

W. Kemmler<sup>1</sup>, S. von Stengel<sup>1</sup>, J. Weineck<sup>2</sup>, K. Engelke<sup>1</sup>

## Empfehlungen für ein körperliches Training zur Verbesserung der Knochenfestigkeit: Schlussfolgerungen aus Tiermodellen und Untersuchungen an Leistungssportlern

*Exercise recommendations for an increase of bone strength based on animal models and studies with athletes*

1 Osteoporoseforschungszentrum, Institut für Medizinische Physik,

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

### Zusammenfassung

Neben der Sturzgefährdung stellt die "Knochenfestigkeit" für die Prävention und Rehabilitation der Osteoporose die zentrale Zielgröße eines körperlichen Trainings dar. Weder über geeignete Trainingsinhalte noch über die Gestaltung der Belastungsnormativa für ein Trainingsprogramm mit optimaler Wirkung am Knochen herrscht Einigkeit. Erkenntnisse über die Wirksamkeit einzelner Trainingsinhalte lassen sich aus tierexperimentellen Längsschnittstudien und aus Querschnittstudien mit Sportlern unterschiedlicher Sportarten ableiten. Hier erweisen sich Belastungen, die mit hohen muskulären Spannungen verbunden sind (Krafttraining, Gewichtheben) und gewichtstragende Belastungsformen mit hohen axialen Belastungen (z.B. Sprünge), besonders wenn sie mit einer variablen Belastungsverteilung assoziiert sind, als geeignet, positive Anpassungen am Knochen auszulösen. Die selektive Wirkung einzelner Belastungsnormativa auf den Knochen wurde im Rahmen von tierexperimentellen mechanischen Belastungsversuchen von Knochen *in vivo* ermittelt. Die Ergebnisse dieser Studien bestätigen die Bedeutung hoher Reizintensität bzw. raschen Reizaufbaus. Trainingsprogramme mit einer Auswahl entsprechender Belastungsinhalte und Belastungsnormativa stellen erhebliche Anforderungen an den Bewegungsapparat und die körperliche Fitness und sind mit einem erhöhten Verletzungs- und Arthroserisiko behaftet. Tierexperimentelle Belastungsversuche zeigen zwar, dass auch Belastungsregime mit niedrigen Reizintensitäten bei entsprechend hoher Reizhäufigkeit/Reizfrequenz ein osteogenes Potential aufweisen, die Relevanz dieser Daten ist jedoch angesichts unphysiologisch hoher Werte stark eingeschränkt. Im Zusammenhang mit der Forderung nach hoher Reizintensität bzw. raschem Reizaufbau besitzt die Beachtung trainingsmethodischer Grundsätze einen hohen Stellenwert. Ein langfristiger, progressiver Belastungsaufbau, der die Individuen vorsichtig an höhere Belastungsreize heranführt, erscheint dringend nötig.

**Schlüsselwörter:** Training, Belastung, Osteoporose, Knochen

### Summary

Apart from the reduction of falls, bone strength is the central focus of physical training strategies against osteoporosis, but there is still vagueness about the design of a training regime with an optimal effect on bone. Optimised training contents can be derived from longitudinal animal studies and cross-sectional studies with athletes of different kinds of sport. According to these studies, exercises with high muscular tension and weight-bearing exercises with high intensity were suitable to increase bone strength especially if they were associated with variable strain distribution. The selective effect of strain magnitude, rate, frequency and cycle number on bone was also investigated *in vivo* in mechanical strain trials in animals. The results of these studies confirm the importance of a high intensity and rapid increase of strain. However, corresponding exercise programs challenge the musculoskeletal structure and are known to increase injury and the risk of arthrosis. Although recent studies with animals demonstrate an osteoanabolic effect of exercise regimes with low strain intensity but high cycle numbers and strain frequency, the relevance of these results is doubtful since the achieved values were very high and therefore not physiological. Thus a long-term progressive increase of strain intensities is essential.

**Key words:** training, exercise, osteoporosis, bone

### Einleitung

Körperliche Belastung gilt als zentrale Säule innerhalb der Osteoporoseprävention und -rehabilitation. Wie keine andere Maßnahme wirkt körperliche Belastung in vielfältiger

Weise auf das Frakturrisiko ein (Abb. 1). Neben einer Reduktion der Sturzhäufigkeit (34, 109) zeigt eine große Anzahl von Interventionsstudien (Übersicht in 14, 60, 142, 143, 147) positive Effekte eines körperlichen Trainings auf die Knochendichte bei Männern und Frauen unterschiedlichen Le-

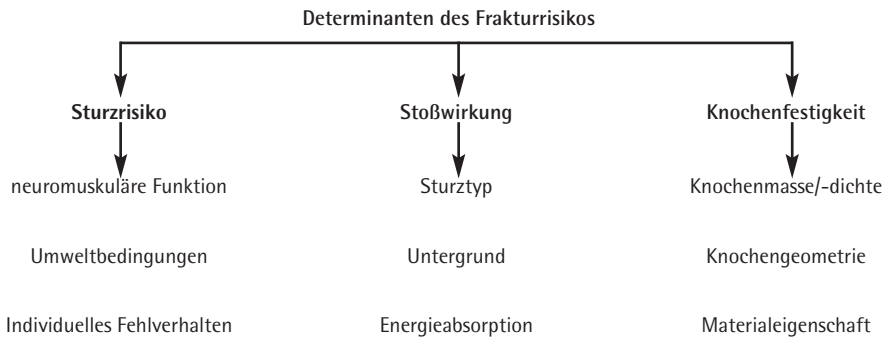


Abbildung 1: Determinanten des Frakturrisikos

bensalters. Während die trainingsmethodische Vorgehensweise zur Reduktion des Sturzrisikos vergleichsweise gesichert ist (101, 109), steht trotz einer Fülle von Untersuchungen die ideale Vorgehensweise zur Steigerung oder zum Erhalt der Knochenfestigkeit noch nicht fest.

In dieser Übersicht sollen anhand der vorliegenden Literatur Trainingsinhalte und Belastungsnormativa, die eine positive Wirkung auf den Knochen haben, identifiziert und daraus Trainingsempfehlungen abgeleitet werden. Die Diskussion stützt sich primär auf tierexperimentelle Daten, artifizielle Belastungsversuche an Tierknochen in vivo sowie auf Querschnittstudien mit Leistungssportlern. Diese Studien erlauben unserer Meinung nach spezifischere Einblicke in die Anpassung des Knochens an körperliche Belastung als Längsschnittstudien an weitgehend unспортlichen Menschen, bei denen eine selektive Bewertung der Wirkung einzelner Belastungsnormativa und Trainingsinhalte nicht möglich ist. Auf Grund dieses Ansatzes muss natürlich die zentrale Frage, unter welchen Bedingungen die Ergebnisse experimenteller Studien in die normale Trainingspraxis übertragen werden können, diskutiert werden.

## Trainingsinhalte zur Steigerung oder zum Erhalt der Knochenfestigkeit

Nach der Festlegung des Trainingszieles ist der erste Schritt bei der Konzeption eines Trainingsprogrammes die Wahl geeigneter Trainingsinhalte, der zweite die der Belastungsnormativa. Beide Faktoren beeinflussen sich gegenseitig. Es ist entscheidend, mit welcher Intensität, Dauer oder Häufigkeit bestimmte Trainingsinhalte durchgeführt werden. Im Folgenden werden zum besseren Verständnis die Trainingsinhalte zunächst isoliert dargestellt. Versucht man Trainingsinhalte knochenspezifisch zu systematisieren und in Wirkpfaden zu kategorisieren, so lässt sich in Anlehnung an die Senn'schen Knochenfaktoren (121) folgende Einteilung treffen:

### 1. Axiale Belastung

Unter diese Kategorie fallen Belastungen, bei denen der Knochen oder das entsprechende Skelettsegment primär in axialer Richtung beansprucht wird. Eine im Vergleich zur Gravitation höhere axiale Belastung tragender Teile des Skelettsystems ist eine zentrale Komponente des Modeling-Re-

modelingprozesses (76, 77, 115, 116). Lanyon (76) weist in seinem klassischen Truthahnmodell eine Beziehung zwischen dynamischer axialer Belastung und Knochenhypertrophie nach. In Abhängigkeit vom Skelettsegment kommt es bei axialer Belastung überwiegend zu einer Kompressions- (Wirbelkörper) oder Biegebelastung (geschwungene lange Röhrenknochen). Trainingsinhalte sind dementsprechend neben Lauf- und

Sprungbelastungen Übungen, die das entsprechende Skelettsegment in weitgehend axialer Richtung belasten.

### 2. Muskelzug

Dieser Faktor wirkt am Knochen über zwei Pfade. Zum einen führt ein Muskelzug über die Sehne zu einer lokalen Adaptation des Knochens im Bereich des Insertionsgebietes. Zum anderen kommt es zu komplexen Biege- und Torsionsbelastungen des Knochens, da der Muskelzug einwirkenden äußeren Kräften über den Hebelarm Knochen entgegenwirkt. Einige Autoren (33, 119) spekulieren in diesem Zusammenhang, dass der Muskelzug selbst am Achsenskelett den höchsten physiologischen Reiz darstellt.

### 3. Systemische Determinante

Körperliche Belastung wird von komplexen hormonellen Regulationsmechanismen begleitet. In Abhängigkeit von der beanspruchten Muskelmasse (40, 72, 74), von Dauer und Intensität des Belastungsreizes (72, 74, 103) und von Lebensalter und Geschlecht kommt es zu einer Ausschüttung knochenanabol wirksamer Substanzen wie hGH, IGF-I, männlicher und weiblicher Sexualhormone inklusive deren Vorläufersubstanzen (Übersicht in 65) und kalziumregulierender Hormone (93, 150).

Die meisten sportlichen Aktivitäten, wie Laufen, Springen, Schwimmen oder Kraftübungen, stimulieren mehrere dieser Knochenfaktoren gleichzeitig: Laufen bei hinreichender Dauer und Intensität beispielsweise alle drei Faktoren, Schwimmen nur die letzten beiden. Versucht man, die relative Wertigkeit verschiedener Trainingsinhalte bezüglich ihrer osteoanabolen Wirkung einzuordnen, bieten sich tierexperimentelle Untersuchungen an, bei denen die Tiere unterschiedlichen Belastungsformen ausgesetzt wurden. Derartige Studien wurden überwiegend mit Ratten und Mäusen durchgeführt. Es handelt sich um Studien, bei denen die Tiere am Ende der Belastungsperiode getötet werden, um am extrahierten Knochen die Bruchkraft, die das zentrale Maß für die Knochenfestigkeit darstellt, zu ermitteln.

Laufen als umfangsorientierte Belastung führte in Abhängigkeit von der Laufgeschwindigkeit zu deutlichen, teilweise signifikanten Steigerungen der Knochenfestigkeit an den beanspruchten Körperregionen (6, 7, 53, 54, 88, 90, 99, 102, 105, 128, 139). Sprünge als Belastungsform mit deutlich höherer Belastungsintensität zeigten höhere Effekte als eine

Laufbelastung (46, 47, 68, 95-97, 125, 137). Ein direkter Vergleich beider Belastungsformen (96) zeigt, dass das Sprungtraining insbesondere zu einer stärkeren Zunahme der Knochenmasse und größeren Verbreiterung der Kortikalis führt als das Lauftraining. Interessanterweise führte bereits eine Bewegungsausführung ohne negativ dynamische Komponente (Landung) zu diesen Effekten (46, 47, 125, 137).

Die Wertigkeit des Trainingsinhalts Schwimmen auf die Knochenfestigkeit ist nicht eindeutig (41, 48, 49, 51, 123, 130, 131). Während Untersuchungen mit jungen Tieren überwiegend positive Ergebnisse zeigten, waren bei Kollektiven mit begrenztem osteoanabolen Potential (alte oder ovariectomierte Tiere) in der Mehrzahl keine Effekte nachzuweisen.

Tabelle 1: Vergleichende Querschnittuntersuchungen mit Leistungssportlern. Knochenmasse und/oder Knochendichte an unterschiedlichen Körperregionen. TG: Trainingsgruppe, KG: Kontrollgruppe, LWS: Lendenwirbelsäule, SH: Schenkelhals, TB: Gesamtkörper

Quelle	Alter / Anzahl der Probanden / Geschlecht	Skelettregion	Relativer Stellenwert der Sportart hinsichtlich der Knochendichte	Bemerkung
Andreoli 2000 [135]	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 [136]	TG: 20/53/w KG: 20/28/w	LWS SH Tibia	Sprinter/Springer/Mehrck. > Mittel-/Langstrecke ≥ KG Sprinter/Springer/Mehrck. > Mittel-/Langstrecke > KG Sprinter/Springer/Mehrck. > Mittel-/Langstrecke > KG	Elite und Subelitesportler, korrigiert für Gewicht und Größe, kein Unterschied für Total Body (TB).
Chae 1994 [137]	TG: 23/152/w KG: 25/36/w	LWS SH	Kraftsport > Spiele > Allround > Lauf > KG > Ballett Spiele > Kraftsport > Allround > Ballett > Lauf > KG	Kraftsport = Ringen und Judo, Allrounder = Sportstudenten, Gruppen < n = 10 nicht aufgeführt, keine Daten zur hormonellen Situation.
Creighton 2001 [138]	TG: 20/32/w KG: 23/7/w	LWS SH	High-impact (Basketball) > medium Impact (Fußball, Mittelstrecke) > non impact (Schwimmen) > KG (<1h/Wo.); High-impact > medium Impact > non impact ≥ KG	Elitesportler, keine Zyklusirregularitäten (Amenorrhoe/Oligomenorrhoe); geringe Stichprobe, "gematched" (Größe, Gewicht, Kalziumaufnahme).
Duncan 2002 [139]	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 [140]	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 [141]	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 [142]	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 [143]	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 [144]	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 [145]	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.
Morel 2001 [146]	TG: 18-40/704/m	TB LWS	Sportspiele > Kampfsport/Body-Building > WB-Allrounder > Rudern/Triathlon/Laufen/Radfahren > Klettern > Schwimmen Rugby > Spielsport/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 [147]	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 [148]	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.
Taafe 1995 [149]	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.

Einige Autoren (11, 16, 98) untersuchten den Einfluss eines Krafttrainings (Klettern oder Kniebeugen) bei Ratten. *Buhl et al.* (16), die Kniebeugen mit einem Zusatzgewicht von bis zu 65% des Körpergewichtes durchführten, konnten aber keine Veränderung der Knochenfestigkeit an Femur oder Tibia erfassen. Das gleiche negative Ergebnis berichteten *Bennell et al.* (11), die den Effekt eines Klettertrainings mit Zusatzbelastung von 80% des Körpergewichtes untersuchten. Interessanterweise zeigte ein umfangsorientiertes Klettertraining (98) signifikant positive Effekte auf die Knochenfestigkeit am Femur, nicht jedoch an der mechanisch weniger belasteten Lendenwirbelsäule.

Da sich der Knochenmetabolismus von Nagetieren wie Ratten oder Mäusen in einigen wesentlichen Punkten von dem des Menschen unterscheidet, ist eine direkte Übertragbarkeit der tierexperimentellen Ergebnisse auf den Menschen nur einschränkt möglich. In-vivo Untersuchungen am Menschen haben dagegen den Nachteil, dass überwiegend nur die Knochenmasse oder -dichte, nicht aber die Knochenfestigkeit bestimmt werden kann. In Bruchversuchen in vitro findet sich zwar eine hohe Korrelation dieser Parameter ( $r^2=0.48 - 0.94$ ) (70, 140, 149), allerdings deuten Ergebnisse unterschiedlicher Autoren an, dass in vivo eine Erhöhung der Knochenfestigkeit durch körperliches Training auch unabhängig von einer korrespondierenden Zunahme der Knochenmasse oder -dichte realisiert werden kann (52, 54, 102, 148). Eine ausbleibende Veränderung der Knochendichte ist also nicht zwangsläufig ein Indiz für die Wirkungslosigkeit eines Trainingsprogramms.

Die aussagekräftigsten in-vivo Studien am Menschen zur Differenzierung von Trainingsinhalten sind Querschnittstudien an (Hoch-)Leistungssportlern, da hier das disziplinspezifische Anforderungsprofil eine exakte Einschätzung des Belastungsreizes ermöglicht. Es existiert hier eine Fülle von vergleichenden Veröffentlichungen, die in Tabelle 1 zusammengestellt sind. Aus den aufgeführten Daten lassen sich folgende grundsätzliche Punkte ableiten:

1. Trainingsinhalte mit axialer Belastung, die höher als die Gravitation ist, 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) (vgl. 115).
4. Intensitätsbetonte Varianten von Sportarten (Sprint) zeigen höhere Effekte als umfangsorientierte Varianten (Mittel-/Langstreckenlauf).
5. Bei umfangsorientierten Trainingsbelastungen mit entsprechend negativem Einfluss auf den systemischen Knochenfaktor wird der positive Einfluss mechanischer Belastung abgeschwächt.

Betrachtet man Knochendichte bzw. -masse als Endpunkt, lässt sich die in Abbildung 2 skizzierte Rangfolge für die Effektivität der Trainingsinhalte aufstellen.

Sicherlich ist diese Liste nur eine Orientierung, da es sich um eine Interpretation von Querschnittstudien handelt, die bekanntlich eine Reihe von Schwachpunkten aufweisen:

1. Die "basalen" Werte vor der Aufnahme der sportartspezifischen Belastung sind nicht bekannt. Es stellt sich also die grundsätzliche Frage, ob die Belastung zu einer Veränderung der Knochendichte führt oder ob eine hohe Knochendichte Voraussetzung dafür ist, verletzungsfrei außergewöhnliche Leistungen in dieser Disziplin zu vollbringen. Zumindest in Sportarten mit unilateraler Armbelastung, wie z.B. Tennis, Squash oder Volleyball, wurde allerdings belegt, dass das Training zur einer signifikant höheren Knochendichte und/oder einer höheren Querschnittsfläche am dominanten Arm führte (u.a. 1, 4, 37, 58, 71).
2. Leistungssportliche Karrieren werden meist deutlich vor Erreichen der sog. Peak Bone Mass bzw. vor Wachstumsende aufgenommen. Tierexperimentelle und humane Untersuchungen zeigen jedoch, dass ein "junger" Knochen mit höheren Veränderungen der Knochendichte und -geometrie auf Belastung reagiert als "erwachsener" Knochen (4, 36, 91, 113, Übersicht in 82).
3. Die bei Ausdauersportarten im Leistungssport vorherrschenden exzessiven Trainingsumfänge gehen oft mit einer Suppression u.a. der Sexualhormonachse einher (5, 24). Da sich mechanische und systemische Faktoren gegenseitig beeinflussen (32, 133), schwächt der negative Effekt des Sexualhormonmangels bei exzessiven Ausdauerbelastungen den positiven Effekt der mechanischen Belastung ab (13). Dieser Effekt ist allerdings bei moderatem Sporttreiben nicht zu erwarten.

LWS		Schenkelhals
Kraftsport/Turnen/Sportspiele	↑ + ↓ -	Turnen/Sportspiele
Allround		Kraftsport
Laufen		Allround/Ballett
Ballett		Laufen
Schwimmen/Radfahren/Untrainierte		Schwimmen/Radfahren/Untrainierte

Abbildung 2: Einfluss der Sportart auf die BMD in Leistungssportlern (18-35 Jahre).

Die Wahl der Trainingsinhalte ist, wie oben dargestellt, ein erster Schritt im Trainingsprozess. Über die Gestaltung der Belastungsnormativa lassen sich die Trainingsinhalte in ihrer Wirksamkeit modifizieren und individuell an die entsprechende Zielgruppe anpassen. Konkret müssen also Reizintensität (Höhe und Rate des Belastungsreizes), Reizumfang (Reizhäufigkeit, -dauer und -frequenz), Reizdichte (Wechsel von Belastung und Erholung) und Trainingshäufigkeit (Anzahl der Trainingseinheiten pro Woche) für den jeweiligen Belastungsinhalt festgelegt werden. Die in tierexperimentellen Belastungsversuchen verwendeten mechanischen Variablen zur Charakterisierung der Belastung stehen nicht im Einklang mit der Begriffsterminologie der Sportwissenschaft. Soweit möglich soll mit Blick auf die Übertragbarkeit der Ergebnisse dieser Studien auf die Trainingspraxis versucht werden, die Begriffe einheitlich in Anlehnung an die

Terminologie der Trainingslehre zu kategorisieren. Daher wird im Folgenden unter Reizintensität die Reizhöhe und -rate und unter Reizumfang die Reizhäufigkeit und -frequenz subsumiert, während die Reizdichte generell das Verhältnis zwischen Belastung und Erholung, die Trainingshäufigkeit die Anzahl der Trainingseinheiten bzw. Belastungssequenzen pro Woche darstellt.

## Gestaltung der Belastungsnormativa

Anhand der diskutierten tierexperimentellen Daten und der Querschnittsstudien an Menschen zeigte sich bereits der Stellenwert einer hohen mechanischen Belastungsintensität. In-vivo Belastungsversuche an Knochen im Tierexperiment, die im Folgenden diskutiert werden, belegen dieses Primat der Belastungsintensität, wobei andere Belastungsnormativa den Zusammenhang zwischen Intensität und Ausmaß der ossären Reaktion deutlich beeinflussen (Tab. 2). Neuere Untersuchungen weisen den früher eher vernachlässigten Belastungsnormativa Reizhäufigkeit, -frequenz, -dichte und Trainingshäufigkeit einen höheren Stellenwert zu als bisher.

### Reizintensität

Die Intensität eines Belastungsreizes (Reizhöhe), z.B. einer axialen Kompression wird typischerweise als relative Verformung (engl.: strain) des betroffenen Knochens gemessen und in microstrain ( $\mu\Sigma$ ) angegeben. 1000  $\mu\Sigma$  sind definiert als eine Längenänderung von 0.1%. Beim Laufen treten z.B. je nach Geschwindigkeit Intensitäten von bis zu 2000  $\mu\Sigma$  auf

### Reizhöhe

Die Reiz- bzw. Verformungshöhe ist unbestritten zentrales Moment in der Auslösung knochenanaboler Prozesse (69). Schon *Lanyon und Rubin* (75, 115, 116) belegten nach axialer Kompressionsbelastung an einer funktionell isolierten Truthahn-Ulna, *Turner et al.* nach Biegebelastung der Rattentibia (135), dass die Knochenformation oberhalb einer Reizhöhe, die eine Längenänderung von ca. 1000 ( $\mu\Sigma$ ) bewirkt, linear zum Anheben der Reizhöhe liegt.

### Reizrate

Die Ursache für die hohe Wirksamkeit von Sportarten mit sog. high impact Belastungen ist noch nicht ganz verstanden. Sie kann sowohl auf die große Reizhöhe als auch auf die durch Stoßbelastungen auftretenden hohen Reizraten zurückgeführt werden. Statische Belastung als Extremfall niedriger Reizrate zeigt unabhängig von der Reizhöhe keinen positiven Einfluss auf den Knochen (75, 115). *Turner et al.* (136) zeigten in einer Studie an der Rattenulna bei unterschiedlichen Reizraten einen linearen Anstieg von Formationsprozessen relativ zur Reizrate. Aufgrund methodischer Mängel war allerdings nicht eindeutig zu klären, ob die Unterschiede ausschließlich auf die Reizrate zurückzuführen waren. *Mosley und Lanyon* (89) fanden bei einem dreiwöchigen Belastungsregime (4000  $\mu\Sigma$ , 2 Hz, 1200 Wdh./Tag) mit drei Reizraten (0.100  $\mu\Sigma \cdot s^{-1}$ , 0.030  $\mu\Sigma \cdot s^{-1}$ ; 0.018  $\mu\Sigma \cdot s^{-1}$ ) ebenfalls einen engen Zusammenhang zwischen dem Ausmaß von Formationsprozessen und der Reizrate. Die Gruppe mit der höchsten Reizrate wies eine um 54% größere Änderung des Knochenvolumens als diejenige mit der mittleren

Tabelle 2: Zusammenwirken von Reizintensität, -häufigkeit und -frequenz zum Knochenhalt

Autor		Knochenkompartiment	Belastungsform	Intensität	Häufigkeit	Frequenz
Rubin 1984	[85]	Hühner-Ulna	axiale Kompression	2000 $\mu\Sigma$	4 Zyklen	0.5 Hz
Rubin 1985	[13]	Truthahn-Ulna	axiale Kompression	1000 $\mu\Sigma$	100 Zyklen	1 Hz
Cullen 2001	[86]	Ratten-Ulna	4-Punkt-Biegebel.	1000 $\mu\Sigma$	40 Zyklen	2 Hz
Cullen 2001	[86]	Ratten-Ulna	4-Punkt-Biegebel.	800 $\mu\Sigma$	120 Zyklen	2 Hz
McLeod 1992	[150]	Truthahn-Ulna	axiale Kompression	700 $\mu\Sigma$	600 Zyklen	1 Hz
Hsieh 2001	[93]	Ratten-Ulna	axiale Kompression	580 $\mu\Sigma$	360 Zyklen	10 Hz
McLeod 1992	[150]	Truthahn-Ulna	axiale Kompression	400 $\mu\Sigma$	18.000 Zyklen	30 Hz
McLeod 1992	[150]	Truthahn-Ulna	axiale Kompression	270 $\mu\Sigma$	36.000 Zyklen	60 Hz
Qin 1998	[88]	Truthahn-Ulna	axiale Kompression	70 $\mu\Sigma$	108.000 Zyklen	30 Hz

(2). Neben der Reizhöhe spielt aber auch die Reizrate eine entscheidende Rolle. Die Reizrate wird i.a. als relative Verformung des betroffenen Knochens pro Zeiteinheit (Verformungsrate; engl.: strain rate) gemessen und in microstrain pro Sekunde ( $\mu\Sigma \cdot s^{-1}$ ) angegeben. Beide Parameter, die Verformungshöhe und die Verformungsrate werden hier diskutiert. Bezogen auf die Trainingspraxis führen sowohl hohe muskuläre Spannungen (z.B. Krafttraining) als auch hohe axiale Belastungen bei gewichtstragenden Trainingsinhalten zu großen Verformungshöhen am Knochen. Hohe Verformungsraten treten bei sog. "high impact" Belastungen und bei schnellkräftigen Muskelkontraktionen auf.

Rate auf, die wiederum einen 13% höheren Zuwachs als die Gruppe mit der niedrigsten Rate zeigte.

Die Ergebnisse dieser Belastungsversuche wurden durch ein dreiwöchiges Sprungtraining (drop jump) mit Hähnen bestätigt (57). Eine Sprungbelastung von 200 Wiederholungen pro Tag führte im Vergleich mit normaler Aktivität bei nur leicht unterschiedlicher Reizhöhe (2070  $\mu\Sigma$  vs. 1570  $\mu\Sigma$ ) und ähnlicher Belastungsverteilung zu einer wesentlichen Steigerung der Verformungsrate (Sprünge: 0.038; normale Aktivität: 0.316  $\Sigma/s$ ). Die histomorphometrisch bestimmten Knochenformationsraten waren bei der Sprunggruppe sowohl periostal (+40%) als auch endokortikal (+370%) signifikant erhöht. Ein Vergleich zwischen Lauf- und Sprunge-

lastung mit vergleichbarer Reizhöhe (56, 57) zeigte in der Laufgruppe eine wesentlich niedrigere Verformungsrate und keinen Effekt am Knochen.

#### Reizumfang

Der Reizumfang gliedert sich in Reizhäufigkeit, die typischerweise als Zahl von Wiederholungen (engl.: cycle number) angegeben wird, und die Dauer des einzelnen Reizes (für den keine isolierten Daten vorliegen). Der Parameter Reizfrequenz (engl.: cycle frequency) gemessen in Hertz (Hz) wird ebenfalls unter dieser Kategorie abgehandelt.

**Reizhäufigkeit:** Die Bedeutung der Reizhäufigkeit als Determinante des Trainingserfolges wurde lange Zeit unterschätzt. *Rubin* (115) stellte bei einer Verformungshöhe von 2000  $\mu\Sigma$  und einer Reizfrequenz von 0.5 Hz keinen wesentlichen Zusammenhang zwischen Reizhäufigkeit (36 vs. 360 vs. 1800 Wdh.) und knochenanabolen Prozessen fest. Möglicherweise verschleierte jedoch die vergleichsweise große Reizhöhe von 2000  $\mu\Sigma$  den modifizierenden Effekt der Reizhäufigkeit. So zeigten *Cullen et al.* (23), dass eine Reizhäufigkeit von 40 Wdh. bei 800  $\mu\Sigma$  und 2 Hz keinen bzw. bei 1000  $\mu\Sigma$  lediglich einen moderaten Einfluss auf Formationsparameter hatte, während eine Häufigkeit von 120 und 400 Wdh. mit 800  $\mu\Sigma$  deutliche und bei 1000  $\mu\Sigma$  signifikant positive Einflüsse auf Formationsparameter hatte. Zusammenfassend sind beide Autoren der Meinung, dass die Reizhäufigkeit bei niedriger bzw. grenzwertiger Reizhöhe von 800-1100  $\mu\Sigma$  vergleichsweise hoch (400 Wdh.) sein muss, um knochenanabole Prozesse auszulösen.

Diese Daten stehen im Einklang mit dem Modell der Knochenadaptation von *Whalen et al.* (146), das einen steigenden Einfluss der Reizhäufigkeit bei absinkender Reizhöhe vorsieht. Danach können auch Verformungen von weit unter 1000  $\mu\Sigma$  bei adäquater Reizhäufigkeit einen positiven Einfluss auf den Knochen nehmen. *Qin et al.* (104) und *Rubin et al.* (118) betonen in diesem Zusammenhang die Relevanz der Alltagsbelastung, die naturgemäß einen hohen Umfang bei geringer Intensität aufweist. 108.000 Belastungszyklen bei 30 Hz (Belastungsdauer = 60 min) mit einer Verformung von jeweils nur 70  $\mu\Sigma$  scheinen dabei den Knochen (Truthahn-Ulna) zumindest zu erhalten (104). *Rubin et al.* (118) weisen am ovinen Femur bei lediglich 5  $\mu\Sigma$  und 36.000 Zyklen (5 Tage/Wo., 20 min, 30 Hz) signifikante Erhöhungen der trabekulären Knochendichte, der trabekulären Vernetzung und der Knochenfestigkeit gegenüber untrainierten Tieren nach. Wir sind bezüglich dieser Untersuchung jedoch der Ansicht, dass nicht die Belastungshäufigkeit per se, sondern die unphysiologisch hohe Reizfrequenz von 30 Hz den Wirkungsschlüssel darstellte.

**Reizfrequenz:** Tierexperimentell ist eine Verformung von 500  $\mu\Sigma$  bei einer Reizfrequenz von 1 Hz nach *Rubin und McLeod* (117) nicht ausreichend, um den Knochenverlust zu inhibieren, während es bei 20 Hz zu einer sehr deutlichen Steigerung der Knochenmasse kommt. Auch *Turner et al.* (134) zeigten bei konstanter Reizhöhe und -häufigkeit nach

Erhöhung der Reizfrequenz von 0.2 auf 2 Hz eine signifikant erhöhte Knochenformation. *Hsieh und Turner* (50) bestätigten diese Ergebnisse, indem sie bei niedrigerer Reizhöhe und hoher Frequenz bei 360 Belastungszyklen pro Tag eine vergleichbare osteogenetische Reaktion zeigten wie bei größerer Reizhöhe und geringerer Reizfrequenz. Vergleichbar den Ergebnissen von *Rubin und McLeod* löste bereits eine vergleichsweise niedrige Verformung von 570  $\mu\Sigma$  bei 10 Hz deutliche osteogenetische Reaktionen aus, während eine wesentlich größere Reizhöhe (1610  $\mu\Sigma$ ) bei einer Frequenz von 1 Hz keine Wirkung zeigte. Am deutlichsten sind aber die bereits erwähnten Ergebnisse von *Qin et al.* (104), die bei einer Reizfrequenz von 30 Hz und einer exzessiven Reizhäufigkeit von 108.000 Zyklen einen Knochenerhalt bei nur 70  $\mu\Sigma$  (!) beobachten konnten.

Obwohl die Reizfrequenz experimentell von erheblicher Bedeutung ist, erscheint ihre Relevanz im sportlichen Training fragwürdig, da eine Reizfrequenz von über 2-4 Hz willkürlich kaum zu realisieren und nur durch Vibrationsplattformen oder ähnliche Geräte zu erreichen ist.

#### Reizdichte

Nach *Umemura et al.* (138) und *Burr et al.* (17) vermindert sich bei anhaltender Belastung die Mechanosensitivität des Knochens, während bei einer Aufteilung des Belastungsregimes in Blöcke mit entsprechenden Pausen diese Sensitivität erhalten bleibt. *Robling et al.* (112) konnten tierexperimentell nach viermonatigem "Training" (3600  $\mu\Sigma$ , 360 Wdh., 2 Hz) bei einem Belastungsregime von 4 x 90 Wdh. mit jeweils drei Stunden Pause signifikant höhere Werte für biomechanische Parameter nachweisen als bei 360 Wdh. en bloc. Acht Stunden nach Belastung scheint die Mechanosensitivität des Knochens wieder voll hergestellt zu sein (111).

Selbst kurze Pausen zwischen einzelnen Reizen scheinen die osteoanabole Reaktion zu verstärken. *Robling et al.* (111) untersuchten den Effekt der Pausenlänge indem sie Pausen von 0.5, 3.5, 7 und 14 s miteinander verglichen. Während die drei erstgenannten Gruppen zwar signifikant bessere Ergebnisse als eine nicht trainierte Kontrollgruppe aufwiesen, sich aber nicht signifikant voneinander unterschieden (0.5 s > 7 s > 3.5 s), zeigte die Methodenvariante mit 14 s Pause zwischen den Zyklen eine um ca. 50% größere Steigerung der Formationsparameter als die drei Methodenvarianten mit den kürzeren Pausen. Ähnliche Ergebnisse bei wesentlich niedrigerer Reizhäufigkeit zeigten *Umemura et al.* (138) nach einem Sprungtraining. Zwar unterschieden sich alle Belastungsregime signifikant positiv von der nicht trainierenden Kontrollgruppe, die deutlichsten Verbesserungen ergab jedoch die Variante mit der längsten Pausendauer (30 s) zwischen den einzelnen Sprüngen.

Auch *Srinivasan et al.* (129) untersuchten den Einfluss niedriger Reizhöhe (ca. 800  $\mu\Sigma$ ) bei unterschiedlicher Reizdichte (100 Belastungszyklen, 1 Hz, en bloc vs. 10 s Pause zwischen den Reizen). Bereits nach sechs Tagen zeigte sich für beide Belastungsregime eine signifikante Erhöhung der Osteoblastentätigkeit gegenüber der unbelasteten Ulna, wobei die Methodenvariante mit geringer Reizdichte eine signifi-

fikant höhere Rate aufwies. In einer weiteren Untersuchung der Autoren (129) an Mäusen erwies sich ein Belastungsregime mit Pausen (0.25 N, 10 Zyklen/Tag, 10 s Pause) einem umfangreicheren Belastungsregime ohne Pausen aber gleicher Belastungsdauer (0.25 N, 100 Zyklen/Tag, 1 Hz) hinsichtlich der Formationsparameter signifikant überlegen.

## Trainingshäufigkeit

Den Einfluss der Trainingshäufigkeit auf Knochenparameter untersuchen nur wenige Studien. Eine tierexperimentelle Untersuchung von Raab-Cullen *et al.* (106) zeigte, dass eine Trainingshäufigkeit von drei bis viermal pro Woche ebenso effektiv auf den Knochen einwirkt wie eine tägliche Belastung. Belastungen unter zwei Trainingseinheiten pro Woche scheinen allerdings keine wesentlichen Effekten am Knochen zu bewirken. So zeigt eine Vielzahl von in-vivo Verlaufsstudienstudien am Menschen bei niedriger Trainingshäufigkeit trotz adäquater Trainingsinhalte und Reizintensitäten (Ausnahme: 100) keine (15, 26, 81, 122, 124) oder nur wenig eindrucksvolle (39, 66, 100, 126) Effekte am Knochen oder keine Unterschiede zu einer nicht trainierenden Kontrollgruppe.

Eigene Daten (63) bestätigen diese Ergebnisse. So zeigten sich nach retrospektiver Aufteilung nach Trainingshäufigkeit (1-2 TE/Woche vs. 2-4 TE/Woche) deutliche Unterschiede (BMD-LWS: +0.7%, n.s. vs. +2.2%,  $p < 0.001$ ) zwischen den Subgruppen. Karlsson *et al.* (59), die den Trainingsumfang bei Fußballspielern erfassten, zeigten einen positiven Zusammenhang zwischen der Knochenmineraldichte an den belasteten Regionen und dem Trainingsumfang. Mit jeder Zunahme des Umfangs um eine Stunde pro Woche stieg die Dichte am Schenkelhals um 3.3% (bis 6 Std./Wo.). Ab sechs Stunden stieg die Dichte nur noch geringfügig um 0.7% pro zusätzlicher Trainingsstunde.

## Empfehlungen zu den Belastungsnormativa

Zusammenfassend lassen sich unserer Einschätzung nach die folgenden praxisrelevanten Schlüsse aus den oben aufgeführten Ergebnissen ziehen:

1. Hohe Reizintensität und rascher Belastungsaufbau wirken besonders effektiv am Knochen und scheinen somit Prädiktoren des Trainingserfolges zu sein.
2. Bei einer Reizintensität im Bereich der Reizschwelle scheint die Relevanz der Reizhäufigkeit am höchsten, d.h. eine hohe Reizhäufigkeit kann eine niedrigere Reizintensität bis zu einem gewissen Grad kompensieren.
3. Der am isolierten Knochen nachgewiesene Effekt der Reizfrequenz ist nur schwer in die Trainingspraxis zu transferieren. Es deutet sich jedoch an (134), dass auch eine Erhöhung der Frequenz innerhalb des physiologischen Bereiches positive Auswirkungen auf Knochenparameter zeigt.
4. Eine Gliederung des Trainingsprotokolls in einzelne Belastungsreize oder Sätze mit entsprechenden Pausen scheint effektiver auf den Knochen einzuwirken als eine Durchführung im Block.

5. Die effektive Trainingshäufigkeit sollte im Bereich von über zwei wöchentlichen Trainingseinheiten liegen, um relevante Ergebnisse am Knochen zu bewirken.

## Empfehlungen zur Trainingsdurchführung

Versucht man die bisher gewonnenen Erkenntnisse in ein sportliches Training zu transferieren, so würden sich die folgenden Trainingsinhalte anbieten:

1. Vielseitige, auch ausdauerorientierte Belastungsformen wie Tanzen, Aerobic, kleine Spiele/Sportspiele, die bei einer mittleren bis hohen mechanischen und physischen Reizintensität und moderater Reizhäufigkeit und -dauer über alle "Knochenfaktoren" mechanisch lokal und systemisch übergreifend auf das Skelett einwirken.
2. Trainingsinhalte mit hoher Reizintensität und raschem Belastungsaufbau wie Sprünge, die mechanisch besonders intensiv auf die belastete Skelettregion einwirken.
3. Muskeltraining im mittleren bis hohen Intensitätsbereich ( $\geq 70\%$  des 1RM = Einwiederholungsmaximums) unter Miteinbeziehung aller großen Muskelgruppen.
4. Organisatorisch muss das Training überdauernd (141) und regelmäßig mindestens zweimal pro Woche angeboten werden.

Den oben aufgeführten Forderungen stehen Rahmenbedingung entgegen, die eine direkte Umsetzung z.T. erheblich erschweren. So ist die Problematik von Bewegungsformen mit raschem Belastungsaufbau bei Menschen in mittlerem oder hohem Lebensalter unmittelbar einsichtig. Bezogen auf die Reizintensität ist es nach *Drinkwater* (27) zudem fraglich, ob alte Menschen mit sehr stark eingeschränkter körperlicher Leistungsfähigkeit überhaupt ein Aktivitätsniveau entwickeln können, das für den Knochenerhalt notwendig wäre.

Aus trainingsmethodischer Sicht sollte über einen vorsichtigen und langsamen Belastungsaufbau zunächst ein sogenanntes Basis-Niveau erreicht werden, das dann ein weitgehend unbedenkliches Training im höheren Belastungsbereich erlaubt. Eine hohe initiale Intensität, eine schnelle Steigerung der Reizintensität eines Krafttrainings (z.B. 10, 21, 66, 67) oder ein Sprungtraining ohne entsprechende Vorbereitung (8, 9, 20) sind aus Verletzungs- und Compliancegründen nicht empfehlenswert. Eigene Ergebnisse einer Untersuchung mit früh-postmenopausalen Frauen (61, 62, 64) belegen eindrucksvoll, dass nach entsprechender Vorbereitung und unter Berücksichtigung relevanter Trainingsprinzipien ein Sprung- und ein Krafttraining im hohen Intensitätsbereich (70-90% 1RM) bei intermittierenden Regenerationsphasen zu keinerlei negativen Auswirkungen auf Schmerzhäufigkeit und -intensität führen (vgl. hierzu 92).

## Empfehlungen zu Trainingsprinzipien

Als methodische Grundsätze im Rahmen eines Trainings mit dem Ziel des Erhaltes bzw. der Steigerung der Knochenmasse können neben dem Prinzip des "langfristigen Belastungs-

aufbaus" einige im präventiv-rehabilitativen Bereich kaum berücksichtigten Trainingsprinzipien (nach 144) dienen.

### 1. Prinzip der optimalen Relation von Belastung und Erholung

Ein neuerlicher Trainingsreiz soll nach vollständiger Wiederherstellung erfolgen bzw. "nicht erst, wenn die Spuren der vorausgegangenen Belastung völlig verwischt sind" (84). Die Höhe der Ermüdung bzw. die Länge der Wiederherstellung ist dabei vom Grad des Reizumfangs und -intensität, vom Trainingszustand sowie anderen exogenen und endogenen Faktoren (79) wie z.B. dem Lebensalter (120) abhängig. Neben dem bereits diskutierten negativen Einfluss einer (zu) geringen Trainingshäufigkeit zeigt sich, dass die negativen Ergebnisse einiger Interventionsstudien (10, 53) möglicherweise auf eine zu hohe Reizhäufigkeit bei hoher Reizintensität zurückzuführen sind.

### 2. Prinzip der progressiven Belastungssteigerung

Bleibt die Trainingsbelastung über längere Zeit gleich, sinkt der Belastungsreiz aufgrund des erhöhten, funktionellen Niveaus des Übenden. Der von verschiedenen Autoren (25, 80, 85, 100) beobachtete Plateaueffekt der Knochendichtezunahme nach 9-12monatigem Trainingszeitraum hängt möglicherweise auch mit dem Umstand zusammen, dass die Trainingsbelastung im Verlauf nicht oder nicht deutlich genug gesteigert wurde. Tierexperimentelle Untersuchungen u.a. von Raab-Cullen (106) und Westerlind et al. (145) bestärken die Forderung nach progressiver Belastungssteigerung.

### 3. Prinzip der Variation der Trainingsbelastung

Langfristiges monotones Training mit dauerhaft gleichen Trainingsinhalten und Trainingsmethoden bewirkt neben einer negativen Beeinflussung der Compliance verminderte Reizwirksamkeit und stagnierende Leistungsentwicklung (35, 79). Auf mechanischer Ebene steht dieses Trainingsprinzip eng mit der bereits diskutierten Forderung nach "ungewohnter Belastungsverteilung" (115) in Verbindung.

### 4. Prinzip des periodischen Trainingsaufbaus

Derzeit liegt unseres Wissens keine Studie vor, die den Effekt eines periodisierten Trainingsprogramms bei untrainierten Menschen im mittleren bis hohen Lebensalter untersucht. Grundsätzlich sind periodisierte Trainingsprogramme bezüglich der Kraftentwicklung Belastungsregimen ohne Periodisierung überlegen (Übersicht in 31, 73). Bei Untrainierten (Übersicht in 31), kurzer Untersuchungsdauer (< 3 Monate) und initial hohen Verbesserungen in beiden Subgruppen zeigte sich jedoch kein wesentlicher Unterschied zwischen periodisierten und nicht-periodisierten Trainingsprogrammen. Fleck (31) interpretiert diese Daten dahingehend, dass ein periodisiertes Training erst ab einem angehobenen Fitnesslevel sinnvoll ist.

### 5. Prinzip der Altersgemäßheit und Individualität

Innerhalb der Trainingsplanung und -durchführung muss die altersabhängige biologische Leistungsfähigkeit des Indi-

viduums Berücksichtigung finden. Insbesondere im höheren Alter müssen einige Besonderheiten beachtet werden (120):

- Aufgrund ihrer herabgesetzten Reagibilität sind ältere Menschen rascher ermüdbar (Kontext Reizdichte).
- Messgrößen der Trainingssteuerung wie Herzfrequenz und Blutdruck müssen aufgrund verlangsamter, ergotroper Reaktion auf Belastung anders beurteilt werden (Kontext Reizintensität).
- Regenerationsvorgänge laufen beim älteren Menschen verlangsamt ab (Kontext Trainingshäufigkeit).

## Literatur

1. Alfredson H, Nordstrom P, Pietila T, Lorentzon R: Long-term loading and regional bone mass of the arm in female volleyball players. *Calcif Tissue Int* 62 (1998) 303-308.
2. Allen SH: Exercise considerations for postmenopausal women with osteoporosis. *Arthritis Care Res* 7 (1994) 205-214.
3. Andreoli A, Monteleone M, Van Loan M, Promenzio L, Tarantino U, De Lorenzo A: Effects of different sports on bone density and muscle mass in highly trained athletes. *Med Sci Sports Exerc* 33 (2001) 507-511.
4. Ashizawa N, Nonaka K, Michikami S, et al.: Tomographical description of tennis-loaded radius: reciprocal relation between bone size and volumetric BMD. *J Appl Physiol* 86 (1999) 1347-1351.
5. Baker ER: Menstrual dysfunction and hormonal status in athletic women: a review. *Fertil Steril* 36 (1981) 691-696.
6. Barends EI, Curry DJ, Bapna MS, Kukreja SC: Effects of endurance exercise on bone mass and mechanical properties in intact and ovariectomized rats. *J Bone Miner Res* 8 (1993) 937-942.
7. Barends EI, Curry DJ, Bapna MS, Kukreja SC: Effects of two non-endurance exercise protocols on established bone loss in ovariectomized adult rats. *Calcif Tissue Int* 52 (1993) 239-343.
8. Bassey EJ: Exercise in primary prevention of osteoporosis in women. *Ann Rheum Dis* 54 (1995) 861-862.
9. Bassey EJ, Rothwell MC, Littlewood JJ, Pye DW: Pre- and postmenopausal women have different bone mineral density responses to the same high-impact exercise. *J Bone Miner Res* 13 (1998) 1805-1813.
10. Bemben DA, Fetters NL, Bemben MG, Nabavi N, Koh ET: Musculoskeletal responses to high- and low-intensity resistance training in early postmenopausal women. *Med Sci Sports Exerc* 32 (2000) 1949-1957.
11. Bennell K, Page C, Khan K, et al.: Effects of resistance training on bone parameters in young and mature rats. *Clin Exp Pharmacol Physiol* 27 (2000) 88-94.
12. Bennell KL, Malcolm SA, Khan KM, et al.: Bone mass and bone turnover in power athletes, endurance athletes, and controls: a 12-month longitudinal study. *Bone* 20 (1997) 477-484.
13. Bennell KL, Malcolm SA, Wark JD, Brukner PD: Skeletal effects of menstrual disturbances in athletes. *Scand J Med Sci Sports* 7 (1997) 261-273.
14. Berard A, Bravo G, Gauthier P: Meta-analysis of the effectiveness of physical activity for the prevention of bone loss in postmenopausal women. *Osteoporos Int* 7 (1997) 331-337.
15. Blimkie CJ, Rice S, Webber CE, Martin J, Levy D, Gordon CL: Effects of resistance training on bone mineral content and density in adolescent females. *Can J Physiol Pharmacol* 74 (1996) 1025-1033.
16. Buhl KM, Jacobs CR, Turner RT, Evans GL, Farrell PA, Donahue HJ: Aged bone displays an increased responsiveness to low-intensity resistance exercise. *J Appl Physiol* 90 (2001) 1359-1364.
17. Burr DB, Robling AG, Turner CH: Effects of biomechanical stress on bones in animals. *Bone* 30 (2002) 781-786.
18. Chae AE, Platen P, Antz R, et al.: Knochendichte bei Leistungssportler/innen aus verschiedenen Sportarten im Vergleich zu Sportstudent/innen und untrainierten Kontrollpersonen. Regulations- und Repairemechanismen 1994, Paderborn, Germany.
19. Chambers TJ, Evans M, Gardner T, Turner-Smith A, Chow JW: Induction of bone formation in rat tail vertebrae by mechanical loading. *Bone Miner* 20 (1993) 167-178.
20. Cheng S, Sipila S, Taaffe DR, Puolakka J, Suominen H: Change in bone mass distribution induced by hormone replacement therapy and high-



- impact physical exercise in post-menopausal women. *Bone* 31 (2002) 126-135.
21. *Chilibeck PD, Davison KS, Whiting SJ, Suzuki Y, Janzen CL, Peloso P*: The effect of strength training combined with bisphosphonate (etidronate) therapy on bone mineral, lean tissue, and fat mass in postmenopausal women. *Can J Physiol Pharmacol* 80 (2002) 941-950.
  22. *Creighton DL, Morgan AL, Boardley D, Brolinson PG*: Weight bearing exercise and markers of bone turnover in female athletes. *J Appl Physiol* 90 (2001) 565-570.
  23. *Cullen DM, Smith RT, Akhter MP*: Bone-loading response varies with strain magnitude and cycle number. *J Appl Physiol* 91 (2001) 5: 1971-6.
  24. *Dale E, Gerlach DH, Wilhite AL*: Menstrual dysfunction in distance runners. *Obstet Gynecol* 54 (1979) 47-53.
  25. *Dalsky GP, Stocke KS, Ehsani AA, Slatopolsky E, Lee WC, Birge SJ, Jr.*: Weight-bearing exercise training and lumbar bone mineral content in postmenopausal women. *Ann Intern Med* 108 (1988) 824-828.
  26. *Danz AM, Zittermann A, Schiedermaier U, Klein K, Hötzel D, Schönau E*: The effect of a specific strength-development exercise on bone mineral density in perimenopausal and postmenopausal women. *Journal of Women's Health* 7 (1998) 701-709.
  27. *Drinkwater BL*: Exercise in the prevention of osteoporosis. *Osteoporos Int* 3 (1993) Suppl 1, 169-171.
  28. *Duncan DS, Blimkie CJ, Cowell CT, Burke ST, Briody EN, Howman-Giles R*: Bone mineral density in adolescent female athletes: relationship to exercise type and muscle strength. *Med Sci Sports Exerc* 34 (2002) 286-294.
  29. *Etherington J, Harris PA, Nandra D, et al.*: 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 (1996) 1333-1338.
  30. *Fehling PC, Alekel L, Clasey J, Rector A, Stillman RJ*: A comparison of bone mineral densities among female athletes in impact loading and active loading sports. *Bone* 17 (1995) 205-210.
  31. *Fleck SJ*: Periodized strength training: A critical review. *J. Strength and Cond. Res.* 13 (1999) 82-89.
  32. *Frost HM*: The role of changes in mechanical usage set points in the pathogenesis of osteoporosis. *J Bone Miner Res* 7 (1992) 253-261.
  33. *Frost HM*: Why do marathon runners have less bone than weight lifters? A vital-biomechanical view and explanation. *Bone* 20 (1997) 183-189.
  34. *Gardner MM, Robertson MC, Campbell AJ*: Exercise in preventing falls and fall related injuries in older people: a review of randomised controlled trials. *Br J Sports Med* 34 (1999) 7-17.
  35. *Grosser M, Brüggemann P, Zintl F*: Leistungssteuerung in Training und Wettkampf. München: BLV-Verlag, 1986.
  36. *Haapasalo H, Kannus P, Sievanen H, Heinonen A, Oja P, Vuori I*: Long-term unilateral loading and bone mineral density and content in female squash players. *Calcif Tissue Int* 54 (1994) 249-255.
  37. *Haapasalo H, Kontulainen S, Sievanen H, Kannus P, Jarvinen M, Vuori I*: 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 (2000) 351-357.
  38. *Hagino H, Raab DM, Kimmel DB, Akhter MP, Recker RR*: The effects of ovariectomy on bone response to in vivo external loading. *J Bone Miner Res* 8 (1993) 347-357.
  39. *Hakkinen A, Sokka T, Kotaniemi A, et al.*: Dynamic strength training in patients with early rheumatoid arthritis increases muscle strength but not bone mineral density. *J Rheumatol* 26 (1999) 1257-1263.
  40. *Hakkinen K, Pakarinen A, Kraemer WJ, Newton RU, Alen M*: Basal concentrations and acute responses of serum hormones and strength development during heavy resistance training in middle-aged and elderly men and women. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci* 55 (2000) 2, B95-105.
  41. *Hart KJ, Shaw JM, Vajda E, Hegsted M, Miller SC*: Swim-trained rats have greater bone mass, density, strength, and dynamics. *J Appl Physiol* 91 (2001) 1663-1668.
  42. *Heinonen A, Oja P, Kannus P, et al.*: Bone mineral density in female athletes representing sports with different loading characteristics of the skeleton. *Bone* 17 (1995) 197-203.
  43. *Heinonen A, Oja P, Kannus P, Sievanen H, Manttari A, Vuori I*: Bone mineral density of female athletes in different sports. *Bone Miner* 23 (1993) 1-14.
  44. *Heinrich CH, Going SB, Pamentier RW, Perry CD, Boyden TW, Lohman TG*: Bone mineral content of cyclically menstruating female resistance and endurance trained athletes. *Med Sci Sports Exerc* 22 (1990) 558-563.
  45. *Hirano T, Burr DB, Turner CH, Sato M, Cain RL, Hock JM*: Anabolic effects of human biosynthetic parathyroid hormone fragment (1-34), LY333334, on remodeling and mechanical properties of cortical bone in rabbits. *J Bone Miner Res* 14 (1999) 536-445.
  46. *Honda A, Sogo N, Nagasawa S, Shimizu T, Umemura Y*: High-impact exercise strengthens bone in osteopenic ovariectomized rats with the same outcome as Sham rats. *J Appl Physiol* 95 (2003) 1032-1037.
  47. *Honda A, Umemura Y, Nagasawa S*: Effects of high-impact and low-repetition training on bones in ovariectomized rats. *J Bone Miner Res* 16 (2001) 1688-1693.
  48. *Hoshi A, Watanabe H, Chiba M, Inaba Y*: Bone Density and mechanical properties in femoral bone of swim loaded aged mice. *Biomed Environ Sci* 11 (1998) 243-250.
  49. *Hoshi A, Watanabe H, Chiba N, Inaba Y*: Effects of swimming and weight loading on bone density and mechanical properties of femoral bone in mice. *Environ Health Prev Med* 1 (1996) 128-132.
  50. *Hsieh YF, Turner CH*: Effects of loading frequency on mechanically induced bone formation. *J Bone Miner Res* 16 (2001) 918-924.
  51. *Huang TH, Lin SC, Chang FL, Hsieh SS, Liu SH, Yang RS*: Effects of different exercise modes on mineralization, structure, and biomechanical properties of growing bone. *J Appl Physiol* 95 (2003) 300-307.
  52. *Iwamoto J, Takeda T, Ichimura S*: Effect of exercise on tibial and lumbar vertebral bone mass in mature osteopenic rats: bone histomorphometry study. *J Orthop Sci* 3 (1998) 257-263.
  53. *Iwamoto J, Takeda T, Ichimura S*: Effects of exercise on bone mineral density in mature osteopenic rats. *J Bone Miner Res* 13 (1998) 1308-1317.
  54. *Jarvinen TL, Kannus P, Sievanen H, Jolma P, Heinonen A, Jarvinen M*: Randomized controlled study of effects of sudden impact loading on rat femur. *J Bone Miner Res* 13 (1998) 1475-1482.
  55. *Jee WS, Li XJ*: Adaption of cancellous bone to overloading in the adult rat. A single photon absorptiometry and histomorphometry study. *Anat Rec* 227 (1990) 418-426.
  56. *Judex S, Zernicke RF*: Does the mechanical milieu associated with high-speed running lead to adaptive changes in diaphyseal growing bone? *Bone* 26 (2000) 153-159.
  57. *Judex S, Zernicke RF*: High-impact exercise and growing bone: relation between high strain rates and enhanced bone formation. *J Appl Physiol* 88 (2000) 2183-2191.
  58. *Kannus P, Haapasalo H, Sankelo M, et al.*: Effect of starting age of physical activity on bone mass in the dominant arm of tennis and squash players. *Ann Intern Med* 123 (1995) 27-31.
  59. *Karlsson MK, Magnusson H, Karlsson C, Seeman E*: The duration of exercise as a regulator of bone mass. *Bone* 28 (2001) 128-132.
  60. *Kelley GA*: Exercise and regional bone mineral density in postmenopausal women: a meta-analytic review of randomized trials. *Am J Phys Med Rehabil* 77 (1998) 76-87.
  61. *Kemmler W, Engelke K, Lauber D, Weineck J, Hensen J, Kalender WA*: Exercise effects on fitness and BMD in early postmenopausal women: 1 year EFOPS results. *Med Sci Sports Exerc* 34 (2002) 2115-2123.
  62. *Kemmler W, Engelke K, Lauber D, Weineck J, Hensen J, Kalender WA*: Impact of intense exercise on physical fitness, quality of life, and bone mineral density in early postmenopausal women. Year 2 results of the Erlangen Fitness Osteoporosis Prevention Study (EFOPS). *Arch Int Med* accepted for publication (2003).
  63. *Kemmler W, Riedel H*: Körperliche Belastung und Osteoporose - Einfluß einer 10monatigen Interventionsmaßnahme auf ossäre und extraossäre Risikofaktoren einer Osteoporose. *Dtsch Z Sportmed* 49 (1998) 270-277.
  64. *Kemmler W, Weineck J, Hensen J, Lauber D, Kalender WA, Engelke K*: Exercise in the early menopause prevents bone loss and reduces CHD risk factors: 3 year results of the Erlangen Fitness Osteoporosis Prevention Study (EFOPS). *JAMA* submitted (2003).
  65. *Kemmler W, Wildt L, Engelke K, et al.*: Acute hormonal responses of a high impact physical exercise session in early postmenopausal women. *Eur J Appl Physiol* 90 (2003) 199-209.
  66. *Kerr D, Ackland T, Maslen B, Morton A, Prince R*: Resistance training over 2 years increases bone mass in calcium-replete postmenopausal women. *J Bone Miner Res* 16 (2001) 175-181.
  67. *Kerr D, Morton A, Dick I, Prince R*: Exercise effects on bone mass in postmenopausal women are site-specific and load-dependent. *J Bone Miner Res* 11 (1996) 218-225.
  68. *Kodama Y, Umemura Y, Nagasawa S, et al.*: Exercise and mechanical loading increase periosteal bone formation and whole bone strength in C57BL/6J mice but not in C3H/HeJ mice. *Calcif Tissue Int* 66 (2000) 298-306.

69. Kohrt WM: Osteoprotective benefits of exercise: more pain, less gain? *J Am Geriatr Soc* 49 (2002) 1565-1567.
70. Konermann W, Stubbe F, Link T, Meier N: Axiale Bruchfestigkeit von thorakolumbalen Wirbelkörpern - eine experimentelle biomechanische Studie. *Z Orthopädie* 137 (1999) 223-231.
71. Kontulainen S, Sievanen H, Kannus P, Pasanen M, Vuori I: Effect of long-term impact-loading on mass, size, and estimated strength of humerus and radius of female racquet-sports players: a peripheral quantitative computed tomography study between young and old starters and controls. *J Bone Miner Res* 17 (2002) 2281-2289.
72. Kraemer WJ: Endocrine responses to resistance exercise. *Med Sci Sports Exerc* 20 (1988) 5 Suppl, S152-157.
73. Kraemer WJ: A series of studies - the physiological basis for strength training in American Football: Fact over philosophy. *J. Strength and Cond. Res.* 11 (1997) 131-142.
74. Kraemer WJ: Acute and long term hormonal adaptations to strength training in men and women. International Conference on weightlifting and strength training 1998, Lahti, Finland: 23-28.
75. Lanyon LE: Functional strain as a determinant for bone remodeling. *Calcif Tiss Int* 36 (1984) 56-61.
76. Lanyon LE: Biomechanical factors in adaptation of bone structure to function. In: Uthoff HK, ed. Current concepts of bone fragility. Berlin: Springer, 1986.
77. Lanyon LE: Using functional loading to influence bone mass and architecture: objectives, mechanisms, and relationship with estrogen of the mechanically adaptive process in bone. *Bone* 18 (1996) 1 Suppl, 375-435.
78. Lee EJ, Long KA, Risser WL, Poindexter HB, Gibbons WE, Goldzieher J: Variations in bone status of contralateral and regional sites in young athletic women. *Med Sci Sports Exerc* 27 (1995) 1354-1361.
79. Letzelter M: Trainingsgrundlagen. Reinbek bei Hamburg: rororo-Verlag, 1987.
80. Lohman T, Going S, Pamerter R, et al.: Effects of resistance training on regional and total bone mineral density in premenopausal women: a randomized prospective study. *J Bone Miner Res* 10 (1995) 1015-1024.
81. Lord SR, Ward JA, Williams P, Zivanovic E: The effect of a community exercise program on fracture risk factors in older women. *Osteoporos Int* 6 (1996) 361-367.
82. MacKelvie KJ, Khan KM, McKay HA: Is there a critical period for bone response to weight-bearing exercise in children and adolescents? a systematic review. *Br J Sports Med* 36 (2002) 250-257; discussion 257.
83. Marcus R: Relationship of age-related decreases in muscle mass and strength to skeletal status. *J Gerontol* 50 (1995) 86-87.
84. Matwejew LP: Periodisierung des sportlichen Trainings. Berlin: Barthels & Wernitz, 1978.
85. Mayoux-Benhamou MA, Bagheri F, Roux C, Auleley GR, Rabourdin JP, Revel M: Effects of psoas training on postmenopausal lumbar bone loss: a 3-year follow-up study. *Calcified Tiss Int* 60 (1997) 348-353.
86. McLeod KJ, Rubin CT: Sensitivity of the bone remodeling response to the frequency of applied strain. *Trans Orthop Res Soc* 17 (1992) 533.
87. Morel J, Combe B, Francisco J, Bernard J: Bone mineral density of 704 amateur sportsmen involved in different physical activities. *Osteoporos Int* 12 (2001) 152-157.
88. Mosekilde L, Danielsen CC, Sogaard CH, Thorling E: The effect of long-term exercise on vertebral and femoral bone mass, dimension, and strength - assessed in a rat model. *Bone* 15 (1994) 293-301.
89. Mosley JR, Lanyon LE: Strain rate as a controlling influence on adaptive modeling in response to dynamic loading of the ulna in growing male rats. *Bone* 23 (1998) 313-318.
90. Myburgh KH, Noakes TD, Roodt M, Hough FS: Effect of exercise on the development of osteoporosis in adult rats. *J Appl Physiol* 66 (1989) 14-19.
91. Nara-Ashizawa N, Liu LJ, Higuchi T, et al.: Paradoxical adaption of mature radius to unilateral use in tennis playing. *Bone* 30 (2002) 619-623.
92. Nelson DA, Boussein ML: Exercise maintains bone mass, but do people maintain exercise? *J Bone Miner Res* 16 (2001) 202-205.
93. Nelson ME, Meredith CN, Dawson-Hughes B, Evans WJ: Hormone and bone mineral status in endurance-trained and sedentary women. *J Clin Endocrinol Metab* 66 (1988) 927-933.
94. Nilsson BE, Westlin NE: Bone density in athletes. *Clin Orthop* 77 (1971) 179-182.
95. Notomi T, Lee SJ, Okimoto N, et al.: Effects of resistance exercise training on mass, strength, and turnover of bone in growing rats. *Eur J Appl Physiol* 82 (2000) 268-274.
96. Notomi T, Okazaki Y, Okimoto N, Saitoh S, Nakamura T, Suzuki M: A comparison of resistance and aerobic training for mass, strength and turnover of bone in growing rats. *Eur J Appl Physiol* 83 (2000) 469-474.
97. Notomi T, Okimoto N, Okazaki Y, Nakamura T, Suzuki M: Tower climbing exercise started 3 month after ovariectomy recovers bone strength of the femur and lumbar vertebrae in aged osteopenic rats. *J Bone Miner Res* 18 (2003) 140-149.
98. Notomi T, Okimoto N, Okazaki Y, Tanaka Y, Nakamura T, Suzuki M: Effects of tower climbing exercise on bone mass, strength, and turnover in growing rats. *J Bone Miner Res* 16 (2001) 166-174.
99. Peng Z, Tuukkanen J, Vaananen HK: Exercise can provide protection against bone loss and prevent the decrease in mechanical strength of femoral neck in ovariectomized rats. *J Bone Miner Res* 9 (1994) 1559-1564.
100. Prince RL, Devine A, Dick I, et al.: The effect of calcium supplementation (milk powder or tablets) and exercise on bone density in postmenopausal women. *J Bone Miner Res* 10 (1995) 1068-1075.
101. Province MA, Hadley EC, Hornbrook MC, et al.: The effects of exercise on falls in elderly patients. A preplanned meta-analysis of the FICSIT Trials. Frailty and Injuries: Cooperative Studies of Intervention Techniques. *JAMA* 273 (1995) 1341-1347.
102. Puustjarvi K, Nieminen J, Rasanen T, et al.: Do more highly organized collagen fibrils increase bone mechanical strength in loss of mineral density after one-year running training? *J Bone Miner Res* 14 (1999) 321-329.
103. Pyka G, Wiswell RA, Marcus R: Age-dependent effect of resistance exercise on growth hormone secretion in people. *J Clin Endocrinol Metab* 75 (1992) 404-407.
104. Qin YX, Rubin CT, McLeod KJ: Nonlinear dependence of loading intensity and cycle number in the maintenance of bone mass and morphology. *Journal of Orthopaedic Research* 16 (1998) 482-489.
105. Raab DM, Smith EL, Crenshaw TD, Thomas DP: Bone mechanical properties after exercise training in young and old rats. *J Appl Physiol* 68 (1990) 130-134.
106. Raab-Cullen DM, Akhter MP, Kimmel DB, Recker RR: Bone response to alternate-day mechanical loading of the rat tibia. *J Bone Miner Res* 9 (1994) 203-211.
107. Raab-Cullen DM, Akhter MP, Kimmel DB, Recker RR: Periosteal bone formation stimulated by externally induced bending strength. *J Bone Miner Res* 9 (1994) 1143-1152.
108. Ringe JD, Ibbeken F, Steinhagen-Thiessen E, Meier-Baumgartner HP: Osteoporoseprävention durch Gymnastik in höherem Lebensalter. *Z Geriatrie* 1 (1988) 86-90.
109. Robertson MC, Campbell AJ, Gardner MM, Devlin N: Preventing injuries in older people by preventing falls: A meta analysis of individual-level data. *J Am Geriatr Soc* 50 (2002) 905-911.
110. Robertson TL, Snow-Harter C, Taaffe DR, Gillis D, Shaw J, Marcus R: Gymnasts exhibit higher bone mass than runners despite similar prevalence of amenorrhea and oligomenorrhea. *J Bone Miner Res* 10 (1995) 26-35.
111. Robling AG, Burr DB, Turner CH: Recovery periods restore mechanosensitivity to dynamically loaded bone. *J Exp Biol* 204 (2001) 3389-3399.
112. Robling AG, Hinant FM, Burr DB, Turner CH: Shorter, more frequent mechanical loading sessions enhance bone mass. *Med Sci Sports Exerc* 34 (2002) 196-202.
113. Rubin CT, Bain SD, McLeod KJ: Suppression of the osteogenic response in the aging skeleton. *Calcif Tissue Int* 50 (1992) 306-313.
114. Rubin CT, Donahue HJ, Rubin JE, McLeod KJ: Optimization of electric field parameters for the control of bone remodeling: Exploitation of an indigenous mechanism for the prevention of osteopenia. *J Bone Miner Res* 8 (1993) Suppl 2, S573-S581.
115. Rubin CT, Lanyon LE: Regulation of bone formation by applied dynamic loads. *J Bone Joint Surg Am* 66 (1984) 397-402.
116. Rubin CT, Lanyon LE: Regulation of bone mass by mechanical strain magnitude. *Calcif Tissue Int* 37 (1985) 411-417.
117. Rubin CT, McLeod KJ: Promotion of bony ingrowth by frequency specific, low-amplitude mechanical strain. *Clin Orthop* 298 (1994) 165-174.
118. Rubin CT, Turner AS, Müller R, et al.: Quantity and quality of trabecular bone in the femur are enhanced by a strongly anabolic, noninvasive mechanical intervention. *J Bone Miner Res* 17 (2002) 349-357.
119. Schoenau E, Frost HM: The muscle-bone unit in children and adolescents. *Calc Tiss Int* 75 (2002) 405-407.
120. Seidel EJ, Wick C, Scheibe J: Besonderheiten des sportlichen Trainings beim älteren Menschen. *Phys Med* 4 (1994) 158-159.

121. Senn E: Grundlagen der positiv-trophischen Wirksamkeit physikalischer Belastung auf normales, osteopenisches und osteoporotisches Knochen- gewebe. *Phys Med* 4 (1994) 133-134.
122. Sidney KH, Shephard RJ, Harrison JE: Endurance training and body composition of the elderly. *Am J Clin Nutr* 30 (1977) 326-333.
123. Simkin A, Leichter I, Swissa A, Samueloff S: The effect of swimming activity on bone architecture in growing rats. *J Biomech* 22 (1989) 845-851.
124. Sinaki M, Wahner HW, Bergstralh EJ, et al.: Three-year controlled, randomized trial of the effect of dose-specified loading and strengthening exercises on bone mineral density of spine and femur in nonathletic, physically active women. *Bone* 19 (1996) 233-244.
125. Singh R, Umemura Y, Honda A, Nagasawa S: Maintenance of bone mass and mechanical properties after short-term cessation of high impact exercise in rats. *Int J Sports Med* 23 (2002) 77-81.
126. Smidt GL, Lin SY, O'Dwyer KD, Blanpied PR: The effect of high-intensity trunk exercise on bone mineral density of postmenopausal women. *Spine* 17 (1992) 280-285.
127. Smith EL, Reddan W, R. C, et al.: Physical activity and calcium modalities for bone mineral increase in aged women. *Med Sci Sports Exerc* 13 (1981) 60-64.
128. Sogaard CH, Danielsen CC, Thorling EB, Mosekilde L: Long-term exercise of young and adult female rats: effect on femoral neck biomechanical competence and bone structure. *J Bone Miner Res* 9 (1994) 409-416.
129. Srinivasan S, Weimer DA, Agans SC, Bain SD, Gross TS: Low-magnitude mechanical loading becomes osteogenic when rest is inserted between each load cycle. *J Bone Miner Res* 17 (2002) 1613-1620.
130. Swissa-Sivan A, Azoury R, Statter A, et al.: The effect of swimming on bone modeling and composition in young adult rats. *Calcif Tissue Int* 47 (1990) 173-177.
131. Swissa-Sivan A, Simkin A, Leichter I, et al.: Effect of swimming on bone growth and development in young rats. *Bone Miner* 7 (1989) 91-105.
132. Taaffe DR, Snow-Harter C, Connolly DA, Robinson TL, Brown MD, Marcus R: Differential effects of swimming versus weight-bearing activity on bone mineral status of eumenorrhic athletes. *J Bone Miner Res* 10 (1995) 586-593.
133. Turner CH: Homeostatic control of bone structure: an application of feedback theory. *Bone* 12 (1991) 203-217.
134. Turner CH, Forwood MR, Otter MW: Mechanotransduction in bone: do bone cells act as sensors of fluid flow? *Faseb J* 8 (1994) 875-878.
135. Turner CH, Forwood MR, Rho JY, Yoshikawa T: Mechanical loading thresholds for lamellar and woven bone formation. *J Bone Miner Res* 9 (1994) 87-97.
136. Turner CH, Owan I, Takano Y: Mechanotransduction in bone: role of strain rate. *Am J Physiol Endocrinol Metab* 269 (1995) E438-E442.
137. Umemura Y, Ishiko T, Yamauchi T, Kurono M, Mashiko S: Five jumps per day increase bone mass and breaking force in rats. *J Bone Miner Res* 12 (1997) 1480-1485.
138. Umemura Y, Sogo N, Honda A: Effects of intervals between jumps or bouts on osteogenic response to loading. *J Appl Physiol* 93 (2002) 1345-1348.
139. van der Wiel HE, Lips P, Graafmans WC, et al.: Additional weight-bearing during exercise is more important than duration of exercise for anabolic stimulus of bone: a study of running exercise in female rats. *Bone* 16 (1995) 73-80.
140. Veeland JF, Link TM, Konermann W, Meier N, Grashuis JL, Gelsema ES: Unraveling the role of structure and density in determining vertebral bone strength. *Calcif Tissue Int* 61 (1997) 474-479.
141. Vuori I, Heinonen A, Sievanen H, Kannus P, Pasanen M, Oja P: Effects of unilateral strength training and detraining on bone mineral density and content in young women: a study of mechanical loading and deloading on human bones. *Calcif Tissue Int* 55 (1994) 59-67.
142. Vuori IM: Dose-response of physical activity and low back pain, osteoarthritis, and osteoporosis. *Med Sci Sports Exerc* 33 (2001) 6 Suppl, S551-S586.
143. Wallace BA, Cumming RG: Systematic review of randomized trials of the effect of exercise on bone mass in pre- and postmenopausal women. *Calcif Tissue Int* 67 (2000) 10-18.
144. Weineck J: Optimales Training. Erlangen: Spitta-Verlag, 2000.
145. Westerlind KC, Fluckey JD, Gordon SE, Kraemer WJ, Farrell PA, Turner RT: Effect of resistance exercise training on cortical and cancellous bone in mature male rats. *J Appl Physiol* 84 (1998) 459-464.
146. Whalen RT, Carter DR: Influence of physical activity on the regulation of bone density. *J Biomech* 21 (1988) 825-837.
147. Wolff I, van Croonenborg JJ, Kemper HC, Kostense PJ, Twisk JW: The effect of exercise training programs on bone mass: a meta-analysis of published controlled trials in pre- and postmenopausal women. *Osteoporos Int* 9 (1999) 1-12.
148. Woo SL, Kuei SC, Amiel D, et al.: The effect of prolonged physical training on the properties of long bone: a study of Wolff's Law. *J Bone Joint Surg Am* 63 (1981) 780-787.
149. Yamagata M, Hideshige M, Goto S, Takahashi K: Relationship between mechanical strength and bone mineral density of the vertebral shell and core. In: Cohn DV, Glorieux FH, Martin TJ, eds. Calcium regulation and bone metabolism: Elsevier Science Publishers, 1990, 502-508.
150. Zittermann A, Sabatschus O, Jantzen S, et al.: Exercise trained young men have higher calcium absorption rates and plasma calcitriol levels compared with age-matched sedentary controls. *Calcif Tissue Int* 67 (2000): 215-219.

**Korrespondenzadresse:**  
**Dr. Wolfgang Kemmler, Osteoporoseforschungszentrum**  
**Institut für Medizinische Physik**  
**Friedrich-Alexander Universität Erlangen**  
**Krankenhausstraße 12**  
**91054 Erlangen**  
**Fax: 09131-8522824**  
**E-mail: wolfgang.kemmler@imp.uni-erlangen.de**