,13 | 181 |
| Mäusebussard | 5227 | 86,05 | 61,15 | | 104,62 | 193 | 4400 | 5,95 | 194 |
| Mäusebussard | 5283 | 88,36 | 66,78 | | 116,60 | 240 | 3630 | 5,25 | 192 |
| Mäusebussard | 5291 | 88,34 | 63,84 | 0,27 | 107,23 | 201 | 3980 | 6,71 | 212 |
| Mäusebussard | 5297 | 89,83 | 66,43 | | 116,94 | 224 | 3460 | 5,54 | 230 |
| Mäusebussard | 5319 | 86,04 | 66,67 | | 117,97 | 248 | 3310 | 6,69 | 253 |
| Mäusebussard | 5340 | 91,14 | 68,09 | | 118,35 | 250 | 3550 | 5,77 | 227 |
| Mäusebussard | 5346 | 90,07 | 62,57 | | 108,11 | 198 | 3940 | 5,17 | 212 |
| Mäusebussard | 5348 | 88,24 | 62,88 | 0,15 | 107,51 | 202 | 4050 | 4,99 | 237 |
| Mäusebussard | 5369 | 89,45 | 66,88 | | 116,36 | 244 | 3460 | 9,84 | 204 |
| Mäusebussard | 5371 | 88,53 | 66,01 | | 117,23 | 258 | 3730 | 5,75 | 188 |

Fortsetzung Tabelle 53: Trockensubstanz (TS), Rohasche, Rohfett, Kalzium-, Phosphor-, Magnesium- (Mg), Kupfer- und Zinkgehalt der Humeri der 62 untersuchten Vögel

| Vogelart | Nr. | TS (%) | Rohasche (%) | Rohfett (%) | Kalzium (g/kg) | Phosphor (g/kg) | Mg (mg/kg) | Kupfer (mg/kg) | Zink (mg/kg) |
|--------------|----------|--------|--------------|-------------|----------------|-----------------|------------|----------------|--------------|
| Mäusebussard | 5389 | 89,30 | 67,78 | | 120,81 | 262 | 3510 | 6,06 | 226 |
| Mäusebussard | 5394 | 85,99 | 66,74 | | 115,71 | 242 | 3400 | 9,04 | 221 |
| Mäusebussard | 5591 | 87,62 | 63,67 | | 101,48 | 221 | 3030 | 7,82 | 166 |
| Mäusebussard | 5596 | 89,24 | 64,45 | | 112,34 | 206 | 2690 | 5,05 | 220 |
| Mäusebussard | 6065 | 82,80 | 63,43 | | 111,09 | 223 | 3140 | 10,80 | 192 |
| Mäusebussard | 6104 | 79,71 | 58,34 | | 101,06 | 185 | 3720 | 5,36 | 249 |
| Mäusebussard | 6132 | 82,03 | 62,66 | | 100,90 | 190 | 3850 | 6,15 | 254 |
| Mäusebussard | 6216 | 83,31 | 62,34 | | 106,77 | 195 | 3670 | 5,26 | 206 |
| Mäusebussard | 6218 | 85,44 | 63,18 | | 109,08 | 201 | 3720 | 5,52 | 201 |
| Mäusebussard | 6244 | 84,59 | 62,12 | | 107,49 | 226 | 3560 | 5,36 | 278 |
| Mäusebussard | 6463 | 85,64 | 62,69 | | 105,46 | 215 | 3560 | 6,36 | 219 |
| Mäusebussard | B 283/06 | 80,54 | 57,56 | | 96,86 | 202 | 3180 | 7,53 | 207 |
| Mäusebussard | B 38/08 | 85,35 | 60,91 | | 97,24 | 206 | 3090 | 10,40 | 178 |
| Mäusebussard | 598/07 | 87,66 | 63,66 | | 93,27 | 232 | 3140 | 7,67 | 192 |
| Seeadler | 4077 | 89,81 | 59,79 | 0,02 | 99,21 | 214 | 2430 | 5,34 | 284 |
| Seeadler | 4119 | 89,95 | 61,13 | | 102,35 | 240 | 2390 | 6,81 | 295 |
| Seeadler | 4999 | 85,93 | 56,02 | | 94,72 | 180 | 3300 | 7,09 | 291 |
| Seeadler | 5023 | 86,14 | 58,17 | | 101,03 | 201 | 3660 | 8,35 | 286 |
| Seeadler | B 11/04 | 88,67 | 59,61 | | 98,99 | 201 | 2660 | 4,72 | 255 |
| Seeadler | B 33/04 | 89,22 | 59,00 | | 103,52 | 225 | 2180 | 16,60 | 193 |
| Seeadler | B 118/04 | 89,45 | 61,24 | | 106,81 | 228 | 2730 | 7,14 | 286 |
| Seeadler | B 144/05 | 89,06 | 62,19 | | 108,75 | 220 | 2440 | 5,61 | 286 |
| Seeadler | B 28/06 | 90,12 | 62,14 | 0,28 | 104,53 | 205 | 2150 | 5,68 | 278 |
| Seeadler | B 31/06 | 89,89 | 61,88 | 0,19 | 106,03 | 225 | 2810 | 6,53 | 261 |
| Seeadler | B 37/06 | 89,83 | 62,55 | | 103,77 | 229 | 2620 | 5,76 | 270 |
| Seeadler | B 41/06 | 90,03 | 61,20 | | 103,84 | 230 | 2580 | 4,55 | 266 |
| Seeadler | B 113/06 | 89,25 | 61,11 | | 101,33 | 220 | 2590 | 5,52 | 272 |
| Schleiereule | 4071 | 90,75 | 68,43 | | 118,55 | 204 | 3180 | 8,65 | 181 |
| Schleiereule | 4904 | 87,52 | 65,34 | | 118,33 | 218 | 3640 | 25,90 | 216 |
| Schleiereule | 5477 | 90,14 | 67,57 | | 120,24 | 246 | 3430 | 13,70 | 185 |
| Schleiereule | 6776 | 89,25 | 68,31 | | 118,47 | 238 | 3630 | 9,44 | 156 |
| Schleiereule | B 259/07 | 90,30 | 69,30 | 0,99 | 122,53 | 246 | 3640 | 27,50 | 197 |
| Schleiereule | B 262/07 | 87,97 | 65,07 | | 115,17 | 246 | 3810 | 7,90 | 198 |
| Schleiereule | B 271/07 | 88,33 | 65,05 | | 117,61 | 253 | 3720 | 8,60 | 185 |
| Schleiereule | B 13/08 | 88,22 | 65,83 | | 112,11 | 250 | 3650 | 7,05 | 166 |
| Schleiereule | B 29/08 | 87,51 | 67,24 | 1,73 | 116,71 | 244 | 3520 | 8,34 | 158 |

Tabelle 54: Gewicht der Diaphyse (GwDiaphyse), Kortexdicke, Knochendichte (BMD), maximales Drehmoment (M_{\max}), maximaler Winkel und Steifigkeit der Tibiotarsi der 62 untersuchten Vögel

| Vogelart | Nr. | GwDiaphyse (g) | Kortexdicke (mm) | BMD (g/cm ³) | M_{\max} (Nm) | max. Winkel (°) | Steifigkeit (Nm/°) |
|--------------|----------|-------------------|---------------------|-----------------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|
| Mäusebussard | 3998 | 2,19 | 0,71 | 1,86 | 1,93 | 14,44 | 0,08 |
| Mäusebussard | 4058 | 2,53 | 0,73 | 1,64 | 1,99 | 22,02 | 0,11 |
| Mäusebussard | 4070 | 2,69 | 0,69 | 1,63 | 1,33 | 13,15 | 0,12 |
| Mäusebussard | 4073 | 2,39 | 0,69 | 1,90 | 1,36 | 9,40 | 0,16 |
| Mäusebussard | 4083 | 1,76 | 0,65 | 1,97 | 1,78 | 22,09 | 0,11 |
| Mäusebussard | 4084 | 1,99 | 0,67 | 1,71 | 1,71 | 24,54 | 0,08 |
| Mäusebussard | 4204 | 1,80 | 0,62 | 1,76 | 0,75 | 7,16 | 0,12 |
| Mäusebussard | 4224 | 1,75 | 0,64 | 1,83 | 1,48 | 16,77 | 0,12 |
| Mäusebussard | 4459 | 2,19 | 0,78 | 2,01 | 1,77 | 17,33 | 0,11 |
| Mäusebussard | 4964 | 1,97 | 0,60 | 2,00 | 0,71 | 8,60 | 0,08 |
| Mäusebussard | 4988 | 1,61 | 0,66 | 1,99 | 1,03 | 21,33 | 0,06 |
| Mäusebussard | 4997 | 1,32 | 0,57 | 1,77 | 1,18 | 26,57 | 0,05 |
| Mäusebussard | 4998 | 1,13 | 0,58 | 1,85 | 1,44 | 22,25 | 0,07 |
| Mäusebussard | 5006 | 1,59 | 0,65 | 1,96 | 1,15 | 8,22 | 0,16 |
| Mäusebussard | 5016 | 1,51 | 0,49 | 1,62 | 0,92 | 19,74 | 0,05 |
| Mäusebussard | 5226 | 1,89 | 0,63 | 1,80 | 1,99 | 28,04 | 0,11 |
| Mäusebussard | 5227 | 2,09 | 0,60 | 1,22 | 0,64 | 14,00 | 0,05 |
| Mäusebussard | 5283 | 2,68 | 0,76 | 1,88 | 2,38 | 25,01 | 0,15 |
| Mäusebussard | 5291 | 2,14 | 0,60 | 1,62 | 1,46 | 26,26 | 0,06 |
| Mäusebussard | 5297 | 1,95 | 0,69 | 2,01 | 1,58 | 27,42 | 0,07 |
| Mäusebussard | 5319 | 1,74 | 0,65 | 1,49 | 1,33 | 17,73 | 0,09 |
| Mäusebussard | 5340 | 1,78 | 0,65 | 1,95 | 1,54 | 17,58 | 0,11 |
| Mäusebussard | 5346 | 1,94 | 0,52 | 1,63 | 1,24 | 24,85 | 0,05 |
| Mäusebussard | 5348 | 1,59 | 0,53 | 1,79 | 0,46 | 8,52 | 0,05 |
| Mäusebussard | 5369 | 2,05 | 0,62 | 1,43 | 1,89 | 21,69 | 0,13 |
| Mäusebussard | 5371 | 1,88 | 0,71 | 1,65 | 1,30 | 19,21 | 0,07 |
| Mäusebussard | 5389 | 1,66 | 0,67 | 2,12 | 0,53 | 11,51 | 0,06 |
| Mäusebussard | 5394 | 2,51 | 0,60 | 1,94 | 1,17 | 12,61 | 0,10 |
| Mäusebussard | 5591 | 1,66 | 0,62 | 1,99 | | | |
| Mäusebussard | 5596 | 1,54 | 0,69 | 1,37 | 1,80 | 18,65 | 0,11 |
| Mäusebussard | 6065 | 1,53 | 0,59 | 2,03 | 2,40 | 18,60 | 0,15 |
| Mäusebussard | 6104 | 1,41 | 0,60 | 1,57 | 1,14 | 32,82 | 0,05 |
| Mäusebussard | 6132 | 1,15 | 0,63 | 1,71 | 0,79 | 21,02 | 0,04 |
| Mäusebussard | 6216 | 1,10 | 0,62 | 1,78 | 1,31 | 21,38 | 0,09 |
| Mäusebussard | 6218 | 1,08 | 0,72 | 1,85 | 0,98 | 21,33 | 0,06 |
| Mäusebussard | 6244 | 1,21 | 0,65 | 1,78 | 0,96 | 18,96 | 0,06 |
| Mäusebussard | 6463 | 1,38 | 0,58 | 1,66 | 1,26 | 17,31 | 0,08 |
| Mäusebussard | B 283/06 | 1,68 | 0,68 | 1,80 | 1,45 | 18,39 | 0,08 |
| Mäusebussard | B 38/08 | 1,63 | 0,60 | 1,55 | 1,42 | 20,46 | 0,07 |
| Mäusebussard | 598/07 | 1,58 | 0,67 | 1,93 | 0,97 | 19,92 | 0,06 |
| Seeadler | 4077 | 7,65 | 1,23 | 1,95 | 8,95 | 20,99 | 0,56 |
| Seeadler | 4119 | 9,45 | 1,53 | 2,02 | 8,07 | 30,05 | 0,30 |
| Seeadler | 4999 | 8,60 | 1,01 | 1,92 | 7,16 | 35,92 | 0,30 |
| Seeadler | 5023 | 8,39 | 1,07 | 1,87 | 4,87 | 25,16 | 0,23 |
| Seeadler | B 11/04 | 13,84 | 1,39 | 2,00 | 12,33 | 27,66 | 0,58 |
| Seeadler | B 33/04 | 30,91 | 1,67 | 1,76 | 12,17 | 26,07 | 0,63 |
| Seeadler | B 118/04 | 14,89 | 1,30 | 1,92 | 13,03 | 32,34 | 0,58 |
| Seeadler | B 144/05 | 9,64 | 1,40 | 2,01 | 5,73 | 23,30 | 0,29 |
| Seeadler | B 28/06 | 12,25 | 1,26 | 2,04 | 12,47 | 27,97 | 0,57 |
| Seeadler | B 31/06 | 6,90 | 1,01 | 1,99 | 8,01 | 32,26 | 0,30 |
| Seeadler | B 37/06 | 9,37 | 1,33 | 2,02 | 9,09 | 27,83 | 0,41 |
| Seeadler | B 41/06 | 11,44 | 1,61 | 2,00 | 14,34 | 28,22 | 0,70 |
| Seeadler | B 113/06 | 7,34 | 1,34 | 1,81 | 6,84 | 26,11 | 0,30 |
| Schleiereule | 4071 | 0,88 | 0,52 | 1,91 | 0,49 | 17,01 | 0,03 |

Fortsetzung Tabelle 54: Gewicht der Diaphyse (GwDiaphyse), Kortexdicke, Knochendichte (BMD), maximales Drehmoment (M_{\max}), maximaler Winkel und Steifigkeit der Tibiotarsi der 62 untersuchten Vögel

| Vogelart | Nr. | GwDiaphyse (g) | Kortexdicke (mm) | BMD (g/cm^3) | M_{\max} (Nm) | max.Winkel ($^\circ$) | Steifigkeit ($\text{Nm}/^\circ$) |
|--------------|----------|----------------|------------------|--------------------------------|-----------------|-------------------------|------------------------------------|
| Schleiereule | 4904 | 0,69 | 0,55 | 1,87 | 0,29 | 28,46 | 0,01 |
| Schleiereule | 5477 | 0,84 | 0,47 | 2,05 | 0,53 | 15,47 | 0,03 |
| Schleiereule | 6776 | 0,88 | 0,57 | 1,96 | 0,52 | 17,56 | 0,03 |
| Schleiereule | B 259/07 | 0,92 | 0,55 | 1,98 | 0,99 | 20,66 | 0,05 |
| Schleiereule | B 262/07 | 1,24 | 0,62 | 1,80 | 0,86 | 28,74 | 0,04 |
| Schleiereule | B 271/07 | 0,76 | 0,48 | 1,82 | 0,45 | 26,09 | 0,02 |
| Schleiereule | B 13/08 | 0,89 | 0,48 | 1,64 | 0,59 | 21,52 | 0,03 |
| Schleiereule | B 29/08 | 0,93 | 0,48 | 2,02 | 0,50 | 21,56 | 0,03 |

Tabelle 55: Trockensubstanz (TS), Rohasche, Rohfett, Kalzium-, Phosphor-, Magnesium- (Mg), Kupfer- und Zinkgehalt der Tibiotarsi der 62 untersuchten Vögel

| Vogelart | Nr. | TS (%) | Rohasche (%) | Rohfett (%) | Kalzium (g/kg) | Phosphor (g/kg) | Mg (mg/kg) | Kupfer (mg/kg) | Zink (mg/kg) |
|--------------|----------|--------|--------------|-------------|----------------|-----------------|------------|----------------|--------------|
| Mäusebussard | 3998 | 87,12 | 67,96 | | 113,50 | 238 | 3220 | 5,52 | 211 |
| Mäusebussard | 4058 | 87,93 | 65,46 | | 113,65 | 253 | 3180 | 6,00 | 215 |
| Mäusebussard | 4070 | 84,83 | 66,74 | | 117,39 | 237 | 3470 | 6,46 | 217 |
| Mäusebussard | 4073 | 85,79 | 66,26 | 0,39 | 112,61 | 236 | 3140 | 5,63 | 233 |
| Mäusebussard | 4083 | 87,78 | 68,66 | | 117,89 | 253 | 3550 | 6,33 | 197 |
| Mäusebussard | 4084 | 86,82 | 64,21 | | 110,87 | 226 | 3600 | 7,16 | 221 |
| Mäusebussard | 4204 | 88,52 | 67,75 | | 117,11 | 262 | 3370 | 7,85 | 212 |
| Mäusebussard | 4224 | 87,59 | 67,60 | | 113,83 | 243 | 3020 | 6,39 | 230 |
| Mäusebussard | 4459 | 88,55 | 66,01 | | 111,19 | 239 | 3180 | 4,99 | 216 |
| Mäusebussard | 4964 | 85,47 | 69,91 | | 117,25 | 248 | 2940 | 5,48 | 240 |
| Mäusebussard | 4988 | 83,75 | 59,84 | 0,22 | 103,82 | 211 | 3420 | 5,70 | 239 |
| Mäusebussard | 4997 | 85,66 | 62,50 | | 103,34 | 214 | 3280 | 4,43 | 215 |
| Mäusebussard | 4998 | 88,99 | 64,89 | | 111,03 | 202 | 3270 | 6,27 | 243 |
| Mäusebussard | 5006 | 89,57 | 68,63 | 0,94 | 118,79 | 262 | 3450 | 6,02 | 216 |
| Mäusebussard | 5016 | 82,75 | 61,94 | | 103,79 | 221 | 3660 | 7,23 | 203 |
| Mäusebussard | 5226 | 85,29 | 64,83 | | 111,81 | 230 | 2980 | 6,84 | 189 |
| Mäusebussard | 5227 | 76,68 | 58,43 | | 100,85 | 226 | 3470 | 4,88 | 211 |
| Mäusebussard | 5283 | 87,84 | 67,19 | | 115,24 | 231 | 3600 | 5,04 | 204 |
| Mäusebussard | 5291 | 88,84 | 61,15 | | 107,81 | 235 | 3160 | 6,89 | 276 |
| Mäusebussard | 5297 | 88,84 | 65,57 | | 113,25 | 242 | 3430 | 4,80 | 204 |
| Mäusebussard | 5319 | 89,37 | 66,97 | | 115,55 | 247 | 3370 | 5,60 | 226 |
| Mäusebussard | 5340 | 87,95 | 68,45 | | 117,45 | 242 | 3440 | 6,04 | 249 |
| Mäusebussard | 5346 | 86,23 | 62,61 | 0,25 | 108,43 | 242 | 2980 | 6,05 | 254 |
| Mäusebussard | 5348 | 84,54 | 59,45 | | 102,18 | 225 | 3290 | 4,34 | 217 |
| Mäusebussard | 5369 | 88,89 | 66,11 | | 108,57 | 235 | 3560 | 7,04 | 226 |
| Mäusebussard | 5371 | 84,53 | 64,27 | | 117,04 | 224 | 3610 | 6,58 | 192 |
| Mäusebussard | 5389 | 87,47 | 67,73 | | 117,97 | 231 | 3450 | 5,22 | 250 |
| Mäusebussard | 5394 | 86,02 | 66,21 | | 114,65 | 250 | 3510 | 4,82 | 232 |
| Mäusebussard | 5591 | 88,54 | 63,05 | | 102,85 | 218 | 3080 | 8,88 | 182 |
| Mäusebussard | 5596 | 89,30 | 65,82 | | 104,66 | 247 | 2730 | 5,45 | 249 |
| Mäusebussard | 6065 | 87,65 | 66,61 | | 105,38 | 238 | 3020 | 4,69 | 244 |
| Mäusebussard | 6104 | 79,18 | 61,91 | | 102,74 | 233 | 3850 | 4,81 | 255 |
| Mäusebussard | 6132 | 84,40 | 64,35 | | 107,47 | 242 | 3790 | 4,36 | 290 |
| Mäusebussard | 6216 | 80,97 | 62,14 | | 104,95 | 234 | 3660 | 4,13 | 244 |
| Mäusebussard | 6218 | 86,09 | 60,67 | | 107,57 | 218 | 3680 | 4,47 | 235 |
| Mäusebussard | 6244 | 85,05 | 60,87 | | 105,00 | 220 | 3730 | 4,72 | 260 |
| Mäusebussard | 6463 | 80,70 | 63,79 | | 105,30 | 227 | 3980 | 6,04 | 210 |
| Mäusebussard | B 283/06 | 82,22 | 59,52 | | 102,13 | 208 | 3270 | 7,77 | 210 |
| Mäusebussard | B 38/08 | 88,01 | 64,40 | | 102,32 | 236 | 3230 | 6,50 | 200 |

Fortsetzung Tabelle 55: Trockensubstanz (TS), Rohasche, Rohfett, Kalzium-, Phosphor-, Magnesium- (Mg), Kupfer- und Zinkgehalt der Tibiotarsi der 62 untersuchten Vögel

| Vogelart | Nr. | TS (%) | Rohasche (%) | Rohfett (%) | Kalzium (g/kg) | Phosphor (g/kg) | Mg (mg/kg) | Kupfer (mg/kg) | Zink (mg/kg) |
|--------------|----------|--------|--------------|-------------|----------------|-----------------|------------|----------------|--------------|
| Mäusebussard | 598/07 | 88,60 | 63,10 | | 101,45 | 223 | 3080 | 8,02 | 213 |
| Seeadler | 4077 | 89,24 | 61,93 | | 103,29 | 214 | 2440 | 5,26 | 276 |
| Seeadler | 4119 | 89,94 | 59,23 | | 103,46 | 208 | 2440 | 6,03 | 283 |
| Seeadler | 4999 | 84,76 | 57,82 | | 93,18 | 215 | 2830 | 5,13 | 201 |
| Seeadler | 5023 | 84,58 | 56,93 | | 96,90 | 238 | 2510 | 7,40 | 274 |
| Seeadler | B 11/04 | 82,34 | 61,26 | | 109,00 | 246 | 2730 | 6,18 | 268 |
| Seeadler | B 33/04 | 84,50 | 57,09 | | 98,68 | 213 | 2280 | 15,00 | 220 |
| Seeadler | B 118/04 | 89,03 | 59,71 | | 100,05 | 230 | 2530 | 5,28 | 279 |
| Seeadler | B 144/05 | 88,39 | 58,99 | | 102,99 | 239 | 2230 | 6,29 | 287 |
| Seeadler | B 28/06 | 89,03 | 59,97 | | 100,65 | 237 | 2610 | 4,92 | 280 |
| Seeadler | B 31/06 | 89,48 | 61,69 | | 103,73 | 235 | 2750 | 4,44 | 263 |
| Seeadler | B 37/06 | 88,35 | 59,83 | 1,24 | 102,29 | 216 | 2410 | 5,22 | 271 |
| Seeadler | B 41/06 | 89,38 | 61,53 | 0,03 | 101,73 | 248 | 2540 | 4,82 | 273 |
| Seeadler | B 113/06 | 84,64 | 59,42 | | 101,61 | 217 | 2430 | 6,04 | 265 |
| Schleiereule | 4071 | 90,57 | 66,59 | | 118,43 | 236 | 3210 | 12,70 | 195 |
| Schleiereule | 4904 | 87,82 | 64,36 | | 115,50 | 221 | 4150 | 14,80 | 212 |
| Schleiereule | 5477 | 89,59 | 66,18 | 0,06 | 114,13 | 229 | 3510 | 19,90 | 206 |
| Schleiereule | 6776 | 89,48 | 67,75 | 1,34 | 120,15 | 239 | 3730 | 12,70 | 164 |
| Schleiereule | B 259/07 | 89,61 | 65,33 | | 116,34 | 241 | 3580 | 17,20 | 215 |
| Schleiereule | B 262/07 | 87,71 | 62,37 | | 112,10 | 240 | 3830 | 7,09 | 202 |
| Schleiereule | B 271/07 | 88,29 | 66,43 | | 114,34 | 244 | 3970 | 9,67 | 199 |
| Schleiereule | B 13/08 | 87,98 | 63,85 | | 111,97 | 250 | 3720 | 17,50 | 177 |
| Schleiereule | B 29/08 | 87,49 | 65,01 | | 115,61 | 235 | 3720 | 11,50 | 176 |

Danksagung

Mein herzlicher Dank gilt Herrn Professor Dr. Leo Brunberg für die Überlassung des Themas, die Unterstützung während der Arbeit an meinem Promotionsthema und der kritischen Durchsicht des Manuskripts.

Frau Dr. Kerstin Müller möchte ich für die gute Zusammenarbeit, die intensive Betreuung, ständige Hilfsbereitschaft und für die sorgfältige Durchsicht meines Manuskripts danken.

Ich danke dem Julius Wolff-Institut der Charité Berlin unter Leitung von Herrn Professor Dr. Georg Duda. Vielen Dank an das Team des Biomechanik-Prüflabors, vor allem Herrn Jan-Erik Hoffmann, für die Unterstützung bei der Durchführung und Auswertung der Torsionsprüfung. Vielen Dank auch an das Team des Histologielaors, besonders an Gabriele Hardung und Camilla Bergmann sowie Dr. Jasmin Lienau und Dr. Hanna Schell, die mir jederzeit bei der Anfertigung der Schnitte behilflich waren und alle meine Fragen beantwortet haben.

Mein Dank gilt auch dem Institut für Tierernährung der Freien Universität Berlin, insbesondere Herrn Professor Dr. Jürgen Zentek für die Unterstützung bei der Planung der Versuche sowie Anett Kriesten für die Hilfestellung bei der Durchführung der Analysen.

Ich danke der Kommission zur Vergabe von Promotionsstipendien (NaFÖG) für die Gewährung eines Stipendiums und die damit verbundene finanzielle Unterstützung meiner Arbeit.

Frau Dr. Gisela Arndt und Herrn Fabian Lotz vom Institut für Biometrie der Freien Universität Berlin danke ich für die Hilfe bei der statistischen Auswertung der Daten.

Allen Mitarbeitern der Klinik und Poliklinik für kleine Haustiere der Freien Universität Berlin gilt mein Dank für die gute und freundschaftliche Zusammenarbeit.

Ich danke Herrn Rainer Altenkamp für die Hilfe bei der Altersbestimmung der Greifvögel und Eulen sowie für die Hilfe in allen Belangen der Greifvogelbiologie.

Frau Birgit Block von der staatlichen Vogelschutzwarte in Buckow und Herrn Christian Blumenstein vom Naturkundemuseum Potsdam danke ich für die Bereitstellung von tot aufgefundenen Seeadlern und Schleiereulen für die Untersuchungen.

Ich danke meinem Mann Philipp Schuhmann für seine Unterstützung und Geduld.

Ganz besonderer Dank gilt meinen Eltern, ohne deren liebevolle und finanzielle Unterstützung diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit bestätige ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig angefertigt habe. Ich versichere, dass ich ausschließlich die angegebenen Quellen und Hilfen in Anspruch genommen habe.

Berlin, den 22.09.2010

Britta Schuhmann, geb. Horn