

Querschnittsmerkmale von Langknochendiaphysen domestizierter Equiden

Andreas Artemiou, Gerhard Forstenpointner & Günther Karl Kunst

Einleitung

Eine praktische Anwendung von PAUWEL'S Prinzip des Zusammenhanges zwischen mechanischer Beanspruchung und der Form der Elemente des Bewegungsapparates (z.B. PAUWELS 1965, nach PREUSCHOFT 1989) stellt die geometrische Analyse der Querschnittsflächen von Langknochendiaphysen dar. Die im Querschnitt erkennbare Stärke der Kompakta und deren Anordnung um eine gedachte Längsachse des Knochens folgen demnach den *in vivo* auftretenden Belastungsmustern. Dies betrifft einerseits den am lebenden Organismus beobachtbaren Knochenumbau, der auf habituelle Beanspruchungen reagiert (WOLFF'S Regel nach LARSEN 1997). Umgekehrt ist es nun möglich, von der Querschnittsmorphologie von Femur und Tibia einer menschlichen Population auf deren Bewegungsniveau bzw. auf das übliche Aktivitätsmuster zu schließen (z.B. RUFF & HAYES 1983). Regelmäßige Diaphysenabschnitte können als hohle Balken modelliert und die mechanisch relevanten Parameter (Biege widerstand, Flächenträgheitsmoment, ...) berechnet und verglichen werden. Eine Zusammenfassung von Anwendungsbeispielen aus der prähistorischen Anthropologie findet sich bei LARSEN (1997, 195ff.).

Andererseits können die artspezifisch abweichend ausgebildeten Querschnittsflächen verwandter Arten mit einem entsprechend unterschiedlichen Bewegungsverhalten in Zusammenhang gebracht werden. Bisher wurden vorwiegend Langknochen einzelner Primatengruppen (z.B. PREUSCHOFT 1970; DEMES et al. 1991; RUFF 1989), aber auch von südamerikanischen Nagern (Caviomorpha; BIKNEVECIUS 1993) und von Bären (Ursidae; KUNST 1996) nach diesen Gesichtspunkten untersucht. Ebenso bezog TAYLOR (1976) bei einer vergleichenden funktionsmorphologischen Untersuchung des Bewegungsapparates afrikanischer Schleichkatzen (Viverridae) die Form des Diaphysenumrisses in seine Überlegungen ein. Die Widerstandsfähigkeit einer Langknochendiaphyse gegen Biegebeanspruchungen nimmt nun mit steigender Kompaktadicke und dem Abstand der Knochensubstanz vom Zentrum einer zentralen Achse zu. Diese Eigenschaften sind nun aus einer gegebenen Schnittlage ersichtlich. Allgemein kann davon ausgegangen werden, daß eine allseits gleichmäßig von Biege- oder Torsionsbelastungen beanspruchte Diaphyse einen mehr oder weniger runden Querschnitt aufweist. Liegt dagegen eine Ebene mit erhöhter Belastung vor, so ist mit vermehrtem Aufbau von Knochensubstanz in eben dieser bevorzugten Beanspruchungsrichtung und einem unregelmäßigen bzw. elliptischen Knochenquerschnitt, unter

Umständen auch mit stark differierenden Wandstärken, zu rechnen.

In der Archäozoologie scheint der oben definierte Arbeitsansatz im engeren Sinn, das heißt die vergleichende geometrische Analyse von Knochenquerschnitten, bisher wenig Beachtung gefunden zu haben.

Überlegungen über den grundlegenden Zusammenhang zwischen Querschnittsmorphologie und Funktion bzw. mechanischer Beanspruchung finden sich aber in Lehrbüchern der Veterinär anatomie (NICHEL et al. 1992, Abb. 137–138; Metapodien von *Equus*), ebenso wird in der Bestimmungsliteratur vielfach auf den Diaphysenumriß als diagnostisches Merkmal verwiesen (SCHMID 1972: Metapodien von *Equus* und Ruminantiern). Ebenso geben an der Diaphyse (Kleinste Diaphysenbreite, -tiefe etc.) erhobene Meßstrecken zwar eine grobe Orientierung über deren Querschnittsform, eine Berechnung der durch die Kompaktastärke (mit)definierten mechanischen Eigenschaften ist durch sie allein aber nicht möglich.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden nun Querschnittsflächen der Langknochen der Hinterextremität (Tibia und Metatarsus 3, in der Folge: Metatarsus) von verschiedenen Vertretern der Gattung *Equus*, und zwar von Hauseseln und Hauspferden und deren Hybriden erhoben und geometrisch ausgewertet. Einbezogen wurden auch zwei Wildpferdereste. Anstoß dazu gab das anscheinend häufige Auftreten von Maultieren (Gebrauchshybriden von Pferd und Esel) in einer römischen Fundstelle in Niederösterreich, dem Auxiliarkastell Carnuntum (KUNST 1997a). Die artliche Bestimmung von postkranialen Resten von Vertretern der Gattung *Equus*, besonders auch von Pferden, Eseln und deren Hybriden, allein anhand linearer Meßstrecken und deren Proportionen bereitet erfahrungsgemäß Schwierigkeiten (z.B. EISENMANN 1986). Andererseits bestehen bekanntermaßen zwischen Pferd und Esel, aber auch zwischen verschiedenen anderen, freilebenden Arten der Gattung *Equus*, Unterschiede in der Gliedmaßenstellung, in der Gangart und im Lokomotionsverhalten (u.a. FLADE 1990; HECKNER-BISPING & GRÄFF 1992; HECKNER-BISPING & GEIER 1993), die teilweise mit der Anpassung an unterschiedliche Lebensräume bzw. Substrattypen gedeutet werden. Es wäre daher nicht auszuschließen, daß sich diese Differenzen im Belastungsregime der Gliedmaßen und konsequenterweise auch in der Querschnittsform der Langknochen äußern. Weiters ist damit zu rechnen, daß, im Sinne der oben erwähnten anthropologischen Untersuchungen, modifikatorische, durch die Lebensweise der untersuchten Tiere begründete Einflüsse (Reit-, Zugnutzung; Zoonhaltung),

allenfalls vorhandene artspezifische Unterschiede überprägen können.

Da ferner bei Einbeziehung von domestizierten Formen von einer starken Variabilität hinsichtlich Größe und Wuchsform (Proportionierung) auch innerhalb der Arten ausgegangen werden kann, müssen besonders hierdurch bedingte allometrische Erscheinungen berücksichtigt werden. Die vorliegende Untersuchung ist daher bloß als erster Versuch zu werten, die Brauchbarkeit von Querschnittsuntersuchungen an einem gängigen archäozoologischen Zuordnungsproblem zu prüfen.

Material

Zur Untersuchung gelangten sowohl rezentes Vergleichsmaterial als auch Knochen aus archäologischen Fundzusammenhängen. Letztere rühren teilweise von mehr oder weniger vollständig geborgenen Skeletten und waren daher mit einiger Sicherheit artlich, das heißt im gegebenen Fall als Pferd oder Maultier, bestimmbar. Im Falle von isolierten Knochen und Gliedmaßenverbänden muß die Bestimmung dagegen fraglich bleiben. Nicht immer standen von einem Individuum Daten für Tibia und Metatarsus zur Verfügung, was die teilweise differierenden Knochenzahlen erklärt.

a) Rezentes Material (mit der Anzahl der jeweils untersuchten Knochen)

Hauspferd (*Equus ferus f. caballus*):

Tibia 11, Metatarsus 15; verschiedene Rassen, Österreich.

Mongolisches Wildpferd (*Equus ferus przewalskii*):

Tibia 1, Metatarsus 1; Zootier, Österreich.

Hauseesel (*Equus africanus f. asinus*):

Tibia 3, Metatarsus 3; Zwergesel, Österreich;
Tibia 1; Poitou-Esel.

Maultier (*Equus africanus f. asinus* X *Equus ferus f. caballus*):

Tibia 1; Herkunft?

Maulesel (*Equus ferus f. caballus* X *Equus africanus f. asinus*):

Tibia 4, Metatarsus 5; Zypern.

b) Archäologisches Material

Wildpferd (*Equus ferus ssp.*):

Tibia, Metatarsus 1; Frauenhofen (Niederösterreich), Stichbandkeramik (PUCHER 1992).

Hauspferd (*Equus ferus f. caballus*):

Tibia 5, Metatarsus 4; Carnuntum/Petronell (Niederösterreich), Römerzeit, 2.-3. Jahrhundert (KUNST 1997a).

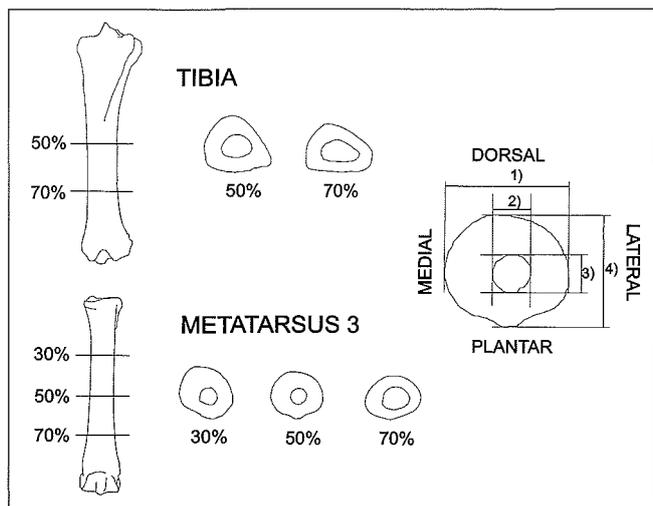


Abb. 1: Position der Schnittlagen und repräsentative Querschnittsbilder von Tibia und Metatarsus 3 der linken Körperseite von *Equus*. Querschnittsbilder von distal betrachtet. Definition der Meßstrecken: 1) mediolateraler Außendurchmesser, 2) mediolateraler Innendurchmesser, 3) dorsoplantarer Innendurchmesser, 4) dorsoplantarer Außendurchmesser.

Maultier (*Equus africanus f. asinus* X *Equus ferus f. caballus*):

Tibia 1, Metatarsus 1; Carnuntum/Petronell (Niederösterreich), Römerzeit, 2.-3. Jahrhundert (KUNST 1997a).

? Maultier (*Equus africanus f. asinus* X *Equus ferus f. caballus*):

Tibia 1, Metatarsus 2; Carnuntum/Petronell (Niederösterreich), Römerzeit, 2.-3. Jahrhundert (KUNST 1997a).
Metatarsus 1; Ephesos (FORSTENPOINTNER 1996).

Die rezenten Knochen vom Poitou-Hauseesel und dem Maultier sowie die Wildpferdknochen aus Frauenhofen stammen aus der Sammlung der Archäologisch-Zoologischen Sammlung des Naturhistorischen Museums Wien. Das übrige rezente Skelettmaterial und der Equidenknochen aus Ephesos befinden sich in der Sammlung des Institutes für Anatomie der Veterinärmedizinischen Universität Wien. Die sonstigen archäologischen Reste werden derzeit am Institut für Paläontologie der Universität Wien (IDEA) verwahrt.

Um allometrische Effekte kontrollieren zu können, wäre es zur Feststellung allfälliger zwischen Esel und Pferd bestehender Gestaltunterschiede wünschenswert, Individuen ähnlicher Größe, also möglichst großwüchsige Esel und kleinwüchsige Pferde, zu vergleichen. Diesen Anspruch kann das vorliegende Material infolge des Mangels großwüchsiger Eselreste nur teilweise erfüllen. Durch die Einbeziehung mehrerer kleinwüchsiger Pferde(Pony)knochen und der verhältnismäßig großen Hybridformen wurde aber doch eine gewisse Überlappungszone erreicht. Insgesamt ist das durch die untersuchten Knochen abgedeckte Größenintervall bedeutend: so betragen die Höchstwerte der Größten Längen knapp das Doppelte der Minimalwerte. Für die rezenten

Tiere kann eine übliche Gebrauchsnutzung (Reit-, ev. Zugnutzung) für die Pferde, eine Hobbynutzung für die Esel angenommen werden. Beim archäologischen Material kann zumindest für die römischen Knochen eine sehr intensive Beanspruchung vermutet werden, weil die Reste aus einem Militärlager stammen, wo sie offenbar noch während der normalen Gebrauchsphase verstarben.

Für die Messungen bzw. für die Gewinnung der Querschnittsbilder wurde ein Computertomograph vom Typ PACE (General electric) verwendet, die untersuchten Knochen wurden mit Hilfe von Zellstoffrollen und Knetmasse im Geräteschacht entsprechend einer gedachten Diaphysenachse möglichst orthograd ausgerichtet (Abweichung von der Horizontal- und Vertikalebene des Geräteschachtes annähernd gleich Null).

Für die geometrische Auswertung wurden nun die Schnittbilder bei 50 und 70% der Gesamtlänge (von proximal aus gerechnet) für die Tibia und 30, 50 und 70% für den Metatarsus herangezogen (Abb. 1). Die Biegefestigkeit (Flächenträgheitsmoment; *second moment of area* nach RUFF & HAYES 1983, angegeben in mm⁴) wurde nach folgender Näherungsformel berechnet (RUNESTEAD et al. 1993):

I_x – Biegefestigkeit in der Sagittalebene bzw. um eine gedachte mediolaterale Achse:

$$\pi \times ((\text{mediolateraler Außendurchmesser} + \text{dorsoplantarer Außendurchmesser}^3) - (\text{mediolateraler Innendurchmesser} \times \text{dorsoplantarer Innendurchmesser}^3)) / 64$$

I_y – Biegefestigkeit in der (senkrecht zur Sagittalebene

verlaufenden) Koronalebene/dorso-plantarer Ebene bzw. um eine gedachte dorsoplantare Achse:

$$\pi \times ((\text{dorsoplantarer Außendurchmesser} + \text{mediolateraler Außendurchmesser}^3) - (\text{dorsoplantarer Innendurchmesser} \times \text{mediolateraler Innendurchmesser}^3)) / 64$$

Als »innerer Knochendurchmesser« wurde der Durchmesser der Markhöhle bezeichnet. Die Maße wurden an den Bildausdrucken des Computertomographen direkt mit einer Schublehre abgenommen. Die Durchmesser entsprechen jeweils dem »größten Durchmesser« in Projektion parallel zur Auflagefläche (mediolaterale Durchmesser) bzw. senkrecht dazu (dorsoplantare Durchmesser; vgl. Abb. 1)

Die Formel nimmt eine symmetrische, elliptische Kontur des äußeren und inneren Knochenumrisses an. Während die Schnittbilder des Metatarsus diesen Kriterien einigermaßen genau entsprechen, stellen die Berechnungen für die Tibia zwangsläufig nur eine recht grobe Annäherung dar.

Der Biege widerstand in einer gegebenen Ebene wächst daher mit der Menge der vorhandenen Kompaktasubstanz (Wandstärke) und deren zunehmender Entfernung von der zentralen Achse. Der Quotient aus den beiden Biegefestigkeiten I_x/I_y gibt nun Auskunft über die Form der Querschnittsfläche. Werte nahe bei 1 bezeichnen demnach einen kreisförmigen oder zumindest in den beiden Ebenen in gleicher Weise belastbaren Knochen. Werte, die deutlich unter oder über 1 liegen, zeigen an, daß I in einer der Ebenen gegenüber der anderen (senkrecht stehenden) deutlich erhöht ist. Beispielsweise lie-

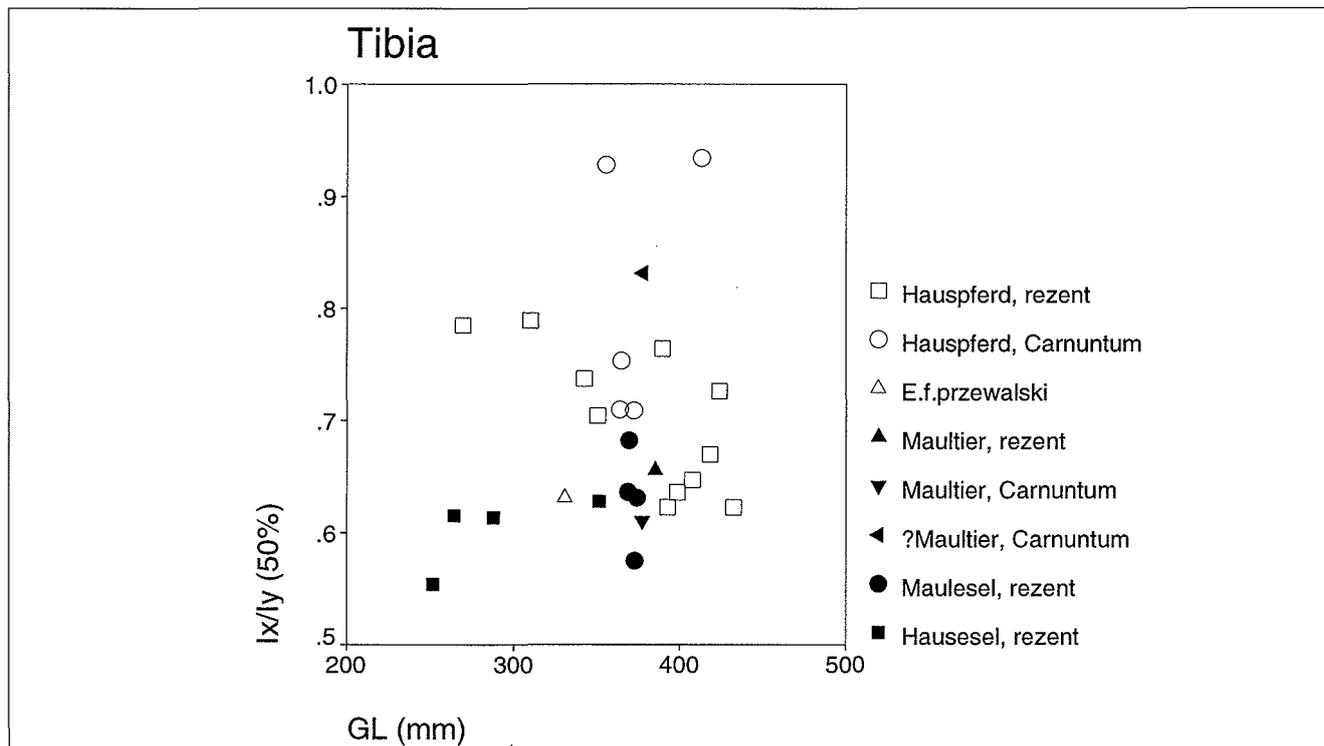


Abb. 2: Tibia: Korrelationsdiagramm der »Größten Länge« und dem I_x/I_y -Wert bei 50% (s. Text).

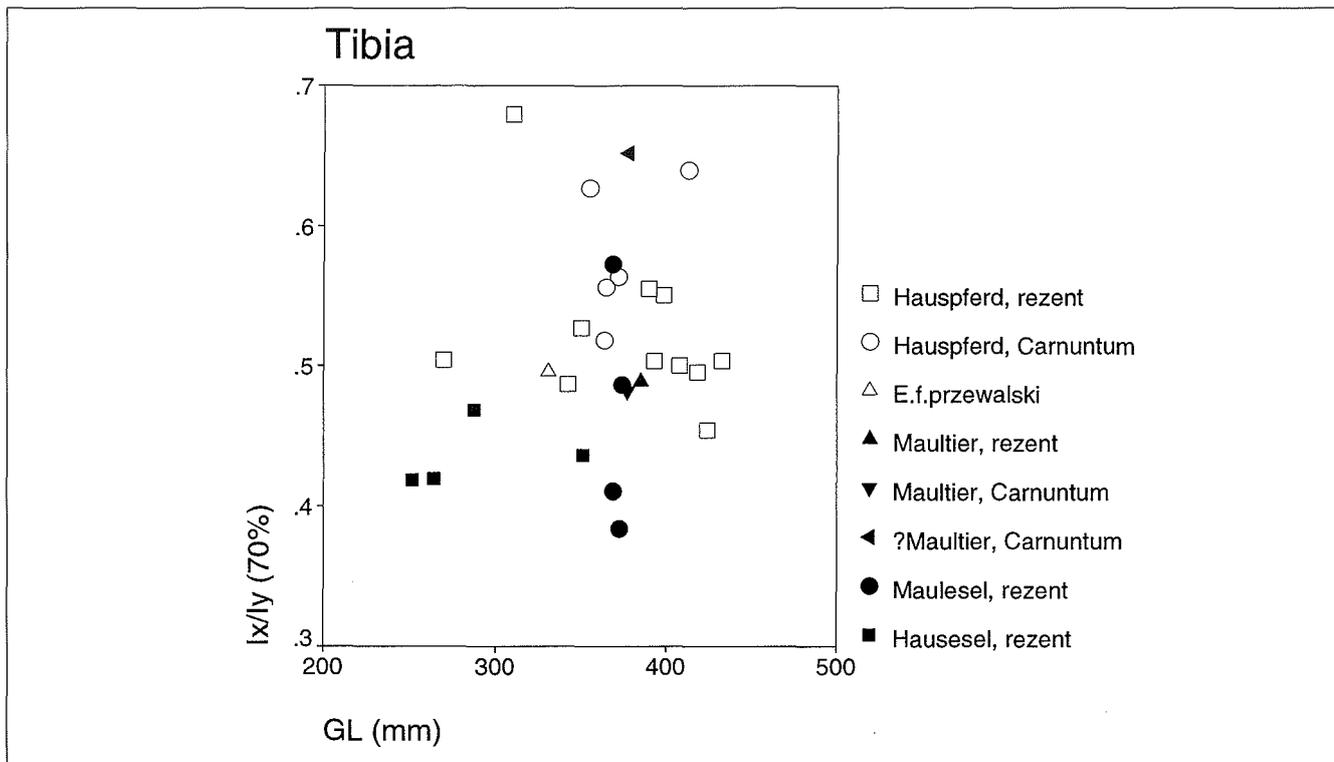


Abb. 3: Tibia: Korrelationsdiagramm der »Größten Länge« und dem Ix/Iy-Wert bei 70% (s. Text).

gen die Ix/Iy Werte für die Knochenquerschnitte bei 30% des Metatarsus, einer gewöhnlich gleichmäßig runden Knochenposition, manchmal nahe bei 1, bei der Querschnittsfläche bei 70% der Tibia dagegen deutlich darunter: der dorsoplantar abgeflachte, mediolateral ausgezogene, querovale Knochenquerschnitt bewirkt eine erhöhte Biegefestigkeit bei mediolateraler Beanspruchung (Ix kleiner als Iy). Die Abnahme der Größten Länge (GL) von Tibia und Metatarsus erfolgte nach der in der Archäozoologie üblichen Methode (von den DRIESCH 1976).

Ergebnisse

Aus den Tabellen 1 und 2 können die größten Längen, die Biegegewiderstände in den beiden Ebenen und der »Formindex« Ix/Iy der untersuchten Knochen entnommen werden. In Abb. 2 wurde die Größte Länge der Tibien gegen den Ix/Iy-Wert bei der Schnittlage für 50% aufgetragen. Weder für das Gesamtmaterial noch für die Hauspferde ist eine eindeutige Abhängigkeit des Formindex von der Knochenlänge zu erkennen. Die Schwankungsbreite dieses Wertes ist beim Hauspferd enorm, er beträgt aber stets über 0,6. Mit einer Ausnahme, dem fraglichen römerzeitlichen Maultier 900/97, liegen die Werte für die Hausesel und die Hybriden deutlich unter 0,7. Eine sichere Trennung des Materiales nach dem Ix/Iy Wert bei 50% ist demnach nicht möglich, wenn auch Esel und Hybriden tendenziell eine dorsoplantar abgeflachtere (bzw. mit einer in der Sagittalebene relativ geringeren Biegefestigkeit ausgestattete) Diaphysenmitte aufweisen. An-

dererseits wird dieser Index sehr stark vom Verlauf der Crista tibiae und der Ausbildung der Facies caudalis beeinflusst. Letztere ist bei zwei römerzeitlichen Pferden stark vorgewölbt und bewirkt deshalb hohe Werte (über 0,9) – ein Beispiel dafür, wie Formeigenschaften, die durch übliche Meßmethoden schlecht faßbar sind, anhand einer Querschnittsbetrachtung zugänglich gemacht werden können. Es ist allerdings zu bedenken, daß die errechneten Formparameter wegen des dreieckigen Querschnittes dieser Knochenposition ohnehin nur eine sehr grobe Näherung darstellen.

Eine Skalierung der Gesamtlänge gegen den Formindex bei 70% (Abb. 3) bringt im wesentlichen ein ähnliches Ergebnis: Esel und Hybriden weisen durchschnittlich geringere Indexwerte auf. Der Überlappungsbereich (um 0,45–0,5) ist hier sogar geringer, wenn man vom erwähnten fraglichen Maultier und einem Maulesel mit jeweils ziemlich hohen Werten absieht. Einige besonders niedrige Werte für Esel und Maulesel werden durch betonte mediolaterale Ausdehnung der Tibia in diesem Bereich und einem daraus resultierenden vermehrten Biegegewiderstand in der Koronalebene (bzw. in mediolateraler Richtung) bedingt. Auch hier ist keine mit der Gesamtlänge korrelierte Zunahme von Ix/Iy beim Hauspferd zu verzeichnen, wobei der größte Wert von einem Pony erreicht wird.

Eine halbwegs befriedigende Gruppentrennung liefert ein kombiniertes Streudiagramm aus den beiden Formindizes bei 50 und 70% (Abb. 5); wiederum mit der ?Maultier 900/97 betreffenden Einschränkung). Es sei darauf hingewiesen, daß die einzige Tibia von *E.f.prze-*

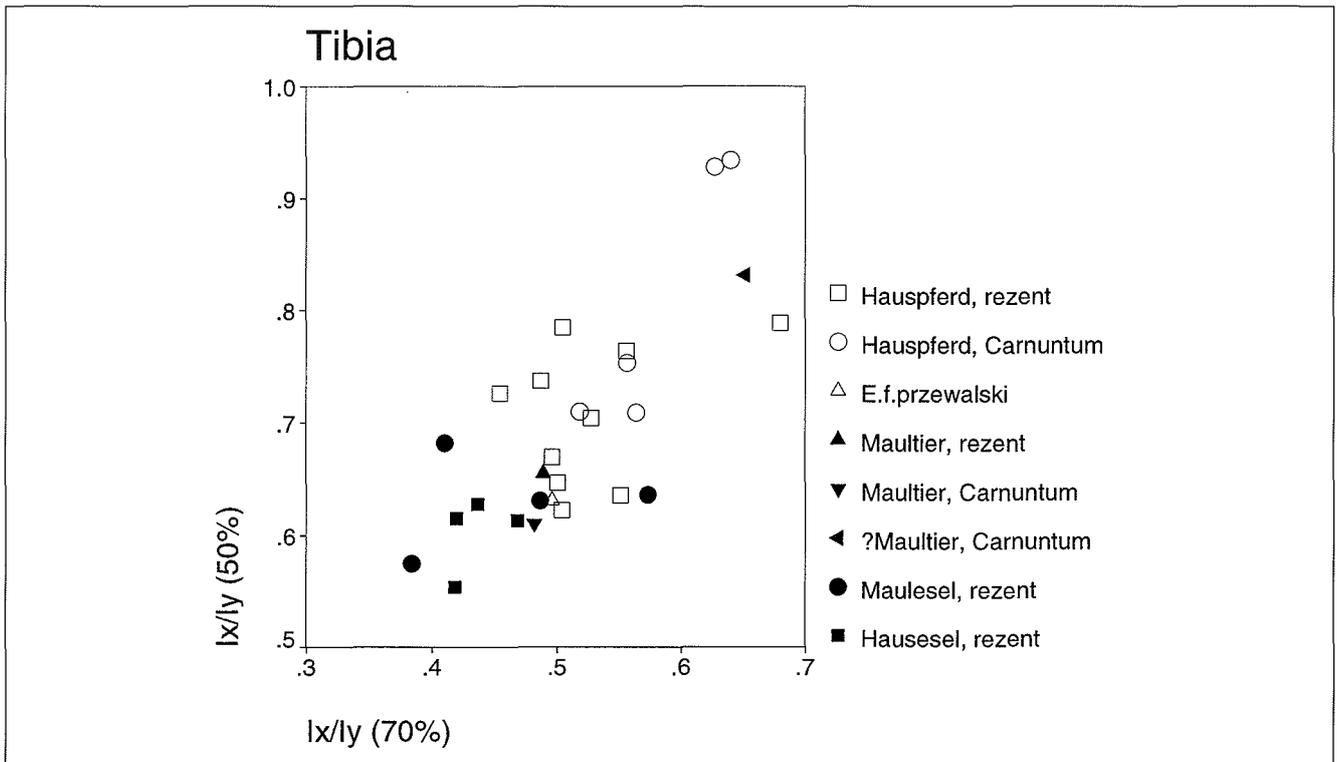


Abb. 4: Tibia: Korrelationsdiagramm der Ix/Iy-Werte bei 50 und 70%.

walskii sich stets in der Überlappungszone zwischen den Hauspferden einerseits und der Esel/Hybridgruppe andererseits befindet. Dieser Knochen ist allerdings überhaupt sehr massiv gebaut, was sich an den generell hohen Werten für den Biege widerstand, gemessen an seiner Gesamtlänge, äußert (Tab. 1).

Der Metatarsus von *Equus* erscheint aufgrund seines regelmäßigen Aufbaues als ein für eine Querschnittsanalyse besonders geeignetes Element.

Bei der 30% Marke zeigt der Formindex eine überaus große Variabilität (Tab. 2), wobei die Extremwerte aber nicht von Hauspferden eingenommen werden. Entspre-

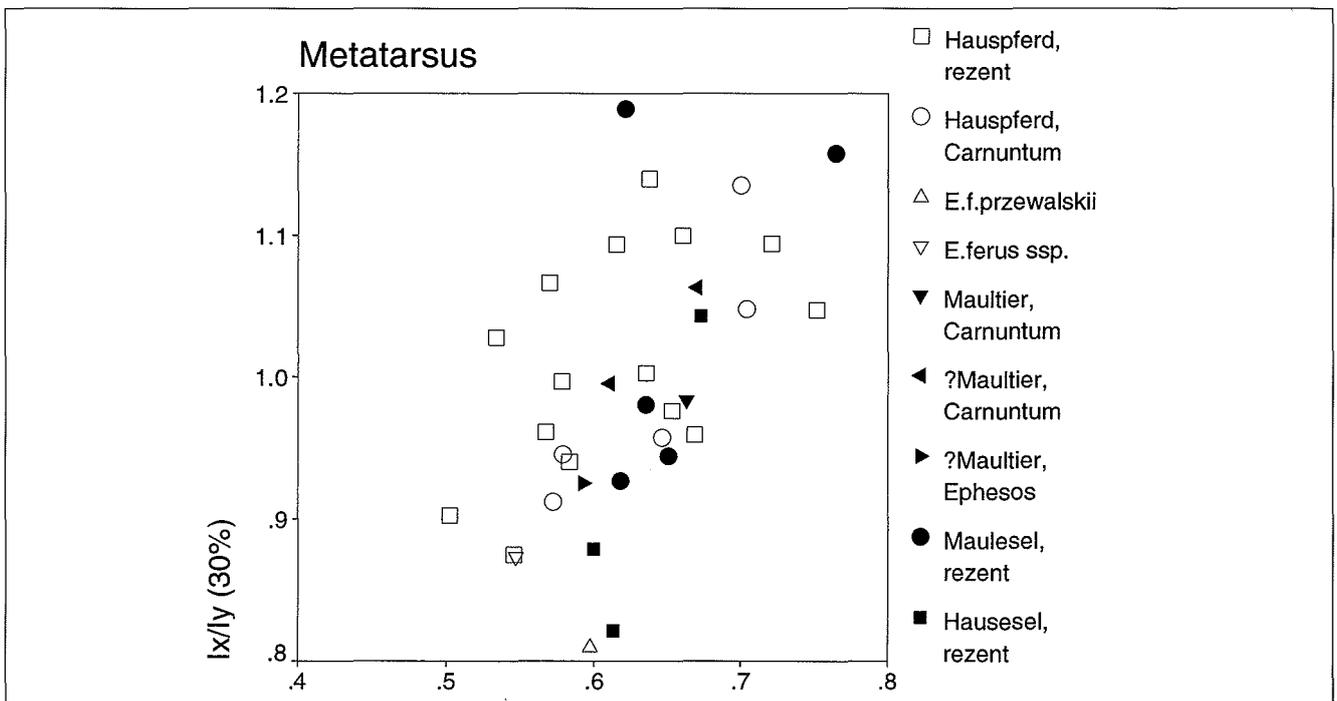


Abb. 5: Metatarsus 3: Korrelationsdiagramm der Ix/Iy-Werte bei 50 und 70%.

Tab. 1: Tibia.

TIBIA							
		Flächenträgheitsmomente (mm ⁴)					
Tier	Größte Länge (mm)	Ix50	Iy50	Ix/Iy50	Ix70	Iy70	Ix/Iy70
Hausesel (Poitouresse)	351	46807,6	74510,9	0,63	44568,8	102111,8	0,44
Hausesel 1	251,5	15791,8	28490,4	0,55	10664,8	25481,6	0,42
Hausesel 2	264	12323,7	20019,2	0,62	8199,9	19543,7	0,42
Hausesel 3	287,5	26795,6	43656,7	0,61	19538,3	41706,1	0,47
Maulesel 1	369	74386,4	109062,6	0,68	46245,3	112626,4	0,41
Maulesel 2	374	81904,8	129750,9	0,63	54752,1	112536,8	0,49
Maulesel 4	368,5	69994,8	109990,6	0,64	58554,9	102143,0	0,57
Maulesel 5	372,5	84884,0	147590,7	0,58	53641,6	139680,2	0,38
?Maultier, Carnuntum	377,5	136878,5	164642,0	0,83	92986,5	142632,8	0,65
Maultier, Carnuntum	377	104755,9	171510,4	0,61	72019,3	149447,2	0,48
Maultier, rezent	385	85105,7	129805,0	0,66	65468,9	133895,3	0,49
<i>E.f.przewalski</i>	330,5	84379,1	133633,0	0,63	57860,7	116639,4	0,50
Pferd 1, Carnuntum	413	189530,3	202854,2	0,93	106109,8	165808,6	0,64
Pferd 2, Carnuntum	364,5	113344,9	150452,3	0,75	68943,3	123861,1	0,56
Pferd 3, Carnuntum	363,5	96858,4	136444,3	0,71	65925,7	127168,1	0,52
Pferd 1974/93, Carnuntum	355	128548,7	138455,6	0,93	87045,0	138777,9	0,63
Pferd 857/97, Carnuntum	372	127756,9	180190,8	0,71	78273,1	138749,0	0,56
Pferd 10	418	184053,8	274724,5	0,67	130976,5	264186,8	0,50
Pferd 39	392,5	118895,3	190825,8	0,62	84874,9	168448,7	0,50
Pferd 52	398,5	192973,9	303464,1	0,64	136764,7	248169,2	0,55
Pferd 59	350	131311,4	186423,7	0,70	83821,2	158896,4	0,53
Pferd 62	407,5	119010,5	183867,5	0,65	79200,2	158261,8	0,50
Pferd 96	424	181275,4	249559,1	0,73	105999,9	233336,5	0,45
Pferd 97	432,5	118895,3	190825,8	0,62	84874,9	168448,7	0,50
Pferd 99	389,5	122789,8	160694,4	0,76	72793,7	131010,6	0,56
Pferd 2087	269,5	32630,9	41563,8	0,79	19506,9	38668,8	0,50
Pony1	342,5	50540,2	68538,4	0,74	31089,0	63819,7	0,49
Welsh Pony	310	39083,7	49531,3	0,79	29569,1	43509,9	0,68

chend dem runden Verlauf der Knochenoberflächen gibt es hier auch Werte über 1, und zwar von 0,8–1,2. Die Knochen mit dem geringsten Anteil der Ix-Komponente stammen von einem Hausesel und dem Przewalskipferd. Die relativ größten dorsoplantaren (sagittalen) Biegefestigkeiten treten dagegen bei zwei Metatarsen von Mauleseln auf. Die Variabilität der Hauspferde ist in dieser Hinsicht sehr groß, ohne daß besondere Häufungswerte oder eine Größenabhängigkeit zu erkennen wären. Artkonsistente Gruppenbildungen waren nicht zu erkennen, aber zumindest zwei Hausesel und die Wildpferde haben niedrige Formindizes. Eine gewisse Häufung der Werte im Bereich 0,9–1 läßt sich auch bei einigen der (vermuteten) Hybridformen feststellen. Auch bei der 50%-Position umfaßt das Hauspferd fast

die gesamte Spannweite der Ix/Iy-Werte; den Maximalwert, also die »rundeste« Diaphysenmitte, weist aber Maulesel 4 auf. Abgesehen vom zuletzt genannten Individuum besitzen Hausesel und Hybriden eher niedrigere Formindizes, also dorsoplantar abgeflachtere Querschnittsbilder.

Bei 70% ist die Diaphyse dorsoplantar schon stärker abgeflacht, die Werte liegen daher stets unter 1. Auch hier nimmt Maulesel 4 den Maximalwert beim Formindex ein, die Varianz wird im übrigen vom Hauspferd (0,5–0,75) abgedeckt. Die Ix/Iy-Werte für die Hausesel und die übrigen Hybridformen (exkl. Maulesel 4) liegen in einem vergleichsweise engen Bereich (0,59–0,67).

In einem kombinierten Diagramm (Abb. 5) aus den beiden Formindizes bei 30 und 70% ist eine Gruppentren-

Tab. 2: Metatarsus 3.

METATARSUS 3		Flächenträgheitsmomente (mm ⁴)								
Tier	Größte Länge (mm)	Ix 30	Iy 30	Ix/Iy 30	Ix 50	Iy 50	Ix/Iy 50	Ix 70	Iy 70	Ix/Iy 70
Hausesel 1	177,5	8684,7	8321,8	1,04	6989,7	7985,5	0,88	4743,1	7047,1	0,67
Hausesel 2	192,0	7567,1	8607,8	0,88	6558,7	8196,9	0,80	4283,1	7146,8	0,60
Hausesel 3	208,5	9574,3	11655,2	0,82	9197,1	11446,5	0,80	6155,7	10037,9	0,61
Maulesel 1	280,0	32610,7	34532,0	0,94	27949,4	32043,6	0,87	20455,4	31416,5	0,65
Maulesel 2	285,5	51786,4	52804,3	0,98	40734,2	46258,1	0,88	30180,7	47483,8	0,64
Maulesel 3	258,6	27451,5	29623,3	0,93	23233,1	29729,2	0,78	18918,5	30604,3	0,62
Maulesel 4	275,5	48921,7	42247,8	1,16	39604,6	38910,8	1,02	28841,9	37706,9	0,76
Maulesel 5	269,0	50369,2	42361,6	1,19	36233,7	39910,4	0,91	25084,4	40370,6	0,62
?Maultier, Ephesos	275,5	38347,5	41445,4	0,93	35022,7	43401,4	0,81	26795,0	45212,7	0,59
?Maultier, Carnuntum	280,0	82342,3	77424,2	1,06	69090,5	79191,9	0,87	46093,6	68757,9	0,67
?Maultier, Carnuntum	291,0	75292,8	75620,3	1,00	67512,2	75653,1	0,89	47466,9	77761,3	0,61
Maultier, Carnuntum	286,7	68291,2	69415,7	0,98	57440,3	66280,2	0,87	38384,6	57884,5	0,66
<i>E.ferus</i> ,Frauenhofen	260,0	51964,3	59476,8	0,87	46368,7	60632,4	0,76	36267,7	66294,8	0,55
<i>E.f.przewalskii</i>	274,5	47214,8	58299,9	0,81	40747,9	53480,2	0,76	31600,4	52895,9	0,60
Pferd 1, Carnuntum	300,0	68135,4	64984,8	1,05	60323,2	66328,5	0,91	48153,5	68373,4	0,70
Pferd 2, Carnuntum	283,5	59107,8	61737,6	0,96	50204,7	57988,8	0,87	33557,0	51885,1	0,65
Pferd 3, Carnuntum	273,2	59635,9	65380,7	0,91	46579,8	61241,9	0,76	33229,2	58049,2	0,57
Pferd 1974/93, Carnuntum	272,0	59843,6	52709,1	1,14	54025,1	57378,0	0,94	40807,8	58263,3	0,70
Pferd 857/97, Carnuntum	274,0	65334,0	69096,1	0,95	55740,0	65061,1	0,86	39328,3	67933,4	0,58
Pferd 4	311,0	91000,4	94851,2	0,96	88214,7	96671,0	0,91	68730,3	102774,6	0,67
Pferd 5	300,0	116762,5	113538,0	1,03	98949,6	125894,0	0,79	73099,3	136938,1	0,53
Pferd 10	324,5	141653,4	142056,1	1,00	114913,9	140072,3	0,82	77930,6	134808,8	0,58
Pferd 17	303,1	86577,1	79111,4	1,09	64802,5	68764,8	0,94	50633,6	70228,0	0,72
Pferd 19	318,9	118387,9	118003,4	1,00	88528,2	105631,6	0,84	66136,4	104056,0	0,64
Pferd 39	287,5	79499,5	72672,4	1,09	63836,5	67175,2	0,95	47107,6	76587,0	0,62
Pferd 52	300,0	89417,9	102185,2	0,88	72307,5	95488,3	0,76	56825,6	104134,5	0,55
Pferd 59	263,0	52298,6	54411,5	0,96	46392,1	54491,1	0,85	32397,1	57119,0	0,57
Pferd 62	312,5	68107,3	64991,0	1,05	57970,8	60067,3	0,97	43544,6	57917,2	0,75
Pferd 96	317,0	109985,0	99995,2	1,10	78179,3	91134,1	0,86	65396,2	98997,8	0,66
Pferd 97	330,0	152371,8	133634,3	1,14	105985,1	117941,9	0,90	88028,9	137989,0	0,64
Pferd 99	296,0	76605,1	81464,8	0,94	58327,5	69819,9	0,84	45228,4	77520,5	0,58
Pferd 2087	214,0	16391,0	18159,2	0,90	14849,6	17900,3	0,83	8730,1	17376,0	0,50
Pony 1	241,0	35350,5	33135,5	1,07	27282,4	32019,7	0,85	18305,5	32124,9	0,57
Welsh Pony 13	233,0	23575,8	24144,8	0,98	20913,2	23080,9	0,91	13765,9	21069,3	0,65

nung wenigstens ansatzweise erkennbar, wobei wieder auf die abweichende Position von Maulesel 4 und vom Przewalskipferd zu verweisen wäre. Im Diagramm erscheinen Esel und Hybriden vorwiegend in der rechten, unteren Hälfte, die Hauspferde auch links oberhalb. Unter Berücksichtigung der Achsdefinition bedeutet dies, daß, bei einer gegebenen Querschnittsform bei 70%, der sagittale, also dorsoplantar gerichtete Anteil der Biegefestigkeit an der 30%-Position bei den Hauspferden relativ erhöht ist. Hier kann also von einer stärkeren »Zunahme« des relativen Anteiles von Ix von distal nach proximal gesprochen werden. Die Unterschiede im Verhältnis der Biegefestigkeiten in den beiden Ebenen wären demnach bei Hauseseln und der Mehrzahl der Hybriden zwischen proximalen und distalen Schaftbe-

reichen geringer als bei den Hauspferden. In numerischen Werten ausgedrückt, betragen die Differenzen der Indizes von 30 und 70% ($I_x/I_y30\% - I_x/I_y70\%$) bei den Hauspferden 0,3–0,5 ($n = 17$, Mittelwert 0,38, Std. Abw. 0,07), bei Hauseseln und Hybriden 0,19–0,56 (bzw. –0,38, wenn man den extrem liegenden Maulesel 4 nicht berücksichtigt; sonst $n = 12$, Mittelwert 0,35, Std. Abw. 0,09).

Diskussion und Ausblick

Mit der nötigen Vorsicht, die durch die Zusammensetzung des Materiales geboten scheint, können nun Vermutungen über die biomechanischen Grundlagen der Formunterschiede angestellt werden, die sich zwischen

den einzelnen Equidengruppen abzeichnen. Die für den mittleren und distalen Diaphysenbereich der Tibia beim Hauspferd festgestellten, im Vergleich zu Eseln und Hybriden erhöhten, Biege widerstände in der Sagittalebene (in dorsoplantarer Richtung) können mit vergleichsweise gesteigerten Beanspruchungen in dieser Richtung zusammenhängen. Über das Belastungsregime an der distalen Hintergliedmaße des Pferdes sind wir durch verschiedene Arbeiten von PREUSCHOFT und Mitarbeitern (z.B. PREUSCHOFT & FRITZ 1977; PREUSCHOFT 1989) ausführlich unterrichtet. So treten beim Absprung und beim Abbremsen am proximalen Metatarsus enorme, jeweils entgegengesetzte Biegespannungen in der Sagittalebene auf. Die an der Tibia und andeutungsweise auch am proximalen Metatarsus festgestellten Formunterschiede könnten daher mit den Belastungen im Bereich des Sprunggelenkes korrelieren, wie sie bei schnellen Bewegungen auftreten. Diese Erklärung würde sich anbieten, wenn man von einer betonter cursorialen Lokomotionsweise beim Pferd im Vergleich zum Esel ausgeht. Andererseits wäre auch an eine mehr auf Stabilität ausgerichtete Fortbewegungsweise beim Esel zu denken, die stärker auf Belastungen aus verschiedenen Raumrichtungen eingestellt ist. Die Tibia ist, anders als der Metatarsus, ein auch in der Ruhestellung geneigt gehaltenes Skelettelement. Deshalb könnten auch artspezifische Unterschiede in der habituellen Haltung (Gelenkwinkelung) die beobachteten Unterschiede am Tibiaschaft mitbedingen, etwa im Sinne einer beim Esel steiler gestellten Extremität.

Für das vorliegende Material kann der modifizierende Einfluß von Haltungs- oder Nutzungsbedingungen auf die Knochenform nur schwer abgeschätzt werden. Die häufig intermediäre Morphologie der Hybriden (Maultiere und Maulesel) spricht aber doch für eine vorhandene genetische Komponente. Ferner ist bemerkenswert, daß sich die beiden untersuchten Wildpferdeknochen in ihren mechanischen Eigenschaften stark an die Hausesel und Hybriden anlehnen. Als notwendig erscheinen uns daher weiterführende Untersuchungen an größeren rezenten Vergleichsserien von Equiden mit bekannter Lebensgeschichte.

Danksagung

Frau Prof. Elisabeth MAYRHOFER und Herrn Dr. Wolfgang HENNINGER (Universitätsklinik für Röntgenologie der Veterinärmedizinischen Universität Wien) sei für die bereitwillige Zurverfügungstellung des Computertomographen sowie die in reichlichem Maße bei den Messungen geleistete Hilfestellungen recht herzlich gedankt. Zu danken ist auch Herrn Dr. Erich PUCHER, Archäologisch-Zoologische Sammlung des Naturhistorischen Museums Wien, für die Überlassung von Vergleichsmaterial. Ebenso war es dank Herrn Dr. Manfred KANDLER (Österreichische Archäologisches Institut) möglich, frisch geborgenes Equidenmaterial aus Carnuntum in diese Untersuchung einzubeziehen. Prof. Holger PREUSCHOFT

(Bochum) wies anlässlich einer Posterpräsentation zur Morphologie des (in dieser Arbeit nicht behandelten) Equidenfemur (KUNST 1997b) auf den möglichen Zusammenhang zwischen habitueller Extremitätenstellung (Gelenkwinkelung) und dem Diaphysenquerschnitt hin.

Anschriften der Verfasser:

Mag. Andreas Artemiou und
Dr. Gerhard Forstenpointner
Inst. f. Anatomie der Veterinärmedizinischen
Universität Wien
Veterinärplatz 1
A-1210 Wien

Mag. Günther Karl Kunst
IDEA/Inst. f. Paläontologie, Geozentrum
Althanstraße 14
A-1090 Wien

Literatur

- BIKNEVECICUS, A. R. (1993): Biomechanical scaling of limb bones and differential limb use in caviomorph rodents. *J. Mammalogy* 74, 95–107.
- DEMES, B., W. L. JUNGERS & K. SELPIEN (1991): Body size, locomotion, and long bone cross-sectional geometry in Indriid primates. *Am. J. phys. Anthropol.* 86, 537–547.
- DRIESCH, A. VON DEN (1976): Das Vermessen von Tierknochen aus vor- und frühgeschichtlichen Siedlungen. München.
- EISENMANN, V. (1986): Comparative Osteology of Modern and Fossil Horses, Half-asses, and Asses. In: R. H. MEADOW & H.-P. UERPMMANN (Hrsg.): *Equids in the ancient world*. *Beih. TAVO A*, 19/1, 67–116.
- FLADE, J. E. (1990): *Der Hausesel*.
- FORSTENPOINTNER, G. (1996): Die Tierknochenfunde aus dem Schachtbrunnen im Atrium. In: C. LANG-AUINGER: *Hanghaus 1 in Ephesos*. *Der Baubefund. Forschungen in Ephesos* 8/3, 209–218.
- HECKNER-BISPING, U. & C. GEIER (1993): Bedingen vergleichbare Lebensräume bei *Equus grevyi*, *Equus quagga boehmi* und *Equus przewalskii* gleichartige Lokomotionsmuster? *Z. Säugetierkunde, Sonderheft zum Bd. 58*, 25–26.
- HECKNER-BISPING, U. & S. GRÄFF (1992): Vergleichende Untersuchungen zum Lokomotionsverhalten von Onager (*Equus hemionus onager*) und Przewalskipferd (*Equus przewalski*) sowie deren Fohlen. *Z. Säugetierkunde, Sonderheft zum Bd. 57*, 30–31.
- KUNST, G. K. (1996): Femoral morphology of some Quaternary bears. *Acta zool. cracov.* 39(1), 269–278.
- KUNST, G. K. (1997a): Equidenskelette aus dem Vorland des Auxilarkastelles Carnuntum. In: M. KANDLER (Hrsg.), *Das Auxilarkastell Carnuntum 2*, *Österr. Arch. Inst., Sonderchriften* 30, 183–218.
- KUNST, G. K. (1997b): Discrimination of long bones from domestic Equus by cross-sectional geometry. *ICVM-5 Abstracts, J. Morphology* 232/3, 282.
- LARSEN, C. S. (1997): *Bioarchaeology. Interpreting behavior from the human skeleton*. *Cambridge Studies in Biological Anthropology*.

- NICKEL, R., A. SCHUMMER & E. SEIFERLE (1992): Lehrbuch der Anatomie der Haustiere Bd. 1, Bewegungsapparat. 6. Aufl.
- PAUWELS, F. (1965): Gesammelte Abhandlungen zur funktionellen Anatomie des Bewegungsapparates.
- PREUSCHOFT, H. (1970): Functional anatomy of the lower extremity. In: *The Chimpanzee*, vol.3, 221–294.
- PREUSCHOFT, H. (1989): The external forces and internal stresses in the feet of dressage and jumping horses. *Z. Säugetierkunde* 54, 172–190.
- PREUSCHOFT, H. & M. FRITZ (1977): Mechanische Beanspruchungen im Bewegungsapparat von Springpferden. *Fortschritte der Zoologie* 24, 75–98.
- PUCHER, E. (1992): Das bronzezeitliche Pferdeskelett von Unterhautzenthal, P. B. Korneuburg (Niederösterreich), sowie Bemerkungen zu einigen anderen Funden »früher« Pferde in Österreich. *Ann. Naturhist. Mus. Wien* 93/B: 19–39.
- RUFF, C. B. (1989): New approaches to structural evolution of limb bones in primates. *Folia Primatol.* 53, 142–159.
- RUFF, C. B. & W. C. HAYES (1983): Cross-sectional geometry of Pecos Pueblo femora and tibiae—a biomechanical investigation: I. Method and general patterns of variation. *Am. J. phys. Anthropol.* 60, 359–381.
- RUNESTEAD, A. J., C. B. RUFF, J. C. NIEH, R. W. THORINGTON & M. F. TEAFORD (1993): Radiographic estimation of long bone cross-sectional geometric properties. *Am. J. phys. Anthropol.* 90, 207–213.
- SCHMID, E. (1972): *Atlas of Animal Bones*.
- TAYLOR, M. E. (1976): The functional anatomy of the hindlimb of some African Viverridae (Carnivora). *J. Morphology* 148, 227–254.