

Abschlussbericht
für das Bundesinstitut für Sportwissenschaften

**Effekt niedrigen Körpergewichtes und hoher mechanischer
Belastung auf die Frakturwiderstandsfähigkeit
ausgewählter Skelettregionen**

**Eine Querschnittsstudie mit Sportkletterern und
Langstreckenläufer**

**W. Kemmler¹, H. Baumann², K. Engelke¹, R. Pintag¹, I. Roloff¹, C.
Beeskow¹, W. Kalender¹, J. Weineck²**

¹ Institut für Medizinische Physik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-
Nürnberg

² Institut für Sport und Sportwissenschaft, Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

Korrespondenzadresse:

PD Dr. Wolfgang Kemmler

Institut für Medizinische Physik

Henkestrasse 91

91054 Erlangen

Telefon: 09131/8523999

Fax: 09131/8522824

e-mail: wolfgang@imp.uni-erlangen.de

Einleitung

Niedriges Körpergewicht spielt in Sportarten mit Weight-bearing-Belastungen wie Laufen oder Relativkraftmerkmalen wie Klettern eine zentrale Rolle. Gerade aus diesem Grund versuchen viele Athleten dieser Sportarten ihr Körpergewicht niedrig zu halten respektive zu senken. Dass ein niedriges Körpergewicht bzw. eine Gewichtsreduktion mit einer Reduktion des derzeit als zentraler Frakturprädiktor anerkannten Parameters Knochendichte (BMD) in negativer Beziehung steht, wurde indes zweifelsfrei nachgewiesen (26, 32, 96, 99). Ob dieser negative Einfluss durch die mechanische Belastung, die den Sportarten innewohnt, ganz oder zumindest regional kompensiert werden kann, ist eine zentrale Frage für die Frakturprophylaxe dieser Athleten.

Eine Vielzahl von Untersuchungen erfasste die BMD in unterschiedlichen Sportarten. Beschränkt man sich auf das von uns fokussierte Kollektiv „leichtgewichtiger“ männlicher Sportler, so zeigen sich besonders für die LWS-Region insgesamt heterogene Ergebnisse (Übersicht in (54, 81, 91)), die nicht zuletzt auf unterschiedliche Messorte, Messtechniken und methodische Unterschiede zurückzuführen sind. So liegt z. B. die Knochendichte eines Langstreckenläufers an der von der mechanischen Belastung weniger tangierten Region LWS je nach Untersuchung im Bereich untertrainierter Kontrollpersonen (4, 6, 11), darunter (5) oder darüber (57, 76, 90). Der zentrale Bias, die zu diesen deutlichen Unterschieden führt, ist unserer Einschätzung nach die Auswahl der Kontrollgruppe. So sind anthropometrische Größen der KG, die Einfluss auf die Knochendichte (Gewicht, BMI, Körperfett) zeigen, in einigen Fällen (1, 4, 5, 90) signifikant unterschiedlich von den Verhältnissen in der Athletengruppe. Zudem ist meist nicht reglementiert, was unter untrainiert zu verstehen ist. Beispielweise übt die untrainierte Kontrollgruppe in der Untersuchung von Benell et al. (4) bis zu 3 h/Woche Weight-bearing-Sportarten aus.

Betrachtet man in diesem Zusammenhang die Literatur (54, 81, 91), so fällt auf, dass die überwiegende Anzahl entsprechender Untersuchungen auf Frauen fokussiert, wohl deswegen, weil sich die negativen Auswirkungen niedrigkalorischer Ernährung und lange andauernder systemischer Belastung bei Frauen augenscheinlicher manifestieren (3, 18, 84). Insgesamt zeigt sich ein Mangel an Untersuchungen, der den Einfluss spezifischer Belastung auf das Hormonsystem und auf den Knochen bei Männern mit niedrigkalorischer Ernährung bzw. niedrigem Körpergewicht an unterschiedlichen belasteten und weniger belasteten Skelettregionen valide erfasst und in Zusammenhang mit einer bezüglich anthropometrischer Variablen vergleichbaren Kontrollgruppe setzt.

Ziel der vorliegenden Untersuchung war es, den Einfluss deutlich verschiedener sportlicher Belastungen auf Knochenparameter an unterschiedlichen Skelettregionen mittels mehrerer valider Messtechniken (DXA, QCT, Ultraschall) bei Sportlern mit einem niedrigen Körpergewicht/BMI zu erfassen, um Rückschlüsse auf die Frakturgefährdung abzuleiten.

Material und Methoden

Die Untersuchung wurde vom Bundesamt für Strahlenschutz (Z 2.1.2-22462/2-2002-005), dem bayrischen Landesamt für Arbeitsschutz sowie der Ethikkommission der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (Ethik Antrag Nr. 2691) genehmigt. Alle Teilnehmer gaben vor Beginn der Untersuchung Ihre schriftliche Einwilligung.

Stichprobe

Insgesamt 78 Männer zwischen dem 20. und 35. Lebensjahr nahmen an der Untersuchung teil. Die Läufer und Sportkletterer wurden überwiegend über die Kadertrainer, die Allrounder und Kontrollpersonen über Aufrufe, Flugblätter, Internetauftritte sowie direkter Kontaktaufnahme rekrutiert.

Einschlusskriterien:

- 20-35 J.
- BMI < 23

Läufer und Sportkletterer

- Leistungssportliche Betätigung während der vergangenen 5 Jahre
- Leistung auf regionalem/nationalem Niveau (Sportklettern: UIAA \geq 9+ im Vorstieg; Laufen: Halbmarathon < 1.15 oder 10.000 m < 32:30 min).

Allrounder

- > 6 h/Woche Sporttreiben in deutlich unterschiedlichen Sportarten während der vergangenen 5 Jahre
- maximal 3 h spezifische Spezialisierung in einer Sportart während der vergangenen 5 Jahre

Kontrollpersonen

- \leq 2 h/Wochen sportliche Betätigung während der vergangenen 5 Jahre
- keine Sportarten mit hohem osteogenetischem Potential
- keine wettkampfsportliche Aktivität in Kindheit und Adoleszenz

Ausschlusskriterien

- Erkrankungen, Einnahme von Medikamenten mit Einfluss auf den Knochenmetabolismus
- bekannte familiäre Osteoporosedisposition

Nach Anwendung der Ein- und Ausschlusskriterien wurden 71 Teilnehmer in die Analyse eingeschlossen. Tab. 1 zeigt die anthropometrischen und sportspezifischen Daten der Teilnehmer.

Tab. 1: Anthropometrische und sportartspezifische Daten der Gruppen im Vergleich

Variable	Sportkletterer (n=20)	Läufer (n=20)	Allrounder (n=20)	KG (n=11)	p
Alter [J]	28.7 ± 4.1 21 – 35	26.6 ± 5.5 20 – 35	25.6 ± 3.7 22 – 34	28.7 ± 4.6 20 – 35	*
Größe [cm]	178.1 ± 4.8 167.5 – 188.6	179.0 ± 7.1 166.3 – 190.1	183.0 ± 5.5 173.5 – 195.4	182.8 ± 7.9 175.5 – 195.5	n.s.
Gewicht [kg]	67.4 ± 4.7 57.2 – 76.5	67.2 ± 6.7 52.0 – 80.4	72.1 ± 6.5 56.0 – 83.0	69.2 ± 5.9 59.2 – 83.0	n.s.
BMI	21.2 ± 1.0 19.3 – 22.9	20.9 ± 1.4 18.4 – 22.8	21.5 ± 1.3 18.8 – 22.9	20.7 ± 1.7 18.0 – 22.9	n.s.
Körperfett Tanita Normalmodus	12.7 ± 1.9 10.0 – 17.0	11.3 ± 2.3 7.0 – 16.0	12.9 ± 2.5 7.0 – 16.0	11.1 ± 2.6 3.0 – 16.0	n.s.
Körperfett Tanita Sportmodus	6.8 ± 1.4 4.0 – 9.0	5.2 ± 1.5 2.0 – 8.0	6.5 ± 2.3 2.0 – 10.0	6.4 ± 2.7 3.0 – 11.0	n.s.
Körperfett DXA	11.0 ± 1.8 8.1 – 15.0	10.9 ± 1.8 8.1 – 14.7	12.0 ± 2.5 7.0 – 18.5	12.7 ± 2.1 10.4 – 18.5	n.s.

Variable	Sportkletterer	Läufer	Allrounder	KG	p
Trainingsalter [J.]	13.2 ± 5.1 7 – 25	8.9 ± 3.0 4 – 15	11.9 ± 5.7 4-24	5.1 ± 3.9 0 – 9	***
Trainingsumfang [min/Woche]	302 ± 109 ¹ 180 – 660	555 ± 128.7 350 – 840	590 ± 201 270 – 900	43 ± 25 0 -120	***
Trainingshäufigkeit [TE/Wo.]	4.4 ± 1.2 2 – 6	8.1 ± 2.2 5-13	5.9 ± 1.4 4-10	0.8 ± 0.5 0 – 2	***
Handkraft [kg]	50.8 ± 3.8	48.6 ± 4.7	51.0 ± 6.3	48.9 ± 4.1	n.s.

Die Parameter Trainingsumfang und Häufigkeit wurden über das vergangene Jahr gemittelt abgefragt. Die Halbmarathon- bzw. 10.000m-Bestzeit lag innerhalb der Läufergruppe bei 71.1 min; (63 – 75 min bzw. 32.01 min, (29.07 – 33.41)). Das Niveau der Sportkletterer lag zwischen UCI 9+ - 11-.

¹ Es wurde lediglich die Zeit unter Belastung (keine Sichtungs- oder Sicherungsarbeit) berücksichtigt.

Messprogramm

Anthropometrische Messungen

Körpergewicht und Körpergröße wurden über entsprechende Messungen an geeichten Geräten zu allen Messzeitpunkten ermittelt. Aus Körpergröße und Körpergewicht wurde nach der Formel Körpergewicht / Körpergröße (in Meter)² der Body-Mass-Index (BMI) errechnet.

Körperfett und fettfreie Körpermasse wurden sowohl mittels DXA-Methode (Hologic QDR 4500A) im Ganzkörpermodus wie auch durch eine Impedanzmessung (Tanita BF 305, Tokio, Japan) im Normal- sowie Athletenmodus bestimmt. Die DXA-Messung lieferte zusätzlich eine Subanalyse der unterschiedlichen Körperregionen.

Densitometrie

Die Knochendichte/-masse unterschiedlicher Körperregionen wurde mittels DXA-Methode (Hologic QDR 4500A, Bedford USA) im Ganzkörperverfahren erfasst. Neben der Gesamtkörper-Knochendichte erfolgte eine Analyse der „Regions of Interest“ (ROI) Schädel, Arme, Rippen BWS, LWS, Hüfte und Beine). Zur Auswertung wurden Standardprotokolle des Herstellers (38, 39) herangezogen.

Die volumetrische Knochendichte an der LWS (LWK 1-3) wurde computertomographisch (Siemens Somatom 4plus) mittels des von Kalender et al. (46) entwickelten Protokolls ausgewertet. Zusätzlich zum konventionellen Protokoll erfolgte eine Erfassung der Knochendimension (Tiefe LWK 1-3 a.p., Breite LWK 1-3 a.p. und Cross-Sectional-Area CSA).

Die volumetrische Knochendichte (integriert, trabekulär, kortikal) am Schenkelhals, die Dicke des Schenkelhalses, die kortikale Dicke sowie die Hüftachsenlänge wurde ebenfalls computertomographisch (Siemens Somatom 4plus) erfasst und nach dem Protokoll von (47) analysiert. Eine Dosisreduktion wurde über die Protokolle von Kachelrieß (44) realisiert.

Die Ultraschalluntersuchung wurde gemäß dem Protokoll des Herstellers mit einem Sahara Achilles (Hologic, Bedford, USA) am Fersenbein durchgeführt. Der aus den Ultraschallparameter Speed of Sound (SOS) und Broadband Ultrasound Attenuation (BUA) berechnete Quantitativ of Ultrasonic Index (QUI) ging in die Analyse ein.

Sämtliche Untersuchungen wurden am Institut für Medizinische Physik durchgeführt.

Handkraft

Die maximale Handkraft (maximale Flexion der Finger) der dominanten Hand wurde im isometrischen Modus mittels Handdruckkraftgerät (Jamar, Bollington, USA) in Anlehnung an die American Society of Hand Therapists (67) ermittelt.

Ernährungsanalyse

Die Erfassung der aktuellen Ernährungssituation der Teilnehmer erfolgte durch ein 5-tägiges schriftliches Ernährungsprotokoll. Zum genauen Abwiegen der Speisen wurden den Teilnehmern bei Bedarf präzise Haushaltswaagen (Söhnle combi plus, Murrhardt,

Deutschland) überlassen. Das Dokumentieren der Ernährung durch die Teilnehmerinnen wurde unserer Einschätzung nach sehr gewissenhaft durchgeführt. Die Auswertung der Ernährungsprotokolle erfolgte in enger Zusammenarbeit mit dem Sportinstitut der Universität Bayreuth über ein spezielles ernährungswissenschaftliches Programm (Prodi-4,5/03 Expert). Das genannte Programm enthält neben dem BLS (Bundeslebensmittelschlüssel)-Code die Daten unterschiedlicher Produkthersteller, was eine sehr präzise Eingabe ermöglichte.

Blutentnahme

Die Blutentnahme erfolgte in engem zeitlichen Zusammenhang mit den übrigen Messungen. Zwei Tage vor der Blutentnahme sollte weder eine Trainingsmaßnahme noch eine intensive körperliche Belastung durchgeführt werden. 24 h vor der Blutentnahme sollten die Teilnehmer auf Alkohol, Nikotin, Medikation und ungewöhnliche Nahrungszufuhr verzichten. Die Blutentnahmen erfolgten nüchtern zwischen 7:30 und 9:00 durch Venenpunktion in der Ellbeuge. Jeweils 2mal 1 ml Serum und eine Monovette wurden bei -70° bzw. bei -20° tiefgefroren. Auf eine Bestimmung von hormonellen Parametern musste bis zum jetzigen Zeitpunkt aus finanziellen Gründen verzichtet werden.

Fragebogen

Der Fragebogen (Anhang) gliederte sich in mehrere Teile:

In Teil 1 wurden überwiegend organisatorischer Variablen (Name, Anschrift, Erreichbarkeit) aber auch einfache anthropometrische Daten (Alter, Größe, Gewicht) der Teilnehmer abgefragt.

Teil 2 des Fragebogens erfasste Parameter des gesundheitlichen Status und Faktoren, die derzeit in Zusammenhang mit einer Osteoporose gesehen werden:

1. bekannte Osteoporose/Osteopenie
2. familiäre Disposition (Osteoporose bei nahen Verwandten)
3. Erkrankungen mit Wirkung auf den Knochenstoffwechsel
4. Einnahme von Medikamenten mit Wirkung auf den Knochenstoffwechsel
5. Risikofaktoren mit Wirkung auf den Knochenstoffwechsel
6. aktuelles und historisches Belastungsprofil
7. aktuelle und historische Belastung über den Sport
8. Milchkonsum in der Vergangenheit
9. Ernährungsgewohnheiten
10. Genussmittel, Alkohol, Kaffee, Nikotin

Ein spezifischer Fragebogen u.a. zur Erfassung der knochenspezifischen aktuellen und historischen körperlichen Belastung sowie der sportlichen Aktivität in unterschiedlichen Lebensabschnitten und zum aktuellen Zeitpunkt wurde von uns in Anlehnung an einen bereits erprobten Fragebogen (52) entwickelt (53). Eine Prüfung der Reliabilität (Reproduzierbarkeit) dieses Fragebogens im Rahmen der oben aufgeführten Untersuchungen ergab einen Variationskoeffizient von $< 5\%$.

Statistik

Zur Berechnung der kumulierten Probandenwerte, Mittelwerte und Standardabweichungen sowie anderer statistischer Kennzahlen wurde das Computerprogramm SPSS (Version 12.0) genutzt.

Zur Ermittlung von Zusammenhängen zumindest intervallskalierter Daten wurde die Produkt-Moment-Korrelation herangezogen. Daten auf ordinalskaliertem Niveau wurden mittels Rangreihen-Korrelation nach Spearman („Spearman's-Rho“) berechnet. Zur Klärung komplexer Zusammenhänge wurde die schrittweise multiple Regression herangezogen. Korrelationen zwischen 0.2 und 0.4 werden im weiteren als „schwach“, Zusammenhänge zwischen 0.4 und 0.6 als „mittelstark“ und Korrelationen über 0.6 als „stark“ bezeichnet (7).

Bei Zwischenvergleichen von zwei Gruppen wurde in Abhängigkeit von Normalverteilung und Skalenniveau der unabhängige t-Test oder der U-Test nach Mann-Whitney angewandt. Bei Zwischengruppenvergleichen von mehr als 2 Gruppen erfolgte die Berechnung mittels ein- oder mehrfaktorieller Varianzanalyse. Die Verteilung der Werte wurde mittels Kolmogorow-Smirnov-Test, die Varianzhomogenität mittels Levene-Test überprüft. Lag keine Normalverteilung oder Ordinalskalenniveau vor, wurden die Daten mit parameterfreien Verfahren (Kruskal-Wallis-Rangvarianzanalyse) bearbeitet. Zur Prüfung der Signifikanz der Einzelvergleiche wurde von uns der Scheffe-Test ausgewählt.

Tab. 2: Signifikanzschranken mit verbaler Bedeutung, Abkürzung und graphischer Symbolisierung

Irrtumswahrscheinlichkeit	verbale Bedeutung	Abkürzung	graphisches Symbol
> 0.05	nicht signifikant	n.s.	-
≤ 0.05	signifikant	s.	*
≤ 0.01	sehr signifikant	s.s.	**
≤ 0.001	hoch signifikant	h.s.	***

Ergebnisse

Unterschiede zwischen den Gruppen

Ernährungsparameter

Tab. 3: ausgewählte Ernährungsparameter unserer 5tägigen Ernährungsanalyse.

Ernährungsparameter	Sportkletterer (n=15)	Läufer (n=15)	Allrounder (n=12)	KG (n=9)	p
Energieaufnahme [kJ/d]	10813 ± 2091	12062 ± 2634	14725 ± 2725	10832 ± 2190	**
Eiweissaufnahme [g/d]	83.0 ± 20.7	93.3 ± 29.1	114.1 ± 26.8	88.6 ± 19.4	n.s.
KH-Aufnahme [g/d]	349.8 ± 74.8	416.2 ± 78.2	510.0 ± 103.4	312.9 ± 39.5	***
Fettaufnahme [g/d]	82.9 ± 21.2	87.4 ± 28.8	98.6 ± 18.9	87.6 ± 24.7	n.s.
Alkoholaufnahme [g/d]	12.8 ± 11.9	2.6 ± 2.3	13.4 ± 12.9	15.1 ± 12.7	**
Kalzium [mg/d]	1167 ± 401	1207 ± 548	1618 ± 496	1087 ± 530	*
Phosphat [mg/d]	1562 ± 478	1367 ± 573	1919 ± 533	1399 ± 449	n.s.
Natrium [mg/d]	2268 ± 762	3324 ± 1034	3021 ± 683	2674 ± 733	*
Kalium [mg/d]	3465 ± 1014	3327 ± 1764	4352 ± 680	2989 ± 645	*
Magnesium [mg/d]	438.6 ± 141.7	603.1 ± 209.5	611.0 ± 123.5	410.8 ± 103.3	*
Vitamin D [IE/d]	1.78 ± 0.61	2.96 ± 2.10	2.64 ± 2.00	2.55 ± 1.67	n.s.
Wasser [g/d]	2744 ± 848	2496 ± 655	3095 ± 554	2217 ± 850	*

Wie zu erwarten zeigen sich zwischen den Gruppen deutliche, z.T. signifikante Unterschiede für die ausgewählten Ernährungsparameter. Mit wenigen Ausnahmen liegen die Werte der Allroundergruppe am höchsten, gefolgt von der Läufergruppe. Keine wesentlichen Unterschiede konnten zwischen der Gruppe der Sportkletterer und der KG erfasst werden. Fokussiert man zunächst die Energieaufnahme unter Berücksichtigung des Trainingsumfangs, (Tab. 1), so erstaunt der signifikante bzw. deutliche (grenzwertig signifikante) Unterschied zwischen Sportkletterern bzw. Läufern und der Allroundergruppe. Setzt man die Nährstoffe in Beziehung zueinander, so zeigt sich in keiner Gruppe eine krasse Fehlernährung, wobei das Verhältnis der Energie liefernden Grundnährstoffe innerhalb der Gruppe der Läufer und Allrounder am günstigsten und innerhalb der KG am ungünstigsten liegt. Obwohl sich zwischen den Gruppen deutliche bis signifikante Unterschiede für die Mineralstoffe zeigen, kann in keiner Gruppe von einer Mangelversorgung ausgegangen werden. Kalzium als Mineralstoffe mit zentralem Einfluss auf den Knochenmetabolismus unterscheidet sich signifikant zwischen den Gruppen wobei die Kalziumaufnahme bzw. das Verhältnis zwischen Kalzium- und Phosphat-Aufnahme im Rahmen derzeitigen Empfehlungen der DGE (20) und der NIH (75) liegt. Die Flüssigkeitsaufnahme variiert ebenfalls deutlich zwischen den Gruppen, insgesamt erscheint die Flüssigkeitsaufnahme der Läufer in Anbetracht ihres Trainingsumfanges als deutlich zu gering (56), während die übrigen Gruppen eine adäquate Versorgung aufweisen.

Bezogen auf Genussmittel wie Alkohol und Nikotinkonsum zeigen sich ebenfalls signifikante Zwischengruppenunterschied. Für den Alkoholkonsum unterscheiden sich die wenig konsumierenden Läufer signifikant von den übrigen Gruppen. Während kein Teilnehmer der

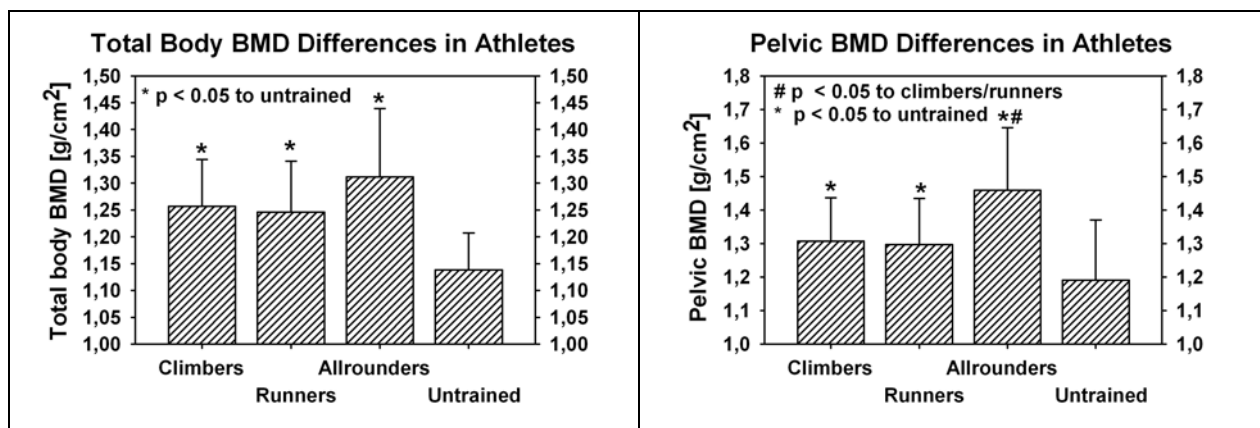
Läufergruppe während der vergangenen 5 Jahre geraucht hat, ist dieser Anteil mit 40% in der Sportkletterergruppe am höchsten (Allrounder: 20%, KG: 36%).

Knochendichte

Tab. 4: Ergebnisse der Gesamtkörper-Densitometrie mittels DXA für die vier unterschiedlichen Subgruppen.

DXA [g/cm ²]	Sportkletterer	Läufer	Allrounder	KG	p
BMD Gesamtkörper	1.257 ± .087	1.246 ± .095	1.312 ± 0.127	1.138 ± .069	***
BMD Schädel	2.081 ± .252	1.991 ± .235	2.047 ± .292	1.971 ± .165	n.s.
BMD linker Arm	0.972 ± .068	0.879 ± .066	0.960 ± .097	0.847 ± .060	***
BMD rechter Arm	0.972 ± .070	0.870 ± .067	0.959 ± .091	0.842 ± .049	***
BMD Rippen links	0.785 ± .100	0.676 ± .064	0.732 ± .075	0.644 ± .038	***
BMD Rippen rechts	0.752 ± .069	0.661 ± .074	0.698 ± .046	0.646 ± .041	***
BMD BWS	0.913 ± .065	0.850 ± .070	0.964 ± .102	0.801 ± 0.74	***
BMD LWS	1.144 ± .102	1.070 ± .114	1.205 ± .124	1.004 ± .170	***
BMD Hüfte	1.307 ± .129	1.297 ± .137	1.459 ± .187	1.191 ± .179	***
BMD linkes Bein	1.395 ± .115	1.480 ± .132	1.517 ± .195	1.299 ± .097	***
BMD rechtes Bein	1.370 ± .092	1.452 ± .135	1.493 ± .160	1.298 ± .103	***

Mit einer Ausnahme zeigen sich für alle DXA-Knochenparameter hoch-signifikante Zwischengruppenunterschiede. Wie erwartet lassen sich für die Knochendichte des Schädels einer durch das Sporttreiben mechanisch nicht belasteten Region keine signifikanten Unterschiede erfassen. Inwieweit die tendenziell niedrigeren Werte der Läufer und Kontrollgruppe mit negativen systemischen Veränderungen zusammenhängen, kann aufgrund der fehlenden Analyse systemischer Substanzen nicht beurteilt werden.



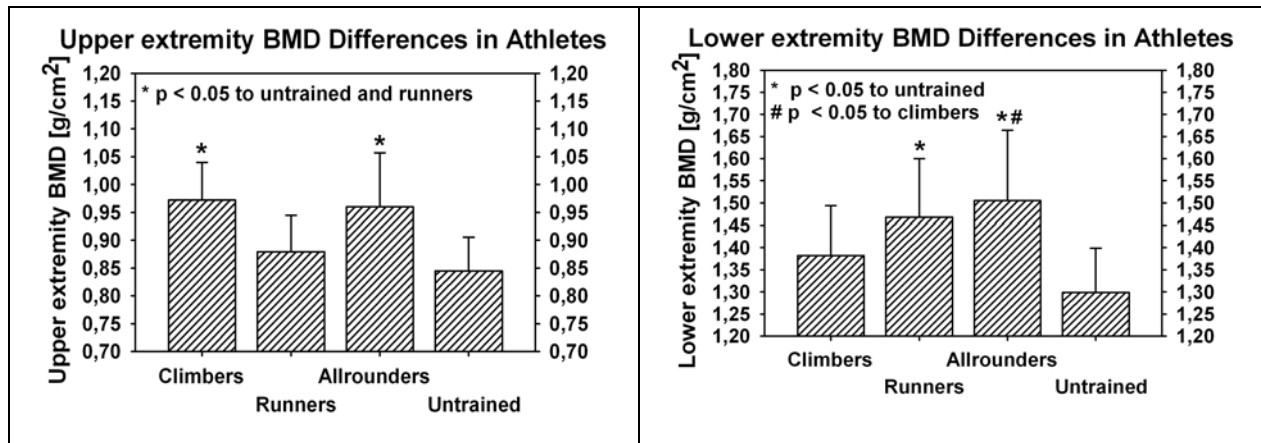


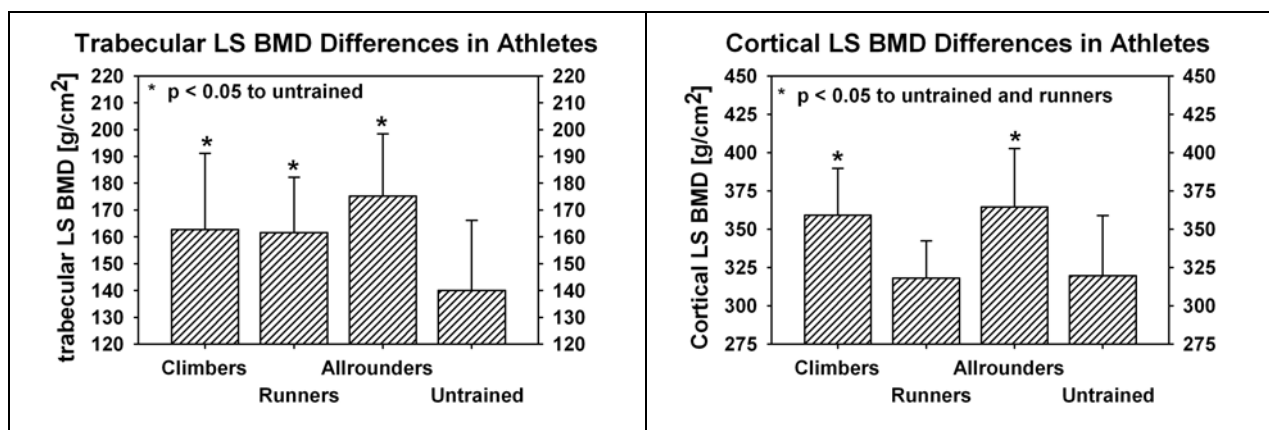
Abb. 1: Ausgewählte Ergebnisse der Gesamtkörper-Densitometrie mittels DXA für die vier unterschiedlichen Subgruppen.

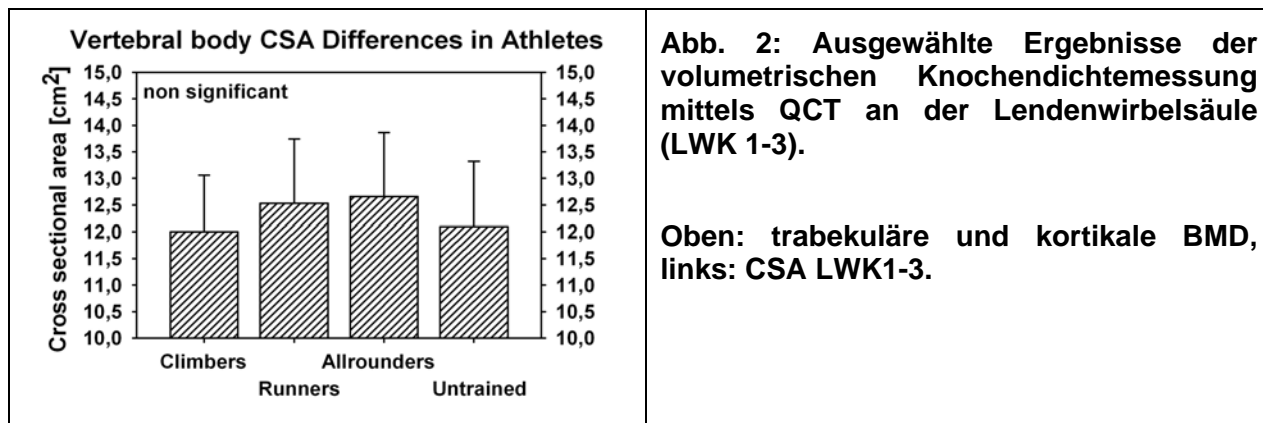
Eine post-hoc Analyse der Varianzanalyse zeigt, dass sich die Kontrollgruppe für fast alle Parameter (Ausnahme Schädel, Rippen links) signifikant von der Allroundergruppe abhebt. Die Sportkletterer unterscheiden sich für die Parameter Gesamtkörper-BMD sowie die Subanalysen Arme, Rippen, BWS, LWS und Hüfte signifikant von der Kontrollgruppe. Für die Läufergruppe konnten signifikante Unterschiede zur Kontrollgruppe für die Regionen Gesamtkörper, untere Extremitäten und Hüfte nachgewiesen werden.

Tab. 5: Ergebnisse der volumetrischen Knochendichtemessung mittels QCT an der Lendenwirbelsäule (LWK 1-3).

Variable	Sportkletterer	Läufer	Allrounder	KG	p
Trabekuläre LWS [g/cm ³]	162.7 ± 28.5	161.6 ± 20.6	175.2 ± 23.2	140.0 ± 26.4	***
Kortikale LWS [g/cm ³]	359.1 ± 30.6	318.1 ± 24.3	364.5 ± 38	319.6 ± 39.2	***
Breite LWK 1-3 [cm]	3.97 ± 0.26	4.11 ± 0.30	4.10 ± 0.29	4.04 ± 0.29	n.s.
CSA LWK 1-3 [cm ²]	12.02 ± 1.06	12.53 ± 1.21	12.66 ± 1.20	12.14 ± 1.22	n.s.

Bezogen auf die trabekuläre Knochendichte zeigt nur die Gruppe der Allrounder ein signifikant höheres Ergebnis als die Kontrollgruppe. Eine vergleichbare trabekuläre Knochendichte weisen Läufer und Sportkletterer auf, während die Knochendichte der Kontrollpersonen deutlich, jedoch n.s., niedriger liegt.





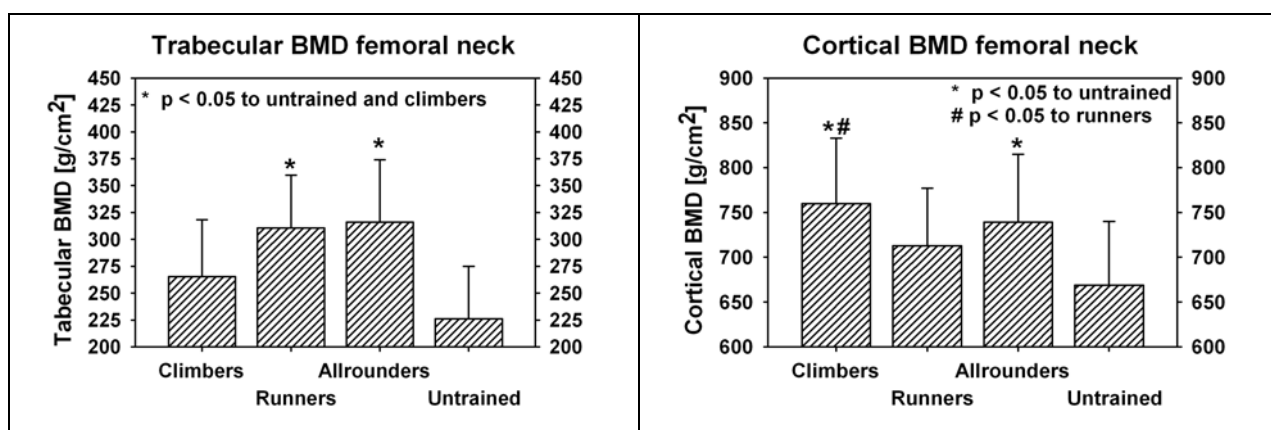
Bezogen auf die kortikale BMD zeigen Allrounder und Sportkletterer sowie Läufer und Kontrollpersonen vergleichbar hohe Werte. Die Gruppen der Allrounder und Sportkletterer weisen jeweils eine signifikant höhere Knochendichte als die Gruppe der Läufer und Kontrollpersonen auf.

Keine signifikanten Unterschiede konnten für Dimensionsparameter (Breite, Tiefe, CSA) des Knochens erfasst werden.

Tab. 6: Knochendichte der unterschiedlichen Kollektive am Schenkelhals (SH) erfasst via QCT.

Variable	Sportkletterer	Läufer	Allrounder	KG	p
SH BMD total [g/cm ³]	432.2 ± 52.2	448.5 ± 48.3	457.3 ± 68.4	370.1 ± 59.5	***
SH trab. BMD [g/cm ³]	265.3 ± 53.0	310.6 ± 49.4	316.1 ± 58.2	226.2 ± 49.4	***
SH cort. BMD [g/cm ³]	760.4 ± 72.7	713.4 ± 64.6	739.4 ± 86.2	669.1 ± 70.7	*
SH cort. Dicke [mm]	2.80 ± .33	2.64 ± .26	2.78 ± .28	2.64 ± .14	n.s.
SH-Breite [cm]	3.51 ± .39	3.56 ± .41	3.58 ± .38	3.52 ± .40	n.s.

Alle Sportlergruppen zeigen eine in etwa vergleichbare integrierte Knochendichte (BMD total) am Schenkelhals, die sich jeweils von der Knochendichte der Kontrollgruppe signifikant unterscheidet.



Eine differenziertere Analyse ergibt jedoch signifikante Unterschiede bei der trabekulären und kortikalen Knochendichte, insbesondere zwischen Läufer und Sportkletterer. Bezogen auf die trabekuläre Knochendichte zeigen Läufer und Allrounder die höchsten Werte, beide

Gruppen unterscheiden sich signifikant von der Kontrollgruppe. Im Gegensatz dazu weist die Gruppe der Sportkletterer die höchsten Werte für die kortikale Knochendichte auf. Nur die Gruppe der Sportkletterer und der Allrounder unterscheidet sich für die kortikale Knochendichte signifikant von der KG. Keine signifikanten Unterschiede zeigen sich für die Dicke der Kortikalis und die Schenkelhalsbreite.

Tab. 7: Ultraschallparameter der Messung am Fersenbein.

Variable	Sportkletterer	Läufer	Allrounder	KG	p
Speed of Sound	1563 ± 34	1605 ± 35	1587 ± 35	1536 ± 34	***
Broadband US Attenuation	79.2 ± 17.2	100.2 ± 18.8	92.5 ± 16.6	67.9 ± 15.8	***
Quality of US Index	101.0 ± 21.1	128.1 ± 20.7	117.9 ± 20.4	86.8 ± 20.2	***

Auch für die Ultraschallparameter ergeben sich jeweils hochsignifikante Zwischengruppenunterschiede (Tab. 7, Abb. 4).

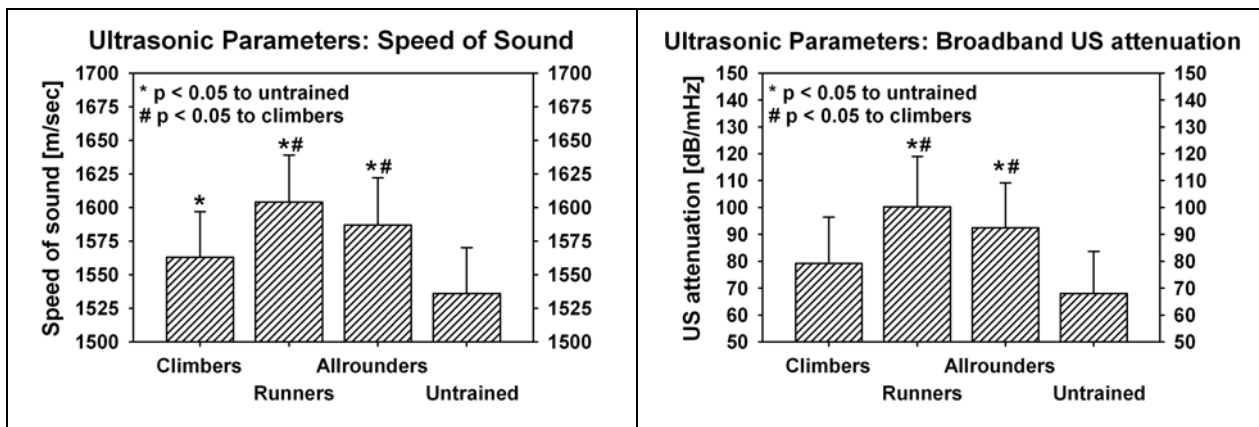


Abb. 4: Ultraschallparameter der unterschiedlichen Kollektive am Calcaneus

Wie zu erwarten erreichen die Läufer die höchsten Werte und unterscheiden sich für alle Parameter (SOS, BUA, QUI) signifikant von den Sportkletterern und der KG. Zwischen Allrounder und Kontrollgruppe ergeben sich ebenfalls signifikante Unterschiede für alle Ultraschall-Variablen, während die Sportkletterer lediglich ein, verglichen mit der KG, tendenziell höheres Ergebnis zeigen.

Zusammenhänge zwischen abhängigen und beeinflussenden Parametern

Bivariate Korrelation

Tab. 8: Zusammenhang (r) zwischen Knochenparametern, anthropometrischen Variablen, Trainings- und Ernährungsparametern.

Variable DXA	BMI	Körperfett (DXA)	Trainingsalter	Trainingsumfang	Energieaufnahme
BMD TB	.44**	---	---	.25*	.32*
BMD Arm	.53**	---	.25*	.27*	---
BMD BWS	.44**	---	.27*	.31**	---
BMD LWS	.29*	---	.30**	.28*	---
BMD Hüfte	.43**	---	---	.24*	---
BMD Beine	.32**	---	---	---	.39*

Variable QCT	BMI	Körperfett (DXA)	Trainingsalter	Trainingsumfang	Energieaufnahme
Tr. BMD LWS	.27*	.28*	---	---	---
Co. BMD LWS	.26*	---	.29*	.34**	---
Tiefe LWK	.40**	---	---	---	---
Breite LWK	.35**	---	---	---	---
BMD SH	---	---	--	.28*	---
Trab. BMD SH	---	---	---	---	---
Cort. BMD SH	---	---	.30*	.26*	---
Cort. Dicke SH	---	---	---	---	---
Breite SH	---	---	---	---	---

Variable Ultraschall	BMI	Körperfett (DXA)	Trainingsalter	Trainingsumfang	Energieaufnahme
SOS	---	-.29	---	.25*	---
BUA	---	---	---	---	---
QUI	---	-.26	---	.24	---

Tab. 6 zeigt den Zusammenhang von Knochenparametern und erklärenden Variablen nach bivariater Korrelation. Neben dem BMI hat das Körpergewicht und (etwas schwächer) das Lean-Body-Mass einen ähnlich hohen prädiktiven Stellenwert für die BMD der Gesamtkörper-Subanalysen und der volumetrischen LWS-Messung, während das Lebensalter keinen Zusammenhang mit den abhängigen Variablen zeigt. Trainingsalter und Trainingsumfang/Woche lassen bei Analyse des Gesamtkollektivs positive Zusammenhänge mit den DXA-Parametern (Ausnahme Beine) sowie kortikaler BMD der LWS und des Schenkelhalses erkennen. Die Parameter Trainingsalter und –umfang zeigen (auch innerhalb einer Subanalyse der Läufergruppe) keine relevante Beziehung zu BMI, Gewicht und Körperfett. Da uns eine zusammenfassende Analyse für diese beiden Trainingsparameter nur eingeschränkt gerechtfertigt erschien, erfolgte eine Analyse nach Sportlerkollektiven, die allerdings keine signifikanten Zusammenhänge aufweist. Bezogen auf Ernährungsparameter zeigte sich lediglich ein signifikanter Zusammenhang zwischen Gesamtenergieaufnahme (sowie Kohlehydrataufnahme) und TB-BMD bzw. der BMD der

Beine. Kein Zusammenhang konnte zwischen Kalzium- bzw. Vitamin-D-Aufnahme und Knochenparametern erfasst werden.

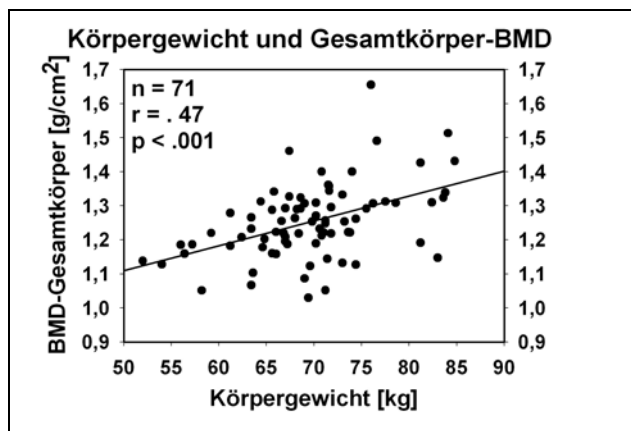


Abb. 5: Zusammenhang zwischen Körpergewicht und total Body BMD nach bivariater Korrelation.

Regressionsanalyse

Eine Regressionsanalyse mit den in Tab. 6 vorgestellten Variablen zeigt am Beispiel der Region Gesamtkörper die zentrale Rolle der BMI als Prädiktor der Knochendichte (Tab. 7).

Tab. 9: Regressionsanalyse mit der abhängigen Variablen Gesamtkörper-BMD

TB-BMD	r	Korrigierter r ²	Standardfehler	Signifikanz
BMI	.432	.166	.084	.002
Energieaufnahme	.513	.224	.081	.054
Trainingsumfang	.574	.078	.078	.062

Auch bei den weiteren in Tab. 7 aufgeführten Knochenparametern bleibt der durch bivariate Korrelation erfasste prädiktive Wert des BMI / Körpergewichtes auch nach Regressionsanalyse bestehen.

Diskussion

Ziel der vorliegenden Untersuchung war die Frage ob Athletenkollektive mit niedrigem Körpergewicht eine erhöhte Frakturgefährdung aufweisen.

Zur Klärung dieser Frage wurden u.a. 3 Athletenkollektive, Sportkletterer, Langstreckenläufer und Allroundsportler mit niedrigem Körpergewicht mit einer alters- und gewichtsgleichen nicht-trainierenden Kontrollgruppe verglichen.

Unsere Untersuchung weist mehrere Stärken auf: (1) Es wurden Sportlerkollektive mit niedrigem Körpergewicht / niedrigem BMI fokussiert, die bezüglich anthropometrischer Variablen mit Einfluss auf die Frakturfestigkeit des Knochens vergleichbar sind. (2) Im Gegensatz zu anderen cross-sektionalen Untersuchungen (1, 4, 5, 90) wurde eine Kontrollgruppe rekrutiert, die bezüglich Körpergewicht respektive BMI keine wesentlichen oder gar signifikanten Unterschiede zu den Athletenkollektiven aufweist. (3) Eine Vielzahl von Skelettregionen wurde mit unterschiedlichen Messtechniken (DXA, QCT, Ultraschall) untersucht. (4) Kovariate wie z. B.. Erkrankungen oder Medikation, genetische Disposition, Ernährung und Genussmittelexzess mit überwiegend systemischem Effekt auf den Knochen wurden abgefragt und ggf. ausgeschlossen.

Eine Schwäche der Untersuchung ist der Verzicht auf die Analyse von Laborparametern, die Hinweise auf systemische belastungsinduzierte Veränderungen hätte geben können. Allerdings weist die zwischen den Subgruppen vergleichbare Knochendichte des Schädels, als mechanisch nicht belastete Skelettregion darauf hin, dass systemische Effekte die Zwischengruppenunterschiede an unterschiedlichen ROIs nicht wesentlich erklären.

Da eine Erfassung von Frakturen wegen der geringen Fallzahl nicht möglich ist, wurden Knochenparameter, wie integrierte, trabekuläre oder kortikale BMD an unterschiedlichen Skelettregionen, Knochendimensionen an LWS und Schenkelhals sowie die Kortikalsdicke am Schenkelhals, erfasst, um Rückschlüsse auf die Frakturfestigkeit des Knochens zu gewinnen. Um dem Leser eine Einschätzung der Transferierbarkeit dieser Substitutparameter auf die Frakturgefährdung zu gewähren wird, im Weiteren der Zusammenhang zwischen beiden Parametern näher beleuchtet.

Unter den die Frakturfestigkeit des Knochens erklärenden Parameter ist derzeit der Zusammenhang zwischen Knochenmasse oder -dichte und der Frakturfestigkeit am besten untersucht. Der Knochenmineralgehalt, ermittelt über QCT, erklärt nach Angaben unterschiedlicher Autoren die Knochenfestigkeit (Kompression) bis zu 90% (LWS: (49, 55, 68, 97, 100), Femur: (23)). Die gemeinsame Varianz von Knochenmineralgehalt/-dichte, nachgewiesen durch Photonenabsorptiometrie und der Frakturstärke bei Kompression, liegt mit $r^2 = .48 - .94$ (33, 65, 66, 100) in einem vergleichbaren Bereich.

Diskutiert man zunächst den Einfluss der gewichtsbezogenen Kovariaten, so ist ein zentrales Ergebnis, dass sich der BMI und in ähnlich hohem Masse das Körpergewicht trotz relativ geringer Varianz innerhalb des Gesamtkollektivs ($17.9 - 22.9 \text{ kg/m}^2$) als signifikanter Prädiktor der integrierten (TB-BMD) und lokalen BMD (Arme, BWS, LWS, Hüfte, Beine), der

volumetrischen Knochendichte der LWS sowie Dimension der LWK 1-3 erweist. Auch nach Miteinbeziehung anderer unabhängiger Variablen (Tab. 7) bleibt dieser Zusammenhang für alle in Tab. 6 ausgewiesenen Körperregionen bestehen.

Dass Gewicht und BMI in deutlichem positiven Zusammenhang mit Knochenparametern, insbesondere axial belasteter Körperregionen, stehen, zeigen eine Vielzahl von Untersuchungen, unabhängig ob Sportler(innen) (14, 27, 28, 61, 73, 80, 90), junge (27, 48) oder alte Menschen (19, 41, 53, 94) untersucht werden.

Auch das Trainingsalter („sport years“) und der Trainingsumfang („training hours per week“) werden von einigen Untersuchungen in positiven Zusammenhang mit der Knochendichte gebracht (21, 69). Im Gegensatz dazu berichten andere Autoren zumindest bei Läufern (5, 37, 63) und Läuferinnen (9, 13) von einem negativen Zusammenhang zwischen Trainingsumfang und Knochendichte. Gemäß unserer Daten (Subanalyse der Läufergruppe) ist eine derartig pauschale Einschätzung jedoch nicht zulässig, da der Zusammenhang von Trainingsumfang und Knochenparameter je Knochenregion positiv oder negativ sein kann, wobei sich in unserer Berechnung keine signifikanten Zusammenhänge nachweisen ließen.

Eine 5-tägige Ernährungsanalyse zeigte naturgemäß signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen mit extrem unterschiedlichem sportartspezifischen Anforderungsprofil oder der untrainierten KG. Dem unbenommen liegen die Werte aller Sportlergruppen im (z.T. unteren) Bereich der Ergebnisse von vergleichbaren Untersuchungen (Übersicht in (4, 102, 103)). Bemerkenswert erscheint jedoch, dass die Gruppe der Sportkletterer, bei einem (effektiven) Trainingsumfang von ca. 5 h/Woche eine ähnliche Energieaufnahme zeigen wie die nicht-trainierende Kontrollgruppe. Dabei liegt unsere Kontrollgruppe durchaus im Rahmen der Energieaufnahme entsprechend leichtgewichtiger Kontrollkollektive der Literatur (4, 5, 10, 83). Auch die Gruppe der Sportkletterer liegt im (unteren) Bereich der Energieaufnahme aus anderen, nicht ausdauerorientierten Sportarten (Übersicht in (102)), so dass in allen Sportlerkollektiven wohl von einer ausgeglichenen Energiebilanz ausgegangen werden kann. Zusammenfassend ist das Ernährungsverhalten innerhalb unseres Sportklettererkollektivs somit moderater als bei anderen Sportarten, bei denen Körpergewicht oder BMI eine leistungslimitierende Rolle spielt. So berichten Rankinen et al. (83), die die Energieaufnahme innerhalb des Finnischen Skisprungkaders analysieren, eine Energieaufnahme von lediglich 7600 kJ innerhalb Ihres Kollektivs (n=21, BMI 19.8 kg/m²).

Die Verteilung der Makronährstoffe (Eiweiß: 13-14.5%, Fett: 25-31%, KH: 52-61%, Alkohol: 0.6-3.5%) unterscheidet sich zwischen den Gruppen n.s., wobei die KG die vergleichsweise ungünstigste Konstellation zeigt. Vergleicht man die Nährstoffverteilung der Sportlerkollektive mit vorliegenden Daten der Literatur (Übersicht in (102, 103)), so ist das Ernährungsverhalten mit Ausnahme der Alkoholaufnahme als vergleichsweise gut einzuschätzen (56). In Abhängigkeit von der Nahrungsgesamtaufnahme zeigen sich ebenfalls signifikante Zwischengruppenunterschiede bezogen auf Mineralstoffe und Spurenelemente. Fokussiert man in diesem Zusammenhang auf die Substanzen, die in engem Zusammenhang mit dem Knochenmetabolismus gesehen werden, so liegt die Aufnahme von Kalzium, Magnesium und Phosphat in allen Gruppen im empfohlenen Bereich (12, 20, 75). Im Gegensatz dazu erreicht keine der Subgruppen die von der DGE oder vom NIH geforderte Aufnahme von Vit-D (5 µg/d). Betrachtet man den Einfluss von

Ernährungsparameter auf den Knochen, so zeigen sich bezogen auf das Gesamtkollektiv nur zwei signifikante Beziehungen. Die Gesamtenergieaufnahme korreliert schwach (s.o.) mit der integrierten Knochendichte des Gesamtkörpers und der Beine. Diese Beziehung bleibt auch nach der Regressionsanalyse bestehen. Vorliegende Untersuchungen mit Sportlerkollektiven konnten diesen Zusammenhang indes nicht bestätigen (62, 74).

Inwieweit die mechanische Belastung der Sportart auf Knochenparameter unterschiedlicher Körperregionen Einfluss nimmt (50, 51), wurde über eine vergleichende Analyse der Sportarten erfasst. Wie bereits erwähnt, liegt insbesondere für Frauen, aber auch für Männer eine Anzahl von vergleichenden Untersuchungen vor (Tab. 10). Insbesondere Querschnittsstudien mit (Hoch)Leistungssportlern erlauben wegen des bekannten sportartspezifischen Belastungsprofils eine sehr gute Einschätzung knochenanaboler Reize (54). Es lassen sich, bezogen auf Belastungsinhalte, somit die folgenden Aussagen ableiten:

- (1) Trainingsinhalte mit axialer Belastung, die höher als die Gravitation ist (Laufen, Springen), zeigen signifikant höhere Effekte auf die korrespondierende Knochendichte als Sportarten ohne wesentliche axiale Komponente (Schwimmen, Radfahren).
- (2) Trainingsinhalte, die hohe muskuläre Spannungsspitzen aufweisen, sind mit einer deutlich erhöhten Knochendichte der belasteten Regionen assoziiert.
- (3) Trainingsinhalte mit variabler Beanspruchung des Knochens (Sportspiele) führen zu deutlicheren Steigerungen der Knochendichte als einseitige Belastungen (Laufen)
- (4) Intensitätsbetonte Varianten von Sportarten (Sprint) zeigen höhere Effekte als umfangsorientierte Varianten (Mittel-/Langstreckenlauf).
- (5) Bei umfangsorientierten Trainingsbelastungen mit entsprechend negativem Einfluss auf die hormonelle Achse wird der positive Einfluss mechanischer Belastung abgeschwächt.

Neben dem Wissen, welche Belastungsinhalte positiven Einfluss auf den Knochen aufweisen, muss zur Einschätzung des osteogenetischen Effektes einer Sportart bekannt sein, welche Ausprägung der Trainingsvariablen und Belastungsnormativa positive und welche negative Effekte zeigt. Ohne nun detailliert auf die komplexen Zusammenhänge einzugehen (Übersicht in (54)) ist eine hohe Reizintensität im Sinne einer hohen (strain magnitude) und raschen (strain rate) Verformung des Knochens besonders geeignet, knochenanabole Prozesse auszulösen (43, 58, 72, 86). Die Reizhöhe zur Auslösung adaptativer Prozesse liegt bei Wirbeltieren im Bereich von ca. 1000-1500 μE (Kompression der Struktur um 0.1 – 0.15%), was ungefähr dem Übergang zwischen Gehen und Laufen zuzuordnen ist.

Der Reizhäufigkeit wird im Allgemeinen eine etwas geringere Bedeutung beigemessen. Lediglich bei grenzwertiger - unterschwelliger Belastungsintensität vermag ein höherer Reizumfang die niedrige Reizintensität zu kompensieren (16, 82, 87).

Langanhaltende Belastung vermindert die Mechanosensitivität des Knochens, während bei einer Aufteilung des Belastungsregimes in Blöcken mit intermittierenden Pausen die Sensitivität erhalten bleibt und eine positive Auslenkung der Knochenfestigkeit beobachtet werden kann (8, 89).

Tab. 10: Relativer Einfluss der Sportart auf die Knochendichte bei unterschiedlichen Disziplinen

Quelle	Alter / Anzahl der Probanden / Geschlecht	Skelettregion	Relativer Stellenwert der Sportart hinsichtlich der Knochendichte	Bemerkung
Andreoli 2000 (1)	TG: 22/50/m KG: 23/12/m	TB Beine Arme	Judo > Karate > Wasserball > KG Judo > Wasserball > Karate > KG	Elitesportler, keine Korrektur für Körpergewicht, Körperfett (trotz signifikanter Unterschiede).
Benell 1997 (4)	TG: 20/58/m KG: 20/27/m	TB LWS Femur	Sprinter/Springer/Mehrkr. > Mittel-/Langstrecke = KG Sprinter/Springer/Mehrkr. > Mittel-/Langstrecke ≥ KG Sprinter/Springer/Mehrkr. ≥ Mittel-/Langstrecke > KG	Elite und Subelitesportler, korrigiert für Gewicht und Größe, kein Unterschied für Total Body (TB).
Chae 1994 (11)	TG: 23/138/m KG: 25/25/m	LWS SH	Kraft > Spiele > Allround > Lauf ≥ KG ≥ Rad ≥ Triathl. Spiele = Kraft > Allround > Lauf > Triathl. > Rad ≥ KG	Kraftsport = Ringen und Judo, Allrounder = Sportstudenten, Gruppen < n = 10 nicht aufgeführt, keine Daten zur hormonellen Situation.
Creighton 2001 (15)	TG: 20/32/w KG: 23/7/w	LWS SH	High-impact (Basketball) > medium Impact (Fußball, Mittelstrecke) > non impact (Schwimmen) > KG; High-impact > medium Impact > non impact ≥ KG	Elitesportler, keine Zyklusirregularitäten (Amenorrhoe/Oligomenorrhoe); geringe Stichprobe, "gematcht" (Größe, Gewicht, Kalziumaufnahme).
Dinc 1996 (21)	TG: 21/51/m KG: 21/45/m	LWS (QCT)	Trabekulär: Gewichtheber > Ringer = Fußball > KG Kortikal: Gewichtheber > Ringer > Fußball > KG	Niveau der Athleten n.g. (Umfang 11-14 h/Wo.). Personen mit „medikamentöser Therapie“ ausgeschlossen, gematchte KG (Alter, Gewicht)
Duncan 2002 (22)	TG: 17/10/w KG: 17/10/w	LWS SH, TB	Laufen > KG > Radfahrer > Schwimmer > Triathlon Laufen > Triathlon > Radfahrer > KG > Schwimmer	Elite und Subelitesportler, korrigiert für fettfreie Körpermaße, Menarchealter, Trainingsjahre, keine Zyklusirregularitäten.
Etherington 1996 (24)	TG: 40-65/83/w KG: 40-65/585/w	LWS SH	Tennis > Laufen > aktive KG > wenig aktive KG > Inaktive Tennis > Laufen > aktive KG > wenig aktive KG > Inaktive	Ex-Elitesportler, keine Trennung von noch aktiven und inaktiven Läufern (!), aktive KG: > 1 h/Sport (Weight-bearing)/Woche inaktive KG: <15 min/Sport/Wo.
Fehling 1995 (25)	TG: 20/28/w KG: 21/17/w	LWS SH, TB	Turnen > Volleyball > Schwimmen = KG Volleyball > Turnen > Schwimmen > KG	Subelitesportler, Zyklusunregelmäßigkeiten nur bei Turnerinnen (10 von 13), korrigiert auf Gewicht und Größe, insgesamt kleine Stichprobe.
Heinonen 1993 (35)	TG: 24/105/w KG: 23/25/w	LWS SH Radius	Gewichtheben > Orientierungslauf ≥ Skilanglauf ≥ Radfahrer Gewichtheben > Orientierungslauf > Skilanglauf > Radfahrer Gewichtheben > Radfahrer > Orientierungslauf > Skilanglauf	Elitesportler, korrigiert auf Gewicht und Größe, (je n = 1/Gruppe mit Amenorrhoe), keine Daten für KG.
Heinonen 1995 (34)	TG: 25/84/w KG: 24/25/w	LWS Ward Radius	Squash > Speed Skater > Aerobic > Allrounder > KG Squash > Aerobic > Skater > Allrounder > KG Squash > KG > Allrounder > Skater > Aerobic	Elitesportler, KG trainierte 2mal Woche (!), Allrounder trainierten 5mal Wo., Skater, Aerobic und Squash trainierten ca. 6-7 mal Wo., korrigiert auf Gewicht und Größe, keine Zyklusirregularitäten.
Heinrich 1990 (36)	TG: 25/40/w KG: 25/18/w	LWS SH	Bodybuilding > Schwimmen > Laufen > KG Bodybuilding > Laufen > Schwimmen > KG	Subelitesportler, gute Vergleichbarkeit TG/KG, keine Zyklusirregularitäten, Läufer: überwiegend Freizeidläufer (11 von 16).

Lee 1995 (60)	TG: 19/34/w	KG: 20/17/w 22/11/w	LWS SH	Basketb. >Volleyb. > Fußb. > Schwimmer = KG (mod.) = KG Basketb. >Volleyb. > Fußb. > KG (mod.) > KG > Schwimmer	Elite und Subelitesportler, geringe Stichprobe/Gruppe, BMD, korrigiert auf Größe und Gewicht, KG (mod.) = moderat trainierte KG, KG = untrainierte KG.
Maimoun 2003 (64)	TG: 26/38/m	KG: 28/10/m	TB LWS SH	Triathleten ≥ Radfahrer ≥ Schwimmer ≥ KG Radfahrer ≥ Triathleten > KG ≥ Schwimmer Triathleten > Radfahrer ≥ Schwimmer > KG	Unterschiedliche Niveau zwischen den Sportlergruppen, 10-15 h/Training/Wo., sign. höheres %Fett in KG
Morel 2001 (70)	TG: 18-40/ 704/m		TB LWS	Sportspiele>Kampfsport/Body-Building>WB-Allrounder> Rudern/Triathlon/Laufen/Radfahren>Klettern>Schwimmen Rugby>Spilsport/Triathlon(!)>Body-Building>Fußball/WB- Allrounder/Kampfsport>Rudern>Schwimmen>Klettern/Lauf	Subelite und Freizeitsportler, korrigiert auf Alter, Größe, Gewicht, hohe Varianz Schädel-BMD (!), keine Kontrollgruppe.
Nilsson 1971 (76)	TG: 22/64/m	KG: 23/39/m	Distaler Femur	Gewichtheber > Werfer > Läufer > Fußballer > Schwimmer > KG	Elitesportler, Teile der KG (n=24) sportlich aktiv, Untersuchung mit SPA.
Robinson 1995 (85)	TG: 20/41/w	KG: 20/19/w	TB, LWS SH	Turnen > Laufen ≥ KG	Elite und Subelitesportler, 30% der Läufer, 47% der Turner mit Zyklusirregularitäten (0% in KG), korrigiert auf Gewicht.
Steward 2000 (90)	TG: 29/39/m	KG: 27/23/m	TB LWS Beine Arme	Läufer = Duathleten > KG > Radfahrer Duathleten > Läufer > KG > Radfahrer Läufer > Duathleten > KG > Radfahrer Duathleten > KG ≥ Läufer > Radfahrer	Subelitesportler (regionales Niveau), 8-10 h Training/Wo., Daten korrigiert auf Gewicht (KG >* als Sportlergruppen)
Taaffe 1995 (92)	TG: 19/39/w	KG: 19/19/w	LWS SH TB	Turnen > KG =Schwimmen Turnen > KG > Schwimmen Turnen > KG > Schwimmen	Elitesportler, korrigiert auf Gewicht, keine Zyklusirregularitäten.

Die von uns erfassten Daten der Athleten lassen sich sehr gut in die vorliegende Literatur einordnen. Vor einer Diskussion der Sportlerkollektive soll aber zunächst eine Einschätzung der Werte der Kontrollgruppe erfolgen, um eine vergleichende Wertung der Knochenparameter der Athletengruppen sicherzustellen zu können.

Die nicht- bzw. sehr wenig trainierende KG zeigt bezogen auf die ausgewählten Knochenparameter mit wenigen Ausnahmen an allen Skelettregionen die ungünstigsten Verhältnisse. Vergleicht man die Knochendichtewerte (Gesamtkörper) der KG mit normativen Daten des Geräteherstellers, so zeigt sich aber, dass die Kontrollgruppe im Bereich (ca. -2%) eines 20-30-jährigen US-amerikanischen Referenzkollektivs (39, 42) liegt.

Die über QCT erfassten trabekulären Knochendichtewerte an der LWS liegen jedoch eindeutig niedriger (ca. 10-15%) als die in der Literatur für gleichaltrige Personen zitierten (Übersicht in (45)). Im Gegensatz dazu zeigt sich für die kortikale BMD kein wesentlicher Unterschied zwischen unserem leichtgewichtigen Kollektiv und Referenzkollektiven der vorliegenden Literatur (45). Keine Vergleichswerte konnten für die QCT-Messung am Schenkelhals gefunden werden.

Auch bezogen auf die Ultraschallparameter liegen die Werte der Kontrollgruppe deutlich (6-8%) unter den Referenzwerten gleichaltriger Kollektive (40).

Neben einer Referenzgruppe mit vergleichsweise geringer und unterschwelliger mechanischer Belastung (KG) wurde mit Rekrutierung der Allroundergruppe versucht, auch ein - was mechanische Belastung angeht - „ideales“ Referenzkollektiv zu etablieren (86). In der Tat zeigen die Allrounder, also die Gruppe der umfassend trainierten Sportstudenten, die überwiegend aus Spielsport mit Belastung der oberen Extremitäten bzw. Rückschlagspielen „stammen“, an fast allen Körperregionen die höchsten Knochendichte (vgl. hierzu Tab. 10). Auch im Vergleich zu den besonders beanspruchten Körperregionen der „Spezialisten“ gibt es keine wesentlichen Differenzen. Vergleicht man die oben aufgeführten Ratschläge für Belastungsinhalte mit knochenanabolem Stellenwert mit der Trainingspraxis dieser Allroundergruppe, so zeigt sich eine sehr hohe Übereinstimmung. Das Sporttreiben dieser Gruppe enthält sowohl axiale Belastung mit hoher Reizhöhe und -rate über bspw. Sprünge als auch Trainingsinhalte mit hohen muskulären Spannungsspitzen (z. B. Muskeltraining, Kunstturnen). Zudem steht diese Gruppe für eine variable Beanspruchung der Knochen an allen Körperregionen über die Vielzahl der ausgeübten Sportarten. Obwohl der Trainingsumfang der Allrounder den der Läufer leicht übertrifft, sind bei den Allroundern wegen des Wechsels unterschiedlicher Sportarten mit unterschiedlichem Belastungsprofils endokrine Störungen mit negativem Effekt auf den Knochenmetabolismus (95) nicht zu erwarten.

Im Gegensatz zur Allroundergruppe zeigt die spezialisierte Gruppe der Läufer- und Sportkletterer in Abhängigkeit von der sportartspezifischen Beanspruchung weniger einheitliche Daten. Wie unspezifisch eine isolierte Betrachtung der Gesamtkörperknochendichte in diesem Zusammenhang ist, macht ein Vergleich der BMD-ROIs zwischen Läufer- und Kontrollgruppe deutlich. So zeigen sich bezogen auf die Gesamtkörperknochendichte durchaus signifikanter höhere Werte innerhalb der Läufergruppe. Analysiert man jedoch die unterschiedlichen ROIs, kann ein signifikanter

Unterschied nur für die mechanisch am stärksten belasteten Regionen (Beine, Hüfte) (6, 35, 36) erfasst werden. Konsequenterweise nähert sich die BMD in kranialer Richtung, also in Richtung abnehmender mechanischer Belastung, immer mehr den Werten der Kontrollgruppe an. Trotzdem liegt die Knochendichte auch dieser Regionen mit Ausnahme der Schädel-BMD immer tendenziell über derjenigen der untrainierten KG. Anhand dieser Daten kann also weder ein negativ systemischer Effekt noch Umverteilungsmechanismen (sogenannte „Steal-Effekte“) nachgewiesen werden.

Trotz vergleichbarer Gesamtkörper-BMD unterscheiden sich die Sportkletterer extrem von der regionalen Knochendichteverteilung der Läufer. Bei signifikant niedrigerer integrierter Knochendichte der unteren Extremitäten und vergleichbarer BMD der Hüfte zeigen sich Richtung kranial signifikante Unterschiede zugunsten der Sportkletterer.

Eine Analyse der QCT-Werte an LWS und Schenkelhals liefert weitergehende Einblicke in die Mechanismen der Anpassung an unterschiedliche Belastungsreize. Während die trabekuläre Knochendichte innerhalb der Läufer- und Sportkletterergruppe vergleichbar jeweils signifikant über der Kontrollgruppe liegt (vgl. hierzu tierexperimentelle Ergebnisse von (71, 77-79, 88, 101)), ist die kortikale BMD der Sportkletterer signifikant höher als diejenige der Läufer und der KG liegt. Es scheint somit, dass die durch die Laufbewegung erzeugte häufige, jedoch abgeschwächte und vergleichsweise niedrigintensive Stoßwirkung ähnlichen Effekt auf die trabekuläre BMD zeigt wie die durch Muskelzug initiierte axiale Belastung dieser Region. Inwieweit systemische Variablen (hormonelle Dysregulation durch hohen Trainingsumfang) insbesondere bei der Läufergruppe das Ergebnis beeinflussen, kann von uns nicht eingeschätzt werden. Einige Autoren (17, 31, 64, 98) stellen bei Ausdauersportler (Radfahrer, Triathleten) z.T. signifikant niedrigere Testosteron und freie Androgen Indices verglichen mit untrainierten Kontrollpersonen fest. Ein Vergleich der Knochendichtewerte an LWS und Femur (DXA) mit der besagten KG (64) zeigt indes zumindest keine erniedrigten Werte seitens der Ausdauersportler, was allerdings eine hormonelle Einflussnahme nicht ausschließt.

Insgesamt widerlegt unser Ergebnis die Daten einer ebenfalls mit QCT arbeitenden Untersuchung (5), die eine im Vergleich zur KG um ca. 10% ($p < 0.05$) niedrige trabekuläre BMD bei einem vergleichbaren Läuferkollektiv erfasst.

Interessanterweise zeigt sich bei der Gruppe der Läufer kein positiver Effekt an der Kortikalis der LWK 1-3. D.h., sowohl die Zugbelastung durch den M. psoas, der ventral an den entsprechenden Wirbelkörpern ansetzt, wie auch die komplexen Stabilisierungsmechanismen der Rückenmuskulatur bei der Laufbewegung haben keinen positiven Einfluss auf die kortikale BMD. Somit hat eine zwar häufige, jedoch entsprechend niedrigintensive Zugbelastung im Gegensatz zu einer ähnlich strukturierten Stossbelastung keine knochenanabolen Effekte. Es muss von uns jedoch eingestanden werden, dass aufgrund der geringen Schichtdicken dieses Kompartiments nicht zweifelsfrei festgestellt werden kann, ob eine Erhöhung der Knochendichte oder der Schichtdicke stattgefunden hat. Nun, beide Mechanismen tragen zu einer Erhöhung der mechanischen Festigkeit des Wirbelkörpers bei.

Fokussiert man die Knochenkompartimente der Schenkelhalsmessung, so zeigt die Läufergruppe verglichen mit der Gruppe der Sportkletterer bei signifikant niedrigerer

kortikaler Knochendichte eine signifikant höhere trabekuläre BMD. Während die höhere trabekuläre BMD in Zusammenhang mit der an dieser Skelettregion zusammenfassend höheren mechanischen (Druck-)Belastung steht, ist nicht ganz klar warum die die kortikale Knochendichte der Kletterer diejenige der Läufer signifikant übersteigt. Sicherlich kommt es beim Sportklettern zu komplexen Beanspruchungen dieser Region durch extreme Flexion und ein sehr nahe am Körperschwerpunkt gelegenes Hochführen (Aufhocken) und Eindrehen („Ägypter“) des Oberschenkels. Ob diese Beanspruchung jedoch die signifikant höhere kortikale Knochendichte erklärt, ist schwierig einzuschätzen. Obwohl es an dieser Stelle aufgrund unterschiedlicher Beanspruchungsarten schwierig ist tierexperimentelle Daten in diese Diskussion einzubringen, zeigen Notomi et al. (78, 79) nach mehrmonatigem „Klettertraining“ bei Ratten ebenfalls signifikante Zuwächse der femoralen Kortikalis, während Lauftraining nur mit moderaten Veränderungen an dieser Stelle verbunden war (71).

Bemerkenswert ist zusätzlich, dass sich die unterschiedlichen Belastungsformen nicht in einer Erhöhung der Knochendimension (Tiefe, Breite) an den untersuchten Skelettregionen manifestieren. Nach Meinung einiger Autoren (2, 29, 30) existieren in Abhängigkeit von der skeletalen Reife unterschiedliche Kompensationsmechanismen des Knochens auf mechanische Belastung. So meinen die Autoren, dass mechanische Belastung, die auf einen Knochen trifft, der nicht mehr ‚bezogen auf seine Dimension, „wachsen“ kann (also seine Makroarchitektur ausreichend anpassen kann) eine Verbesserung der volumetrischen Dichte auslöst, um den vorliegenden Belastungsgegebenheiten gerecht zu werden. Betrachtet man das Trainingsalter der Athleten in Tab. 1, so zeigt sich, dass die Mehrzahl der Sportkletterer und Allrounder das Training vor der skeletalen Reife an LWS und Femur (ca.16-17 Jahre bei Männern, (93)) begannen. Trotzdem zeigen sich keine signifikanten Zwischengruppenunterschiede zu den Gruppen ohne Sporttreiben oder späterem Beginn Ihrer Sportkarriere.

Das Ergebnis der Ultraschallmessung am Kalkaneus hat hingegen das erwartete Ergebnis. Die Gruppe der Läufer, die die höchsten Ergebnisse aufweist, zeigt jeweils signifikant höhere Werte für die Schallgeschwindigkeit (SOS), die Dämpfung (BUA) und den kombinierten Index (QUI) als Sportkletterer oder Kontrollpersonen. Sportkletterer zeigen für die Schallgeschwindigkeit signifikant, für Dämpfung und Index grenzwertig signifikant höhere Werte als die KG, also im Bereich altersgemäßer Daten ohne Gewichts- oder BMI-Limitierung. Inwieweit dieser Unterschied sportartspezifisch ist, bleibt fraglich. Da die sportartspezifische Belastung des Kletterns, unserer Einschätzung, nach keinen Einfluss auf die Knochenparameter an der Ferse aufweisen kann, steht möglicherweise die vergleichsweise selten vorkommende Stoßwirkung (sog. Strain-error (59)) bei der Landung nach der Kletterbelastung bzw. insbesondere beim Bouldern (z.T. wird abgesprungen) in Verbindung mit dieser Form der Adaptation.

Zusammenfassend kommen wir somit zu der folgenden Einschätzung:

(1) Trotz Leichtgewichts erscheinen sowohl die Energieaufnahme, die prozentuale Verteilung der Makronährstoffe wie auch von Mineralien mit Einfluss auf den Knochenmetabolismus innerhalb der Sportlergruppen als adäquat und wenig auffällig.

(2) Die sportartspezifische Belastung zeigt keinen signifikanten Einfluss auf Knochendimensionen oder kortikale Schichtdicken an nicht unmittelbar belasteten Skelettregionen.

(3) Bezogen auf die von uns erfassten, unterschiedlichen Knochenparameter kann bei den Sportlergruppen an keiner Skelettregion von einem erhöhten Risiko für Frakturen ausgegangen werden. Im Gegenteil, im Vergleich zu altersgleichen Personen mit ähnlichem BMI sind die entsprechenden Knochendichtewerte mit einer Ausnahme (kortikale BMD-LWS der Läufer), die aber vergleichsweise wenig zur Frakturprädiktion beiträgt, deutlich oder gar signifikant höher. Somit kann entschieden werden, dass für Läufer oder Sportkletterer als Kollektiv von keiner erhöhten Frakturgefährdung auszugehen ist.

(4) Trotz vergleichsweise hoher Varianz bezogen auf BMI oder Gewicht zeigen sich beide Parameter als signifikante Prädiktoren der Knochendichte an unterschiedlichen Körperregionen. D.h. trotz des Einflusses mechanischer Belastung wird der negative Effekt niedrigen Körpergewichtes/BMI nicht eliminiert. So stellt sich weiterhin die Frage, ob einzelne Sportler in Disziplinen mit suboptimalem mechanischen Einfluss auf den Knochen und/oder sehr niedrigem Körpergewicht trotz erhöhter mechanischer Belastung zumindest an mechanisch weniger belasteten Regionen in einem frakturgefährdeten Bereich liegen.

Literatur

1. Andreoli, A., M. Monteleone, M. Van Loan, L. Promenzio, U. Tarantino, and A. De Lorenzo. Effects of different sports on bone density and muscle mass in highly trained athletes. *Med Sci Sports Exerc.* 33:507-511. 2001.
2. Ashizawa, N., K. Nonaka, S. Michikami, T. Mizuki, H. Amagai, K. Tokuyama, and M. Suzuki. Tomographical description of tennis-loaded radius: reciprocal relation between bone size and volumetric BMD. *J Appl Physiol.* 86:1347-1351. 1999.
3. Baker, E. R. Menstrual dysfunction and hormonal status in athletic women: a review. *Fertil Steril.* 36:691-696. 1981.
4. Bennell, K. L., S. A. Malcolm, K. M. Khan, S. A. Thomas, S. J. Reid, P. D. Brukner, P. R. Ebeling, and J. D. Wark. Bone mass and bone turnover in power athletes, endurance athletes, and controls: a 12-month longitudinal study. *Bone.* 20:477-484. 1997.
5. Bilanin, J. E., M. S. Blanchard, and E. Russek-Cohen. Lower vertebral bone density in male long distance runners. *Med Sci Sports Exerc.* 21:66-70. 1989.
6. Brahm, H., H. Strom, K. Piehl-Aulin, H. Mallmin, and S. Ljunghall. Bone metabolism in endurance trained athletes: a comparison to population-based controls based on DXA, SXA, quantitative ultrasound, and biochemical markers. *Calcif Tissue Int.* 61:448-454. 1997.
7. Brosius, F. *SPSS 8.0. Professionelle Statistik unter Windows.* Bonn: MITP-Verlag, 1998
8. Burr, D. B., A. G. Robling, and C. H. Turner. Effects of biomechanical stress on bones in animals. *Bone.* 30:781-786. 2002.
9. Burrows, M., A. M. Nevill, S. Bird, and D. Simpson. Physiological factors associated with low bone mineral density in female endurance runners. *Br J Sports Med.* 37:67-71. 2003.
10. Calbet, J. A., P. D. Herrera, and L. Z. Rodriguez. High bone mineral density in male elite professional volleyballplayers. *Osteoporos Int.* 10:468-474. 1999.
11. Chae, A. E., P. Platen, R. Antz, J. Kühlmorgen, B. Allolio, H. Lehmann, S. Schuhmann, and J. Kannenberg. Knochendichte bei Leistungssportler/innen aus verschiedenen Sportarten im Vergleich zu Sportstudent/innen und untrainierten Kontrollpersonen. In *Regulations- und Repairmechanismen.* Paderborn, Germany: Springer, 1994.
12. Clarkson, P. M. and E. M. Hayes. Exercise and mineral status of athletes: calcium, magnesium, phosphorus, and iron. *Med Sci Sports Exerc.* 27:831-843. 1995.
13. Cobb, K. L., L. K. Bachrach, G. Greendale, R. Marcus, R. M. Neer, J. Nieves, M. F. Sowers, B. W. Brown, Jr., G. Gopalakrishnan, C. Luetters, H. K. Tanner, B. Ward, and J. L. Kelsey. Disordered eating, menstrual irregularity, and bone mineral density in female runners. *Med Sci Sports Exerc.* 35:711-719. 2003.
14. Conroy, B. P., W. J. Kraemer, C. M. Maresh, S. J. Fleck, M. H. Stone, A. C. Fry, P. D. Miller, and G. P. Dalsky. Bone mineral density in elite junior Olympic weightlifters. *Med Sci Sports Exerc.* 25:1103-1109. 1993.
15. Creighton, D. L., A. L. Morgan, D. Boardley, and P. G. Brolinson. Weight bearing exercise and markers of bone turnover in female athletes. *J Appl Physiol.* 90:565-570. 2001.

16. Cullen, D. M., R. T. Smith, and M. P. Akhter. Bone-loading response varies with strain magnitude and cycle number. *J Appl Physiol.* 91:1971-1976. 2001.
17. Cumming, D. C., G. D. Wheeler, and E. M. McColl. The effects of exercise on reproductive function in men. *Sports Med.* 7:1-17. 1989.
18. Dale, E., D. H. Gerlach, and A. L. Wilhite. Menstrual dysfunction in distance runners. *Obstet Gynecol.* 54:47-53. 1979.
19. Dargent-Molina, P., F. Poitiers, and G. Breart. In elderly women weight is the best predictor of a very low bone mineral density: evidence from the EPIDOS-study. *Osteoporos Int.* 11:881-888. 2000.
20. DGE. (*Deutsche Gesellschaft für Ernährung*): *Empfehlung für die Nährstoffzufuhr.* Frankfurt, 1991
21. Dinc, H., A. Demirci, M. Y. Sadikoglu, E. Tuncel, and H. Yavuz. Quantitative Computed tomography for measuring bone mineral density in athletes. *Calcif Tissue Int.* 58:398-401. 1996.
22. Duncan, D. S., C. J. Blimkie, C. T. Cowell, S. T. Burke, E. N. Briody, and R. Howman-Giles. Bone mineral density in adolescent female athletes: relationship to exercise type and muscle strength. *Med Sci Sports Exerc.* 34:286-294. 2002.
23. Esses, S. I., J. C. Lotz, and W. C. Hayes. Biomechanical properties of the proximal femur determined in vitro by single-energy quantitative computed tomography. *J Bone Miner Res.* 4:715-722. 1989.
24. Etherington, J., P. A. Harris, D. Nandra, D. J. Hart, R. L. Wolman, D. V. Doyle, and T. D. Spector. The effect of weight-bearing exercise on bone mineral density: a study of female ex-elite athletes and the general population. *J Bone Miner Res.* 11:1333-1338. 1996.
25. Fehling, P. C., L. Alekel, J. Clasey, A. Rector, and R. J. Stillman. A comparison of bone mineral densities among female athletes in impact loading and active loading sports. *Bone.* 17:205-210. 1995.
26. Felson, D. T., Y. Zhang, M. T. Hannan, and J. J. Anderson. Effects of weight and body mass index on bone mineral density in men and women: The Framingham Study. *J Bone Miner Res.* 8:567. 1993.
27. Flodgren, G., R. Hedelin, and K. Hendriksson-Larsen. Bone mineral density in flatwater sprint kayakers. *Calcif Tissue Int.* 64:374-379. 1999.
28. Goodpaster, B. H., D. L. Costill, S. W. Trappe, and G. M. Hughes. The relationship of sustained exercise training and bone mineral density in aging male runners. *Scand J Med Sci Sports.* 6:216-221. 1996.
29. Haapasalo, H., P. Kannus, H. Sievanen, M. Pasanen, K. Uusi-Rasi, A. Heinonen, P. Oja, and I. Vuori. Effect of long-term unilateral activity on bone mineral density of female junior tennis players. *J Bone Miner Res.* 13:310-319. 1998.
30. Haapasalo, H., S. Kontulainen, H. Sievanen, P. Kannus, M. Jarvinen, and I. Vuori. Exercise-induced bone gain is due to enlargement in bone size without a change in volumetric bone density: a peripheral quantitative computed tomography study of the upper arms of male tennis players. *Bone.* 27:351-357. 2000.
31. Hackney, A. C. The male reproductive system and endurance exercise. *Med Sci Sports Exerc.* 28:180-189. 1996.
32. Hannan, M. T., D. T. Felson, B. Dawson-Hughes, K. L. Tucker, L. A. Cupples, P. W. Wilson, and D. P. Kiel. Risk factors for longitudinal bone loss in elderly men and women: the Framingham Osteoporosis Study. *J Bone Miner Res.* 15:710-720. 2000.

33. Hansson, T., B. Roos, and A. Nachemson. The bone mineral content and ultimate compressive strength of lumbar vertebrae. *Spine*. 5:46-55. 1980.
34. Heinonen, A., P. Oja, P. Kannus, H. Sievanen, H. Haapasalo, A. Manttari, and I. Vuori. Bone mineral density in female athletes representing sports with different loading characteristics of the skeleton. *Bone*. 17:197-203. 1995.
35. Heinonen, A., P. Oja, P. Kannus, H. Sievanen, A. Manttari, and I. Vuori. Bone mineral density of female athletes in different sports. *Bone Miner*. 23:1-14. 1993.
36. Heinrich, C. H., S. B. Going, R. W. Pamentier, C. D. Perry, T. W. Boyden, and T. G. Lohman. Bone mineral content of cyclically menstruating female resistance and endurance trained athletes. *Med Sci Sports Exerc*. 22:558-563. 1990.
37. Hetland, M. L., J. Haarbo, and C. Christiansen. Low bone mass and high bone turnover in male long distance runners. *J Clin Endocrinol Metab*. 77:770-775. 1993.
38. Hologic, I. Considerations for the determination of precision in-vivo of dual x-ray absorptiometry: Hologic, Inc., 1993.
39. Hologic, I. *QDR 4500a - Users Guide. Manual*. Waltham: Hologic Inc., 1996
40. Hologic, I. *Sahara clinical bone sonometer*. Waltham: Hologic, 1997
41. Hoover, P. A., C. E. Webber, L. F. Beaumont, and J. M. Blake. Postmenopausal bone mineral density: relationship to calcium intake, calcium absorption, residual estrogen, body composition, and physical activity. *Can J Physiol Pharmacol*. 74:911-917. 1996.
42. Investigators. *Primer on the metabolic bone diseases and disorders of mineral metabolism*. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins, 1999
43. Judex, S. and R. F. Zernicke. High-impact exercise and growing bone: relation between high strain rates and enhanced bone formation. *J Appl Physiol*. 88:2183-2191. 2000.
44. Kachelrieß, M. and W. A. Kalender. Dose reduction by generalized 3D adaptive filtering for conventional and spiral single-, multirow and cone-beam CT. In *RSNA 85th Scientific Assembly and Annual Meeting*. Chicago, IL: Radiology, pp. 283-284, 1999.
45. Kalender, W. A., D. Felsenberg, O. Louis, P. Lopez, E. Klotz, M. Osteaux, and J. Fraga. Reference values for trabecular and cortical vertebral bone density in single and dual-energy quantitative computed tomography. *Eur J Rad*. 9:75-80. 1989.
46. Kalender, W. A., E. Klotz, and C. Süß. Vertebral bone mineral analysis: an integrated approach with CT. *Radiology*. 164:419-423. 1987.
47. Kang, Y. 3D Quantitative Computed Tomography (QCT) of the proximal femur. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Institute of Medical Physics, Erlangen, 2003.
48. Kardinaal, A. F. Determinants of bone mass and bone geometry in adolescent and young adult women. *Calcif Tissue Int*. 66:81-89. 2000.
49. Kaufman, J. J. and T. A. Einhorn. Texture analysis of vertebral computed tomography scans improve vertebral strength estimation. *Transaction of the Orthopaedic Research Society*. 14:264. 1989.
50. Kelley, G. A. Exercise and regional bone mineral density in postmenopausal women: a meta-analytic review of randomized trials. *Am J Phys Med Rehabil*. 77:76-87. 1998.
51. Kelley, G. A., K. S. Kelley, and Z. V. Tran. Exercise and bone mineral density in men: a meta-analysis. *J Appl Physiol*. 88:1730-1736. 2000.

52. Kemmler, W. Körperliche Belastung und Osteoporose - Einfluss eines intensiven 9-monatigen körperlichen Trainings auf Knochendichte, Gesamtkalzium und Wirbelkörperbreite bei Frauen mit unterschiedlichem Belastungsniveau in der Vergangenheit. *Osteologie*. 9:114-123. 2000.
53. Kemmler, W., K. Engelke, J. Weineck, and W. A. Kalender. Habitual physical activity, muscle strength, and VO₂max are not highly related with bone parameters in early postmenopausal women with low bone density. *JNMI*. accepted for publication. 2004.
54. Kemmler, W., Weineck, J., Hensen, J., Lauber, D., Kalender, W.A., Engelke, K. Empfehlungen für ein körperliches Training zur Verbesserung der Knochenfestigkeit: Schlussfolgerungen aus Tiermodellen und Untersuchungen an Leistungssportlern. *Dtsch Z Sportmed*. 54:306-316. 2003.
55. Konermann, W., F. Stubbe, T. Link, and N. Meier. Axiale Bruchfestigkeit von thorakolumbalen Wirbelkörpern - eine experimentelle biomechanische Studie. *Z Orthopädie*. 137:223-231. 1999.
56. Konopka, P. *Sporternährung*. München: BLV, 1988
57. Lane, J. M., C. N. Cornell, and J. H. Healey. Orthopaedic consequences of osteoporosis. In: *Osteoporosis: Etiology, diagnosis, and management*. B. L. Riggs and L. J. Melton III (Eds.) New York: Raven Press, 1988, pp. 433-455.
58. Lanyon, L. E. Functional strain as a determinant for bone remodeling. *Calcif Tiss Int*. 36:56-61. 1984.
59. Lanyon, L. E. Using functional loading to influence bone mass and architecture: objectives, mechanisms, and relationship with estrogen of the mechanically adaptive process in bone. *Bone*. 18:37S-43S. 1996.
60. Lee, E. J., K. A. Long, W. L. Risser, H. B. Poindexter, W. E. Gibbons, and J. Goldzieher. Variations in bone status of contralateral and regional sites in young athletic women. *Med Sci Sports Exerc*. 27:1354-1361. 1995.
61. Lehtonen-Veromaa, A., T. Möttönen, I. Nuotio, O. J. Heinonen, and J. Viikari. Influence of physical activity on ultrasound and Dual-Energy X-ray Absorptiometry Bone measurements in peripubertal girls: A cross-sectional study. *Calcif Tissue Int*. 66:248-254. 2000.
62. Lucas, J. A., P. R. Lucas, S. Vogel, G. D. Gamble, M. C. Evans, and I. R. Reid. Effect of sub-elite competitive running on bone density, body composition and sexual maturity of adolescent females. *Osteoporos Int*. 14:848-856. 2003.
63. MacDougall, J. D., C. E. Webber, and J. Martin. Relationship among running mileage, bone density, and serum testosterone in male runners. *J Appl Physiol*. 73:1165-1170. 1992.
64. Maimoun, L., S. Lumbroso, J. Manetta, F. Paris, J. L. Leroux, and C. Sultan. Testosterone is significantly reduced in endurance athletes without impact on bone mineral density. *Horm Res*. 59:285-292. 2003.
65. Martin, R. B., S. B. Arnaud, and D. B. Burr. Non-invasive prediction of bone strength. In: *Advances of Bioengineering*. R. B. Martin, S. B. Arnaud, and D. B. Burr (Eds.) New York, 1989.
66. Martin, R. B. and D. B. Burr. Non-invasive measurements of long bone cross-sectional moment of inertia by photon absorptiometry. *J Biomechanics*. 17:195-201. 1984.
67. Mathiowetz, V., K. Weber, G. Volland, and N. Kashman. Reliability and validity of grip and pinch strength evaluations. *J Hand Surg [Am]*. 9:222-226. 1984.

68. McBroom, R. J., W. C. Hayes, W. T. Edwards, R. P. Goldberg, and A. A. White. Prediction of vertebral body compressive fracture using quantitative computed tomography. *J Bone Joint Surg (Am)*. 67:1206-1214. 1985.
69. Michel, B. A., N. E. Lane, A. Björkengren, D. A. Bloch, and J. F. Fries. Impact of Running on lumbar Bone Density: a 5-year longitudinal study. *J Rheumatol*. 19:1759-1763. 1992.
70. Morel, J., B. Combe, J. Francisco, and J. Bernard. Bone mineral density of 704 amateur sportsmen involved in different physical activities. *Osteoporos Int*. 12:152-157. 2001.
71. Mosekilde, L., C. C. Danielsen, C. H. Sogaard, and E. Thorling. The effect of long-term exercise on vertebral and femoral bone mass, dimension, and strength - assessed in a rat model. *Bone*. 15:293-301. 1994.
72. Mosley, J. R. and L. E. Lanyon. Strain rate as a controlling influence on adaptive modeling in response to dynamic loading of the ulna in growing male rats. *Bone*. 23:313-318. 1998.
73. Nelson, M. E., C. N. Meredith, B. Dawson-Hughes, and W. J. Evans. Hormone and bone mineral status in endurance-trained and sedentary women. *J Clin Endocrinol Metab*. 66:927-933. 1988.
74. Nickols-Richardson, S. M., C. M. Modlesky, P. J. O'Connor, and R. D. Lewis. Premenarcheal gymnasts possess higher bone mineral density than controls. *Med Sci Sports Exerc*. 32:63-69. 2000.
75. NIH. (National Institute of Health): Consensus development panel on optimum calcium intake. *JAMA*. 272:1942-1948. 1994.
76. Nilsson, B. E. and N. E. Westlin. Bone density in athletes. *Clin Orthop*. 77:179-182. 1971.
77. Notomi, T., Y. Okazaki, N. Okimoto, S. Saitoh, T. Nakamura, and M. Suzuki. A comparison of resistance and aerobic training for mass, strength and turnover of bone in growing rats. *Eur J Appl Physiol*. 83:469-474. 2000.
78. Notomi, T., N. Okimoto, Y. Okazaki, T. Nakamura, and M. Suzuki. Tower climbing exercise started 3 months after ovariectomy recovers bone strength of the femur and lumbar vertebrae in aged osteopenic rats. *J Bone Miner Res*. 18:140-149. 2003.
79. Notomi, T., N. Okimoto, Y. Okazaki, Y. Tanaka, T. Nakamura, and M. Suzuki. Effects of tower climbing exercise on bone mass, strength, and turnover in growing rats. *J Bone Miner Res*. 16:166-174. 2001.
80. Pettersson, U., P. Nordström, and R. Lorentzon. A comparison of bone mineral density and muscle strength in young male adults with different exercise level. *Calcif Tissue Int*. 64:490-498. 1999.
81. Platen, P. Prävention und Therapie der Osteoporose: Die Bedeutung des Sports und der körperlichen Aktivität. *Deutsches Ärzteblatt*. 94:A2569-2574. 1998.
82. Qin, Y. X., C. T. Rubin, and K. J. McLeod. Nonlinear dependence of loading intensity and cycle number in the maintenance of bone mass and morphology. *J Orthop Res*. 16:482-489. 1998.
83. Rankinen, T., S. Lyytikäinen, E. Vanninen, I. Penttilä, R. Rauramaa, and M. Uusitupa. Nutritional status of the Finnish elite ski jumpers. *Med Sci Sports Exerc*. 30:1592-1597. 1998.
84. Rizzoli, R. and J. P. Bonjour. Hormones and bones. *Lancet*. 349 Suppl 1:sI20-23. 1997.

85. Robinson, T. L., C. Snow-Harter, D. R. Taaffe, D. Gillis, J. Shaw, and R. Marcus. Gymnasts exhibit higher bone mass than runners despite similar prevalence of amenorrhea and oligomenorrhea. *J Bone Miner Res.* 10:26-35. 1995.
86. Rubin, C. T. and L. E. Lanyon. Regulation of bone formation by applied dynamic loads. *J Bone Joint Surg Am.* 66:397-402. 1984.
87. Rubin, C. T., A. S. Turner, R. Müller, E. Mittra, K. J. McLeod, W. Lin, and Y. X. Qin. Quantity and quality of trabecular bone in the femur are enhanced by a strongly anabolic, noninvasive mechanical intervention. *J Bone Miner Res.* 17:349-357. 2002.
88. Sogaard, C. H., C. C. Danielsen, E. B. Thorling, and L. Mosekilde. Long-term exercise of young and adult female rats: effect on femoral neck biomechanical competence and bone structure. *J Bone Miner Res.* 9:409-416. 1994.
89. Srinivasan, S., D. A. Weimer, S. C. Agans, S. D. Bain, and T. S. Gross. Low-magnitude mechanical loading becomes osteogenic when rest is inserted between each load cycle. *J Bone Miner Res.* 17:1613-1620. 2002.
90. Steward, A. D. and J. Hannan. Total and regional bone density in male runners, cyclists, and controls. *Med Sci Sports Exerc.* 32:1373-1377. 2000.
91. Suominen, H. Bone mineral density and long term exercise. *Sports Medicine.* 16:316-330. 1993.
92. Taaffe, D. R., C. Snow-Harter, D. A. Connolly, T. L. Robinson, M. D. Brown, and R. Marcus. Differential effects of swimming versus weight-bearing activity on bone mineral status of eumenorrheic athletes. *J Bone Miner Res.* 10:586-593. 1995.
93. Theintz, G., B. Buchs, R. Rizzoli, D. Slosman, H. Clavien, P. C. Sizonenko, and J. P. Bonjour. Longitudinal monitoring of bone mass accumulation in healthy adolescents: evidence for a marked reduction after 16 years of age at the levels of lumbar spine and femoral neck in female subjects. *J Clin Endocrinol Metab.* 4. 1992.
94. Trovas, G., G. P. Lyritis, A. Galanos, P. Raptou, and M. Katsiri. Influence of weight gain on spine mineral density in postmenopausal women. *Calcif Tissue Int.* 64:380-383. 1999.
95. Turner, C. H. Homeostatic control of bone structure: an application of feedback theory. *Bone.* 12:203-217. 1991.
96. Uusi-Rasi, K., H. Sievanen, M. Pasanen, P. Oja, and I. Vuori. Maintenance of body weight, physical activity and calcium intake helps preserve bone mass in elderly women. *Osteoporos Int.* 12:373-379. 2001.
97. Veenland, J. F., T. M. Link, W. Konermann, N. Meier, J. L. Grashuis, and E. S. Gelsema. Unraveling the role of structure and density in determining vertebral bone strength. *Calcif Tissue Int.* 61:474-479. 1997.
98. Wheeler, G. D., M. Singh, W. D. Pierce, W. F. Wepling, and D. C. Cumming. Endurance training decreases serum testosterone in men without change in luteinizing hormone pulsatile release. *J Clin Endocrinol Metab.* 72:422-425. 1991.
99. Wu, F., R. Ames, J. Clearwater, M. C. Evans, G. Gamble, and I. R. Reid. Prospective 10-year study of the determinants of bone density and bone loss in normal postmenopausal women, including the effect of hormone replacement therapy. *Clin Endocrinol (Oxf).* 56:703-711. 2002.
100. Yamagata, M., M. Hideshige, S. Goto, and K. Takahashi. Relationship between mechanical strength and bone mineral density of the vertebral shell and core. In: *Calcium regulation and bone metabolism.* D. V. Cohn, F. H. Glorieux, and T. J. Martin (Eds.): Elsevier Science Publishers, 1990, pp. 502-508.

101. Yeh, J. K., J. F. Aloia, M. M. Chen, J. M. Tierney, and S. Sprintz. Influence of exercise on cancellous bone of the aged female rat. *J Bone Miner Res.* 8:1117-1125. 1993.
102. Zapf, J. Aspekte der Ernährung beim Sportklettern. In: *Sportklettern. Aktuelle sportmedizinische Aspekte.* V. Schöffl and T. Hochholzer (Eds.) Ebenhausen: Lochnerverlag, 2004, pp. 182-203.
103. Zapf, J., M. L. Dingerkus, B. Fichtl, and C. Wielgos. Ernährung und Essverhalten beim Sportklettern. *Sport Orthop Traumatolog.* 18:97-103. 2002.