

¹Kemmler W, ¹von Stengel S, ²Lauber D, ²Weineck J, ¹Kalender WA, ¹Engelke K

Umsetzung leistungssportlicher Prinzipien in der Osteoporose-Prophylaxe – Zusammenfassende Ergebnisse der Erlanger Fitness und Osteoporose Präventions- Studie (EFOPS)

Exercise and Osteoporosis – Summary of the Erlangen Fitness and Osteoporosis Prevention Study

¹Osteoporosezentrum, Institut für Medizinische Physik, Erlangen-Nürnberg

²Institut für Sport und Sportwissenschaft, Universität Erlangen-Nürnberg

Zusammenfassung

Problemstellung: Wir untersuchten den Effekt eines fünfjährigen Trainingsprogramms auf die Knochendichte unterschiedlicher Körperregionen bei früh-postmenopausalen osteopenischen Frauen.

Methoden: 86 Frauen ohne Einnahme von Medikamenten mit Auswirkungen auf den Knochenstoffwechsel führten ein komplexes intensives körperliches Training durch, 51 Frauen dienten als nicht trainierende Kontrollgruppe. Beide Gruppen wurden individualisiert mit Kalzium und Vitamin-D supplementiert. Das Trainingsprogramm setzte sich aus einem 2-3maligen gemeinsamen Training sowie einem 1-2maligen Heimprogramm pro Woche zusammen. Trainingsinhalte und Belastungsnormativa orientierten sich an trainingswissenschaftlichen Erkenntnissen sowie an tierexperimentellen Untersuchungen und humanen Querschnittsstudien.

Ergebnisse: Während der initialen 3jährigen Trainingsphase zeigten sich signifikante Zwischengruppenunterschiede zwischen Trainings- und Kontrollgruppe für die Knochendichte an der LWS (DXA: 0.4% vs. -2.8%; QCT trabekulärer VOI: 1.0 vs. -7.6%) und am proximalen Femur (DXA: -0.5% vs. -1.9%) während am distalen Unterarm vergleichbare, hochsignifikante Reduktionen der Knochendichte (ca. -4%) erfasst wurden. Um den Stellenwert der Bewegungsgeschwindigkeit für den Knochen zu bestimmen, wurde im Rahmen der EFOPS-Extension die Trainingsgruppe für das dynamischen Muskeltraining randomisiert in eine Gruppe mit schneller und eine mit langsamer Bewegungsausführung aufgeteilt. Nach zwei weiteren Jahren dieser Intervention wurden nur für die LWS-Region signifikante Zwischengruppenunterschiede zwischen schnell- und langsam trainierender Gruppe (-0.3% vs. -2.4%) nachgewiesen.

Diskussion: Die Untersuchung belegt den positiven Effekt eines intensiven, leistungssportlich ausgerichteten Trainings auf die Knochendichte bei Frauen in einer kritischen Lebensphase.

Schlüsselwörter: Knochendichte, Training, postmenopausal, Periodisierung, Schnellkraft

Einleitung

Die Zeit des Klimakteriums und der frühen Menopause ist ein kritischer Abschnitt im Leben der Frau. Verbunden mit

Summary

Introduction: We investigated the effect of a five-year high-intensity training program on bone mineral density (BMD) in early-postmenopausal osteopenic women (55 ± 3 yr.).

Methods: 86 women participated in the exercise group (EG), 51 women served as non-training control group (CG). Both groups were individually supplemented with calcium and Vit. D. Four training sessions/week were carried out in the EG. The training program was designed according to recent results from experimental animal and cross-sectional human studies.

Results: After the initial 3 years, differences between EG and CG were observed for BMD at the lumbar spine (DXA: 0.5% vs. -2.8%; QCT trabecular VOI: 1.0 vs. -7.6%) and the femoral neck (-0.5 vs. -1.9%) while both groups significantly lost BMD (ca. -4%) at the distal forearm. In order to determine the effect of movement velocity, subjects were then assigned either to a strength with low movement velocity or to a power training group with high movement velocity during the dynamic strength sequence. After two additional years of exercise, between-group differences were demonstrated for BMD of the lumbar spine (strength: -2.4% vs. power: -0.3%) but not for the proximal femur or distal forearm. An analysis of bone kinetics showed that BMD peaks were realized after year one and again after year four.

Discussion: General purpose exercise programs with special emphasis on training methodology can significantly reduce bone loss in early-menopausal woman.

Key words: exercise, bone mineral density, postmenopausal women, periodization, power

dem sukzessiven Verlust des endogenen Östradiolschutzes kommt es in dieser Lebensperiode insbesondere zu einer deutlichen Abnahme der Knochenmassen und -dichte. Körperliches Training mit vergleichsweise unspezifischen Trainingsinhalten wie Kraft- oder Sprungetraining, das

prä- wie auch spät-postmenopausal signifikant positiven Einfluss auf die Knochendichte zeigt (21, 22) scheint in dieser Lebensphase oft nur marginalen Einfluss auf die Knochendichte als wichtigen Parameter der Knochenfestigkeit auszuüben (4). In der Tat überschreiten prämenopausal wirksame Belastungsreize (1, 15) die durch Hormonentzug angehobene Reizschwelle (16) nicht mehr. Zieht man weiterhin die Tatsache in Betracht, das innerhalb unserer bewegungsverarmten Gesellschaft die Bereitschaft zeitaufwendige Präventionsprogramme durchzuführen gering ist (13), so sollte die vergleichsweise kurze zur Verfügung stehende Trainingszeit bestmöglichst ausgenutzt werden. Diese Forderung korreliert mit dem Einsatz anerkannter Trainingsprinzipien und einer grundsätzlich intensitätsorientierten Belastungsgestaltung (9).

In diesem Sinne war es ein wesentliches Anliegen der EFOPS-Studie, den Einfluss optimierter körperlicher Belastung auf Knochenparameter bei frühpostmenopausalen Frauen mit Osteopenie über einen längeren Zeitraum zu erfassen. Um eine Transformierbarkeit unserer Intervention in die Trainingspraxis ambulanter Bewegungsangebote sicherzustellen und so den Modellcharakter unserer Untersuchung zu betonen, orientierten wir uns sehr eng an deren organisatorischen und trainingsmethodischen Rahmenbedingungen. Ziel des vorliegenden Artikels ist es eine abschließende Übersicht über die kumulierten Studienergebnisse zu präsentieren und die Motivation zur Auswahl der angewandten Trainingsinhalte und Belastungsnormativa zu diskutieren.

Material und Methode

Die EFOPS-Studie ist eine fünfjährige kontrollierte, nicht-randomisierte Untersuchung. Die Untersuchung wurde vom Bundesamt für Strahlenschutz (S9108-202/97/1, S21-22112-81-00), vom Bayerischen Landesamt für Arbeitsschutz (13B/3443-4/5/98) sowie von der Ethikkommission der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (Ethik Antrag 905) genehmigt. Alle Teilnehmerinnen gaben vor Beginn der Untersuchung ihre schriftliche Einwilligung ab.

Stichprobe

Insgesamt 137 frühpostmenopausale (1-8 Jahre) Frauen mit einer Osteopenie gemäß WHO wurden in die Untersu-

chung aufgenommen. Ausgeschlossen wurden Frauen mit Einnahme von Medikamenten sowie Erkrankungen mit

Tabelle 1: Anthropometrische Daten und Knochendichte zu Beginn der Untersuchung. BMI: Body Mass Index; DXA: Dual Energy X-ray Absorptiometry; pa: posterior-anterior; QCT: Qualitative Computertomographie.

Variable	TG (n = 86)	KG (n = 51)	Unterschied
Lebensalter [Jahre]	55.1 ± 3.3	55.8 ± 3.1	n.s.
BMI [kg/m ²]	25.2 ± 3.3	25.4 ± 4.4	n.s.
Gesamtkörperfett [%]	36.0 ± 5.0	35.0 ± 7.2	n.s.
Menarchealter [Jahre]	13.4 ± 1.4	13.3 ± 1.6	n.s.
Alter bei Menopause [Jahre]	50.5 ± 3.3	50.4 ± 3.1	n.s.
Maximale Sauerstoffaufnahme (l/min)	1.77 ± 0.40	1.75 ± 0.31	n.s.
Energieaufnahme [kJ/d]	7731 ± 1366	7577 ± 2143	n.s.
Kalziumaufnahme [mg/d]	1055 ± 379	989 ± 290	n.s.
Vitamin-D Aufnahme [µg/d]	5.1 ± 4.1	5.5 ± 5.3	n.s.
Osteoporose bei näheren Verwandten [% je Gruppe]	16%	14%	n.s.
Corticosteroide (>5 mg/d) oder Thyroxin (≥75 mg/d) über > 6 Monate [% je Gruppe]	11%	12%	n.s.
Raucher [% je Gruppe]	9%	10%	n.s.
Knochendichte			
DXA pa L1-L4 [g/cm ²]	0.869 ± 0.090	0.874 ± 0.094	n.s.
QCT trabekulärer L1-L3 [mg/cm ³]	94.0 ± 19.9	95.9 ± 17.8	n.s.
DXA Gesamtfemur [g/cm ²]	0.857 ± 0.081	0.841 ± 0.070	n.s.
DXA ultradistaler Radius [g/cm ²]	0.421 ± 0.052	0.408 ± 0.050	n.s.

Wirkung auf den Knochenmetabolismus innerhalb der vergangenen zwei Jahre, sekundäre Osteoporosen, bekannte osteoporotische Frakturen, entzündliche Erkrankungen, Herz-Kreislauf-Erkrankungen, sehr geringe körperliche Leistungsfähigkeit (< 75 Watt auf dem Fahrradergometer) sowie Sporttreiben auf leistungssportlichem Niveau (Wettkampfteilnahme) in den zwei Dekaden vor Studienstart. Tabelle 1 zeigt die Charakteristika der 86 Personen der Trainingsgruppe sowie der 51 Teilnehmerinnen der Kontrollgruppe.

Nach 3 Jahren EFOPS-Studie waren insgesamt 53 Personen der Trainingsgruppe bereit an der weitergehenden Fragestellung der Jahre 4 und 5 teilzunehmen und wurden randomisiert in die zwei Trainingsarme, eine schnell und eine langsam trainierende Krafttrainingsgruppe (s.u.) eingeteilt. 28 Frauen der Kontrollgruppe erklärten sich bereit an der EFOPS-Extension teilzunehmen.

Intervention

Die Interventionsmaßnahme(n) wurde schon mehrfach beschrieben (5, 19), sodass hier nur eine kurze Zusammenfassung erfolgen soll. Zusammenfassend bestand die Intervention aus einer Trainingsmaßnahme für die Trainingsgruppe sowie aus einer Kalzium- und Vit-D-Versorgung für das gesamte Kollektiv. In Abhängigkeit vom Ergebnis einer 5-tägigen Ernährungsanalyse (5) wurde durch Kalzium- und Cholecalciferolgabe eine Gesamtaufnahme von 1500 mg/Tag Kalzium und 500 IE/Tag Vit-D sichergestellt. Das Trainingsprogramm gliederte sich in zwei (EFOPS) später drei (EFOPS-Extension) gemeinsame Trainingseinheiten (je 60 min) und zwei (EFOPS) später eine Heimtrainingseinheit (je 20-25 min) pro Woche. Eine

Überprüfung der Trainingshäufigkeit (Attendance) sowie der Vollständigkeit (Compliance) der Trainingsdurchführung erfolgte mittels Anwesenheitslisten und Trainingsplänen.

Die gemeinsame Trainingseinheit erfolgte an zwei nicht aufeinander folgenden Tagen und wurde von speziell geschulten Osteoporose-Übungsleitern angeleitet. Die Teilnehmerzahl je Gruppe betrug 10-15 Personen. Die Einheit gliederte sich in 3 Sequenzen:

1. „Ausdauersequenz“: Laufen, kleine Spiele, Low- und zunehmend High-Impact-Aerobic bei 65-85% HFmax über 20 min. Maximale Bodenreaktionskräfte (MTD-Systems, Neuburg vorm Wald): 1445 ± 232 N. (Körpergewicht: 65.3 ± 6.9 kg).
2. „Sprungsequenz“ (Einführung nach 5-6 Monaten): unterschiedliche multidirektionale Sprungformen mit zunehmendem Schwierigkeitsgrad. 4 mal 15 Wiederholungen mit 0.5-2 Hz. Maximale Bodenreaktionskräfte: 2363 ± 462 N. (3.2 faches Körpergewicht)
3. „Kraftsequenz“: Schwerpunkt der Intervention.

Jahr 1-3: Je ein geräteabhängiges sowie ein geräteunabhängiges Krafttraining

Jahr 4-5: Zwei geräteabhängige Trainingseinheiten und eine geräteunabhängige Trainingseinheit.

Das Krafttraining an Geräten (Technogym, Gambettola, Italien) bestand grundsätzlich aus 13 Übungen für alle großen Muskelgruppen. Nach einer siebenmonatigen Einführungszeit während der die Teilnehmerinnen langsam an höhere Belastungsintensitäten und Volumina herangeführt wurden, erfolgte ein Trainingsperiodisierung im Sinne eines regelmäßigen Wechsels von 12wöchigen linear und nicht linear periodisierten hochintensiven Belastungsphasen (70-92.5% des Einwiederholungsmaximums: 1RM) und regenerativ orientierten Trainingsphasen (7).

Derselbe Trainingsmodus erfolgte während der ersten drei Studienjahre innerhalb der geräteunabhängigen Trainingseinheiten mit Kurzhanteln und Gewichtswesten für die Übungen „Kurzhantelrudern“, „Kniebeugen/Powercleans“ und „Brustdrücken“. Weiterhin waren funktionsgymnastische und isometrische Trainingsformen, die mit hoher Reizintensität durchgeführt werden sollten, Inhalte der geräteunabhängigen Kraftsequenz. Nach Beendigung des 3. Studienjahres ersetzte eine zweite geräteabhängige Krafttrainingseinheit die Übungssequenz mit Kurzhanteln und Gewichtswesten. In der hinzugekommenen gemeinsamen Trainingseinheit erfolgten ausschließlich funktionsgymnastische und isometrische Trainingsformen.

Die Bewegungsgeschwindigkeit als ein wesentliches Belastungsnormativa für ein erfolgreiches Training „am Knochen“ wurde während der Intervention ebenfalls verändert. Während der drei ersten Studienjahre wurde die Bewegungsgeschwindigkeit der Bewegungsausführung über die Vorgabe der Zeit im dynamischen konzentrischen Bereich (2 s) im isometrischen (1 s) und im dynamisch exzentrischen Bereich (2 s) vorgegeben. Um den Effekt schneller Bewegungsausführung auf den Knochen zu überprüfen, erfolgte in den Studienjahren 4 und 5 nach randomisierter Auftei-

lung der Studiengruppen entweder eine explosive Bewegungsausführung im dynamisch konzentrischen Bereich gefolgt von einer langsamen Bewegungsausführung (4 s je einzelner Bewegungsausführung) versus einer Bewegungsausführung von 4 s im dynamisch konzentrischen gefolgt von einer ebenso langsamen Bewegungsgeschwindigkeit (4 s) im dynamisch exzentrischen Bereich.

Die Heimtrainingseinheit bestand aus einem regelmäßig wechselnden Programm aus Seilspringen (4 mal 20 Wdh. mit 2 Hz.) sowie einem isometrischen Maximalkrafttraining mit 8-10 Übungen, 2-3 Sätzen über 6-12 s bei maximaler Anspannung und einer Pausendauer von 20 Sekunden. Während der ersten drei Studienjahre sollten zwei im Anschluss eine Heimtrainingseinheit pro Woche durchgeführt werden.

Meßgrößen

Eine dezidierte Vorstellung unserer Meßmethodik wurde bereits vorgenommen (6, 5, 19), sodass hier nur eine knappe Auflistung der wichtigsten Parameter erfolgen soll.

Maximalkraft

Zur Leistungsdiagnostik und insbesondere Bezugswertstellung wurde die dynamischen Maximalkraft (1RM-Test) bei Ausführung der Testübungen „Beinpresse“, „beidbeiniger Beinadduktion“, „beidarmiges Rudern“ und „Brustdrücken“ trainingsbegleitend an Krafttrainingsgeräten (Technogym, Gambettola, Italien) jeweils vor und nach einer hochintensiven Belastungsphase gemäß dem Protokoll von Kraemer (10) bestimmt.

Knochendichte

Die Knochendichte wurde an den LWK 1-4, am proximalen Femur (Region of Interest (ROI): „total hip“, Schenkelhals) und am distalen Unterarm mittels DXA (Hologic QDR 4500a, Bedford USA) untersucht. Die Knochendichte der LWK 1-3 (trabekulärer und kortikaler ROI) wurde während der ersten 3 Jahre zudem mit einer QCT-Messung (Siemens Somatom Plus4) gemessen.

Schmerzhäufigkeit und Intensität

Die Schmerzhäufigkeit und -stärke unterschiedlicher Skelettregionen wurde mittels standardisiertem Fragebogen in Anlehnung an die Studien von Jensen et al. (3) und der Osteoporosis Quality of Life Study Group (2) evaluiert. Die Skala des Fragebogens reichte von 0 (Schmerzhäufigkeit: nie; Schmerzstärke: keine) bis 7 (Schmerzhäufigkeit: sehr häufig; Schmerzstärke: sehr stark). Die Antworten repräsentieren die Schmerzhäufigkeit und -stärke zum Zeitpunkt der Abfrage. Der Reproduzierbarkeitsfehler ist kleiner als 5%.

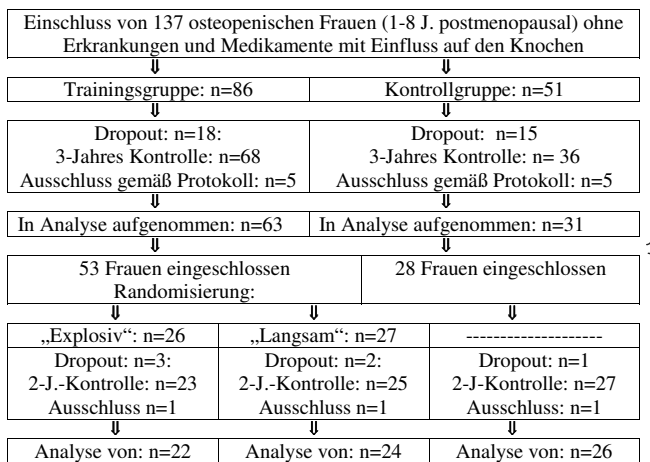


Abbildung 1: Studiendesign der EFOPS und EFOPS-Extensions-Studie.

Statistik

Mittelwerte und Standardabweichungen, prozentuale Veränderungen im Verlauf sowie anderer statistischer Kennzahlen wurden mittels SPSS (Version 12.0) berechnet. In Abhängigkeit von der Werteverteilung erfolgte die

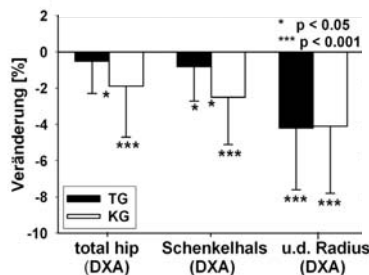
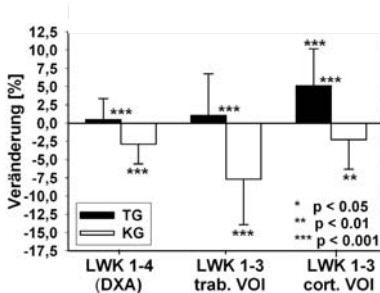


Abbildung 2 und 3: Veränderungen der Knochendichte (Mittelwert und Standardabweichung) an LWS (links), proximalem Femur und Unterarm (rechts) in Trainings- (TG) und Kontrollgruppe (KG) nach drei Jahren Intervention.

Signifikanz-Berechnung mittels T-Test für abhängige oder unabhängige Stichproben. Bei nicht normalverteilten Daten wurde der Wilcoxon- respektive der Whitney-Mann U-Test angewendet. Zusätzlich wurden die gruppenspezifischen Veränderungen mittels zweifaktorieller Varianzanalyse mit Messwiederholung auf Zwischengruppenunterschiede verglichen. Beide statistische Verfahren zeigten bezogen auf die Irrtumswahrscheinlichkeit vergleichbare Ergebnisse. Eine Irrtumswahrscheinlichkeit unter 5 % ($p < 0.05$) wird als statistisch signifikant erachtet.

Ergebnisse

68 Personen der Trainingsgruppe (Dropout: 21 %) und 36 Personen der Kontrollgruppe (Dropout: 29 %) absolvierten die 3-Jahres-Kontrollmessung (Abbildung 1). Gründe für den Studienabbruch waren: Wohnort/Arbeitsplatzwechsel ($n = 11$); Erkrankungen/Todesfälle ($n = 7$); Gründe die in Zusammenhang mit der Interventionsform bzw. deren

Änderung standen ($n = 8$); verlorenes Interesse ($n = 7$). 5 Personen der Trainingsgruppe und 5 Personen der Kontrollgruppe wurden wegen Erkrankungen oder Einnahme knochenanaboler Substanzen von der Analyse ausgeschlossen.

Von den 53 Teilnehmerinnen der Trainings- und den 28 Teilnehmerinnen der Kontrollgruppe welche die Jahre 4 und 5 absolvieren wollten, brachen insgesamt 6 Teilnehmerinnen die Untersuchung aus persönlichen Gründen ab, drei Personen wurden wegen Erkrankungen mit Einfluss auf den Knochenstoffwechsel aus der Datenanalyse ausgeschlossen (Abb. 1). Im Gegensatz zu den vorhergehenden Veröffentlichungen erfolgt in diesem Beitrag kein Ausschluss von Personen mit geringer Trainingshäufigkeit (Trainingsgruppe: $< 2 \text{ TE/Wo.}$: $n = 15$) oder zusätzlicher sportlicher Intervention (Kontrollgruppe) um eine bessere Vergleichbarkeit mit der Extensionsstudie zu gewährleisten. Abbildung 2 und 3 zeigen die prozentualen Veränderungen der Knochendichte an der LWS (DXA, QCT), der Schenkelhals-Region (total Hip-ROI, Schenkelhals-ROI; DXA) und dem ultradistalem (u.d.) Radius (DXA) in Trainings- und Kontrollgruppe während der ersten drei Interventionsjahre. Abbildung 4 gibt den Verlauf der Knochendichte an LWS (DXA), Schenkelhals (total Hip-ROI; DXA) und u.d. Radius (DXA) in der Trainingsgruppe mit explosiver Bewegungsausführung (EB, $n = 22$) vs. der Gruppe mit betont langsamer Bewegungsausführung (LB, $n = 24$) wieder. Die nicht trainierende Kontrollgruppe ($n = 26$), die aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht in Abbildung 4 integriert wurde, zeigte während der letzten beiden Studienjahren eine signifikante Reduktion (LWS: $-1.1 \pm 2.6 \%$; Gesamtfemur: $-1.6 \pm 2.0 \%$; u.d. Radius $-3.3 \pm 3.1 \%$, $p < .001$ vs. beide Trainingsgruppen) der Knochendichte.

Innerhalb der LB wurde eine signifikante Erhöhung der Schmerzintensität am unteren Rücken erfasst. Im Gegensatz dazu zeigte die EB eine tendenzielle Verbesserungen dieses Parameters (Zwischengruppenunterschied $p < .05$). Bezogen auf die Schmerzhäufigkeit der großen Gelenke wurden ebenfalls nur in der schnell trainierenden Gruppe signifikante Verbesserungen nachgewiesen.

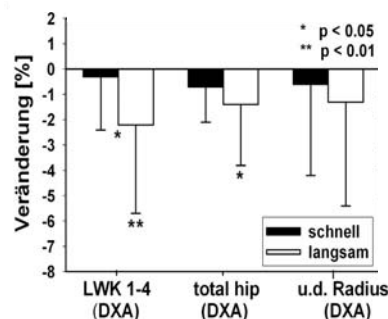


Abbildung 4: Veränderungen der Knochendichte (Mittelwert und Standardabweichung) an LWS, proximalem Femur und Unterarm in schnell- und langsam trainierender Trainingsgruppe nach zwei weiteren Jahren.

Diskussion

Die Erlanger Fitness und Osteoporose-Studie ist weltweit die längste Interventionsstudie mit postmenopausalen Frauen. Obwohl die Untersuchung den Knochen als primären Endpunkt fokussierte, wurden während der ersten drei Studienjahre auch andere relevante Risikofaktoren und Beschwerden der (früh-)postmenopausalen Frau untersucht. Es zeigte sich dabei, dass ein komplexes, „leistungssportlich“ orientiertes Training unter besonderer Berücksichtigung intensitätsorientierter Belastungsgestaltung neben der Knochendichte auch Herz-Kreislauf-Risikofaktoren (Körperfett, Fettverteilungsmuster, VO_2 max, Blutfette) und Wechseljahresbeschwerden positiv zu beeinflussen vermag, ohne dass negative Einflüsse auf die Intensität und die Dauer von Rückenschmerzen bzw. Schmerzen an den großen Gelenken nachzuweisen wären (5, 8).

Der „leistungssportliche“ Ansatz unserer Vorgehensweise äußerte sich dabei insbesondere in den folgenden sieben Kriterien (7):

1. Trainingsregelung auf der Basis regelmäßiger leistungsdiagnostischer Tests (insb. 1 RM-Tests).
2. Individualisierte Trainingspläne für das dynamische Krafttraining.
3. Konkrete Belastungsvorgaben (bspw. Lastvorgaben im dynamischen Krafttraining).
4. Konsequente zeitliche und inhaltliche Trainingsperiodisierung: Monozyklus: Einsatz von 12-wöchigen (hoch)intensiven Belastungsphasen mit regelmäßigen Entlastungsphasen. Mesozyklus: Linear und nicht-linear periodisierte (hoch)intensive 12-wöchige Phasen. Mikrozyklus: Unterschiedliche inhaltliche Schwerpunkte/Wochen. Trainingseinheit: Unterschiedliches Belastungsgefüge für Haupt-, Neben- und Zusatzübungen des dynamischen Krafttrainings. Funktionskreis/Trainingsübung: Überwiegend nichtlineare Periodisierung (d.h. insb. für Hauptübungen unterschiedliche Intensität/Wiederholungszahl je Satz); Periodisierung des Ausbelastungsgrades der Übungssätze durch Trainingslastvorgaben.
5. Fokus auf Bewegungsgeschwindigkeit nach Ausschöpfung der Manipulationsmöglichkeiten der klassischen Belastungsnormativa.
6. Variation der Belastungsinhalte innerhalb der Ausdauer-, Sprung- und funktionsgymnastisch/isometrisch ausgerichteten Sequenzen.
7. Überdauerndes Training mit lediglich 3 Wochen komplett trainingsfreier Zeit pro Jahr.

Die Auswahl unserer Trainingsinhalte orientierte sich eng an den Ergebnissen entsprechender Querschnittsstudien mit ausgewählten Sportlerkollektiven sowie an tierexperimentellen Untersuchungen (9). Strukturiert man diese Trainingsinhalte, so können daraus drei knochenrelevante Faktoren abgeleitet werden:

1. Die axiale Belastung von Skelettsegmente sowie Druckbelastungen des Knochens, die aus Bodenreaktionskräften resultieren.

2. Der „Faktor“ Muskelzug der zu einer lokalen Adaptation des Knochens am Ansatzgebiet der Sehne führt und bei Einwirkung äußerer Kräfte, denen entsprechende innere Muskelkräfte entgegenwirken, den Knochen über Hebelarme komplexen Biege- und Torsionsmomenten aussetzt.
3. Der hormonelle Faktor, der mit der belastungsinduzierten Ausschüttung knochenanabol wirkender Substanzen nach moderat bis intensiver kurzzeitiger Kraft- oder Ausdauerbelastung auf den Knochenstoffwechsel einwirken kann (11).

Die Auswahl des günstigsten Trainingsdesigns hinsichtlich der optimalen Belastungs- bzw. „Reiz“ konstellation (der Begriff „Reiz“ wird im weiteren gemäß der sportwissenschaftlichen Terminologie verwendet) erfordert komplexe Überlegungen. Obwohl ein intensitätsorientiertes Training mit hoher Reizhöhe („strain magnitude“) und/oder hoher Reizrate („strain rate“) zumindest tierexperimentell die günstigsten Auslenkungen der Knochenfestigkeit zeigt, weisen neuere Untersuchungen darauf hin, dass die Reizhäufigkeit und insbesondere die Reizfrequenz diesen Einfluss besonders bei grenzwertiger Reizintensität deutlich modulieren können (9). Ausschlag gebendes Kriterium für die Wahl eines intensitätsorientierten Trainingsdesigns war jedoch nicht zuletzt die Complianceproblematik umfangsorientierter Trainingsprogramme bei lediglich präventiver Motivation der Teilnehmerinnen und die Tatsache, dass die Rahmenbedingungen ambulanter Bewegungsangebote mit einer hohen Trainingshäufigkeit nicht zu vereinbaren sind. Charakterisiert man nun unser Trainingsprogramm anhand der gewählten (knochenspezifischen) Belastungsnormativa so zeichnet es sich aus durch: 1. Eine hohe Reizintensität der axialen Belastung und der Muskelzugbelastung (sowie der HK-Belastung). 2. Eine hohe Reizrate am Achsenskelett durch High-Impact-Aerobic, Sprungsequenz sowie im späteren Stadium durch das Krafttraining mit schneller Bewegungsgeschwindigkeit (19). 3. Einer überwiegend geringen Reizhäufigkeit durch intensitätsorientiertes Sprungkraft- und Muskeltraining (Ausnahme Regenerationsphasen). 4. Einer mittleren Reizfrequenz (< 2-3 Hz) innerhalb von Teilen der Aerobic- und Sprungsequenz und innerhalb des Krafttrainings mit schneller Bewegungsausführung (19) und 5. einer hohen Reizdichte innerhalb der Aerobic und Sprungsequenz sowie einer niedrigen Reizdichte durch längere Pausen innerhalb des (hochintensiven) dynamischen Krafttrainings.

Unser Ergebnis nach 3 Trainingsjahren zeigte signifikante Unterschiede zwischen Trainings- und Kontrollgruppe für die Knochendichte an LWS (DXA und QCT; Abb. 2) und Schenkelhals, nicht jedoch die für den distalen Unterarm (Abb. 3). Betrachtet man die Belastungsinhalte und -normativa die für diese regionalen Unterschiede verantwortlich zeichnen könnten, so fällt unmittelbar auf, dass nur das Achsenskelett, nicht jedoch die oberen Extremitäten, mit Trainingsinhalten mit hoher Reiz-Rate (High Impact-Sequenz, Sprünge) beübt wurde. Inwieweit eine Manipulation der Reizrate über eine Veränderung der Bewegungsgeschwindigkeit im dynamischen Krafttraining Einfluss auf die Knochendichte insbesondere am distalen Unterarm nimmt, war

Fragestellung der zweiten Interventionsperiode (EFOPS-Extension). Nach zwei weiteren Studienjahren zeigte die schnelle im Vergleich zur langsamen Bewegungsausführung für die LWK 1-4 signifikante Zwischengruppenunterschiede zugunsten der schnell trainierenden Gruppen (Abbildung 4). Bezogen auf die Region des proximalen Femurs konnte jedoch ebenso wenig ein signifikanter Zwischengruppenunterschied erfasst werden wie für den distalen Unterarm. Im Gegensatz dazu wurde innerhalb der entsprechenden Einjahres-Analyse bei deutlich günstigeren Auslenkungen der Knochendichte an LWS und proximalem Femur in der schnell trainierenden Gruppe ein signifikanter Zwischengruppenunterschied zur langsam trainierenden Gruppe auch für die Gesamtfemur-Region nachgewiesen (19).

Unsere Untersuchung bestätigt somit bedingt die Ergebnisse tierexperimenteller Daten die belegen dass schnellkräftige Belastungen und hohe Reizraten zu deutlicheren Effekt am Knochen führen als eine langsame Ausführung (12, 17). Somit unterstützt der Verlauf der Knochendichte der sowohl in der Trainingsgruppe (EFOPS) (8) wie auch in der schnell trainierenden Trainingsgruppe (EFOPS-Extension) (20) bereits jeweils nach einjähriger Intervention den Peak erreicht, das von Schriefer et al. (14) postulierte Modell, gemäß dem der Knochen sich relativ rasch an Veränderungen seines mechanischen Umfeld durch das Prinzip der zellulären Anpassung adaptiert. Offensichtlich reicht eine Variation konventioneller Belastungsreize im Sinne einer Trainingsperiodisierung nicht aus, dieses mechanische Umfeld relevant zu verändern und folglich eine „Desensibilisierung“ des Knochens (18) zu vermeiden, um eine weitere trainingsinduzierte positive Veränderung zu garantieren.

Trotzdem ist als knochenspezifisches Fazit unserer 5jährigen Interventionsstudie zu ziehen, dass ein komplexes, intensives körperliches Training die Knochendichte an LWS und Schenkelhals auch in der frühen Postmenopause weitestgehend zu erhalten vermag ohne negativen Einfluss auf Schmerzenparameter zu nehmen.

Dankagung

Für die Bereitstellung von Kalzium und Vitamin-D danken wir Sanofi Synthelabo GmbH (Berlin, Deutschland). Der Ludwig Arzt GmbH (Hadamer, Deutschland) sowie dem Uni-Bund Erlangen sei für die Überlassung von Trainings- und Testgeräten gedankt. Besonderer Dank gilt der Firma MTD-Systems (Neuburg v.W., Deutschland) für die langfristige Überlassung der Kraftmessplatten.

Literatur

1. Bassej 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) 1805-13.
2. Investigators: Measuring quality of life in women with osteoporosis. The Osteoporosis Quality of Life Study Group. *Osteoporos Int* 7 (1997) 478-487.
3. Jensen MP, Karoly P, Braver S: The measurement of clinical intensity: a comparison of six methods. *Pain* 27 (1986).
4. Kemmler W, Engelke K: A critical review of exercise training effects on bone mineral density (BMD) in early-postmenopausal women. *Int Sport-med J* 5 (2004) 67-77.
5. 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* 164 (2004) 1084-1091.
6. Kemmler W, Engelke K, Lauber D, Weineck J, Hensen J, Kalender WA: The Erlangen Fitness Osteoporosis Prevention Study (EFOPS) - a controlled exercise trial in early postmenopausal women with low bone density: First year results. *Arch Phys Med Rehabil* 84 (2003) 673-683.
7. Kemmler W, Lauber D, Von Stengel S, Engelke K. Developing maximum strength in older adults - a series of studies. In: Gießing J, Fröhlich M, Preuss P, eds. *Current results of strength training research*. Göttingen: Cuvillier Verlag; 2005, 114-133.
8. Kemmler W, Lauber D, von Stengel S, Weineck J, Kalender WA, Engelke K: Exercise Effects on Risk Factors in Early Postmenopausal Women: 3y EFOPS results. *Med Sci Sports Exerc* 37 (2005) 194-203.
9. Kemmler W, Weineck J, Hensen J, Lauber D, Kalender WA, Engelke K: Empfehlungen für ein körperliches Training zur Verbesserung der Knochenfestigkeit: Schlussfolgerungen aus Tiermodellen und Untersuchungen an Leistungssportlern. *Dtsch Z Sportmed* 54 (2003) 306-316.
10. Kraemer WJ, Gordon SE, Fleck SJ, Marchitelli LJ, Mello R, Dziadosz JE, Friedl K, Harman E, Maresch C, Fry AC: Endogenous anabolic hormonal and growth factor re-sponses to heavy resistance exercise in males and females. *Int J Sports Med* 12 (1991) 228-35.
11. Maimoun L, Manetta J, Coupret I, Dupuy AM, Mariano-Goulart D, Micallef JP, Peruchon E, Rossi M: The intensity level of physical exercise and bone mineral metabolism response. *Int J Sports Med* 27 (2006) 105-111.
12. 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.
13. Opaschowski HW. *Freizeitökonomie: Marketing von Erlebniswelten*, Opladen, 1993.
14. Schriefer JL, Warden SJ, Saxon LK, Robling AG, Turner CH: Cellular accommodation and the response of bone to mechanical loading. *J Biomech* 38 (2005) 1838-1845.
15. Sugiyama T, Yamaguchi A, Kawai S: Effects of skeletal loading on bone mass and compensation mechanism in bone: a new insight into the "mechanostat" theory. *J Bone Miner Metab* 20 (2002) 196-200.
16. Turner CH: Homeostatic control of bone structure: an application of feedback theory. *Bone* 12 (1991) 203-217.
17. Turner CH, Owan I, Takano Y: Mechanotransduction in bone: role of strain rate. *Am J Physiol Endocrinol Metab* 269 (1995) E438-E442.
18. Turner CH, Robling AG: Exercise as an anabolic stimulus for bone. *Curr Pharm Des* 10 (2004) 2629-2641.
19. von Stengel S, Kemmler W, Lauber D, Weineck J, Kalender WA, Engelke K: Power Training is more Effective than Strength Training to Maintain Bone Mineral Density in Postmenopausal Woman. *J Appl Physiol* 99 (2005) 181-188.
20. von Stengel S, Kemmler W, Lauber D, Weineck J, Kalender WA, Engelke K: Differential effects of strength versus power training on Bone Mineral Density in postmenopausal women - a two year longitudinal study. *Br J Sports Med*, Epub ahead of print, doi: 10.1136/bmj.2006.033480.
21. Vuori IM: Dose-response of physical activity and low back pain, osteoarthritis, and osteoporosis. *Med Sci Sports Exerc* 33 (2001) S551-S586.
22. 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) 10-8.

Korrespondenzadresse:

PD. Dr. Wolfgang Kemmler

Osteoporoseforschungszentrum

Institut für Medizinische Physik

Friedrich-Alexander Universität Erlangen

Henkestrasse 91

91052 Erlangen

e-Mail: wolfgang.kemmler@imp.uni-erlangen.de