

AWMF-Register Nr.	183-002	Klasse:	S3
-------------------	---------	---------	----

Langfassung

„Körperliches Training zur Frakturprophylaxe“

S3-Leitlinie des Dachverbands Osteologie e.V. (DVO)

unter Mitwirkung von

- Behinderten und Rehabilitations-Sportverband Bayern (BVS-Bayern)
- Deutsche Gesellschaft für Geriatrie (DGG)
- Deutsche Gesellschaft für Gynäkologie und Geburtshilfe (DGGG)
- Deutsche Gesellschaft für Nephrologie (DGfN e.V.)
- Deutsche Gesellschaft für Orthopädie und Unfallchirurgie (DGOU)
- Deutsche Gesellschaft für Physikalische Medizin und Rehabilitation e.V. (DGPMR)
- Deutsche Gesellschaft für Rheumatologie und klinische Immunologie e.V. (DGRh)
- Deutsche Rheuma-Liga Bundesverband e.V.
- Deutscher Verband für Gesundheitssport und Sporttherapie e.V. (DVGS)
- Deutscher Verband für Physiotherapie (ZVK) e.V.
- Deutsche Sporthochschule Köln
- Interdisziplinäre Gesellschaft für orthopädische/unfallchirurgische und allgemeine Schmerztherapie (IGOST)
- Österreichische Gesellschaft für Knochen- und Mineralstoffwechsel (ÖGKM)

Version: 1.1

vom 11.02.2025

Autoren und mandatierte Vertreter von Fachgesellschaften und Institutionen

(in alphabetischer Reihenfolge)

Professor Dr. Clemens Becker

Geriatric und Geriatric Rehabilitation, Robert-Bosch-Krankenhaus

Deutsche Gesellschaft für Geriatric (DGG)

Dr. Stefan Degenhardt

Kommission Rehabilitation, Soziales und Transition

Deutsche Gesellschaft für Nephrologie (DGfN e.V.)

Professor Dr. Peyman Hadji

Frankfurter Hormon- und Osteoporosezentrum

Deutsche Gesellschaft für Gynäkologie und Geburtshilfe (DGGG)

Professor Dr. Franz Jakob

Univ.-Prof. i.R. für Osteologie, Universität Würzburg

Dachverband Osteologie (DVO)

Professor Dr. Bernd Kladny

Fachklinik Herzogenaurach

Deutsche Gesellschaft für Orthopädie und Unfallchirurgie (DGOU)

Professor Dr. Wolfgang Kemmler

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

Institut für Radiologie, Universitätsklinikum Erlangen, Autor, Leitlinienkoordinator

Dr. Heinz Kleinöder

Institut für Trainingswissenschaft und Sportinformatik, Deutsche Sporthochschule Köln

Professor Dr. Katharina Kersch-Schindl

Universitätsklinik für Physikalische Medizin, Rehabilitation und Arbeitsmedizin

Medizinische Universität Wien

Österreichische Gesellschaft für Knochen- und Mineralstoffwechsel (ÖGKM)

Nicole Klöckner

Deutsche Rheuma-Liga, *Deutsche Rheuma-Liga Bundesverband e.V.*

Professor Dr. Uwe Lange

Professur für Internistische Rheumatologie, Osteologie, Physikalische Medizin

Justus-Liebig-Universität Gießen

Deutsche Gesellschaft für Physikalische Medizin und Rehabilitation e.V. (DGPMR)

Professor Dr. Dirk Meyer-Olson

Klinik für Rheumatologie und Immunologie/OE 6830, Medizinische Hochschule Hannover

Deutsche Gesellschaft für Rheumatologie und klinische Immunologie e.V. (DGRh)

Dr. Stefan Middeldorf

Orthopädische Klinik, Schön Klinik Bad Staffelstein

Interdisziplinäre Gesellschaft für orthopädische/unfallchirurgische und allgemeine Schmerztherapie (IGOST)

Dr. Stefan Peters

Deutscher Verband für Gesundheitssport und Sporttherapie e.V. (DVGS)

Jamil Sahar

Behinderten- und Rehabilitations Sportverband Bayern e.V. (BVS-Bayern)

Dr. Daniel Schöne

Institut für Radiologie, Universitätsklinikum Erlangen; Autor

Reina Tholen¹, Christopher Büttner

Deutscher Verband für Physiotherapie (ZVK) e.V.

Dr. Friederike Thomasius

Frankfurter Hormon und Osteoporosezentrum

Dachverband Osteologie (DVO)

Professor Dr. Simon von Stengel

Institut für Radiologie, Universitätsklinikum Erlangen; Autor

Unter Mithilfe von:

Professor Dr. Cornel Sieber

Institut für Biomedizin des Alterns, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.

European Geriatric Medicine Society (EuGMS)

Professor Dr. Markus Gosch

Paracelsus Medizinische Privatuniversität für Geriatrie

Deutsche Gesellschaft für Geriatrie (DGG)

Herausgeber

Federführende Fachgesellschaft:

DVO - Dachverband Osteologie e.V.

Kaiser Wilhelm Strasse 3, D-45276 Essen

Leitlinienkoordination

Professor Dr. Wolfgang Kemmler

Institut für Medizinische Physik/Institut für Radiologie

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg/Universitätsklinikum Erlangen

Henkestrasse 91, 91052 Erlangen

Telefon 09131 8523999

Email: wolfgang.kemmler@fau.de

Bitte wie folgt zitieren:

DVO - Dachverband Osteologie e.V.

Körperliches Training zur Frakturprophylaxe

AWMF Registernummer 183-2

Version vom 11.02.2025

Verfügbar unter: https://register.awmf.org/assets/guidelines/183-002I_S3_Training_Frakturprophylaxe_2025-02.pdf

Zugriff am:

¹ Verstorben am 04. Juni 2022.

Was gibt es Neues?

Es handelt sich um eine komplette Überarbeitung, Erweiterung und Aktualisierung der Leitlinie „Physiotherapie und Bewegungstherapie bei Osteoporose“ aus dem Jahr 2008. Neu an der vorliegenden Leitlinie ist deren ausgesprochen trainingswissenschaftliche Ausrichtung, die anhand von Frakturrisikofaktoren unterschiedliche Kollektive kategorisiert, entsprechende Trainingsziele zuweist, sowie detaillierte praxisorientierte Empfehlungen für ein optimiertes Training zur Frakturprophylaxe ableitet. Wir verfolgten eine strikte evidenzbasierte Vorgehensweise, die sich darin äußert, möglichst alle relevanten Sachverhalte über systematische Übersichtsarbeiten und Meta-Analysen zu erschließen. In der Summe wurden im Verlauf der Leitlinienentwicklung über 15 wissenschaftliche Arbeiten erstellt, die bereits (überwiegend) publiziert sind. Ebenfalls neu sind Empfehlungen zu kombinierten Therapien mit körperlichem Training und medikamentöser Therapie bzw. Supplementen.

Inhalt

Teil 1: Formale Aspekte der Leitlinie.....	10
1. Geltungsbereich und Zweck der Leitlinie	10
1.1. Zielsetzung der Leitlinie, Forschungsfragen	10
1.2. Generierung grundsätzlicher Evidenz von Effekten körperlichen Trainings auf... ..	10
1.2.1. die Frakturinzidenz niedrig-traumatischer und osteoporotischer Hauptfrakturen.....	10
1.2.2. die Knochendichte postmenopausaler Frauen.....	10
1.2.3. die Knochendichte von Männern 45 Jahre und älter	10
1.2.4. die Knochendichte bei Menschen mit Glukokortikoid-induzierter Osteoporose.....	10
1.3. Ableitung optimierter Trainingsempfehlungen bezüglich.....	10
1.3.1.Trainingsinhalten	10
1.3.2.Trainingsmitteln.....	10
1.3.3.Belastungskomponenten, wie... ..	10
1.3.4. ... Trainingsprinzipien	11
1.3.5. Ableitung von Empfehlungen einer Kombination von körperlichem Training und medikamentöser Therapie/Supplementen.....	11
1.4. Versorgungsbereich.....	11
1.5. Patientenzielgruppen	11
1.6. Anwenderzielgruppen	11
1.7. Definition der wissenschaftlichen Endpunkte der Leitlinie und deren Operationalisierung	12
2. Zusammensetzung der Leitliniengruppe.....	13
2.1. Leitlinienkoordinator/Ansprechpartner	13
2.2. Leitlinien-Lenkungsgruppe	13
2.3. Beteiligte Fachgesellschaften, Organisationen und Institutionen	14
2.4. Patienten/Bürgerbeteiligungen	14
2.5. Methodische Begleitung.....	14
2.5.1. Erstellung systematischer Literaturrecherchen	14
2.5.2. Einordnung der methodischen Qualität.....	15
3. Informationen zu dieser Leitlinie	16
3.1. Geschlechtsneutrale Schreibweise.....	16
3.2. Vorwort.....	16
3.3. Hintergrund der Leitlinie	16
3.4. Einführung und Rationale.....	17
3.5. Aufbau der Leitlinie	17

4.	Vorgehensweise zur Evidenzgenerierung	18
4.1.	Systematische Leitliniensuche	18
4.2.	Systematische Literaturrecherchen und Meta-Analysen	18
4.3.	Evidenzen positiver Effekte körperlichen Trainings	18
4.4.	Subanalysen:	18
4.5.	Empfehlungen für optimierte Trainingsprotokolle	18
4.5.1.	Subanalysen trainingsrelevanter Größen wie:	18
4.6.	Interaktion unterschiedlicher Therapieansätze	18
4.7.	Übergreifende Methodik der systematischen Literaturrecherchen und Meta-Analysen	19
4.8.	Randomisierte kontrollierte Studien	19
4.9.	Bewertung der Studienqualität	19
4.9.1.	Evidenzen und Evidenzgrade	20
4.9.2.	Graduierung von Empfehlungen, Empfehlungsgrade	21
5.	Konsens Verfahren der Leitlinienkommission	22
5.1.	Umgang mit Interessenkonflikten	22
5.1.1.	Bewertung der Interessenkonflikte	23
	Teil II: Inhaltliche Aspekte der Leitlinie, Empfehlungen	24
1.	Übergreifende Leitliniensuche	24
2.	Evidenz von Effekten körperlichen Trainings auf die Frakturinzidenz	31
2.1.	Effekte körperlichen Trainings auf die Frakturinzidenz niedrig-traumatischer und osteoporotischer Hauptfrakturen	31
3.	Trainingsmethodischer Ansatz zur Frakturprophylaxe durch körperliches Training	37
3.1.	Ansatzpunkte und (Trainings-)Ziele eines körperlichen Trainings zur Frakturprophylaxe	37
3.1.1.	Risikokategorisierung relevanter Gruppen im Spannungsfeld der Frakturprophylaxe	38
3.1.2.	Risiko-/Zielgruppenspezifische Trainingsziele	39
3.2.	Trainingsziel Erhalt/Erhöhung der Knochenfestigkeit	40
	Exkurs: Stellenwert der „Knochendichte“ (KMD)-Messung innerhalb der Knochenfestigkeit	40
3.2.1.	Evidenz körperlichen Trainings zur Verbesserung der Knochenfestigkeit bei postmenopausalen Frauen	41
3.2.2.	Evidenz körperlichen Trainings zur Verbesserung der Knochenfestigkeit bei Männern 45 Jahre und älter	45
3.2.3.	Evidenz körperlichen Trainings zur Verbesserung der Knochenfestigkeit bei Glukokortikoid-induzierter Osteoporose (GIOP)	48
4.	Ableitung von Trainingsempfehlungen zur Verbesserung der Knochenfestigkeit	51

4.1.	Trainingsinhaltliche Empfehlungen	51
4.1.1.	Kategorisierung von Trainingsinhalten: Knochenfaktoren	51
4.1.2.	Knochenanabole Potenz unterschiedlicher sportlicher Belastungen	52
4.1.3.	Longitudinale Trainingsstudien mit postmenopausalen, nicht-athletischen Frauenkollektiven	53
4.1.4.	Systematische Reviews und Meta-Analysen, die auf einzelne Trainingsinhalte fokussieren	57
4.1.5.	Walking	57
4.1.6.	Schwimmen	59
4.1.7.	Wassergymnastik	60
4.1.8.	Radfahren	63
4.1.9.	Ganzkörper-Vibrationstraining (WBV)	64
4.1.10.	Ganzkörper-Elektromyostimulation (WB-EMS)	71
4.2.	Trainingsmittel	73
4.3.	Empfehlungen zur Belastungskomposition	76
4.3.1.	Stellenwert der Reizhöhe („strain magnitude“) innerhalb eines körperlichen Trainings der Knochenfestigkeit	77
4.3.2.	Stellenwert der Reizrate innerhalb eines körperlichen Trainings der Knochenfestigkeit	82
4.3.3.	Stellenwert der Reizhäufigkeit innerhalb eines körperlichen Trainings der Knochenfestigkeit	84
4.3.4.	Stellenwert der Reizfrequenz innerhalb eines (konventionellen) körperlichen Trainings der Knochenfestigkeit	87
4.3.5.	Stellenwert der Reizdauer innerhalb eines körperlichen Trainings der Knochenfestigkeit	88
4.3.6.	Stellenwert der Reizdichte innerhalb eines körperlichen Trainings der Knochenfestigkeit	89
4.3.7.	Stellenwert der Trainingshäufigkeit innerhalb eines körperlichen Trainings der Knochenfestigkeit	90
4.4.	Empfehlungen zur Kombination von pharmakologischer Therapie und körperlichem Training	94
4.4.1.	Kombination von körperlichem Training und antiresorptiver Therapie	94
4.4.2.	Kombination von Hormon Ersatz Therapie (HRT) und körperlichem Training	94
4.4.3.	Kombination von Bisphosphonaten und körperlichem Training	97
4.4.4.	Kombination von Denosumab und körperlichem Training	99
4.4.5.	Fazit antiresorptive Therapie und körperliches Training	99
4.4.6.	Kombination anaboler Osteoporose-Medikamente (Teriparatid, Romosozumab, Abaloparatid) und körperlichem Training	100

4.4.7. Zusammenfassende Empfehlungen zur Kombination von medikamentöser Therapie und körperlichem Training	103
4.5. Empfehlungen zur Kombination von körperlichem Training und Vitamin D	104
4.6. Empfehlungen zur Kombination von körperlichem Training und Protein-Supplementierung	107
5. Ableitung von Trainingsempfehlungen zur Reduktion von Sturzhäufigkeit und Sturzimpact.	111
5.1. Einführung	111
5.2. Risikofaktoren für Stürze	111
5.3. Vermeidung des Sturzereignisses.....	113
5.3.1. Trainingsinhalte (und -methoden) zur Sturzreduktion	114
5.3.2. Belastungsdosierung	138
5.4. Trainingsziel „Verbesserung des Sturzvorganges - Sturzimpact verringern“	141
5.5. Trainingsziel „Sturzangst“	144
5.6. Stellenwert ausgewählter Trainingsprinzipien innerhalb eines körperlichen Trainings zur Frakturprophylaxe.....	146
5.6.1. Prinzipien der Belastung.....	146
5.6.2. Prinzipien der Zyklisierung	153
5.6.3. Zusammenfassung „Trainingsprinzipien“	156
5.7. Validierung der Trainingsziele, Prozess- und Ergebnisqualität	157
6. Zusammengefasste trainingsmethodische Empfehlungen.....	159
6.1. Übergreifende trainingsmethodische Erwägungen	160
6.2. Personen mit erhöhtem Knochenumbau, maximal mässiggradige Verringerung der Knochenfestigkeit (im Sinne einer Osteopenie) ohne relevant erhöhtes Sturzrisiko	161
6.3. Personen mit deutlich herabgesetzter Knochenfestigkeit im Sinne einer Osteoporose ohne Fraktur und ohne relevant erhöhtes Sturzrisiko	161
6.4. Personen mit deutlich herabgesetzter Knochendichte im Sinne einer Osteoporose ohne Fraktur aber mit wesentlichen Sturzrisikofaktoren	162
6.5. Personen mit Osteoporose-assoziierten Frakturen und multiplen und/oder ausgeprägten Sturzrisikofaktoren	162
6.6. Personen mit multiplen Osteoporose-assoziierten Frakturen, hohem Sturzrisiko und sehr geringer körperlicher Belastbarkeit	163
7. Kontraindikationen und Vorsichtsmaßnahmen für ein körperliches Training zur Frakturprophylaxe	164
8. Geeignete Settings für ein körperliches Training zur Frakturprophylaxe	168
9. Limitationen der Leitlinie „Körperliches Training zur Frakturprophylaxe“	171
10. Ausblick	172
10.1. Verbreitung und Implementierung der Leitlinie.....	172

10.2.	Materialien für die Anwendung der Leitlinie.....	172
10.3.	Förderliche und hinderliche Aspekte für die Anwendung und Implementierung der Leitlinie	172
10.4.	Messgrößen für ein Monitoring von Effektivität und Bindungsgrößen	173
11.	Anhang	174
	(1) Frakturreduktion durch körperliches Training.....	174
	(2) Effekte auf die Knochendichte: Postmenopausale Frauen.....	180
	(3) Effekte auf die Knochendichte: Männer 45 Jahre und älter.....	199
	(4) Effekte auf die Knochendichte bei Menschen mit Glukokortikoid-induzierter Osteoporose (GIOP)	206
	(5) Ableitung von Trainingsempfehlungen.....	211
	(6) Kombination von körperlichem Training und medikamentöser Therapie/ Supplementen	252
	(7) Sturzprävention.....	276
12.	Übersicht Interessenkonflikte	284
13.	Literatur.....	292

Teil 1: Formale Aspekte der Leitlinie

1. Geltungsbereich und Zweck der Leitlinie

1.1. Zielsetzung der Leitlinie, Forschungsfragen

Die vorliegende Leitlinie verfolgt unterschiedliche Ziele im Spannungsfeld des körperlichen Trainings und der Frakturprophylaxe bei Menschen in mittlerem-hohen Lebensalter (s.u.). Wesentlichstes Ziel ist aber die Ableitung von konkreten Trainingsempfehlungen und Handlungsanweisungen für ein körperliches Training zur Frakturprophylaxe. Konkret sind die Ziele der Leitlinie körperliches Training zur Frakturprophylaxe die folgenden Themen:

1.2. Generierung grundsätzlicher Evidenz von Effekten körperlichen Trainings auf...

1.2.1. die Frakturinzidenz niedrig-traumatischer und osteoporotischer Hauptfrakturen

1.2.2. die Knochendichte postmenopausaler Frauen

- Subanalyse Effekte unterschiedlichen Knochen-/Osteoporose Status
- Subanalyse Effekte unterschiedlichen Menopausen-Status

1.2.3. die Knochendichte von Männern 45 Jahre und älter

1.2.4. die Knochendichte bei Menschen mit Glukokortikoid-induzierter Osteoporose

1.3. Ableitung optimierter Trainingsempfehlungen bezüglich....

1.3.1.Trainingsinhalten

- a. Dynamisches Krafttraining
- b. Walking
- c. Radfahren
- d. Wassergymnastik
- e. Schwimmen
- f. Ganzkörper-Vibration
- g. Ganzkörper-Elektromyostimulation

1.3.2.Trainingsmitteln

1.3.3.Belastungskomponenten, wie...

- a. Trainingshäufigkeit
- b. Reizhöhe
- c. Bewegungsgeschwindigkeit
- d. Reizhäufigkeit
- e. Reizfrequenz
- f. Reizdauer
- g. Reizdichte

1.3.4. ... Trainingsprinzipien

- a. Überschwelliger Reiz
- b. Progression
- c. Variation der Trainingsbelastung
- d. Optimale Relation von Belastung und Erholung
- e. Kontinuierliche Belastung
- f. Individualisierte Belastung und Altersgemäßheit
- g. Periodisierung und Zyklisierung
- h. Supervisionsgrad

1.3.5. Ableitung von Empfehlungen einer Kombination von körperlichem Training und medikamentöser Therapie/Supplementen

- a. Hormonersatztherapie
- b. Bisphosphonat-Therapie
- c. Osteoporose-Therapie mit knochenanabolen Substanzen
- d. Vitamin-D Gabe
- e. Protein Gabe

1.4. Versorgungsbereich

- Ambulant, teilstationär, (eingeschränkt) stationär
- Prävention, Therapie, Rehabilitation

1.5. Patientenzielgruppen

Die vorliegende Leitlinie adressiert postmenopausale Frauen und Männer ab dem 45. Lebensjahr mit normaler Knochendichte, Osteopenie und Osteoporose mit normalem oder erhöhten Sturzrisiko. Insbesondere für Kinder, Jugendliche, prämenopausale Frauen, jüngere Männer aber auch institutionalisierte Personen gilt diese Leitlinie nur eingeschränkt.

1.6. Anwenderzielgruppen

Die Empfehlungen der Leitlinie wenden sich an unterschiedliche, im Bereich der Osteoporose bzw. der Frakturprophylaxe tätige, Personengruppen. Dies schließt zum einen FachärztInnen der Disziplinen Osteologie, Orthopädie und Orthopädische Chirurgie, Gynäkologie, Endokrinologie, Geriatrie, Rheumatologie, Physikalische Medizin und Rehabilitation ein. Besonders adressiert werden aber Berufsgruppen in der praktischen Umsetzung körperlichen Trainings wie Physiotherapeuten/Krankengymnasten, Sport-/Bewegungstherapeuten, Sportwissenschaftler sowie Übungsleiter in der Rehabilitation der Osteoporose.

Daneben richtet sich die Leitlinie an von einer niedrig-traumatischen Fraktur betroffene oder bedrohte Menschen sowie deren Angehörige. Allgemeinmediziner, weiteren Ärztegruppen, Kosten- und politischen Entscheidungsträgern soll die Leitlinie als Orientierung dienen.

1.7. Definition der wissenschaftlichen Endpunkte der Leitlinie und deren Operationalisierung

Frakturhäufigkeit

- Klinische niedrig-traumatische Frakturen und osteoporotische Hauptfrakturen (Hüfte, LWS, Unterarm und proximaler Oberarm [1])

Knochenfestigkeit

- Knochendichte² erfasst via DPA, DXA oder QCT an Lendenwirbelsäule und proximaler Femur Region of Interest (ROI)³

Reduktion der Sturzhäufigkeit

- Anzahl von Stürzen
- Anzahl von Stürzen mit Verletzungen

Reduktion des Sturzimpacts

- Anzahl von Stürzen mit Verletzungen
- Sturzenergie

Surrogatparameter der Sturzgefährdung

- Kraftfähigkeiten
- Gleichgewichtsfähigkeiten

²als wesentlichste Surrogatgröße der Knochenfestigkeit

³ Primär Schenkelhals- und total Hip-ROI.

2. Zusammensetzung der Leitliniengruppe

Die Expertengruppe wurde multi-professional zusammengestellt und berücksichtigte alle relevanten Expertengruppen, Fachgesellschaften und Interessensvertreter im Spannungsfeld der Frakturprophylaxe durch körperliches Training. Eine Liste der Fachgesellschaften, Verbände, Einrichtungen und beteiligten Personen findet sich zu Beginn der Leitlinie.

2.1. Leitlinienkoordinator/Ansprechpartner

Prof. Dr. Wolfgang Kemmler,
Institut für Radiologie, Universitätsklinikum Erlangen
Institut für Medizinische Physik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Henkestrasse 91, 91052 Erlangen
Email: wolfgang.kemmler@fau.de

2.2. Leitlinien-Lenkungsgruppe

Professor Dr. Franz Jakob
Univ.-Prof. i.R. für Osteologie, Universität Würzburg
Dachverband Osteologie (DVO)

Professor Dr. Wolfgang Kemmler,
Institut für Radiologie, Universitätsklinikum Erlangen
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg/Universitätsklinikum Erlangen

Professor Dr. Katharina Kerschan-Schindl
Universitätsklinik für Physikalische Medizin, Rehabilitation und Arbeitsmedizin
Medizinische Universität Wien
Österreichische Gesellschaft für Knochen- und Mineralstoffwechsel (ÖGKM)

Dr. Heinz Kleinöder
Institut für Trainingswissenschaft und Sportinformatik, Deutsche Sporthochschule Köln

Professor Dr. Uwe Lange
Professur für Internistische Rheumatologie, Osteologie, Physikalische Medizin
Justus-Liebig-Universität Gießen
Deutsche Gesellschaft für Physikalische Medizin und Rehabilitation e.V. (DGPMR)

Dr. Stefan Peters
Deutscher Verband für Gesundheitssport und Sporttherapie e.V. (DVGS)

Dr. Daniel Schöne
Institut für Medizinische Physik und Mikrogewebetechnik, Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

Dr. Friederike Thomasius
Frankfurter Hormon- und Osteoporosezentrum
Dachverband Osteologie (DVO)

Professor Dr. Simon von Stengel
Institut für Radiologie, Universitätsklinikum Erlangen

2.3. Beteiligte Fachgesellschaften, Organisationen und Institutionen

- Behinderten und Rehabilitations-Sportverband Bayern (BVS-Bayern)
- Dachverband Osteologie (DVO); **federführende Fachgesellschaft**
- Deutsche Gesellschaft für Geriatrie (DGG)
- Deutsche Gesellschaft für Gynäkologie und Geburtshilfe (DGGG)
- Deutsche Gesellschaft für Nephrologie (DGfN e.V.)
- Deutsche Gesellschaft für Orthopädie und Unfallchirurgie (DGOU)
- Deutsche Gesellschaft für Physikalische Medizin und Rehabilitation e.V. (DGPMR)
- Deutsche Gesellschaft für Rheumatologie und klinische Immunologie e.V. (DGRh)
- Deutsche Rheuma-Liga Bundesverband e.V.
- Deutscher Verband für Gesundheitssport und Sporttherapie e.V. (DVGS)
- Deutscher Verband für Physiotherapie (ZVK) e.V.
- Deutsche Sporthochschule Köln
- Interdisziplinäre Gesellschaft für orthopädische/unfallchirurgische und allgemeine Schmerztherapie (IGOST)
- Österreichische Gesellschaft für Knochen- und Mineralstoffwechsel (ÖGKM)

2.4. Patienten/Bürgerbeteiligungen

- Behinderten und Rehabilitations-Sportverband Bayern (BVS-Bayern)
- Bundesselbsthilfeverband für Osteoporose e. V.
- Deutsche Rheuma-Liga Bundesverband e.V.
- Rehabilitationssportverein Netzwerk Knochengesundheit Erlangen e.V.

2.5. Methodische Begleitung

- Prof. Dr. Matthias Kohl, Fakultät Medical and Life Sciences, FH Furtwangen
- Frauke Schwier, AWMF

2.5.1. Erstellung systematischer Literaturrecherchen

- Clara Born, Institut für Medizinische Physik (IMP), Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU)
- Cecilie Fischer, Institut für Radiologie, Universitätsklinikum Erlangen
- Isabelle Hoffmann, IMP, FAU
- Sara Kaiser, Institut für Radiologie, Universitätsklinikum Erlangen
- Stephanie Kast, Institut für Radiologie, Universitätsklinikum Erlangen
- Eva Kieswetter, Institut für Biomedizin des Alterns, FAU
- Christopher Klotz, IMP, FAU
- Michelle Mages, IMP, FAU
- Ramin Mohebbi, Institut für Radiologie, Universitätsklinikum Erlangen
- Eileen Schinkel, Institut für Radiologie, Universitätsklinikum Erlangen
- Daniel Schöne, IMP, FAU / Institut für Radiologie, Universitätsklinikum Erlangen
- Dr. Mahdiah Shojaa, Population-Based Medicine, Eberhard-Karls-Universität Tübingen
- Julia Wolf, Institut für Radiologie, Universitätsklinikum Erlangen
- Anna-Lena Zitzmann, IMP, FAU

2.5.2. Einordnung der methodischen Qualität

- Stephanie Kast
- Dr. Daniel Schöne
- Dr. Mahdiah Shojaa
- Professor Dr. Eva Kiesswetter
- Professor Dr. Wolfgang Kemmler
- Professor Dr. Simon von Stengel

Studienstatistiker

Professor Dr. Matthias Kohl
Fakultät Medical and Life Sciences,
FH Furtwangen

3. Informationen zu dieser Leitlinie

3.1. Geschlechtsneutrale Schreibweise

Zur einfacheren Lesbarkeit wurde im Weiteren auf eine geschlechtsneutrale Schreibweise verzichtet. An Stellen, an denen von Anwendern/Betroffenen/Teilnehmern/Trainern etc. die Rede ist, sind Menschen aller Geschlechtszugehörigkeiten gleichermaßen gemeint.

3.2. Vorwort

Die vorgelegte Leitlinie „körperliches Training zur Frakturprophylaxe“ hat sich das Ziel gesetzt, die Evidenz körperlichen Trainings auf Frakturen und Frakturrisikofaktoren unterschiedlicher Kollektive einzuschätzen sowie praxisorientierte Empfehlungen für ein optimiertes Training zur Frakturprophylaxe abzuleiten.

Es erfolgte eine vollständige Überarbeitung, Erweiterung und Aktualisierung der Vorgängerleitlinie „Physiotherapie und Bewegungstherapie bei Osteoporose“ aus dem Jahr 2008 [2]. Die leichte Änderung der Namensgebung der Leitlinie beruht auf der erweiterten Zielsetzung („Fraktur“) und dem umfassenderen Interventionsgedanken eines „körperlichen Trainings“, das die physiotherapeutische Bewegungstherapie aber (definitionsgemäß) auch alle anderen „planmäßigen und zielgerichteten Belastungs-Beanspruchungsprozesse zur Verbesserung der bio-psycho-sozialen Handlungsfähigkeit“ [3] einschliesst.

Die Frage, ob ein körperliches Training niedrig-traumatische Frakturen positiv beeinflussen kann, ist mit einem klaren „ja“ zu beantworten. Die Frage, „wie“ ein optimiertes Trainingsprogramm zur Frakturprävention durchgeführt werden kann, ist weniger einfach zu beantworten. Die vorliegende Leitlinie beansprucht nicht für sich, ein schlüsselfertiges Konzept zu präsentieren. Es führen in Abhängigkeit von Rahmenbedingungen und individuellen Limitationen und Bedürfnissen oft mehrere Wege zum Ziel. Insofern versteht sich die vorgelegte Leitlinie als Handreichung und evidenzbasierte Entscheidungshilfe, nicht aber als verbindliche Vorgabe. Dies beinhaltet ebenfalls, dass die Anwender der Leitlinie „körperliches Training zur Frakturprophylaxe“ für die Konsequenzen der Applikation und Dosierung der Intervention verantwortlich bleiben.

Nicht jedes gesundheitsorientierte Trainingsprogramm führt (auch) zu positiven Effekten im Spannungsfeld der Frakturprophylaxe, also einer Erhöhung der Knochenfestigkeit oder einer Reduktion von Sturzhäufigkeit oder -Impact. Aus unserer Sicht wäre es aber verfehlt, Menschen von Bewegungsgewohnheiten oder Trainingsroutinen abzuraten, weil deren Effekt auf die Knochenfestigkeit und/oder Sturz-„Outcomes“ mit geringer oder fehlender Evidenz belegt wird. Wir empfehlen vielmehr diese Bewegungsroutinen beizubehalten und durch knochen- und/oder sturzrelevante Inhalte zu ergänzen.

3.3. Hintergrund der Leitlinie

Die vorliegende S3 Leitlinie „körperliches Training zur Frakturprophylaxe“ betrachtet sich als aktualisierte und erweiterte Version der Leitlinie „Leitlinie Physiotherapie und Bewegungstherapie bei Osteoporose“ vom 29.04.2008. Die Leitlinie wurde vom Institut für Medizinische Physik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg initiiert und am 05.10.2020 vom Dachverband Osteologie e.V. bei der Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaften e.V. angemeldet (AWMF 183-002). Das Projekt wurde ab März 2021 vom Institut für Radiologie, Universitätsklinikum Erlangen federführend koordiniert.

3.4. Einführung und Rationale

Osteoporose und niedrig-traumatische Frakturen sind ein zentrales Problem des Gesundheitswesens von Gesellschaften mit einem hohen Anteil älterer und hochaltriger Menschen [4,5]. Aufgrund des demografischen Wandels [6] und knapper werdender Ressourcen [7] wird sich diese Problematik in den nächsten Jahren nochmals zuspitzen. Grundsätzlich werden „Bewegung“ und insbesondere körperliches Training als wenig kostenintensive und eigenverantwortlich durchführbare Maßnahme zur Frakturprophylaxe und Osteoporose-Therapie betrachtet [8]. Die Evidenz für einen positiven Effekt körperlichen Trainings auf die Frakturinzidenz liegt derzeit allerdings bestenfalls moderat [9-11]. Daneben zeigen sich extrem heterogene Studienergebnisse, sowohl was die Effekte auf die Frakturinzidenz per se [10] als auch die Effekte auf die Knochenfestigkeit [12,13] sowie die Sturzhäufigkeit [14] als die wesentlichen Risikofaktoren der Fraktur älterer Menschen [15] angeht. Neben Variationen bezüglich Probandengut dürfte der wesentliche Faktor für die extrem variierenden Studienergebnisse das unterschiedliche Interventionsprotokoll der Untersuchungen sein.

3.5. Aufbau der Leitlinie

Im ersten Teil der Arbeit erfolgt eine Recherche vorliegender Leitlinien, die belastbare Evidenzen und Handlungsempfehlungen zu einem körperlichen Training im Spannungsfeld der „Osteoporose“ aussprechen.

Der weitere Aufbau der „Leitlinie körperliches Training zur Frakturprophylaxe“ orientiert sich stark an einer trainingswissenschaftlichen Vorgehensweise. Nach initialer Einführung der Evidenz von Effekten eines körperlichen Trainings auf niedrig-traumatische und osteoporotische Hauptfrakturen und ersten übergreifenden Empfehlungen werden in einem weiteren Schritt relevante Trainingsziele bestimmt, die unterschiedlichen (Fraktur-)Risikogruppen zugeordnet wurden.

Für die nachfolgenden Empfehlungen zu geeigneten Trainingsprogrammen erfolgte aufgrund deutlicher Unterschiede in der trainingsmethodischen Ansteuerung eine Aufteilung der Trainingsziele in „trainingsmethodische Empfehlungen zur Verbesserung der Knochenfestigkeit“ sowie „trainingsmethodische Empfehlungen zur Reduktion der Sturzreduktion und Verbesserung des Sturzablaufes“. Dieser Abschnitt stellt den Schwerpunkt der Leitlinie dar und wird durch die für alle Trainingsziele gemeinsam ausgesprochenen Empfehlungen für ausgewählte Trainingsprinzipien ergänzt.

Die Leitlinie endet mit den Abschnitten „zusammengefasste, trainingsmethodische Empfehlungen“ für die Eingangs klassifizierten (Fraktur-)Risikogruppen, sowie Kontraindikationen und Sicherheitsaspekten für ein körperliches Training zur Frakturprophylaxe. Abschließend werden geeignete Settings und Angebotsstrukturen im Bereich „Osteoporose“ und „Sturzprophylaxe“ genannt, Limitationen der Leitlinie diskutiert sowie die weitere Vorgehensweise zur Implementierung der Leitlinie im Gesundheitswesen besprochen.

4. Vorgehensweise zur Evidenzgenerierung

4.1. Systematische Leitliniensuche

Im ersten Schritt der Evidenzgenerierung wurde eine systematische Leitliniensuche durchgeführt, um möglichst zeiteffektiv auf bestehende Evidenzen im avisierten Fachbereich zugreifen zu können. Details sind unten beschrieben.

4.2. Systematische Literaturrecherchen und Meta-Analysen

Im zweiten Schritt wurden die folgenden Ziele der Leitlinie, in denen nach Einschätzung der Leitlinienautoren keine ausreichende Evidenz zu Effekten körperlichen Trainings vorlag, durch im Rahmen der Leitlinie erstellte, systematische Literaturübersichten und Meta-Analysen adressiert:

4.3. Evidenzen positiver Effekte körperlichen Trainings

- Körperliches Training und Frakturinzidenz niedrig-traumatischer und osteoporotischer Hauptfrakturen [16,17].
- Körperliches Training und Knochendichte postmenopausaler Frauen [13,18].
- Körperliches Training und Knochendichte von Männern 45 Jahre und älter [19].
- Körperliches Training und Knochendichte bei Menschen mit Glukokortikoid-induzierter Osteoporose [20].

4.4. Subanalysen:

- Effekte unterschiedlichen Knochen-/Osteoporose Status [18].
- Effekte unterschiedlichen Menopausen-Status [18].

4.5. Empfehlungen für optimierte Trainingsprotokolle

- Trainingsinhalte [21].
- Dynamisches Krafttraining [22].
- Wassergymnastik [23].
- Trainingshäufigkeit [24].
- Reizhöhe [25].
- Interaktives kognitiv-motorisches Training (eingereicht)

4.5.1. Subanalysen trainingsrelevanter Größen wie:

- Interventionsdauer [17,19].
- Supervision [16,18].
- Belastungsprogression im Verlauf der Intervention [17,18].

4.6. Interaktion unterschiedlicher Therapieansätze

- Kombination von Hormonersatztherapie und körperlichem Training [26].
- Kombination von Bisphosphonat-Therapie und körperlichem Training [27].
- Kombination von knochenanaboler Osteoporosemedikation und körperlichem Training [28].
- Kombination von körperlichem Training und Vitamin D Supplementierung [29].
- Kombination von körperlichem Training und Protein-Supplementierung [30]

4.7. Übergreifende Methodik der systematischen Literaturrecherchen und Meta-Analysen

Die Literaturrecherche für die vorliegenden systematischen Übersichtsarbeiten und Meta-Analysen folgte exakt dem Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) Statement. Alle Arbeiten wurden im internationalen prospektiven Register für systematische Übersichtsarbeiten (PROSPERO) registriert. Je nach Thematik (siehe dort) erfolgte die Suche in 4-8 Datenbanken. Die Datenbanken „PubMed“, „Scopus“, „Web of Science“, „Cochrane“, „Science Direct“, „Eric“, „ProQuest“, „SPORTDiscus“ und „Primo“ wurden für die Recherche genutzt. Im Falle der Leitliniensuche erfolgte zusätzlich eine Abfrage der Leitlinien-Datenbanken der GIN (Guideline International Network) und AWMF (Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaften e.V.). Die Suche erfolgte überwiegend ohne sprachliche Einschränkungen. Es wurde jeweils ein Standard-Suchprotokoll entwickelt, das ein standardisiertes Vokabular (Mesh-Term für MEDLINE) verwendet. Details sind den jeweiligen Kapiteln der Untersuchungen zu entnehmen.

4.8. Randomisierte kontrollierte Studien

Im Rahmen der vorliegenden Leitlinienerstellung wurden keine randomisierten, kontrollierten Studien durchgeführt. In wenigen Bereichen („Reizrate“, „-dauer“, „-dichte“) wurde die Evidenz allerdings über vorliegende, randomisierte kontrollierte Studien eingeschätzt.

4.9. Bewertung der Studienqualität

Wie berichtet, folgten alle vorgelegten systematischen Reviews und Meta-Analysen exakt gemäß dem PRISMA Statement. Als Qualitätsinstrument zur Bewertung der methodischen Qualität der systematischen Übersichtsarbeiten und Meta-Analysen ist PRISMA jedoch nur eingeschränkt geeignet [31], sodass wir R-AMSTAR (Revised Assessment of Multiple Systematic Reviews (R-AMSTAR)) als Bewertungsinstrument heranzogen⁴ [32]. Die Erfassung der methodischen Qualität durch die AMSTAR Checkliste erfolgte via Online Tool (<https://www.perosh.eu/wp-content/uploads/2014/02/R-AMSTAR-Checklist-OSH-Evidence.pdf>) und Tabellenkalkulationsprogramm durch Wolfgang Kemmler (WK), Simon von Stengel (SvS), Mahdiah Shojaa (MS) und Stephanie Kast (SK) im Konsensverfahren.

Für die Bewertung der klinischen Studien innerhalb der Meta-Analysen erfolgte mit einer Ausnahme (Cochrane Risk of BIAS II)⁵ eine Erfassung der methodischen Qualität gemäß der Empfehlungen von PEDro (Physiotherapy Evidence Database Scale Risk of Bias Tool [33]) und TESTEX (Tool for the assessment of Study quality and reporting in EXercise [34]), die speziell für Interventionsstudien im Spannungsfeld „Physiotherapie“ und/oder „körperliches Training“ entwickelt wurden. PEDro-Scores von <5, 5–6 bzw. ≥7 Score-Punkten weisen auf eine niedrige, moderate oder hohe methodische Qualität hin [35]. Um den Einfluss der methodischen Qualität (Klassifizierung PEDro-Score, s.o.) auf das Ergebnis der Meta-Analyse einzuschätzen, erfolgten bei angemessener Studienanzahl und Verteilung Sensitivitätsanalysen. Insbesondere bei fehlendem Einfluss auf das Outcome wurden die Ergebnisse allerdings nicht konsistent in den jeweiligen Publikationen berücksichtigt. Die methodische Bewertung der Studie wurde paarweise, aber unabhängig vom jeweiligen Autoren der Meta-Analyse (siehe

⁴ Da alle erstellten systematischen Übersichtsarbeiten und Meta-Analysen eine vergleichbare Methodik aufwiesen, unterschieden sich die vorgelegten Arbeiten lediglich marginal.

⁵ <https://methods.cochrane.org/risk-bias-2>.

dort), den Projektkoordinatoren (WK, SvS, DS) oder erfahrenen Projektmitarbeitern (MS, SK) vorgenommen.

4.9.1. Evidenzen und Evidenzgrade

Zur Beantwortung der oben genannten Fragestellungen und Ziele wurden die Evidenzen aus Meta-Analysen sowie randomisierten klinischen Studien, also Studientypen, denen hohe Evidenz zugestanden wird (Tab. 1), herangezogen.

Tab. 1: Evidenzgrade von Studien gemäß der Agency for Healthcare Research and Quality (AHRQ; <https://www.ahrq.gov/cpi/about/index.html>)

1a	Evidenz durch <u>Meta-Analyse</u> von <u>mehreren randomisierten, kontrollierten Studien</u> ⁶
1b	Evidenz aufgrund von mindestens <i>einer</i> randomisierten, kontrollierten Studie.
2a	Evidenz aufgrund von mindestens einer gut angelegten, jedoch nicht randomisierten und kontrollierten Studie.
2b	Evidenz aufgrund von mindestens einer gut angelegten, quasi-experimentellen Studie.
3	Evidenz aufgrund gut angelegter, nicht-experimenteller deskriptiver Studien, bspw. Vergleichsstudien oder Fall-Kontroll-Studien.
4	Evidenz aufgrund von Berichten von Experten-Ausschüssen oder aufgrund der klinischen Erfahrung anerkannter Autoritäten.
5	Evidenz aufgrund von Fallserien oder mehrerer Expertenmeinungen

Agency for Healthcare Research and Quality (<https://www.ahrq.gov/cpi/about/index.html>)

Auf der Basis dieser Evidenzklassen wurden unter Miteinbeziehung von Aspekten wie Nutzen-Risiko-Verhältnis, Anwendbarkeit/Umsetzbarkeit und Präferenzen von Patienten-/Studienteilgruppen die unten aufgeführten Empfehlungsstufen erstellt.

Tab. 2: Empfehlungsstufen gemäß Programm für nationale Versorgungsleitlinien [36].

Grad A	Zumindest eine randomisierte kontrollierte Studie von insgesamt guter Qualität und Konsistenz, die sich direkt auf die jeweilige Empfehlung bezieht und nicht extrapoliert wurde (Evidenzebenen Ia und Ib).
Grad B	Gut durchgeführte klinische Studien, aber keine randomisierten klinischen Studien, mit direktem Bezug zur Empfehlung (Evidenzebenen II oder III) oder Extrapolation von Evidenzebene I, falls der Bezug zur spezifischen Fragestellung fehlt.
Grad C (oder 0)	Berichte von Expertenkreisen oder Expertenmeinung und/oder klinischen Erfahrungen anerkannter Autoritäten (Evidenzkategorie IV) oder Extrapolation von Evidenzebene IIa, IIb oder III. Diese Einstufung zeigt an, dass direkt anwendbare klinische Studien von guter Qualität nicht vorhanden oder nicht verfügbar waren.

⁶ Bei Daten, die über Subanalysen oder Meta-Regression einer vorliegenden Meta-Analyse generiert wurden oder die nicht exakt auf den fokussierten Endpunkt der Empfehlung adressierten, reduzierten wir den Evidenzgrad in Absprache innerhalb der Lenkungsgruppe auf 1b.

4.9.2. Graduierung von Empfehlungen, Empfehlungsgrade

Die Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaften (AWMF) empfiehlt ein dreistufiges Modell, das in der vorliegenden Leitlinie zur Graduierung von Empfehlungen verwendet wird.

Tab. 3: Empfehlungsgrade gemäß AWMF

Empfehlungs-grad	Beschreibung	Formulierung
A	Starke Empfehlung	Soll / soll nicht
B	Empfehlung	Sollte / sollte nicht
0	Empfehlung offen	Kann erwogen werden / kann verzichtet werden

„Negativempfehlungen“ der Stärke A (starke Negativempfehlung: „soll nicht“) und B (abgeschwächte Negativempfehlung: „sollte nicht“), die auf den jeweiligen oben angegebenen Evidenzgraden beruhen, wurden ebenfalls berücksichtigt. Die allgemeingültigen Empfehlungen der Leitlinien können bzw. müssen in Einzelfallentscheidung modifiziert werden, sofern patientenindividuelle Gründe dies erfordern.

5. Konsens Verfahren der Leitlinienkommission

Die Konsensfindung wurde in einem zweistufigen Verfahren durchgeführt. Im ersten Abschnitt erfolgte zwischen Mitte Juli und September 2024 eine digitale Abstimmung im Delphi-Verfahren (eine Runde). Hierzu wurden alle 14 Mandatsträger der Fachgesellschaften und beteiligten Organisationen mittels Online Link (<https://www.empirio.de>) zu einer Vorab Delphi-Online-Abstimmung (stimme zu/stimme nicht zu/Enthaltung; s.o.) der Empfehlungen eingeladen. Ebenfalls bereitgestellt wurde die aktuelle Version der Langfassung der Leitlinie mit Hintergrundinformation sowie das AWMF Manual „Hilfestellung zu Delphi-Verfahren für Leitlinien mittels digitaler Abstimmung“. Alle Mandatsträger der Fachgesellschaften nahmen an der nicht anonymisierten Abstimmung teil. Empfehlungen, die von allen Mandatsträgern positiv votiert wurden, wurden als beschlossen angesehen und gingen nicht mehr in die nachfolgenden Konsenskonferenzen ein. Bei Nichtzustimmung einer Empfehlung wurden die Mandatsträger gebeten, einen konkret ausformulierten Alternativvorschlag mit Begründung und Angabe von Literatur zu eröffnen und dem Leitlinienkoordinator in einer bearbeitbaren EDV-Version zuzusenden. Der Hintergrundtext, der keiner formalen Abstimmung bedurfte, konnte kommentiert und ebenfalls mit konkreten und begründeten Änderungsvorschlägen versehen werden. Das Ergebnis der 1. Abstimmungsrunde sowie alle Änderungsvorschläge und relevanten Kommentare wurde an die Mandatstragenden der Fachgesellschaften zurückgemeldet.

Im zweiten Schritt wurden Empfehlungen, die in der Vorab Delphi-Online-Abstimmung eine Zustimmung von weniger als 95% erhielten, in der nachfolgenden Konsenskonferenz im nominalen Gruppenprozess am 29.10.2024 via Zoom-Tool besprochen und abgestimmt. Die Veranstaltung wurde durch eine neutrale Vertreterin des AWMF (Frau Frauke Schwier) moderiert. Nach Einführung in das Procedere erfolgte jeweils eine kurze Präsentation der zu konsentierenden Empfehlungen mit kurzer Hintergrundinformation und zugrunde liegender Evidenz. Nach Berücksichtigung aller Wortmeldungen wurde in einigen Fällen der Wortlaut der Empfehlungen und/oder der Empfehlungsgrad geändert, bzw. auf die Implementierung als Empfehlung verzichtet. Die Abstimmung aller Empfehlungen erfolgte im Weiteren jeweils offen durch Akklamation unter Leitung und Dokumentation durch die Vertreterin des AWMF. Innerhalb der vierstündigen Veranstaltungen wurden alle Empfehlungen von den teilnehmenden Mandatsträgern gemäß Regelwerk der AWMF einstimmig (in den Empfehlungen als „starker Konsens“ vermerkt) beschlossen.

Die Verabschiedung der Leitlinie durch die beteiligten Fachgesellschaften, Organisationen und Institutionen (s.o.) erfolgte am 10.02.2025.

5.1. Umgang mit Interessenkonflikten

Die Interessenserklärungen wurden von Frauke Schwier (AWMF) und Wolfgang Kemmler (Leitlinienkoordinator, Interessenkonfliktbeauftragter) bewertet. Für beide Gutachter erfolgte eine Bewertung des Interessenkonflikts durch den jeweils anderen Gutachter. Die Interessenserklärungen wurden mit dem AWMF Interessenerklärung Online Tool im Zeitraum Oktober 2023 bis Mai 2024 erhoben. Lediglich Mandatsträger mit vorliegender Erklärung zum Interessenkonflikt konnten an der Online-Abfrage und Konsenskonferenz teilnehmen. Neben den Mandatsträgern wurden für die Mitglieder der Lenkungsgruppe, die Koordinatoren sowie die Betreuer der systematischen Literaturarbeiten, die meist im Rahmen von Dissertationen erfolgten (2.5.2.), das Vorliegen von Interessenkonflikten ebenfalls via AWMF Interessen-

erklärung Online Tool überprüft. Für Studierende (2.5.1)⁷, die im Rahmen ihrer Dissertation Arbeiten erstellt hatten, die in die Leitlinie eingingen, wurde auf eine Darlegung von Interessenkonflikten verzichtet. Gemäß des Formblatts „Erklärung von Interessen und Umgang mit Interessenkonflikten“ des AWMF erfolgte die Bewertung der Interessen nach der Einschätzung, ob Interessenkonflikte vorliegen, ob ein thematischer Bezug zur Leitlinie insgesamt und/oder in Bezug auf spezifische Fragestellungen vorliegt und auf die Einschätzung der Relevanz von Interessenkonflikten in gering, moderat und hoch unter Berücksichtigung des eventuellen Ausmaßes des resultierenden Konflikts, der Funktion der betroffenen Person innerhalb der Leitliniengruppe und der protektiven Faktoren.

5.1.1. Bewertung der Interessenkonflikte

Die Konkretisierung des Interessenkonfliktmanagements erfolgte gemäß „AWMF-Kommission Leitlinien“. Geringe, moderate und hohe Evidenz für Interessenkonflikte die in Zusammenhang mit der vorliegenden Leitlinie stehen könnten, wurden wie folgt bewertet:

- **Geringer Interessenkonflikt:**
 - Begründung: Einzelne Vorträge finanziert durch Industrie
 - Konsequenz: Limitation von Leitungsfunktion (Koordination/Leitung)
- **Moderater Interessenkonflikt:**
 - Begründung: Tätigkeiten in industriefinanzierten Advisory Boards, wissenschaftlicher Beirat oder als Gutachter
 - Konsequenz: Keine Teilnahme an Abstimmung für die thematisch relevanten Empfehlungen
- **Hoher Interessenkonflikt:**
 - Begründung: Eigentumsinteresse, Arbeitsverhältnis bei Industrie, hoher Aktienbesitz einzelner Firmen
 - Konsequenz: Keine Teilnahme an Beratungen und keine Abstimmung

Eine Offenlegung möglicher Interessenkonflikte erfolgte durch alle Mandatsträger, LL-Koordinatoren, Autoren, Studienstatistiker, Berater und Moderatoren (Kap. 12, Anhang).

Zusammenfassend wurde für keinen der oben genannten Beteiligten ein Interessenkonflikt mit Themenbezug zur vorliegenden Leitlinie erfasst oder bewertet.

⁷ Clara Born, Cecilie Fischer, Isabelle Hoffmann, Sara Kaiser, Christopher Klotz, Michelle Mages, Ramin Mohebbi, Eileen Schinkel, Julia Wolf, Anna-Lena Zitzmann

Teil II: Inhaltliche Aspekte der Leitlinie, Empfehlungen

1. Übergreifende Leitliniensuche

Einführung

Zur Identifizierung geeigneter Empfehlungen im Spannungsfeld „körperliches Training und Osteoporose“ erfolgte zunächst eine Leitlinienrecherche. Für die Entwicklung neuer Leitlinien stellen vorhandene Leitlinien eine wichtige Basis dar, aus denen zeiteffektiv und evidenzbasiert, falls nicht vollständig, so doch zumindest teilweise Empfehlungen übernommen werden können. Für die vorgelegte Leitlinie war die Erwartung, dass nicht nur Evidenzen zur Effektivität eines körperlichen Trainings zur Knochenfestigkeit bei unterschiedlichen Kollektiven, sondern ebenso konkrete und ausreichend exakte sportwissenschaftliche Empfehlungen für die trainingspraktische Umsetzung eines körperlichen Trainings aus bestehenden Leitlinien übernommen werden können.

Methodik

Neben einer Abfrage der Leitlinien-Datenbanken der GIN (Guideline International Network) und AWMF (Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaften e.V.) wurde eine umfassende Suche in elektronischen Datenbanken über PubMed, Scopus und Cochrane nach allen aktuellen Leitlinien durchgeführt, die zwischen 2008 und Juni 2021 veröffentlicht wurden. Einschränkungen nach Sprache wurden nicht vorgenommen. Die Suchstrategie verwendete das PICOS-Schema. Die Literatursuche wurde um die englischsprachigen Suchbegriffe "osteoporosis", "exercise" und "guideline" aufgebaut. Es wurde ein Standardprotokoll für diese Suche entwickelt und ein kontrolliertes Vokabular (Mesh-Begriffe für MEDLINE) verwendet. Die Schlüsselwörter und ihre Synonyme waren wie folgt: (Guideline OR recommendation OR management OR position statements) AND (exercise OR exercise training) AND (osteoporosis OR fracture). Duplikate wurden durch Vergleich von Autorennamen, Titel und Publikationsdatum identifiziert und ausgeschlossen.

Nach Sichtung der Abstracts wurden (a) Übersichtsarbeiten, (b) Arbeiten, die nicht primär auf Osteoporose oder Frakturen fokussieren oder (c) Arbeiten in nicht englischer oder deutscher Sprache ausgeschlossen. Nach Sichtung der Volltext-Artikel wurden nochmals 41 Artikel überwiegend aufgrund ihres marginalen Informationsgehaltes im Spannungsfeld „körperliches Training und Osteoporose“ nicht berücksichtigt, sodass insgesamt 10 Arbeiten genauer analysiert wurden (Abb. 1).

Zwei Gutachter (SvS, WK) bewerteten unabhängig voneinander zunächst die Volltextartikel, dann die extrahierten Daten aus den eingeschlossenen Studien. Konnte kein Konsens erzielt werden, wurde ein dritter Gutachter konsultiert (MS). Das verwendete Extraktionsformular umfasste Publikationsmerkmale wie Autoren-/Herausgebernamen, Titel des Artikels, Land und Publikationsjahr, Merkmale zur Methodik der Ableitung der Evidenz (bspw. Expertenpanel, systematische Reviews mit/ohne Meta-Analyse, Konsensrunden) sowie insbesondere Daten zu Vollständigkeit, Anwendbarkeit und Aktualität der Empfehlungen zu einem körperlichen Training.

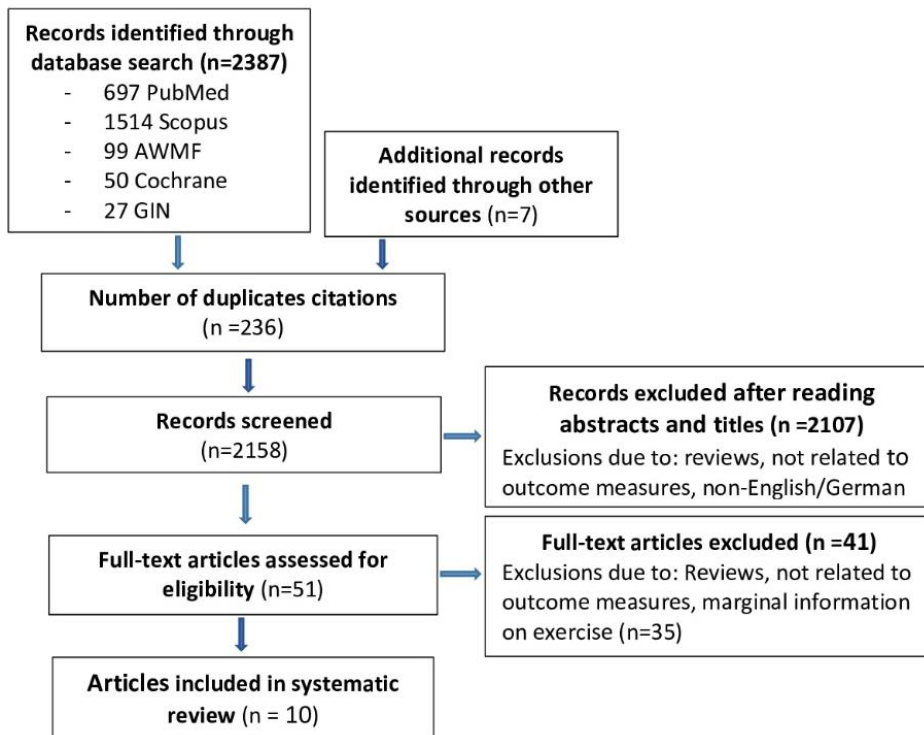


Abbildung 1: Flussdiagramm der Leitliniensuche [37]

In die Bewertung der Vollständigkeit der Daten gingen Parameter wie (a) Bezug zu relevanten Personengruppen (postmenopausale Frauen, Männer 45 Jahre+, Personen mit Osteopenie/Osteoporose), (b) Trainingsziele (Knochenfestigkeit, Sturzprophylaxe), (c) Belastungstypen (gewichtstragende Belastung, Impactbelastung, Kraft-/Schnellkraft, Gleichgewicht, Umfang der adressierten Muskulatur), (d) Belastungskomponenten (Reizintensität, -frequenz, -dauer -dichte; Bewegungsgeschwindigkeit, Trainingshäufigkeit) sowie relevante Trainingsprinzipien (u.a. progressive Belastungserhöhung, Individualisierung, Spezifität, Periodisierung) ein. Die Analyse der Umsetzbarkeit⁸ basierte auf der Vollständigkeit der Trainingsempfehlungen und schloss konkrete Vorgaben zur trainingsmethodischen Umsetzung (bspw. Vorgabe der Reizintensität, Geräte), aber auch Kontraindikationen für bestimmte Belastungstypen mit ein. Die Aktualität der Empfehlungen wurden nach dem Erscheinungsjahr bewertet.

⁸ Nicht deckungsgleich mit dem AGREE II –Kriterium „Applicability“ (Domäne 5), bei der zusätzlich Barrieren der Applikation, Ressourcen zur Durchführung sowie Monitoring-/Auditierungskriterien erfragt werden.

Tab. 4: Übersicht über Leitlinien, und Positionspapieren mit relevanten Informationen im Spannungsfeld Fraktur/Osteoporose

Titel [Referenz]	Format	Land	Generierung der Evidenz (exercise)	Vollstän- digkeit	Umsetz- barkeit	Aktua- lität
Osteoporosis prevention, diagnosis and management in postmenopausal women and men over 50 years of age. The Royal Australian College of General Practitioners and Osteoporosis Australia [38]	Leitlinie "Osteoporose"	Australien	Nationale Expertengruppe System. Literaturrecherche, bis 2016 Konsensus-Konferenz	1	1	3
Exercise and Sports Science Australia (ESSA) position statement on exercise prescription for the prevention and management of osteoporosis [8]	Positionspapier "exercise"	Australien	Nationale Expertengruppe, Konsensus-Konferenz	2	3	3
Canadian Academy of Sport and Exercise Medicine position statement: osteoporosis and exercise [39]	Positionspapier "exercise"	Kanada	Nationale Expertengruppe (?), System. Literaturrecherche bis 2012	1	1	3
Leitlinie Physiotherapie und Bewegungstherapie bei Osteoporose [2] (in Deutsch)	Leitlinie "exercise"	Deutschland	Nationale Expertengruppe System. Literaturrecherche/-analyse bis 2005 Konsensus-Konferenz	3	3	2
Too Fit To Fracture: outcomes of a Delphi consensus process on physical activity and exercise recommendations for adults with osteoporosis with or without vertebral fractures [40]	Positionspapier "exercise"	Inter- national	Internationale Expertengruppe Konsensus-Konferenz	2	3	3
Best Practice Guidelines to Prevent and Manage Osteoporosis and Fractures [41]	Leitlinie Osteoporose	Irland	Nationale Expertengruppe Structure review of the evidence (Leitlinien), Konsensus-Konferenz	1	1	2
Position Statement: Exercise Guidelines to Increase Peak Bone Mass in Adolescents [42]	Positionspapier "exercise"	Korea	Nationale Expertengruppe Systematische Literaturrecherche bis 2019 Konsensus-Konferenz	1	2	3
Management of Osteoporosis and the Prevention of Fragility Fractures: A National Clinical Guideline [43]	Leitlinie Osteoporose	Großbritannien Schottland	Nationale Expertengruppe Systematische Literaturrecherche bis 2015 Konsensus-Konferenz	2	2	3
Thai Osteoporosis Foundation (TOPF) position statements on management of osteoporosis [44]	Positionspapier "exercise"	Thailand	Nationale Expertengruppe Konsensus-Konferenz	2	2	3
American College of Sports Medicine Position Stand: physical activity and bone health [45]	Positionspapier "exercise"	USA (ACSM)	Nationale Expertengruppe Konsensus-Konferenz	3	3	2

1: gering; 2: moderat, 3: hoch. **Vollständigkeit** der Empfehlung hinsichtlich (a) Personengruppen, (b) Trainingszielen, (3) Belastungstypen, (4) Belastungskomponenten, (5) Trainingsprinzipien. **Umsetzbarkeit**: konkrete Empfehlungen zur Durchführung eines Trainingsprotokolls inklusive Kontraindikationen. **Aktualität** des Generierungsprozesses der Empfehlung (...wurde die derzeit vorliegende Evidenz überwiegend oder vollständig berücksichtigt). ACSM: American College of Sports-Medicine.

Bewertung der methodischen Qualität

Alle Artikel, welche die vordefinierten Einschlusskriterien erfüllten, wurden von zwei Prüfern (SvS, WK) anhand der AGREE II [46] Vorgaben unabhängig voneinander auf methodische Qualität bewertet. Meinungsverschiedenheiten wurden unter Einbeziehung eines dritten Prüfers (MS) gelöst.

Anzumerken ist, dass die AGREE II Vorgaben [46] nicht bei allen eingeschlossenen Arbeiten angewendet werden konnten. Insbesondere „Positionspapiere“ in Zeitschriften konnten wohl aus Platzgründen⁹ vielfach Angaben zu „stakeholder involvement“ (Domäne 2) oder „editorial independence“ (Domäne 6) nicht oder nicht vollständig adressieren.

Tab. 5: Methodische Qualität der Arbeiten

	Scope and Purpose	Stakeholder Involvement	Rigor of Development	Clarity of Presentation	Applicability	Editorial independence
Australien [38]	98	85	98	96	52	90
Deutschland [2]	86	81	82	86	56	64
International [40]	86	62	73	90	71	100
Irland [41]	86	71	71	75	86	79
Schottland [43]	86	76	77	86	43	86

Ergebnisse

Die australische Leitlinie “Osteoporosis prevention, diagnosis and management in postmenopausal women and men over 50 years of age” des “Royal Australian College of General Practitioners and Osteoporosis Australia” [38] gibt eine literatur- (bis 2016) und konsensbasierte Zusammenfassung wichtiger Handlungsempfehlungen für die Spannungsfelder „Erhöhung der Knochenmasse“, „Sturzprävention“ und Fraktur-Rehabilitation. Obwohl diese Leitlinie auch praktische Anleitungen für die Umsetzung in die Trainingspraxis ausspricht, gehen sowohl trainingswissenschaftliche Empfehlungen wie auch die Transferierung in die Trainingspraxis nicht weit genug.

Das Positionspapier der Exercise and Sports Science Australia (ESSA)[8] ist eine expertenbasierte Übersicht über ein körperliches Training zur Prävention und Therapie der Osteoporose¹⁰. Belastungstypen und Belastungskomponenten werden im Artikel sehr dezidiert adressiert und im Rahmen von Trainingsempfehlungen für Personen mit unterschiedlicher Frakturgefährdung aufgegliedert. Die Forschungsgruppe benennt zudem wesentliche „Evidenzlücken“ im Spannungsfeld körperliches Training und Fraktur(-häufigkeit). Manko des Positionspapiers ist die trainingswissenschaftliche Fokussierung auf den Aspekt der Knochenfestigkeit sowie fehlende Hinweise zur Implementierung der Trainingsprotokolle und deren nachhaltiger Effekte durch geeignete Trainingsprinzipien. Dieser Umstand ist möglicherweise dem kurzen Format des veröffentlichten Positionspapiers geschuldet.

⁹ Veröffentlichungen als Artikel unterliegen einer Beschränkung des Umfangs.

¹⁰ D.h. Fokus der Trainingsempfehlungen ist die Verbesserung der „Knochenfestigkeit“.

Das Positionspapier der Kanadischen Academy of Sport and Exercise Medicine [39] gibt eine unvollständige Übersicht über ein körperliches Training zur Verbesserung der Knochenfestigkeit in unterschiedlichen Lebensphasen. Eine systematische Literaturrecherche zur Ableitung dezidierter Trainingsempfehlungen fand nicht statt.

Die Deutsche Leitlinie „Physiotherapie und Bewegungstherapie bei Osteoporose“ [2] kann als belastbare Grundlage für Empfehlungen zu einem körperlichen Training zur Frakturprophylaxe angesehen werden. Die Leitlinie adressierte die wichtigsten Zielgruppen und Trainingsziele und gibt eine gut strukturierte, nahezu vollständige und in die Trainingspraxis umsetzbare Übersicht der wichtigsten Aspekte. Allerdings basiert die Leitlinie auf einer systematischen Literaturrecherche bis Ende 2005, sodass relevante neuere Untersuchungen nicht in die Evidenzgenerierung eingeschlossen sind. Eine andere Limitation ist die fehlende Implementierung der Empfehlungen in den stationären und insbesondere ambulanten Trainingsbetrieb, der im Rahmen des Rehabilitationssports bei Osteoporose eine flächendeckende Verbreitung aufweist [47]. Der Umstand, dass wissenschaftliche Empfehlung leider keinen oder kaum Eingang in die praktische Umsetzung des körperlichen Trainings bei Osteoporose in Ausbildung und Trainingsalltag supervidierter ambulanter oder stationärer Gruppen findet, ist in anderen europäischen Ländern leider ebenfalls gängige Praxis [48].

Das von einer internationalen Expertengruppe herausgegebene Positionspapier „Too Fit To Fracture“ [40] wurde mittels Delphi-Consensus Prozess generiert. Die Leitlinie orientiert sich an Schlüsselfragen von Osteoporose-Patientengruppen und medizinischem bzw. physiotherapeutischem Fachpersonal zu den Bereichen „Trainingsbeschreibung-/vorgaben, therapeutische Ziele des Körpertrainings, körperliche Aktivität und Trainingsempfehlungen“, die von Fachexperten im oben genannten Verfahren abgearbeitet wurden. Die klinischen Szenarien waren in drei Kategorien „Osteoporose aufgrund (lediglich) geringer Knochendichte“, „Osteoporose mit einer Wirbelkörperfraktur“ und „Osteoporose mit mehreren Wirbelkörperfrakturen, Hyperkyphose und Schmerzen“ strukturiert. Der Bereich Anamnese zur Identifikation der Zielsetzung, des Trainingsprotokolls und der Hinweise zur sicheren Alltagsaktivität hat in der Patienten-zentrierten Leitlinie einen hohen Stellenwert inne. Die Trainingsziele für die oben genannten Zielgruppen sind nachvollziehbar und gut strukturiert formuliert. Die Trainingsempfehlungen wurden aber aufgrund z.T. inadäquater „Schüsselfragen“ (bspw. „how much weight can I lift during exercise“) unstrukturiert, unvollständig und für den Trainingspraktiker kaum anwendbar beschrieben.

Die irische Leitlinie „Best Practice Guidelines to Prevent and Manage Osteoporosis and Fractures“ aus dem Jahr 2008 [41] fokussiert primär auf den Bereich Sturz und Fraktur. Der Bericht konzentriert sich zunächst auf Struktur, Setting und Anwendungskonzepte körperlichen Trainings zur Sturz- und Frakturprophylaxe. Im Anschluss erfolgt eine übersichtliche Zusammenfassung vorliegender Leitlinien klassifiziert in „Best Practice Guidelines to Prevent and Manage Falls in Older People“ und „Best Practice Guidelines to Prevent and Manage Osteoporosis and Fractures“ sowie „exercise and falls“. Letzterer Abschnitt beschäftigt sich nur eingeschränkt mit körperlichem Training, zeigt aber eine klare Übersicht über sporttherapeutische Behandlung-Schemata in unterschiedlichen Stadien der Osteoporose-Erkrankung. Dem eher allgemeinen Charakter der Leitlinie und dem Publikationsdatum geschuldet, bleiben die konkreten trainingswissenschaftlichen Empfehlungen allerdings zu vage.

Das koreanische Positionspapier („Position Statement: Exercise Guidelines to Increase Peak Bone Mass in Adolescents“) von 2019 unterscheidet sich durch die fokussierte Zielgruppe von allen übrigen Leitlinien und Positionspapieren. Unter der Prämisse, dass die

Wirkmechanismen mechanischer Belastung auf die Knochenfestigkeit übergreifend wirksam sind, trägt dieses Positionspapier durch die von einer Fachkommission entwickelten anwendungsorientierten Schlüsselfragen und einem entsprechenden systematischen Review aus einer anderen Perspektive zu neuen Ansätzen der Osteoporose-Prävention bei. Trotzdem ist die Leitlinie für den Anwender weder vollständig noch ausreichend spezifisch, um Trainingsprotokolle für relevante Zielgruppen generieren zu können.

Eine aktuelle, übergreifende Leitlinie zu Osteoporosemanagement und der Prävention von niedrig-traumatischen Frakturen legt das „Schottische Intercollegiate Guideline Network“ (SIGN) vor [43]. Die Leitlinie gibt strikt evidenzbasierte Empfehlungen u.a. für Trainingsprotokolle, die jedoch nur auf der Ebene der Trainingsinhalte („types of exercise“) verbleiben. Somit wird die bereits vorliegende Evidenz in diesem Spannungsfeld zwar aktualisiert, der Informationsgehalt für den Trainingspraktiker bleibt aufgrund fehlender Angaben zu Methoden, Belastungskomponenten und Trainingsprinzipien gering.

Ähnlich vage bleibt das konsensgenerierte Positionspapier der „Thai Osteoporosis Foundation“ [44], in dem teilweise Empfehlungen ausgesprochen werden, die nicht in Übereinstimmung mit der vorliegenden Literatur stehen¹¹. Zudem stützen sich die Empfehlungen (bei ausreichender Studienlage) sehr oft auf isolierte Studienergebnisse.

Die US-amerikanischen Positionspapieren des American College of Sports Medicine (ACSM), welche die vorliegende Thematik in Teilen adressieren [49-51], liefern zwar jeweils relevante Beiträge zu einzelnen Aspekten eines Trainings mit Osteoporose-Erkrankten, Limitationen bezüglich Strukturiertheit, Vollständigkeit und Aktualität der Empfehlungen machen jedoch eine zeitnahe und gründliche Überarbeitung des Positionspapiers im Spannungsfeld „körperliches Training und Osteoporose“ [49] nötig.

Diskussion

Nach Durchsicht und Analyse der vorliegenden Leitlinien muss insbesondere ein Fehlen aktueller, gut strukturierter und für den Trainingspraktiker ausreichend vollständiger Empfehlungen für ein körperliches Training im Spannungsfeld der Osteoporose und Frakturprophylaxe konstatiert werden. Vielfach werden zentrale Aspekte eines körperlichen Trainings wie Trainingsinhalte, Belastungskomponenten oder Trainingsprinzipien nicht mit der nötigen Strukturiertheit und ausreichenden Präzision adressiert. Ein Beispiel mag die Vorgabe der Reizhöhe (oder -intensität) beim Krafttraining sein, die, was die relative Intensität (% des Maximum) betrifft, meist recht subjektiv aus Einzelstudien abgeleitet wurde. Eine Überprüfung dieser Empfehlung durch eine (Meta-)Analyse vergleichender Studien mit zwei Studienarmen unterschiedlicher relativer Intensität (bspw. [52], ansonsten aber (im Gegensatz zu einer übergreifenden Arbeit [53]) identischen Teilnehmer- und Trainings-Charakteristika) war bisher nie Grundlage entsprechender Leitlinienempfehlungen. Was die Vollständigkeit der Empfehlung betrifft, wurde bspw. die absolute Intensität, letztlich also der Anstrengungsgrad [54], in keiner Leitlinie auch nur ansatzweise adressiert, obwohl dieser Parameter insbesondere beim Training mit älteren Menschen erhebliche Relevanz für Effektivität und Sicherheit aufweisen kann. Was die Strukturiertheit betrifft, orientieren sich nur wenige Leitlinien [55] an einer präzisen sportwissenschaftlichen Terminologie. Dabei sei erwähnt, dass klassische wie auch moderne [56]) sportwissenschaftliche Strukturierungs-

¹¹ Recommended exercises for patients with osteoporosis are the same as for osteopenia with the exception of muscle strengthening exercises, which are prohibited....

ansätze, was Trainingsinhalte¹² und Belastungskomponenten/-normativa¹³ betrifft, bei Trainingsprotokollen im Spannungsfeld „Osteoporose“ (respektive Knochenfestigkeit) an ihre Grenzen stoßen. Als Beispiel mögen die Belastungsgrößen „strain magnitude“ (u.a. [57]) und „strain rate“ (u.a. [58,59]) dienen, die unter Reizhöhe zusammengefasst werden, aber völlig unterschiedlicher Belastungsvorgaben bedürfen.

Fazit

Abzuleiten ist, dass die vorliegenden Leitlinien zu Osteoporosemanagement und Frakturprophylaxe das Spannungsfeld „körperliches Training und Frakturprophylaxe“ überwiegend randläufig, defizitär und eingeschränkt transferierbar adressieren. Eine Ableitung oder Übernahme von Empfehlungen aus den vorliegenden Leitlinien ist somit nur sehr limitiert möglich. Wichtig erscheint der Hinweis, dass ein körperliches Training zur Frakturprophylaxe entsprechend der S3 Leitlinie „Prophylaxe, Diagnostik und Therapie der OSTEOPOROSE bei postmenopausalen Frauen und bei Männern ab dem 50. Lebensjahr“ [60] in ein Therapiekonzept eingebunden werden soll. Dies gilt insbesondere bei fortgeschrittenem Sturz- und Frakturrisiko (vgl. Risikoschwellenkonzept DVO [60]; Einschätzung der Sturzgefährdung Bundesinitiative Sturzprävention [61,62]) als „muss“ (siehe Tabelle 6).

¹² Also bspw. Kraft-, Ausdauer- oder koordinative Training.

¹³ Reizintensität, -häufigkeit, -dauer, -dichte, Trainingshäufigkeit.

2. Evidenz von Effekten körperlichen Trainings auf die Frakturinzidenz

2.1. Effekte körperlichen Trainings auf die Frakturinzidenz niedrig-traumatischer und osteoporotischer Hauptfrakturen

Methodik

Eine im Rahmen der Leitlinienerstellung durchgeführte, systematische Übersichtsarbeit mit Meta-Analyse [16] schloss (a) randomisierte und nicht randomisierte klinische Studien mit mindestens einer Trainings- (TG) versus einer Kontrollgruppe (KG) mit (b) Teilnehmern (Frauen, Männer oder gemischte Kohorten) 45 Jahre und älter, (c) Studien, die sich auf Frakturinzidenz, Verbesserung der Knochenfestigkeit und/oder Sturzanzahl, (d) Studien, welche die Anzahl der Frakturen jeweils für TG und KG als primären oder sekundären Endpunkt, Beobachtung oder unerwünschtes Ereignis berichten und (e) über einen Zeitraum von mindestens 3 Monaten durchgeführt wurden, ein.

Ausgeschlossen wurden Untersuchungen mit Teilnehmern, die sich (a) einer pharmakologischen Therapie mit relevanten positiven (z.B. Bisphosphonat-, Hormonersatztherapie) oder negativen Auswirkungen (Glukokortikoide) auf den Knochenstoffwechsel oder (b) einer Chemo- und/oder Strahlentherapie unterzogen und (c) Studien mit gemischten Interventionen (z. B. körperliches Training und hochdosiertes Vitamin D). Vorläufige Daten, Übersichtsartikel, Fallberichte, Leitartikel, Konferenzberichte, Abstracts und „Letters“ wurden ebenfalls nicht berücksichtigt. Die Literaturrecherche wurde in sechs elektronischen Datenbanken (PubMed, Scopus, Web of Science, Cochrane, Science Direct und ERIC) bis zum 1. Mai 2021 ohne sprachliche Einschränkungen durchgeführt (PROSPERO ID: CRD42021250467) (Abb. 2).

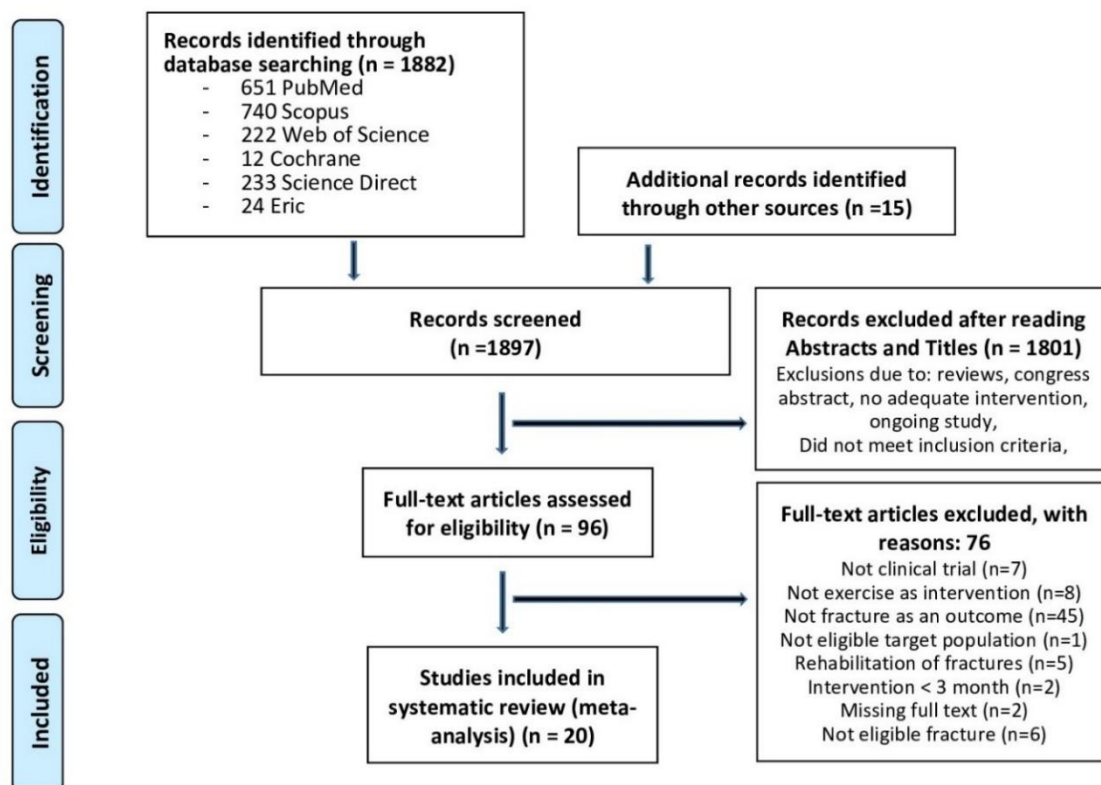


Abb. 2: Flussdiagramm des Suchprozesses „körperliches Training und niedrig-traumatische Fraktur“ [31]

Es wurde ein mixed-effects conditional Poisson regression model zur Analyse der Frakturdaten mittels der R-Pakete metafor [63] und mmeta [64] durchgeführt, die in der Statistiksoftware R [65] enthalten sind. Die Inzidenzen wurden in Ratenverhältnisse (IR) zusammen mit 95%-Konfidenzintervallen (95%-KI) umgewandelt. Subgruppenanalysen wurden für die möglichen Modulatoren Supervision des Trainingsprogrammes sowie für die Progression der Belastung (via Reizhöhe) durchgeführt.

Bewertung von Heterogenität und Effekten kleiner Studien

Die I^2 -Statistik [66] wurde in Kombination mit einem Wald- und einem Likelihood-Ratio-Test genutzt, um den Anteil der Varianz zu ermitteln, der auf Heterogenität zwischen den in die jeweilige Analyse einbezogenen Studien zurückzuführen ist. Funnel Plots mit der Kendall's τ -Statistik kamen zur Anwendung, um eine mögliche Verzerrung im Sinne eines small-study/publication Bias zu untersuchen. Rangkorrelationstests wurden angewandt, um die Asymmetrie des Funnel Plots zu bestimmen [67].

Ergebnisse

Insgesamt wurden 20 Interventionsstudien mit 21 Trainings- (TG) und 20 Kontrollgruppen (KG) mit einer zusammengefassten Anzahl von über 23.000 Teilnehmerjahren (TG: $n=11.836$ vs. KG: 11.275) eingeschlossen (Anhang Tab. 1). Die Untersuchungen unterschieden sich in Bezug auf Teilnehmercharakteristika, Studienendpunkte, methodische Qualität sowie insbesondere Trainingsprotokoll sehr deutlich (Tab. 12a-14 Anhang). Zusammenfassend zeigten sich statistisch signifikante und klinisch relevante Effekte für niedrig-traumatische Frakturen (RR: 0,67, 95%-KI: 0,51–0,87) und osteoporotische Hauptfrakturen (RR: 0,69, 95%-KI: 0,52–0,92) (Abb. 3). Es zeichnet sich allerdings eine z.T. deutliche Heterogenität (niedrig-traumatische Frakturen: $I^2=40\%$) zwischen den Studienergebnissen ab. Eine Sensitivitätsanalyse zeigte keine wesentlichen SMD-Unterschiede (niedrig-traumatische Frakturen: $p=.776$; osteoporotische Hauptfraktur $p=.711$) zwischen Studien mit niedriger, mittlerer oder hoher methodischer Qualität.

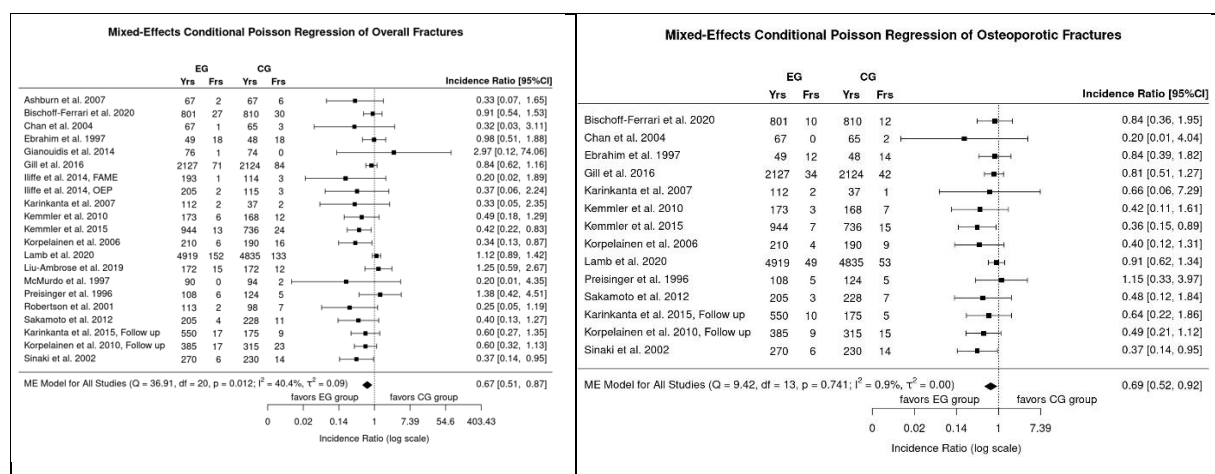


Abb. 3: Forrest-plot der Ergebnisse für niedrig-traumatische (overall) Frakturen (linke Grafik) und osteoporotische Hauptfrakturen (rechte Grafik). Trainingsgruppe (EG) versus Kontrollgruppe (CG)

Die Trichterdiagramme (Abb. 4) deuten auf eine geringe Evidenz von Publication- bzw. „small study“-Bias für die Analyse der niedrig-traumatischen, jedoch nicht der osteoporotischen Hauptfrakturen hin. Abb. 4 (links) zeigt im mittleren Bereich ein auffälliges Überwiegen von Ergebnissen mit positivem Ergebnis. Das entsprechende Ergebnis der leichten Asymmetrie wird allerdings nicht vom Rangkorrelationstest [67] bestätigt.

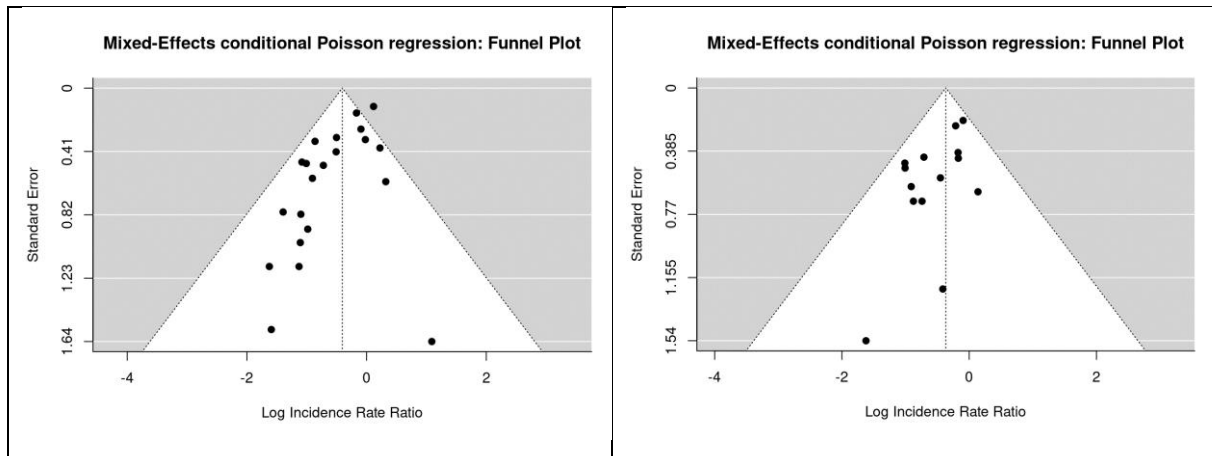


Abb. 4: Trichterdiagramme der Ergebnisse für niedrig-traumatische (linke Grafik) und osteoporotische Hauptfrakturen (rechte Grafik).

Subgruppenanalyse zur Generierung von Trainingsempfehlungen

Die Ableitung von Trainingsempfehlungen gestaltet sich im Spannungsfeld der Frakturprophylaxe besonders schwierig. Insbesondere die unterschiedlichen Trainingsstrategien mit Fokus auf „Sturz“, „Knochenstärke“ oder auf beide Größen, die (im besten Fall) mit Bezug auf das Risikofaktorenprofil der jeweiligen Zielgruppen ausgewählt wurden, erschwert eine sinnvolle Analyse von Trainingsinhalten und Belastungskomponenten. Übergreifende Trainingsaspekte wie Supervision des Trainings und Belastungsprogression sind in geringerem Maße von Interaktionseffekten betroffen und gingen aus diesem Grund in die vorliegenden Subanalysen ein.

Supervision der Trainingseinheit (TE)

In 13 Trainingsgruppen wurde ein überwiegend nicht-supervidiertes¹⁴, in 6 TGs wurde ein überwiegend supervidiertes Trainingsprogramm appliziert. Abbildung 5 zeigt eine signifikante Überlegenheit überwiegend supervidierter vs. nicht supervidierter Trainingsprotokolle sowohl für die niedrig-traumatischen Gesamtfrakturen ($p=.03$), wie auch für die osteoporotischen Hauptfrakturen ($p=.004$)(Abb. 5 rechts).

¹⁴ Bezogen auf die Anzahl der Trainingseinheiten.

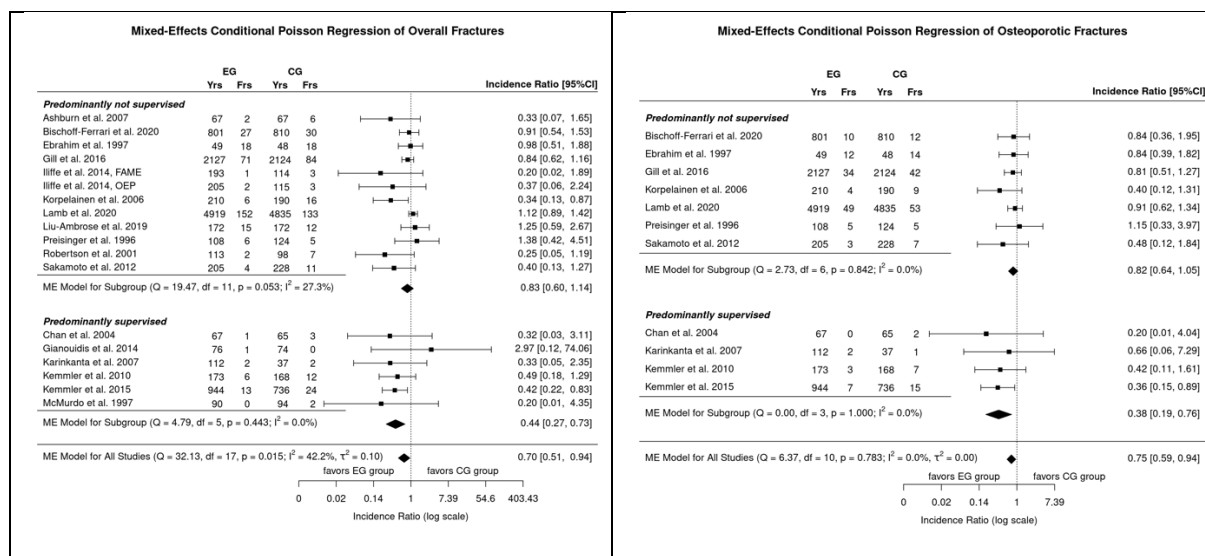


Abb. 5: Forrest-plot der Ergebnisse für überwiegend supervidierte vs. nicht-supervidierte Trainingsprogramme für niedrig-traumatische (overall) Frakturen (linke Grafik) und osteoporotische Hauptfrakturen (rechte Grafik). Trainingsgruppe (EG) versus Kontrollgruppe (CG)

Trainingsprogramme mit Fokus „Erhöhung der Knochenfestigkeit“ (n=4) waren dabei sämtlich überwiegend supervidiert, während isolierte Sturzpräventionsprogramme (n=7) überwiegend nicht-supervidiert waren. Der Großteil der Studien adressierte allerdings beide Frakturrisikofaktoren, sodass unser Ergebnis nur bedingt von der Trainingsstrategie beeinflusst wurde.

Einfluss der Belastungsprogression

Eine Progression via Reizintensität wurde in 11 der 21 TGs durchgeführt. Trotz tendenzieller Unterschiede für niedrig-traumatische und insb. osteoporotischen Hauptfrakturen (Abb. 6) konnte keine signifikante Überlegenheit von Trainingsprogrammen mit Belastungsprogression erfasst werden. Zu diesem Ergebnis beitragen könnte die möglicherweise geringe Relevanz einer Belastungsprogression bei kurzer Interventionsdauer.

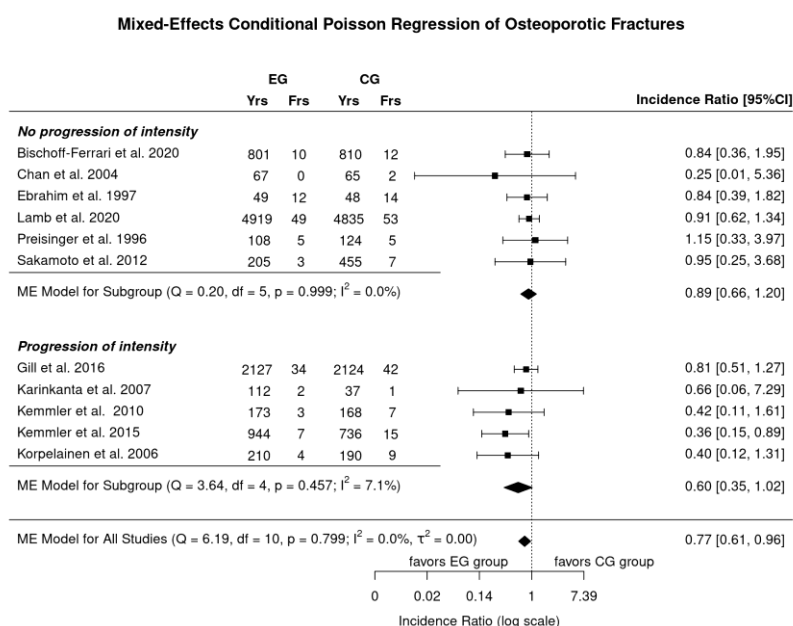


Abb. 6: Forrest-plot der Ergebnisse für Trainingsprogramme mit versus ohne Belastungsprogression: osteoporotische Hauptfrakturen.

Diskussion

Die vorgelegte Analyse belegt die grundsätzlich hohe Evidenz von Effekten eines körperlichen Trainings auf niedrig-traumatische Frakturen mit hoher Effektstärke. Eine ältere Meta-Analyse im Spannungsfeld „körperliches Training und niedrig-traumatische Fraktur“ (RR: 0,49; 95%-KI: 0,31-0,76) sowie Ergebnisse für „sturzinduzierte Frakturen“ [9,11,68] bestätigen dieses Ergebnis.

Neben der Effektivität eines Trainingsprotokolls spielt auch der Supervisionsgrad eine wichtige Rolle bei der Konzeption von Bewegungsprogrammen. Viele Menschen sind nicht in der Lage oder wenig motiviert, (dauerhaft) an betreuten, aushäusigen Programmen teilzunehmen [69,70]. Ausgaben für Übungsleiter, Personal und Räumlichkeiten sowie Epidemie-bedingte Schließungen und/oder Isolation unterstreichen die zunehmende Relevanz von häuslichen Bewegungsprogrammen besonders für die ältere Bevölkerung. Unsere Daten weisen allerdings darauf hin, dass überwiegend nicht supervidierte Übungsprogramme signifikant geringere Frakturreduktionsdaten zeigen als überwiegend supervidierte. Eine kürzlich durchgeführte Meta-Analyse im Bereich des dynamischen Krafttrainings bestätigt diese Daten [71]. Fisher et al. [71] nennen mehrere Gründe für die Überlegenheit von supervidierten (Kraft-)Trainingsprogrammen, die vor allem mit Größen wie Motivation, Überschwelligkeit der Belastung und Sicherheit in Verbindung stehen. Insbesondere Sicherheitsaspekte, die darin begründet sind, dass intensive und komplexe Übungsprotokolle stärker überwacht werden müssen, deuten allerdings darauf hin, dass die Unterschiede in der Frakturinzidenz nicht vollständig auf den Grad der Überwachung, sondern z.T. auf zugrunde liegende Trainingsinhalte und Belastungskomponenten zurückgeführt werden können.

Eine progressive Belastungserhöhung der Trainingsintervention ist essenziell, um die Überschwelligkeit (overload-principle) im Verlauf einer Trainingsintervention zu gewährleisten [72]. Die vorliegende Subanalyse zeigte allerdings keine signifikante Überlegenheit von Trainingsprogrammen mit Progression der Reizintensität. Allerdings lag die Länge der Trainingsinterventionen vieler Studien im Bereich von 12 Monaten und darunter, sodass eine Überschwelligkeit der Belastung, auch bei gleichbleibender Reizhöhe über einen Großteil dieser Zeitdauer aufrechterhalten werden konnte.

Bewertung der Studienqualität und Transferierbarkeit der Ergebnisse

Die Generierung der vorliegenden Evidenz erfolgte via systematischer Literaturrecherche und Meta-Analyse, also Evidenzgrad 1a gemäß AQRH (Tab. 1). Die Anzahl der eingeschlossenen Studien lag mit 20 Untersuchungen in einem moderat-hohen Bereich. Die quantitative Qualitätsbewertung der hier vorgelegten Arbeit mittels R-Amstar [32] zeigte 38 von 44 Punkten (Tab. 48). Negativ zu beurteilen ist allerdings die sehr hohe Heterogenität der Interventionsmaßnahmen innerhalb der Arbeit mit z.T. suboptimalen Trainingsprotokollen (s.u.), die zu einer Reduktion des Effektes beitragen. Insofern gehen wir von einem eher konservativen Ergebnis unserer Untersuchung, keinesfalls aber von einer Überschätzung des Gesamteffektes aus. Die vorliegenden Untersuchungen [10,16] schloss postmenopausale Frauen sowie Männer 45 Jahre und älter mit und ohne vorliegende Frakturen ein, insofern kann ein hoher Generalisierungsgrad unserer Ergebnisse angenommen werden.

Formulierung der Empfehlungen

1	Empfehlung 1	Neu, Stand 2024
Empfehlungsgrad A	Postmenopausale Frauen und Männer 45 Jahre ¹⁵ und älter sollen ein geeignetes körperliches Training ¹⁶ zur Frakturprophylaxe durchführen.	
Evidenzgrad 1a	[16,17]	
	Konsensstärke: 100%	
2	Empfehlung 2	Neu, Stand 2024
Empfehlungsgrad A	Das Trainingsprogramm zur Frakturprophylaxe soll nach Möglichkeit durch eine Bewegungsfachkraft ¹⁷ supervidiert durchgeführt werden.	
Evidenzgrad 1a	[16]	
	Konsensstärke: 100%	

¹⁵ ...mit erhöhter Frakturgefährdung...

¹⁶ Empfehlungen für ein geeignetes Körpertraining werden im Verlauf der Leitlinie sukzessive adressiert.

¹⁷ Gemeint ist eine ausreichend qualifizierte Kraft mit einschlägiger Lizenzierung durch die aufsichtsführende Behörde oder Institution.

3. Trainingsmethodischer Ansatz zur Frakturprophylaxe durch körperliches Training

Neben einem positiven Gesamteffekt zeigen die in Abb. 3 dargestellten Ergebnisse eine deutliche Heterogenität mit zum Teil tendenziell negativen Effekten einzelner Studien. Dies deutet darauf hin, dass einige applizierte Trainingsprotokolle schlicht keinen oder sogar einen negativen Effekt auf den avisierten Endpunkt „Frakturreduktion“ hatten. Tatsächlich sind zur Generierung erfolgversprechender Trainingsprotokolle eine Vielzahl von Aspekten zu beachten sowie (idealerweise) eine dezidierte trainingswissenschaftliche Vorgehensweise zu wählen (Abb. 7).

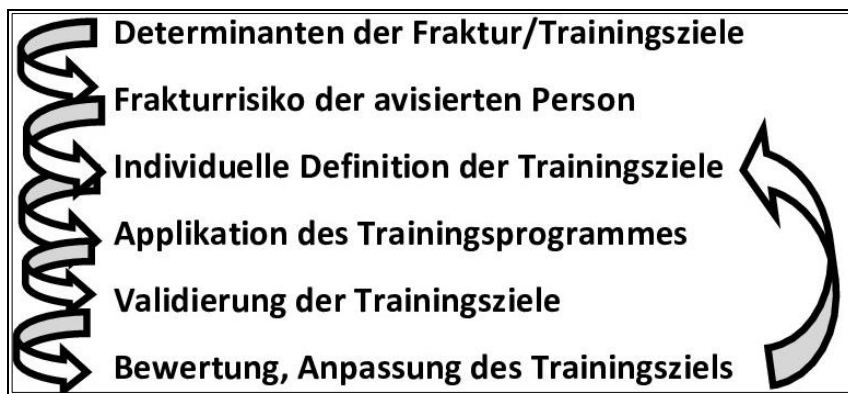


Abb. 7: Schematischer Ablauf der Trainingsregelung zur individualisierten Generierung von Trainingsprotokollen

3.1. Ansatzpunkte und (Trainings-)Ziele eines körperlichen Trainings zur Frakturprophylaxe

Die Frakturprophylaxe ist zwar definitiver Endpunkt einschlägiger Interventionsprogramme im Spannungsfeld der Osteoporose-Erkrankung, zur trainingsmethodischen Ansteuerung und Monitoring der Realisierung individueller Trainingsziele aber nicht geeignet. So sollten Trainingsprogramme insbesondere für ältere Menschen mit Sturzrisikofaktoren auf den Aspekt der Sturzprophylaxe fokussieren, während Untersuchungen mit jüngeren Kollektiven ohne relevante Sturzrisikofaktoren primär über eine Erhöhung der Knochenfestigkeit Einfluss auf die Frakturhäufigkeit nehmen sollten. Naturgemäß unterscheidet sich die trainingsmethodische Ansteuerung dieser Trainingsziele relevant, wobei sich aber durch kluge Auswahl von Trainingsinhalten und -methoden simultane Effekte auf mehrere Trainingsziele realisieren lassen. Abb. 8 zeigt die Determinanten des Frakturrisikos als Ansatzpunkte der Trainingsregelung [73], die im Sinne von Trainingszielen angesteuert werden sollen (Abb. 7).



Abb. 8: Ansatzpunkte und Trainingsziele eines körperlichen Trainings zur Frakturprophylaxe [73].

Wie bereits angemerkt, sind die oben genannten Trainingsziele nicht für alle Kollektive, die von einer Osteoporose betroffen oder bedroht sind, gleichermaßen relevant. Das von der pharmakologischen Forschung zentral fokussierte Interventionsziel „Erhöhung der Knochenfestigkeit“ ist, je nach Alter des Betroffenen, körperlicher Fitness und Osteoporosestatus, ein wichtiger, jedoch nicht der einzige Ansatzpunkt eines körperlichen Trainings. Eine weitere Trainingsstrategie zielt auf die Verringerung des Sturzrisikos ab. Besonders die Schenkelhalsfrakturen des älteren Menschen werden zu einem Großteil durch Stürze verursacht [74], sodass ein Sturzprophylaxe-Training bei diesen Personen besonders erfolgversprechend ist und — verglichen mit dem intensiven Training der Knochenfestigkeit — körperlich weniger belastend durchgeführt werden kann. Ein weiteres frakturspezifisches Trainingsziel kann es sein, die Energie- bzw. Gewalteinwirkung des Sturzes auf den Knochen möglichst gering zu halten, um eine Fraktur zu verhindern. Neben frakturspezifischen Zielgrößen kann ein Körpertraining bzw. eine Bewegungstherapie auch einen wichtigen Beitrag zur Schmerzreduktion bei Osteoporose oder eine Verbesserung der Alltagsmotorik in den meist älteren Betroffenenkollektiven bewirken.

Allerdings müssen individuell nicht alle diese Trainingsziele gleichermaßen relevant sein. So ist das zentrale Trainingsziel für Frauen in den Wechseljahren (aufgrund des erhöhten Knochenabbaurisikos in dieser Lebensphase) der Erhalt/die Erhöhung der Knochenfestigkeit, während ein spezifisches Training zur Beeinflussung von Sturzhäufigkeit und -ablauf aufgrund des geringen Sturzrisikos vernachlässigbar ist. Vice versa ist das Trainingsziel „Sturzprophylaxe“ besonders bei älteren Menschen mit manifester Osteoporose (...also bereits vorliegenden Frakturen), einschlägiger pharmakologischer Therapie, geringer körperlicher Leistungsfähigkeit und/oder orthopädischer Limitation absolut zentral.

3.1.1. Risikokategorisierung relevanter Gruppen im Spannungsfeld der Frakturprophylaxe

Je nach Status und Risikofaktorprofil lassen sich aus unserer Sicht fünf Personengruppen klassifizieren, für die das Spannungsfeld „Frakturgefährdung“ erhöhte Relevanz besitzt:

(1) Personen mit erhöhtem Knochenumsatz oder Personen mit leichter bis mäßiggradiger Reduktion der Knochenfestigkeit im Sinne einer Osteopenie ohne erhöhtes Sturzrisiko. Eine typische Gruppe sind hier früh-postmenopausalen Frauen.

(2) Personen mit deutlich reduzierter Knochenfestigkeit im Sinne einer Osteoporose, ohne Frakturen und ohne erhöhtes Sturzrisiko. Eine typische Gruppe sind junge bis moderat alte Menschen, die in der Vergangenheit eine Glukokortikoid-Therapie erhalten haben, Menschen mit genetischer Komponente oder leistungsfähige ältere Menschen.

(3) Menschen mit Osteoporose ohne klinische Frakturen, aber mit multiplen und ausgeprägten Risikofaktoren für Stürze. Dies ist wohl die Mehrzahl der Personen, die ein Körpertraining zur Frakturprophylaxe betreiben sollten. Eine leitliniengerechte pharmakologische Therapie zur Erhöhung der Knochenfestigkeit kann in diesem Kollektiv in Abhängigkeit vom individuellen Risikostatus bereits verordnet werden [60], ein Aspekt, der den Stellenwert eines Trainings zur Erhöhung der Knochenfestigkeit relativiert.

(4) Menschen mit Wirbelfrakturen und multiplen und ausgeprägten Risikofaktoren für Stürze. Eine typische Gruppe sind ältere Menschen mit einer langen Vorgeschichte von osteoporotischen Risikofaktoren (z.B. Krankheiten, Medikamente, Lebensstil, Ernährung) und körperlich inaktiver Lebensweise. Für diese Personen besteht die Möglichkeit/Notwendigkeit

einer leitliniengerechten pharmakologischen Osteoporosetherapie [60] zur Verbesserung der Knochenfestigkeit (Konsequenz siehe Gruppe 3).

(5) Menschen mit multiplen, z.T. extravertebralen Frakturen, hohem Sturzrisiko und sehr geringer körperlicher Belastbarkeit. Eine typische Gruppe sind institutionalisierte Menschen. Für diese Personen besteht die Verordnungsmöglichkeit/Notwendigkeit einer leitliniengerechten knochenanabolen pharmakologischen Osteoporose-Therapie [60].

3.1.2. Risiko-/Zielgruppenspezifische Trainingsziele

Weist man diese Kollektive den oben genannten Trainingszielen zu, so ergibt sich die folgende Matrix (Tab. 6). Ist der Osteoporosestatus bei Personen ohne manifeste Frakturen aufgrund fehlender Messung der Knochendichte (als Surrogatgröße der Knochenfestigkeit) nicht bekannt, empfiehlt sich eine besonders behutsame Applikation der Trainingsinhalte und vorsichtige Steigerung der Reizhöhe mechanischer Belastungen, insbesondere in knochenzentrierten Trainingsabschnitten (s.u.).

Tab. 6: Zuweisung der kategorisierten Gruppen auf für die Frakturprophylaxe relevanten Trainingsziele.

Risikogruppen	Trainingsziel
(1) Personen mit erhöhtem Knochenumbau, maximal mäßiggradige Verringerung der Knochenfestigkeit (im Sinne einer Osteopenie) ohne relevant erhöhtes Sturzrisiko	Erhalt/Erhöhung der Knochenfestigkeit
(2) Personen mit deutlich herabgesetzter Knochenfestigkeit im Sinne einer Osteoporose ohne Fraktur und ohne relevant erhöhtes Sturzrisiko*	Erhalt/Erhöhung der Knochenfestigkeit
(3) Personen mit deutlich herabgesetzter Knochenfestigkeit im Sinne einer Osteoporose, ohne Fraktur aber mit wesentlichen Sturzrisikofaktoren*	Erhalt/Erhöhung der Knochenfestigkeit Reduktion der Sturzhäufigkeit Verbesserung des Sturzablaufes
(4) Personen mit Osteoporose-assoziierten Frakturen und multiplen und/oder ausgeprägten Sturzrisikofaktoren*	Reduktion der Sturzhäufigkeit Verbesserung des Sturzablaufes Erhalt/Erhöhung der Knochenfestigkeit
(5) Personen mit multiplen Osteoporose-assoziierten Frakturen, hohem Sturzrisiko und sehr geringer körperlicher Belastbarkeit*	Reduktion der Sturzhäufigkeit Verbesserung des Sturzablaufes

* Die bezeichneten Gruppen sollen gemäß S3 Leitlinie „Prophylaxe, Diagnostik und Therapie der OSTEOPOROSE bei postmenopausalen Frauen und bei Männern ab dem 50. Lebensjahr“ [60] in ein übergreifendes Therapiekonzept eingebunden werden.

Eine grobe Zuordnung der oben aufgeführten Gruppen in das 3-Jahres Frakturrisiko-Schema der oben genannten S3 Leitlinie, würde für die beiden erstgenannten Gruppen (Gruppe (1) und (2)) einem Risiko von 0-3%, für die Gruppe (3) einem Risiko von 3-5% und für die Gruppen (4) und (5) einem Risiko von 5-10% oder darüber entsprechen.

3.2. Trainingsziel Erhalt/Erhöhung der Knochenfestigkeit

Exkurs: Stellenwert der „Knochendichte“ (KMD)-Messung innerhalb der Knochenfestigkeit

Das übliche diagnostische Verfahren zur Erfassung der Knochenfestigkeit ist die Messung der Knochendichte (oder Knochenmineralgehalt: Bone Mineral Density (KMD) an LWS- und Schenkelhalsregion mittels Dual Energy X-Ray Absorptiometry (DXA) oder (eingeschränkt) Quantitativer Computer Tomographie (QCT)[75]. Die KMD als Knochenmasse je Areal (aKMD) oder Volumen (vKMD), als vergleichsweise einfach erfassbarer und hoch reliabler Surrogatparameter, erklärt einen Großteil (bis zu 94%) der Varianz der Knochenfestigkeit [76-78]; dies gilt insbesondere für die Schenkelhalsregion. Daneben stehen aber noch weitere Größen wie bspw. Mikroarchitektur, Mineralisierungsgrad oder Ausrichtung des Kollagens in Verbindung mit der Knochenfestigkeit. Diese Parameter werden von der DXA-Messung nicht oder unzureichend erfasst bzw. quantifiziert [79]. Therapiebedingte Veränderungen des Frakturrisikos durch unterschiedliche Interventionen spiegeln sich somit nicht zwingend in korrespondierenden KMD-Veränderungen [79] wider. Dass selbst ein Ausbleiben einer Veränderung der Knochendichte nicht unbedingt als Fakt für die Ineffektivität eines Interventionsprogramms anzusehen ist, belegen tierexperimentelle Trainingsstudien, bei denen durch ein Trainingsprogramm die Bruchfestigkeit anstieg, ohne dass sich dies in einer Veränderung der Knochendichte äußerte [80,81]. Analog zur „Leitlinie Prophylaxe, Diagnostik und Therapie der Osteoporose bei postmenopausalen Frauen und bei Männern ab dem 50. Lebensjahr [60]“ verwenden wir im Weiteren bei übergreifenden Sachverhalten den Begriff „Knochenfestigkeit“(anstatt „Knochendichte“).

3.2.1. Evidenz körperlichen Trainings zur Verbesserung der Knochenfestigkeit bei postmenopausalen Frauen

Methodik

Eine im Rahmen der Leitlinie erstellte systematische Übersichtsarbeit und Meta-Analyse [18] berücksichtigte Untersuchungen mit den folgenden Charakteristika: (a) Klinische Studien mit mindestens einer Trainingsgruppe sowie einer Kontrollgruppe ohne relevante Intervention, (b) Frauen mit postmenopausalem Status, (c) Intervention von mindestens 6 Monaten Dauer, (d) Erfassung der KMD an Lendenwirbelsäule (LWS) oder/und der proximalen Femurregionen "total hip" (TH) und/oder "femoral neck" (FN) (f) zu Studienbeginn und bei der Nachuntersuchung mittels, (g) KMD bestimmt durch DXA oder Dual-Photon-Absorptiometrie (DPA), (h) $\leq 10\%$ der Teilnehmerinnen unter Hormon(Ersatz)Therapie (HRT), osteoanaboler/antiresorptiver (z. B. Bisphosphonate, Denosumab) oder osteokatabole (Glukokortikoide) Therapie, insofern die Anzahl der Anwender in TG und KG vergleichbar war. Die Ausschlusskriterien waren wie folgt: (a) gemischte Geschlechter oder gemischte prä- und postmenopausale Kohorten ohne separate KMD-Analyse für postmenopausale Frauen, (b) Frauen, die sich einer Chemo- und/oder Strahlentherapie unterzogen, (c) Frauen mit Krankheiten, die den Knochenstoffwechsel maßgeblich beeinflussten, (d) Interventionen, bei denen neuartige Bewegungstechnologien (z. B. Ganzkörper-Vibrationen, Elektromyostimulation) oder als weitgehend ineffektiv bekannte Trainingsinhalte (s.u.) wie Radfahren, Schwimmen als einzige Art des Bewegungstrainings eingesetzt wurden, (e) Studien, welche die synergistische/additive Wirkung von Bewegung und pharmakologischer Therapie erfassen wollten. Darüber hinaus wurden (f) Doppel-/Mehrfachveröffentlichungen, vorläufige Daten aus später veröffentlichten Studien und (g) Übersichtsartikel, Fallberichte, Leitartikel, Konferenzzusammenfassungen, Briefe, unveröffentlichte Berichte oder Artikel, für die nur Zusammenfassungen verfügbar waren, nicht berücksichtigt. Die elektronische Literaturrecherche wurde in den Datenbanken PubMed, Web of Science, Cochrane, Science Direct, Eric und ProQuest bis zum 09. August 2022 ohne sprachliche Einschränkung durchgeführt. Die Studie wurde unter PROSPERO; ID: CRD42021241407 registriert (Abb. 9).

Wir führten eine random-effects Meta-Analyse mithilfe des metafor-Pakets [63] durch, das in der Statistiksoftware R [82] enthalten ist. Die Werte der Effektgröße (ES) wurden als standardisierte Mittelwertunterschiede (SMD) in Kombination mit dem 95%-Konfidenzintervall (95%-KI) dargestellt. Angewendet wurde das von Doi et al. [83] vorgeschlagene Modell der inversen Heterogenität (IVhet)¹⁸. Fehlende Standardabweichungen (SD) wurden nach der Methode berechnet, die in der kürzlich veröffentlichten umfassenden Meta-Analyse von Shojaa et al. [13] ausführlich beschrieben wurde. Die Heterogenität zwischen den Studien wurde anhand der Q und I^2 -Statistik überprüft. Ein I^2 von 0-40% wurde als "gering", 30-60% als "mäßig", 50-90% als "erheblich" und 75-100% als "beträchtliche" Heterogenität angesehen. Neben dem (Egger)Regressionstest und den Rangkorrelations-Effektschätzungen und ihren Standardfehlern unter Verwendung des t-Tests und der Kendall's τ -Statistik für potenzielle Publikationsverzerrungen wurden auch Trim- und Fill-Analysen unter Verwendung des von Duval et al. vorgeschlagenen LO-Schätzers durchgeführt [84]. Zusätzlich zum Einsatz kamen Doi-Plots und der Luis Furuya-Kanamori-Index (LFK-Index) [85], um auf Asymmetrie zu prüfen. LFK-Werte unter 1 galten als vernachlässigbar, während Werte ≥ 1 bis 2 als geringe Asymmetrie angesehen wurden. Werte über 2 deuten auf

¹⁸ Die Effektstärken, die durch diese Methode errechnet werden, sind etwas niedriger als bei einem klassischen random effect-Modell.

eine starke Asymmetrie hin. Für alle Tests wurde ein p-Wert <0.05 als Signifikanzniveau zugrunde gelegt. SMD-Werte von 0,2; 0,5 und 0,8 werden als kleine, mittlere und große Effekte interpretiert.

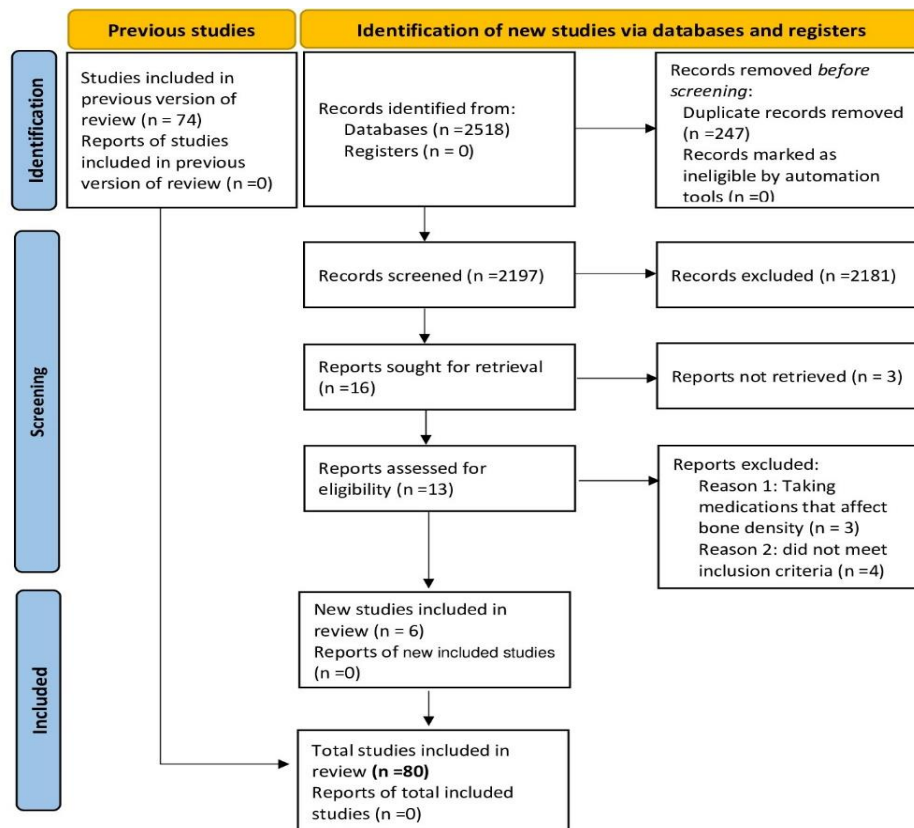


Abb. 9: Flussdiagramm des Suchprozesses „körperliches Training und Veränderung der Knochendichte bei postmenopausalen Frauen“ [31]

Der primäre Endpunkt war die Veränderung der KMD an LWS, Schenkelhals (FN) und im Bereich der Hüft-ROI (TH) von basaler Messung bis zur Untersuchung unmittelbar nach Interventionsende. Für die Subanalysen wurde die Untersuchungen gemäß (a) Knochenstatus (d. h. Kohorten mit bzw. ohne Osteopenie/Osteoporose) und (b) Menopausenstatus der Frauen (d. h. früh (≤ 8 Jahre) bzw. spät-postmenopausal (> 8 Jahre) [86]) gegliedert.

Ergebnisse

Die 80 Studien, die in den systematischen Review und der Meta-Analyse einbezogen werden konnten (Abb. 9), umfassten 94 Trainingsgruppen und 80 Kontrollgruppen [87-166]. Die gepoolte Teilnehmerzahl betrug 5581 (Trainingsgruppe: 3036, Kontrollgruppe: 2545), die Stichprobengröße der Einzelstudien reichte von 5 bis 125 Teilnehmern pro Gruppe. Die Studien wurden zwischen 1989 und 2022 veröffentlicht. Tab. 15-16 (Anhang) zeigen Studien-/Teilnehmer- und Trainingscharakteristika der Untersuchungen. Die methodische Qualität gemäß PEDro ist in Tabelle 17 (Anhang) dargestellt. Fünfzehn Studien wiesen eine hohe und 49 Studien eine mittlere methodische Qualität auf, während die übrigen Studien von geringer Qualität waren. Höhere Punktzahlen wurden häufig durch das Fehlen einer verdeckten Zuteilung, einer fehlenden Verblindung der Teilnehmer, Trainer oder Testassistenten sowie durch den Umstand beeinträchtigt, dass bedingt durch „loss to follow-up“ weniger als 85% der Probanden für mindestens ein primäres Ergebnis untersucht werden konnten. Wenn man jedoch bedenkt, dass eine erfolgreiche Verblindung der Teilnehmer und Übungsleiter/Trainer

bei Trainingsstudien kaum möglich ist, können 8 von maximal 10 möglichen Punkten des PEDro-Scores als ausgezeichnetes Ergebnis angesehen werden.

KMD-LWS: 85 Vergleiche lagen für die Effekte eines körperlichen Trainings auf die KMD-LWS (Anhang Abb. 28) vor. Zusammenfassend zeigte das IVhet-Modell mit Imputation der mittleren Korrelation einen signifikanten Effekt ($p < .001$) von körperlichem Training auf die KMD-LWS (SMD: 0,29; 95%-KI: 0,16 bis 0,42). Die Heterogenität zwischen den Studienergebnissen ($I^2=68\%$) kann als erheblich eingestuft werden (Anhang Abb. 28).

KMD-FN: 71 Gruppenvergleiche ermittelten einen signifikanten Effekt ($p < .001$) körperlichen Trainings auf die KMD-FN (SMD: 0,27; 95%-KI: 0,16 bis 0,39) (Anhang Abb. 29). Die Heterogenität zwischen den Studienergebnissen ($I^2=58\%$) lag moderat (Abb. 29).

KMD-TH: 30 Vergleiche untersuchten die Auswirkungen von körperlichem Training auf die KMD-TH (Abb. 30). Das IVhet-Modell (Abb. 30) mit Imputation der mittleren Korrelation zeigte einen signifikanten Effekt ($p < .001$) auf die KMD-TH (SMD: 0,41; 95%-KI: 0,30 bis 0,52). Die Heterogenität zwischen den Studienergebnissen ($I^2=20\%$) war gering (Abb. 30).

Die IVhet-Modell basierten Trichterdiagramme deuten auf einen möglichen Publication/Small Study Bias für die KMD-LWS und KMD-TH, nicht jedoch der KMD-FN hin (Anhang Abb. 31). In der „Trim und Fill Analyse“ der KMD-LWS werden neun fehlende Studien auf der linken Seite (negative Effekte) imputiert, für die KMD-TH wurden 3 Studien auf der rechten unteren Seite (kleine Studien mit positiven Effekten). Allerdings bleibt auch der korrigierte, d. h. um die Imputation bereinigte Interventionseffekt signifikant ($p=.008$). Die signifikante Asymmetrie für die KMD-LWS werden durch den LFK-Index (1.50), den Regressions- ($p=.011$) und den Rangkorrelationstest ($p=.016$) bestätigt, während die entsprechenden Tests die Asymmetrie für die KMD-TH durch jeweils nicht signifikante Ergebnisse relativieren. Eine Sensitivitätsanalyse zeigte keine wesentlichen SMD-Unterschiede (KMD-LWS: $p=.867$; KMD-FN: $p=.622$; KMD-TH: $p=.463$) zwischen Studien mit niedriger, mittlerer oder hoher methodischer Qualität.

Subanalyse 1: Modulierende Effekte durch unterschiedlichen Knochen(dichte)status

Vierzehn der 85 Vergleiche konzentrierten sich auf die LWS-KMD in Kohorten mit Osteopenie, Osteoporose oder einer Vorgeschichte von Frakturen (Tab. 15). Das IVhet-Modell ermittelte keinen signifikanten Unterschied ($p=.094$) zwischen den Untergruppen mit (SMD: 0,54; 95%-KI: 0,17 bis 0,92) und ohne (SMD: 0,23; 95%-KI: 0,08 bis 0,38) Osteopenie/Osteoporose/Frakturgeschichte auf die LWS-KMD. Die Heterogenität der Studienergebnisse war allerdings in beiden Untergruppen erheblich ($I^2=63\%$ und $I^2=77\%$). Für die FN wurden zehn versus 62 Untergruppen mit und ohne Osteopenie/Osteoporose/Frakturgeschichte verglichen. Es wurden keine relevanten Unterschiede (0,32; 0,09-0,55 vs. 0,26; 0,11-0,41) festgestellt ($p=.711$). Dasselbe galt für die TH-KMD (0,48; 0,14-0,81 vs. 0,38; 0,25-0,51; $p=.453$) mit 6 vs. 25 Vergleichen. Die Heterogenität lag in allen Gruppen für die TH-KMD Analyse in einem niedrigen bzw. moderaten Bereich, für die FN Analyse in einem moderaten Bereich.

Subanalyse 2: Modulierende Effekte durch unterschiedlichen (Post-) Menopausenstatus

Zusammenfassend wurden 18 früh- vs. 35 spät-postmenopausale Studiengruppen für die LWS-, 13 vs. 34 für FN- und 9 vs. 13 Subgruppen für TH-KMD verglichen. Zusammenfassend konnten wir keinen signifikanten Unterschied für die LWS- ($p=.352$), FN- ($p=.908$) oder TH-KMD ($p=.615$) feststellen. Tendenziell waren die Auswirkungen auf LWS-, FN- und TH-KMD für die früh-postmenopausalen Studiengruppen jedoch konsistent etwas günstiger.

Diskussion

Insgesamt zeigen sich für die KMD an LWS-, FN und TH signifikante, allerdings lediglich moderat hohe Effekte eines körperlichen Trainings. Die Heterogenität der Studienergebnisse lag z.T. (LWS-KMD) auf erheblichem Niveau. Neben mehreren sehr erfolgreichen Untersuchungen (Abb. 28-30) liegen ebenfalls Untersuchungen mit signifikant negativen (!) Effekten vor [99]. Neben den stark differierenden Trainingscharakteristika sind diese Ergebnisse wohl auch auf unterschiedliche Teilnehmercharakteristika zurückzuführen. In Subanalysen wurde die relevante Fragestellung, ob der Osteoporosestatus bzw. der Menopausenstatus Einfluss auf die trainingsinduzierte Veränderung der Knochendichte nimmt, evaluiert. Die vorliegende Auswertung zeigte in Einklang mit den wenigen vorliegenden Studien/Subgruppenanalysen eine tendenziell etwas günstigere KMD Entwicklung an LWS, FN und TH für Studienarme mit Osteopenie/Osteoporose/Frakturvorgeschichte [52,167] respektive für früh-postmenopausale Frauengruppen [124]. Insgesamt zeigen sich für jeweils beide Studienarme aber signifikant positive Veränderungen, sodass (a) postmenopausale Frauen grundsätzlich unabhängig von Osteoporosegrad und (Post-)Menopausenstatus von trainingsinduzierten Effekten auf die KMD profitieren können und (b) die Heterogenität der Studienergebnisse nur bedingt durch diese Teilnehmercharakteristika beeinflusst wurden.

Bewertung der Studienqualität und Transferierbarkeit der Ergebnisse

Die Generierung der vorliegenden Evidenz erfolgte via systematischer Literaturrecherche und Meta-Analyse, also Evidenzgrad 1a gemäß AQRH (Tab. 1). Die Anzahl der eingeschlossenen Studien lag mit 80 Untersuchungen in einem sehr hohen Bereich. Die quantitative Qualitätsbewertung der hier vorgelegten Arbeit mittels R-Amstar [32] zeigte 37 von 44 Punkten (Tab. 61). Die hohe Heterogenität der Interventionsmaßnahmen mit suboptimalen Trainingsprotokollen (s.u.) trägt zu einer Reduktion des Effektes bei, schwächt die Evidenz der Ergebnisse ab und führt somit zu einem eher konservativen Ergebnis, keinesfalls jedoch zu einer „Überschätzung des Gesamteffektes“. Die vorliegende Untersuchung [18] fokussierte via Einschlusskriterien ausschließlich auf postmenopausale Frauenkollektive, insofern gehen wir von einem hohen Generalisierungsgrad unserer Ergebnisse aus.

Formulierung der Empfehlung

3	Empfehlung 3	Neu, Stand 2024
Empfehlungsgrad A	Postmenopausale Frauen, die von einer Osteoporose bedroht oder betroffen sind, sollen ein geeignetes körperliches Training zur Verbesserung der Knochenfestigkeit durchführen.	
Evidenzgrad 1a	[13,18]	
	Konsensstärke: 100%	

3.2.2. Evidenz körperlichen Trainings zur Verbesserung der Knochenfestigkeit bei Männern 45 Jahre und älter

Methodik

Eine im Rahmen der Leitlinie erstellte systematische Übersichtsarbeit und Meta-Analyse [19] berücksichtigte Untersuchungen mit den folgenden Charakteristika: (1) Männerkollektive 45 Jahre und älter, (2) randomisierte und nicht-randomisierte kontrollierte Studien mit mindestens einer Trainingsgruppe versus einer Kontrollgruppe ohne relevantes körperliches Training, (3) ≥ 6 Monate Interventionsdauer, (4) Erfassung der arealen KMD an LS, FN und/oder TH zu Beginn und am Ende der Studie bestimmt via (5) DXA oder Dual-Photonen-Absorptiometrie (DPA). Ausgeschlossen wurden Studien mit Fokus auf (1) Krankheiten/-Konditionen mit relevantem Einfluss auf den Knochenstoffwechsel (z. B. entzündliche Erkrankungen), (2) pharmakologische Therapien, die den Knochenstoffwechsel relevant beeinflussen, (3) gemischte Kohorten ohne separate KMD-Analyse für Männer. Doppel-/Mehrfachveröffentlichungen einer Studie, vorläufige Daten aus später veröffentlichten Studien, Übersichtsartikel, Fallberichte, Konferenzzusammenfassungen und „letters“ wurden ebenfalls nicht berücksichtigt. Studien mit Teilnehmern, die bereits vor der Intervention Trainingsgewohnheiten berichteten, die dem Umfang und der Intensität des Interventionsprotokolls nahe kamen, wurden ausgeschlossen. Die elektronische Literaturrecherche wurde in den Datenbanken PubMed, Science direct, Scopus, Web of Science, Cochrane und ERIC für Artikel durchgeführt, die bis zum 15. März 2021 in deutscher oder englischer Sprache veröffentlicht wurden. Die Studie wurde unter PROSPERO (ID: CRD42021233194) registriert.

Die statistische Analyse erfolgte weitgehend analog zur Analyse für das postmenopausale Frauenkollektiv. Es erfolgte eine traditionelle random-effects Meta-Analyse als Primäranalyse. Wir führten zusätzlich eine Sensitivitäts-/Einflussanalyse mit Ausschluss von zwei „kritischen“ Studien [168,169] durch.

Ergebnisse

Insgesamt wurden zwölf Studien mit 16 Übungs- und 12 Kontrollgruppen eingeschlossen [164,168-178] (Abb. 10). Die zusammengefasste Anzahl der Teilnehmer betrug 823 (Trainingsgruppen: 461, Kontrollgruppen: 362). Tabelle 18 zeigt die Studien- und Teilnehmercharakteristika, Tabelle 19 Trainingscharakteristika und Tabelle 20 die methodische Qualität der Untersuchungen gemäß PEDro und TESTEX.

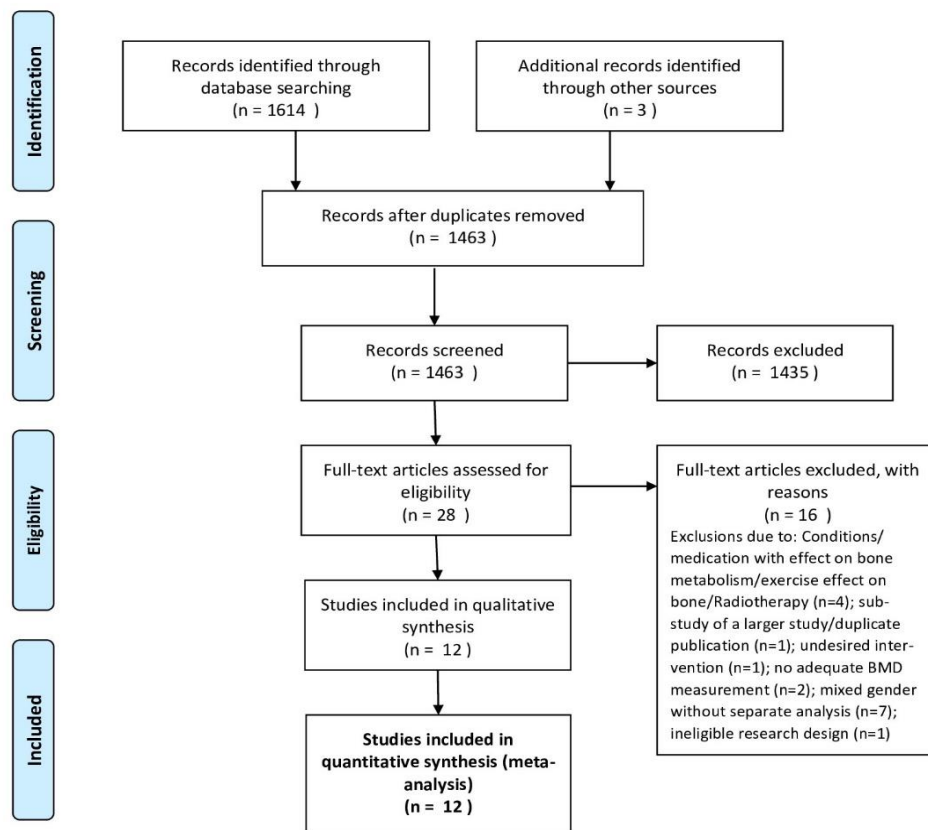


Abb. 10: Flussdiagramm des Suchprozesses „körperliches Training und Veränderung der Knochendichte bei Männern 45 Jahre und älter“[31]

KMD-LWS: Neun Studien mit 11 Übungsgruppen untersuchten die Effekte von körperlichem Training im Vergleich zu einer Kontrollgruppe auf die LWS-KMD (Abb. 32). Zusammenfassend zeigt die traditionelle random-effects Analyse einen signifikanten ($p=.002$), aber lediglich moderaten Effekt körperlichen Trainings auf die LWS-KMD (SMD: 0,38, 95%-KI: 0,14 bis 0,61). Das IVhet-Modell weist erwartungsgemäß einen niedrigeren Effekt körperlichen Trainings auf die LWS-KMD aus (SMD: 0,29, 95%-KI: 0,04 bis 0,53). Bei Ausschluss der beiden „kritischen Studien“ zeigten sich keine wesentlichen Unterschiede zur Primäranalyse. Die Daten weisen auf eine moderate Heterogenität der Studienergebnisse hin ($I^2=46\%$).

FN-KMD: Zehn Studien mit 13 Trainingsgruppen untersuchten die Effekte körperlichen Trainings auf die KMD-FN (Abb. 33). Zusammenfassend ließen sich signifikant ($p=.048$) positive Effekte (SMD: 0,25, 95%-KI: 0,00 bis 0,49) eines körperlichen Trainings erfassen. Bei Verwendung des "robusteren" IVhet-Modells reduzierte sich der Effekt (SMD: 0,21, 95%-KI: -0,04 bis 0,47) auf einen nicht-signifikanten ($p=.105$) Erklärungsbeitrag. Bei Ausschluss der beiden kritischen Studien zeigten sich keine wesentlichen Unterschiede zur Primäranalyse. Parallel zur LWS-KMD beobachteten wir ein moderates Maß an Heterogenität ($I^2=46\%$).

Das Trichterdiagramm für die LWS-KMD deutet auf einen Publikations-/small study Bias hin (Abb. 34 links). Die Analyse zeigt fehlende Studien auf der unteren rechten Seite (d. h. kleine Studien mit negativem Ergebnis). Eine Trim-and-Fill-Analyse mit Imputation „fehlender Studien“ reduzierte die Effektgröße (SMD: 0,12, 95%-KI: -0,16 bis 0,40) auf ein nicht signifikantes Niveau. Der Regressionstest ($p=0.02$) und (eingeschränkt) der Rangkorrelationstest ($p=.09$) deuten auf eine relevante Asymmetrie der LWS-Daten hin, der LFK-Index (2.35) bestätigte dieses Ergebnis. Kein entsprechender Bias zeigte sich für die FN-KMD. Bei der Trim-

and-Fill-Analyse wurden keine fehlenden Studien imputiert; weder Regression ($p=.061$) noch der Rangkorrelationstest oder der des LFK-Index (0.78) deuteten auf eine Asymmetrie hin. Eine Sensitivitätsanalyse zeigte keine wesentlichen SMD-Unterschiede (KMD-LWS: $p=.433$; KMD-FN: $p=.551$) zwischen Studien mit niedriger mittlerer oder hoher methodischer Qualität.

Diskussion

Die vorliegende Analyse zeigt signifikante, niedrige-moderate Effekte eines körperlichen Trainings auf die KMD an LWS und FN. Eine neuere Meta-Analyse [179] mit denselben Eligibilitätskriterien, die allerdings auf RCTs basiert ($n=10$) zeigt in der Primäranalyse signifikant positive (moderat hohe) Effekte eines körperlichen Trainings an den Hüft-ROIs Schenkelhals ($n=10$) und total hip ($n=9$), nicht jedoch für die KMD-LWS ($n=9$). Eine Subgruppenanalyse von Untersuchungen ≥ 12 Monaten wies indes signifikant positive Ergebnisse mit moderat hoher Effektgröße für die KMD-LWS auf. Das Trichterdiagramm und die entsprechenden Tests unserer Untersuchung deuten auf eine erhebliche Verzerrung im Sinne eines Publication/-small study Bias für die LWS, nicht jedoch die FN Region hin. Insgesamt fällt für die Analyse der Studiendaten für die LWS ein Fehlen von überwiegend kleinen - moderat großen Studien mit negativem Ergebnis auf. Bei Ausschluss von kritischen Studien mit Personenkollektiven mit Erkrankungen (HIV [168], stabiler Morbus Crohn [169]), die möglicherweise Einfluss auf das Ergebnis haben könnten, zeigte sich keine Erhöhung der SMD. Mit 13 Vergleichen sollte dieses Ergebnis ebenfalls nicht primär einer geringen Fallzahl geschuldet sein. Die moderate Heterogenität ($I^2=46\%$) zwischen den Studienergebnissen deutet ebenfalls nicht auf eine dramatische Verzerrung durch Studien mit Extremwerten hin. Trainingsinhaltlich (Tab. 19) und -methodisch (Tab. 20) sind die Untersuchungen trotzdem als sehr heterogen einzuordnen. Während einige Untersuchungen ein „state of the art“ Protokoll applizieren, ist das Trainingsprotokoll anderer Untersuchungen als „potentiell unterschwellig“ einzuordnen. Insgesamt sollte das Spannungsfeld „körperliches Training und Knochendichte bei Männern“ durch weitere methodisch angemessene Untersuchungen mit erfolgversprechenden Trainingsprotokollen adressiert werden. Dies erscheint umso mehr nötig, als dass Trainingsprotokolle die Effekte bei postmenopausalen Frauen zeigen, nicht zwingend auf Männer übertragbar sein müssen.

Bewertung der Studienqualität und Transferierbarkeit der Ergebnisse

Die Generierung der vorliegenden Evidenz erfolgte via systematische Literaturrecherche und Meta-Analyse (Evidenzgrad 1a gemäß AQRH). Die Anzahl der eingeschlossenen Studien lag mit 12 Untersuchungen im moderaten Bereich. Die quantitative Qualitätsbewertung der Arbeit mittels R-Amstar [32] ergab 38 von 44 Punkten (Tab. 61). Einige „suboptimale“ Trainingsprotokolle tragen zu einer deutlichen Reduktion des Effektes bei und schwächt die positive Evidenz der Ergebnisse somit deutlich ab. Die Untersuchung [19] fokussierte ausschließlich auf Männerkollektive 45 Jahre und älter mit und ohne Osteoporose, insofern gehen wir von einem hohen Generalisierungsgrad unserer Ergebnisse aus.

Formulierung der Empfehlung

4	Empfehlung 4	Neu, Stand 2024
Empfehlungsgrad A	Männer, die von einer Osteoporose bedroht oder betroffen sind, sollen ein geeignetes körperliches Training zur Verbesserung der Knochenfestigkeit durchführen.	
Evidenzgrad 1a	[19]	
	Konsensstärke: 100%	

3.2.3. Evidenz körperlichen Trainings zur Verbesserung der Knochenfestigkeit bei Glukokortikoid-induzierter Osteoporose (GIOP)

Methodik

Eine im Rahmen der Leitlinie erstellte systematische Übersichtsarbeit und Meta-Analyse [20] berücksichtigte Untersuchungen mit den folgenden Charakteristika: (1) randomisierte und nicht-randomisierte kontrollierte Studien mit mindestens einer Trainings- im Vergleich zu einer Kontrollgruppe ohne zusätzliches körperliches Training, wobei beide Gruppen die identische Glukokortikoid-Behandlung erhielten, (2) ≥ 6 Monate Interventionsdauer, (3) KMD oder BMC an Lendenwirbelsäule (LWS) und/oder Hüftregion zu Beginn und am Ende der Studie bestimmt durch (4) DXA, DPA oder QCT.

Ausgeschlossen wurden Studien am Menschen mit (1) anderen pharmakologischen Wirkstoffen als Glukokortikoiden mit relevantem Einfluss auf den Knochenstoffwechsel, (2) Krebspatienten, (3) Studien mit Teilnehmern, die bereits vor der Studienintervention Trainingsgewohnheiten angaben, die dem Umfang und der Intensität des Interventionsprotokolls nahekamen, (4) Teilnehmern, die der Schwerelosigkeit im Weltraum ausgesetzt waren oder permanente Bettruhe hatten. Übersichtsartikel, Fallberichte, Leitartikel, Konferenzzusammenfassungen und „Letters“ wurden ebenfalls ausgeschlossen.

Studien aus den fünf elektronischen Datenbanken PubMed/Medline, Scopus, Web of Science, Cochrane und CINAHL, die bis zum 31. Januar 2022 veröffentlicht wurden, mit einer Aktualisierung am 20. September 2022, wurden ohne sprachliche Einschränkungen akzeptiert. Die Studie wurde unter PROSPERO; ID: CRD42022308155 registriert.

Die statistische Analyse erfolgte weitgehend analog zur Analyse für das postmenopausale Frauenkollektiv. Es erfolgte eine Berechnung mittels inversen Heterogenitäts (IVhet) Modell als Primär-(Meta-)analyse. Aufgrund der geringen Anzahl von eingeschlossenen Untersuchungen erfolgten keine Subanalysen.

Ergebnisse

Abbildung 11 zeigt den Suchprozess der Studie. Nach dem Entfernen von 283 Duplikaten wurden 1180 Artikel anhand von Titel und Zusammenfassung gesichtet. Die Volltexte von 11 potenziell relevanten Artikeln wurden gescreent, final wurden drei Artikel [180-182] durch zwei unabhängige Gutachter in die vorliegende Analyse eingeschlossen. Tab. 21 zeigt die Studien- und Teilnehmercharakteristika, Tab. 22 die pharmakologische Therapie, Tab. 23 die Trainingscharakteristika und Tab. 24 die methodische Qualität der Untersuchungen.

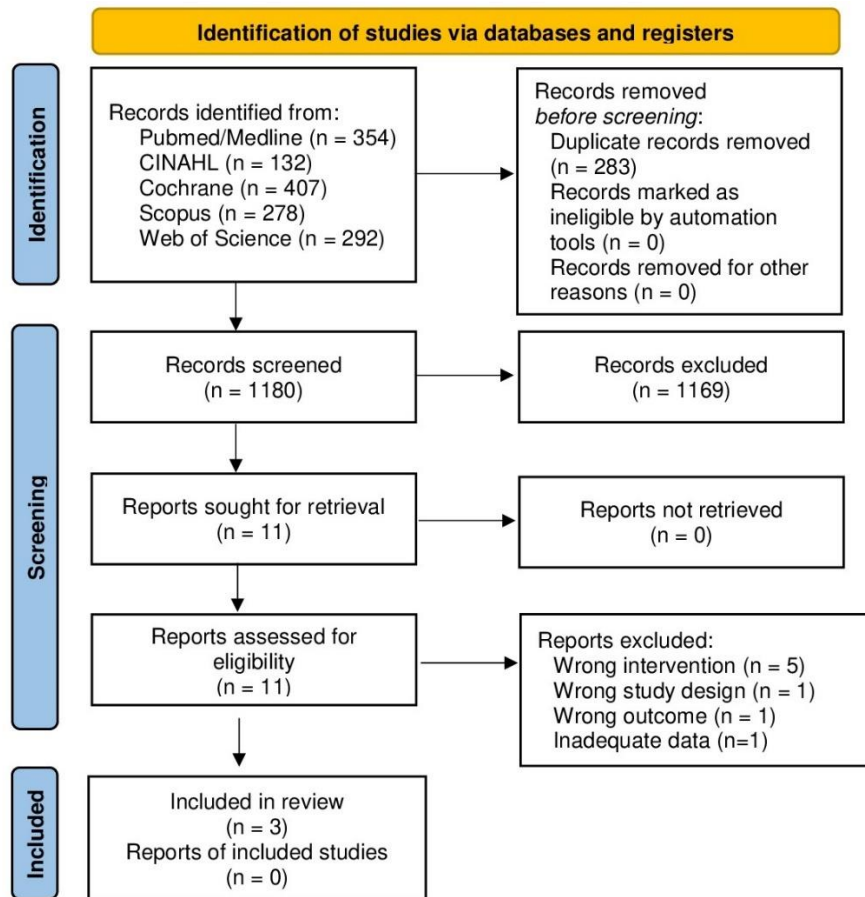


Abb. 11: Flussdiagramm des Suchprozesses „körperliches Training und Veränderung der Knochendichte bei Menschen mit GIOP [31]

KMD-LWS Drei Vergleiche von Studienarmen mit kombinierter (GC+EX) versus isolierter pharmalogischer Therapie (GC) untersuchten die entsprechenden Effekte auf die KMD-LWS (Abb. 35 oben). Zusammenfassend zeigte das IVhet-Modell einen signifikanten Effekt ($p < .021$) körperlichen Trainings von GC+EX (vs. GC) für die LWS-KMD (SMD: 1,50; 95%-KI: 0,23 bis 2,77). Die Heterogenität zwischen den Studienergebnissen ($I^2 = 71\%$) muss allerdings als erheblich eingestuft werden (Abb. 35).

KMD-FN Abbildung 35 unten zeigt die Ergebnisse für den Effekt körperlichen Training bei GC-Therapie für die KMD am FN. Auf der Grundlage von nur zwei eingeschlossenen Studien wurde kein signifikanter positiver Effekt ($p = .412$) der kombinierten Therapie (GC+EX) beobachtet (SMD: 0,64; 95%-KI: -0,89 bis 2,17). Die Heterogenität zwischen den Studienergebnissen war ebenfalls erheblich ($I^2 = 78\%$) (Abb. 35 unten).

Im Gegensatz zur KMD-FN deutet die Funnel-Plot-Analyse mit Trim and Fill einen Publikations-/small study Bias für die LWS-KMD Analyse an. Die Analyse unterstellt zwei fehlende Studien auf der unteren rechten Seite (d.h. es „fehlen“ kleine Studien mit negativem Ergebnis). Die entsprechende Asymmetrie bestätigt sich bei der Betrachtung des LFK-Index (1.1). Der Regressions- ($p = .026$), nicht aber der Rangkorrelationstest ($p = .333$) für die Trichterdiagramm-Asymmetrie verifiziert ebenfalls die signifikante Asymmetrie (Abb. 36).

Diskussion

Betrachtet man die aktuellen Leitlinien zur GIOP (z. B. [183-185]), so wird körperliches Training allenfalls im Spannungsfeld der Sturzprävention als relevant angesehen. Der potenziell wichtigere Aspekt von GIOP ist jedoch der ausgeprägte Verlust der Knochenmasse insbesondere im ersten Jahr der Behandlung [186]. Obwohl die vorliegende Literatur im Spannungsfeld körperliches Training, Glukokortikoidtherapie und Knochendichte zweifellos limitiert ist, sollten künftige Leitlinien, bedingt durch die nunmehr belegte moderate Evidenz für positive Effekte auf die Knochenfestigkeit [20], sowie geringem Risiko und Nebenwirkungen, ein körperliches Training innerhalb der Therapie der GIOP stärker berücksichtigen.

Bewertung der Studienqualität und Transferierbarkeit der Ergebnisse

Die Generierung der vorliegenden Evidenz erfolgte via systematischer Literaturrecherche und Meta-Analyse, folglich Evidenzgrad 1a gemäß AQRH (Tab. 1). Die Anzahl der eingeschlossenen Studien lag mit 3 Untersuchungen in einem sehr niedrigen Bereich. Die quantitative Qualitätsbewertung der Arbeit mittels R-Amstar [32] zeigte 38 von 44 Punkten (Tab. 61). Neben der Applikation suboptimaler Trainingsprotokolle (s.u.) schwächen zwei Untersuchungen, die den Effekt körperlichen Trainings während immunsuppressiver Therapie nach Organtransplantation erfassen, eine breite Transferierbarkeit unserer Ergebnisse auf „klassische“ Kohorten mit GIOP ab. Die vorliegende Untersuchung [20] fokussierte via Einschlusskriterien auf Studiengruppen mit Glukokortikoid-Behandlung, allerdings mit unterschiedlichen Grunderkrankungen (Tab. 21), insofern gehen wir von einem lediglich moderaten Generalisierungsgrad unserer Ergebnisse auf die Zielgruppe dieser Leitlinie aus.

Formulierung der Empfehlung

5	Empfehlung 5	Neu, Stand 2024
Empfehlungsgrad A	Menschen, die von einer Glukokortikoid-induzierten Osteoporose bedroht oder betroffen sind, sollen ein geeignetes körperliches Training zur Verbesserung der Knochenfestigkeit durchführen.	
Evidenzgrad 1a	[20]	
	Konsensstärke: 100%	

4. Ableitung von Trainingsempfehlungen zur Verbesserung der Knochenfestigkeit

In diesem Abschnitt werden konkrete sportwissenschaftliche Empfehlungen zur Trainingsdurchführung zur Verbesserung der Knochenfestigkeit, überwiegend basierend auf Knochendichtemessungen bei humanen Kollektiven, in Einzelfällen via tierexperimentell erhobenen Parameter der Knochenfestigkeit, ausgesprochen.

4.1. Trainingsinhaltliche Empfehlungen

Einführung

Die Umsetzung der Trainingsziele (Abb. 8) vollzieht sich über die Auswahl geeigneter Tätigkeiten (=Trainingsinhalte). Die Frage lautet somit: „Welche Inhalte sollen/müssen appliziert werden, um das Trainingsziel zu realisieren?“. Trainingsinhalte („types of exercise“) sind bspw. dynamisches Krafttraining, Walking, Aerobic, Tai-Chi oder Perturbationstraining. Wichtig erscheint der Hinweis, dass ausgewählte Trainingsinhalte zur Realisierung mehrerer Trainingsziele (Abb. 8) beitragen können. Durch die enge Interaktion insbesondere mit den die Trainingsinhalte präzisierenden Belastungskomponenten ist eine Ableitung von erfolgversprechenden Trainingsinhalten aus den vorliegenden Untersuchungen allerdings nicht trivial.

Die klassische trainingswissenschaftliche Kategorisierung der Trainingsinhalte in Ausdauer-, Kraft- oder Koordinationstraining (u.ä.) ist im Spannungsfeld der Beanspruchung des Knochens allerdings wenig hilfreich [187]. Senn et al. [188] schlagen deswegen eine Einteilung von Trainingsinhalten in mehrere mechanisch lokale und einen systemisch übergreifenden „Knochenfaktor“ vor, eine Klassifikation, dem in leicht modifizierter Weise an dieser Stelle gefolgt werden soll.

4.1.1. Kategorisierung von Trainingsinhalten: Knochenfaktoren

Knochenfaktor „axiale Belastung“

Unter diese Kategorie fallen Belastungen, bei denen der Knochen respektive das entsprechende Skelettsegment primär in axialer Richtung beansprucht wird („ground reaction forces“). Eine im Vergleich zur Gravitation höhere axiale Belastung tragender Teile des Skelettsystems ist eine zentrale Komponente des Modeling/Remodeling-Prozesses [189-192]. Lanyon et al. [189] wiesen in ihrem klassischen Truthahnmodell eine enge Beziehung zwischen dynamischer axialer Belastung und Knochenhypertrophie nach. In Abhängigkeit vom Skelettsegment kommt es bei axialer Belastung überwiegend zu einer Kompressions- (Wirbelkörper) oder Biegebelastung (lange Röhrenknochen).

Knochenfaktor „Muskelzugsbelastung“

Veränderung der Muskellänge und entsprechender Muskelzug über die Sehne resultiert in einer komplexen Druck-, Biege- und Scherbeanspruchung der lokal betroffenen Knochenareale, die als „Hebelwerk“ die Muskelkräfte übertragen („joint reaction forces“). Durch den drehpunktnahen Ansatz der meisten Muskeln mit resultierendem schlechten Kraftarm-Lastarm-Verhältnis betragen die inneren Kräfte und damit die Knochenbelastung oft ein Vielfaches der äußeren Kräfte. Mehrere Autoren (u.a. [193,194]) spekulieren in diesem Zusammenhang, dass der Muskelzug selbst am Achsenskelett den höchsten physiologischen Reiz darstellt¹⁹.

¹⁹ Hier kommt dem Ausmaß der individuell vorliegenden „Sarkopenie/Dynamopenie“ erhebliche Bedeutung zu...

Knochenfaktor Belastungsverteilung

Gemäß der These, dass sich Knochengewebe hinsichtlich seiner Mechanosensitivität den vorherrschenden Belastungen anpasst (u.a. [195]), sind mechanische Stimuli, die den Knochen in ungewohnter Weise belasten, mit einer größeren anabolen Knochenreaktion verbunden als eine habituelle Belastungsverteilung. Dabei ist die osteoanabole Reaktion umso höher, je größer die Abweichung vom habituellen Bewegungsmuster ist [190]. Crosssektionale Studien (Übersicht in [196]) mit Leistungssportlern unterschiedlicher Disziplinen zeigen, dass mechanische Stimuli mit variablem Belastungsmuster, wie dies z.B. bei Spportsportarten der Fall ist, mit einer höheren Knochendichte assoziiert sind, als Sportarten mit gleichförmigen Belastungsmustern (bspw. Laufen).

Knochenfaktor „systemische Komponente“

Belastungsinduzierte Ausschüttung anaboler Substanzen zur Sicherung von Regeneration, Einleitung und Realisierung von Anpassungserscheinungen nehmen ebenfalls Einfluss auf die ossäre Reaktion. Insbesondere abhängig von der Reizhöhe²⁰, können sowohl hochintensive ausdauer- als auch kraftorientierte Trainingsinhalte hormonelle Veränderungen induzieren, die in engem positivem Zusammenhang mit Knochenmetabolismus und Kalziumhaushalt stehen (u.a. [198]). Das „Mechanostatmodell“ [199] impliziert darüber hinaus eine permissive Interaktion von systemischen und mechanischen Knochenfaktoren. Ein „günstiges“ hormonelles Milieu äußert sich in einer höheren ossären Reaktion des mechanischen Reizes. So zeigen identische Trainingsreize in der prämenopausalen Phase eine höhere Wirkung auf die Knochendichte als in der Postmenopause, also im „(Östradiol-)Mangelzustand“ [158]. Allerdings kann sehr umfangsorientierte Belastung zu einer andauernden Suppression der anabolen Achse und korrespondierend zu negativen Effekten auf die Knochenfestigkeit führen [200]. Bei Sportarten/Trainingsinhalten, die dauerhaft einer umfangsorientierten Belastung in Training und Wettkampf unterliegen, ist dieses Phänomen besonders prominent (s.u.).

4.1.2. Knochenanabole Potenz unterschiedlicher sportlicher Belastungen

Crosssektionale Daten mit Sportlerkollektiven

Studien mit adulten Leistungssportlern haben den wichtigen Vorzug, dass die trainingsinhaltlichen Effekte den jeweiligen Endpunkt weitestgehend optimal und mit ausreichend langer Expositionsdauer adressieren. Eine inadäquate Trainingskomposition, wie häufig im Gesundheits- oder Seniorensport durch (zu) geringe Trainingshäufigkeit oder Reizhöhe zu finden, ist bei diesen hochambitionierten Kollektiven weitgehend auszuschließen. Limitationen von Studien mit (Leistungs-)Sportlerkollektiven sind allerdings das oft multimodale Trainingsprotokoll vieler Sportarten, das eine valide Zuordnung sportart-spezifischer Effekte auf Knochenparameter einschränkt. Trotzdem kann anhand der oben aufgeführten Klassifikation die osteoanabole Potenz leistungssportlich durchgeführter Sportarten ausreichend gut eingeschätzt werden (Tab. 7), um erste Trainingsempfehlungen abzuleiten.

²⁰ Kurze, intensive Reize scheinen dabei besonders geeignet, die Serumkonzentration anabol wirkender Hormone und Substanzen zu erhöhen [197].

Tab. 7: Osteoanabole Potenz unterschiedlicher Sportarten in der Übersicht: Studien mit langjährigen Leistungssportlern. Die Einordnung erfolgte über Expertenrating innerhalb der Autorengruppe.

Trainingsinhalt/ Disziplin	Axiale Belastung	Muskelzugs- belastung	Verteilungs- muster	systemischer Effekt
Gewichtheben	⊕⊕⊕	⊕⊕⊕	⊕⊕	⊕
Kunstturnen	⊕⊕⊕	⊕⊕	⊕⊕⊕	⊕
Basketball/Volleyball	⊕⊕⊕	⊕	⊕⊕⊕	⊕
Langstreckenlauf	⊕	∅	∅	∅/↓
Schwimmen	∅	∅	⊕/∅	∅/↓
Radsport (Straße)	∅	∅	∅	∅/↓

⊕⊕⊕, ⊕⊕, ⊕: sehr hohe, hohe, moderat hohe positive Effekte; ∅: keine/vernachlässigbare Effekte; ↓: negative Effekte

Kraftsportarten wie insb. Gewichtheben oder Kraftdreikampf weisen aufgrund sehr hoher mechanischer Beanspruchung und günstigem hormonellem Milieu eine hohe osteoanabole Potenz auf. Dies äußert sich in einer besonders hohen Knochendichte u.a. an LWS und Schenkelhalsregionen [201,202]. Im Gegensatz dazu zeigt Straßensport (....ähnlich wie Schwimmen), charakterisiert durch niedrige, da umfangsorientierte mechanische Belastung, gleichförmiges Verteilungsmuster und tendenziell negativen Auswirkungen auf das endokrine System [203], keine oder sogar negative Wirkung auf die Knochendichte unterschiedlicher Skelettregionen [204-207].

Bei den überwiegend crosssektional erhobenen Daten stellt sich die grundsätzliche Frage, ob die sportartspezifische Belastung im Sinn eines Kausalzusammenhangs zu einer Veränderung der Knochendichte führt oder ob eine hohe Knochenfestigkeit Voraussetzung ist, (verletzungsfrei) außergewöhnliche Leistungen in dieser Disziplin zu vollbringen. Tatsächlich zeigen Sportarten mit unilateralem mechanischem Anforderungsprofil (Tennis/Squash/ Volleyball) überwiegend signifikant höhere Knochendichte-/Querschnittswerte (Cross Sectional Area: CSA) am dominanten vs. nicht dominanten Arm (u.a. [208,209]), sodass ein kausaler Zusammenhang zwischen mechanischer Belastung und Knochendichte attestiert werden kann.

4.1.3. Longitudinale Trainingsstudien mit postmenopausalen, nicht-athletischen Frauenkollektiven

Mehrere meta-analytische Ansätze bzw. deren Subanalysen fokussieren auf die Identifizierung geeigneter Trainingsinhalte zur Verbesserung der Knochenfestigkeit an LWS und proximalem Femur (u.a. [13,21,210,211]).

Methodik

Eine im Vorlauf der Leitlinienerstellung durchgeführte systematische Übersichtsarbeit und Meta-Analyse, die diese Fragestellung direkt adressierte [21], schloss Studien mit den folgenden Kriterien ein: (1) randomisierte und nicht-randomisierte kontrollierte Studien mit mindestens einer Trainings- versus einer Kontrollgruppe — letztere ohne entsprechendes körperliches Training mit Effekt auf den Knochenstoffwechsel. (2) Frauen, die zu Beginn der Studie postmenopausal waren, (3) ≥6 Monate Interventionsdauer, (4) KMD an LWS oder den proximalen Femurregionen FN und/oder TH basal und nach Interventionsende, bestimmt

durch (5) DXA oder DPA, (6) $\leq 10\%$ der Frauen unter osteoanaboler/antiresorptiver oder Glukokortikoide-Therapie, allerdings nur, wenn die Anzahl zwischen TG und KG vergleichbar lag. Ausgeschlossen wurden (1) gemischte Männer-/Frauenkollektive oder prä-/postmenopausale Kohorten ohne separate KMD-Analysen, (2) Frauen, die sich einer Chemo- und/oder Strahlentherapie unterzogen und (3) Frauen mit Erkrankungen, die den Knochenstoffwechsel relevant beeinflussen, sowie (4) Doppel-/Mehrfachveröffentlichungen, vorläufige Daten aus später veröffentlichten Studien, Übersichtsartikel, Fallberichte, Leitartikel, Konferenzzusammenfassungen, Briefe, unveröffentlichte Berichte oder Artikel, für die nur Zusammenfassungen verfügbar waren. Schließlich wurden auch Studiengruppen mit Trainingsinhalten, die nicht eindeutig klassifiziert werden konnten, in der vorliegenden Analyse nicht berücksichtigt.

Die elektronische Literaturrecherche wurde in den Datenbanken PubMed, Scopus, Web of Science, Cochrane, Science Direct, Eric, ProQuest and Primo für alle Artikel ausgeführt, die bis zum 01. März 2019 in deutscher oder englischer Sprache veröffentlicht wurden. Die Studie wurde in PROSPERO (CRD42018095097) registriert. Abb. 12 zeigt das Flussdiagramm der Untersuchung.

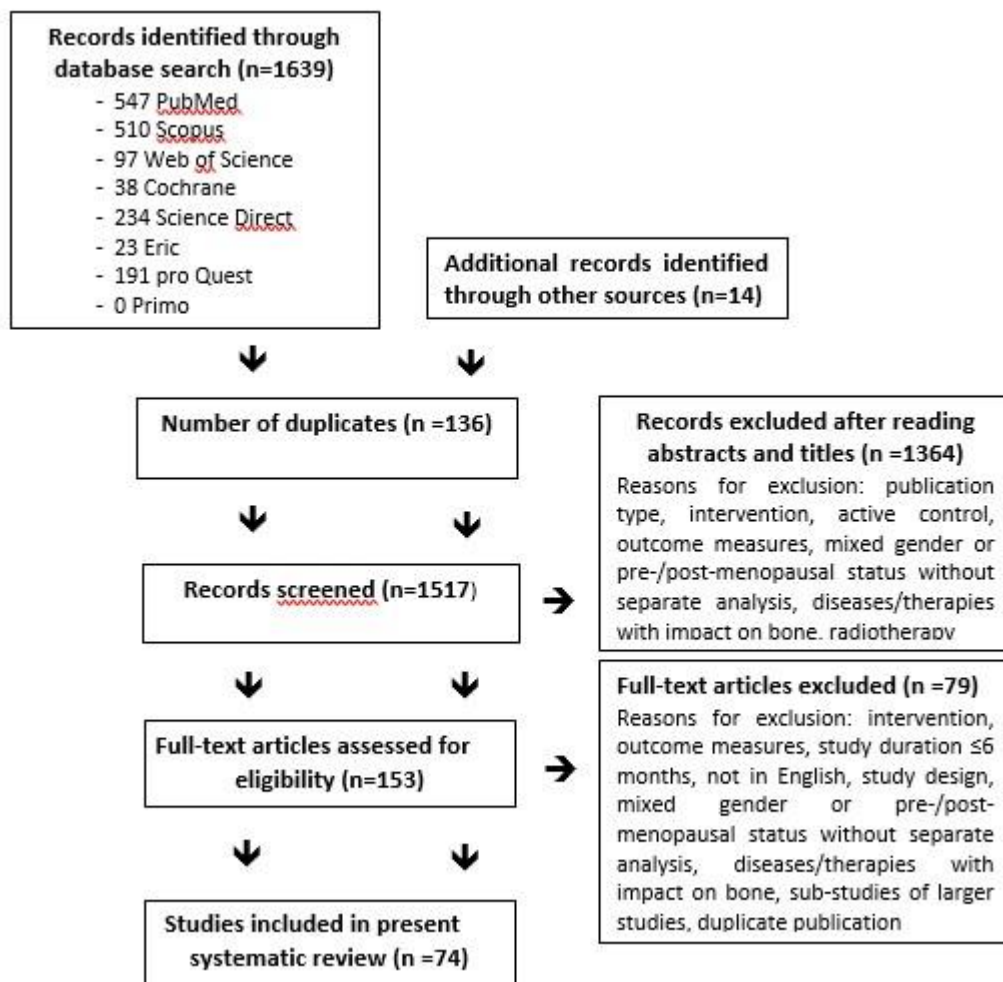


Abb. 12: Flussdiagramm des Suchprozesses „Trainingsinhalte mit positiven Effekten auf die Knochendichte“ [37].

Die Kategorisierung der Trainingsinhalte wurde wie folgt durchgeführt: (1) Isoliertes dynamisches Krafttraining („dynamic resistance exercise“, DRT), d. h. jede Art von Widerstandsübung, die Gelenkbewegungen zur Entwicklung der Muskel-Skelett-Kraft beinhaltet. Studien, die zusätzliche Übungskomponenten oder knochenspezifische Aufwärmprotokolle (Laufen, Hüpfen, Aerobic) mit potenzieller Wirkung auf den Knochen durchgeführt haben, wurden nicht eingeschlossen. (2) Übungen mit axialer Belastung über die Gravitation (weight bearing exercise“: WBE), die jede Art von aerober und anaerober Belastung des axialen Skeletts durch die Schwerkraft beinhalten, also bspw. Tai Chi²¹, Gehen, Laufen, Tanzen, Bewegungsspiele, „heel drops“, Hüpfen, Springen. (3) Interventionsstudien, in denen WBE und DRT kombiniert wurden, auch wenn die WBE-Belastung nur während der Aufwärmphase durchgeführt wurde. Zwei Gutachter (MS, WK) kategorisierten die Daten unabhängig voneinander, im Falle von Unstimmigkeiten entschied ein dritter Gutachter (SvS).

Die statistische Analyse erfolgte weitgehend analog zur Analyse für das postmenopausale Frauenkollektiv [18]. Es erfolgte eine traditionelle random-effects Meta-Analyse als Primäranalyse. Die vorliegende Untergruppenanalyse wurde als mixed-effects Meta-Analyse durchgeführt, wobei der "Trainingsinhalt" als Moderator diente.

Ergebnisse

Insgesamt wurden 74 geeignete Studien mit 84 Trainingsgruppen identifiziert (Abb. 12), die in 18 DRT-Gruppen, 30 WBE-Trainingsgruppen sowie 36 Studiengruppen mit kombinierten Trainingsprotokollen kategorisiert wurden (Abb. 37-39). Tab. 25 – 27 zeigen basale Charakteristika der Studie/Teilnehmer, Trainingscharakteristika und methodische Studienqualität der eingeschlossenen Untersuchungen.

LWS-KMD 16 DRT-, 26 WBE- und 33 kombinierte WBE&DRT-Übungsgruppen untersuchten die Effekte körperlichen Trainings auf die LWS-KMD. Zusammenfassend betrug die gepoolte Schätzung der Analyse für DRT (SMD) 0,40, 95%-KI: 0,15 bis 0,65 ($p=.009$), für WBE-Training 0,26, 95%-KI: 0,03 bis 0,49 ($p=.037$) und 0,42, 95%-KI: 0,23 bis 0,61 ($p=.001$) für die kombinierte WBE&DRT-Methodenvariante. Es wurden keine signifikanten Unterschiede bezüglich der Effektivität auf die Knochendichte zwischen den Trainingsinhalten festgestellt ($p=.508$). Alle Trainingsarten wiesen ein ähnlich hohes Maß an Heterogenität ihrer Studienergebnisse auf ($I^2=76,3-76,5\%$) (Abb. 37).

FN-KMD 15 DRT-, 23 WBE- und 25 kombinierte WBE&DRT-Trainingsgruppen untersuchten die Effekte körperlichen Trainings auf die FN-KMD. Zusammenfassend betrug die gepoolte Schätzung der Analyse für DRT 0,27, 95%-KI: 0,09 bis 0,45 ($p=.003$), für WBE-Training 0,37, 95%-KI: 0,12 bis 0,62 ($p=.004$) und 0,35, 95%-KI: 0,19 bis 0,51 ($p=.001$) für das kombinierte WBE&DRT-Training. Es wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen den Trainingsarten festgestellt ($p=.822$). Die Heterogenität der eingeschlossenen Studien war in der WBE- und kombinierten WBE&DRT-Gruppe beträchtlich ($I^2=82\%$) oder erheblich ($I^2=64\%$), in der DRT-Gruppe jedoch gering ($I^2=17\%$) (Abb. 38).

TH-KMD 10 DRT-, 7 WBE- und 12 kombinierte WBE&DRT-Gruppen untersuchten die Effekte körperlichen Trainings auf die TH-KMD. Zusammenfassend betrug die gepoolte Schätzung der Analyse für DRT 0,51, 0,28 bis 0,74 ($p<.001$), für WBE 0,40, 0,21 bis 0,58 ($p<.001$) und 0,34, 0,14 bis 0,53 ($p<.001$) für das kombinierte WBE&DRT-Training. Es wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen den Trainingsinhalten festgestellt ($p=.554$). Die Heterogenität der

²¹ Dasselbe gilt für andere traditionelle Chinesische Fitnessformen wie insb. Yi Jin Jing, für die ebenfalls Evidenz für positive Effekte auf die KMD an LWS und Hüft-ROI bei postmenopausalen Frauen vorliegt [212].

eingeschlossenen Studien war in der WBE&DRT-Gruppe vernachlässigbar ($I^2 < 10\%$) und in der DRT-Gruppe moderat ($I^2 = 44\%$) (Abb. 39).

Die Trichterdiagramme für die KMD an LWS, FN und TH ergaben keine Hinweise auf einen Publikations-/small study Bias. Der Regressions- und Rangkorrelationstest für die Asymmetrie des Funnel Plots ergab keine signifikante Asymmetrie für LWS oder TH, jedoch für TH mit fehlenden Studien auf der rechten Seite (d.h. „fehlende Studien mit positiven Effekten“). Die Trim-and-Fill-Analyse, bei der drei Studien entsprechend imputiert wurden, führte zu etwas günstigeren Ergebnissen (0,43; 95% KI: 0,31-0,54).

Diskussion

Die vorgelegte Meta-Analyse mit Subanalyse für unterschiedliche Trainingsinhalte bestätigt die signifikant positiven Effekte von dynamischem Krafttraining, WBE-Belastung sowie der Kombination beider Protokolle auf die KMD an LWS, FN und TH bei postmenopausalen Frauen. Zwischen den Trainingsinhalten zeigen sich keine signifikanten Gruppenunterschiede für LWS-, FN- oder TH-KMD. Diese Daten verifizieren die Ergebnisse von Shojaa et al. [13], die nach Kategorisierung der Trainingsinhalte in „ground reaction forces“ versus „joint reactions forces“ ebenfalls keine signifikanten Unterschiede erfassen konnten. Betrachtet man die Auswirkungen der verschiedenen Trainingsinhalte im Detail, so fällt auf, dass die Wirkung der WBE-Interventionen auf die KMD-LWS im Vergleich zur DRT-Gruppe deutlich geringer war (SMD: 0,26 versus SMD: 0,40). Dies hängt jedoch nicht unbedingt mit höheren Effekten der DRT-induzierten direkten muskulären Belastung auf den LWS zusammen, sondern möglicherweise mit der großen Anzahl von WBE-Studien, die mit geringen Bodenreaktionskräften (z.B. Gehen: $n=11$) und mit entsprechender geringer axialer Stoßbelastung gearbeitet haben. Ein weiteres, etwas überraschendes Ergebnis ist, dass der kombinierte Effekt von WBE&DRT im Vergleich zu DRT keine relevant höheren KMD-Effekte generiert. Dies steht jedoch nicht im Widerspruch zu älteren Meta-Analysen [213] oder neueren evidenzbasierten Leitlinien [8,214], die ebenfalls auf die Effekte körperlichen Trainings auf die Knochenfestigkeit fokussieren und durchweg Trainingsprotokolle empfehlen, die eine Kombination von DRT und WBE beinhalten. Obwohl unsere Analyse keine wesentliche Tendenz in Richtung einer Überlegenheit kombinierter Trainingsprotokolle aufzeigt, erscheint ein multimodales Trainingsprogramm zur Ansteuerung nicht-ossärer Trainingsziele (Sturzanzahl, -impact) oder Beschwerden/Risikofaktoren (die in Zusammenhang mit der Menopause oder höherem Lebensalter stehen) ohnehin geeigneter als monomodale Programme. Die Generalisierbarkeit unseres Ergebnisses auf andere Kollektive (Männer, GIOP) ist dabei unklar. Angesichts der grundsätzlichen Wirkmechanismen dieser Trainingsinhalte gehen wir jedoch von einer weitgehenden Übertragbarkeit dieser Ergebnisse aus.

Final ist aber anzumerken, dass die hohe Heterogenität (LWS- und FN-KMD) der Studienergebnisse innerhalb der Subgruppen WBE, DRT und WBE&DRT andeutet, dass neben den Trainingsinhalten noch andere Trainingsgrößen das Ergebnis körperlichen Trainings auf die KMD modifizieren.

Bewertung der Studienqualität und Transferierbarkeit der Ergebnisse

Die Generierung der vorliegenden Evidenz erfolgte via systematischer Literaturrecherche und Meta-Analyse, folglich Evidenzgrad 1a gemäß AQRH (Tab. 1). Die Anzahl der eingeschlossenen Studien lag mit 72 Untersuchungen respektive mindestens 15 Studiengruppen je Kategorie zumindest für LWS und FN-KMD (TH ≤ 7 Studienarme) in einem moderat hohen Bereich. Die quantitative Qualitätsbewertung der Arbeit mittels R-Amstar [32] zeigte 34 von 44 Punkten

(Tab. 61). Neben der Applikation von suboptimalen Trainingsprotokollen (s.u.) schwächen die enge Kategorisierung der Studien in DRT-, WBE- und kombinierte WBE&DRT-Protokolle die Generalisierbarkeit der Ergebnisse ab und erschweren eine Beurteilung von Trainingsinhalten, die nicht (bspw. Radfahren, Schwimmen, Wassergymnastik) oder nur eingeschränkt (bspw. „Walking“) diesen Kategorisierungen zugeordnet werden konnten.

Formulierung der Empfehlung

6	Empfehlung 6	Neu, Stand 2024
Empfehlungsgrad A	Ein körperliches Training zur Verbesserung von Knochenfestigkeit soll gewichtstragende Trainingsinhalte („weight-bearing exercise“) und/oder dynamisches Krafttraining berücksichtigen ²² .	
Evidenzgrad 1a	[13,21,211]	
	Konsensstärke: 100%	

Da diese Empfehlung insbesondere für den Trainingspraktiker zu wenig konkret ist, werden im Weiteren einige Trainingsinhalte genauer adressiert.

4.1.4. Systematische Reviews und Meta-Analysen, die auf einzelne Trainingsinhalte fokussieren

Walking, Radfahren und Schwimmen sind Bewegungs- und Trainingsinhalte, die bei Menschen mit orthopädischen Limitationen/eingeschränkter Leistungsfähigkeit sehr populär sind und z.T. bequem in den Alltag integriert werden können. Daneben zeigen diese (zumindest bei nicht-athletischen Kollektiven) primär „umfangsorientierten Inhalte“ positive Effekte auf kardiovaskuläre und kardiometabolische Risikofaktoren und Erkrankungen [215]. Die grundsätzliche Charakterisierung in Tab. 7 weist insbesondere für leistungssportliches Radfahren und Schwimmen ausbleibende oder negative Effekt auf Knochengrößen (überwiegend KMD) nach. Nun ist allerdings anzumerken, dass im Gesundheitssport die Gefahr kataboler Stoffwechsellage über (sehr) hohe Trainingsvolumina sehr überschaubar bleibt und ein entsprechend negativer Effekt des Trainingsinhaltes auf die Knochenfestigkeit bei nicht-athletischen Kollektiven nicht zu erwarten ist. Parallel dazu ist die Reizschwelle²³ im Zielkollektiv von Menschen, die von einer Osteoporose betroffen oder gefährdet sind, deutlich niedriger als bei Sportlerkollektiven, sodass auch niedrige mechanische Reize möglicherweise Anpassungserscheinungen auslösen können. Insofern lohnt es sich, einige ausgewählte Trainingsinhalte hinsichtlich ihrer osteogenen Potenz genauer zu analysieren.

4.1.5. Walking

Mehrere Meta-Analysen adressieren die Effekte von „Walking“ (inklusive Nordic Walking) auf die Knochendichte an LWS und Hüftregion [216-219] bei postmenopausalen Frauen. Zusammenfassend zeigt keine der Analysen, die z.T. mit unterschiedlichen Eligibilitätskriterien gearbeitet haben, signifikante Effekte von „Walking“ auf die Knochendichte an LWS, FN oder Unterarm-Regionen. Im Detail sind die Ergebnisse jedoch nicht ganz so eindeutig. Beispielhaft schloss die Analyse von Ma et al. [216] insgesamt 10 Untersuchungen mit isolierten Walking-Interventionen mit peri- und postmenopausalen Frauen ein. Die Meta-Analyse der Autoren

²² unter Differenzierung der Intensität. Cave: höhergradige Osteoporose. Erläuterung Kap. 4.3.1, Kap. 6.4, Kap. 7.

²³ ...also die physiologische Schwelle, die von einem Reiz überschritten werden muss, um Anpassungserscheinungen auszulösen.

[216] zeigt zwar keinen signifikanten Effekt an LWS (weighted mean difference, WMD: 0,01 g/cm; 95%-KI, -0,00 bis 0,02; p = .05), FN (WMD: 0,01 g/cm; 95%-KI, -0,00 bis 0,01; p = .07) oder dem mechanisch nicht belasteten Radius (-0,01 g/cm; 95%-KI, -0,06 bis 0,04; p = .71), eine Subanalyse ergab aber, dass eine Interventionsdauer >6 Monate zu signifikant positiven Effekten von Walking auf die FN-KMD führt. Sieht man „Remodeling“ als primäre Form von Knochenumbau und -anpassung bei Erwachsenen an [220,221], so ist ein Studienzeitraum von weniger als 6 Monaten zu kurz, um das volle Ausmaß der trainingsinduzierten Veränderung des mineralisierten Knochens via DXA/DPA/QCT zu erfassen. Insofern erscheint die Subanalyse somit als das belastbarere Ergebnis. Subanalysen für die Reizhöhe (hier: Gehgeschwindigkeit), Menopause (peri- vs. früh-post vs. spät-postmenopausal), Knochen- (knochengesund vs. Osteopenie/Osteoporose) oder Fitnessstatus (einschlägig vortrainiert vs. untrainiert) wurden von den Autoren nicht durchgeführt. Zusammenfassend interpretieren wir die Ergebnisse dahingehend, dass Walking zwar leichte Effekte auf die KMD insbesondere an der Hüft-ROI ausübt, aber in leistungsfähigen Kollektiven sicher nicht den Trainingsinhalt der Wahl darstellt. Inwieweit aber Walking eine Trainingsoption für ältere Menschen mit niedriger Knochenfestigkeit (Osteopenie/Osteoporose) oder manifesten niedrig-traumatischen Frakturen, also bei potentiell herabgesetzter Reizschwelle ist, evaluieren Rodrigues et al. [219]. Die Autoren [219] fokussieren in ihrer Meta-Analyse auf über 50-jährige Menschen mit erhöhtem Frakturrisiko. Die Autoren identifizieren via Literaturrecherche 13 eligible Studien, allerdings konzentrierte sich nur eine Untersuchung auf ein isoliertes Walking Protokoll [110]. Ebrahim et al. [110] führten dabei ein Walkingtraining mit vermutlich moderater Reizhöhe („brisk walking“) 3x 40 min/Woche über 24 Monate mit postmenopausalen Frauen (67±8 Jahre) durch. Die Untersuchung zeigte trotz eines positiven Trends weder im ersten noch im zweiten Studienjahr signifikante KMD-Effekte der Intervention an LWS und FN im Vergleich zu einer nicht-trainierenden KG.

Fazit

Bei positiven Effekten auf kardiovaskuläre/kardiometabolische Risikofaktoren und Erkrankungen (u.a. [222]) hat Walking lediglich einen geringen Stellenwert für die Knochenfestigkeit an LWS und Schenkelhals. Wir möchten allerdings Personen, die ein regelmäßiges Walkingtraining durchführen raten, diese kardiometabolisch effektive Trainingsform beizubehalten. Zum Zwecke der Verbesserung der Knochenfestigkeit sollten allerdings Trainingsinhalte mit höherem osteogenen Potential hinzukommen (s.u.).

Bewertung der Studienqualität und Transferierbarkeit der Ergebnisse

Die Generierung der vorliegenden Evidenz basiert auf den vorgelegten systematischen Literaturrecherchen und Meta-Analysen (Evidenzgrad 1a gemäß AQRH) sowie einer randomisierten Studie und einem RCT im Parallelgruppendesign [110], die den Effekt eines isolierten Walking-Trainings auf die KMD in einer relevanten Kohorte im Zielbereich dieser Leitlinie untersucht.

Formulierung der Empfehlungen

7	Empfehlung 7	Neu, Stand 2024
Empfehlungsgrad 0	Walking als alleinige Intervention zur Verbesserung der Knochenfestigkeit kann für Menschen mit stark herabgesetzter ossärer Reizschwelle erwogen werden.	
Evidenzgrad 1a	[216-219]	
	Konsensstärke: 100%	

4.1.6. Schwimmen

Schwimmen wird bedingt durch seinen Charakter als nicht-gewichtstragende Sportart mit überwiegend umfangsorientierter Muskelzugbelastung als mechanisch nicht oder wenig osteoanabol eingeschätzt. Eine Vielzahl von vergleichenden crosssektionalen Untersuchungen mit Athletenkollektiven bestätigt diese Einschätzung, indem sie in leichter Abhängigkeit von der Skelettregion (LWS, FN, Unterarm) keine wesentlichen Unterschiede zu einer nicht-trainierenden Vergleichsgruppe berichten (u.a. [204,223,224]). Mehrere systematische Übersichten und Meta-Analysen adressieren den Effekt von Schwimmen u.a. auf die KMD bei Kindern, Heranwachsenden und (eingeschränkt) Erwachsenen [205,225,226]. Die überwiegende Anzahl der dabei eingeschlossenen Einzeluntersuchungen erfasst die Effekte von Schwimmen mittels crosssektionaler oder retrospektiver Fragestellung, meist bei athletischen Kollektiven in jungem-mittleren Lebensalter. Überraschenderweise adressiert keine Interventionsstudie die Effekte eines Schwimmtrainings bei postmenopausalen Frauen. Mohr et al. [227] evaluieren mittels Parallelgruppendesign die trainingsinduzierten Effekte hoch- (10x 30s „Sprint“-Intervalle mit 120 s Pause) vs. niedrig-intensiver (Dauermethode: 3x 45-60 min/Wo.) Intervention im Vergleich zu einer nicht-trainierenden KG bei prämenopausalen Frauen (40-52 Jahre). Die Autoren berichten (unabhängig von der Reizhöhe und im Gegensatz zu einem Fußballtraining) keine Effekte auf die KMD oder Veränderung von Knochenmarkern nach einem 15-wöchigen Schwimmtraining.

Fazit

Bei positiven Effekten auf kardiovaskuläre/kardiometabolische Risikofaktoren/Erkrankungen (u.a. [228,229]) weist Schwimmen für die Knochenfestigkeit an LWS und proximalem Femur lediglich einen geringen Stellenwert auf. Wir möchten allerdings Personen, die ein regelmäßiges Schwimmtraining durchführen raten, diese kardiometabolisch effektive Trainingsform beizubehalten. Im Rahmen der Osteoporose-Therapie/-prophylaxe sollten allerdings Trainingsinhalte mit höherem Effekt auf die Knochenfestigkeit hinzukommen (s.u.). Für Menschen mit orthopädischen Limitationen, Gelenkproblemen und Faible für ein Training im Wasser wäre Wassergymnastik (s.u.) eine geeignete Trainingsoption.

Bewertung der Studienqualität und Transferierbarkeit der Ergebnisse

Die Generierung der vorliegenden Evidenz basiert auf mehreren systematischen Übersichtsartikeln und Meta-Analysen (Evidenzgrad 1a gemäß AQRH) mit unterschiedlichen Kollektiven. Leider wurden in keinem Fall Ergebnisse für postmenopausale Frauen oder Männer über 45 Jahre berichtet. Ein RCT im Parallelgruppendesign [227] wurde aufgrund relativer Nähe zum Zielkollektiv ebenfalls in die Evidenzbewertung eingeschlossen. Insgesamt ist jedoch die Transferierbarkeit der vorliegenden Untersuchungen auf die relevante Kohorte von postmenopausalen Frauen oder Männer über 45 Jahre deutlich eingeschränkt.

Formulierung der Empfehlungen

8	Empfehlung 8	Neu, Stand 2024
Empfehlungsgrad 0	Schwimmen als alleinige Intervention zur Verbesserung der Knochenfestigkeit kann für Menschen mit stark herabgesetzter ossärer Reizschwelle erwogen werden.	
Evidenzgrad 1a	[205,225,226]	
	Konsensstärke: 100%	

4.1.7. Wassergymnastik

Einführung

Im Rahmen des Rehabilitationssports und insbesondere Funktionstrainings via § 64 SGB IX und der Rahmenvereinbarung der Bundesarbeitsgemeinschaft für Rehabilitation [230,231] wird Wassergymnastik in Deutschland seit Jahren und in einer Vielzahl von Gruppen (ca. 15.000) u.a. im Spannungsfeld der Osteoporose-Erkrankung eingesetzt. Daher ist eine Evaluierung dieses Trainingsinhaltes von hochrelevanter Bedeutung für die künftige Ausrichtung des Rehabilitationssports und des Funktionstrainings bei Osteoporose. Lv et al. [232], die den Effekt von Balneotherapie und Wassergymnastik („aquatic exercise“) auf den Knochenmetabolismus via systematischem Review (n=4) und Meta-Analyse evaluierten, berichteten signifikant positive Effekte auf Formationsmarker (Osteocalcin) und tendenziell günstige Effekte auf Resorptionsmarker (CTX-I). In ihrem systematischen Review mit Meta-Analyse berichteten Simas et al. [233] signifikant positive Effekte einer Wassergymnastik (vs. nicht-trainierender KG; 6 Vergleiche) auf die LWS- (mean difference 0,03 g/cm²; 95%-KI: 0,01 – 0,05 g/cm²) und FN-KMD (0,04 g/cm²; 95%-KI: 0,02 – 0,07 g/cm²). Ein Vergleich zu „landbasierten“ Trainingsprotokollen (4 Vergleiche) zeigte für die LWS, nicht jedoch für die FN signifikant ungünstigere KMD-Veränderungen in der wasserbasierten Trainingsgruppe. In der Zwischenzeit wurden allerdings zusätzliche Arbeiten veröffentlicht, sodass ein „Update“ der einschlägigen Literatur nötig erscheint.

Methodik

Eine im Rahmen der Leitlinienerstellung durchgeführte systematische Übersichtsarbeit mit Meta-Analyse [23] durchsuchte fünf elektronische Datenbanken (Medline (PubMed), Cochrane CENTRAL, CINAHL, SPORTDiscus, PEDro) sowie zwei Register (International Clinical Trials Registry Platform (ICTRP) and clinicaltrials.gov für ongoing trials) nach Artikeln, die bis zum 07.10.2022 veröffentlicht wurden ohne sprachliche Einschränkungen. Zwei Artikel mit spanischem [234] oder japanischem [235] Volltext wurden, mittels elektronischer Ressourcen übersetzt. Die Arbeit inkludierte (1) randomisierte und nicht-randomisierte kontrollierte Studien mit mindestens einer Übungsgruppe im Vergleich zu einer Kontrollgruppe. (2) Studien mit einer Interventionsdauer von mindestens 6 Monaten, welche (3) die KMD an LWS und FN zu Beginn und nach Untersuchungsende durch (4) DXA, DPA oder QCT bei (5) erwachsenen Teilnehmern beiderlei Geschlechts erfassten. (6) Teilnehmer, die eine pharmakologische Osteoporose-Therapie erhielten, wurden nur dann eingeschlossen, wenn die Anzahl dieser Probanden zwischen der Trainings- und der Kontrollgruppe vergleichbar war. Ausgeschlossen wurden Studien, die sich auf (1) Krankheiten oder Zustände bezogen, die den Knochenstoffwechsel relevant beeinflussen, (2) auf (Hoch-)Leistungssportler oder (3) Tiere bezogen, (4) Doppel-/Mehrfachveröffentlichungen aus einer Studie sowie (5) Übersichtsartikel, Fallberichte, Leitartikel, Konferenzzusammenfassungen, Meta-Analysen und Letters. Die Arbeit wurde gemäß PRISMA durchgeführt [31]. Die Meta-Analyse wurde im International Prospective Register of Systematic Reviews (PROSPERO) unter der ID CRD42022298321 registriert.

Die statistische Analyse wurde analog zu den bereits oben beschriebenen Ansätzen und Prozeduren durchgeführt (Kapitel 5.4. [18]). Da sich eine einzelne Untersuchung bezüglich der berichteten LWS-KMD Daten sehr deutlich von den übrigen Untersuchungen unterschied, wurde eine Sensitivitätsanalyse ohne diese Studie [234] durchgeführt. Es wurde zudem eine Subanalyse für die Interventionsdauer (<8 versus ≥8 Monate) sowie den Knochenstatus (mit vs. ohne Osteopenie/Osteoporose) durchgeführt.

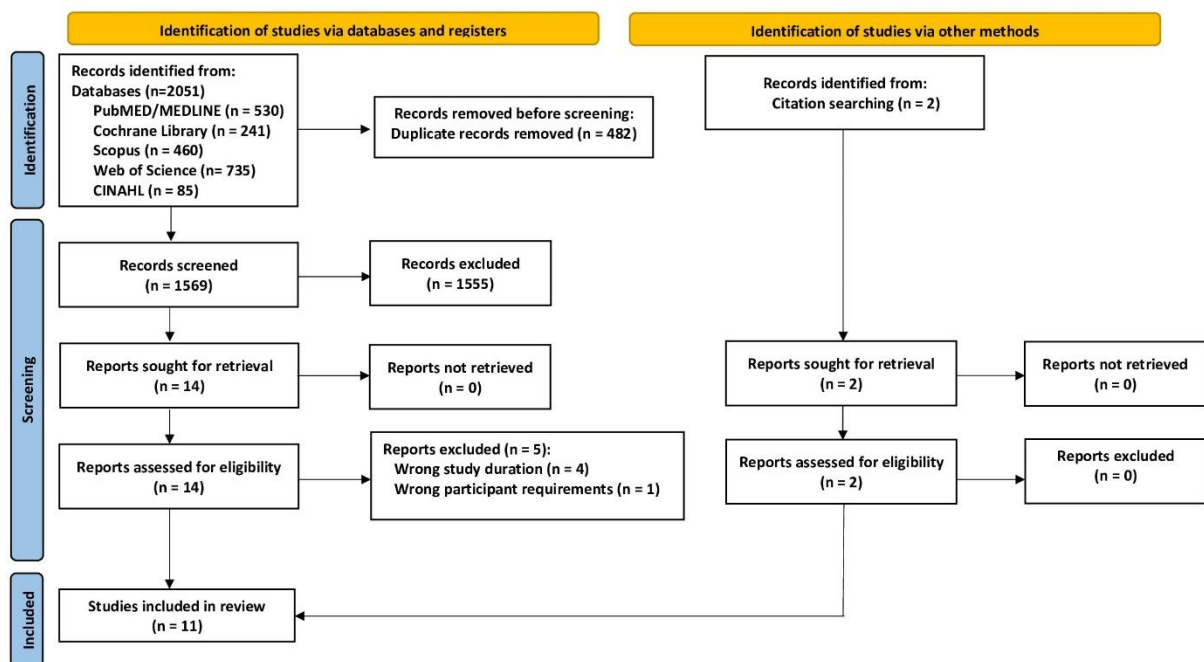


Abb. 13: Flussdiagramm des Suchprozesses „Effekte von Wassergymnastik auf die KMD“ [31].

Ergebnisse

Wie in Abb. 13 zu sehen, identifizierte die Literaturrecherche 11 eligible Untersuchungen [234-244] mit jeweils 11 TG und 11 KG. Der überwiegende Anteil der Untersuchungen (7 von 11) waren nicht randomisierte kontrollierte Studien [234,235,237,239,242-244]. Die zusammengefasste Anzahl der Teilnehmer lag bei 281 in der TG and 274 in der KG. Unabhängig von der Studiengruppe (d. h. TG oder KG) verordneten Borba-Pinheiro et al. [237,238] und Pernambuco et al. [241] eine Alendronat-Therapie (70 mg/Woche) für Teilnehmer mit Osteoporose und/oder eine Vit-D-Supplementierung (5600 IE/Woche) für osteopenische Teilnehmer. Tab. 28 bis 30 (Anhang) zeigen die basale Studien-, Teilnehmer- und Trainingscharakteristika sowie die methodische Qualität der eingeschlossenen Untersuchungen.

KMD-LWS Abbildung 40 (Anhang) zeigt die Effekte von Wassergymnastik auf die LWS-KMD im Vergleich zu einer nicht-trainierenden KG, mit und ohne Einschluss einer Studie mit sehr hohen Effekten [234]. Unter Anwendung der Sensitivitätsanalyse konnte ein signifikanter Effekt ($p=.002$) auf die LWS-KMD (0,30; 95%-KI: 0,11 bis 0,49) erfasst werden, der bei Analyse aller Studien nicht signifikant blieb (SMD: 0,34, 95%-KI: -0,18 bis 0,86). Die Heterogenität der Studienergebnisse war beträchtlich, zumindest wenn man alle eligible Studie einschloss ($I^2=82\%$) und lag nach Sensitivitätsanalyse vernachlässigbar ($I^2=7\%$).

KMD-FN Abbildung 41 (Anhang) zeigt die Effekte von Wassergymnastik auf die FN-KMD. Die Effekte von Wassergymnastik auf die FN-KMD unterschieden sich signifikant ($p=.034$) von der KG (SMD: 0,76, 95%-KI: 0,06 bis 1,46). Die Heterogenität zwischen den Studien war jedoch erheblich ($I^2=87\%$, Abb. 41).

Der Funnel Plot mit Trim- und Fill-Analyse wies auf eine vernachlässigbare Verzerrung der Ergebnisse für die KMD-LWS (allerdings ohne die Untersuchung von [234]) und eine hohe Evidenz für einen Publication/small study Bias für die FN-KMD hin (Abb. 42, Anhang). LFK Index

(0.39), Regressions- ($p=.833$) und Rangkorrelationstest bestätigten ($p=.727$) das Ergebnis geringer Verzerrung für die LWS und sehr deutlicher Asymmetrie (LFK: 3.73; Regressionstest $p=.020$) für die FN-KMD.

Die Subanalysen für die Interventionsdauer ($p\geq.579$) und den Knochenstatus ($p\geq.385$) zeigten keine signifikanten Unterschiede. Im Detail waren Interventionsdauern von ≥ 8 Monaten etwas günstiger, um die KMD an LWS und FN zu steigern, für den Knochenstatus zeigten sich keine konsistenten Ergebnisse.

Diskussion

Wassergymnastik ist besonders in Mittel- und Osteuropa sehr beliebt. Allein in Deutschland gibt es rund 15.000 Wassergymnastikgruppen, die unter den gesetzlichen Vorgaben des § 64 SGB IX [245] im Rahmen des Rehabilitationssports und insbesondere des Funktionstrainings ärztlich verordnet und von den GKV kofinanziert werden. Ein sehr erheblicher Anteil dieser zwingend supervidierten Bewegungsangebote umfasst Personen mit einer Osteoporose-Erkrankung. Dementsprechend ist das Ergebnis der vorliegenden systematischen Übersichtsarbeit und Meta-Analyse zu Wassergymnastik und Knochengesundheit von besonderem Interesse für die nicht-pharmakologische Therapie der Osteoporose bei körperlich limitierten, leistungsschwachen Kohorten. Zusammenfassend konnten signifikante Effekte von Wassergymnastik für die KMD des proximalen Femurs und abhängig von der Analyse (d.h. mit oder ohne die Studie von Ramirez-Villada [234]) für die KMD der Lendenwirbelsäule nachgewiesen werden. Wir bestätigen mit höherer Fallzahl somit die Daten von Simas et al. [233], die in ihrer systematischen Übersichtsarbeit und Meta-Analyse mit sieben Vergleichen (Wassergymnastik vs. nicht-trainierende KG) ebenfalls signifikante Auswirkungen von Wassergymnastik auf die LWS- und FN-KMD berichten. Allerdings berichteten die Autoren auch eine signifikante Überlegenheit von landbasierten gegenüber wasserbasierten Trainingsprogrammen (4 Vergleiche) für LWS- und (weniger ausgeprägt und n.s.) FN-KMD. Einen Erklärungsbeitrag für dieses Ergebnis liefern Daten, die aufgrund des Auftriebseffekts lediglich halb so hohe Spitzenwerte der vertikalen Bodenreaktionskräfte bei typischen Wasserübungen (z. B. stationäres Laufen, Nordic Skiing) im Wasser im Vergleich zum trockenen Umfeld berichten [246]. Dementsprechend wird die Hauptwirkung von Wasserübungen auf die Knochen durch Gelenkreaktionskräfte (joint reaction forces) ausgelöst, während die Wirkung von Bodenreaktionskräften bei Übungen im typischerweise brusthohem Wasser weniger relevant oder sogar vernachlässigbar ist [246]. Umgekehrt sind geringere Gelenksbelastungen, eine schmerzlindernde Wirkung [247,248] und das vernachlässigbare Sturzrisiko bzw. die fehlende Verletzungsgefahr wichtige Argumente, Wassergymnastik als Trainingsoption bei Menschen mit osteoartikulären Einschränkungen, Übergewicht und besonders bei körperlich eingeschränkten älteren Menschen zu applizieren.

Bewertung der Studienqualität und Transferierbarkeit der Ergebnisse

Die Generierung der vorliegenden Evidenz für Empfehlung 9 erfolgte via systematischer Literaturrecherche und Meta-Analyse, folglich Evidenzgrad 1a gemäß AQRH (Tab. 1). Die Anzahl der eingeschlossenen Studien lag mit 11 Untersuchungen in einem moderat hohen Bereich. Die quantitative Qualitätsbewertung der Arbeit mittels R-Amstar [32] ergab 38 von 44 Punkten (Tab. 61). Als Basis für Empfehlung 10 liegt die Subanalyse einer Meta-Analyse vor, allerdings mit nur 4 vergleichenden Untersuchungen. Neben der Applikation suboptimaler Trainingsprotokolle sowie nur schwer nachvollziehbarer Interventionsprogramme und

Studienergebnisse²⁴ erschweren die sehr deutlich variierenden Teilnehmercharakteristika eine abschließende Beurteilung der Effektivität dieses Trainingsinhaltes. Eine Generalisierbarkeit der Ergebnisse auf die Zielgruppe älterer Menschen mit einer herabgesetzter Knochenfestigkeit erscheint indes gerechtfertigt.

Formulierung der Empfehlungen

9	Empfehlung 9	Neu, Stand 2024
Empfehlungsgrad A	Wassergymnastik als Intervention zur Verbesserung der Knochenfestigkeit soll als Trainingsoption ²⁵ berücksichtigt werden.	
Evidenzgrad 1a	[23]	
	Konsensstärke: 100%	
10	Empfehlung 10	Neu, Stand 2024
Empfehlungsgrad B	Leistungsfähige Kollektive ohne Notwendigkeit oder Neigung für Wassergymnastik sollten ein landbasiertes- einem wasserbasierten Trainingsprotokoll vorziehen.	
Evidenzgrad 1a	[233]	
	Konsensstärke: 100%	

4.1.8. Radfahren

Ebenso wie Schwimmen stellt Radfahren eine nicht-gewichtstragende Sportart mit umfangsorientiertem Charakter dar. Mehrere Übersichtsartikel [206,207] belegen unter Miteinbeziehung überwiegend crosssektionaler oder observativer Untersuchungen mit athletischen Kollektiven zusammenfassend einen tendenziell negativen Effekt leistungssportlichen Radsports auf die Knochengesundheit (hier: KMD, Knochengeometrie, Knochenmarker). Neben der oben genannten vernachlässigbaren mechanischen Belastung kann es über die hohe Umfangsorientierung, kurze Regenerationszeiten und hohe Wettkampfdichte insbesondere im Straßenradsport zu negativen Effekten auf das endokrine System mit Suppression anaboler Hormone [249-251] und entsprechender Wirkung auf das muskuloskelettale System kommen. Dieser Aspekt sollte bei gesundheitsorientiertem Radsport mit entsprechend geringerem Trainingsvolumen allerdings nicht auftreten. Untersuchungen, die eine isolierte Intervention über Radfahren/Radergometer-Training fokussieren, liegen für postmenopausale Frauenkollektive oder Männer 45 Jahre+ nicht vor, sodass die Evidenz für Effekte eines gesundheitsorientierten Radtrainings sehr defizitär ist.

Fazit

Bei positiven Effekten auf kardiovaskuläre/kardiometabolische Risikofaktoren/Erkrankungen (u.a. [252]) hat Radfahren hingegen keinen nachgewiesenen positiven Effekt auf die Knochendichte an LWS und proximalem Femur. Personen, die ein regelmäßiges Radtraining durchführen wird trotzdem geraten, diese gelenkschonende und kardiometabolisch effektive Trainingsform beizubehalten. Zum Zwecke der Osteoporose-Therapie oder -prophylaxe

²⁴ Es wurden fünf Autoren angeschrieben und um Klarstellung von Sachverhalten gebeten. Leider erfolgte keine Antwort. Im Falle der Autoren Ramirez-Villada et al. [234] vermuten wir, dass die Varianz als Standardfehler (SE) und nicht wie angegeben als Standardabweichung (SD) angegeben wurde. Letzters würde um Faktor 4,1 höhere Varianzen bedeuten.

²⁵ Trainingsoption meint, dass dieser Trainingsinhalt grundsätzlich eine Möglichkeit zur effektiven Trainingsdurchführung darstellt.

sollten allerdings Trainingsinhalte mit höherem Effekt auf die Knochenfestigkeit hinzukommen (s.u.).

Bewertung der Studienqualität und Transferierbarkeit der Ergebnisse

Die Generierung der vorliegenden Evidenz basiert auf zwei systematischen Übersichtsartikeln mit Kollektiven, die verglichen mit der Zielgruppe der Leitlinie völlig unterschiedliche Rahmenbedingungen aufweisen. Die Transferierbarkeit der vorliegenden Untersuchungen auf die relevante Kohorte von postmenopausalen Frauen oder Männer über 45 Jahre ist somit sehr eingeschränkt.

Formulierung der Empfehlungen

11	Empfehlung 11	Neu, Stand 2024
Empfehlungsgrad A	Wird Radfahren als Trainingsinhalt zur Verbesserung der kardiometabolischen Leistungsfähigkeit und der körperlichen Fitness durchgeführt, soll ein geeignetes körperliches Training zur Frakturprophylaxe hinzukommen.	
Evidenzgrad 1a	[206,207]	
	Konsensstärke: 100%	

4.1.9. Ganzkörper-Vibrationstraining (WBV)

Ganzkörpervibrationstraining (Whole Body Vibration: WBV) stellt eine „alternative Trainingstechnologie“ dar, die in den letzten zwei Dekaden zunehmend Verbreitung gefunden hat und sich insbesondere im Bereich Osteoporose etablieren konnte. WBV Training besitzt grundsätzlich ebenso wie konventionelles Training das Potenzial, das Frakturrisiko als zentrale Zielgröße aller Interventionsmaßnahmen im Bereich Osteoporose über die zwei Trainingsziele „Erhöhung der Knochenfestigkeit“ und „Reduktion des Sturzrisikos“ anzusteuern. Der Abschnitt fokussiert zunächst das erste der beiden Trainingsziele.

Das Potenzial von Vibrationstraining im osteoporotischen Handlungsfeld begründet sich in der Tatsache, dass Knochengewebe neben der Reizhöhe (= Höhe der Krafteinwirkung mit resultierender Verformung des Knochens in $\mu\Sigma$) [57,253,254] und Reizrate (in $\mu\Sigma/s$) [58,59,255-257] eine Sensibilität für die Reizhäufigkeit [n] [258,259] und die Reizfrequenz [in Hz] [260-262] aufweist (siehe Belastungskomponenten). Mehrere Studien zeigen dabei, dass bei mechanischer Stimulierung des Knochens eine niedrige Reizhöhe durch eine (sehr) hohe Reizfrequenz respektive Reizhäufigkeit weitgehend kompensiert werden kann (Tab. 8) [73,263].

Tierexperimentelle Studien belegen sehr eindrucksvoll und weitgehend konsistent die hohe osteogene Potenz von Vibrationsreizen, die extern über Vibrationsplatten appliziert werden. Die große Mehrzahl entsprechender tierexperimenteller WBV-Studien am Kleintiermodell zeigt signifikante Effekte auf mittels CT oder DXA erfasste morphometrische oder densitometrische Parameter oder die mechanische Widerstandsfähigkeit auf. In den Studien vermochte WBV z.B. Ovariectomie induzierte Knochenverluste aufzuhalten [264-267], inaktivitätsbedingten Knochenschwund zu stoppen [268-270], in der Wachstumsphase vermehrt Knochen aufzubauen [271-273], die Wirkung von Alendronat zu verstärken [274] oder die Frakturheilung zu beschleunigen [264]. Wegweisend im Bereich der tierexperimentellen WBV-Studien war eine Studie von Rubin et al. [275] mit adulten Schafen, bei denen ein niedrig-

intensives Vibrationstraining über ein Jahr (20 min/d, 5 d/W., $0,3g^{26}$, $<10 \mu\text{m}$) zu einer Erhöhung der trabekulären KMD des proximalen Femurs (pQCT) um 34% ($p<0.01$) und einer Steigerung der Bruchfestigkeit um 27% ($p<0.05$) führte.

Vor dem Hintergrund dieser Ergebnisse stellt WBV zweifelsfrei einen mechanischen Stimulus mit osteogener Potenz dar, dessen Anwendung am Menschen im Handlungsbereich Osteoporose nahe liegt. Das Potential dieser Methode ist insbesondere darin zu sehen, dass sie gerade die große Zielgruppe älterer Menschen, die keinen Zugang oder Neigung zu klassischen Sportprogrammen haben, ansprechen kann.

Im Gegensatz zu tierexperimentellen Studien sind die Ergebnisse von humanen klinischen WBV Studien allerdings weniger einheitlich (positiv). Diese Heterogenität könnte insbesondere darauf zurückzuführen sein, dass in humanen WBV Studien sehr unterschiedliche Geräte und Belastungsprotokolle zur Anwendung kommen [276]. Zum Grundverständnis und als Basis zur Bewertung der Evidenz zur Wirkung von WBV auf die Knochenfestigkeit beim Menschen, ist es entsprechend unabdingbar, kurz auf die mechanischen Besonderheiten von WBV Geräten und die Unterschiede in den mechanischen Belastungs- und Trainingsprotokollen einzugehen. Aus diesem Grund werden im Folgenden die verwendeten Plattensysteme, die mechanischen Belastungsparameter, Übungsposition und Trainingsprotokolle kurz dargestellt.

Plattenkonstruktionen

Bei den Vibrationsplatten, die in den beschriebenen Studien zum Einsatz kamen, müssen grundsätzlich drei Systeme bzw. Grundprinzipien unterschieden werden: (A) Platten, welche nach dem „Wippprinzip“ arbeiten. Hier wird eine seitenalternierende Auslenkung der Platte über eine Rotation um eine Achse erzeugt (rotationale Vibration: RV). Dies führt zu einer alternierenden Belastung der Beine, ähnlich wie dies bei der Lokomotion der Fall ist. Die Auslenkung ist abhängig von der Entfernung zur Achse und kann über die Standbreite variiert werden. In Studien beträgt die Auslenkung der Platten 4-12 mm, was rechnerisch zu Beschleunigungen vom Mehrfachen der Erdbeschleunigung ($>1 g$; = supra G RV WBV). (B) Platten, welche nach dem „Hubprinzip“ arbeiten. Bei dieser Form der vertikalen Vibration wird die gesamte Platte und das sich darauf befindliche Subjekt vertikal beschleunigt (vertikale Vibration: VV). Auslenkungen von ca. 1,5 bis 4 mm führen rechnerisch ebenfalls zu Beschleunigungen vom Mehrfachen der Erdbeschleunigung ($>1 g$; = supra G VV WBV). (C) Low intensity (LI) Platten, welche durch eine sehr geringe vertikale Auslenkung ca. 0,1 mm (bei meist 30 Hz) zu niedrigen Beschleunigungen unterhalb der Erdbeschleunigung führen ($<1g$; = sub G LI WBV).

Gestaltung der mechanischen Belastungsparameter

Zentrale mechanische Belastungsparameter, welche beim Vibrationstraining den Stimulus auf den Knochen bestimmen, sind (A) die Auslenkung der Platte („peak to peak displacement“), die bei sinusförmigen Schwingungen, wie dies bei Vibrationsplatten meist der Fall ist, der doppelten Amplitude entspricht und (B) die Frequenz als Anzahl der Schwingungen pro Sekunde. Die Intensität der Vibration wird durch die Beschleunigung bestimmt, welche sich nach der Formel $A = 2 \times \pi^2 \times F^2 \times D$ (F = Frequenz; D = Amplitude) aus der Amplitude und der Frequenz errechnet.

²⁶ $1g = 9,81\text{m/s}^2$

Die WBV Studien am Menschen unterscheiden sich maßgeblich in der Gestaltung der beschriebenen mechanischen Belastungsparameter. Die Auslenkung der Platten variiert in den Studien zwischen 0,05 mm und 12 mm. Ebenso existieren große Unterschiede in der applizierten Vibrationsfrequenz zwischen 12 und 90 Hz. Die aus den Vibrationsprotokollen rein rechnerisch resultierenden Beschleunigungen liegen zwischen 0,3 g und 18 g. Die tatsächlichen Beschleunigungen welchen die unterschiedlichen Skelettregionen ausgesetzt sind, weicht in Abhängigkeit von der Körperposition und der Region stark ab (s.u.)[277].

Neben Frequenz und Amplitude sind Applikationsdauer und Trainingshäufigkeit wichtige Parameter des Belastungsprotokolls. Die Applikation des Vibrationsreizes erfolgte in den Studien, die mit supra G WBV arbeiten intervallartig mit meist 30-90 sekündigen Belastungsintervallen mit einer gesamten WBV Expositionsdauer von meist ca. 10 min. Die Trainingshäufigkeit betrug in der Mehrzahl der Studien 2-3 TE/Woche. Bei „sub G“ Belastungen erfolgt eine Dauerbelastung von i.d.R. 10-20 min bei 5-7 TE/Woche.

Positionierung auf der Platte

Die Körperposition auf der Platte bestimmt die Übertragung der Vibrationen auf den menschlichen Organismus und beeinflusst somit direkt die Reizsetzung im Bereich unterschiedlicher Skelettelemente. Die Positionierung erfolgte in den Studien sehr unterschiedlich, wobei die Vibration z.T. im aufrechten Stand, zum Teil in statischer oder dynamischer Beugeposition („Squat“ Position) appliziert wurde.

Übungsprotokolle

Große Unterschiede zwischen den Trainingsprotokollen bestehen bezüglich der Übungspositionen, ausgeführten Übungen, Haltedauer, Wiederholungshäufigkeit, Satzanzahl und der Trainingshäufigkeit (von täglich bis zweimal wöchentlich). In wenigen Studien wurden intensive Übungen auf den Platten ausgeführt, welche auch ohne WBV einen trainingswirksamen Reiz darstellen könnten, während in anderen Studien die Probanden lediglich passiv auf den Platten standen.

Evidenz zur Wirkung von WBV Training auf die Knochendichte bei postmenopausalen Frauen

Die Bewertung der Evidenz zur Wirkung von WBV Training auf die Knochendichte ist, zumindest was die Studienlage betrifft, leicht möglich, da inzwischen eine relativ große Anzahl an RCTs existiert, die in mehreren Meta-Analysen zusammengefasst wurden. Endpunkt der großen Mehrzahl der Studien ist die mittels Standardverfahren „DXA“ gemessene (areale) Knochendichte im Bereich der LWS und/oder des proximalen Femurs.

Eine Meta-Analyse von DadeMatthew et al. [278] zur Wirkung von WBV-Interventionen auf die Knochendichte (23 RCTs) bei unterschiedlichen Kohorten zeigte einen grenzwertig nicht signifikant positiven Effekt für die kumulierte KMD an proximalem Femur und LWS (23 Studien, SMD: 0,11; 0,00 bis 0,22, $I^2=28\%$). Fokussiert man auf die Gruppe der postmenopausalen Frauen, deutet die Analyse von DadeMatthews et al. [278] darauf hin, dass der Effekt auf die KMD bei postmenopausalen Frauen höher liegt als bei prämenopausalen Frauen. Analog weisen Zha et al. [279] günstigere WBV-induzierte osteogene Effekte bei Menschen mit Osteoporose, verglichen mit Knochengesunden nach.

De Oliveira et al. [280] evaluieren in ihrer Meta-Analyse den Effekt von WBV auf die Knochendichte ausschliesslich bei postmenopausalen Frauengruppen. Ihre (primäre) Analyse ergab signifikante Effekte für die KMD an LWS (14 RCTs, MD=0,009 g/cm², 0,003 bis 0,015

g/cm², I²=77%, moderate methodische Qualität), allerdings mit Ausnahme der wenig aussagekräftigen Trochanter-Region nicht für die proximale Femur-KMD²⁷.

Die inkludierten Studien der beiden Arbeiten [278,280] weisen große inhaltliche Unterschiede hinsichtlich der verwendeten Geräte und der Belastungs- und Trainingsprotokolle auf. Diese Heterogenität erfordert eine differenzierte Betrachtungsweise, die im Weiteren über Subanalysen gerätetechnischer Spezifizierung verfolgt wird. Es werden drei Kategorien unterschieden und analysiert (1) supra G (RV), (2) supra G (VV) und (3) sub G (VV) WBV.

In der Literaturübersicht von de Oliveira et al. [280] zeigten Studien mit supra G WBV Geräten sowohl bei vertikaler als auch seitenalternierender Auslenkung der Platte relevante Effekte auf die mittels DXA ermittelte KMD [280]. In 12 Studien kam vertikale („supra G“) WBV zur Anwendung. Sieben dieser 12 Studien berichten signifikante Effekte auf die KMD der LWS und/oder der Hüfte/Hüftregionen zugunsten der WBV Gruppen im Vergleich zu weitgehend nicht-trainierenden Kontrollgruppen [123,138,161,281-284]. In vier Studien konnte indes kein Effekt belegt werden [285-288]. Von sechs Studien, in denen seitenalternierende WBV zur Anwendung kam, berichten vier Studien signifikante Effekte auf die KMD der LWS und/oder Hüfte/Hüftregionen [108,284,289,290]. In zwei Studien wurde kein Effekt auf die Knochendichte belegt [291,292].

In einer Subanalyse verglichen (indirekt) de Oliveira et al. [280] den Effekt von seitenalternierender und vertikaler WBV (vs. KG). Die Analyse zeigte einen tendenziell günstigeren Effekt von seitenalternierender WBV auf die KMD der LWS (0,017 g/cm²; 0,012 bis 0,022 g/cm², I²=34%) und der Trochanterregion (0,020 g/cm², 0,012 bis 0,029 g/cm², I²=0%). Vertikale Vibration zeigte in der Subanalyse tendenziell eine geringere, aber ebenfalls signifikante Wirkung auf die KMD der LWS (0,007 g/cm²; 0,00 bis 0,013 g/cm², I²=75%), nicht aber auf die KMD der proximalen Femur-ROIs.

Auch DadeMatthews et al. [278] verglichen im Rahmen ihrer Meta-Analyse die Effekte vertikaler und seitenalternierender Vibration (vs. KG) und kamen zu dem Ergebnis, dass die Verwendung von seitenalternierenden WBV-Plattformen zu signifikant günstigeren Veränderungen der KMD (SMD: 0,20, 0,04 bis 0,37) im Vergleich zur vertikalen WBV-Plattformen führten (SMD: 0,06; -0,01 bis 0,14) [278].

Diese Ergebnisse decken sich mit denen einer früheren Meta-Analyse von Fratini et al. (9 RCTs), die speziell den Einfluss von Unterschieden in der WBV Reizsetzung auf die KMD (LWS und Hüfte) bei postmenopausalen Frauen analysierte [293]. Die Studie ergab einen signifikant positiven Effekt auf die KMD (0,020 g/cm², 0,017 bis 0,023 g/cm², I²=91%) nach seitenalternierender, nicht aber vertikaler WBV-Applikation.

Letztlich ist eine zuverlässige Bewertung der Überlegenheit eines WBV-Systems nur über eine Arbeit zu bewerkstelligen, die die Effekte beider Systeme bei ansonsten weitgehend identischer Gestaltung des Belastungs- und des Trainingsprotokolls direkt vergleicht (Kapitel 1). In einer derartigen Studie haben von Stengel et al. [294,295] in einer direkten Gegenüberstellung weitgehend vergleichbare positive Veränderungen der KMD von LWS (0,7±2.2% vs. 0,5±2.0%) und Hüfte (0,3±2,7% vs. 1,1±3,4%), nach Applikation seitenalternierender versus vertikaler WBV-Plattformen beobachtet.

Derzeit weist keine vorliegende Studie mit postmenopausalen Frauen einen signifikanten Effekt von „sub G“ WBV auf die KMD an LWS oder Hüfte/Hüftregionen nach [123,287,291,296-

²⁷ „grenzwertig“ n.s. für Schenkelhals-KMD: 9 RCTs, MD 0.016 g/cm², -0.001 bis 0.034 g/cm², I²=92%.

298]. Dies gilt trotz ausreichend hoher statistischer „Power“ (bis zu $n=710$ [296]), langer Interventionsdauer (8-24 Monate), hoher Trainingsfrequenz (5-7 TE/Woche) und einer Trainingsdauer von meist 10-20 min, also im Bereich von supra-G WBV.

Eine Datenkummulierung durch die bereits angeführte Meta-Analyse von de Oliveira et al. [280] zeigt indes für „sub G“ WBV in Summe einen signifikanten Effekt für die KMD der LWS (3 Studien, MD: $0,004 \text{ g/cm}^2$, $0,000-0,007 \text{ g/cm}^2$, $I^2=23\%$, PEDro: 6-10), nicht jedoch der Hüfte/Hüftregionen. Angesichts der hohen methodischen Qualität der Evidenz (hohe Fallzahl und gute methodische Qualität der einzelnen Studien) sprechen die Autoren eine Empfehlung für WBV mit hoher Frequenz ($\approx 30 \text{ Hz}$) und niedriger Reizhöhe ($\approx 0,3 \text{ g}$) zur Verbesserung der KMD bei postmenopausalen Frauen aus. Allerdings muss kritisch angemerkt werden, dass der Effekt auf die LWS-KMD ($0,004 \text{ g/cm}^2$, $0,000-0,007 \text{ g/cm}^2$)²⁸ sehr niedrig liegt und die entsprechende klinische Relevanz somit äusserst limitiert ist. Daneben ist die methodische Studienqualität nach Überprüfung nicht so hoch, wie von De Oliveira et al. [280] angegeben. Kritisch anzumerken ist ebenfalls die hohe Trainingsfrequenz, die mit dieser Methode verbunden ist (5-7x 10-20 min/Woche). Fratini et al. [293] berichten in diesem Zusammenhang einen signifikanten Effekt von WBV mit Beschleunigungen von $>3\text{g}$ ($0,013 \text{ g/cm}^2$, $0,004-0,021 \text{ g/cm}^2$, $I^2=94\%$), nicht jedoch nach „sub G“ WBV. Die Autoren gehen davon aus, dass nur ein intensiver mechanischer Reiz die dämpfende Wirkung der Weichteile und Gelenke überwinden und mit ausreichender Energie die Zielregionen erreichen und beeinflussen kann. Warum ein niedrigintensives „sub G“ WBV in tierexperimentellen Studien im Gegensatz zu humanen Studien in der Mehrzahl der Untersuchungen signifikante Effekte zeigt, kann auf der Basis der vorliegenden Studienlage nicht beantwortet werden.

Auf Basis der vorliegenden Daten lässt sich die Wirksamkeit von WBV Training auf die mittels DXA erhobene KMD somit ausreichend gut bewerten. Die Daten sind allerdings nicht ausreichend, um evidenzbasiert detaillierte Empfehlungen für eine optimale Gestaltung der mechanischen Belastungsparameter (insb. Frequenz, Amplitude, Reizdauer) und Trainingsprotokolle (Trainingsfrequenz, -dauer) aussprechen zu können. Die mechanische Stimulierung des Knochens resultiert beim WBV-Training aus der Summe aller mechanischen Belastungsparameter, sodass die Analyse der Wirkung eines Parameters stets unter Berücksichtigung der Gestaltung der anderen Belastungsparameter erfolgen muss.

Betrachtet man die Vibrationsfrequenz, so waren in der Analyse von de Oliveira et al. niedrige Frequenzen unter 20 Hz in gleicher Weise effektiv wie hohe Frequenzen, um die aKMD im Bereich LWS und Trochanter positiv zu beeinflussen [280]. Hier muss erwähnt werden, dass Frequenzen von unter 20 Hz nur bei seitenalternierendem WBV Training zur Anwendung kamen. Kategorisiert man nach Vibrationsplatten, so zeigten sich bei supra G WBV Studien auf vertikal vibrierenden Platten bei Frequenzen zwischen 20 und 40 Hz , bei seitenalternierend vibrierenden Platten bei Frequenzen zwischen $12,5$ und 30 Hz Effekte auf die KMD zu. Bei vertikalen Vibrations-basierten Protokollen mit Auslenkungen der Platten von $1,5$ bis 4 mm , bei seitenalternierender WBV mit 4 bis 12 mm kann ebenfalls eine osteogene Wirkung nachgewiesen werden. Fasst man die Trainingscharakteristika effektiver Protokolle zusammen, so war bei einem supra G WBV auf vertikalen oder seitenalternierenden Platten eine Trainingshäufigkeit von 2-3 Trainingseinheiten mit einer Dauer von 10-20 Minuten grundsätzlich geeignet, eine osteogene Wirkung auf die KMD zu erzielen. Rein rechnerisch betrugen die resultierenden Beschleunigungen effektiver Protokolle $>3 \text{ g}$ ($3-18 \text{ g}$). Ob auf den Platten spezielle Trainingsübungen durchgeführt wurden oder nicht, hatte statistisch keinen

²⁸ $\approx 0,5\%$

Einfluss auf die Ergebnisse [280]. Im Gegensatz zu supra G WBV Protokollen waren sub G WBV Protokolle weitgehend homogen (meist ca. 0,1 mm Auslenkung, 30 Hz, 0,3 g i.d.R. 5-7x 20 min/Woche).

Neben der positiven Beeinflussung der Knochenfestigkeit ist eine Verbesserung des neuromuskulären Funktionszustandes ein weiteres Ziel, welches durch WBV realisiert werden kann. Eine wachsende Zahl von Veröffentlichungen zeigt, dass WBV-Interventionen dazu beitragen können, die Muskelkraft und funktionelle motorische Fähigkeiten zu verbessern [299]. Ein verbesserter neuromuskulärer Funktionszustand kann über eine Reduktion der Sturzneigung einen wesentlichen Beitrag zur Vermeidung osteoporotischer Frakturen leisten (siehe entsprechender Abschnitt).

Sicherheitsaspekte

Da bei der Anwendung intensiver supra G WBV Protokolle die ISO-Richtlinien (ISO-2631) um ein vielfaches überschritten werden [300], stellt der Sicherheitsaspekt ein wichtiges Thema dar, der final aufgegriffen werden soll. Grundlage der Diskussion darf allerdings nicht die Beschleunigung sein, welche die Platte rechnerisch produziert, sondern diejenige, die tatsächlich auf den Körper und die kritischen Körperregionen wie z.B. die Wirbelsäule und den Kopf übertragen werden. Die Übertragung von Vibrationen innerhalb des menschlichen Körpers hängt stark von der Körperposition, bzw. den Gelenkstellungen ab, wobei durch Beugung der Gelenke die Schwingungen zum großen Teil kompensiert werden [277]. Im Zusammenhang mit möglichen Gesundheitsrisiken darf auch nicht unerwähnt bleiben, dass die Übertragung von Vibrationen auf Wirbelsäule und Kopf bei vertikalen Vibrationen um 71% bis 189% höher ist als bei seitenalternierender WBV. Bei osteoporotischen Kollektiven ein intensives vertikales Vibrationstraining bei 30 Hz und 2-5 mm Auslenkung im aufrechten Stand zu realisieren, ist daher äußerst kritisch zu sehen, da die Schwelle ab der ein Vibrationsreiz potentiell schädigend auf osteoporotisch ausgedünnte Wirbelkörper wirkt und deren Zusammensintern fördern kann, nicht bekannt ist. Während bei sub G WBV zur Verbesserung der Übertragung der Vibrationsreize i.d.R. eine Exposition im aufrechten Stand mit durchgestreckten Gelenken erfolgt (wodurch umgekehrt die Aktivierung der Muskulatur gering ausfällt), ist bei intensivem supra G WBV zur Dosierung des Vibrationsstimulus und zur optimalen Aktivierung der Muskulatur stets auf eine Beugeposition der Gelenke zu achten. Bei WBV Protokollen mit rechnerisch resultierenden Beschleunigungen von 8 bzw. 15 g wird durch eine Kniebeugeposition die Übertragung auf den Rumpf um den Faktor 10 reduziert [277]. Generell berichten entsprechende WBV-Studien nahezu ausnahmslos eine gute Verträglichkeit der angewendeten Protokolle. De Oliveira [280] erfassen in ihrer (Meta-)Analyse allerdings eine Anzahl von Untersuchungen (6 von 34), die von unerwünschten Nebenwirkungen (allerdings ohne großen Beschwerdegrad) berichten, sodass eine komplett unbeaufsichtigte Durchführung der WBV nicht in jedem Fall angeraten werden kann.

Fazit

Die Durchführung von WBV-Training kann (bzw. soll) als nicht-pharmakologische Präventions- oder Therapieform im Bereich Osteoporose als Trainingsoption Berücksichtigung finden. In Meta-Analysen von RCTs mit postmenopausalen Frauen [280] oder mit Frauen und Männern unterschiedlichen Alters [278] hat WBV einen signifikant positiven Einfluss auf die Knochendichte gezeigt (hohe Evidenz). Signifikante und klinische relevante Effekte auf die KMD der LWS ergaben sich in den beschriebenen Meta-Analysen für vertikale und seitenalternierende supra G WBV Protokolle, welche rechnerisch zu Beschleunigungen der Platten von >3 g führen (hohe Evidenz) [280]. Die Verwendung von seitenalternierenden WBV-

Plattformen führt im Gegensatz zur vertikalen Vibration zusätzlich zu signifikanten und klinisch relevanten Effekte auf die KMD der Trochanterregion (>3 g)[280]. Die Effekte von WBV Training auf die KMD sind mit den Effekten die durch klassisches Training bewirkt werden, weitgehend vergleichbar [13,18]. Sub G Studien führten (nur) nach Meta-Analyse im Bereich der LWS zu statistisch signifikanten Effekten auf die KMD, wobei die Effektstärke niedrig liegt [280,293].

Zusammenfassend hat WBV als nicht-pharmakologische Maßnahme im Handlungsfeld Frakturprophylaxe ein großes Potential, da es die große Zielgruppe der Personen anspricht, für die ein klassisches körperliches Training zur positiven Beeinflussung des Knochenstatus (und der neuromuskulären Leistungsfähigkeit) nicht oder nicht konsistent in Frage kommt. Die Barrieren für die Durchführung von WBV-Training sind verglichen mit denjenigen für klassisches Sporttreiben geringer. Es zeichnet sich durch einen subjektiv geringen Anstrengungsgrad aus, ist (meist) weniger zeitintensiv und stellt keinen hohen Anspruch an die sportmotorischen Fähigkeiten dar, so dass WBV selbst für „Sportabstinente“ attraktiv ist.

Bewertung der Studienqualität und Transferierbarkeit der Ergebnisse

Die Generierung der vorliegenden Evidenz basiert auf mehreren systematischen Übersichtsartikeln/Meta-Analysen (und randomisierten klinischen Studien (RCTs) mit Kollektiven, die mit den Zielgruppen der Leitlinie unmittelbar vergleichbar sind. Die Transferierbarkeit der vorliegenden Untersuchungen auf die relevante Kohorte von postmenopausalen Frauen oder Männer über 45 Jahre ist somit voll gerechtfertigt.

Formulierung der Empfehlung

12	Empfehlung 12	Neu, Stand 2024
Empfehlungsgrad A	Ganzkörper-Vibration soll als Trainingsoption ²⁹ zur Verbesserung der Knochenfestigkeit berücksichtigt werden.	
Evidenzgrad 1a	[278,280]	
	Konsensusstärke: 100%	

Zusammenfassende Hinweise zur Durchführung eines WBV-Trainings

Leider ist die vorliegende Studienlage nicht ausreichend, um differenzierte Empfehlungen bzgl. der optimalen Gestaltung eines WBV Belastungsprotokolls ableiten zu können. Fasst man die Charakteristika von osteogenen WBV Protokollen zusammen, so lassen sich dennoch einheitliche Charakteristika erkennen und Grundprinzipien ableiten: Ein supra G WBV Training sollte demnach 2-3x pro Woche mit einer Expositionszeit von ca. 10 min und intervallartiger WBV Applikation durchgeführt werden. Bei vertikaler Vibration haben Frequenzen zwischen 20 und 40 Hz, bei seitenalternierender WBV zwischen 12,5 und 30 Hz eine osteogene Potenz gezeigt. Auf den Platten ist während der (supra G) WBV eine Positionierung mit gebeugten Gelenken zu empfehlen. Eine Durchführung von speziellen Übungen ist zur additiven positiven Beeinflussung der KMD nicht erforderlich. Ein sub G WBV Training sollte mit hohem Volumen 5-7mal/Woche über 10-20 Minuten erfolgen. Um eine Übertragung der Vibrationsstimuli entlang des zentralen Achsenskelettes von kaudal nach kranial zu gewährleisten, sollte die Exposition im aufrechten Stand erfolgen.

²⁹ Trainingsoption meint, dass dieser Trainingsinhalt grundsätzlich eine Möglichkeit zur effektiven Trainingsdurchführung darstellt.

4.1.10. Ganzkörper-Elektromyostimulation (WB-EMS)

WB-EMS ist besonders für ältere Menschen eine attraktive, da zeiteffektive, hochgradig supervidierte und gelenkschonende Trainingstechnologie [301]. WB-EMS ist besonders in Deutschland relativ weit verbreitet [302] und strikt reglementiert [303,304]. Vergleichbar einer WBV bietet sich die Trainingstechnologie „Ganzkörper-Elektromyostimulation“ (WB-EMS), welche die unterschwelligen Reize eines leichten Körpertrainings auf ein effektives Maß verstärken kann [305], als Trainingsoption für ältere Menschen ohne Zugang oder Neigung zu klassischen Sportprogrammen an. Fasst man die vorliegende Literatur im Bereich „Elektromyostimulation und Knochen“ zusammen, so finden sich mehrheitlich Studien, die den Einfluss von (funktionellem) EMS (meist „FEMS-cycling“ oder „FEMS-resistance exercise“) bei Querschnittslähmung (SCI) untersuchen. Obgleich die überwiegende Anzahl (Ausnahme u.a. [306,307]) der Studien in Abhängigkeit von untersuchter Region und Belastungsprotokoll generell positive Effekte auf die Knochendichte der fokussierten Region zeigen (u.a. [308-311]), sind diese Ergebnisse auf Kollektive ohne schwerwiegende funktionelle Einschränkungen und einer somit deutlich weniger Inaktivitäts-bedingt herabgesetzten Reizschwelle [312] kaum übertragbar. Ganzkörper-Elektromyostimulation (WB-EMS), die im Gegensatz zur lokalen Stimulation alle großen Muskelgruppen simultan, aber mit jeweils dezidierter Reizhöhe stimulieren kann [313], hat sich in der Vergangenheit als effektive Trainingsmethode im Spannungsfeld der Sarkopenie herausgestellt [314,315], sodass aufgrund enger Muskel-/Knochen-Interaktion [316,317] ein relevanter Effekt auf die KMD an LWS und FN möglich erscheint. Nur wenige Untersuchungen evaluieren die Effekte einer WB-EMS Applikation auf die KMD [318-322]. Lediglich eine der Untersuchungen [320] erfasst den Effekt eines WB-EMS auf die Knochendichte an LWS und FN über einen ausreichend langen Zeitraum (≥ 6 Monate) und mit ausreichender statistischer „Power“. Der 12-monatige RCT schloss weitgehend sportabstinente Frauen, 70 Jahre und älter mit geringer Muskelmasse und einer Osteopenie an LWS oder FN ein. Nach niederfrequenter (85 Hz) Standard WB-EMS-Applikation [323] (bipolar, Impulsbreite 350 μ sec, direkter Impulsanstieg, 4s Impuls - 4s Impulspause) mit leichten Körperübungen im Stehen 1,5x 20 min/Wo. berichteten die Autoren nach ITT-Analyse einen grenzwertig nicht signifikanten Effekt für die LWS-KMD ($p=.051$)³⁰ im Vergleich zu einer KG mit niedrig-intensivem Gymnastikprogramm 1x 45 min/Wo. Keine wesentlichen Unterschiede ($p=.768$) zur KG zeigten sich für KMD-FN. Im Gegensatz dazu führte die WB-EMS Intervention zu einer signifikanten Verbesserung von morphometrischen und funktionellen Muskelgrößen [325]. Zusammenfassend kann der positive Effekt einer isolierten WB-EMS Applikation auf die KMD an LWS und proximalem Femur in Anbetracht der potentiell herabgesetzten ossären Reizschwelle dieses inaktiven Kollektivs auch unter Berücksichtigung potentiell positiver Effekte in der aktiven Kontrollgruppe als niedrig eingeschätzt werden. Inwieweit eine andere Belastungskomposition oder begleitende moderate WB-Belastung unter WB-EMS-Applikation andere Effekte gezeigt hätte, ist schwer zu beurteilen. Eine WB-EMS induzierte Rhabdomyolyse wie in der Vergangenheit nach exzessiver Erstapplikation beschrieben [326-328], kann nach sorgfältiger Konditionierung und angemessener Intensitätssteuerung selbst bei vulnerablen Kollektiven allerdings ausgeschlossen werden [329].

Bewertung der Studienqualität und Transferierbarkeit der Ergebnisse

Die Generierung der vorliegenden Evidenz basiert auf lediglich einer randomisierten kontrollierten Studie im Parallelgruppendesign von akzeptabler Qualität (PEDro 7), die allerdings die hochrelevante Gruppe wenig sportaffiner, osteopener Frauen 70 Jahre+

³⁰ Per Protokoll Analyse $p=.015$ [324].

adressierte. Die Transferierbarkeit der vorliegenden Untersuchungen auf die Zielkohorte älterer Menschen, die ein intensives konventionelles Trainingsprogramm nicht mehr durchführen möchten oder können, ist somit unmittelbar gegeben. Im Gegenteil dazu ist die Transferierbarkeit der Ergebnisse auf jüngere Personen mit weniger herabgesetzter ossärer Reizschwelle sehr eingeschränkt. Letztere Gruppe sehen wir allerdings nicht als primäres Nutzerkollektiv dieser Technologie.

Formulierung der Empfehlungen

13	Empfehlung 13	Neu, Stand 2024
Empfehlungsgrad B	Bei Menschen mit herabgesetzter Leistungsfähigkeit und Gelenkproblematik sollte Ganzkörper-EMS zur Verbesserung der Knochenfestigkeit als mögliche Trainingsoption berücksichtigt werden ³¹ .	
Evidenzgrad 1b	[320]	
	Konsensstärke: 100%	
14	Empfehlung 14	Neu, Stand 2024
Empfehlungsgrad A	Wird Ganzkörper-EMS von leistungsfähigen Menschen ohne Gelenklimitation durchgeführt, soll ein geeignetes körperliches Training zur Frakturprophylaxe hinzukommen.	
Evidenzgrad 1a	[18,19,320]	
	Konsensstärke: 100%	

³¹ ...unter strikter Berücksichtigung der bestehenden Kontraindikationen [330] und der internationalen Richtlinie für sichere und effektive Applikation von Ganzkörper-Elektromyostimulation [331].

4.2. Trainingsmittel

Einführung

Trainingsmittel im hier relevanten Sinne sind im Training eingesetzte Geräte, die im Trainingsprozess in „organisatorischer, gerätemäßiger und informativer Art“ [72] genutzt werden. Im Spannungsfeld eines konventionellen körperlichen Trainings zum Erhalt/zur Erhöhung der Knochenfestigkeit haben Trainingsmittel besondere Relevanz. Besonders aus organisatorischer, logistischer und finanzieller Sicht ist es relevant zu wissen, ob spezifische (Kraft-)Geräte erforderlich sind, um erfolgreiche Trainingsprogramme zu erstellen, oder ob ein DRT mit freien Geräten wie Bänder, Hanteln oder lediglich dem eigenen Körpergewicht ähnlich effektiv auf die KMD einwirken.

Methodik

Eine im Vorlauf der Leitlinienerstellung durchgeführte, systematische Übersichtsarbeit und Meta-Analyse [22], die u.a. die oben genannte Fragestellung adressierte, schloss Studien mit Eligibilitätskriterien analog zu der bereits oben beschriebenen Untersuchung [21] ein. Für die weitergehende Analyse der isolierten DRT-Effekte [22,332] wurden nur Studien berücksichtigt, in denen isoliertes DRT ohne eine begleitende Übungskomponente/Aufwärmphase mit Inhalten die potentiell relevante Effekte auf die Knochenfestigkeit zeigen, durchgeführt wurden. Wie bereits ausgeführt, schloss die elektronische Literaturrecherche in acht Datenbanken alle Artikel ein, die bis zum 01. August 2022 (update) in deutscher oder englischer Sprache veröffentlicht wurden. Die Studie wurde unter PROSPERO (CRD42018095097) registriert. Abb. 43 (Anhang) zeigt das Flussdiagramm der Literaturrecherche.

Die Kategorisierung der Trainingsmittel wurde wie folgt durchgeführt: (1) DRT mit spezifischen Kraftgeräten, (2) freie Gewichte inklusive eigenes Körpergewicht sowie (3) eine Kombination beider Methodenvarianten. Zwei Gutachter kategorisierten die Studienarme unabhängig voneinander, im Falle von Unstimmigkeiten entschied ein dritter Gutachter [22].

Die statistische Analyse erfolgte weitgehend analog zur Analyse für das postmenopausale Frauenkollektiv. Die vorliegende Untergruppenanalyse wurde als mixed-effects Meta-Analyse durchgeführt, wobei die Kategorisierung der Trainingsmittel als Moderator diente.

Ergebnisse

Insgesamt wurden 17 eligible (Krafttrainings-) Studien mit 20 Übungs- und 18 Kontrollgruppen eingeschlossen. Die zusammengefasste Anzahl der Teilnehmerinnen in den Trainings- und Kontrollgruppen betrug 423 bzw. 373 Frauen. Da die basalen Teilnehmer- und Studien-, Charakteristika sowie die methodische Qualität der Studien bereits in Tab. 26 und 27 abgebildet sind, erfolgt lediglich eine Darstellung der Trainingscharakteristika zur Übersicht der Kategorisierung im Anhang (Tab. 31).

Grundsätzlich zeigte die Analyse signifikante Effekte eines DRT für die KMD an LWS (SMD: 0,54, 95%-KI: 0,22 bis 0,87), FN (SMD: 0,22, 95%-KI: 0,07 bis 0,38) und TH (0,48, 0,22 bis 0,75). Die Kategorisierung bezüglich der Trainingsmittel zeigte, dass die größte Anzahl der Untersuchungen ein Krafttraining mit Geräten (n=10) durchführte, jeweils 4 Untersuchungen führten ein „freies Training“ sowie einen Mix aus beiden Varianten durch.

Die entsprechende Analyse auf Unterschiede zwischen den Kategorien „Kraftgeräte“ vs. „freie Gewichte“ versus „Kombination beider Varianten“ zeigte bei tendenzieller leichter

Überlegenheit von Gerätetraining für die KMD-ROIs LWS ($p=.70$) und FN ($p=.49$) keinen signifikanten Unterschied zwischen den Kategorien. Im Gegensatz dazu zeigte sich für ein "freies Gewichtstraining" die signifikant höchste ($p=.013$) Effektstärke an der TH-KMD (SMD: 0,89, 95%-KI: 0,59 bis 1,19) vs. „DRT-Geräte“ (0,23, -0,09 bis 0,55) vs. „Kombination“ (0,25, -0,35 bis 0,84). Das letztere Ergebnis ist allerdings wenig belastbar, da lediglich 3 Trainingsarme ein Krafttraining an Geräten und nur eine Studie ein „Kombinations“-Training durchführten.

Diskussion

Zusammenfassend zeigen sich nochmals signifikante niedrig (FN) bis moderat (LWS) hohe Effekte eines dynamischen Krafttrainings auf die Knochendichte. Relevanter in diesem Zusammenhang ist aber das Ergebnis der weitgehend vergleichbaren, jeweils signifikanten Effekte eines Krafttrainings an Geräten, freien Gerätetrainings und Mix aus beiden Trainingsvarianten auf die KMD an LWS und FN. Etwas überraschend ist das allerdings wenig belastbare Ergebnis, das ein Training mit freien Gewichten die besten Effekte für die TH-KMD zeigt. Insgesamt ist dieses Ergebnis erfreulich, da der materielle Aufwand eines Trainings mit spezifischen Geräte, somit nicht zwingend erforderlich ist. Abseits der Knochendichte könnte für ältere Menschen ein alltagsorientiertes Training mit freien Gewichten günstiger sein, um die Funktionalität [333,334] zu verbessern, die bei Mobilitätseinschränkungen, Behinderung, Morbidität und Mortalität von entscheidender Bedeutung ist [335-337]. Übungen mit freien Geräten werden, durch die höhere muskuläre Koordinationsleistung aufgrund der instabilen Bewegungsausführung, höhere Transfereffekte auf Alltagsaktivitäten zugeschrieben [338]. Auf der anderen Seite sprechen einige Aspekte für die Applikation eines Gerätetrainings. So lässt die Bewegungsführung von Kraftgeräten ein sichereres Krafttraining verglichen mit freien Geräten [333,334,339], insbesondere bei Untrainierten und Menschen mit orthopädischen Limitationen, zu. Auf untrainierte Personen können freie Gewichte wie Hanteln zudem „einschüchtern“ wirken [338] und somit die Bindung an das Trainingsprogramm einschränken. Weiterhin bietet ein Training an Geräten zumindest im Vergleich zu Hilfsmitteln wie elastischen Bändern oder dem eigenen Körpergewicht die Möglichkeit der präzisen Intensitäts- und Lastvorgabe, dessen Monitoring und einer Steuerung der Progression im Trainingsverlauf. Zusammenfassend erscheint nach einer ausreichend langen Lern- und Konditionierungsphase ein gemischtes Training an Kraftgeräten für eher verletzungsgefährdete Körperübungen und/oder geringem Supervisionsgrad sowie ein freies Krafttraining für funktionell besonders relevante Körperregionen (bspw. untere Extremitäten) die Methode der Wahl [334,338,340].

Bewertung der Studienqualität und Transferierbarkeit der Ergebnisse

Die Generierung der vorliegenden Evidenz erfolgte via Subanalyse einer systematischen Literaturrecherche und Meta-Analyse im Spannungsfeld des DRT. Die Anzahl der eingeschlossenen Studien lag in einigen Subgruppen insbesondere für die TH-KMD aber niedrig. Die quantitative Qualitätsbewertung der Arbeit mittels R-Amstar [32] ergab 36 von 44 Punkten (Tab. 61). Allerdings betrifft diese Punktzahl die Gesamtanalyse für DRT-Effekte, nicht die Subanalyse der Trainingsmittel. Angesichts der Teilnehmer- und Studiencharakteristika schätzen wir die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die Zielgruppen der Leitlinie als hoch ein.

Formulierung der Empfehlung

15	Empfehlung 15	Neu, Stand 2024
Empfehlungsgrad A	Grundsätzlich soll dynamisches Krafttraining, unabhängig von den zur Verfügung stehenden Trainingsmitteln, appliziert werden.	
Evidenzgrad 1a	[22]	
	Konsensstärke: 100%	

Die Generierung der Evidenz für die Empfehlung 16 basiert auf Expertenrating der LL-Lenkungsgruppe. Insbesondere bei einem Training mit hoher Reizhöhe und Reizrate (s.u.) ist ein Training mit freien Gewichten aufgrund seines freien, nicht bewegungsgeführten Bewegungsumfangs mit einem größeren Verletzungsrisiko verbunden als das geführte Training an Kraftgeräten [129,333].

Die Generierung der Evidenz für die Empfehlung 17, also eines idealerweise gemischten Trainings mit freien Gewichten und Kraftgeräten nach ausreichender Konditionierungsphase, basieren auf systematischen Übersichtsarbeiten und Meta-Analysen [338,340], Positionspapieren [334] und Expertenmeinungen [333], von denen allerdings keine direkt auf die KMD fokussiert.

16	Empfehlung 16	Neu, Stand 2024
Empfehlungsgrad B	Einsteiger und Personen mit schweren orthopädischen Limitationen sollten nach Möglichkeit ein dynamisches Krafttraining an geführten Kraftgeräten durchführen ³² .	
Evidenzgrad 4	[129,333]	
	Konsensstärke: 100%	
17	Empfehlung 17	Neu, Stand 2024
Empfehlungsgrad B	In fortgeschrittenem Trainingszustand sollte ein DRT verstärkt mit freien Gewichten angeboten werden, um möglichst über alltagsrelevante Körperübungen die Funktionalität zu verbessern.	
Evidenzgrad 1b	[333,334,338,340]	
	Konsensstärke: 100%	

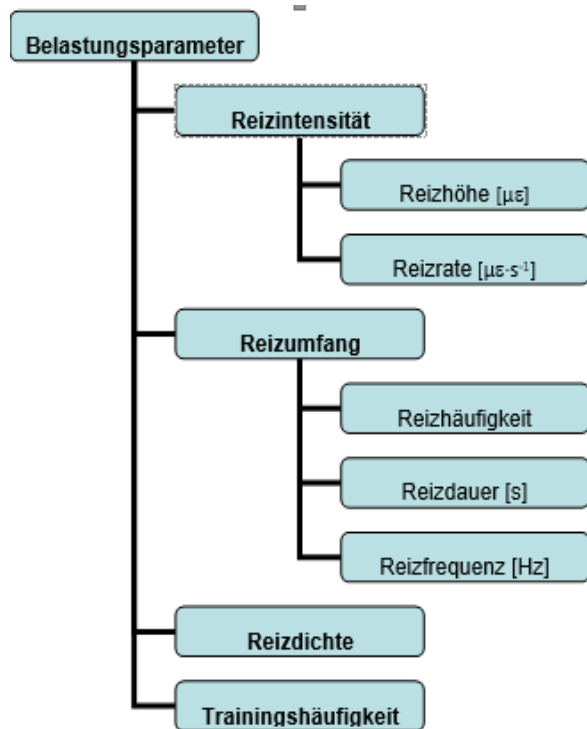
³² aufgrund der Möglichkeit, eine hohe Reizhöhe und -rate (siehe unten) sicher applizieren zu können, präziser Intensitätsvorgabe, einfacher Realisierung progressiver Belastungserhöhung und einem einfachen Monitoring.

4.3. Empfehlungen zur Belastungskomposition

Einführung

Die Trainingsinhalte werden durch die Belastungskomponenten oder -normativa (oder -parameter) spezifiziert und erhalten so erst ihre Ausprägung und Ausrichtung auf die gewählten Trainingsziele [3,72]. Nach der Frage „Welche Trainingsinhalte sind innerhalb der Frakturprophylaxe sinnvoll?“ lautet hier die Frage „Wie ist das Training durchzuführen bzw. die Trainingsinhalte zu manipulieren, um das Trainingsziel möglichst optimal zu realisieren?“ In den klassischen Trainingswissenschaften unterscheidet man vereinfacht die Belastungskomponenten „Reizhöhe oder -intensität“ (Stärke des Einzelreizes), „Reizdauer“ (Dauer des Einzelreizes), „Reizhäufigkeit“ (Anzahl der Einzelreize), „Reizdichte“ (zeitliches Verhältnis zwischen Belastungs- und Erholungssequenzen) und die „Trainingshäufigkeit“ (Anzahl der Trainingseinheiten (TE) pro Tag/Woche).

Diese Trainingsgrößen beeinflussen sich gegenseitig erheblich. Außerdem kommen im Spannungsfeld der mechanischen Belastung des Knochens weitere Belastungskomponenten hinzu. Abb. 14 stellt diese Kategorisierung der Belastungskomponenten für ein körperliches



Training der Knochenfestigkeit dar. Ziel dieses Abschnittes ist eine möglichst evidenzbasierte Ableitung von Trainingsempfehlungen basierend auf humanen Interventionsstudien und tierexperimenteller Grundlagenforschung. Letzteres erforderte bisweilen eine Abstraktion komplexer Sachverhalte aufgrund der Notwendigkeit der Transferierung mechanischer Belastungsgrößen und Begriffe in eine trainingswissenschaftliche Terminologie und Vorgehensweise [73].

Abb. 14: Kategorisierung der Belastungskomponenten in Anlehnung an die Trainingswissenschaften [341].

Wie angemerkt, übt die enge Interaktion der Trainingskomponenten ein hohes Störpotential auf die isolierte Betrachtung einer einzelnen Trainingskomponente aus und erschwert somit die Ableitung von validen Trainingsempfehlungen [342,343]. Insbesondere die Trainingshäufigkeit und die Reizhöhe als zentrale Komponenten eines körperlichen Trainings, stehen dabei in einem engen Wirkverhältnis. Aufgrund dieser Abhängigkeiten sowie unterschiedlichen Teilnehmerkollektiven erscheint die Durchführung übergreifender Meta-Analysen mit Einschluss von Untersuchungen mit den unterschiedlichsten Trainingsprotokollen und Kollektiven nur eingeschränkt geeignet, Trainingsempfehlungen abzuleiten. Möglicherweise besser geeignet sind meta-analytische Ansätze mit vergleichenden Studien mit zwei Studienarmen, deren Trainingsprotokolle sich lediglich für die fokussierte Trainingsgröße unterscheiden, ansonsten aber dieselben Trainingskomponenten und Teilnehmerkollektive beinhalten.

4.3.1. Stellenwert der Reizhöhe („strain magnitude“) innerhalb eines körperlichen Trainings der Knochenfestigkeit

Einführung

Die Reizhöhe³³ wird als Schlüsselaspekt eines körperlichen Trainings zur Verbesserung der Knochenfestigkeit angesehen [8,214]. Während in der frühen tierexperimentellen Grundlagenforschung [57,195,253] ein entscheidender Effekt der Reizhöhe (hier: strain magnitude) auf die Knochenparameter festgestellt wurde, deuten neuere Forschungen zur molekularen Reaktion auf körperliches Training (Übersicht in [344,345]) nur eine limitierte Evidenz für den relevanten Effekt der Reizhöhe an [346,347].

Methodik

Eine im Rahmen der Leitlinienerstellung durchgeführte, systematische Übersichtsarbeit und Meta-Analyse, die den Stellenwert der Reizhöhe für die Veränderung der KMD adressierte [25], schloss Studien mit den folgenden Kriterien ein: (1) randomisierte und nicht-randomisierte kontrollierte Studien mit mindestens zwei Trainingsgruppen mit unterschiedlicher Reizhöhe, (2) ≥ 6 Monate Interventionsdauer, (3) KMD an LWS und/oder proximalen Femurregionen bestimmt durch (4) DXA oder DPA. (5) Studien mit Teilnehmern unter Hormonersatztherapie (HRT) wurden dann berücksichtigt, wenn die Anzahl dieser Probanden zwischen den Übungsgruppen vergleichbar war. Ausgeschlossen wurden Studien mit Personen, (1) die sich einer Chemo- und/oder Strahlentherapie unterzogen, (2) mit Erkrankungen mit relevantem Einfluss auf den Knochenstoffwechsel sowie (3) Studien mit Schwerpunkt auf der synergistischen/additiven Wirkung von Bewegung und pharmakologischer Therapie. (4) Doppel-/Mehrfachveröffentlichungen, vorläufige Ergebnisse aus später veröffentlichten Studien und Übersichtsartikel, Fallberichte, Leitartikel, Konferenzzusammenfassungen, Briefe, unveröffentlichte Berichte oder Artikel, für die nur Zusammenfassungen verfügbar waren, wurden nicht berücksichtigt. Die Literaturrecherche umfasste fünf elektronische Datenbanken (PubMed/Medline, Scopus, Web of Science, Science Direct, Cochrane) ohne sprachliche Einschränkungen für Artikel, die bis zum 21. April 2021 veröffentlicht wurden. Die Studie wurde unter PROSPERO CRD42021246415 registriert. Abb. 15 zeigt das Flussdiagramm der Literaturrecherche.

Die statistische Analyse wurde analog zu den bereits oben beschriebenen Ansätzen und Prozeduren durchgeführt. Die hier relevante Analyse der Trainingsarme mit unterschiedlicher Trainingshäufigkeit wurde als random-effects Meta-Analyse mit Subgruppenanalyse der potentiellen Modulatoren (a) Interventionsdauer (≤ 7 vs. > 7 Monate) und (b) Trainingsinhalt (WBE vs. DRT) analysiert. Zwei Gutachter kategorisierten die Daten unabhängig voneinander, bei Unstimmigkeiten entschied ein dritter Gutachter. Wie beschrieben wurden nur Studien eingeschlossen, die eine TG mit hoher Reizhöhe einer Gruppe mit niedriger Reizhöhe gegenüberstellten.

³³ Nicht zu Verwechseln mit dem Ausbelastungsgrad.

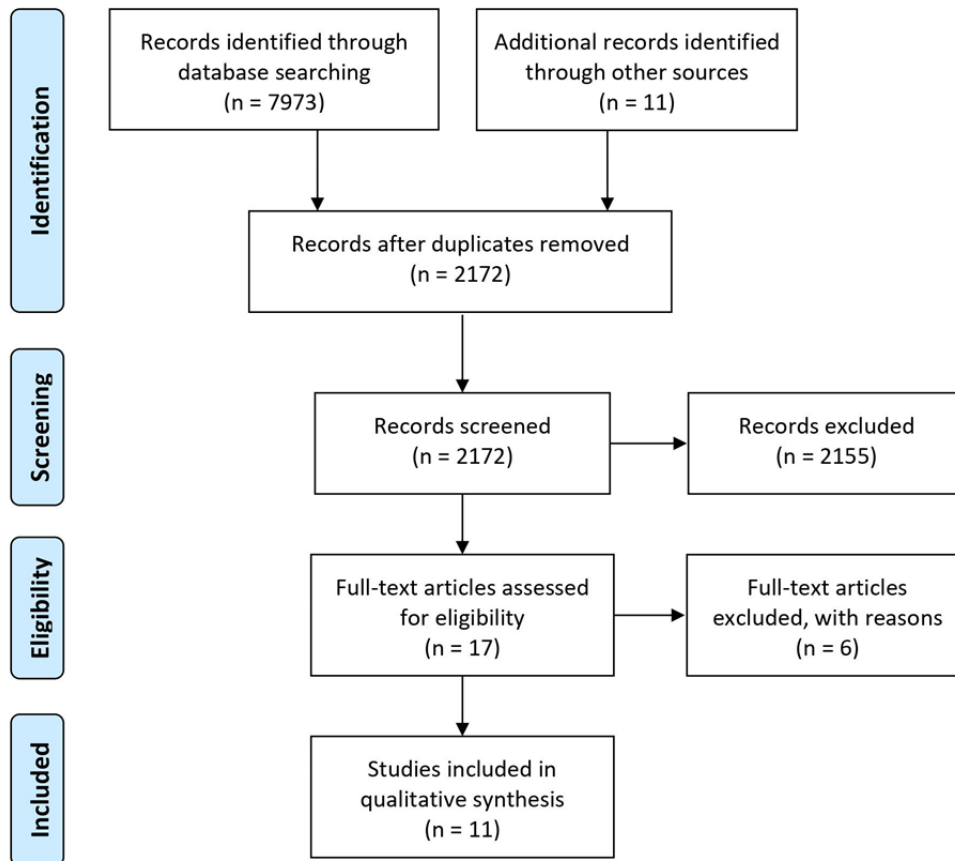


Abb. 15: Flussdiagramm des Suchprozesses „Einfluss der Reizhöhe auf die Knochendichte“ [31].

Ergebnisse

Insgesamt konnten 11 Trainingsstudien mit 26 (Trainings-)Studienarmen in die Analyse einbezogen [92,114,118,128,152,348-353] werden (Abb. 15). Von Bedeutung erscheint, dass in fünf Studien [114,348-350,353] bis zu 75% [348]) der Frauen eine Hormonersatztherapie (HRT) erhielten, wobei es keine relevanten Unterschiede zwischen den Subgruppen gab. Die Tabellen 36-38 zeigen basale Studien-/ Teilnehmercharakteristika, Trainingscharakteristika sowie die methodische Qualität der eingeschlossenen Untersuchungen.

KMD-LWS Abbildung 49 (oben) zeigt die Effektstärken hoher versus niedriger Reizhöhe auf die LWS-KMD. Abschließend ergab die zusammengefasste Schätzung der random-effects Analyse einen etwas günstigeren Effekt von hochintensivem Training auf die LWS-KMD (0,19, 95%-KI: 0,61 bis -0,23), der Unterschied zwischen den Gruppen war dabei nicht signifikant ($p=.373$). Wir beobachteten ebenfalls ein erhebliches Maß an Heterogenität zwischen den Studien ($I^2=71\%$) (Abb. 49 oben).

KMD-FN Die Ergebnisse hoher versus niedriger Reizhöhe auf die FN-KMD sind in Abbildung 49 (unten) dargestellt. Zusammenfassend zeigt die Schätzung der random-effects Analyse einen etwas günstigeren Effekt von hochintensiven Trainingsprotokollen im Vergleich zu der niedrigintensiven Methodenvariante (SMD: 0,17, 95%-KI: 0,38 bis -0,04). Allerdings ist auch hier der Unterschied nicht signifikant ($p=.109$). Im Gegensatz zur LWS-KMD war die Heterogenität der Studien innerhalb der Analyse für den Hüft-ROI vernachlässigbar ($I^2=0\%$).

Die Trichterdiagramme mit Trim and Fill-Analyse zeigten keine Hinweise auf einen Publikations-/small study Bias für die KMD an LWS oder FN. Auch der Regressions- und der

Rangkorrelationstest ergaben keine wesentlichen Hinweise auf eine Asymmetrie. Die Sensitivitätsanalyse zeigte keine relevant unterschiedlichen Effekte ($p > .60$) für die methodische Studienqualität [25].

Subgruppenanalysen des Modulators „Interventionsdauer“

KMD-LWS Abb. 50 (oben) zeigt den modulierenden Effekt der Interventionsdauer auf die Interaktion zwischen Reizhöhe und Knochendichte an der LWS. Obwohl der Effekt einer höheren Reizhöhe auf die LWS-KMD in Studien >7 Monate deutlich höher war (SMD: 0,27, 95%-KI: 0,56 bis -0,02) als in Studien mit einer Dauer von 7 Monaten oder weniger (0,07, 0,83 bis -0,69), beobachteten wir keinen signifikanten Unterschied ($p=0.060$) (Abb. 6). Studien ≤ 7 Monate zeigten, im Gegensatz zu den längeren Studien ($I^2=2\%$), ein erhebliches Maß an Heterogenität ($I^2=81\%$) (Abb. 50 oben).

KMD-FN Abb. 50 (unten) zeigt den modulierenden Effekt der Interventionsdauer auf die Interaktion zwischen Reizhöhe und Knochendichte am FN. Überraschenderweise unterschieden sich die entsprechenden Ergebnisse für die FN-KMD diametral von den Ergebnissen der LWS-KMD. Obwohl der Unterschied wiederum nicht signifikant lag ($p=0.136$), lieferten Studien von kürzerer Dauer eine deutlich höhere Effektgröße (SMD: 0,27, 95%-KI: 0,61 bis -0,02) im Vergleich zu Trainingsstudien von 8 Monaten und länger (0,07, 0,83 bis -0,69). Die Analyse für Studien ≤ 7 Monate ergab eine mäßige ($I^2=45\%$), für Studien >7 Monate eine geringe Heterogenität ($I^2=0\%$) zwischen den Studien (Abb. 50 unten).

Subgruppenanalysen des Modulators „Trainingsinhalt“

Da lediglich eine Untersuchung den Effekt einer WBE-Intervention auf die FN-KMD erfasste, erfolgt lediglich eine Analyse für die Effekte an der LWS-KMD. Zusammenfassend scheint bei DRT die Rolle einer hohen Reizintensität etwas relevanter zu sein (SMD: 0,22, 95%-KI: -0,22 bis 0,66) als bei WBE (0,07, -1,24 bis 1,38) (Abb. 51). Die Unterschiede zwischen den Gruppen sind jedoch nicht signifikant. In beiden Subgruppen wurde ein erhebliches Maß an Heterogenität zwischen den Studienergebnissen festgestellt (DRT: $I^2=70\%$; WB: $I^2=78\%$).

Diskussion

Die vorgelegte Meta-Analyse liefert im Gegensatz zu übergreifenden Meta-Analysen [53,354] keine Evidenz für eine signifikante Überlegenheit hoher versus niedriger Reizhöhe für die LWS- oder FN-KMD. Souza et al. [52], die ebenfalls dezidiert die Auswirkungen einer hohen ($\geq 70\%$ 1RM) versus niedrigen Reizhöhe ($<70\%$) bei DRT erfassten (6 Studien), berichteten über "ähnliche Auswirkungen" eines DRT auf die KMD an LWS und FN und bestätigen somit unsere Ergebnisse. Neben DRT Studien schloss die vorliegende Untersuchung auch WBE-Studien mit ein, um durch die Einbeziehung anderer Trainingsinhalte mit Relevanz für die Knochen [8,214] zusätzliche Evidenz für die Fragestellung „Reizhöhe und KMD-Effekte“ zu generieren. Trotz der erhöhten statistischen Power zeigte sich kein statistischer Unterschied zwischen den Methodenvarianten, nicht zuletzt deswegen, da die Differenz zwischen den Subgruppen mit hoher versus niedriger Reizhöhe für die WBE-Trainingsarme zu vernachlässigen war. Im Gegensatz dazu, berichtet die methodisch etwas fragwürdige³⁴ Meta-Analyse von Kitagawa et

³⁴ Eine der eingeschlossenen Untersuchungen [119] vergleicht nicht die Effekte moderater versus intensiver Trainingsdurchführung, sondern etablierte aus Verblindungs-Gründen eine Kontrollgruppe mit niedrig-intensivem Trainingsprotokoll (sham-exercise), das sich ebenfalls durch eine signifikant geringere Trainingshäufigkeit verglichen mit dem Trainingsarm charakterisierte.

al. [355] ebenfalls nach Analyse vergleichender Untersuchungen (n=3) mit moderater vs. hoher Reizintensität (WBE und DRT) signifikante Effekte für die LWS- nicht jedoch die FN-KMD.

Fazit

Hohe Reizhöhen führen verglichen mit niedrigen Reizhöhen nicht zwangsläufig zu günstigeren Effekten auf die Knochendichte an LWS und FN. Eine Variation von Trainingsphasen mit hoher, moderater und niedriger Reizhöhe im Sinne eines periodisierten Trainingsprotokolls erscheint sinnvoll und effektiv [127,175,356], um die Sensitivität der Knochenstruktur zu erhalten [357] und Überlastung zu vermeiden. Bleibt man bei der Subanalyse für den modellierenden Effekt des Trainingsinhaltes, so fällt bei detaillierter Betrachtung der DRT-Studien ein wichtiger Aspekt auf: Im Gegensatz zu den Subgruppen mit hoher Reizhöhe wurde in den meisten Studienarmen mit niedriger Reizhöhe eine niedrige absolute Intensität ("effort") angewandt [92,152,348,351,353]. D.h. das Verhältnis von Reizhäufigkeit (Anzahl der Wiederholungen, Wdh.) und relativer Intensität (%1RM) ist nicht angemessen und, im Gegensatz zu der intensiven Methodenvarianz, weit entfernt von einem ausbelasteten Übungssatz (repetition maximum) oder gar einer Arbeit bis zum Punkte des momentanen Muskelversagens (PMF, [54]). Im Gegensatz zur trainings-induzierten Muskelhypertrophie [358] ist also eine hohe absolute Intensität im Sinne eines weitgehend ausbelasteten Übungssatzes ganz offensichtlich nicht der dominierende Auslöser für die Knochenanpassung — was eine wichtige Botschaft für den Trainingspraktiker ist. Ein weiterer erklärender Aspekt für den zu vernachlässigenden Effekt von WBE im Kontext der Reizhöhe sind Hinweise darauf, dass mechanische Belastungen, die leicht unterhalb der Schwelle der Knochenadaptation liegen, durch eine (deutlich) höhere Anzahl von Belastungszyklen kompensiert werden können ([258,359], Übersicht in [187]). Da während WBE wie Laufen, Walking oder Tanzen im Gegensatz zum DRT eine Reizhäufigkeit im hohen 3 bis 4-stelligen Bereich/TE auftritt, tritt die Relevanz der Reizhöhe hier möglicherweise in den Hintergrund. Auf diesen Aspekt wird unter der nachfolgenden Belastungskomponente „Reizhäufigkeit“ ausführlicher eingegangen.

Das lediglich ein überdauerndes Sporttreiben zu nachhaltigen Effekten führt, wird unter der Thematik „Trainingsprinzipien“ („Dauerhaftigkeit und Kontinuität“) adressiert. Die Interventionsdauer diene uns daher weniger dazu Trainingsempfehlungen auszusprechen, als vielmehr den Erklärungsbeitrag dieser Größe auf unser Ergebnis einzuschätzen. Dass Interventionsdauer und Reizhöhe in Verbindung stehen, hängt primär mit einer initial niedrigen Reizschwelle zusammen, die sich durch Anpassungserscheinungen stetig erhöht [72]. Niedrigintensive Trainingsreize, welche die ossäre Reizschwelle initial noch überschreiten, bleiben nach Ansteigen der Reizschwelle unerschwellig und führen somit zu keinen weiteren Anpassungserscheinungen. Insofern könnte erwartet werden, dass die Reizhöhe bei länger andauernden Interventionen eine größere Rolle spielt als bei Interventionsdauern ≤ 7 Monaten. Die erhobenen Daten weisen für die LWS-KMD tendenziell ($p=0.060$) in diese Richtung. Die diametral unterschiedlichen Daten für die FN-KMD (n.s.; höhere Effekte kurzer Interventionsdauern) vermögen wir nicht zu erklären. Als Erkenntnis aus diesem Ergebnis kann aber zusammengefasst werden, dass bereits im frühen Stadium einer Intervention, also mit vergleichsweise niedriger applizierter Reizhöhe, Effekte auf die KMD zu erwarten sind.

Aus pragmatischer Sicht ist ein Ergebnis, dass grundsätzlich auch eine niedrige Reizhöhe positive Effekte am Knochen [53] zeigen kann, aus vielerlei Sicht (Akzeptanz, Sicherheit, Anwendbarkeit) erwünscht. Trainingsmethodisch hat das Ergebnis allerdings eine eher untergeordnete Rolle, da die Trainingsprinzipien „Variation“ und „Zyklisierung/Periodisierung“ eine strukturierte Variation der Reizhöhe ohnehin nahelegen (siehe dort).

Trainingsmethodisch ist die Vorgabe der Reizintensität im Krafttraining (1) objektiv über die Angabe der Wiederholungszahl und die korrespondierende Last basierend auf %1RM (s.o.) oder (2) über den subjektiven Ausbelastungsgrad möglich. Beide Methoden haben ihre Vorzüge und Limitationen. Wesentliche Limitation des auf 1RM basierenden Verfahrens [360] oder prognostischer Formeln zur Lastvorgabe [361] mit muskulärer Ausbelastung bis zum „Punkt des momentanen Muskelversagens“ (PmM; [54,362]) ist der erhöhte Test- bzw. Berechnungsaufwand und primär die fehlende Anwendungsoption bei Übungen mit Eigengewicht, elastischen Bändern oder sonstigen nicht detailliert skalierbaren Übungsgeräten. Für gesundheitsorientiertes Krafttraining empfehlenswert und validiert [175] ist der „repetition in reserve“ (RIR)-Ansatz von Zourdos et al. [363], bei dem allerdings ein geschultes Belastungsempfinden und Erfahrung mit der Last/Belastungs-Wiederholungsanzahl vorliegen sollte. Grundlage dieses Ansatzes ist dabei die Vorgabe eines Zielbereichs der Wiederholungszahl (bspw. 8-10 Wdh.) und die Vorgabe eines „Satzendpunktes“ [54]. Satzendpunkte eines primär gesundheitsorientierten Trainings sind dabei das nicht-Wiederholungsmaximum (nRM: Trainingssatz wird beendet, obwohl weitere Wiederholungen möglich wären) und das Wiederholungsmaximum (RM: Satz wird mit der letztmöglich technisch korrekten Wiederholung beendet) [362]. Der RIR-Ansatz bezieht sich auf das nicht-Wiederholungsmaximum und gibt vor, wie viele Wiederholungen vor dem voraussichtlichen PmM der Satz beendet werden soll. Neben dem geringen Aufwand sind wesentliche Vorteile des Ansatzes die tagesaktuelle Umsetzbarkeit und die inhärente progressive Belastungssteigerung bei Anpassung. Auch aus verletzungsprophylaktischer Sicht sind nRM Ansätze zu präferieren [40,364].

Bewertung der Studienqualität und Transferierbarkeit der Ergebnisse

Die Generierung der vorliegenden Evidenz erfolgte via systematischer Literaturrecherche und Meta-Analyse (Evidenzgrad 1a gemäß AQRH). Die Anzahl der eingeschlossenen Studien lag mit 11 vergleichenden Untersuchungen in einem akzeptablen Bereich. Die quantitative Qualitätsbewertung der Arbeit mittels R-Amstar [32] ergab 38 von 44 Punkten (Tab. 61). Retrospektiv eher kritisch zu beurteilen ist der Einschluss unterschiedlicher Trainingsinhalte (WBE, DRT) in die Meta-Analyse, die den Effekt der Reizhöhe auf die KMD ebenso „verwässert“ wie die variierenden Belastungskomponenten der unterschiedlichen Studien. Die Transferierbarkeit der Ergebnisse auf die Gesamtheit postmenopausaler Frauen und Männer ≥45 Jahre halten wir aufgrund der eingeschlossenen Untersuchung aber für gegeben.

Formulierung der Empfehlungen

18	Empfehlung 18	Neu, Stand 2024
Empfehlungsgrad B	Dynamisches Krafttraining (DRT) und WBE-Training sollten mit variierender Reizhöhe durchgeführt werden, um Desensibilisierung und Überlastung der Knochenstruktur zu vermeiden.	
Evidenzgrad 1a	[25,52,53]	
	Konsensstärke: 100%	
19	Empfehlung 18	Neu, Stand 2024
Empfehlungsgrad A	DRT und WBE-Belastungen sollen nicht mit hohem Ausbelastungsgrad durchgeführt werden.	
Evidenzgrad 1a	[25,40]	
	Konsensstärke: 100%	

4.3.2. Stellenwert der Reizrate innerhalb eines körperlichen Trainings der Knochenfestigkeit.

Einführung

Auf der Basis tierexperimenteller Grundlagenforschung wird der „strain rate“, also der Verformungsrate des Knochens ein hoher Stellenwert zugewiesen [58,59,257,359,365,366]. Interessanterweise ist dabei die Entlastungsphase ebenso bedeutsam wie die Belastungsphase [256]. Dass bei high-Impact Belastungen im Vergleich zu low-Impact Belastungen die Reizrate (auch unter Berücksichtigung der erhöhten Reizhöhe) deutlich gesteigert ist, stellt den Schlüssel für die hohe Knochenwirksamkeit dieses Trainingsinhaltes dar. Meta-Analysen von Trainingsstudien mit Menschen berichten in Abhängigkeit von der Reizhöhe nach Impactbelastung (Übersicht in [367,368]) signifikant positive Effekte an der Hüft- nicht jedoch der LWS-ROI. Eine hohe Reizrate insbesondere bei der Landung nach Sprüngen [369] führt allerdings auch zu einer hohen Gelenksbelastung. Die Reizrate kann allerdings auch innerhalb eines Krafttrainings, das vergleichsweise besser dosier- und kontrollierbar ist, durch eine Erhöhung der Bewegungsgeschwindigkeit gesteigert werden. Leider konnte nur eine Untersuchung identifiziert werden, welche dezidiert (hohe vs. niedrige Reizrate) den Einfluss der Reizrate auf die Effekte eines dynamischen Krafttrainings auf die KMD an LWS und proximalem Femur validierte [352,370].

Methodik

Dreiundfünfzig früh-postmenopausale Frauen mit einer Osteopenie an LWS und/oder FN aus der Trainingsgruppe der EFOPS-Studie [125] wurden in die Studie aufgenommen und randomisiert einer Kraft- (KT) versus einer Schnellkraft (Power-)Trainingsgruppe (PT) zugewiesen. Keine der Probandinnen litt an einer Krankheit oder nahm Medikamente mit Einfluss auf den Knochenmetabolismus ein.

Es wurde eine Per-Protokoll Analyse durchgeführt, bei der Personen mit einer mittleren Trainingshäufigkeit von weniger als zwei TE/Wo./Jahr ausgeschlossen wurden (PT: n=4; ST: n=5), um Interaktionseffekte mit der Belastungskomponente „Trainingsfrequenz“ (s.u.) zu vermeiden. Zur Analyse der Interaktionseffekte wurde eine „repeated measure two way ANOVA“ (Zeit-Gruppe) durchgeführt [370].

Beide Gruppen absolvierten ein 24-monatiges Trainingsprogramm mit zwei supervidierten DRT-Einheiten/Woche an Geräten (60 min), einer supervidierten Gymnastikeinheit/Woche mit Freihanteltraining (60 min) und einer Heim-TE/Woche (25 min). Die supervidierte TE begann mit einem 20-minütigen Aufwärmen (Laufen, LI und HI-Aerobic bei 70-85% der maximalen Herzfrequenz), gefolgt von einer Sprungsequenz mit 4x 15 multidirektionalen Sprüngen. In der DRT-Sequenz an Geräten wurden bis zu 13 Übungen (horizontales Beinpressen, Beincurls, Bankdrücken, Rudern, Beinadduktion und -abduktion, Rumpfbeugung, Rückenstreckung, Latzug, Hyperextension, Beinstreckung, Schulterheben und Hüftbeugung), in der Gymnastik-TE konsistent 3 Freihantelübungen (einarmlige Rudern, Kreuzheben, Brustdrücken) überwiegend im Mehrsatzmodus durchgeführt. Das Training gliederte sich in zwölfwöchige Mesozyklen mit 4-Wochenabschnitten linear periodisierten DRT (70-90% 1- RM), die durch 4-5-wöchige Phasen mit niedrigerer Reizhöhe (50% 1 RM) unterbrochen waren. Der (einzige) Unterschied zwischen den Trainingsarmen war die Bewegungsgeschwindigkeit des DRT. Das Trainingsprotokoll der KT sah eine Bewegungsgeschwindigkeit je Wiederholung von 4s konzentrisch, 1s isometrisch und 4s exzentrisch vor, während die PT-Gruppe eine maximal explosive Bewegungsgeschwindigkeit in der

konzentrischen Bewegungsphase durchführte, sowie 1s isometrisch und 4s exzentrisch arbeitete. Faktisch bestand der Unterschied zwischen den beiden Methodenvarianten KT und PT somit lediglich in der Bewegungsgeschwindigkeit der konzentrischen Phase.

Ergebnisse

Nach 12 Monaten Intervention wurden signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen für die LWS- ($p=.023$) und Hüft-KMD ($p=.015$) zugunsten der PT-Gruppe erfasst (Abb. 16). Die langsam trainierende KT-Gruppe zeigte eine Reduktion der KMD im Bereich der nicht-trainierenden Kontrollgruppe [371]. Nach 24 Monaten Intervention verblieb die Differenz für die LWS signifikant, während sich für die KMD der Hüfte keine signifikanten Zwischengruppenunterschiede (mehr) nachweisen ließen. Keine wesentlichen Unterschiede zwischen den Gruppen wurden für die Maximalkraft ausgewählter Trainingsübungen oder Häufigkeit und Stärke von Schmerzen an Wirbelsäulenregionen oder großen Gelenken erfasst.

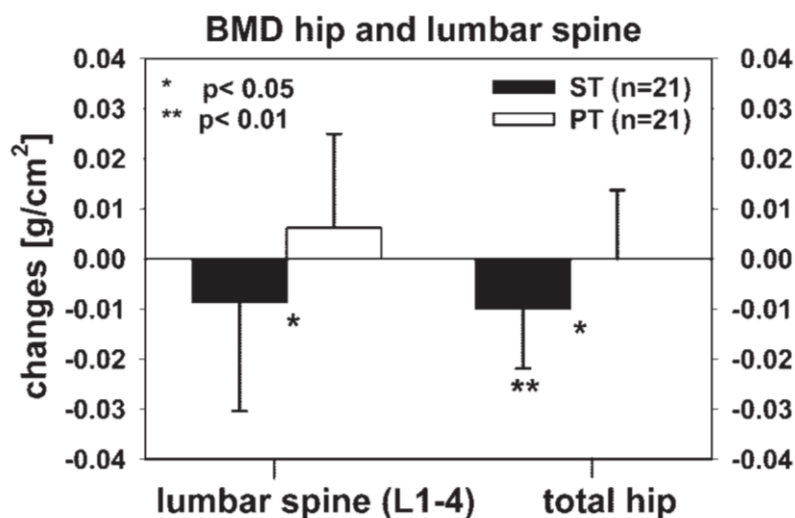


Abb. 16: Unterschiede für die KMD an LWS- (links) und Hüft-ROI nach 12-monatigem Krafttraining mit niedriger (ST) versus hoher Bewegungsgeschwindigkeit (PT)

Diskussion

Es zeigte sich eine signifikante Überlegenheit schneller versus langsamer Bewegungsgeschwindigkeit innerhalb der konzentrischen Phase bei ansonsten identischem DRT auf die Knochendichte an LWS und (eingeschränkt) Hüftregion. In der Trainingsphase vor der hier aufgeführten Intervention wurde mit denselben Trainingsparametern, aber konsistent mit einer Bewegungsgeschwindigkeit von TUT 2s-1s-2s gearbeitet, sodass beide Methodenvarianten eine Variation des bisherigen DRT bedeuteten. Biomechanische Messungen (Kraft-Zeit Kurven von 6 Wdh. mit 75% 1RM) innerhalb der Untersuchung ergaben, dass die PT-Variante verglichen mit der ST-Gruppe eine 16% höhere relative Reizhöhe, eine 82% höhere relative Reizamplitude und eine 262% höhere Reizrate zeigte. Alle Unterschiede waren dabei hochsignifikant ($p<.001$). Das Ergebnis ausbleibender unerwünschter Nebeneffekte einer DRT mit maximaler Bewegungsgeschwindigkeit in der konzentrischen Phase wird von mehreren Untersuchungen bestätigt (s.u.). Im Gegensatz zu den hohen Bodenreaktionskräften bei high-Impact WBE sind die hohen Reizhöhen (siehe oben) und Reizraten, die durch schnelle Bewegungsausführung im konzentrischen Bereich der Bewegung bei DRT generiert werden, für ältere Menschen oder Menschen mit

Gelenksproblematik generell gut durchführbar und gut verträglich [372-374]. Der positive Effekt höherer Bewegungsgeschwindigkeit setzte sich im zweiten Interventionsjahr allerdings nicht konsequent fort. Als Erklärungsansatz kommt primär ein Desensibilisierungseffekt aufgrund einer unveränderten Reizrate in Frage, sodass eine Variation dieser Belastungskomponente empfohlen wird [352,370]. Eine systematische Übersichtsarbeit³⁵ mit 12 Interventionsstudien (≥6 Monate) bestätigt den positiven Effekt eines Krafttrainings mit hoher Bewegungsgeschwindigkeit (HVRT) für die Knochendichte an LWS und Hüft-ROIs bei Menschen 50 Jahre und älter, allerdings im Vergleich zu (überwiegend) inaktiven Kontrollgruppen [375].

Bewertung der Studienqualität und Transferierbarkeit der Ergebnisse

Die Generierung der vorliegenden Evidenz basiert auf einer randomisierten kontrollierten Studie (Evidenzgrad nach AHRQ: 1b) im Parallelgruppendesign von moderater Qualität (PEDro 6), die allerdings die für diese Fragestellung hochrelevante Gruppe früh-postmenopausaler Frauen mit Osteopenie einschloss. Die Transferierbarkeit der vorliegenden Untersuchungen auf die Zielkohorte leistungsfähiger Menschen ohne Gelenksproblematik, aber leicht erhöhtem Frakturrisiko ist somit unmittelbar gesichert. Die Transferierbarkeit der Ergebnisse auf Menschen mit deutlicher herabgesetzter ossärer Reizschwelle erscheint zumindest bei Applikation eines geführten Krafttrainings an Geräten ebenfalls naheliegend.

Formulierung der Empfehlungen

20	Empfehlung 20	Neu, Stand 2024
Empfehlungsgrad A	Bei ausreichender individueller Belastbarkeit soll ein Training zur Verbesserung der Knochenfestigkeit Trainingsphasen mit hohen Reizraten beinhalten.	
Evidenzgrad 1b	[370]	
	Konsensstärke: 100%	
21	Empfehlung 21	Neu, Stand 2024
Empfehlungsgrad B	Kraft- und WBE-Training zur Verbesserung der Knochenfestigkeit sollte mit variierender Reizrate appliziert werden, um Desensibilisierung und Überlastung zu vermeiden.	
Evidenzgrad 1b	[352,370]	
	Konsensstärke: 100%	

4.3.3. Stellenwert der Reizhäufigkeit innerhalb eines körperlichen Trainings der Knochenfestigkeit.

Einführung und Diskussion

Grundsätzlich hängt die Reizhäufigkeit, also die Anzahl der Einzelreize, sehr eng mit der Reizhöhe zusammen. Insbesondere im DRT besteht ein sehr enges Gefüge zwischen beiden Größen, besonders wenn ein Trainingsreiz im Bereich der Ausbelastung bei Satzende (RM, WMF [54]) angestrebt wird. Wie bereits oben angemerkt (Reizhöhe) ist der Aspekt der Ausbelastung bei einem Training der Knochenfestigkeit im Gegensatz zu einem muskulären Hypertrophietraining [376-378] weniger relevant. Tatsächlich sind die Größen, die den Abbruch der Belastung bei willkürlicher Aktivierung bedingen, Art und Umfang der Energiebereit-

³⁵ Aufgrund der hohen Heterogenität der Studien wurde keine Meta-analyse durchgeführt.

stellung, ein Aspekt, der muskuläre, nicht aber ossäre Strukturen betrifft. Insbesondere im Bereich der WBE bzw. axialer Belastung weisen tierexperimentelle Studien darauf hin, dass eine höhere Anzahl von Wiederholungen eine per se unterschwellige Reizhöhe möglicherweise kompensieren kann. Tab. 8 zeigt eine Übersicht tierexperimenteller Untersuchungen mit unterschiedlichen Belastungsprotokollen mit vergleichbar positiven Effekten auf Knochenparameter [187].

Tab. 8: Zusammenstellung wirksamer Reizkompositionen mit vergleichbaren positiven Effekten auf die Knochenfestigkeit bei sonstiger Inaktivität: Tierexperimentelle Daten.

Autor	Region (Spezies)	Belastungsmodell	Reizhöhe ($\mu\epsilon$)	Reizhäufigkeit (n)	Reizfrequenz (Hz)
Rubin et al. [191]	Ulna (Küken)	axiale Kompression	2000	4	0,5
Rubin et al. [57]	Ulna (Truthahn)	axiale Kompression	1000	100	1
Cullen et al. [258]	Ulna (Ratte)	4-Punkt-Biegung	1000	40	2
Cullen et al. [258]	Ulna (Ratte)	4-point-bending	800	120	2
McLeod et al. [260]	Ulna (Truthahn)	axiale Kompression	700	600	1
Hsieh et al. [262]	Ulna (Ratte)	axiale Kompression	580	360	10
McLeod et al. [260]	Ulna (Truthahn)	axiale Kompression	400	18.000	30
McLeod et al. [260]	Ulna (Truthahn)	axiale Kompression	270	36.000	60
Qin et al. [379]	Ulna (turkey)	axiale Kompression	70	108.000	30
Rubin et al. [380]	Schafe	axiale Kompression	5	60.000	90

Tabelle 8 (oberer Teil) zeigt die Interaktion zwischen Reizhäufigkeit und Reizhöhe bei willkürlich durchführbarer Reizfrequenz (≤ 5 Hz). Eine hohe mechanische Verformungs- bzw. Reizhöhe ($2000 \mu\epsilon$)³⁶ mit 4 Wiederholungen appliziert, führt bei sonstiger Inaktivität zum Knochenerhalt, eine Reizhäufigkeit von 36 Wdh. zur Erhöhung der Knochenmasse (BMC) [191]. Eine weitere Erhöhung der Reizhäufigkeit auf 360 oder 1800 Wdh. ergab vergleichbare Ergebnisse wie bei 36 Wdh. Ähnliche Daten liefern Umemura et al. [259]. Möglicherweise verschleierte jedoch die vergleichsweise große Reizhöhe von $2000 \mu\epsilon$ den modifizierenden Effekt der Reizhäufigkeit. So zeigten Cullen et al. [258], dass eine Reizhäufigkeit von 40 Wdh. bei $800 \mu\epsilon$ und 2 Hz keinen bzw. bei $1000 \mu\epsilon$ lediglich einen moderaten Einfluss auf Formationsparameter hatte, während eine Häufigkeit von 120 und 400 Wdh. mit $800 \mu\epsilon$ deutliche und bei $1000 \mu\epsilon$ signifikant positive Einflüsse auf Formationsparameter ausübte.

³⁶ die mechanische Reizschwelle über mechanische in vivo Belastungstests wird bei Vertebraten bei ca. $1000 \mu\epsilon$ angesetzt. $1000 \mu\epsilon$ sind definiert als eine Längenänderung von 0.1%. „Gehen“ wird je nach Geschwindigkeit mit einer Peak-Belastung von 600-1200 $\mu\epsilon$) [381] belegt, beim Laufen mit hoher Geschwindigkeit treten Reizhöhen von bis zu $2000 \mu\epsilon$ auf [382].

Zusammenfassend sind beide Autoren [191,258] der Meinung, dass die Reizhäufigkeit bei niedriger bzw. grenzwertiger Reizhöhe von 800-1100 $\mu\Sigma$ vergleichsweise hoch (400 Wdh.) liegen muss, um knochenanabole Prozesse auszulösen. Auch McDonald et al. [383] belegen den Einfluss der Reizhäufigkeit auf die Knochenformationsrate, indem sie nach artifizierter Biegung der Kaninchenulna (2.5 N. $\approx$ ca. 150-200 μ E, 45 min/d, 28 Tage) bei 4 Wdh./min keinen wesentlichen Effekt (0,6%) bei 40 Wdh/min jedoch einen deutlichen Effekt (4.2%) auf das CSA der Midtibia bei erwachsenen Tieren³⁷ (n=4) erfassen.

Humane Untersuchungen, die den Effekt der Wiederholungshäufigkeit auf die Knochendichte dezidiert untersuchen, liegen leider nicht vor. Zwei Trainingsstudien [90,369] bestätigen allerdings die tierexperimentell erhobenen Daten, dass bei relativer hoher Reizintensität nur eine geringe Reizhäufigkeit nötig ist, die Knochendichte zu verbessern. Kato et al. [369], die bei jungen Frauen (21 $\pm$ 1 Jahre) ein Trainingsprotokoll von 10 Schlussprüngen mit maximaler Intensität barfuß auf hartem Untergrund 3x Woche durchführten (GRF-Absprung: 2.4 faches, GRF-Landung: 4.8 faches Körpergewicht) (n=18), berichten nach Intervention von signifikanten Effekten auf die Knochendichte an LWS und FN im Vergleich zu einer nicht-trainierenden KG (n=18). Bassey et al. [90], die in einer Trainingseinheit lediglich 5 Sätze mit 10 Schlussprüngen (GRF: 3-faches Körpergewicht) durchführten, konnten nach 5-monatigem Interventionszeitraum einen signifikanten Effekt auf die FN-KMD (nicht aber die LWS-KMD) für ein prämenopausales (36 $\pm$ 7 Jahre), nicht jedoch für ein (früh-)postmenopausales Kollektiv nachweisen³⁸. Allerdings betrug die Trainingsfrequenz 6 TE/Woche, sodass auch dieser Aspekt einen Erklärungsbeitrag zu dem positiven Ergebnis der prämenopausalen Frauengruppe liefern kann.

Fazit

Bei Möglichkeit der Applikation hoher Reizintensität spielt die Anzahl der Einzelreize keine wesentliche Rolle für die Knochenanpassung. Insbesondere bei einem Training an Kraftgeräten können leistungsschwache Menschen oder Menschen mit orthopädischen Limitationen ein zeiteffektives und sicheres Training mit hoher Reizintensität und geringer Reizhäufigkeit (ohne muskuläre Ausbelastung) durchführen [372]. Belastungen mit Reizhöhen im Bereich der Adaptationsschwelle des Knochens können möglicherweise durch eine höhere Anzahl von Wiederholungen positive Effekte am Knochen auslösen. Diese Trainingsstrategie sollte insbesondere bei einem Körpertraining mit intensiven WBE/hoher Impactbelastung erwogen werden.

Bewertung der Studienqualität und Transferierbarkeit der Ergebnisse

Die Generierung der vorliegenden Evidenz basiert überwiegend auf tierexperimentellen RCTs im Parallelgruppensdesign sowie (bedingt) auf zwei RCTs (s.o.) mit prä- und (früh-)postmenopausalen Frauen (Evidenzgrad gemäß AHRQ: 1b) sowie auf einer Ableitung von Daten zur Reizhöhe. Die Transferierbarkeit der vorliegenden Untersuchungen auf die Zielkohorte postmenopausaler Frauen und Männer 45 Jahre+ ist somit leicht eingeschränkt. Da der Zusammenhang zwischen Reizhäufigkeit und Reizintensität aber biologisch-physiologischen Gesetzmäßigkeiten folgt, erscheint die grundsätzliche Evidenz der oben aufgeführten Ergebnisse für die von der Leitlinie adressierten Gruppen weitgehend transferierbar.

³⁷ Heranwachsende Tiere: 1.3% vs. 6.3%.

³⁸ Der Aspekt, dass prämenopausale verglichen mit postmenopausalen Frauen bereits bei geringerer Reizhöhe positive Effekte auf die KMD an LWS und FN zeigen, wird von verschiedenen anderen Untersuchungen bestätigt [90,158,384].

Formulierung der Empfehlungen

22	Empfehlung 22	Neu, Stand 2024
Empfehlungsgrad B	Bei Menschen ohne Limitationen/Beschwerden sollte ein Training mit geringer Reizhäufigkeit/Wiederholungszahl mit hoher Reizhöhe und/oder Reizrate durchgeführt werden.	
Evidenzgrad 1b	[90,191,258,369]	
	Konsensstärke: 100%	
23	Empfehlung 23	Neu, Stand 2024
Empfehlungsgrad B	Bei Personen mit orthopädischen Limitationen/geringer körperlicher Leistungsfähigkeit sollte ein Training mit höherer Wiederholungszahl und geringerer Reizhöhe und/oder Reizrate durchgeführt werden.	
Evidenzgrad 1b	[25,52,187]	
	Konsensstärke: 100%	

4.3.4. Stellenwert der Reizfrequenz innerhalb eines (konventionellen) körperlichen Trainings der Knochenfestigkeit.

Einführung und Diskussion

Die Reizfrequenz stellt die Anzahl der Reize bzw. Wiederholungen pro Zeit dar und wird physikalisch in Hertz (Hz) angegeben. Im Bereich der willkürlichen Muskelaktivierung (<5 Hz) eines körperlichen Trainings existieren nur wenige Untersuchungen, welche die Effekte der Reizfrequenz auf Parameter der Knochenfestigkeit erfassen. Beispielhaft untersuchten Turner et al. [385] den selektiven Einfluss von Reizfrequenzen zwischen 0,1 und 2,0 Hz, also einer willkürlich zu generierenden Frequenz, auf die Knochenformationsrate der Rattenulna. Zusammenfassend führten nur Frequenzen >0,5 Hz zu einer signifikant erhöhten Knochenformationsrate, die sich mit steigender Reizfrequenz (bis 2 Hz) nochmals erhöhen ließ. Eine mäßige willkürliche Erhöhung der Reizfrequenz lässt sich beim konventionellen Training durch eine Steigerung der Schritt- oder Sprungfrequenz bzw. schnellkräftigen Bewegungsausführung realisieren. Wie bei der oben beschriebenen Interaktion kann eine höhere Reizfrequenz somit eine niedrige Reizhöhe möglicherweise kompensieren (Tab. 8) [262]). Die spezifische Sensibilität des Knochens bezüglich hoher Frequenzen macht sich im Übrigen auch das Vibrationstraining zunutze, welches bereits oben dargestellt wurde.

Fazit

Hohe Reizfrequenz zeigt verglichen mit niedriger Reizfrequenz günstigere Effekte auf Knochenparameter. Insofern sollten Trainingsinhalte, wenn möglich, mit hoher Reizfrequenz durchgeführt werden. Insgesamt ist der Stellenwert der Reizfrequenz im Bereich der willkürlichen Muskelaktivierung zumindest bei der Möglichkeit der sicheren Applikation potenterer Belastungskomponenten wie Reizhöhe und –rate aber niedrig.

Bewertung der Studienqualität und Transferierbarkeit der Ergebnisse

Die Generierung der vorliegenden Evidenz basiert lediglich auf einer tierexperimentellen Studie. Da der Zusammenhang zwischen Reizfrequenz und Reizintensität biologisch-physiologischen Gesetzmäßigkeiten folgt, erscheint die grundsätzliche Evidenz des Ergebnisses auf humane Kollektive grundsätzlich transferierbar. Bedingt durch die geringe trainingspraktische Relevanz dieser Belastungskomponente innerhalb eines konventionellen körperlichen Trainings möchten wir aber von einer dedizierten Empfehlung absehen.

4.3.5. Stellenwert der Reizdauer innerhalb eines körperlichen Trainings der Knochenfestigkeit.

Einführung und Diskussion

Die Relevanz der Reizdauer, also der Dauer eines Einzelreizes, wird nur von sehr wenigen Untersuchungen und ausschließlich im tierexperimentellen Setting adressiert. Turner [195] fasste bereits 1998 zusammen, dass nur eine kurze Dauer der mechanischen Belastung erforderlich ist, um eine adaptive ossäre Reaktion auszulösen. Eine Verlängerung der Reizdauer hat eine (zunehmend) abnehmende Wirkung auf die weitere Knochenanpassung. Für die Gestaltung von Trainingsprotokollen ebenfalls relevant ist dabei, dass "statische" Belastungsprotokolle möglicherweise unwirksam sind, positive Veränderungen von Parametern der Knochenfestigkeit zu bewirken (Übersicht in [195,386]). Einige tierexperimentelle Untersuchungen zeigen indes positive Auswirkungen auf die Knochenanpassung durch statische Belastungsprotokolle (z. B. [383,387,388]). Obwohl auch in der Studie von McDonald et al. [383] kurze, intermittierende Belastungsreize günstigere Effekte zeigten, führte auch die statische Methodenvariante zu einem signifikanten Anstieg des Tibia-CSA. Die Autoren führten dieses Ergebnis auf die kürzere Reizdauer (45 min (!)) im Vergleich zu den meisten anderen Studien mit statischen Belastungsprotokollen zurück. Andererseits beobachteten Robling et al. [389], dass 10 min/Tag statische Belastung im Gegensatz zu dynamischer Belastung eine hemmende Wirkung auf die periostale Knochenformationsrate (Bone Formation Rate: BFR) der Rattenulna hat. Selbst eine kürzere statische Belastung (18s) im Bereich isometrischer Übungsprotokolle beim Menschen, die mit einer hohen Reizintensität angewendet wurden, führte tierexperimentell nicht zu relevanten Veränderungen der BFR [58]. Übertragen auf die klinische Praxis beim Menschen deuten diese Ergebnisse zusammenfassend darauf hin, dass Trainingsprotokolle zur Verbesserung der Knochenfestigkeit besser dynamische als statische Inhalte applizieren sollen [195].

Fazit

Zur Auslösung von knochenanabolen Effekten sollen kurze Reizdauern (mit hoher Reizhöhe oder -rate) appliziert werden. Es sollen überwiegend dynamische (anstatt statische) Belastungsprotokolle zur Anwendung kommen.

Bewertung der Studienqualität und Transferierbarkeit der Ergebnisse

Die Generierung der vorliegenden Evidenz basiert auf mehreren grundlegenden tierexperimentellen Studienprojekten mit weitgehend konsistentem Ergebnis. Eine direkte Übertragbarkeit auf die Zielkohorte postmenopausaler Frauen und Männer 45 Jahre+ ist somit nur sehr eingeschränkt möglich. Aufgrund spezieübergreifender mechanisch-physiologischer Gesetzmäßigkeiten dürfen aber vergleichbare Mechanismen für humane Kollektive erwartet werden. Die Fragestellung ist aus trainingswissenschaftlicher Sicht hochrelevant, negative Auswirkungen der Bevorzugung dynamischer versus statischer oder kurzer versus langer Reizdauern sind nicht zu erwarten, sodass trotz limitierter Evidenz aufgrund fehlender humaner Studien die unten aufgeführte Empfehlung abgeleitet wird.

Formulierung der Empfehlung

24	Empfehlung 24	Neu, Stand 2024
Empfehlungsgrad B	Ein Training zur Verbesserung der Knochenfestigkeit sollte im dynamischen Modus und/oder (bei isometrischer Ausführung) mit kurzer Reizdauer durchgeführt werden.	
Evidenzgrad 2	[58,195,386]	
	Konsensstärke: 100%	

4.3.6. Stellenwert der Reizdichte innerhalb eines körperlichen Trainings der Knochenfestigkeit.

Einführung und Diskussion

Die Reizdichte charakterisiert das Verhältnis zwischen Belastung und Erholung. Dies bezieht sich auf den Zeitraum zwischen Wiederholungen oder Sätzen, Trainingseinheiten oder, im langfristigen Trainingsprozess, Trainingsphasen/-perioden. In Bezug auf die Knochenfestigkeit hängt die Relevanz dieses Parameters stark mit den "Desensibilisierungsphänomenen" des Knochengewebes nach (häufig) wiederholter Belastung zusammen [357]. Für die Gestaltung von Trainingsprotokollen ist es von Bedeutung, dass die Desensibilisierung des Knochens über verschiedene Zeiträume (Sekunden, Stunden, Tage, Wochen) betrachtet wird [357]. Im kurzfristigen Verlauf wird angenommen, dass die Sensibilisierung des Knochens gegenüber mechanischer Belastung bereits nach mehreren Belastungszyklen (Wiederholungen) nachlässt, zumindest bei hoher Reizhöhe oder -rate [191,259]. Folglich verbessern kurze Ruhephasen zwischen einzelnen Belastungszyklen die osteoanabole Reaktion [390-394]. In Bezug auf die Dauer der Ruhephase beobachteten Robling et al. [391], welche die Wirkung von 0,5, 3,5, 7 und 14 Sekunden Pause zwischen den Einzelreizen verglichen, tierexperimentell einen signifikant höheren Anstieg der relativen Knochenformationsrate für den 14-Sekunden-Ansatz im Vergleich zu den anderen Protokollen³⁹. Montgomery et al. [143] verfolgten diesen Ansatz in ihrem Kollektiv früh-postmenopausaler Frauen. Nach 12-monatiger Trainingsintervention zeigte intermittierende Sprungbelastung mit 30 Wdh. und 10 s Pause zwischen den Wdh. aber ähnliche Effekte auf die KMD an LWS und FN wie eine durchgehende Sprungbelastung ohne intermittierende Pause (30 Sprünge in 2 min). Im Gegensatz dazu führte (tierexperimentell) die Gliederung einer durchgehenden Trainingseinheit mit 360 Belastungszyklen (bzw. Wdh.) in kürzere Belastungszyklen (4x 90 Zyklen) mit intermittierenden, relativ langen Ruhephasen, zu einer günstigeren osteoanabolen Reaktion [391,395,396]. Robling et al. [391] deuten mit dieser Studie an, dass die Sensibilität des Knochens nach einer 8-stündigen Pause zwischen den Trainingseinheiten vollständig wiederhergestellt zu sein scheint. Aus sportwissenschaftlicher und trainingspraktischer Sicht ist jedoch der Langzeitaspekt der Knochen(re)sensibilisierung ein wichtiges Thema. Saxon et al. [397], die drei 15-wöchige Protokolle mit und ohne intermittierende Ruhephasen verglichen, zeigten (tierexperimentell) die deutlichsten Effekte auf Parameter der Knochenstärke für das Protokoll mit intermittierender (5-wöchiger) Ruhephase. Dieses Ergebnis kann als Rationale für periodisierte bzw. blockperiodisierte Trainingsprotokolle [119,127,356] im Spannungsfeld der Frakturprophylaxe angesehen werden, bei denen die Resensibilisierungsphase des Knochens als Vehikel für relevante extra-ossäre Trainingsziele (bspw. Sturzprophylaxe, Sturzschole etc.) genutzt werden kann (siehe Trainingsprinzipien). Daneben kann durch die entsprechende Abwechslung innerhalb des Trainingsprogramms die Motivation der Probanden und damit die Adhärenz erhöht werden. Trainingsfreie Zeiträume aufgrund von Feiertagen und Ferien sollten in die entsprechende Planung der Belastungs- und Ruhephasen eingehen.

Bewertung der Studienqualität und Transferierbarkeit der Ergebnisse

Die Generierung der vorliegenden Evidenz basiert auf grundlegenden tierexperimentellen Studienprojekten und empirischen Erkenntnissen des Hochleistungssports. Eine direkte Übertragbarkeit auf die Zielkohorte postmenopausaler Frauen und Männer 45 Jahre+ ist somit nur eingeschränkt möglich. Aufgrund Spezies- und Kohorten-übergreifender mechanisch-

³⁹ Dieser Aspekt kollidiert mit tierexperimentellen Ergebnissen für die Reizfrequenz.

physiologischer Gesetzmäßigkeiten dürfen aber vergleichbare Effekte für humane Kollektive erwartet werden. Die Fragestellung ist aus trainingswissenschaftlicher Sicht hochrelevant, sodass trotz limitierter Evidenz aufgrund fehlender humaner Studien die unten aufgeführte Empfehlung abgeleitet wird.

Formulierung der Empfehlungen

25	Empfehlung 25	Neu, Stand 2024
Empfehlungsgrad B	Trainingsphasen mit hoher Reizhöhe/-rate sollten von regenerativen Trainingsphasen unterbrochen werden.	
Evidenzgrad 2	[119,127,356,357,397]	
	Konsensstärke: 100%	

4.3.7. Stellenwert der Trainingshäufigkeit innerhalb eines körperlichen Trainings der Knochenfestigkeit

Einführung

Neben Trainingsinhalt und Reizhöhe ist die Trainingshäufigkeit in mehrfacher Hinsicht ein Schlüsselaspekt erfolgreicher Trainingsprotokolle nicht-athletischer Kollektive [72]. Aus pragmatischer Sicht ist die Trainingshäufigkeit aufgrund des limitierten Enthusiasmus für häufiges Training [398-400] und der tendenziell geringeren Trainingsbeteiligung im fortgeschrittenen Alter [401] wohl eine der „kritischsten Komponenten“ bei der Entwicklung praktikabler und effektiver Trainingsprogramme.

Methodik

Eine im Rahmen der Leitlinienerstellung durchgeführte systematische Übersichtsarbeit und Meta-Analyse, die den Stellenwert der Trainingshäufigkeit für die Veränderung der KMD adressierte [24], schloss Studien mit den folgenden Kriterien ein: (1) randomisierte und nicht-randomisierte kontrollierte Studien mit mindestens zwei Trainingsgruppen mit unterschiedlicher Trainingshäufigkeit, (2) ≥ 6 Monate Interventionsdauer, (3) KMD an LWS oder den proximalen Femur ROIs FN und/oder TH, basal und nach Interventionsende, bestimmt durch (4) DXA oder DPA. Ausgeschlossen wurden Personen, (1) die sich einer Chemo- und/oder Strahlentherapie unterzogen und (2) mit Erkrankungen und Medikamenten die den Knochenstoffwechsel relevant beeinflussen. (3) Doppel-/Mehrfachveröffentlichungen, vorläufige Daten aus später veröffentlichten Studien und Übersichtsartikel, Fallberichte, Leitartikel, Konferenzzusammenfassungen, Briefe, unveröffentlichte Berichte oder Abstracts wurden nicht berücksichtigt. Die Literaturrecherche umfasste sieben elektronische Datenbanken (PubMed, Scopus, Web of Science, Cochrane, Science Direct, Eric, PEDro) ohne sprachliche Einschränkungen für Artikel, die bis zum 01 Juli 2021 veröffentlicht wurden. Die Studie wurde unter PROSPERO CRD4202124680 registriert. Abb. 17 zeigt das Flussdiagramm der Literaturrecherche.

Die statistische Analyse wurde analog zu den bereits oben beschriebenen Ansätzen und Prozeduren durchgeführt. Die hier relevante Analyse der Trainingsarme mit unterschiedlicher Trainingshäufigkeit wurde als random-effects Meta-Analyse mit Subanalyse der potentiellen Modulatoren (a) Interventionsdauer, (b) Trainingsinhalt und (c) Reizhöhe durchgeführt. Die Interventionsdauer wurde in drei Untergruppen <12 Monate vs. 12-18 Monate vs. >18 Monate, die Trainingsinhalte wurden in „weight bearing-exercise“ (WBE) vs. „Krafttraining“

(RT) vs. „gemischtes WBE&RT“ eingeteilt. Die knochenrelevante Reizhöhe wurde in „moderat hoch bis hoch“ versus „niedrig“ klassifiziert. Als niedrige (Netto-)Trainingsfrequenz (low frequency: LF) wurde unter Beachtung der Teilnahme-Rate eine Trainingshäufigkeit von <2 Trainingseinheiten pro Woche (TE/Wo), als hohe Trainingsfrequenz (high frequency: HF) eine (Netto-)Trainingsfrequenz von ≥ 2 TE/Wo. erachtet. Zwei Gutachter kategorisierten die Daten unabhängig voneinander, bei Unstimmigkeiten entschied ein dritter Gutachter.

Ergebnisse

Insgesamt konnten 7 Trainingsstudien mit 17 (Trainings-)Studienarmen in die Analyse einbezogen [348,402-407] werden (Abb. 17). Eine Studie sah drei Studienarme mit 2, 4 und 7 TE/Wo. vor. Eine weitere Studie verglich die Wirkung von jeweils 2 vs. 3 TE/Wo. bei hoher vs. niedriger Trainingsintensität. Die Tabellen 32-34 zeigen basale Studien-, Teilnehmer- und Trainingscharakteristika sowie die methodische Qualität der eingeschlossenen Untersuchungen.

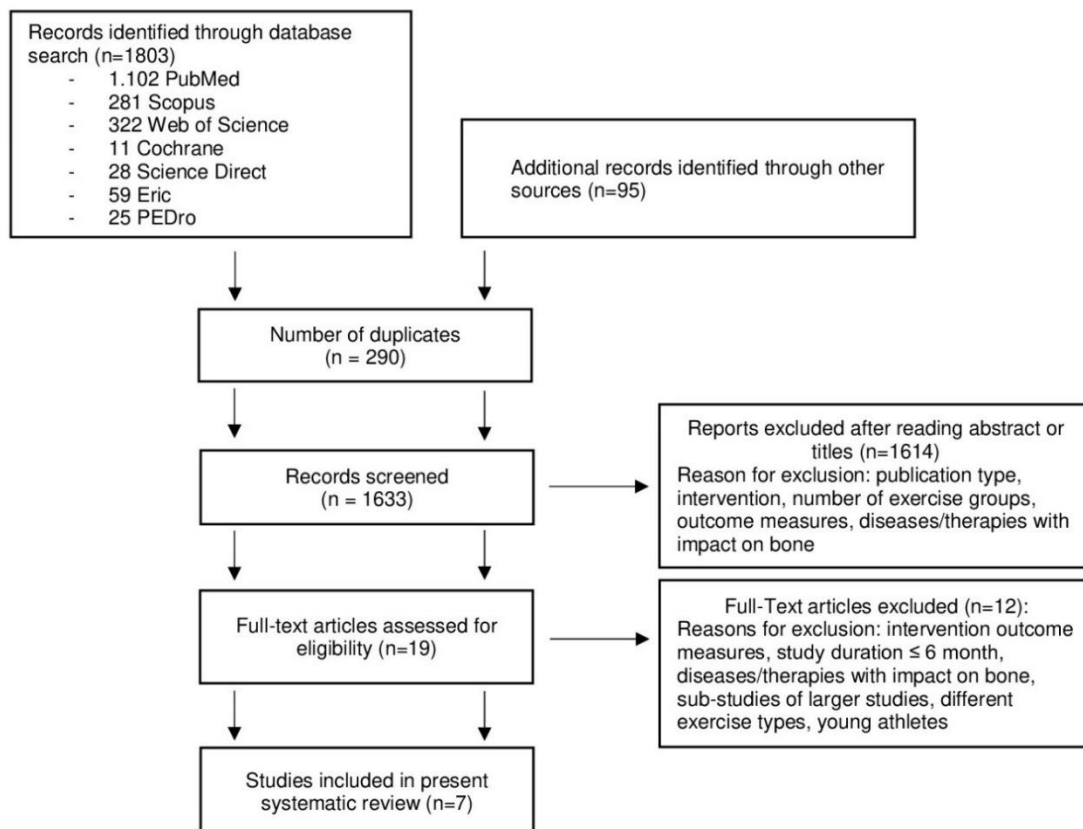


Abb. 17: Flussdiagramm des Suchprozesses „Einfluss der Trainingshäufigkeit auf die Knochendichte“ [37].

KMD-LWS Abbildung 44 zeigt den Effekt niedriger versus hoher Trainingshäufigkeit für die LWS-KMD. Zusammenfassend lag der Effekt einer hohen Trainingshäufigkeit signifikant ($p=.002$) günstiger (SMD: 0,55, 95%-KI: 0,20-0,90) als bei niedriger Trainingshäufigkeit. Umgerechnet in KMD-Werte betrug der Unterschied zwischen LF und HF im Durchschnitt $0,026 \pm 0,023$ g/cm², was $2,7 \pm 2,3\%$ entspricht. Die Studienergebnisse wiesen allerdings ein erhebliches Maß an Heterogenität auf ($I^2=70\%$) (Abb. 44).

FN-KMD Abbildung 45 zeigt den Effekt niedriger versus hoher Trainingshäufigkeit für die FN-KMD. Obwohl der Effekt von höherfrequenten (gegenüber niederfrequenten) Trainingsprotokollen tendenziell höher lag (SMD: 0,19, 95%-KI -0,06 bis 0,45), war der Unterschied zwischen den Trainingsprotokollen nicht signifikant ($p=.136$). Die Studienergebnisse wiesen ein moderates Maß an Heterogenität auf ($I^2=47\%$).

Die Trichterdiagramme beider Analysen (LWS, FN) deuten auf eine leichte (FN-KMD) bis moderate (LWS-KMD) Evidenz für einen Publication-/small study Bias an. Die Trim and Fill Analyse imputierte eine (FN-KMD) bzw. zwei „fehlende“ Untersuchungen auf der linken, unteren Seite (kleine Studien mit negativem Ergebnis). Die entsprechende Asymmetrie wurde von Regressions- oder Rangkorrelationstest (je $p>.50$) für die Trichterdiagramm-Asymmetrie allerdings nicht bestätigt. Eine Sensitivitätsanalyse zeigte signifikant ($p=.036$) höhere Effekt für die KMD-LWS (nicht FN: $p=.714$) in Studien mit mittlerer oder hoher versus niedriger methodischer Qualität.

Subgruppenanalysen der Modulatoren „Interventionsdauer“, „Trainingsinhalt“, „Reizhöhe“

Interventionsdauer: Den Effekt der Interventionsdauer auf die Effekte unterschiedlicher Trainingsfrequenz an LWS und FN zeigt Abb. 46. Während mittlere (SMD: 0,78, 95%-KI: 0,49-1,07) und längere Studiendauern (0,82; 0,22-1,42) den Unterschied in der KMD-LWS zwischen niedriger und hoher Trainingshäufigkeit vergrößerten, zeigten Studien mit kurzer Studiendauer sogar leicht günstigere LWS-KMD-Effekte zugunsten der Subgruppe mit niedriger Trainingshäufigkeit (-0,07; -0,42 bis 0,28). Die LWS-KMD Differenz zwischen kurzer versus mittlerer oder langer Interventionsdauer war dabei signifikant ($p=.049$). Keine signifikanten Differenzen zeigten sich für die FN-KMD ($p=.136$), wobei zu beachten ist, dass der Haupteffekt für die Trainingsfrequenz ebenfalls nicht signifikant lag.

Trainingsinhalt: Keinen signifikanten Einfluss auf den Effekt der Trainingsfrequenz für LWS- oder FN-KMD hatte der Trainingsinhalt (Abb. 47). Die Effekte von Krafttrainingsprotokollen zeigen ROI-übergreifend eine geringe Abhängigkeit der KMD-Veränderung von der Trainingshäufigkeit. Das liegt allerdings primär an dem Aspekt, dass die RT-Protokolle eine sehr geringe Varianz für die Trainingshäufigkeit (Tab. 33) aufwiesen.

Reizhöhe: Lediglich ein Studienarm [348] wurde mit einer niedrigen Reizhöhe klassifiziert, sodass ein valider Vergleich nicht möglich erscheint (Abb. 48). Unter dieser Prämisse ist der (nicht-signifikante) Effekt höherer Reizintensität auf den Effekt der Trainingsfrequenz auf die KMD-LWS (nicht jedoch auf die FN-KMD) ebenfalls nur sehr vorsichtig zu interpretieren.

Diskussion

Zusammenfassend zeigt sich eine hochrelevante Überlegenheit von Trainingsprotokollen mit höherer Trainingsfrequenz auf die Knochendichte an LWS ($p=.002$) und (eingeschränkt) FN-KMD. Der „Cut-point“ der Trainingsfrequenz wurde bei 2 TE/Woche (<2 TE/Wo. versus 2TE/Wo.), also einem für den gesundheitsorientierten Sport, auch unter der Prämisse einer anwesenheitsbereinigten Trainingsfrequenz, realistischen Wert festgelegt. Im Detail zeigen Studienarme mit geringer Trainingshäufigkeit zumindest an der LWS keine Effekte auf die KMD ($0,0\pm2,1\%$). Die Analyse bestätigt dahingehend die Ergebnisse zweier Untersuchungen [406,407], die bei Trainingshäufigkeiten von ≥ 1 bis <2 TE/Wo. keine Unterschiede zur KMD-Entwicklung (LWS und FN) zu einer nicht-trainierenden Kontrollgruppe berichten.

Zunehmende Interventionsdauer erhöht die Differenz zwischen LF und HF Protokollen. Dies liegt wohl daran, dass die Reizschwelle für ossäre Anpassungserscheinungen innerhalb der initialen Trainingsphase vergleichsweise niedrig liegt, aber durch trainingsinduzierte

Anpassungen im Verlauf ansteigt. Zwar nehmen alle Untersuchungen eine progressive Erhöhung der Reizhöhe im Verlauf der Intervention vor (Tab. 33), die Trainingshäufigkeit verbleibt jedoch auf dem initialen Niveau.

Der ebenfalls durch geringe Fallzahlen/Subgruppe und geringe Varianz der Trainingshäufigkeit innerhalb der RT-Subgruppe limitierte Vergleich der Trainingsinhalte führt zu keinem wesentlichen modifizierenden Effekt auf den Stellenwert der Trainingsfrequenz für KMD-Veränderungen. Vergleichbares gilt (bei geringer statistischer Power) für den potentiell modifizierenden Effekt der Reizhöhe auf die Effekte der Trainingshäufigkeit auf die KMD.

Bewertung der Studienqualität und Transferierbarkeit der Ergebnisse

Die Generierung der vorliegenden Evidenz erfolgte via systematischer Literaturrecherche und Meta-Analyse, folglich Evidenzgrad 1a gemäß AQRH (Tab. 1). Die Anzahl der eingeschlossenen Studien lag mit 7 vergleichenden Untersuchungen in einem noch akzeptablen Bereich. Die quantitative Qualitätsbewertung der Arbeit mittels R-Amstar [32] ergab 38 von 44 Punkten (Tab. 61). Die Transferierbarkeit der Ergebnisse auf die Gesamtheit postmenopausaler Frauen und Männer ≥ 45 Jahre halten wir aufgrund der eingeschlossenen Untersuchung für gegeben.

Formulierung der Empfehlungen

26	Empfehlung 26	Neu, Stand 2024
Empfehlungsgrad A	Ein Training zur Verbesserung der Knochenfestigkeit soll im Jahresmittel mindestens zweimal pro Woche (unter Berücksichtigung regenerativer Phasen) durchgeführt werden.	
Evidenzgrad 1a	[24,408]	
	Konsensstärke: 100%	

4.4. Empfehlungen zur Kombination von pharmakologischer Therapie und körperlichem Training

Eine medikamentöse Osteoporose-Therapie durch ein körperliches Training zu ergänzen, ist im Sinne einer umfassenden Frakturprophylaxe insbesondere bei Kollektiven mit erhöhtem Sturzrisiko (Tab. 6) absolut angeraten [187,409]. Eine andere Frage ist, ob ein körperliches Training den positiven Effekt etablierter pharmakologischer Therapie auf die Knochenfestigkeit erhöhen kann.

4.4.1. Kombination von körperlichem Training und antiresorptiver Therapie

In diesem Abschnitt erfolgt eine Übersicht über die Effekte antiresorptiver Osteoporose-Therapie und körperlichem Training. Die Fragestellung war jeweils, ob ein körperliches Training einen additiven Effekt auf die Knochendichte der jeweiligen medikamentösen Therapie erbringt. Es erfolgten systematische Literaturrecherchen und Meta-Analysen zu den Substanzgruppen „Hormon-Ersatz-Therapie“ (HRT), und „Bisphosphonate“. Zusätzlich erfolgte eine kombinierte Suche nach den Substanzen „Denosumab“ sowie den knochenanabolen Pharmazeutika „Teriparatid“, „Romosozumab“ und „Abaloparatid“, die für die antiresorptive Substanz „Denosumab“ zu keinem „Treffer“ führte. Eine entsprechende Literaturrecherche für selektive E(Ö)strogenrezeptormodulatoren (SERMs) wurde nicht durchgeführt.

4.4.2. Kombination von Hormon Ersatz Therapie (HRT) und körperlichem Training

Einführung

Neben anderen überwiegend negativen Folgen [410-413] wird der ausgeprägte postmenopausale Rückgang von Östradiol (E2) [414,415] mit einem beschleunigten Knochenabbau [416] insbesondere in den peri- und frühen postmenopausalen Jahren in Verbindung gebracht [417,418]. Hinsichtlich der Interaktion von körperlichem Training und E2 (-Reduktion) gibt es belastbare Hinweise auf eine verringerte Mechanosensitivität knochen-anaboler Stimuli nach dem Übergang in die Menopause [90,158,419,420]. Neben Anderen [90,384] evaluierten Sugiyama et al. [421] KMD-Veränderungen nach einem 6-monatigen Training mit mittlerer Reizhöhe/-rate ("Seilspringen") und beobachteten signifikante positive Auswirkungen auf die Hüft-KMD nur in der prämenopausalen (45-50 Jahre), nicht jedoch in der nur geringfügig älteren (früh-)postmenopausalen Gruppe. Ein adäquates "anaboles hormonelles Milieu" mit ausreichender E2-Konzentration und -Rezeptordichte scheint also für die Mechanosensitivität/-transduktion/-response des Knochengewebes von wesentlicher Bedeutung zu sein [422]. Dementsprechend könnte ein additives körperliches Training adjuvant zur HRT eine erfolgversprechende Option darstellen, um die KMD postmenopausaler Frauen zu optimieren. Mehrere Studien haben die kombinierte Wirkung von körperlichem Training und HRT-Supplementierung bei postmenopausalen Frauen im Vergleich zu isolierter HRT untersucht [90,113,130,137,142,423,424]. Obwohl Hinweise auf eine überlegene Wirkung von HRT in Kombination mit körperlichem Training (HRT+E) im Vergleich zu isolierter HRT oder isoliertem körperlichen Training/mechanischer Belastung vorliegen [90,130,423,424], ist das Ergebnis bei Betrachtung der Einzelstudien uneinheitlich.

Methodik

Eine im Rahmen der Leitlinie erstellte systematische Übersichtsarbeit und Meta-Analyse [26] schloss die folgenden Untersuchungen ein: (1) randomisierte oder nicht-randomisierte kontrollierte Studien mit drei Gruppen: (Hormontherapie-) HRT- plus Trainingsgruppe (HRT+E)

versus isolierte HRT versus isoliertes körperliches Training (TG), (2) postmenopausaler Status zu Studienbeginn, (3) Interventionsdauer ≥ 6 Monate, (4) KMD an LWS und Hüfte mittels (e) QCT, DXA oder DPA bestimmt. (5) Abgesehen von HRT, keine weitere Medikation oder Erkrankungen mit relevanten Auswirkungen auf den Knochenmetabolismus. Ausgeschlossen wurden Untersuchungen mit (1) gemischten prä- und postmenopausale Kohorten ohne separate KMD-Analysen, (2) „Follow-ups“ abgeschlossener Trainingsinterventionen (z. B. [424]) sowie (3) Doppel-/Mehrfachveröffentlichungen, vorläufige Daten aus später veröffentlichten Studien, Übersichtsartikel, Fallberichte, Editorenstudien, Konferenzzusammenfassungen und „letters“. Die Literaturrecherche umfasste sechs elektronische Datenbanken (PubMed, Scopus, ProQuest, Science Direct, Eric and Web of Science) ohne sprachliche Einschränkungen für Artikel, die bis zum 28. April 2021 veröffentlicht wurden. Eine Registrierung erfolgte unter PROSPERO, ID: 279742. Abb. 18 zeigt das Flussdiagramm der Literaturrecherche.

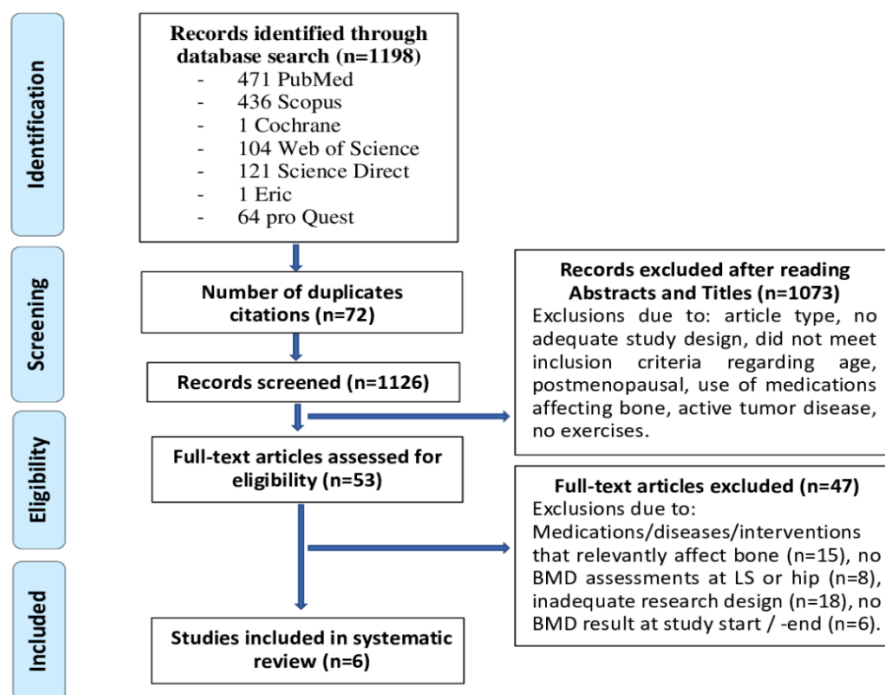


Abb. 18: Flussdiagramm des Suchprozesses „Einfluss von HRT und körperlichem Training auf die Knochendichte“ [31].

Die statistische Analyse wurde analog zu den bereits oben beschriebenen Ansätzen und Prozeduren durchgeführt. Die Berechnung erfolgte mittels inversem Heterogenitäts (IVhet) Modell. Sub- oder Sensitivitätsanalysen wurden nicht durchgeführt.

Ergebnisse

Zusammenfassend wurden durch unsere Suche sechs Studien [90,113,130,137,142,423] (Abb. 18) mit jeweils sechs TG, HRT, kombinierten HRT+E sowie KG identifiziert. Abgesehen von einer nicht-randomisierten kontrollierten Studie [130] handelte es sich bei allen anderen Studien um RCTs. Die Stichprobengröße der Gruppen reichte von 8 [130] bis 91 Teilnehmern/Gruppe [113]. Die gepoolte Anzahl der eingeschlossenen Teilnehmer betrug 219 in der TG, 178 in der HRT-Gruppe, 188 in der kombinierten Gruppe und 189 in der nicht-trainierenden Kontrollgruppe. Tab. 39 bis 41 (Anhang) zeigen die basale Studien-, Teilnehmer-, Trainings- und HRT-Charakteristika sowie die methodische Qualität der eingeschlossenen Untersuchungen.

KMD-LWS Zusammengefasst lag der Effekt der kombinierten Intervention (SMD: 0,12, 95%-KI: -0,25 bis 0,49) von HRT+E auf die LWS-KMD nicht signifikant ($p=.27$) günstiger als die isolierte HRT-Applikation (HRT: $1,4\pm 1,6\%$ vs. HRT+E: $2,1\pm 1,9\%$). Die Heterogenität zwischen den Studienergebnissen ($I^2=49\%$) lag moderat (Abb. 52 oben).

KMD-FN Der Effekt der kombinierten HRT+E Intervention zeigte sich für die FN-KMD ebenfalls nicht signifikant günstiger ($p=.17$) als in der isolierten HRT-Gruppe (SMD: 0,19, 95%-KI: -0,07 bis 0,44). Die Heterogenität zwischen den Studienergebnissen ($I^2=29\%$) lag niedrig-moderat (Abb. 52 unten).

Der Funnel Plot mit Trim- und Fill-Analyse deutet auf eine leichte bis moderate Verzerrung der Ergebnisse für die LWS- und FN-KMD hin. Das Ergebnis der Asymmetrie wurde jeweils durch den LFK-Index bestätigt. Im Gegensatz dazu wiesen weder die Regressions- noch die Rangkorrelationstests auf eine signifikante Asymmetrie hin (Abb. 53).

Diskussion

HRT wird grundsätzlich als potentes Pharmazeutikum zur Vermeidung von Frakturen bei postmenopausalen Frauen angesehen [425-428]. Trotzdem ist die HRT unabhängig von Zusammensetzung und Applikationsform nicht als „lege artis“ Therapie zur Frakturprävention zu sehen [60]. Indikation für eine Hormonersatztherapie ist vielmehr das klimakterische Syndrom [428]. Stand 2018 erhalten in Deutschland ca. 700.000 Frauen (6.6%) im Alter zwischen 45-65 Jahren eine HRT [429], insofern ist die Frage der Interaktion zwischen HRT und körperlichem Training auf die KMD von hoher Relevanz. Zusammenfassend konnten wir keinen signifikanten Effekt von HRT+E im Vergleich zu isolierter HRT auf die KMD an LWS (SMD: 0,12, 95%-KI: -0,25 bis 0,49) oder FN (SMD: 0,19, 95%-KI: -0,07 bis 0,44) feststellen. Wir führen dieses Ergebnis zu einem guten Teil auf die unterschiedliche HRT-Supplementierung und den basalen hormonellen Status der postmenopausalen Frauen zurück [26]. Daneben zeigte die entsprechende Analyse [26] keine signifikante Differenz von HRT versus körperlichem Training auf die Knochendichte an LWS oder Schenkelhals.

In ihrer systematischen Übersicht und Meta-Analyse untersuchten Zhao et al. [430] die Auswirkungen von HRT in Kombination mit körperlichem Training im Vergleich zu isolierter körperlicher Aktivität bei postmenopausalen Frauen. Zusammenfassend berichten die Autoren einen signifikant höheren KMD-Effekt an der LWS (SMD: 0,22, 95%-KI: 0,01 bis 0,43) und FN (SMD: 0,73, 95%-KI: 0,19 bis 1,27) nach kombinierter HRT+E Intervention vs. isoliertem körperlichen Training. Dieser Ansatz⁴⁰ erscheint uns aus pragmatischer Sicht allerdings wenig anwendungsorientiert.

Fazit

Bei weitgehend vergleichbaren Effekten von HRT und körperlichem Training auf die KMD postmenopausaler Frauen, zeigt ein körperliches Training bei bereits bestehender HRT keine wesentlichen additiven Effekte auf die KMD an LWS und Schenkelhalsregion. Die Trainingsinterventionen der eingeschlossenen Untersuchungen erscheinen dabei grundsätzlich geeignet, positive Effekte auf die KMD auszuüben. Die Transferierbarkeit der vorliegenden Ergebnisse auf andere Kollektive unter HRT erscheint weitgehend gerechtfertigt. In Anbetracht der potenziell synergistischen/additiven/permisiven Wirkungen auf andere Gewebsformen und Systeme [428,431,432] sind Frauen unter HRT allerdings gut beraten, ein körperliches Training aufzunehmen [26].

⁴⁰ Basis körperliches Training und additive HRT-Supplementierung. Basis der Fragestellung ist eine vorliegende HRT

4.4.3. Kombination von Bisphosphonaten und körperlichem Training

Einführung

Bisphosphonate zählen bereits seit vielen Jahren zur Standardtherapie bei der Behandlung der postmenopausalen und der Glukokortikoid-induzierten Osteoporose sowie der Osteoporose bei Männern [60]. Ein additives körperliches Training ist aufgrund fehlender Effektivität von Bisphosphonaten auf sturzrelevante Größen [433-435] insb. bei Menschen mit erhöhtem Sturzrisiko grundsätzlich angezeigt. Eine andere Frage ist, ob ein geeignetes adjuvantes Trainingsprotokoll zu einer über die Effekte isolierter Bisphosphonat Therapie hinausgehenden Erhöhung der Knochenfestigkeit an LWS und FN führt.

Methodik

Die für diese Fragestellung durchgeführte systematische Literaturrecherche und Meta-Analyse [27] durchsuchte fünf elektronische Datenbanken (PubMed, Scopus, Web of Science, Cochrane und Science direct), für Artikel, die bis zum 26. August 2021 veröffentlicht wurden. Eingeschlossen wurden Studien/Studienarme mit (1) randomisiertem und nicht-randomisiertem kontrolliertem Studiendesign mit mindestens einer Trainingsgruppe versus einer Kontrollgruppe ohne zusätzliches körperliches Training, die beide dieselbe Bisphosphonat Therapie erhalten, (2) ≥ 6 Monate Interventionsdauer, (3) KMD oder Knochenmasse (BMC) der LWS und des proximalen Femurs zu Beginn und am Ende der Studie, bestimmt durch (4) DXA oder DPA. Ausgeschlossen wurden Studien mit (1) Medikamenten /Krankheiten/Konditionen mit relevantem Einfluss auf den Knochenstoffwechsel, (2) organtransplantierten Menschen oder Krebspatienten, (3) Tieren, (4) körperlichem Training mit Hilfe von funktioneller elektrischer Stimulation (FES), (5) Teilnehmern, die der Schwerelosigkeit im Weltraum oder dauerhafter Bettruhe ausgesetzt waren, (6) ohne verwendbare Ergebnisse oder Studiendesign. Übersichtsartikel, Fallberichte, Leitartikel, Konferenz-„Abstracts“ und „Letters“ wurden ebenfalls nicht berücksichtigt. Eine Registrierung erfolgte unter PROSPERO CRD42021275374.

Die statistische Analyse wurde analog zu den bereits oben beschriebenen Ansätzen und Prozeduren durchgeführt. Die Berechnung erfolgte mittels inversem Heterogenitäts (IVhet) Modell. Subanalysen wurden aufgrund der geringen Anzahl der eingeschlossenen Untersuchungen nicht durchgeführt.

Ergebnisse

Zusammenfassend konnten wir nach Literaturrecherche und Eligibilitätsprüfung vier Studien [102,403,434,436] einschließen (Abb. 19). Die kumulierte Fallzahl betrug 113 Teilnehmer in der isolierten Bisphosphonat- (B) und 124 Teilnehmer in der kombinierten Bisphosphonat/Trainings-Gruppe (B+E).

LWS-KMD Abbildung 54 (oben) zeigt die standardisierten Mittelwerts-Differenzen (SMD) für die LWS-KMD. Die Analyse weist auf keine signifikanten Unterschiede ($p=.32$) zwischen kombinierter Therapie (B+E) und isolierter Bisphosphonat Therapie auf die LWS-KMD (SMD: 0,89, 95%-KI: -0,73 bis 2,52) hin. Die Heterogenität der Ergebnisse zwischen den eingeschlossenen Studien ($I^2=96\%$) kann als extrem hoch interpretiert werden (Abb. 54, oben).

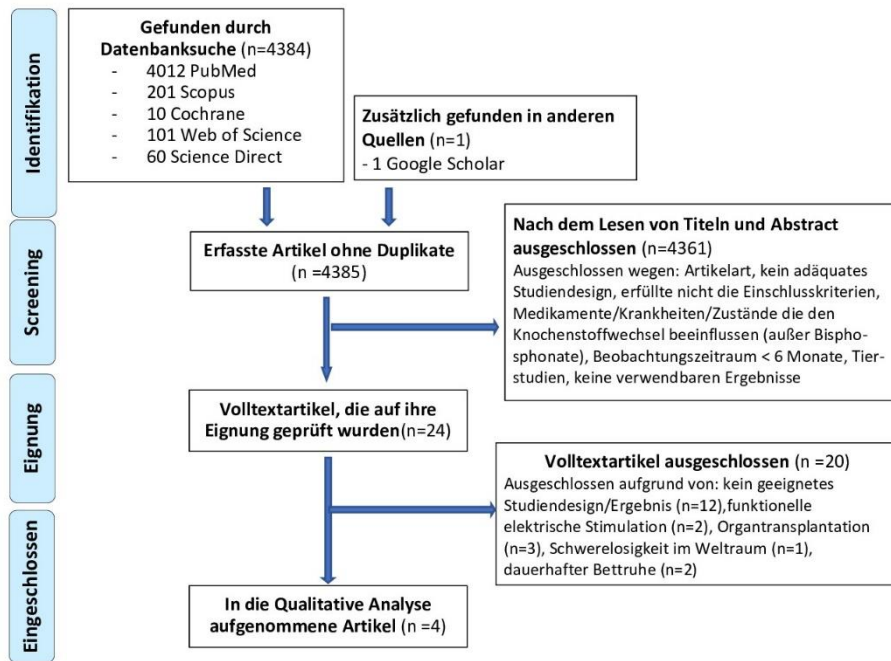


Abb. 19: Flussdiagramm des Suchprozesses „Einfluss von Bisphosphonaten und körperlichem Training auf die Knochendichte“ [31].

FN-KMD Abbildung 52 (unten) zeigt den Forrest-plot für den Effekt kombinierter B+E-Therapie versus isolierter Bisphosphonat Therapie für die FN-KMD. Das Modell belegt keine signifikante Überlegenheit ($p=.29$) einer kombinierten Intervention (0,71; -0,51 bis 1,92). Die Heterogenität der eingeschlossenen Studien liegt mit $I^2=92\%$ sehr hoch.

Die Analyse der Trichterdiagramme (Abb. 55) deutet sowohl für die LWS wie auch die FN-KMD auf einen moderaten Publikations- bzw. „small study“-Bias hin. Die Ergebnisse der Asymmetrie der Trichterdiagramme werden allerdings weder vom LFK-Index noch vom Regressions- oder Rangkorrelationstest bestätigt.

Diskussion

Zusammenfassend zeigt eine kombinierte Therapie aus Bisphosphonat und körperlichem Training keine signifikant über die Wirkung isolierter Bisphosphonat-Therapie hinausgehenden Effekte auf die Knochendichte an LWS und/oder proximalem Femur [27]. Die Evidenz dieses Ergebnisses ist allerdings durch die hohe Variabilität der wenigen Studien und deren besondere Teilnehmer- und Interventionscharakteristika (Tab. 43-46) deutlich limitiert.

Unser Ergebnis stellt die grundsätzliche Zweckmäßigkeit einer kombinierten Intervention von Bisphosphonaten und einem regelmäßigen Körpertraining keinesfalls in Abrede. Abseits der Knochendichte ist ein Körpertraining im Spektrum der Frakturprophylaxe besonders bei Menschen mit hohem Sturzrisiko unstrittig sinnvoll und obligater Bestandteil der Osteoporose-Therapie. Insbesondere bei leistungsschwachen Menschen mit einer (manifesten) Osteoporose, denen ein intensives Körpertraining nicht mehr zuzumuten ist, erscheint eine pharmakologische Therapie zur Verbesserung der Knochenfestigkeit und ein geeignetes, niedrig-intensives Körpertraining zur Reduktion von Sturzrisikofaktoren als die Methode bzw. Therapie der Wahl.

Fazit

Leider leistet die vorgelegte Analyse nur einen geringen Erklärungsbeitrag zur Evidenz eines additiven körperlichen Trainings im Rahmen einer Bisphosphonat Therapie. Besonders limitierend ist die hohe Heterogenität zwischen den Interventionsprotokollen, nicht zuletzt durch teilweise inadäquate, nicht nachvollziehbare oder potentiell ineffektive Belastungsprotokolle. Die Transferierbarkeit ist aufgrund der Teilnehmercharakteristika (überwiegend jüngere postmenopausale Kollektive) ebenfalls eingeschränkt, sodass wir an dieser Stelle keine Empfehlung aussprechen können oder möchten.

4.4.4. Kombination von Denosumab und körperlichem Training

Neben Bisphosphonaten liegen eine Anzahl neuer antiresorptiv wirksamer Medikamente vor. Zu den monoklonalen Antikörpern zählt Denosumab, das das RANK-Ligand induzierte Aktivieren der Osteoklasten inhibiert. Denosumab zeigt nach 12 Monaten eine signifikante Erhöhung der Knochendichte, die für die LWS-ROI (6-7%) ca. zweifach höher liegt als für die total hip-ROI [437,438]. Aufgrund möglicher [439] positiver Effekte auf die Muskelkraft [440] und -funktion [441], steht Denosumab derzeit als Therapieoption der Osteosarkopenie zur Diskussion [440]⁴¹. Martinez-Reina et al. [443] sagen im mechanobiologischen Modell reduzierte Denosumab-induzierte KMD-Veränderungen nach Inaktivität („mechanical disuse“) im Vergleich zu habitueller Belastung voraus. Weiterhin besteht für Denosumab moderate Evidenz für positive Effekte auf Sturzgrößen [444]⁴². Leider ergab die systematische Literaturrecherche für Denosumab keinen „Treffer“.

Eine Studie [445], die aus methodischen Gründen⁴³ nicht in die Analyse eingeschlossen werden konnte, untersuchte den kombinierten Effekt antiresorptiver Pharmazeutika⁴⁴ und körperlichem Training (hochintensives DRT und WBE-Training) auf die Knochendichte an LWS und proximalem Femur bei postmenopausalen Frauen mit niedriger Knochenfestigkeit /Osteopenie (≤ -1 SD T-Score). Nach 8-monatigem Training zeigte die kombinierte Interventionsgruppe, verglichen mit der isolierten Trainingsgruppe, signifikant höhere Zuwächse für die KMD am Schenkelhals, nicht aber an der LWS. Der Vergleich zwischen der Gruppe mit hochintensivem Krafttraining und einer Subgruppe, die eine per se ineffektive Trainingstherapie („low intensity Pilates based exercise“) mit Denosumab kombinierte, zeigte dabei keine signifikanten Unterschiede.

4.4.5. Fazit antiresorptive Therapie und körperliches Training

Derzeit besteht nur geringe Evidenz für additive positive Effekte einer Kombination mit den antiresorptiv wirkenden Substanzgruppen „HRT“, „Bisphosphonate“ und „Denosumab“ und einem körperlichen Training versus isolierte medikamentöse Therapie auf die Knochenfestigkeit. Für Denosumab liegen derzeit keine Untersuchungen vor, die auf der Basis einer pharmakologischen Therapie eine zusätzliche Trainingsintervention implementiert.

⁴¹ Allerdings ist die Evidenz für Denosumab-induzierte Effekte [440] auf die Muskelkraft (hier: Handkraft) und -funktion (habituelle Gehgeschwindigkeit) nach Beck et al. [439] limitiert. Tatsächlich berichten lediglich Rupp et al. [442] und Miedany et al. [441] von signifikant positiven Effekten von Denosumab versus Bisphosphonate (von denen keine positive Wirkung auf die Muskelkraft/-funktion bekannt ist) auf Muskelkraft und -funktion.

⁴² Allerdings berichten von den fünf eingeschlossenen RCTs dieser Meta-Analyse lediglich Cummings et al. [437] signifikant positive Effekte für den nachrangigen Studienendpunkt „Anzahl der Stürzer“ in Denosumab- vs. Placebogruppe. Die Methodik der Erfassung der Sturzhäufigkeit wird bei Cummings et al. nicht berichtet.

⁴³ U.a. keine Gruppe mit isolierter Denosumab-Therapie, unterschiedliche Zusammensetzung der Therapie in den Gruppen.

⁴⁴ 80% der Personen unter Denosumab, 20% unter Bisphosphonaten (Alendronat, Risedronat, Zoledronat); stabile Dosis in den letzten 12 Monaten vor Trainingsbeginn.

Inwieweit eine Kombination von selektiven E(Ö)strogenrezeptormodulatoren (SERMs) und körperlichem Training ähnlich ausbleibende additive Effekte wie HRT zeigt, ist schwer zu beurteilen. Wie bereits mehrfach erörtert betreffen diese Ergebnisse den Frakturrisikofaktor der Knochenfestigkeit. Im Bereich der Sturzprävention ist ein körperliches Training parallel zur pharmakologischen Therapie (bei entsprechend ausbleibenden Effekten antiresorptiver Therapie) bei den betroffenen Personengruppen (Tab. 6) eine Konstante.

4.4.6. Kombination anaboler Osteoporose-Medikamente (Teriparatid, Romosozumab, Abaloparatid) und körperlichem Training

Einführung

Neben antiresorptiven Osteoporose-Therapien sind bereits seit geraumer Zeit osteoanabol wirkende Pharmazeutika verfügbar. Am Markt befindliche osteoanabole Substanzen sind Romosozumab, Teriparatid, Abaloparatid. Romosozumab bindet und hemmt Sklerostin, das von Osteozyten freigesetzt wird und maßgeblich an der Regulierung der Knochenneubildung und des Knochenabbaus beteiligt ist. Teriparatid ist mit einem Teil des menschlichen Parathormons aus der Nebenschilddrüse identisch. Durch die Wirkung auf Osteoblasten regt es die Knochenneubildung an und erhöht die Calciumrückresorption im Darm.

Romosozumab und Teriparatid sind hocheffektive Pharmazeutika [446-449] zur Reduktion vertebraler und proximaler Femurfrakturen bei postmenopausalen Frauen. Beide Substanzen führten zu hohen KMD Verbesserungen an der LWS im Bereich von 10% und darüber [446,448,450]. Mögliche sturzpräventive Effekte werden für Romosozumab [451] berichtet.

Inwieweit eine Interaktion zwischen körperlichem Training/mechanischer Belastung und systemischen Effekten dieser knochenanabolen Pharmazeutika zur Verbesserung der Knochendichte besteht, ist unklar. Tierexperimentell liegen Daten vor, die eine synergistische/additive Wirkung insbesondere von Teriparatid⁴⁵ und mechanischer Belastung nahelegen [453-455]. Teriparatid erhöht die Knochenmineraldichte an der LWS wesentlich stärker als an der Hüfte [450,456,457]. U.a. Rooney et al. [458] führen diese lokalen Unterschiede auf die unterschiedliche mechanische Belastungssituation (Druck vs. Zugbelastung) und die Teriparatid-induzierte synergistische anabole Wirkung zurück. Die präklinischen Daten der Autoren weisen darauf hin, dass eine spezifische (Kompressions-) Belastung der Hüfte die KMD-Effekte von Teriparatid auch im klinischen Umfeld verstärken könnte. Eine Kombination einer pharmakologischen Therapie mit den oben genannten Medikamenten und körperlichem Training erscheint somit auch unter dem Aspekt höherer KMD-Zuwächse⁴⁶ vielversprechend.

Methodik

Eine systematische Literaturrecherche und Meta-Analyse [28] durchsuchte ohne Sprachbegrenzung fünf elektronische Datenbanken (MEDLINE (Ovid), Cochrane Library (Central), CINAHL (EBSCO Host), SPORTDiscus (EBSCO Host) and Scopus) und zwei Datenregister (International Clinical Trials Registry Platform (ICTRP), clinicaltrials.gov for unpublished and ongoing trials) (Abb. 20), für Artikel, die bis zum 16. April 2023 veröffentlicht wurden. Eingeschlossen wurden Studien/Studienarme mit (1) randomisiertem, kontrolliertem Studiendesign, (2) postmenopausale Frauen und Männer 45 Jahren oder älter mit Osteopenie oder Osteoporose, (3) Vergleich von mindestens zwei Studienarmen mit identischer antiresorptiver (Denosumab) oder knochenanaboler Therapie (Romosozumab,

⁴⁵ eingeschränkt für Sklerostin-Antikörper wie Romosozumab und Blosozumab [452].

⁴⁶ Das ein körperliches Training zur Sturzprophylaxe auch bei pharmakologischer Therapie angezeigt ist, versteht sich dabei.

Teriparatid, Abaloparatid), von denen (4) ein Studienarm eine zusätzliche körperliche Trainingsintervention⁴⁷ erhält. (5) Studienendpunkte sind KMD oder Knochenmasse (BMC) an LWS und proximaler Femur-ROI zu Beginn und am Ende der Studie (DXA, DPA, QCT) sowie Frakturen oder Stürzen im Studienzeitraum. Ausgeschlossen wurden Studien mit (1) Osteoporose-relevanten Medikamenten (außer Romosozumab, Teriparatid, Abaloparatid) oder Erkrankungen bzw. Konditionen mit relevantem Einfluss auf den Knochenstoffwechsel. (2) Artikel, die auf Heilungsprozesse nach Frakturen fokussieren. (3) Übersichtsartikel, Fallberichte, Leitartikel, Konferenz-„abstracts“ und „Letters“ wurden nicht berücksichtigt. Eine Registrierung der Arbeit erfolgte unter PROSPERO ID CRD42023440581.

Ergebnisse

Final konnte nur eine eligible Untersuchung identifiziert werden [282], die den kombinierten Effekt von Ganzkörper-Vibrationstraining (WBV) und Teriparatidgabe (PTH 1-34) versus isolierte Teriparatidgabe in postmenopausalen Frauen mit niedrigem Knochenmineralgehalt (T-Score <-3SD) im Sinne einer Osteoporose oder mindestens zwei vertebrealen Frakturen über 12 Monate evaluierten. Die pharmakologische Therapie sah für alle Teilnehmer (WBV+PTH n=17 versus PTH n=18) eine subkutane Gabe von 20 µg/d Teriparatid zu Studienbeginn vor (Tab. 48, Anhang). Innerhalb der WBV-Gruppe erfolgte ein intermittierendes (1 min Belastung – 1 min Pause) Protokoll über 3x 12 min/Woche über 12 Monate. Das WBV-Gerät verwendete eine multidimensionale Vibration, eine Frequenz von 30 Hz und einer Amplitude von 1 mm (3,6 g). Die Teilnehmer führten das Übungsprogramm mit gebeugten Beinen durch (Tab. 49). Die methodische Qualität der Untersuchung kann als hoch angesehen werden (Tab. 50).

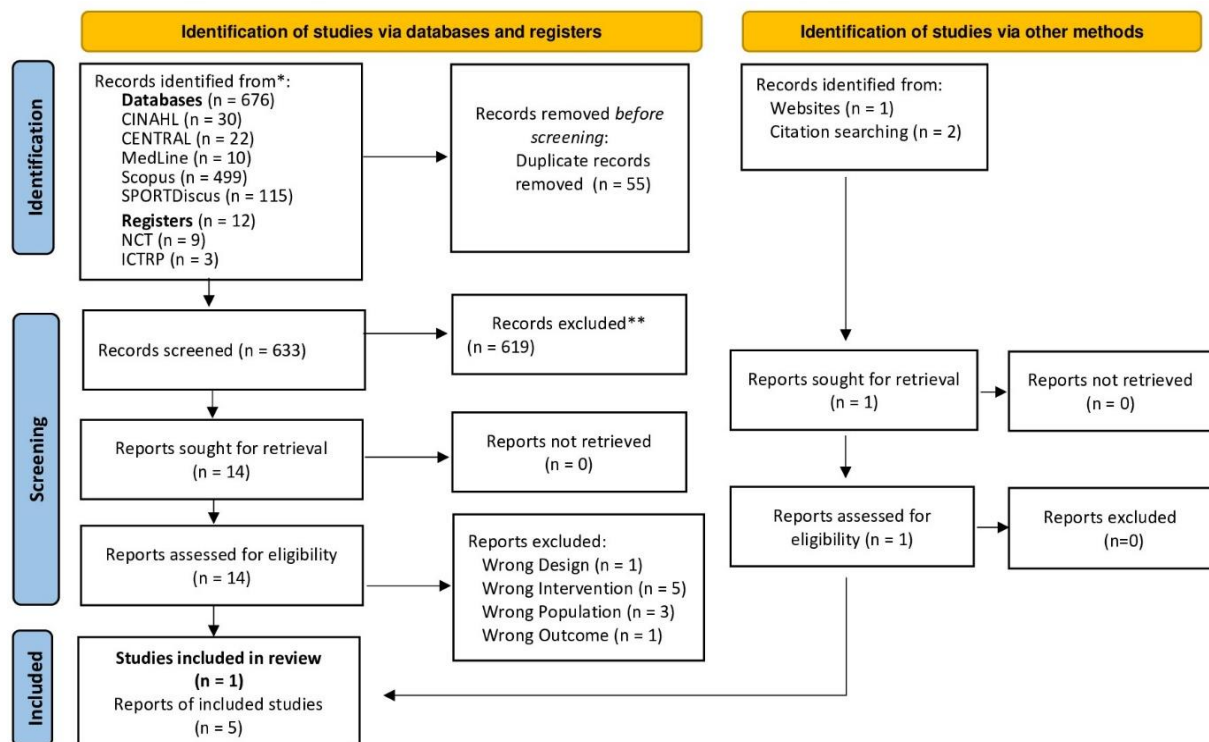


Abb. 20: Flussdiagramm des Suchprozesses „Einfluss von knochenanabolen Osteoporose-medikamenten und körperlichem Training auf die Knochendichte“ [31].

⁴⁷ Eine Vergleich von körperlichem Training vs. körperlichem Training und pharmakologischer Therapie erfolgt aus vergleichbaren Gründen wie bei den bereits durchgeführten Analysen nicht.

Zusammenfassend zeigte sich nach 12 Monaten ein signifikant additiver Effekt ($p=.004$) einer kombinierten WBV+PTH Intervention ($8.9\pm5.5\%$) vs. isolierter PTH-Gabe ($6.7\pm5.6\%$) für die KMD-LWS, nicht jedoch für die „total Hip-KMD“ (-0.18 ± 4.08 vs. $0.81\pm4.11\%$). Ebenfalls keine signifikanten Effekte additiver WBV zeigten sich mittels pQCT erfasster Strukturparameter an Radius oder Tibia (keine Veränderungen in den Gruppen) oder für die Knochenmarker CTX und P1NP, die in beiden Gruppen in ähnlichem Maße signifikant anstiegen.

Diskussion

Trotz offener Suchstrategie mit vergleichsweise wenigen Eligibilitätskriterien belegt diese systematische Literaturübersicht einen eklatanten Mangel an Untersuchungen, die eine knochenanabole Osteoporose-Therapie mit körperlichem Training kombiniert haben, um Frakturgrößen (KMD, Frakturen) zu beeinflussen. Obwohl aus tierexperimentellen und präklinischen Untersuchungen überzeugende Daten zur synergistischen/additiven Wirkung, insbesondere von Teriparatid und mechanischer Belastung, vorliegen [453-455,458], finden sich zu dieser Fragestellung kaum klinische Untersuchungen am Menschen. Final konnte lediglich eine Untersuchung identifiziert werden (Abb. 20), die die Effekte einer kombinierten Teriparatid Therapie (PTH 1-34) und WBV vs. isolierter Teriparatid Therapie auf die Knochendichte an LWS-, Hüft-, Radius und Tibia-ROI, sowie Strukturparameter an Tibia und Radius und Biomarker des Knochenstoffwechsels (CTX, N1NP) berichtet [282]. Zusammenfassend zeigte sich nach 12-monatiger Intervention (lediglich) eine signifikant höhere Zunahme der LWS-KMD (8.9 vs. 6.7%) nach kombinierter vs. isolierter Therapie. Positive Effekte für Strukturparameter oder Knochenmarker konnten nicht beobachtet werden. Inwieweit die etwas höheren Auslenkungen der KMD-LWS bei kombinierter Therapie zu einer höheren Knochenfestigkeit beitragen, ist schwierig zu beurteilen. Bemerkenswert erscheint, dass sich der Großteil der positiven Veränderungen der KMD-LWS bei kombinierter Therapie bereits während der ersten 6 Monate ereignete, während sich die KMD-LWS bei isolierter Teriparatid-Gabe zwischen 6 und 12 Monate nochmals annähernd verdoppelte.

Dass sich die Effekte einer Teriparatid-Therapie überwiegend auf die trabekuläre KMD der LWS und in deutlich geringerem Maße auf die Hüft-KMD auswirkt [456,457,459,460] ist hinreichend bekannt. (Seitenalternierende) WBV-Applikation führt zu signifikanten Effekten auf die KMD-LWS und der Trochanter-ROI, nicht jedoch der total-Hip (tHip)KMD [280]. Tierexperimentell ist bekannt, dass fehlende oder stark eingeschränkte körperliche Aktivität den knochenanabolen Effekt von PTH [461] abschwächt. Unter dieser Prämisse erklären sich ggf. auch die ausbleibenden additiven KMD Effekte von WBV unter Teriparatid-Therapie an LWS, tHip- und FN-ROI bei Menschen mit chronischen Rückenmarksverletzungen [462]. Allerdings variierten die WBV-Protokolle zwischen den Studien ganz erheblich, insbesondere bezüglich der Akzeleration (2,5 g [282] vs. 0,5 g [462]).

Fazit

Die Evidenz für additive ossäre Effekte eines körperlichen Trainings zu einer anabolen pharmakologischen Therapie ist als niedrig einzuschätzen. Konventionelle Trainingsstudien liegen nicht vor, lediglich eine Untersuchung evaluiert den kombinierten Effekt einer Teriparatid-Therapie und Ganzkörper-Vibration vs. isolierter Teriparatid-Therapie.

Vorgreifend auf die Sturzproblematik ist der Stellenwert einer Kombination von anabolen Osteoporose-Pharmazeutika und körperlichem Training sowie als Sonderform WBV als sehr viel höher einzuschätzen. Moderne, hocheffektive Therapeutika [463] wie Romosozumab, Teriparatid, Abaloparatid kommen überwiegend bei Menschen mit hohem Frakturrisiko zum Einsatz, die altersbedingt meist ein deutlich höheres Sturzrisiko aufweisen. Obwohl limitierte

Evidenz für einen sturzreduktiven Effekt von Teriparatid und Romosozumab vorliegt [451,464]⁴⁸, liegt der Schwerpunkt des fraktursenkenden Effekts dieser Pharmazeutika auf einer Verbesserung der Knochenfestigkeit. Umgekehrt liegt eine sehr robuste Evidenz für signifikant positive Effekte dediziertem körperlichen Trainings [14,465] (oder WBV [466]) auf das Sturzrisiko vor (s.u.). Abseits der Verbesserung der Knochenfestigkeit ist eine Kombination von anabolen Osteoporose-Pharmazeutika und körperlichem Training zur Frakturprophylaxe somit uneingeschränkt empfehlenswert.

4.4.7. Zusammenfassende Empfehlungen zur Kombination von medikamentöser Therapie und körperlichem Training

Zusammenfassend zeigt sich eine niedrige Evidenz für additive Effekte eines körperlichen Trainings zu einer etablierten oder neu beginnenden antiresorptiv oder osteoanabol wirkenden pharmakologischen Osteoporose-Therapie auf die Knochenfestigkeit. Diese Einschätzung wird von der systematischen Übersichtsarbeit und Meta-Analyse von Schumm et al. [467] bestätigt. Angesichts z.T. sehr hoher Verbesserungen der Knochendichte nach moderner antiresorptiver und insbesondere osteoanaboler Therapie, ist die Relevanz geringer additiver KMD-Effekte für die Verbesserung der Knochenfestigkeit ohnehin diskutabel. Da lediglich für wenige pharmakologische Substanzen⁴⁹ zur Osteoporose-Therapie (limitierte) Evidenz für mögliche sturzpräventive Effekte berichtet werden, sollten Strategie und Ausrichtung des körperlichen Trainings weniger die Verbesserung der Knochenfestigkeit adressieren, als vielmehr auf eine Reduktion der Sturzhäufigkeit und eine Verbesserung des Sturzablaufes ausgerichtet sein. Diese Forderung spiegelt sich in Empfehlung 27 wieder.

Bewertung der Studienqualität und Transferierbarkeit der Ergebnisse

Die Generierung der vorliegenden Evidenz erfolgte durch mehrere, im Rahmen der LL-Generierung erfolgten, sowie bereits vorliegenden systematischen Literaturrecherchen und Meta-Analysen (Evidenzgrad 1a gemäß AQRH). Die quantitative Qualitätsbewertung der Arbeiten mittels R-Amstar [32], ergab 38-43 von 44 Punkten (Tab. 61). Die Transferierbarkeit der vorliegenden Ergebnisse auf die in der Leitlinie adressierten Kollektive erscheint durch die Auswahl der jeweiligen Studienkollektive gerechtfertigt.

Formulierung der Empfehlung

27	Empfehlung 27	Neu, Stand 2024
Empfehlungsgrad A	Postmenopausale Frauen und Männer 45 Jahre und älter unter antiresorptiver oder osteoanaboler pharmakologischer Therapie, sollen ein geeignetes körperliches Training zur Frakturprophylaxe durchführen.	
Evidenzgrad 1a	[14,26,27,282]	
	Konsensstärke: 100%	

⁴⁸ Vergleichbares gilt für Denosumab [437].

⁴⁹ Denosumab [437,444], Romosozumab [451].

4.5. Empfehlungen zur Kombination von körperlichem Training und Vitamin D

Einführung

Körperliche Bewegung und Vitamin-D-Supplementierung gelten als niedrigschwellige, kosteneffiziente und sichere modifizierbare Lebensstilfaktoren [468] mit relevantem Einfluss auf die Knochengesundheit [13,469] und die Verringerung von Fragilitätsfrakturen [16]. Obwohl der Wirkungsmechanismus von Bewegung und Vitamin D auf die Knochenstärke sehr unterschiedlich ist [16], haben Studien Hinweise auf eine Interaktion von Vitamin D/Vitamin-D-Rezeptor (VDR) und Bewegung (d. h. mechanische Belastung) auf der Ebene der Mechano-transduktion geliefert [470,471]. Dementsprechend gibt es einige Hinweise darauf, dass eine Vitamin-D-Supplementierung die Auswirkungen von körperlichem Training auf die Knochenfestigkeit zumindest bei Menschen mit Vitamin-D-Insuffizienz, d. h. bei bis zu 50% der Erwachsenen in Mittel- und Westeuropa, verstärken könnte [472].

Ziel der systematischen Übersichtsarbeit und Meta-Analyse war es daher, die Wirkung einer Vitamin-D-Gabe in Verbindung mit körperlichem Training auf die Knochenmineraldichte an der LWS und am proximalen Oberschenkelknochen bei Erwachsenen zu untersuchen.

Methodik

Eine systematische Übersichtsarbeit und Meta-Analyse [29] gemäß PRISMA, schloss die folgenden Untersuchungen ein: (a) randomisierte und nicht-randomisierte kontrollierte Studien mit mindestens einer Studiengruppe mit kombinierter Vitamin-D Gabe und körperlichem Training (VITD+TG) versus einer isolierten Trainingsgruppe (TG), (b) postmenopausaler Status zu Studienbeginn oder 50 Jahre und älter, (c) Interventionsdauer ≥ 6 Monate, (d) KMD an LWS und Hüfte mittels (e) QCT, DXA oder DPA bestimmt und (f) keine Medikamente oder Erkrankungen mit relevanten Auswirkungen auf den Knochenmetabolismus. Ausgeschlossen wurden: (a) Tierexperimentelle Studien, (b) Untersuchungen mit alternativen Trainingstechnologien (WBV, WB-EMS), (c) Studien, welche die Effekte von Schwerelosigkeit oder dauerhafter Bettruhe untersuchen, (d) Studien mit gemischten Kohorten ohne separate KMD-Analyse, (e) Untersuchungen mit inadäquaten Studiendesigns wurden ebenso wie Übersichtsartikel, Fallberichte, Leitartikel, Konferenz-Abstracts und „Letters“ nicht berücksichtigt.

Die Literaturrecherche umfasste sechs elektronische Datenbanken (PubMed, Scopus, Ovid (MEDLINE), Web of Science, Cochrane, und CINAHL) ohne sprachliche Einschränkungen für Artikel, die bis zum 01. Januar 2022 veröffentlicht wurden (PROSPERO; ID: CRD42022309813). Abb. 21 zeigt das Flussdiagramm der Literaturrecherche.

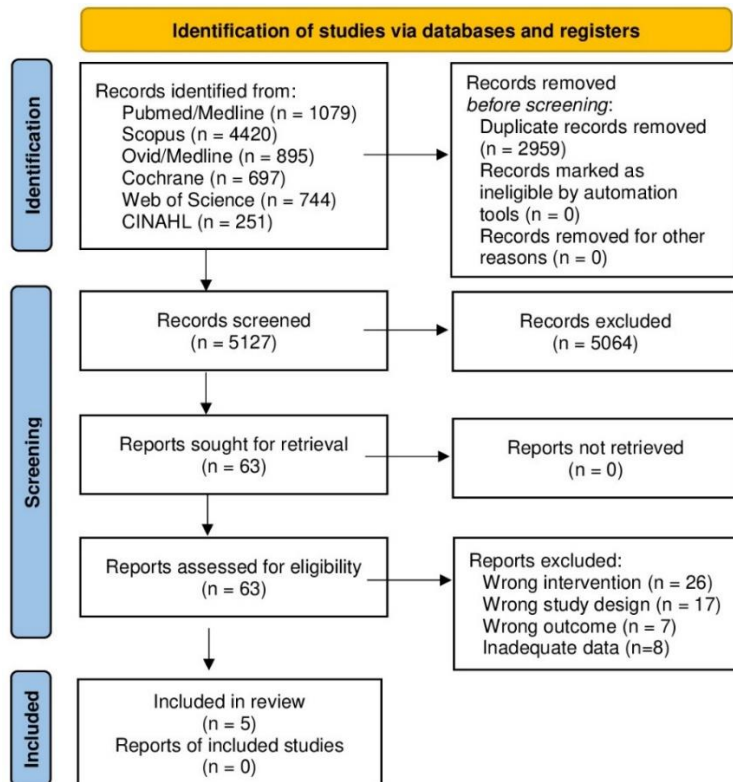


Abb. 21: Flussdiagramm des Suchprozesses „Einfluss von Vitamin-D und körperlichem Training auf die Knochendichte“ [31].

Die statistische Analyse wurde analog zu den bereits oben beschriebenen Ansätzen und Prozeduren durchgeführt. Die Berechnung erfolgte mittels inversem Heterogenitäts (IVhet) Modell. Subanalysen wurden bezüglich Untersuchungen durchgeführt, die neben Vitamin-D zusätzlich Kalzium supplementierten.

Ergebnisse

Zusammenfassend gingen fünf eligible Studien [144,176,473-475] (Abb. 21) mit jeweils fünf kombinierten Gruppen und fünf isolierten TG in die Analyse ein. Abgesehen von zwei nicht oder nicht konsistent randomisierten kontrollierten Studie [144,473], handelte es sich bei allen anderen Studien um RCTs. Die gepoolte Anzahl der eingeschlossenen Teilnehmer betrug 279 in der TG und 281 in der kombinierten Gruppe. Die Stichprobengröße der Gruppen reichte von 9 [144,473] bis 109 [474] Teilnehmern/Gruppe. Tab. 51 bis 54 (Anhang) zeigen die basalen Studien-, Teilnehmer-, Trainings- und HRT-Charakteristika sowie die methodische Qualität der eingeschlossenen Untersuchungen.

LWS-KMD Abbildung 54 zeigt die Mittelwerts-Differenzen (MD) für die LWS-KMD. Die Analyse zeigt keine signifikanten Unterschiede ($p=.871$) zwischen kombinierter Gruppe (VITD+TG) und isolierter Trainingsgruppe (TG) (MD: 0,002, 95%-KI: -0,033 bis 0,066). Die Heterogenität zwischen den eingeschlossenen Studien ($I^2=55\%$) kann als moderat eingestuft werden (Abb. 56).

Subanalyse LWS-KMD Zusammenfassend konnte kein signifikanter Unterschied ($p=.92$) für die LWS-KMD zwischen den VITD+TG mit und ohne zusätzliche Kalzium-Supplementierung erfasst werden (Abb. 56, rechts). Die Heterogenität zwischen den Studienergebnissen der Subgruppen lag moderat (VITD+TG) bzw. substantiell (VITD+Ca+TG).

FN-KMD Abbildung 57 zeigt die Mittelwerts-Differenzen (MD) für die FN-KMD. Die Analyse ergibt keine signifikanten Unterschiede ($p=.675$) zwischen VITD+TG und isolierter TG (MD: 0,003, 95%-KI: -0,013 bis 0,019). Die Heterogenität zwischen den eingeschlossenen Studien ($I^2=38\%$) kann als moderat eingestuft werden.

Subanalyse FN-KMD Innerhalb der Subanalyse konnte kein signifikanter Unterschied ($p=.976$) zwischen den VITD+TG mit und ohne zusätzliche Kalzium-Supplementierung erfasst werden (Abb. 57, rechts). Eine erhebliche Heterogenität ($I^2=80\%$) lag für die „Ca-Untergruppe“ vor, während in der VITD+TG-Gruppe ohne zusätzliche Ca-Supplementierung keinerlei Heterogenität ($I^2=0\%$) beobachtet wurde.

Small study/Publication Bias Die Analyse der Trichterdiagramme (Abb. 58) deutet sowohl für die LWS-KMD wie auch die FN-KMD auf einen moderaten (KMD-FN) bzw. ausgeprägten (KMD-LWS) Publikations- bzw. „small study“-Bias hin. In beiden Fällen wurden eine, bzw. zwei Studien am linken unteren Rand imputiert. Der LFK Index bestätigt für die Analyse von LWS (4.21) wie auch FN-KMD (2.76) die im Funnelplot erfasste Asymmetrie.

Diskussion

Zusammenfassend konnte die vorliegende systematische Übersichtsarbeit und Meta-Analyse mit fünf Untersuchungen (3 RCTs) mit kleiner bis moderat hoher Fallzahl (Evidenzgrad 1a gemäß AQRH) keine Belege für eine überlegene Wirkung von Vitamin D in Kombination mit körperlichem Training im Vergleich zu körperlicher Betätigung ohne Vitamin-D Substitution auf die KMD an LWS oder proximalem Femur erbringen. Zwei Aspekte liefern aus unserer Sicht einen wichtigen Beitrag zu diesem Ergebnis: (1) Die wenig knochenspezifischen Trainingsprotokolle von mindestens zwei [144,474] der vier Studien, sowie (2) die Eligibilitätskriterien der Studien, die nicht oder nicht konsequent genug auf den Vit-D-Mangel [472] als Einschlusskriterium fokussierten⁵⁰. Mehrere Untersuchungen zeigen, dass eine Vit-D Supplementierung bei Personen, die sich nicht im Vit-D Mangelzustand (≤ 20 ng/ml; [472]) befinden, keine zusätzlichen Effekte auf die KMD aufweist [476-478]. Inwieweit dieser Aspekt Einfluss auf eine mögliche Interaktion zwischen körperlichem Training und Vit-D Supplementierung hat, ist allerdings nicht klar. Unser Ergebnis stellt den Nutzen einer kombinierten Intervention aus regelmäßigem körperlichem Training und Vitamin-D Gabe im Bereich der Frakturrisikoreduktion nicht in Abrede. Körperliches Training und Vitamin-D Substitution ist unbestritten ein obligater Bestandteil der leitliniengerechten Osteoporose-Therapie im Bereich der Sturzprophylaxe, insbesondere bei Personen mit hohem Sturzrisiko [479]. Die Vitamin-D Konzentration sollte daher gemessen und bei nachgewiesenem Mangel ausreichend substituiert werden.

Fazit

Die vorliegende Literatur lässt klare Empfehlungen zur additiven Vitamin-D Gabe bei einem körperlichen Training nicht zu. Primär liegt der Aspekt nahe, dass eine Vit-D Supplementierung lediglich im Falle eines Mangelzustandes positive Effekte auf die Knochenfestigkeit ausübt. Dies gilt jedoch weitgehend unabhängig von der Kombination mit körperlichem Training. Weitere Studien mit geeignetem Studiendesign und Trainingsprotokoll sollten den kombinierten Effekt körperlichen Trainings und additiver Vitamin-D Gabe im Mangelzustand und bei ausreichender Vit-D Konzentration evaluieren.

⁵⁰ Bestenfalls eine der vier Studien lag im Mittel im Bereich von 20 ng/ml 25-OH-Vitamin D3 als Schwellenwert für eine Insuffizienz [472].

4.6. Empfehlungen zur Kombination von körperlichem Training und Protein-Supplementierung

Ungefähr ein Drittel der Knochenmasse besteht aus Protein, somit erscheint eine ausreichende Proteinzufuhr für Aufbau und Erhalt des Knochens essentiell zu sein. Verschiedene Studien deuten darauf hin, dass eine höhere Proteinzufuhr als die empfohlene Tagesdosis (Recommended Dietary Allowance, RDA) die Knochenmineraldichte/den Knochenmineralgehalt erhöhen kann [480,481]. Eine aktuelle Übersicht systematischer Reviews/Übersichtsarbeiten mit Erwachsenen stuft die Evidenz für einen positiven Effekt von Gesamtprotein, tierischen oder pflanzlichen Proteinen, auf die KMD und das Frakturrisiko⁵¹ allerdings als unzureichend ein [484]. Ziel der vorliegenden systematischen Übersichtsarbeit mit Meta-Analyse war daher die Generierung von Evidenz für eine Interaktion zwischen körperlichem Training und Proteinzufuhr auf die Knochengesundheit bei Erwachsenen mittleren Alters und älteren Menschen.

Methodik

Eine systematische Übersichtsarbeit und Meta-Analyse [30] gemäß PRISMA, schloss Untersuchungen anhand folgender Kriterien ein: (a) Erwachsene ab 45 Jahren ohne spezifische Erkrankungen, b) Interventionen, die körperliches Training mit einer hohen Proteinzufuhr über die Nahrung oder einer Protein-/Aminosäuresupplementation kombinierten, c) Kontrollgruppen, die ausschließlich körperliches Training oder Protein-Interventionen erhielten, d) KMD/Knochenmasse (BMC) (primär) oder osteoporotischen Frakturen (sekundär) als Endpunkte, e) randomisierte und quasi randomisierte kontrollierte Studiendesigns. Die Literaturrecherche umfasste fünf elektronische Datenbanken (Medline via Ovid, Web of Science via Clarivate, Cochrane via Wiley, CINAHL via Ebsco, SportDiscuss via Ebsco Host) ohne sprachliche Einschränkungen für Artikel, die bis zum 24. Januar 2023 veröffentlicht wurden (PROSPERO; ID: CRD42022334026). Die Suche kombinierte Blöcke zu den Suchbegriffen "Protein", "Bewegung", "Knochen" und "RCTs". Abb. 22 zeigt das Flussdiagramm der Literaturrecherche. Abweichend von der bisherigen Vorgehensweise wurde die methodische Studienqualität bzw. das Verzerrungsrisiko mittels Cochrane RoB II bewertet (Abb. 60, Anhang) und die Vertrauenswürdigkeit in die Evidenz mittels GRADE-Ansatz evaluiert.

Ergebnisse

Zusammenfassend konnten 10 Studien mit 570 Teilnehmern in die Arbeit eingeschlossen werden [112,485-493]. Drei Studien schlossen postmenopausale Frauen ein [112,486,491], eine davon [491] fokussierte auf Frauen mit einer Osteopenie/Osteoporose. Neun Studien führten progressives DRT, eine Studie ein Ausdauertraining durch. Die Interventionsdauer der Untersuchungen war mit 12-39 Wochen vergleichsweise kurz. Die Placebo-kontrollierte Proteinsupplementierung basierte auf Milch-, Soja- oder Kollagen-Protein mit einer täglichen Dosis von 10-40 g. Eine Studie [486] untersuchte den Effekt einer täglichen Zufuhr von 220 g magerem Fleisch. Insgesamt acht Studien untersuchten den additiven Effekt von Protein und körperlichem Training und werden in der vorliegenden Arbeit diskutiert. Die Tabellen 55-57 sowie Abb. 60 zeigen Studien-, Teilnehmer-, Interventionscharakteristika der Untersuchungen sowie die methodische Studienqualität gemäß RoB II Ansatz.

⁵¹ ...mit Ausnahme von Hüftfrakturen, hier berichten zwei von drei systematischen Übersichtsarbeiten positive Effekte hoher Proteinzufuhr [482,483].

PRISMA 2020 flow diagram for new systematic reviews which included searches of databases, registers and other sources

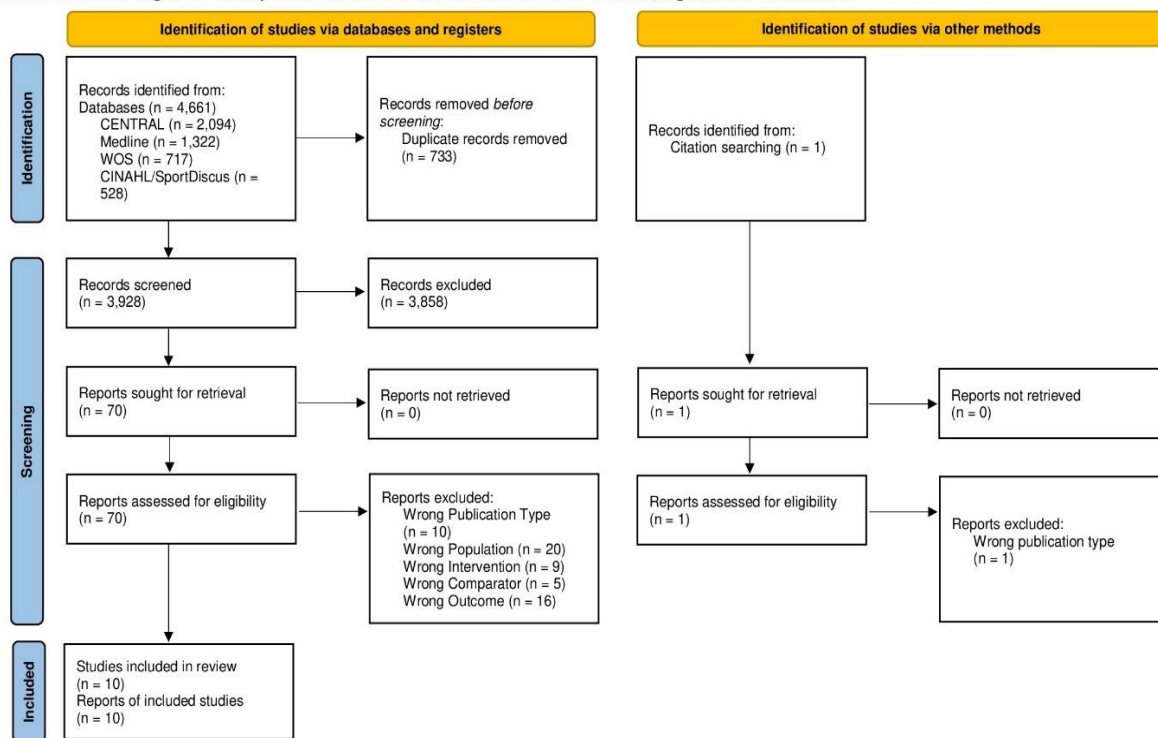


Abb. 22: Flussdiagramm des Suchprozesses „Einfluss von Proteinaufnahme und körperlichem Training auf die Knochendichte und Frakturinzidenz“ [31]

Bis auf eine Studie (Quantitativer Ultraschall: QUS) erfassen alle Studien die KMD/BMC mittels DXA. Zwei Studien erfassten die Gesamtkörper-ROI, drei die LWS-ROI und 7 Studien unterschiedliche ROI des proximalen Femurs. Leider konnten lediglich Studien, welche die Knochenmasse (n=6) untersuchten, in die gepoolte Analyse eingeschlossen werden.

Nach Ausschluss einer Arbeit, die keine Effektgrößen für die BMC berichtete [485], konnten fünf Studien mit 196 Teilnehmern in die Analyse der Daten eingeschlossen werden [487-489,492,493]. Die (Meta-)Analyse ergab, dass eine additive Proteingabe im Vergleich zu isoliertem körperlichem Training zu keiner oder nur marginalen Zunahme der BMC unterschiedlicher Körperregionen (s.o.) führt (MD: 0,026 kg, 95%-KI: -0,003 bis 0,054 kg; $I^2=58\%$; Abb. 59). Eine Sensitivitätsanalyse unter Ausschluss einer Untersuchung [493], deren Proteinintervention von den übrigen Studien abwich (Kollagenpeptide- vs. Milchproteinbasierte Supplemente), deutet basierend auf einer niedrigen Vertrauenswürdigkeit in die Evidenz auf keine oder marginale Effekte auf die BMC (MD: 0,01 kg; 95%-KI: -0,01 bis 0,03 kg; $I^2=0\%$) (Abb. 59) hin. Eine Analyse der LWS oder proximalem Femur-ROI konnte aufgrund fehlender Daten nicht durchgeführt werden. Geschlechterunterschiede konnten nach Analyse nicht identifiziert werden, ebenso zeigte eine Subanalyse der Interventionsdauer (12 vs. 24 Wochen) keine unterschiedlichen Effekte. Parallel zu dem Ergebnis für die BMC, konnte auch die qualitative Synthese der wenigen Untersuchungen, die auf die KMD fokussierten [486,490], keine additiven Effekte von Proteingabe und körperlichem Training gegenüber isoliertem Training zeigen. Im Detail weisen die beiden Untersuchungen, die den Effekt 16-wöchiger kombinierter Interventionen gegenüber reiner Trainingsintervention u.a. auf die KMD an LWS und proximalen Femur Regionen untersuchten, an keiner Region Effekte aus.

Diskussion

Die vorgelegte Arbeit ist die erste systematische Übersichtsarbeit und Meta-Analyse, welche den kombinierten Effekt von körperlichem Training und Proteingabe versus der jeweiligen isolierten Intervention auf BMC/KMD oder Frakturinzidenz erfasst. Zusammenfassend weisen die Daten darauf hin, dass eine überwiegend über Milchproteine generierte Protein-Supplementierung keinen oder nur einen marginalen, über ein körperliches Training hinausgehenden Effekt zeigt. Hidayat et al. [494] beschreibt in seiner systematischen Übersicht keine Effekte einer ebenfalls Milchprotein-basierten Proteinsupplementierung auf die Knochendichte unterschiedlicher ROIs oder Biomarker des Knochenstoffwechsels. Die Autoren, die neben reinen Proteininterventionen auch fünf Trainings-RCTs mit Proteinsupplementierung einschlossen⁵², berichten ebenfalls keine additiven Effekte zusätzlicher Proteingabe. Auch Studien, die den Effekt unterschiedlicher Proteindosen (20, 40, 60 g/d) oder Proteinquellen auf die Knochenmasse untersuchten, konnten keine Unterschiede nachweisen [480,494,495].

Mehrere methodische Limitationen der eingeschlossenen Untersuchungen können zu diesem Ergebnis beigetragen haben. Neben der (sehr) geringen Studiendauer der meisten Untersuchungen (12 Wochen), waren Knochenparameter wie die KMD/BMC selten primärer Studienendpunkt, sodass viele Untersuchungen schlicht eine zu geringe Fallzahl zur Adressierung dieser Endpunkte aufwiesen. Weitere Limitationen der eingeschlossenen Studien waren die Variation der Proteinsupplementierung hinsichtlich Zusammensetzung und Dosis, das Fehlen einer Erfassung der basalen (habituellen) Proteinzufuhr in vier Studien, sowie eine breite Spanne der basalen Proteinzufuhr im Bereich 0,81 bis 1,3 g/kg KG/Tag (also nicht zwingend eine unzureichende Zufuhr) in den übrigen 6 RCTs. Eine weitere Limitation der vorliegenden Untersuchung ist, dass relevante ROIs wie LWS und proximaler Femur aufgrund fehlender Daten nicht dezidiert adressiert werden konnten. Eine aktuelle systematische Übersichtsarbeit und Meta-Analyse (insgesamt 9 RCTs) berichtet in diesem Zusammenhang inkonsistente Effekte von Milch-/Molkeprotein auf KMD und Knochenmarker, mit ausbleibenden signifikanten Effekten für die LWS- und proximalen Femur KMD [496]. Allerdings gelten die oben aufgeführten Limitationen in ähnlichem Maße für diese Arbeit.

Fazit

Im Bereich einer additiven Proteingabe zeigt sich eine ähnliche Problematik wie im Bereich der Vit-D Supplementierung. Darüber hinaus ist die Studiendauer vieler Untersuchungen möglicherweise zu kurz (<6 Monate), um die Validierung des Trainingserfolges über die DXA-Methode sicherzustellen. Primär scheint eine Substituierung im Mangelzustand besonders relevant zu sein, bei z.T. fehlender Angabe der basalen Zufuhr lieferte allerdings keine der Untersuchungen einen Hinweis auf eine entsprechende Minder-/Unterversorgung, zumindest bei Heranziehen einer Empfehlung von 0,8 bzw. 1,0 g/kg Körpergewicht/d [497]. Legt man allerdings die Empfehlung der PROTAGE Gruppe [498] von 1,2 g/kg Körpergewicht/d für ältere Menschen zugrunde, so liegt die Mehrzahl der Untersuchungen zu Studienbeginn zumindest in einem suboptimalen Bereich. Ein wichtiger Aspekt ist zudem, dass alle Studien ein DRT (2-3x 45-60 min/Woche) mit überschwelliger Reizhöhe durchgeführt haben, sodass die Notwendigkeit einer höheren Proteinzufuhr [498] durchaus vorlag. Dass im Rahmen der Muskel-/Knocheninteraktion durch verbesserte Muskelgrößen positive Effekte am Knochen generiert werden, liegt nahe, kann aber bedingt durch die kurze Interventionsdauer der

⁵² Aufgrund jüngeren Lebensalters (<45 Jahre) und nicht ausschließlicher Protein-Supplementierung wurden vier dieser fünf Studien nicht in die vorliegende Untersuchung eingeschlossen.

Untersuchungen nicht verifiziert werden. Trotz dieser unübersichtlichen und unklaren Gemengelage möchten wir im Gegensatz zur Vitamin D Supplementierung an dieser Stelle für eine additive Proteingabe begleitend zu einem körperlichen Training zumindest eine neutrale Empfehlung aussprechen. Weitere dezidierte Studien in diesem Spannungsfeld sind angezeigt.

Bewertung der Studienqualität und Transferierbarkeit der Ergebnisse

Die Generierung der vorliegenden Evidenz erfolgte via systematischer Literaturrecherche und Meta-Analyse, die 10 RCTs mit kleiner bis moderat hoher Fallzahl (Evidenzgrad 1a gemäß AQRH) berücksichtigte. Eingeschlossen wurden u.a. Studien mit postmenopausalen Frauen (n=4) und Männern 45 Jahre und älter (n=2). Eine Studie schloss postmenopausale Frauen mit Osteopenie/Osteoporose ein. Die Transferierung der vorliegenden Ergebnisse auf die Grundgesamtheit postmenopausaler Frauen und Männer in höherem Lebensalter erscheint somit angemessen. Trainingsinhalte waren überwiegend DRT, allerdings lag die Studiendauer in 8 von 10 Untersuchungen unter 20 Wochen. Leider konnte eine Analyse der Effekte auf die relevanten Regionen LWS und Hüfte nicht durchgeführt werden. Das Verzerrungsrisiko wurde bei sechs Arbeiten mit „einigen Bedenken“ und bei vier Studien als „hoch“ bewertet (Abb. 60, Anhang). Die methodische Qualität der vorgelegten Meta-Analyse mittels R-AMSTAR [32] ergab 43 von 44 Punkten (Tab. 61).

Formulierung der Empfehlung

28	Empfehlung 28	Neu, Stand 2024
Empfehlungsgrad 0	Bei postmenopausalen Frauen oder Männern 45 Jahre und älter mit ausreichender Proteinzufuhr kann eine additive Proteingabe zu einem körperlichen Training zur Verbesserung der Knochenfestigkeit erwogen werden.	
Evidenzgrad 1a	[30]	
	Konsensstärke: 100%	

5. Ableitung von Trainingsempfehlungen zur Reduktion von Sturzhäufigkeit und Sturzimpact.

5.1. Einführung

Der wichtigste Risikofaktor für Frakturen im Alter sind Stürze [499]; mehr als 95% der Hüftfrakturen werden durch Stürze verursacht [500].

Stürze sind ein häufiges Ereignis bei älteren Menschen und haben erhebliche Auswirkungen auf die öffentliche Gesundheit. Zahlreiche internationale Kohortenstudien mit prospektiver Datenerhebung zeigen, dass etwa jeder Dritte selbstständig lebende Menschen ab 65 Jahren mindestens einmal pro Jahr stürzt [501,502]. Mit weiter zunehmendem Alter und in anderen Settings (Notaufnahmen, Krankenhäuser, Pflegeeinrichtungen) bzw. bei spezifischen Erkrankungen/Syndromen (z.B. Demenz, Parkinson, Schlaganfall) werden zum Teil deutlich höhere Sturzraten berichtet [503]. In Deutschland ereignen sich so jedes Jahr ca. fünf bis sechs Millionen unbeabsichtigte Stürze bei Menschen über 65 Jahren [504].

Stürze sind die Hauptursache für Verletzungen beim älteren Menschen und assoziiert mit einer erhöhten Sterblichkeit [505-508]. Etwa 22-60% der Betroffenen erleiden durch Stürze körperliche Verletzungen, die von Prellungen, Schnitten, Verstauchungen und Schürfwunden bis hin zu Frakturen und schweren Kopfverletzungen reichen [502]. Stürze bei Personen ab 65 Jahren sind daher die häufigste Ursache für verletzungsbedingte Hospitalisierungen [502,509] und für traumatische Hirnverletzungen [510].

Die Anzahl der Stürze, die in Frakturen resultieren, liegt bei ca. 2-6% [511-515], ca. 1-2% der Stürze haben eine Fraktur des proximalen Femurs zur Folge [514,516]. Mit zunehmendem Alter erhöht sich die Frakturhäufigkeit überproportional zur Sturzhäufigkeit [517-519]. Nach Evans [517] steigt bei Menschen zwischen 65 und 85 Jahren die Inzidenz von sturzbedingten Schenkelhalsfrakturen in einer Relation von 200:1 (65 Jahre) auf 10:1 (85 Jahre). Diese drastische Erhöhung der Inzidenzrate kann nur unvollständig mit der Reduktion der Knochenfestigkeit erklärt werden; altersbedingt biomechanisch ungünstig verlaufende Stürze mit einem hohen Impact auf den Knochen sind zunehmend zu berücksichtigen [520-522].

Stürze mit und ohne Verletzungsfolgen sind Determinanten für Funktionsverluste bei grundlegenden und instrumentellen Aktivitäten des täglichen Lebens [523,524]. Stürze und wiederholte Stürze sind zentrale Prädiktoren für den Umzug in stationäre Pflegeeinrichtungen [523-525]. Neben körperlichen Verletzungen stellen psychische Folgen von Stürzen oder deren stetige Antizipation Einschränkungen für das Individuum dar. Bis zu 92% der Gestürzten und mehr als 50% der älteren Personen, die nicht gestürzt sind, entwickeln eine Sturzangst [526,527]. Diese ist mit einer schlechteren Leistungsfähigkeit bei physischen-, funktionalen- und kognitiven Tests verbunden [528,529]. Als wesentliche Folge werden Aktivitäten eingeschränkt, was in einer Abwärtsspirale aus Inaktivität, Dekonditionierung und Vertrauensverlust resultiert und zu einem fortschreitend erhöhten Sturzrisiko führt [530,531]. Physische, psychische und soziale Folgen von Stürzen können die Lebensqualität älterer Menschen zunehmend einschränken [532,533].

5.2. Risikofaktoren für Stürze

Zahlreiche epidemiologische Studien haben eine Vielzahl an Risikofaktoren für Stürze im Alter identifiziert [534-537]. Tab. 9 spezifiziert einige Sturzrisikofaktoren, die durch ein körperliches bzw. motorisch-kognitives Training beeinflussbar sind.

Tab. 9: Ausgewählte modifizierbare Risikofaktoren für Stürze respektive Trainingsziele eines körperlichen Trainings zur Reduktion von Sturzereignissen (in Anlehnung an [534-537])

Risikofaktorkategorie	Risikofaktoren
Posturale Instabilität	- Langsames freiwilliges/bewusstes Stepping - Unzureichendes reaktives Stepping - Gestörte Transferfähigkeit (sit-to-stand) - Reduzierte Ganggeschwindigkeit - Erhöhte Gangvariabilität - Gestörte Stabilität im Stehen - Gestörte Stabilität beim Anlehnen/Greifen
Sensorische Defizite	- Reduzierte Kontrastsensitivität - Reduzierte Vestibulärfunktionen - Reduzierte Propriozeption
Reduzierte neuromuskuläre Funktionalität	- Reduzierte muskuläre Maximalkraft - Reduzierte Schnellkraft - Langsame Einfachreaktionszeit - Langsame Wahlreaktionszeit
Kognitive Störungen	- Störungen der Exekutivfunktionen - Langsame Informationsverarbeitungsgeschwindigkeit
Psychologische Konsequenzen	- Erhöhte Bedenken zu Stürzen (u.a. Sturzangst) - Depressive Symptomatik

Hinzu kommen mehrere andere („unabhängige“)⁵³ Sturzrisikofaktoren, z.B. Synkope [538], kardiovaskuläres Risiko, Blutdruckschwankungen [539], sturz-relevante Medikation/Polyparmazie [540,541], Hyperkyphose [542] oder/und geringe Ermüdungswiderstandsfähigkeit [543], die ebenfalls über ein geeignetes körperliches Training relevant verbessert werden können (u.a. [544-548]).

Mehrere dieser Faktoren lassen sich nicht eindeutig einer Kategorie zuordnen. Darüber hinaus interagieren sie miteinander und die Wirkpfade sind zum Teil unbekannt. Die relative Bedeutung einzelner Faktoren ist abhängig vom Individuum und der Situation und lässt sich somit nur eingeschränkt bewerten. Diese intrinsischen Risikofaktoren werden durch extrinsische, umweltbedingte Risikofaktoren beeinflusst (z.B. posturale Instabilität durch ungeeignetes Schuhwerk). Die jeweilige Aktivität muss im Kontext der Situation und des Fähigkeitslevels des Individuums gesehen werden [549]. Dieser Dreiklang determiniert das individuelle Expositionslevel und damit die Sturzgefährdung einer Person [550]. I.d.R. haben prospektive Kohortenstudien im Themenfeld „Sturz“ eine Nachbeobachtungszeit von 12 Monaten, in denen Sturzereignisse erfasst werden; Aussagen über Risikofaktoren intermittierender Natur sind somit meist nicht zu treffen.

Die Identifizierung eines Risikofaktors legt den Umkehrschluss nahe, dass dessen Verbesserung zu einer Reduktion von Stürzen führt. Trotz guter Evidenz, dass zahlreiche Faktoren modifizierbar sind, ist dies jedoch in der Praxis oft nicht der Fall oder zumindest nicht belegt. Zu begründen ist dies möglicherweise durch die multifaktorielle Genese des Sturzereignisses. Zu berücksichtigen ist auch, dass sich das individuelle Risikoprofil mit der

⁵³ Zumindest innerhalb der biometrischen Analyse. Dass zwischen den genannten Risikofaktoren z.T. eine enge Interaktion besteht, darf vorausgesetzt werden.

Anzahl an Risikofaktoren verändert [515]. Daher fokussieren wir im Folgenden auf die Evidenz körperlichen Trainings auf den klinisch belastbaren Endpunkt „Vermeidung des Sturzereignisses“ einschließlich „sturzbedingter Verletzungen“⁵⁴. Zudem wird am Ende des Abschnitts die Evidenz körperlichen Trainings auf den Sturzimpact (Aufprallkraft) kurz (...durch wenige wissenschaftliche Studien adressiert...) dargestellt.

5.3. Vermeidung des Sturzereignisses

Das Vorliegen eines Risikofaktorenkonglomerats bei älteren Menschen und unklare Wirkpfade erschweren eine Festlegung detaillierter Trainingsziele und die entsprechende „Durchdeklinierung“ von Trainingsinhalten und Belastungskomponenten, wie dies für den Bereich „Knochenfestigkeit“ vorgenommen werden konnte. Insbesondere fehlen direkte Vergleiche von Trainingsinhalten und Belastungskomponenten durch kontrollierte Interventionsstudien mit dem Endpunkt „Vermeidung des Sturzereignisses“ [551] - meist aus methodisch-biometrischen Gründen. So sind beim Vergleich von Trainingsprotokollen deutlich geringere Unterschiede zu erwarten⁵⁵, als bei Vergleich mit inaktiven Kontrollen. Daher sind zur Absicherung von signifikanten Effekten auf die Ereignisrate oder den dichotomen Endpunkt Sturz (ja/nein) kaum leistbare Fallzahlen erforderlich. Meta-Analysen, die in Sensitivitäts- oder Subgruppenanalysen auf Trainingsgrößen fokussieren (z.B. [465,552-554]), sind aufgrund von Heterogenität durch unterschiedliche (Risiko-)Profile der eingeschlossenen Stichproben und von relevanten Unterschieden zwischen Trainings- und Messprotokollen derselben Kategorie [551] nur bedingt geeignet, belastbare Trainingsempfehlungen auszusprechen.

Aufgrund dieser limitierten Evidenz können Empfehlungen in Bezug auf Dosisparameter körperlichen Trainings nur sehr eingeschränkt abgeleitet werden. Der primäre Fokus des vorliegenden Abschnitts liegt daher auf den Trainingsinhalten, welche in Anlehnung an die Empfehlung von Lamb et al. [551] kategorisiert wurden.

Die aktuelle Version des Cochrane Reviews zum Thema Bewegungsinterventionen und Stürze im Alter und dessen Update im Rahmen der kürzlich publizierten „World Guidelines for Falls Prevention and Management for Older Adults“ der WHO schlossen insgesamt 116 Studien mit 25.160 Teilnehmer ein [14,465]. Die Resultate (Tab. 10) sind vergleichbar mit denen anderer kürzlich publizierter Übersichtsarbeiten [11,555,556]. Der meta-analytische Effekt von Bewegungsinterventionen auf den Endpunkt Sturzrate war eine relative Risikoreduktion von 23% (RaR: 0,77; 95%-Konfidenzintervall 0,71 bis 0,83, hohe Vertrauenswürdigkeit), während der Effekt auf den Anteil Stürzender mit -15% (RR: 0,85; 0,81 bis 0,89, hohe Vertrauenswürdigkeit) geringer war. Bezüglich sturzbedingter Frakturen ergaben sich Effekte von -27% (RR: 0,73; 0,56 bis 0,95, geringe Vertrauenswürdigkeit), für sturzbedingte medizinische Behandlungen wurde eine Reduktion von 39% berichtet (0,61; 0,47 bis 0,79, geringe Vertrauenswürdigkeit). Sturzbedingte Hospitalisierungen zeigten sich nicht-signifikant um 22% (0,78; 0,51 bis 1,18, sehr geringe Vertrauenswürdigkeit) reduziert (Tab. 10). Die Dauer der Wirksamkeit dieser Interventionen scheint sich zumindest über ca. 24 Monate zu erstrecken, mit sehr limitierter Datenlage jenseits dieses Zeitraums [557].

⁵⁴ Reduktion der Anzahl der Sturzereignisse in der Kohorte (=Sturzrate; „rate ratio“ [RaR (z.T. auch IRR benannt, hier der Einfachheit halber konsistent RaR)]) oder Anteil der Stürzenden („risk ratio“ [RR], „odds ratio [OR]“).

⁵⁵ Siehe Metaanalysen für Trainingshäufigkeit oder -intensität.

Tab. 10: Übersicht über die grundsätzlichen Effekte von Bewegungsinterventionen verglichen mit Kontrollgruppen in Bezug auf die Reduktion von sturzrelevanten Endpunkten [14,465].

Vergleich	Endpunkt	Anzahl Studien; Teilnehmende	Effekt [RaR, RR] (95%-KI)	Vertrauenswürdigkeit
Bewegung vs. Kontrolle	Sturzrate	64; 14.306	0,77 (0,71 bis 0,83)	⊕⊕⊕⊕
	Anteil Stürzender	63; 13.518	0,85 (0,81 bis 0,89)	⊕⊕⊕⊕
	Sturzbedingte Frakturen	10; 4047	0,73 (0,56 bis 0,95)	⊕⊕⊖⊖
	Sturzbedingte Hospitalisierung	2; 1705	0,78 (0,51 bis 1,18)	⊕⊖⊖⊖
	Sturzbedingte medizinische Behandlung	5; 1019	0,61 (0,47 bis 0,79)	⊕⊕⊖⊖

RaR: rate ratio; RR: risk ratio/relative risk

Vertrauenswürdigkeit gemäß GRADE Methodologie: ⊕⊕⊕⊕ hoch, ⊕⊕⊕⊖ moderat, ⊕⊕⊖⊖ gering, ⊕⊖⊖⊖ sehr gering

Auch bei Personen mit spezifischen Erkrankungen und Syndromen wurde die Wirksamkeit von strukturierten Bewegungsinterventionen untersucht, wobei die Anzahl der Studien hier wesentlich geringer ausfällt. Bei Personen mit kognitiven Einschränkungen erzielten strukturierte Trainingsinterventionen eine Reduktion der Sturzrate um 30% (RaR: 0,70; 0,52 bis 0,95, 9 Studien; geringe Vertrauenswürdigkeit), jedoch keine Reduktion des Sturzrisikos (RR: 1,01; 0,90 bis 1,14, 9 Studien; geringe Vertrauenswürdigkeit) [558]. Hierbei scheinen Studien-Level Charakteristika den Effekt nicht zu modifizieren (z.B. kognitiver Störungstyp, Interventionsumfang, Adhärenz). Limitierte positive Evidenz zeigt zudem die Wirksamkeit von körperlichem Training auf die Sturzrate bei Menschen mit Morbus Parkinson (RaR: 0,47; 0,30 bis 0,73, 6 Studien), während nach Schlaganfall (RaR: 0,74; 0,42 bis 1,32, 3 Studien) oder nach kürzlichem Krankenhausaufenthalt (RaR: 1,16; 0,88 bis 1,52, 3 Studien) [553] keine positiven Effekte berichtet werden.

Nur wenige „pragmatische“ Studien existieren in Bezug auf Bewegungsinterventionen zur Sturzprävention, sodass die bisherige Evidenz tendenziell „Idealbedingungen“ reflektiert. Dies führt möglicherweise zu einer Überschätzung der Wirksamkeit in realen Versorgungsstrukturen und -prozessen, vor allem in nicht-institutionellen Settings wie der Gemeinde. Ein Beispiel hierfür ist die PREFIT Studie aus Großbritannien, welche u.a. das als Goldstandard anerkannte Otago Exercise Programm (OEP) durchführte und keine positiven Effekte für Stürze und Frakturen nach 12 und 18 Monaten erzielte [559]. Im Gegensatz dazu wurde der sturzreduzierende Effekt des OEP in mehreren anderen Studien, u.a. in einer spezialisierten Sturzklinik gezeigt [560,561]. Neben individualisierter Trainingssteuerung und anderen trainingsrelevanten Faktoren spielt die Interventionstreue („fidelity“) eine bedeutende Rolle zur Aufrechterhaltung positiver Effekte nach Implementierung in verschiedene Settings. Leider sind nur sehr wenige Programme zur Sturzprävention bzgl. dieser Endpunkte wissenschaftlich evaluiert worden.

5.3.1. Trainingsinhalte (und -methoden) zur Sturzreduktion

Einzelne Trainingsinhalte zeigen unterschiedliche Effekte auf Stürze und erlauben indirekt den Vergleich verschiedener Trainingsverfahren. Ein Überblick gibt Tabelle 11.

Tab. 11: Übersicht über die Wirksamkeit verschiedener Bewegungskomponenten verglichen mit Kontrollgruppen in Bezug auf die Reduktion von sturzrelevanten Endpunkten [14,465].

Vergleich	Endpunkt	Anzahl Studien; Teilnehmende	Effekt [RaR, RR] (95%-KI)	Vertrauenswürdigkeit
Gleichgewichts- & Funktionstraining vs. Kontrolle	<i>Sturzrate</i>	39; 7989	0,76 (0,70 bis 0,82)	⊕⊕⊕⊕
	<i>Anteil Stürzender</i>	37; 8288	0,87 (0,82 bis 0,91)	⊕⊕⊕⊕
	<i>sturzbedingte Frakturen</i>	7; 2139	0,44 (0,25 bis 0,76)	⊕⊕⊖⊖
multimodale Programme vs. Kontrolle*	<i>Sturzrate</i>	15; 2283	0,72 (0,56 bis 0,93)	⊕⊕⊕⊖
	<i>Anteil Stürzender</i>	17; 1623	0,78 (0,64 bis 0,96)	⊕⊕⊕⊖
	<i>sturzbedingte Frakturen</i>	3; 1810	0,85 (0,62 bis 1,16)	⊕⊕⊖⊖
Tai Chi vs. Kontrolle	<i>Sturzrate</i>	9; 3196	0,77 (0,61 bis 0,97)	⊕⊕⊕⊖
	<i>Anteil Stürzender</i>	8; 3677	0,80 (0,70 bis 0,91)	⊕⊕⊕⊕
Krafttraining vs. Kontrolle	<i>Sturzrate</i>	5; 327	1,14 (0,67 bis 1,97)	⊕⊖⊖⊖
	<i>Anteil Stürzender</i>	2; 163	0,81 (0,57 bis 1,15)	⊕⊖⊖⊖
	<i>sturzbedingte Frakturen</i>	1; 73	0,97 (0,14 bis 6,49)	⊕⊖⊖⊖
Tanzen vs. Kontrolle	<i>Sturzrate</i>	1; 522	1,34 (0,98 bis 1,83)	⊕⊖⊖⊖
	<i>Anteil Stürzender</i>	1; 522	1,35 (0,83 bis 2,20)	⊕⊖⊖⊖
Gehen/Walking vs. Kontrolle	<i>Sturzrate</i>	2; 441	1,14 (0,66 bis 1,97)	⊕⊖⊖⊖
	<i>Anteil Stürzender</i>	2; 441	1,05 (0,71 bis 1,54)	⊕⊖⊖⊖
	<i>sturzbedingte Frakturen</i>	1; 97	0,66 (0,11 bis 3,76)	⊕⊖⊖⊖

*beinhalten als primäre Komponente Gang, Gleichgewichts- und Funktionstraining sowie Krafttraining;

bei Nichtnennung eines Endpunktes wurden hierfür keine Studien identifiziert;

RaR: rate ratio; RR: risk ratio/relative risk

Vertrauenswürdigkeit gemäß GRADE Methodologie: ⊕⊕⊕⊕ hoch, ⊕⊕⊕⊖ moderat, ⊕⊕⊖⊖ gering, ⊕⊖⊖⊖ sehr gering

Darüber hinaus ergaben Subgruppenanalysen keine signifikanten Unterschiede bezüglich der Wirksamkeit in Abhängigkeit der folgenden Charakteristika:

- Alter <75 versus ≥75 Jahre
- Erhöhtes Sturzrisiko versus kein/niedriges Sturzrisiko
- Einzel- versus Gruppentraining
- Anleitung durch Gesundheitsfachberuf (meist physio-/bewegungstherapeutische Fachkräfte) versus keine Anleitung durch Gesundheitsfachberuf

Meta-Regression erlaubt das Aufklären der Varianz im multivariablen Modell. In Bezug auf die Sturzrate zeigt sich die Bedeutung des Faktors „Gleichgewichts- und Funktionstraining“⁵⁶ [465]. Die Kriterien für ein effektives Gleichgewichtstraining sind die folgenden drei Aspekte [562]:

- Kontrollierte Bewegungen des Körperschwerpunkts
- Verringerung der Unterstützungsfläche
- Minimale Unterstützung durch die oberen Extremitäten

⁵⁶ ...beinhaltet auch Tai Chi und multimodale Interventionen, welche diese Übungsformen enthielten.

Gang- und Gleichgewichtstraining, Perturbations- oder Krafttraining können mehrere der oben genannten Risikofaktoren (respektive Trainingsziele) simultan beeinflussen. Geeignete Methodenvarianten (z.B. funktionelles Schnellkraft-/Powertraining, HIT) können darüber hinaus (mehrere) ausgewählte individuelle Sturzrisikofaktoren effektiver und/oder zeiteffizienter adressieren.

Multiple Trainingsinhalte

Mehrere systematische Übersichtsarbeiten und Meta-Analysen (u.a. [14,552,563-565]) weisen einem Trainingsprotokoll, das mehrere der unten aufgeführten Trainingsinhalte (Kategorien)⁵⁷ appliziert, die höchste Evidenz für positive Effekte auf die Sturzhäufigkeit zu. Dies steht in Einklang mit dem meist multifaktoriellen Risikofaktorenprofil der älteren Teilnehmer. Die Mehrzahl der übergreifenden Trainingsprotokolle beinhalten Trainingsformen wie Gleichgewichts-, funktionelles Training und Krafttraining. In ihrer Netzwerk-Meta-Analyse von Interventionsstudien (n=169) nennen Sibley et al. [564] Trainingsinhalte mit Anforderungen an antizipatorische Reaktion/reaktive Gleichgewichtsfähigkeit, dynamische Stabilität, Gleichgewichtskontrolle nahe der Stabilitätsgrenze und Flexibilität als günstigstes Konglomerat.

Bewertung der Studienqualität und Transferierbarkeit der Ergebnisse

Die Generierung der vorliegenden Evidenz erfolgte via (vorliegender) systematischer Literaturübersicht und Meta-Analysen/Meta-Regression von Sherrington et al. [14,465] (Tab. 11, Evidenzgrad 1a gemäß AQRH). Die Analyse der unterschiedlichen Sturzendpunkte gemäß GRADE Methodologie zeigte für alle Endpunkte (Sturzrate, Anzahl Stürzende, Stürzer mit Frakturen) eine moderat hohe Vertrauenswürdigkeit. In die Analyse eingeschlossen wurden überwiegend Studien mit postmenopausalen Frauen und Männern 65 Jahre und älter. Die Transferierbarkeit der vorliegenden Ergebnisse auf die Grundgesamtheit postmenopausaler Frauen und Männer in höherem Lebensalter, also die Zielpopulation der vorliegenden LL im Spannungsfeld der Sturzprophylaxe erscheint somit uneingeschränkt möglich.

Formulierung der Empfehlung

29	Empfehlung 29	Neu, Stand 2024
Empfehlungsgrad A	In Abhängigkeit von individuellen Sturzrisikofaktoren, sollen bei einem Training zur optimierten Sturzreduktion mehrere (der unten aufgeführten ⁵⁸) Trainingsinhalte adressiert werden	
Evidenzgrad 1a	[14,465]	
	Konsensstärke: 100%	

Im Weiteren erfolgt eine Darstellung der Relevanz unterschiedlicher „Kategorien“ [551] von Trainingsinhalten für die Sturzhäufigkeit.

⁵⁷ ...eine klare Zuordnung der Kategorie ist allerdings oft schwierig (z.B. funktionelles Krafttraining vs. funktionelles Training).

⁵⁸ ...siehe Empfehlungen 30-44.

Gang-, Gleichgewichts- und funktionelles Training

Für diese Kategorie von Trainingsinhalten [551] berichten unterschiedliche Autoren die höchste Evidenz für positive Effekte auf die Sturzhäufigkeit [14,553,566]. Neben Gangtraining/-übungen mit unterschiedlicher Zielsetzung (Schrittlänge, -frequenz, Geschwindigkeits-, Richtungsänderungen, Multitasking) und funktionellen Inhalten (z.B. Hindernisparcours, Spielformen, Krafttraining unter Gleichgewichtsanforderungen, spezifische Bewegungsaufgaben) ist ein Training der posturalen Kontrolle zentraler Inhalt von Trainingsprotokollen zur Sturzprävention [465,562]. Grundsätzlich sind „Gleichgewichtstypen“ [549] wie stationäres bzw. kontinuierliches Gleichgewicht, also statische („Gleichgewichtszustand halten“) und dynamische („Gleichgewichtszustand wiederherstellen“) wie auch proaktive/antizipatorische („Posturalmuskulatur vor Entstehung eines destabilisierenden Ereignisses aktivieren“) und reaktive Gleichgewichtsfähigkeit („Gleichgewichtszustand nach einem destabilisierenden Ereignis wiederherstellen“) als Trainingsziele bedeutsam [567]. Von Relevanz ist der geringe Transfer von trainierten zu nicht-trainierten Aufgaben [568]. Trainingsverantwortliche sollten daher verbesserungsbedürftige Aufgaben identifizieren und diese im Training (und als Teil der Testbatterie) ansteuern. Je stärker das Training den Alltag und variierende Umweltbedingungen berücksichtigt, umso effektiver wird es. Stürze geschehen meist während der Lokomotion [569-571], daher sollten Übungen der Gangadaptabilität, d.h. Übungen, bei denen das normale Gangmuster gebrochen und modifiziert wird, regelmäßiger Bestandteil des Trainings sein (s.u. „Stepping“). Ungleich der Steuerung im Kraft- oder Ausdauersport wird die Reizhöhe eines Gleichgewichtstrainings primär über die Körperübung, respektive Übungsausführung generiert. Eine Progression der Intensität und entsprechende Individualisierung kann dabei sukzessive über eine Verringerung der Unterstützungsfläche, eine Verlagerung des Körperschwerpunkts, Reduktion des Armeinsatzes zum Erhalt der posturalen Stabilität, einen zunehmend labilen Untergrund, Ausschalten von Analysatoren/Reduktion des sensorischen Inputs (visuell, taktil), Perturbation (Störreize) sowie kognitive (aufmerksamkeitsfordernde) Zusatzreize generiert werden [572-574]. Ein weiterer Schritt innerhalb der Progressionskette ist das Gleichgewichtstraining unter (Vor-)Ermüdung z.B. durch ein vorhergehendes Ausdauer- oder Krafttraining; eine Situation, die der Sturzrealität älterer Menschen nahekkommt [543].

Bewertung der Studienqualität und Transferierbarkeit der Ergebnisse

Die Generierung der vorliegenden Evidenz erfolgte via (vorliegender) systematischer Literaturübersicht und Meta-Analysen/Meta-Regression von Sherrington et al. [14,465] (Tab. 11, Evidenzgrad 1a gemäß AQRH). Die Analyse der unterschiedlichen Sturzendpunkte gemäß GRADE Methodologie zeigte für die Sturzrate, und die Anzahl der Stürzenden eine hohe Vertrauenswürdigkeit. Die trainingsmethodischen Empfehlungen (40 und 41) beruhen primär auf den Ergebnissen von randomisierten und nicht randomisierten Untersuchungen (Evidenzgrad 1b gemäß AQRH) hoher methodischer Qualität sowie einer Meta-Analyse aus dem Bereich „Perturbation“. In die Analyse eingeschlossen, wurden überwiegend Studien mit postmenopausalen Frauen und Männern 65 Jahre und älter. Die Transferierbarkeit der vorliegenden Ergebnisse auf die Grundgesamtheit postmenopausaler Frauen und Männer in höherem Lebensalter, also die Zielpopulation der vorliegenden LL im Spannungsfeld der Sturzprophylaxe ist somit uneingeschränkt möglich.

Formulierung der Empfehlung

30	Empfehlung 30	Neu, Stand 2024
Empfehlungsgrad A	Gang-, Gleichgewichts- und funktionelles Training sollen essentieller Bestandteil von Trainingsprotokollen zur Sturzprävention sein.	
Evidenzgrad 1a	[14,553,566]	
	Konsensstärke: 100%	
31	Empfehlung 31	Neu, Stand 2024
Empfehlungsgrad A	Im Rahmen eines Trainings der Gleichgewichtsfähigkeit sollen sowohl kontinuierliche, reaktive als auch proaktive Inhalte Berücksichtigung finden.	
Evidenzgrad 1b	[549,567,572-574]	
	Konsensstärke: 100%	
32	Empfehlung 32	Neu, Stand 2024
Empfehlungsgrad B	Übungen, bei denen das normale Gangmuster gebrochen und modifiziert wird, sollten regelmäßiger Bestandteil des Gleichgewichtstrainings sein.	
Evidenzgrad 1b	[575,576]	
	Konsensstärke: 100%	

Perturbationstraining

Perturbationstraining stellt als „perturbationsbasiertes Gleichgewichtstraining“ (Perturbation-based balance training; PBT)⁵⁹ einen besonders effektiven Ansatz des Gleichgewichtstrainings dar [577]. Im Rahmen des PBT sind zwei Aspekte besonders relevant: (1) Es werden externe Reize appliziert und (2) die Perturbation führt zu kompensatorischen motorischen Reaktionen, um einen Sturz zu verhindern. Plötzliche Störungen der posturalen Stabilität (Perturbationen) erfordern zunächst eine gute reaktive, dann aber auch bewusste Gleichgewichtskontrolle, im Sinne der Integration von Sensorik, zentraler Verarbeitung und motorischer Reaktion. Via Perturbationen appliziertes Training kann über verschiedene Verfahren angewandt werden. Neben motorisierten Platten und nahe am Körperschwerpunkt befindlichen motorisierten Kabelzügen kommen perturbierende Laufbänder, sowie bewegliche Platten auf einer Gangbahn zum Einsatz, welche Perturbationsreize während des Gehens ausüben, Stolpern oder Ausrutschen initiieren und adäquate Reaktionen erfordern [577-579]. Wesentlicher Vorteil des provozierten Gleichgewichtsverlustes und der darauffolgenden Reaktion ist ein sehr realitätsnahes Training unter maximaler Sicherheit. PBT ist das einzige Trainingsparadigma, bei dem eine Person tatsächlich einer Sturzexposition ausgesetzt wird, während andere Formen des körperlichen Trainings Risikofaktoren für Stürze modifizieren. Dem wichtigen Trainingsprinzip der Aufgabenspezifität folgend, handelt es sich hier also um ein Training, in dem diejenigen Funktionen trainiert werden, welche „im Falle eines Falles“ tatsächlich notwendig sind [580].

Eine aktuelle Meta-Analyse [581] berichtet vergleichsweise hohe Effekte auf die Reduktion der Sturzrate älterer Menschen sowie Patienten mit spezifischen Erkrankungen (Schlaganfall, Parkinson) von 40% (RaR: 0,60; 0,42 bis 0,86, 13 Studien, geringe Vertrauenswürdigkeit). Der

⁵⁹ “balance training that uses repeated, externally applied mechanical perturbations to trigger rapid reactions to regain postural stability in a safe and controlled environment” [577].

Effekt war geringer beim Endpunkt „Anteil der Stürzenden“ mit einer Reduktion von 25% (RR: 0,75; 0,60 bis 0,92, 13 Studien, geringe Vertrauenswürdigkeit). Der Effekt auf beide Endpunkte blieb auch im Vergleich zu aktiven Kontrollgruppen stabil. Eine Untersuchung [582] applizierte dabei lediglich eine Trainingseinheit, bei der die gesunden älteren Menschen durch im Boden eingelassene, lockere Platten in insgesamt 24 Perturbationsvorgängen (via Gurtsystem gesichert) aus dem Gleichgewicht gebracht wurden. Nach dieser einmaligen Intervention bzw. TE reduzierten sich die Sturzereignisse im Folgejahr relativ zur Kontrollgruppe um über 40%. Dementgegen konnte eine kürzlich publizierte Studie in Dänemark bei gesunden älteren Menschen lediglich eine nicht-signifikante 22% Reduktion nach 80 min multidirektionalen PBT, verteilt über vier TE erzielen [575]. Auch ein erster pragmatischer RCT wurde inzwischen publiziert [583]. In einer heterogenen Stichprobe älterer Menschen mit Gang- und Gleichgewichtsproblemen erzielte ein physiotherapeutisch angeleitetes, individualisiertes multimodales Trainingsprogramm (4-6 Wochen, 2-3x ca. 45 min/Woche), welches ca. 15 min Perturbationstraining auf dem Laufband applizierte, eine Reduktion sturzbedingter Verletzungen um 62% (RR: 0,38; 0,21 bis 0,75) sowie eine nicht-signifikante 17% Reduktion für den Anteil Stürzender (RR: 0,83; 0,63 bis 1,09) drei Monate nach Ende des Trainings. Noch nach einem Jahr zeigten sich grenzwertig signifikante Effekte (RR:0,82; p=0.054) im Vergleich zum multimodalen Training ohne Perturbation aber gleicher Trainingsdosis und Kontaktzeit. Relevante physische und psychische Risikofaktoren für Stürze zeigten indes keine Zwischengruppenunterschiede, was auf das Vorliegen anderer Wirkmechanismen hindeutet [583].

Perturbationen des Gleichgewichts können auch ohne hohen apparativen Aufwand ins Training integriert werden, bspw. durch Verwendung unebener oder instabiler Untergründe, durch Auslenken des Körperschwerpunkts bspw. im Rahmen von Partnerübungen (kontrolliertes „Schubsen“) oder Verwendung einfacher Geräte [584]. Wichtig bleibt, dass der Reiz mit einer Stärke, die ohne motorische Reaktion zu einem Verlust des Gleichgewichts führen würde, appliziert wird. Über ausreichende Sicherheitsmaßnahmen ist das Risiko für einen tatsächlich vorkommenden Sturz zu minimieren. Trotzdem ist PBT mit einem erhöhten Risiko für unerwünschte Nebenwirkungen assoziiert [581]. PBT kann auch bei ausreichenden Sicherheitsmaßnahmen zunächst Angst induzieren und muss auch aus diesem Grund physisch eng supervidiert werden. Das Training kann auf mehreren Ebenen progressiv gesteigert werden z.B. über kognitive, visuelle und taktile Reize, sowie den Grad selbstinduzierter Körperschwerpunktverlagerung. Bei apparativen Verfahren erfolgt die Steigerung der Schwierigkeit primär über das Verändern von Kraft und Geschwindigkeit der applizierten Störreize (Übersicht in [577]).

Fazit

- PBT ist eine hocheffektive Methodenvariante für herausforderndes, funktionelles Gleichgewichtstraining zur Reduktion der Sturzhäufigkeit.
- PBT erscheint als sinnvolle Ergänzung zum konventionellen Training mit potentiell zusätzlichem sturzreduzierendem Effekt.
- Gerätebasiertes PBT ist eine sichere Möglichkeit, Perturbationen zu applizieren.
- Geräteunabhängiges PBT erfordert hohe Standards an Sicherheit und Supervision.

Bewertung der Studienqualität und Transferierbarkeit der Ergebnisse

Die Generierung der vorliegenden Evidenz erfolgte über bereits vorliegende systematische Literaturübersichten und Meta-Analysen (Evidenzgrad 1a gemäß AQRH)[581], allerdings von geringer Vertrauenswürdigkeit, sowie mindestens einem RCTs mit hoher methodischer Qualität [575]. In die Analyse eingeschlossen, wurden überwiegend Studien mit postmeno-

pausalen Frauen und Männern 65 Jahre und älter. Die Transferierbarkeit der vorliegenden Ergebnisse auf die Grundgesamtheit postmenopausaler Frauen und Männer in höherem Lebensalter, also die Zielpopulation der vorliegenden LL, ist somit uneingeschränkt möglich.

Formulierung der Empfehlung

33	Empfehlung 33	Neu, Stand 2024
Empfehlungsgrad A	Perturbationsbasiertes Gleichgewichtstraining soll ein Bestandteil von Trainingsprotokollen zur Sturzprävention sein.	
Evidenzgrad 1a	[575,581]	
	Konsensstärke: 100%	

„Stepping“

Da die meisten Stürze selbstständig lebender älterer Menschen während des Gehens geschehen, kommt der Gangadaptabilität, im Sinne einer Anpassung des Schrittmusters an die situativen Begebenheiten, eine zentrale Rolle zu. Neben dem reaktiven Greifen ist die Schrittstrategie, d.h. das Setzen eines oder mehrerer Schritte, variierend in Bezug auf Zeit, Richtung, Geschwindigkeit und Länge, i.d.R. die letzte Möglichkeit, einen Sturz oder dessen Folgen zu verhindern oder abzumildern. Nicht überraschend sind daher Stepping Tests geeignet, das Sturzrisiko älterer Menschen vorherzusagen [585]. Neben dem reaktiven Stepping (siehe Perturbationstraining) ist auch volitionales⁶⁰ Stepping ein sinnvolles Trainingsparadigma. Bei diesem werden Gang- bzw. Schrittmuster als Reaktion auf Veränderungen in der Umwelt (bspw. über Farben, Musik etc.) angepasst, indem korrekte und/oder schnelle Schritte gesetzt werden müssen. Stepping-Programme trainieren die Reaktionsgeschwindigkeit und kognitive Leistungen, die als motorisch-kognitive Fähigkeiten im Alltag von hoher Relevanz sind, um sich sicher in sich verändernden Umwelten zu bewegen.

Meta-analytische Ergebnisse von Stepping-Interventionen bei älteren Menschen zeigen Effektgrößen von 40-60% für die Reduktion von Sturzrate (moderate Vertrauenswürdigkeit) und –risiko (geringe Vertrauenswürdigkeit), sowie basierend auf zwei RCTs eine Reduktion des Anteils der Personen mit sturzbedingten Frakturen um 80% (sehr geringe Vertrauenswürdigkeit) [575,586]. Dabei kam es ebenfalls zu Verbesserungen der Gehgeschwindigkeit unter Einfach- und Doppel-/Mehrfachbelastung, dem Timed-up & Go Test, dem Einbeinstand als Maß des statischen Gleichgewichts sowie der Wahlreaktionszeit, nicht jedoch von Kraftparametern [575,586]. Beispiele für Stepping-Interventionen sind das Square Stepping Exercise (SSE) Programm und das Multitarget Stepping.

Beim SSE [587] müssen die Teilnehmer präzise (mit dem ganzen Fuß, der Fußspitze oder der Ferse) in Quadrate treten und dabei bis zu 196 verschiedene Schrittmuster mit zunehmender Komplexität befolgen. Diese kostengünstige kognitiv-motorische Intervention beinhaltet die serielle und parallele Verarbeitung von Reizen. Im Vergleich zu einem Kraft- und Gleichgewichtstraining gleicher Dauer und Frequenz (12 Wochen, 2 TE/Wo.) berichtete die SSE-Gruppe eine geringere Anzahl stolperbedingter Stürze über 14 Monate, - bei vergleichbaren Verbesserungen in Funktionstests (Beinkraft, Gleichgewicht, Schritt- und Ganggeschwindigkeit) [588]. Auch im Vergleich zu einem Walking-Programm war SSE mit höheren Effekten auf Beinkraft, Gleichgewicht, Beweglichkeit und Reaktionszeit verbunden [587].

⁶⁰ bewusste, willentliche Umsetzung von Zielen und Motiven in Ergebnisse.

Während des Multitarget-Steppings setzen die Personen entsprechend farblich markierter Vierecke entweder präzise Schritte oder müssen ihre Schrittreaktion unterdrücken (Go/No-Go-Aufgaben) [589]. In einer 24-wöchigen randomisierten, kontrollierten Studie führten sturzängstliche, ältere Menschen in zwei Gruppen ein identisches Multikomponenten-Bewegungsprogramm mit 2 TE/Wo. von 30 Minuten durch. Die Interventionsgruppe führte zusätzlich 5-7 Minuten (2 min Trainingszeit) Multitarget-Stepping durch, während die Kontrollgruppe in derselben Zeit lediglich normal ging. Die 24-wöchige 12 Multitarget-Stepping Intervention führte zu signifikant höheren Verbesserungen von Schrittgenauigkeit, Mobilität und Ganggeschwindigkeit [589]. Darüber hinaus war das Multitarget-Stepping mit einer Reduktion des Sturzrisikos und der Sturzrate (RR: 0.35; 0.19 bis 0.66) um zwei Drittel sowie mit einem geringeren Risiko für sturzbedingte Frakturen (RR: 0.22; 0.06 bis 0.80) im 12-monatigen Nachbeobachtungszeitraum verbunden [589].

Fazit

- Volitionales Stepping ist eine hocheffektive Methodenvariante für herausforderndes, funktionelles Gleichgewichtstraining zur Reduktion der Sturzhäufigkeit.
- Trainingsprogramme sollten Übungen, bei denen das normale Gangmuster gebrochen und modifiziert wird, beinhalten.
- Volitionales Stepping sollte Komponenten enthalten, welche kognitiv anspruchsvoll sind.

Bewertung der Studienqualität und Transferierbarkeit der Ergebnisse

Die Generierung der vorliegenden Evidenz erfolgte via (vorliegender) systematischer Literaturübersicht und Meta-Analyse (Evidenzgrad 1a gemäß AQRH)[586,590] mit moderater Vertrauenswürdigkeit (Sturzrate) sowie mindestens einem RCTs von hoher methodischer Qualität [591]. In die Analysen eingeschlossen, wurden überwiegend Studien mit postmenopausalen Frauen und Männern 65 Jahre und älter. Die Transferierbarkeit der vorliegenden Ergebnisse auf die Grundgesamtheit postmenopausaler Frauen und Männer in höherem Lebensalter, also die Zielpopulation der vorliegenden LL, ist somit uneingeschränkt möglich.

Formulierung der Empfehlung

34	Empfehlung 34	Neu, Stand 2024
Empfehlungsgrad A	Volitionales Stepping soll essentieller Bestandteil von Trainingsprotokollen zur Sturzprävention sein.	
Evidenzgrad 1a	[586,590,591]	
	Konsensstärke: 100%	

3D-Training (Tai Chi, Qi Gong, Tanz)

Für Tai Chi liegt eine hohe Evidenz für signifikant positive Effekte auf die Sturzhäufigkeit bei selbstständig lebenden älteren Menschen (RaRs zwischen 0,51 und 0,87, moderate bis hohe Vertrauenswürdigkeit), hospitalisierten älteren Menschen (RaR: 0,48, 95%-KI: 0,35 bis 0,65, moderate Vertrauenswürdigkeit) sowie Parkinson- (OR: 0,29, 95%-KI: 0,11 bis 0,79, niedrige Vertrauenswürdigkeit) und Schlaganfallpatienten (OR: 0,21, 0,09 bis 0,48, niedrige Vertrauenswürdigkeit) vor [592-595]. Tai Chi beeinflusst dabei zahlreiche bekannte Risikofaktoren. Hierzu zählen u.a. das statische und dynamische Gleichgewicht [595-598], die Propriozeption insbesondere der Fuß- und Kniegelenke [597,599-601], das Gangbild [602], die Reaktionszeit [603], die Sturzangst [595,604] aber auch Verbesserungen der Exekutivfunktionen [605]. Subgruppeneffekte deuten allerdings darauf hin, dass Personen mit erhöhtem Sturzrisiko weniger profitieren. Insgesamt zeigen sich größere Effekte durch den Yang Stil verglichen mit dem Sun Stil [606] wobei für den letztgenannte Variante nur wenige Untersuchungen vorliegen.

Im Gegensatz zu Tai-Chi, sind die Ergebnisse der wenigen Untersuchungen [607-609], die den Effekt unterschiedlicher, meist folkloristischer und/oder klassischer Tanzformen untersuchen sehr inkonsistent. Nach sechs Monaten Jaques-Dalcroze Eurhythmie mit Dual-Task Training wurde eine Reduktion der Sturzrate von 54% berichtet (RaR: 0,46; 95%-KI: 0,27 bis 0,79) [609]. Die unangemessen „gepowerte“ Studie von Eyigor et al. [607] zeigte tendenziell positive Ergebnisse nach acht Wochen Volkstanz. Dementgegen fanden Merom et al. [608] nach 12-monatiger Intervention (Volks- oder Gesellschaftstanz), auch nach Adjustierung von Störvariablen, eine ca. 20% höhere Sturzinzidenz (nicht signifikant) in der Interventionsgruppe, verglichen mit einer nicht-trainierenden Kontrollgruppe. Post-hoc-Subgruppenanalysen zeigten, dass die Sturzrate bei der Volkstanzgruppe höher war als bei der Gesellschaftstanzgruppe. Personen mit erhöhtem Sturzrisiko zu Studienbeginn profitierten von dem Programm nicht. Die Autoren argumentieren, dass neben dem Mangel ausreichender Gleichgewichtsanforderungen in der Intervention auch eine geringe Adhärenz (56%) diese Ergebnisse erklären könnte.

Tanzen führt nachweislich zu Verbesserungen des Gleichgewichts, des Gangs, der Mobilität, der Kraft und der Propriozeption bei älteren Menschen [610-612]. Es beinhaltet herausfordernde dynamische Gleichgewichtsübungen und erfordert sowohl serielle als auch simultane kognitive Verarbeitung. Die Ergebnisse für die Wirksamkeit auf die kognitive und körperliche Leistungsfähigkeit sind jedoch z.T. widersprüchlich und spiegeln die Vielfalt der Tänze in den Kulturen und deren unterschiedliche trainingsfördernde Stimuli wider.

Fazit

- Tai Chi reduziert die Sturzhäufigkeit selbstständig lebender, älterer Menschen und ist somit guter Trainingsinhalt eines Sturzpräventionstrainings.
- Derzeitig lässt die vorhandene Datenlage eine Empfehlung von „Tanzen“ zur Sturzprävention nicht zu. Zusätzliche detaillierte Studien sind notwendig um das Potential geeigneter Tanzformen zu evaluieren.
- Angesichts der Popularität in der älteren (weiblichen) Bevölkerung und grundsätzlich positiven Effekten auf übergreifende relevante Risikofaktoren höheren Lebensalters, verwundert es, dass Variationen von „Tanz“ bislang nicht intensiver evaluiert wurden.

Bewertung der Studienqualität und Transferierbarkeit der Ergebnisse

Die Generierung der vorliegenden Evidenz für Tai Chi erfolgte via (vorliegender) systematischer Literaturübersichten und Meta-Analysen (Evidenzgrad 1a gemäß AQRH) mit moderater bzw. hoher Vertrauenswürdigkeit für die Sturzhäufigkeit bei selbstständig lebenden oder hospitalisierten älteren Menschen. Die Empfehlungen für den Trainingsinhalt „Tanz“ beruht auf randomisierten Interventionsstudien niedriger bis moderater methodischer Qualität (Evidenzgrad 1ab gemäß AQRH) bei inkonsistenten Ergebnissen. In die Analysen eingeschlossen wurden überwiegend Studien mit postmenopausalen Frauen und Männern 65 Jahre und älter. Die Generalisierung der vorliegenden Ergebnisse auf die Grundgesamtheit postmenopausaler Frauen und Männer in höherem Lebensalter, also die Zielpopulation der vorliegenden LL, ist somit uneingeschränkt möglich.

Formulierung der Empfehlung

35	Empfehlung 35	Neu, Stand 2024
Empfehlungsgrad A	Tai Chi soll, bei vorliegender fachlicher Kompetenz, als Bestandteil von Trainingsprotokollen zur Sturzprävention Berücksichtigung finden.	
Evidenzgrad 1a	[592-595]	
	Konsensstärke: 100%	
36	Empfehlung 36	Neu, Stand 2024
Empfehlungsgrad 0	Tanzen und Tanzformen können im Rahmen eines Trainings zur Sturzprävention erwogen werden.	
Evidenzgrad 1b	[607-609]	
	Konsensstärke: 100%	

Kraft-/Schnellkrafttraining

Isoliertes Krafttraining wird im Rahmen der Sturzprävention sehr selten eingesetzt. Bei entsprechend niedriger Evidenzstärke zeigen sich in Abhängigkeit von Kollektiv und „Kraft“-Kategorisierung unterschiedliche Ergebnisse. So berichten Sherrington et al. [14,553] keine wesentlichen positiven Effekte (vs. inaktive KG), während Claudino et al. [613] ähnlich günstige Effekte wie bei anderen bewegungsbasierten Sturzprotokollen beschreiben (sehr geringe Vertrauenswürdigkeit). Eine große, kürzlich publizierte Studie mit gesunden älteren Menschen fand keinen sturzreduzierenden Effekt von heimbasiertem Krafttraining (RaR; 1,10; 95%-KI: 0,99 bis 1,22) mit potentiell erhöhtem Sturzrisiko in den Subgruppen Männer (RaR: 1,23; 1,02 bis 1,48), jüngere Teilnehmende (RaR: 1,16; 1,00 bis 1,33) und Personen mit Sturzgeschichte (RaR: 1,17; 1,00 bis 1,37) [476]. Bezüglich des Endpunkts „sturzbedingte Verletzungen“ ergaben sich ähnliche Ergebnisse (RaR: 1,08; 0,97 bis 1,21); Subgruppe Männer (RaR: 1,28; 1,05 bis 1,56), jüngere Teilnehmer (RaR: 1,19; 1,03 bis 1,38). Auch extra-vertebrale Frakturen wurden über den 36-monatigen Beobachtungszeitraum nicht reduziert (RaR: 1,06; 0,77 bis 1,47) [614]. Vice versa zeigen RCTs bei sehr alten und oder physisch limitierten Menschen positive Effekte auf das Sturzrisiko [615,616].

Einigkeit herrscht indes darüber, dass ein Kraft-/Schnellkrafttraining im Spannungsfeld der Sturzprävention überwiegend funktionelle Übungen beinhalten sollte (u.a. [14]). Im Rahmen zahlreicher Studien wurden außerdem kombiniertes Kraft- und Gleichgewichtstrainings durchgeführt; der selektive Effekt dieser Komponenten lässt sich allerdings nicht ableiten. Die Schnellkraft hat für die körperliche Funktionalität grundsätzlich einen höheren Stellenwert als die Maximalkraft [617,618]. Funktionelle Tests, die in engem Zusammenhang mit der Sturzprädiktion gesehen werden, zeigen nach einem Schnellkrafttraining z.T. signifikant günstigere Effekte verglichen mit Trainingstypen langsamerer Bewegungsgeschwindigkeit [619,620]. Hinzu kommt, dass im Falle eines Gleichgewichtsverlustes schnelle korrektive Bewegungen notwendig sind. Insofern ist das Training der Schnellkraft besonders geeignet, um funktionelle Verbesserungen zu erzielen [621] und, vergleichbar dem Perturbations-training, das reaktive Gleichgewicht zu verbessern [622]. Trotzdem ist die Evidenz für die Wirksamkeit auch schnellkräftiger Kraftreize auf die Reduktion von Stürzen limitiert. Solange keine positiven Studienergebnisse veröffentlicht werden, bleibt die Unsicherheit über den Nutzen eines Krafttrainings innerhalb von Sturzpräventionsprogrammen bei älteren Erwachsenen bestehen. Neben der limitierten Evidenz in Bezug auf Stürze ist zudem zu beachten, dass ein hochintensives Krafttraining bei vulnerablen älteren Menschen mit einem erhöhten Risiko muskuloskelettale Nebenwirkungen einhergehen kann (RR:3,6; 1,5 bis 8,0) [623].

Bei Fokus auf die unteren Extremitäten, ist ein Ganzkörper-Krafttraining im Rahmen der Sturzprävention sinnvoll, u.a. um die unten aufgeführten Strategien beim Sturz durch ein ausreichendes Kraft-/Schnellkraftniveau der Muskulatur von Rumpf und oberen Extremitäten zu gewährleisten [522,567]. Kommt eine Hyperkyphose als Sturzrisikofaktor hinzu [542], ist ein Krafttraining der Rumpfmuskulatur wichtiger Bestandteil des Trainingsprotokolls. Trainingsmethodisch kann nach ausreichender Konditionierungsphase die Reizhöhe des Krafttrainings individuell und (Knochen-)statusabhängig analog zu den Vorgaben eines Trainings der Knochenfestigkeit erhöht werden. Parallel dazu ist eine Variation der Bewegungsgeschwindigkeit mit Phasen schneller Bewegungsausführung elementar. Betrachtet man die gängige Sturzsituation älterer Menschen, die zum reaktiven (Wieder-) Herstellen der posturalen Stabilität ihr gesamtes Körpergewicht (schnell) bewegen müssen,

so ist ein Schnellkrafttraining mit moderat-hohen Widerständen (65-80% 1RM⁶¹) anzuraten. Ähnliches gilt für den Schulterbereich und die oberen Extremitäten, die den Sturz abfangen sollen. Eine muskuläre Ausbelastung bei Sitzende ist dabei nicht erforderlich und bei vulnerablen Personengruppen sogar kontraindiziert. Während in Studien meist ein Mehrsatztraining favorisiert wird [624], zeigt ein Einsatztraining bei älteren Menschen ähnlich hohe Effekte auf Kraftparameter und funktionelle Größen bei höherer Zeiteffektivität, was Raum für andere Trainingsinhalte zulässt [175,625].

Fazit

- Während die vorhandene Datenlage eine Empfehlung von isoliertem Krafttraining zur Sturzprävention derzeit nicht zulässt, sollte es bei Menschen mit Muskelschwäche oder funktionellen Einschränkungen essentieller Bestandteil von Trainingsprotokollen zur Sturzprävention sein.
- Die Verknüpfung von kraft-/schnellkraftorientierten Trainingsreizen, Gleichgewichtsfähigkeit und kognitiv-koordinativen Herausforderungen im Sinne eines funktionellen Krafttrainings erscheint empfehlenswert.
- Innerhalb des Krafttrainings sollten (falls möglich) Phasen hoher Bewegungsgeschwindigkeit und hoher Reizintensität implementiert werden.

Bewertung der Studienqualität und Transferierbarkeit der Ergebnisse

Die Generierung der vorliegenden Evidenz (Empfehlung 37 und 38) erfolgte über randomisierte und nicht randomisierte Untersuchungen niedrig bis moderat hoher Studienqualität (Evidenzgrad 1b gemäß AQRH), sowie Expertenrating der Lenkungsgruppe „Sturz“. Die vorliegenden Studien schlossen postmenopausale Frauen und Männer 65 Jahre und älter ein, sodass die Transferierbarkeit der vorliegenden Ergebnisse auf die Zielpopulation der vorliegenden LL gerechtfertigt erscheint.

Formulierung der Empfehlung

37	Empfehlung 37	Neu, Stand 2024
Empfehlungsgrad B	Bei Menschen mit Muskelschwäche oder funktionellen Einschränkungen sollte Krafttraining essentieller Bestandteil von Trainingsprotokollen zur Sturzprävention sein.	
Evidenzgrad 1b	[615,616]	
	Konsensstärke: 100%	
38	Empfehlung 38	Neu, Stand 2024
Empfehlungsgrad B	Kraft-/Schnellkrafttraining im Spannungsfeld der Sturzprävention sollte überwiegend eine funktionelle Ausrichtung verfolgen.	
Evidenzgrad 1b	[619,620]	
	Konsensstärke: 100%	

⁶¹ Das Einwiederholungsmaximum (1RM) ist das höchste Gewicht, das eine Person lediglich einmal unter korrekter Ausführung bewegen kann und dient als Maß für die individuelle Kraft.

Ausdauertraining

Geringe Ermüdungswiderstandsfähigkeit, kardiovaskuläre Limitationen/Blutdruckschwankungen und Synkopen sind Sturzrisikofaktoren, die insbesondere über ein Ausdauertraining erfolgreich adressiert werden können [539,543,545]. Möglicherweise aufgrund unspezifischer Probandenkollektive liegt derzeit keine Evidenz für positive Auswirkungen eines isolierten Ausdauertrainings im Bereich der Sturzprävention vor. Lediglich zwei Studien untersuchten (isoliertes) Walkingtraining in Bezug auf die Sturzhäufigkeit [110,626], mit sturzerhöhenden [110] oder fehlenden positiven [626] Effekten im Vergleich zu inaktiven Kontrollgruppen⁶². Sherrington et al. [553], die in ihrer Meta-Analyse Programme mit walking-Komponente (n=29) vs. Kontrolle analysieren, berichtigen zusammenfassend keine positiven Effekte auf die Sturzrate (IRR: 1,01; 95%-KI: 0,86 bis 1,20). Im Gegensatz dazu zeigte sich eine signifikante Verringerung des Sturzrisikos nach Walking-, im Vergleich zu Balancetraining, wenn man die Stürze pro körperlich aktivem Personentag (0,38; 0,19 bis 0,77) oder Schritthäufigkeit (0,47; 0,26 bis 0,85) adjustiert [627]. Die Einbeziehung eines Walking- oder Laufprogrammes zur Sturzprävention wird generell kontrovers diskutiert. Bei Personen mit hohem Sturzrisiko raten Sherrington et al. in ihrer Literaturübersicht und Meta-Analyse von 2011 von einem nicht-supervidierten Walkingtraining ab [628]. Die entsprechende Empfehlung basiert auf einem RCT [110], der bei Frauen mit Oberarmfraktur nach nicht-supervidiertem Walkingprogramm („brisk walking“) signifikant negative Effekte (vs. Kontrolle) auf die Sturzrate beobachtete.

Fazit

- Derzeit lässt die vorhandene Datenlage eine Empfehlung für isoliertes Ausdauertraining zur Sturzprävention nicht zu. Zusätzliche Studien sind notwendig.

Bewertung der Studienqualität und Transferierbarkeit der Ergebnisse

Die Generierung der vorliegenden Evidenz erfolgte für Empfehlung 39 über eine Meta-Analyse von Sherrington et al. [553] sowie über randomisierte klinische Studien mit moderat hoher Studienqualität [110,626,627]. Empfehlung 40 basiert auf den Ergebnissen einer randomisierten, placebokontrollierten Walkingstudie [110] mit moderat hoher methodischer Qualität (PEDro: 7 Punkte) sowie einem Expertenrating der Lenkungsgruppe „Sturz“ (DS, WK). Die vorliegenden Studien schlossen postmenopausale Frauen und Männer 65 Jahre und älter ein, sodass die Transferierbarkeit der vorliegenden Ergebnisse auf die Zielpopulation der vorliegenden LL gerechtfertigt erscheint.

Formulierung der Empfehlung

39	Empfehlung 39	Neu, Stand 2024
Empfehlungsgrad 0	Ein Ausdauertraining zur Verbesserung von Größen die in Zusammenhang mit der Sturzinzidenz stehen kann erwogen werden.	
Evidenzgrad 1a	[110,553,626,627]	
	Konsensstärke: 100%	
40	Empfehlung 40	Neu, Stand 2024
Empfehlungsgrad B	Nicht supervidierte Walking- oder Jogging-Programme sollten bei erhöhtem Sturzrisiko nicht mehr durchgeführt werden.	
Evidenzgrad 1b	[110]	
	Konsensstärke: 100%	

⁶² Ob bei den durchgeführten Walking Programmen/Komponenten in jedem Fall ein trainingswirksamer Reiz vorlag, ist unklar.

Beweglichkeit, Flexibilität

Untersuchungen, die den Effekt eines Beweglichkeitstrainings auf die Sturzinzidenz (versus inaktive Kontrollgruppe) erfassen, liegen nicht vor. In einigen Untersuchungen ist ein Training der Beweglichkeit neben Kraft- oder Gleichgewichtstraining primärer Trainingsinhalt [629-633], in vielen anderen Studien (Übersicht in [14]) hingegen nachrangiger Bestandteil. Flexibilität ist allerdings oft inhärenter Bestandteil anderer Trainingsinhalte wie Tai Chi oder Pilates. Die funktionelle Rationale für ein Beweglichkeitstraining⁶³ als komplementärer Trainingsinhalt erschließt sich [72] u.a. aus den Aspekten einer ausreichenden Beweglichkeit von Hüft- und Beinmuskulatur für einen weiten Ausfallschritt nach vorne/zur Seite beim Stolpern oder Ausrutschen oder einer ausreichenden Beweglichkeit der Rumpfmuskulatur beim Wegdrehen der exponierten Hüfte beim Sturz. Als Fazit ist aber zu ziehen, dass Evidenz für positive Effekte eines Beweglichkeitstrainings auf die Sturzhäufigkeit derzeit schlicht nicht existiert [14,634].

Fazit

- Derzeitig lässt die vorhandene Datenlage eine Empfehlung von Beweglichkeitstraining zur Sturzprävention nicht zu. Zusätzliche Studien sind erforderlich.

Bewertung der Studienqualität und Transferierbarkeit der Ergebnisse

Die Generierung der vorliegenden Evidenz erfolgte über ein Expertenrating der Lenkungsgruppe „Sturz“ (DS, WK), basierend auf den oben genannten Untersuchungen. Primär wurden postmenopausale Frauen und Männer 65 Jahre+ berücksichtigt, sodass die Transferierbarkeit der vorliegenden Ergebnisse auf die Zielpopulation der vorliegenden Leitlinie gerechtfertigt erscheint.

Formulierung der Empfehlung

41	Empfehlung 41	Neu, Stand 2024
Empfehlungsgrad 0	Ein Beweglichkeitstraining kann im Rahmen eines Trainings zur Sturzprävention erwogen werden.	
Evidenzgrad 4	[14,629-634]	
	Konsensstärke: 100%	

Ergänzend zu den Inhalten der Klassifikation von Lamb und Kollegen [551], sind in den letzten Jahren weitere Trainingsparadigmen untersucht worden, die sich nicht eindeutig den bisher aufgeführten Kategorien zuordnen lassen und daher im Folgenden besprochen werden.

⁶³ Also Bewegungen mit optimaler Beweglichkeit/Schwingungsweise im Gelenk durchführen zu können.

Interaktives kognitiv-motorisches Training (IKMT)

Einführung

Die Bewältigung täglicher Aufgaben, einschließlich dem Erhalt einer aufrechten Körperhaltung und der sicheren Navigation in komplexen Umgebungen, erfordert eine angemessene Integration sensorischer, kognitiver und motorischer Reize [635], wobei mit zunehmendem Alter eine erhöhte kognitive Verarbeitung erforderlich ist [636]. Darüber hinaus erfordern viele tägliche Aktivitäten die Bewältigung von zwei (oder mehr) gleichzeitigen Aufgaben. Eine kognitive Domäne, welche für das Sturzrisiko besonders relevant ist, sind Exekutivfunktionen und dabei insbesondere die Inhibition [590,591,637-639]. Um die Komplexität der Realität trainingsmethodisch abzubilden, erscheint die Applikation interaktiver kognitiv-motorischer Trainingsformen (IKMT) geeignet. Dabei handelt es sich um ein Trainingsparadigma in sogenannten „enriched environments“, bei dem die Teilnehmer zur Durchführung einer Aufgabe über Bewegungen (bspw. Schritte) mit einem Computer interagieren und hierbei Sensorik (Sehen, Hören, Propriozeption), Kognition (Exekutivfunktionen [z.B. Vermeiden von Objekten, Distraktoren, zu unterdrückende No-Go-Reize], Informationsverarbeitungsgeschwindigkeit, räumliche Orientierung) und Motorik (z.B. Stepping, Gehen) integrieren. IKMT umfasst Virtual Reality (VR)-Applikationen, wie das Navigieren in simulierten Straßenszenen mit VR-Brillen sowie Exergames (=Exercise plus Videogames) [640]. Lapiere et al. [641], welche die Effekte von Exergame-unterstützten Interventionen auf Sturzrate, SPBB, TUG, Gleichgewichtsfähigkeit und Sturzangst erfassen, schließen 24 RCTs mit aktiven und inaktiven Kontrollgruppen ein. Bezogen auf die Sturzrate (4 RCTS) berichten die Autoren einen geringen, aber signifikant positiven Effekt ($-0,91$, 95%-KI: $-0,17$ bis $-1,65$) in Vergleich zur inaktiven KG. Daneben zeigen sich signifikant positive Effekte für Mobilität (TUG) und Gleichgewichtsfähigkeit nicht aber SPBB und Sturzangst. Insgesamt zeigt sich die Studienlage, was den Effekt von IKMT auf Sturzgrößen betrifft zusammenfassend sehr inkonsistent. Während kleinere Studien keine signifikant reduzierten Sturzendpunkte berichteten [642-644], konnten andere diese zeigen [645-648]. Da in der näheren Vergangenheit neue Untersuchungen publiziert wurden, erschien uns eine neu aufgelegt Literaturrecherche mit Meta-Analyse der Effekt von IKMT auf mehrere Sturzgrößen angemessen zu sein.

Methodik

Eine im Rahmen der Leitlinienerstellung durchgeführte, derzeit noch unveröffentlichte Übersichtsarbeit und Meta-Analyse [649], erfasst die Auswirkung von interaktiven kognitiv-motorischen Trainingsformen (IKMT) u.a. auf die Sturzrate, den Anteil der Stürzenden und Stürzende mit Verletzung. Fünf elektronische Datenbanken (Medline (PubMed), Cochrane CENTRAL, CINAHL, SPORTDiscus, PEDro), zwei Studienregister (International Clinical Trials Registry Platform (ICTRP) and clinicaltrials.gov für ongoing trials) sowie Referenzlisten und google scholar wurden ohne sprachliche Einschränkungen bis zum 19.4.2024 durchsucht. Die Arbeit inkludierte (1) gesunde und gesundheitlich limitierte Männer und Frauen im Mittel 45 Jahre und älter, die den Effekt von (2) Computer-Mensch Interaktion, Exergames, virtual (incl. augmented, mixed) reality Interventionen unter Einsatz großer Muskelgruppen⁶⁴, versus (3) (konventionell) aktive oder inaktive Kontrollgruppen (4) auf Sturzereignisse über mindestens 12 Wochen mittels (5) randomisierten kontrollierten Studienprotokollen erfasst haben. Eine Registrierung der Arbeit erfolgte unter PROSPERO CRD42023433477.

Abb. 23 zeigt das Flow-chart der Untersuchung.

⁶⁴ Studien die lediglich mit bspw. „Joysticks“ bzw. marginalem Körpereinsatz appliziert haben, wurden nicht berücksichtigt.

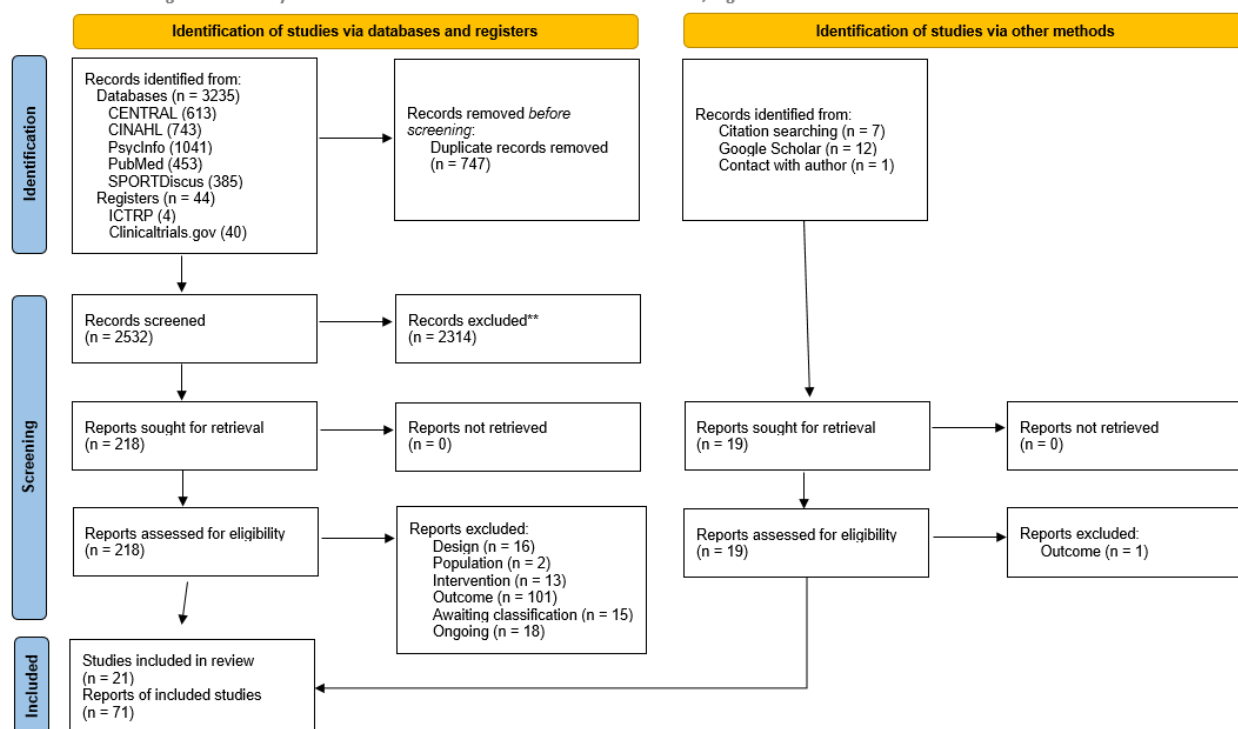


Abb. 23: Flussdiagramm des Suchprozesses „Einfluss von Interaktivem kognitiv-motorischem Trainings auf die Sturzhäufigkeit“ [29].

Die primäre statistische Analyse für die Sturzrate erfolgte mittels mixed-effects Poisson Regressionsmodell, die statistische Analyse der Stürzenden (Proportion of Fallers) wurde mittels einem mixed-effects logistischen Regressionsmodell durchgeführt. Daneben wurden mit letzterem Regressionsmodell Analysen für die Endpunkte „Anteil wiederholter Stürzer“, „Stürzer mit Verletzungen“, „Stürzer mit schweren Verletzungen“ und „Stürzer mit Frakturen“ durchgeführt (Tab. 60, Anhang). Untersuchungen, die in beiden Gruppen (IKMT und Kontrolle) keine Stürze verzeichneten, blieben in der Analyse unberücksichtigt. Bei jeweils mehr als 10 einschlägigen Untersuchungen wurden Sub- und/oder Sensitivitätsanalysen durchgeführt.

Ergebnisse „Sturzrate“

Zusammenfassend wurden nach Literaturrecherche und Eligibilitätsprüfung 18 Studien [642,643,645,647,648,650-661] mit 23 Vergleichen eingeschlossen (Abb. 23). Die kumulierte Fallzahl betrug 1228 Teilnehmer in der IKMT- und 1473 Teilnehmer in der KG. Die Untersuchungen unterschieden sich in Bezug auf Studien- und Teilnehmercharakteristika, Trainingsprotokoll sowie methodische Qualität (Tab.) sehr deutlich (Anhang Tabellen 58-60).

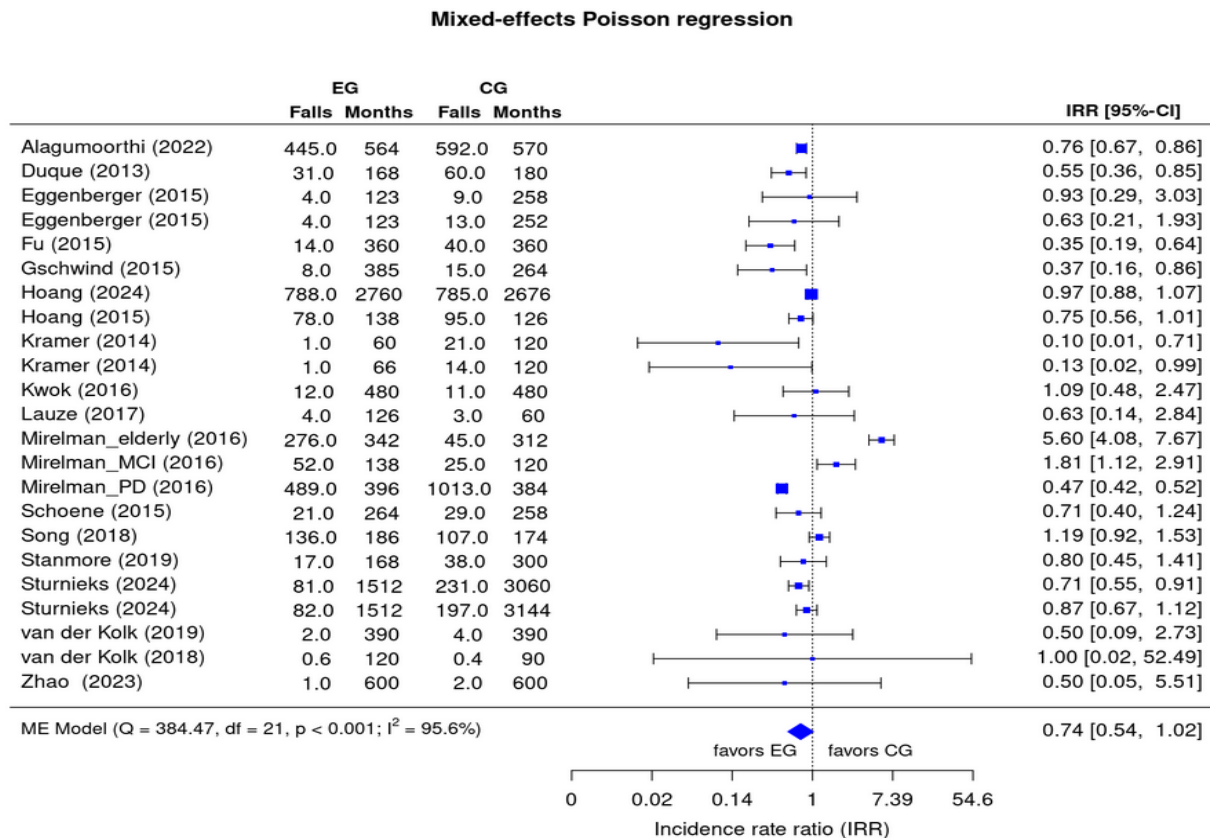


Abb. 24: Forrest-plot der Ergebnisse „Einfluss von Interaktivem kognitiv-motorischem Trainings auf die Sturzrate“

Zusammenfassend zeigte die Meta-Analyse einen statistisch grenzwertig (nicht) signifikanten moderaten Effekt von IKMT-Interventionen auf die Sturzrate (IRR: 0,75, 95%-KI: 0,54–1,02). Die Heterogenität der Ergebnisse ($I^2=96\%$; Abb. 24) lag sehr hoch. Die durchgeführten Subgruppenanalysen u.a. für Lebensalter (<65 vs. ≥ 65 Jahre), Fallzahl/Gruppe ($n < 150$ vs. $n \geq 150$), basales Sturzrisiko (Stürze vs. keine Stürze), einschlägige basale Erkrankungen (ja vs. nein), basaler Funktionsstatus (gut vs. schlecht), IKMT-Typ (Spiele vs. Übungen), Trainingshäufigkeit (1-2 vs. 3 und mehr TE/Woche), Interventionsdauer (bis 12 vs. >12 Wochen), Intervention in KG (aktiv vs. inaktiv) oder Supervision (ja vs. nein) zeigten keine signifikanten Erklärungsbeiträge. Zum Teil gab es jedoch bedeutsame Unterschiede in den Punktschätzern, sodass zukünftige Studien notwendig sind, welche die statistische Power der Subanalysen höher avisieren. Die Subgruppe Setting („community“ vs. „institution“) zeigte einen größeren Effekt für Interventionen in institutionalisierten Settings im Vergleich zu community-basierten Interventionen. Dies basiert allerdings primär auf den sehr großen Effekten der Studie von Kramer et al. [654], die teilnehmerschwach war und ein hohes Verzerrungsrisiko aufwies. Die Sensitivitätsanalysen, bei welchen Studien (a) mit hohem Verzerrungsrisiko, (b) mit jüngeren Personen (c) cluster-randomisierte Studien und (d) Interventionen mit Durchführung des Trainingsprogramms im Sitzen ausgeschlossen wurden erbrachten vergleichbare Effekte wie das Hauptmodell.

Das Trichterdiagramm (Abb. 61, Anhang) ist nicht symmetrisch und deutet die Präsenz von Publikations- bzw. „small study“-Bias an. Abb. 61 zeigt im unteren und mittleren Bereich (kleine und moderat große Studien) ein auffälliges Überwiegen von Ergebnissen mit positivem

Ergebnis. Dieses Ergebnis der Asymmetrie wird vom LFK-Index (-1.5: leichte Asymmetrie) sowie von (mixed-effects-basierten) Regressionstest ($p=.044$) bestätigt.

Ergebnisse „Anteil der Stürzenden“

Zusammenfassend konnten nach Literaturrecherche und Eligibilitätsprüfung 15 Studien [642,643,645,650-659,661-663] mit 18 Gruppenvergleichen in die Analyse zum Einfluss von IKMT auf den Anteil der Stürzenden eingeschlossen werden (Abb. 25). Die kumulierte Fallzahl betrug 1308 Teilnehmer in der IKMT- und 1635 Teilnehmer in der KG. Das mixed-effects logistische Regressionsmodell ergab einen signifikanten Effekt zugunsten der IKMT-Gruppe (OR: 0,72, 95%-KI: 0,58–0,91). Die Heterogenität der Ergebnisse kann als gering ($I^2=22\%$; Abb. 25) eingeschätzt werden.

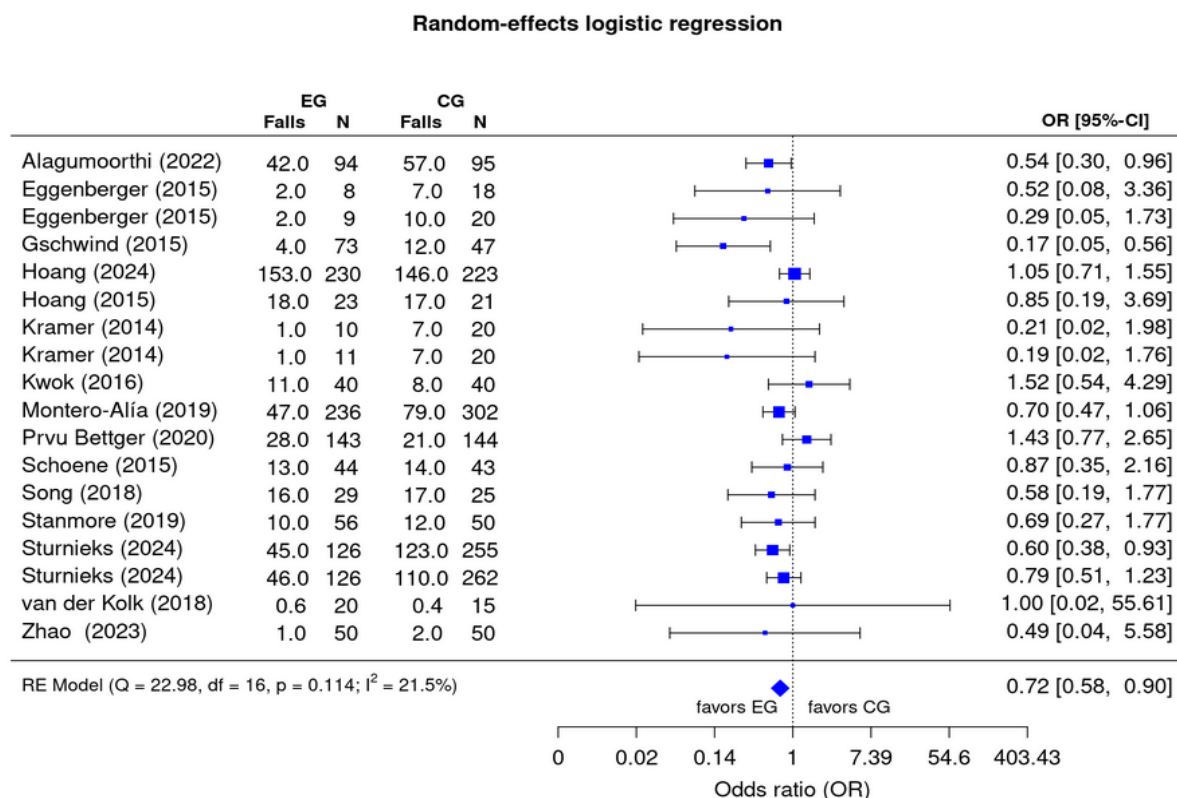


Abb. 25: Forrest-plot der Ergebnisse „Einfluss von Interaktivem kognitiv-motorischem Trainings auf die Anzahl der Stürzenden/Gruppe.“

Die Subgruppenanalysen für Lebensalter, Fallzahl/Gruppe, basales Sturzrisiko, einschlägige basale Erkrankungen, basaler Funktionsstatus, Setting, IKMT-Typ, Trainingshäufigkeit, Interventionsdauer, Intervention in KG oder Supervision (Kategorisierung siehe oben) zeigten kein signifikantes Ergebnis. Jedoch wurden z.T. relevante Unterschiede in den Punktschätzern zwischen den Gruppen identifiziert, sodass zukünftige Studien mit höherer statistischer Power detailliertere Ergebnisse liefern könnten. Die Sensitivitätsanalysen (siehe oben) erbrachten auch für den vorliegenden Studienendpunkt vergleichbare Effekte wie das Hauptmodell.

Das Trichterdiagramme (Abb. 61, Anhang) weist auf eine moderte bis hohe Evidenz eines Publikations- bzw. „small study“-Bias hin. Besonders im unteren Bereich kleiner Untersuchungen, zeigt sich ein auffälliges Überwiegen von Ergebnissen mit positivem Ergebnis. Dieses Ergebnis der Asymmetrie wird vom LFK-Index (-2.6: starke Asymmetrie), nicht aber vom Egger-Test ($p=.123$) verifiziert.

Ergebnisse für weitere Sturzendpunkte

Die weiteren Endpunkte „Anteil wiederholter Stürzer“, „Stürzer mit Verletzungen“, „Stürzer mit schweren Verletzungen“ und „Stürzer mit Frakturen“ wurden von wenigen der eingeschlossenen Studien (Tab. 60) adressiert. Entsprechend geringer ist die statistische Power. Zusammenfassend zeigten sich keine signifikanten Ergebnisse, die Vertrauenswürdigkeit war für alle Analysen sehr gering. Im Detail scheinen IKMT Interventionen keinen wesentlichen Einfluss auf den Anteil wiederholter Stürzer zu haben (OR: 0,97; 0,81 bis 1,16). Ebenfalls keinen Einfluss weist IKMT auf den Anteil der Stürzer mit Verletzungen auf (OR: 0,92; 0,76 bis 1,10). Bedeutsamere Effekte zeigen sich für den Anteil der Stürzer mit schweren Verletzungen (OR: 0,51, 0,25 bis 1,04) und den Anteil der Stürzer mit Frakturen (OR: 0,57, 0,30 bis 1,06).

Diskussion

Insgesamt zeigten die Analysen der eingeschlossenen RCTs lediglich für Studienendpunkte die mit hoher statistischer Power belegt waren, einen signifikanten (Anzahl der Stürzer) oder grenzwertig (nicht) signifikanten Effekt (Sturzrate) eines interaktiven kognitiv-motorischen Trainings auf Sturzgrößen (Tab. 60 Anhang). Betrachtet man die jeweiligen Quotenverhältnisse (OR), so liegen trotz der relativ geringen statistischen Power z.T. klinisch hochrelevante, allerdings grenzwertig nicht signifikante Effekte für die Endpunkte „Anteil Stürzer mit ernsthaften Verletzungen“ oder „Anteil der Stürzer mit Frakturen“ vor. Auffällig ist, dass die Mehrzahl der Untersuchungen aktive Kontrollgruppen mit potentiell effektiven Trainingsprotokollen implementierten (Tab. 59, Anhang), die einen klinisch relevanten Zwischengruppenunterschied zwischen IKMT und KG zumindest erschweren. Zwar zeigte eine entsprechende Subgruppenanalyse von physisch aktiven und inaktiven KGs lediglich tendenzielle günstigere Effekte bei Vergleich des IKMT zu inaktiven KGs, trotzdem deutet die hohe Varianz der Ergebnisse einen einschlägigen beeinflussenden Effekt an. Ein wichtiges Ergebnis für die Trainingspraxis ist, dass supervidierte Trainingsprotokolle, im Gegensatz zu nicht-überwachten Trainingsprogrammen zu signifikant positiven Effekten auf Sturzrate und Anzahl der Stürzer führen, während der Unterschied zwischen individuellem und Gruppentraining inkonsistente Ergebnisse zeigt, was möglicherweise einer höheren statistischen Power (13 vs. 4 Gruppen) der individuell durchgeführten Trainingsprogramme geschuldet ist. Insgesamt scheinen die Subgruppenanalysen eine nicht ausreichende Power aufzuweisen, weshalb mehr Studien erforderlich sind, um klinische Parameter und Dosis-Wirkungs-Beziehungen des IKMT belastbar analysieren zu können.

Die hier untersuchten IKMT sind technologische Interventionen, die sich in den vergangenen Jahren stark entwickelt haben. Durch die Verfügbarkeit und das zunehmende Verständnis für die Anwendung solcher Technologien in den Nutzergruppen ergibt sich insbesondere das Potential für einen Einsatz als niederschwelliges, heimbasiertes Training, das nur geringe Ressourcen des Gesundheitssystems bindet. Derzeit wird IKMT allerdings überwiegend im klinischen Setting i.d.R. als individuell betreute Einzelmaßnahmen appliziert. Nach entsprechender Validierung könnte IKMT aber als Ersatz oder Erweiterung konventioneller physiotherapeutischer Anwendungen ohne wesentlichen Personaleinsatz eingesetzt werden. Über den primär spielerischen Ansatz, oftmals in Kombination mit Bonifikationssystemen (Gamification), bieten IKMT die Chance auf höhere Adhärenz, ein vielfach beschriebenes Problem von Lebensstilinterventionen.

Bewertung der Studienqualität und Transferierbarkeit der Ergebnisse

Die Generierung der vorliegenden Evidenz erfolgte via systematischer Literaturrecherche und Meta-Analyse (Evidenzgrad 1a gemäß AQRH). Die methodische Qualität der Meta-Analyse mittels R-AMSTAR [32] ergab 43 von 44 Punkten (Tab. 61). Die Analyse der unterschiedlichen Sturzendpunkte gemäß GRADE Methodologie zeigte für alle Endpunkte (Sturzrate, Anzahl Stürzende, Anteil wiederholter Stürzer, Stürzer mit Verletzungen, Stürzer mit Frakturen) eine niedrige Vertrauenswürdigkeit. Entsprechend PICOS wurden in die Analysen Studien mit postmenopausalen Frauen und Männern 45 Jahre und älter eingeschlossen. Die Transferierbarkeit der vorliegenden Ergebnisse auf die Grundgesamtheit postmenopausaler Frauen und Männer in höherem Lebensalter ist somit möglich.

Formulierung der Empfehlung

42	Empfehlung 42	Neu, Stand 2024
Empfehlungsgrad B	Interaktives kognitiv-motorisches Training sollte im Rahmen eines Trainings zur Sturzprävention durchgeführt werden.	
Evidenzgrad 1a	[649]	
	Konsensstärke: 100%	

Wassergymnastik

Wassergymnastik wird in Deutschland im Rahmen des § 64 SGB IX [245] via Rehabilitationssport und Funktionstraining „Osteoporose“ (respektive Frakturprävention) vielfach und insbesondere für wenig belastbare und/oder körperlich limitierte Menschen ärztlich verordnet. Bedenkt man, dass gerade diese Personengruppe primär dem Trainingsziel der Sturzprävention zugewiesen wird, so erscheint eine kurze Beschreibung der Evidenz der Effektivität dieser „Trainingsform“ gerechtfertigt. Grundsätzlich kann Wassergymnastik („aquatic exercise“) als Vehikel und Trainingsmittel für verschiedene Trainingsinhalte angesehen werden. Studien, welche Stürze oder sturzbedingte Verletzungen erhoben, liegen kaum vor – zudem werden die wenigen Teilnehmer häufig über lediglich kurze Zeiträume evaluiert [664-668]. Eine Studie die über sechs Monate ein Multikomponententraining im Wasser (3x 60 min/Wo. mit moderater bis hoher Reizhöhe) applizierte, zeigte im Vergleich mit einer passiven Kontrollgruppe einen hohen Effekt (RR: 0,24; 0,13 bis 0,44) bei 100 postmenopausalen Frauen [665]. Ein systematischer Review (14 Studien) [669] und eine Meta-Analyse (11 Studien) [233] kommen zum Ergebnis, dass die positive Evidenz zur Anwendung von Wassergymnastik-Trainingsprotokollen zur Reduktion von Sturzrisikofaktoren (Gleichgewicht, Kraft, Flexibilität) insgesamt limitiert und mit niedriger methodischer Qualität belegt ist. Eine der Arbeiten zeigt allerdings (überwiegend) signifikant positive Veränderungen von Gleichgewicht, Flexibilität und Kraftgrößen sowie muskuläre Hypertrophieeffekte verglichen mit primär inaktiven Kontrollgruppen [669]. Vergleiche zwischen wasser- und landbasiertem Training demonstrieren in Bezug auf gängige Sturzrisikofaktoren mehrheitlich keine Zwischengruppenunterschiede [667,670-674], während in einigen Studien leichte Vorteile des Trainings im Wasser beobachtet wurden [666,675-677]. Dieses Ergebnis wird von einer Meta-Analyse bestätigt [678], die bei selbstständig lebenden Menschen für wasserbasierte Trainingsprogramme günstigere Effekte auf Gleichgewichtsfähigkeit, Gehgeschwindigkeit und Sturzangst verglichen mit landbasierten Programmen nachwies. Die Autoren [678] räumen jedoch ein, dass aufgrund methodischer Limitationen der Studien dieses Ergebnis nicht sehr belastbar ist.

Fazit

- Wassergymnastik kann in limitiertem Umfang zu Verbesserungen von Größen der körperlichen Leistungsfähigkeit (Mobilität, Kraft, Gleichgewicht) beitragen, die in Zusammenhang mit Stürzen und Frakturen stehen.
- Für Menschen mit großer Sturz- oder Bewegungsangst, welche an strukturierten, landbasierten Trainings nicht teilnehmen möchten, kann ein Wassergymnastikprogramm als Alternative angeboten werden.

Bewertung der Studienqualität und Transferierbarkeit der Ergebnisse

Die Generierung der vorliegenden Evidenz erfolgte primär via systematischer Literaturübersicht [669] und einer Meta-Analyse [233] (Evidenzgrad 1a gemäß AQRH) sowie geeigneten, zugrunde liegenden RCTs (u.a. [665]). Die Untersuchungen schließen exklusiv Frauen und Männern 60 Jahre und älter ein, sodass die Transferierbarkeit der vorliegenden Ergebnisse auf die Zielgruppe postmenopausaler Frauen und Männer in höherem Lebensalter möglich ist.

Formulierung der Empfehlung

43	Empfehlung 43	Neu, Stand 2024
Empfehlungsgrad 0	Wassergymnastik kann im Rahmen eines Trainings zur Sturzprävention erwogen werden.	
Evidenzgrad 1a	[665,669]	
	Konsensstärke: 100%	

Vibrationstraining

Eine Meta-Analyse von Jepsen et al. [466] zeigt, dass ein WBV Training bei Menschen 60 Jahre und älter die Sturzrate um 33% reduzieren kann (4 RCTs, Incidenz-Ratenverhältnis (IRR=0,67; 95%-KI 0,50 bis 0,89, $I^2=19\%$), wobei die Qualität der eingeschlossenen Untersuchungen als niedrig-moderat einzustufen ist [466]. Seitenalternierende ist, gemäß den Ergebnissen von Jepsen et al. [466], einer vertikalen Vibration vorzuziehen. Leung et al. [296] bestätigen den grundsätzlich positiven Effekt einer WBV Applikation auf die Sturzinzidenz in ihrer „cluster“-randomisierten kontrollierten Studie mit über 700 selbstständig lebenden, untrainierten Frauen 60 Jahre und älter. Nach 18-monatiger (sub g) WBV-Intervention (5x 20 min/Wo., 35 Hz, 0,3 g, vertikal) berichten die Autoren eine signifikant niedrigere Inzidenzrate für Stürze, verglichen mit der Kontrollgruppe (IRR: 0,54, 95%-KI 0,37 bis 0,78). Im Gegensatz dazu zeigt ein aktueller RCT von Sievanen et al. [679] tendenziell negative Effekte von WBV vs. Wellness-KG auf Sturzrate (IRR: 1,5, 0,9 bis 2,5) und Anzahl der Stürzer (IRR: 1,29, 0,78 bis 2,15)⁶⁵. Von Stengel et al. [680], die im Anschluss an ein konventionelles Training zur Fakturprophylaxe ein Beinkrafttraining mit (n=50) vs. ohne (n=50) 15 min seitenalternierendes WBV anfügten, konnten lediglich in der WBV-Gruppen eine signifikante Reduktion der Sturzhäufigkeit im Vergleich zu einer „Wellness-KG“ (n=51) erfassen⁶⁶.

Effekte auf die zugrunde liegenden neuromuskuläre Funktionsparameter/Sturzrisikofaktoren wie Muskelkraft, Muskelleistung und Balance älterer Kollektive sind sowohl für das vertikale als auch für das seitenalternierende supra G WBV belegt (u.a. [161,284,289,295,296,679,681-685]. Corrie et al. [686], die innerhalb ihres RCTs seiten- vs. höhenalternierende WBV-Platten

⁶⁵ Die Untersuchung erreichte mit n=130 ihre avisierte Fallzahl von 200 Personen zwar nicht, es ist aber eher nicht davon auszugehen, dass über eine höhere Fallzahl (signifikante) positive Effekte von WBV hätten realisiert werden können

⁶⁶ Allerdings keine signifikanten Unterschiede zwischen den Trainingsgruppen mit und ohne Vibration.

vergleichen, erfassen ähnliche Effekte für TUG, chair rise/sit to stand Test, „leg power“ oder Gleichgewichtsfähigkeit⁶⁷. Die neuromuskuläre Wirkung von WBV wird primär über den Vibrationsreflex erklärt, der auf dem Muskeldehnungsreflex basiert und während WBV mittels Elektromyographie (EMG) messbar ist [687].

Da die Höhe der durch WBV induzierten Muskelaktivierung positiv mit dem Kniebeugewinkel (bzw. der muskulären Vorspannung) korreliert [688-690], sind zur neuromuskulären Aktivierung Übungen in der „Squat Position“ zu empfehlen. Die muskuläre Aktivierung ist auf seitenalternierenden ausgeprägter als bei vertikal vibrierenden Geräten [687,690] (66-91% höhere EMG Aktivität [690]). Bei sub G WBV, bei dem die Trainierenden im aufrechten Stand mit gestreckten Gelenken auf der Platte stehen, wird kein Training der Muskulatur angestrebt.

Generell ist ein positiver Zusammenhang der Muskelaktivität sowohl mit der Frequenz als auch mit der Amplitude nachgewiesen, wobei bzgl. der Frequenz bei 30 Hz ein Maximum erreicht wird [688,689,691]. Die Reizsetzung sollte selbstverständlich nicht maximal erfolgen, sondern sollte mit Blick auf die Belastbarkeit der Trainierenden individuell und im Zweifelsfall moderat gestaltet werden. Die Belastungsdosierung besitzt auch vor dem Hintergrund der Compliance einen hohen Stellenwert. Während bei einem Kollektiv leistungsschwacher Senioren (84 J.) bei seitenalternierendem WBV Training eine Frequenz von 12 Hz von 95% sehr gut toleriert wurde, lag die Quote bei 26 Hz unter 30% [691]. Dass WBV auch mit niedriger Frequenz maßgeblichen Einfluss auf neuromuskuläre Kenngrößen hat, zeigen u.a. Studienergebnisse, in denen ein seitenalternierendes Vibrationstraining mit 12,5 Hz bei postmenopausalen Frauen eine signifikante Steigerung der Maximalkraft von 25% bewirkte [284]. De Oliveira [280] erfassten in ihrer (Meta-)Analyse allerdings eine Anzahl von Untersuchungen (6 von 34), die von unerwünschten Nebenwirkungen (allerdings keine schwerwiegenden Nebenwirkung) berichten, sodass eine komplett unbeaufsichtigte Durchführung nicht in jedem Fall angeraten werden kann, bzw. Sicherungsmaßnahmen getroffen werden sollten.

Fazit

- Die Evidenz für positive Effekte isolierten Ganzkörper-Vibrationstrainings (WBV) auf die Sturzhäufigkeit ist moderat hoch.
- Seitenalternierende WBV ist im Rahmen der Sturzprophylaxe etwas günstiger als höhenalternierende WBV.
- Durch die relativ hohe Verfügbarkeit von Vibrationsplattformen bietet sich dieser Trainingsinhalt als geringgradig-supervidiertes, videoanimiertes Individualtraining an.

Bewertung der Studienqualität und Transferierbarkeit der Ergebnisse

Die Generierung der vorliegenden Evidenz erfolgte via systematischer Literaturrecherche und Meta-Analyse (Evidenzgrad 1a gemäß AQRH) mit moderater Vertrauenswürdigkeit [466] sowie mindestens einem teilnehmerstarken RCT mit moderater methodischer Studienqualität [296]. In die Analyse eingeschlossen wurden Studien mit postmenopausalen Frauen und Männern 50 Jahre und älter, sodass die Transferierbarkeit der vorliegenden Ergebnisse auf die Grundgesamtheit postmenopausaler Frauen und Männer in höherem Lebensalter möglich ist.

⁶⁷ Für diese Fragestellung weißt die Untersuchung mit n=20/Gruppe allerdings eine (zu) geringe statistische Power auf.

Formulierung der Empfehlung

44	Empfehlung 44	Neu, Stand 2024
Empfehlungsgrad A	Ganzkörpervibration soll (nach Möglichkeit) im Rahmen eines Trainings zur Sturzprävention durchgeführt werden.	
Evidenzgrad 1a	[296,466]	
	Konsensstärke: 100%	

Heimbasierte Trainingsprogramme

Bei der Frage, ob das Trainingsprogramm (vorzugsweise) als Gruppen- oder Einzelangebot durchgeführt werden soll, spielen neben gesundheitlichen Faktoren, Leistungsfähigkeit, Neigung/Motivation/Volition und Gruppenfähigkeit auch rechtliche, logistische, organisatorische und finanzielle Aspekte eine wesentliche Rolle [62]. Einzeltrainings können in gering/nicht supervidiert Form zu Hause durchgeführt werden und damit Personen ansprechen, die an Gruppenangeboten nicht teilnehmen möchten oder können. Eine grundsätzliche Entscheidungshilfe zur Zuordnung der geeigneten Interventionsform bietet der modifizierte STEADI-(„Stop Elderlies Accidents, Death and Injuries“)-Algorithmus der Bundesinitiative Sturzprävention [61,62] an. Bei der Beurteilung der Effektivität beider Trainingsformen müssen allerdings die im jeweiligen Setting möglichen Rahmenbedingungen wie Geräteausstattung, konsistente Supervision, Individualisierung, persönliche Kontakte und/oder Teilhabeaspekte miteinbezogen werden. Eine Analyse der Effektivität von Gruppen- vs. individuellen Trainingsprotokollen zeigt für die Sturzrate lediglich tendenzielle Unterschiede zugunsten der Gruppenangebote [14]. Im Gegensatz dazu zeigen Lacroix et al. [692] überwiegend signifikant günstigere Effekte eines supervidierten Trainings auf das Gleichgewicht sowie die Kraft-/Schnellkraft [692] bei Menschen 65 Jahre und älter.

Das wohl bekannteste (Sturz-)Trainingsprogramm für zu Hause ist das Otago Exercise Programm (OEP) [693]. OEP beinhaltet ein funktionell orientiertes Kraft- (5 Übungen, 2 Sätze mit 8-10 Wdh. für die unteren Extremitäten) und Gleichgewichtstraining (12 Übungen), 3x 30 min/Wo. sowie „Walking“ (2x 30 min/Wo. im habituellen Gehtempo), einschließlich Vorgaben für die Progression der Übungsgestaltung. Es bedarf kaum Platz und lediglich Gewichtsmanschetten als Trainingsmittel. Die Implementation von OEP erfolgte durch Fachpersonal. Insgesamt sind vier bis fünf Heimbefuche in den ersten zwei Monaten sowie eine „Booster-Sitzung“ nach sechs Monaten vorgesehen. Eine Meta-Analyse zeigte, dass sich durch OEP nicht nur das Sturzrisiko im Folgejahr um ein Drittel (IRR: 0,68, 95%-KI 0,56 bis 0,79, 7 Studien) reduzierte, sondern auch die Mortalität um 50 Prozent geringer lag als in der Kontrollgruppe [561]. Positive Ergebnisse bei älteren Menschen umfassen zudem Verbesserungen der kognitiven Funktion, der Muskelkraft der unteren Extremitäten, der dynamischen und statischen Gleichgewichtsfähigkeit, der Gangstabilität sowie der Fähigkeit zur Haltungskontrolle [694]. Obwohl Studiendaten bezüglich der Sturzhäufigkeit fehlen, deuten Ergebnisse darauf hin, dass OEP als supervidiertes Gruppentraining bei älteren Menschen mit hohem Sturzrisiko effektiver ist als OEP-Training allein zu Hause [695].

Daneben kann durch die Einbeziehung funktioneller Übungen in den Alltag eine niederschwellig individualisierte Sturzprävention betrieben werden. Das Lifestyle-integrated Functional Exercise (LiFE) Konzept zielt z.B. darauf ab, den Lebensstil so zu modifizieren, dass während der Ausführung wiederkehrender, alltäglicher Routinen Kraft und Gleichgewicht effektiv trainiert werden. Dazu zählen u.a. Treppensteigen als Krafttraining oder eine herausfordernde Gleichgewichtsposition während des Zähneputzens. LiFE wird durch fünf

Hausbesuche, zwei Booster Sitzungen innerhalb von drei Monaten sowie zwei nachfolgenden telefonischen Kontakten durch geschultes Personal implementiert. Diverse Studien (Übersicht in [696]) haben dieses Konzept untersucht und belegen seine Wirksamkeit auf Surrogat-Endpunkte von Stürzen sowie auf die Sturzrate (IRR: 0,69, 95%-KI 0,48 bis 0,99 [697]) bei älteren Menschen.

Die Durchführung von OEP, LiFE sowie anderer heimbasierter Programme ergänzend zu konsistent supervidierten Trainingsinhalten höherer Reizintensität (z.B. PBT) im ambulanten Setting könnte besonders für Menschen mit hohem Sturzrisiko zu additiven Effekten auf die Sturzreduktion führen.

Fazit

- Die aktuelle Evidenz zeigt die Wirksamkeit individueller Heimtrainings, z.B. OEP auf die Sturzhäufigkeit.
- Lebensstil-modifizierende Programme, z.B. LiFE, können niederschwellige, zeiteffektive und alltagsorientierte Möglichkeiten zur individuellen Sturzprävention darstellen.

Bewertung der Studienqualität und Transferierbarkeit der Ergebnisse

Die Generierung der grundsätzlichen Evidenz für positive Effekte von Heimtrainings-Programmen basiert überwiegend auf einer systematischen Literaturrecherche und Meta-Analyse [561] für das OEP (Evidenzgrad 1a gemäß AQRH). Für das LiFE-Konzept liegen Daten aus randomisierten Studien moderater Studienqualität vor. Die Evidenz für Empfehlung 46 wurde im Expertenrating der LL-Lenkungsgruppe „Sturz“ basierend auf Daten zu supervidierten Trainingsprogrammen in der Gruppe und Heimtraining getroffen (Evidenzgrad 4 gemäß AQRH). In die Analyse eingeschlossen wurden Studien mit postmenopausalen Frauen und Männern 65 Jahre und älter, sodass die Transferierbarkeit der vorliegenden Ergebnisse auf die von der Leitlinie fokussierten Personengruppen möglich ist.

Formulierung der Empfehlung

45	Empfehlung 45	Neu, Stand 2024
Empfehlungsgrad A	Geeignete Heimtrainingsprogramme zur Sturzprophylaxe sollen insbesondere von Menschen ohne Zugang und Möglichkeit zu aushäusigen Trainingsprogrammen durchgeführt werden.	
Evidenzgrad 1a	[561]	
	Konsensstärke: 100%	
46	Empfehlung 46	Neu, Stand 2024
Empfehlungsgrad B	Geeignete Heimtrainingsprogramme zur Sturzprophylaxe sollten ein supervidiertes Training unter kompetenter Anleitung im Bereich Sturzprävention ergänzen.	
Evidenzgrad 4	[14,16,465,561]	
	Konsensstärke: 100%	

Auch Hämodialyse Patienten sind in hohem Maße von Sarkopenie und Frailty bedroht und können vielfach aushäusige Programme zur Verbesserung der Knochenstabilität und Sturzprophylaxe nicht mehr wahrnehmen. Jedoch bietet das Dialysetting dreimal in der Woche (übliche Dialysefrequenz) die Gelegenheit, während der Dialysebehandlung ein Trainingsprogramm zu absolvieren. Dieses besteht in der Regel aus einem Ausdauertraining

mit Liegend-Ergometern, einem individuell angepassten Krafttraining mit Hanteln und Bändern und aus funktionellen Übungen zur Verbesserung von Koordination und Flexibilität. Die Durchführbarkeit, Wirksamkeit und die hohe Adhärenz eines solchen Programms konnten in einer groß angelegten prospektiven, cluster-randomisierten Studie gezeigt werden [698]. Der Innovationsausschuss beim Gemeinsamen Bundesausschuss hat im April 2024 die Empfehlung an Krankenkassen und Dialyseleistungserbringer ausgesprochen, Verhandlungen aufzunehmen, um eine Implementierung in den Dialysealltag zu ermöglichen.

5.3.2. Belastungsdosierung

Aufgrund der bereits eingangs beschriebenen Problematik ist die evidenzbasierte Empfehlung der Belastungskomposition für das Spannungsfeld „Sturz“ und deren konsequente Durchdeklination für alle relevanten Belastungskomponenten nur sehr eingeschränkt möglich. Zusätzliche Problematik birgt der Aspekt, dass zur Generierung optimierter Belastungsprotokolle weitere Aspekte berücksichtigt werden müssen. Besonders relevant sind dabei: (a) Die jeweiligen Trainingsziele, die unterschiedlich sensibel auf die jeweiligen Belastungskomponenten reagieren können, (b) der individuelle Leistungsstatus vor der Trainingsmaßnahme, (c) die komplexe Interaktion von Belastungskomponenten zur Realisierung eines effektiven Trainings sowie (d) individuelle Neigungen, Präferenzen und Limitationen, die bspw. sehr häufig mit hoher Reizhöhe und Trainingsfrequenz kollidieren.

Beginnt man mit dem am wenigsten problematischen Aspekt der Interventionsdauer, so sind trotz nachwirkender Effekte auf Sturzrate/-risiko (bspw. nach PBT) eine überdauernde, lebenslange Partizipation an Trainingsprogrammen mit möglicherweise variierender Priorisierung sich ändernder Sturzrisikofaktoren nötig. Längere Trainingspausen sind auch bei Aufrechterhaltung oder Erhöhung der habituellen Aktivität zu vermeiden (siehe Abschnitt „Prinzip der kontinuierlichen Belastung“).

Auch die Empfehlung optimierter Trainingshäufigkeit bzw. Trainingsvolumens ist anhand der vorliegenden Literatur recht konsistent möglich. Wenig überraschend zeigt sich bezogen auf die Sturzrate ein Trend ($p=0.07$) zu höheren Effekten bei höherem Trainingsvolumen. Die Durchführung der Trainingsinhalte „Gleichgewichts- und Funktionstraining“ mit einem Trainingsvolumen von „drei Stunden oder mehr Training je Woche“ reduzierte die Sturzhäufigkeit relativ zur Kontrollgruppe mit der vergleichsweise höchsten Effektgröße (RaR: 0,58; 0,45 bis 0,76) [465]. Faktisch entspricht das in die Analyse eingestellte Trainingsvolumen einer Trainingshäufigkeit von 3 TE/Woche von 60 min Dauer [465]. Lesinski et al. [699], die eine meta-analytische Analyse zur Dosis-Wirkungs-Beziehungen von Gleichgewichtstraining vorlegen, erfassen die günstigsten Ergebnisse für ein Trainingsvolumen von 91–120 min/Wo. (mittlere SMD: 1,93), einer Häufigkeit von 3 TE/Wo. (mittlere SMD: 1,20) und einer Dauer der TE von 31–45 min (mittlere SMD: 1,19) [699]. Granacher et al. [572] berichten ebenfalls, dass ein Trainingsvolumen von 90-180 min/Wo. verteilt auf 3 TE (zwei supervidierte TE, eine Heim-TE) geeignet ist, die Gleichgewichtsfähigkeit älterer Menschen weitgehend optimal zu verbessern. Daten für Tai Chi bestätigen die Tendenz größerer Wirksamkeit auf die Sturzrate bei höherer Trainingsfrequenz [606]. Für die Muskelkraft älterer Menschen zeigt die meta-analytische Auswertung von Borde et al. [624], dass bei einer Trainingshäufigkeit von mehr als 2 TE/Woche keine höheren Effekte zu erwarten sind. Die Autoren empfehlen zur optimierten Verbesserung von Kraftparametern ein Mehrsatztraining durchzuführen. Die Evidenz der vergleichsweise einheitlichen Daten für die Effektivität von umfangsorientierten Größen (also Trainingsumfang, Trainingshäufigkeit, Dauer der TE) wird durch methodische Limitation der oben vorgestellten Studien etwas eingeschränkt. So liegt zum einen keine

anwesenheitsbereinigte Analyse der Daten vor, zum anderen ist die Varianz der eingeschlossenen Studien insbesondere für die Trainingshäufigkeit mit einem Schwerpunkt bei 2-3 TE/Wo. sehr gering.

Die zweite kritische Komponente eines Körpertrainings beim älteren Menschen ist die Reizhöhe. Im Bereich der Sturzprophylaxe ist die Ableitung einheitlicher und strukturierter Intensitätsvorgaben für sturzrelevante Trainingsgrößen aufgrund der unterschiedlichen Zielgrößen schwierig. In Bezug auf die Gleichgewichtsfähigkeit(en) wird ein „anspruchsvolles und individuell überschwelliges Training“ gefordert (Kriterien s.o.) [562,567]. Die Reizhöhe oder, möglicherweise zutreffender, der Schwierigkeitsgrad des Trainingsinhaltes oder der Körperübung hat sich dabei an der individuellen Überschwelligkeit der Belastung, aber auch an Sicherheitsaspekten des Trainingsinhaltes zu orientieren. Ein effektives Gleichgewichtstraining wie das PBT oder andere Trainingsformen, die sich relativ nahe am tatsächlichen Sturzvorgang orientieren, sollte hohe Sicherheitsstandards aufweisen. Ein apparatives PBT kann in diesem Zusammenhang über entsprechende Sicherungen sehr viel intensiver durchgeführt werden als ein PBT im wesentlich verletzungsgefährdeteren Gruppen- oder Partnerrahmen. Wesentlich einfacher als für koordinative Fähigkeiten ist die Belastungsvorgabe im Krafttraining. Im Bereich der Steigerung der Muskelkraft des älteren Menschen schlagen Borde et al. [624] eine Reizhöhe von 70-79% des 1RM vor. Ist das 1RM nicht bekannt oder werden Übungsformen ohne Skalierung verwendet, würde dies, je nach Übung, einer Wiederholungszahl von 8-12 Wiederholungen unter Ausbelastung entsprechen. Eine ausbelastete Wiederholungsleistung empfehlen wir für ältere Kollektive indes nicht oder zumindest nicht konsistent [175]. Aufgrund der Relevanz eines mit hoher Bewegungsgeschwindigkeit gegen hohe Widerstände ausgeführten Krafttrainings sollten Trainingsphasen schneller (konzentrischer) Bewegungsgeschwindigkeit und einer Reizhöhe von $\geq 70\%$ 1RM [72] ohne muskuläre Ausbelastung [54] appliziert werden. Wie im Weiteren besprochen (Trainingsprinzipien: Periodisierung), sollten diese Phasen mit hoher Reizhöhe und Bewegungsgeschwindigkeit, also intensiver mechanischer Belastung, nicht durchgehend, sondern im Rahmen intermittierender Phasen eines überwiegend funktionell orientierten, linear periodisierten Krafttraining in unterschiedlichen Intensitätsbereichen (50-85% 1RM) durchgeführt werden [356]. Dies betrifft sowohl den Bereich „Sturz“ wie auch den ossären Aspekt eines Trainings zur Frakturprophylaxe.⁶⁸

Bewertung der Studienqualität und Transferierbarkeit der Ergebnisse

Die Generierung der vorliegenden Evidenz für die Trainingshäufigkeit erfolgte via systematischer Literaturrecherchen und Meta-Analysen (Evidenzgrad 1a gemäß AQRH). Die Empfehlungen zur Intensität des PBT basiert auf der grundsätzlichen Evidenz für positive Effekte dieses Trainingsinhaltes u.a. abgeleitet von einer aktuellen Meta-Analyse [581], bei der definitionsgemäß intensive Reize verabreicht werden, die zu einer kompensatorischen motorischen Reaktion führen (müssen), um einen Sturz zu vermeiden. Die Empfehlung 49 basiert u.a. auf Meta-Analysen [619,620], die eine Überlegenheit von Krafttrainings mit schneller vs. normaler Bewegungsgeschwindigkeit zumindest auf Größen, die in engem Zusammenhang mit dem Sturzrisiko gesehen werden, berichten (Evidenzgrad 1b gemäß AQRH). Die Empfehlung einer (zeitweilig) hohen Reizhöhe basieren auf Daten von Meta-Analysen, die sich allerdings nicht primär auf Stürze bezieht [621,624] (Evidenzgrad 1b gemäß AQRH) sowie auf Daten zur Trainingsperiodisierung (siehe dort). Die in die Analysen eingeschlossenen Männer und Frauen wiesen meist ein Alter von 60 Jahren und älter auf,

⁶⁸ Weitere Empfehlungen zur Belastungsdosierung eines optimierten Trainings zur Sturzprophylaxe wurden bereits in vorhergehenden Abschnitten berichtet oder erscheinen im folgenden übergreifenden Abschnitt der Trainingsprinzipien....

sodass die Übertragbarkeit der Empfehlungen auf die von der Leitlinie fokussierten Kohorten angemessen erscheint.

Formulierung der Empfehlung

47	Empfehlung 47	Neu, Stand 2024
Empfehlungsgrad A	Die Trainingshäufigkeit eines optimierten Trainings zur Sturzprävention soll ca. 3 TE/Wochen betragen.	
Evidenzgrad 1a	[465,572,699]	
	Konsensstärke: 100%	
48	Empfehlung 48	Neu, Stand 2024
Empfehlungsgrad A	Im Bereich des Perturbationstrainings sollen intensive Reize gesetzt werden, die zu kompensatorischen motorischen Reaktionen führen müssen.	
Evidenzgrad 1b	[581]	
	Konsensstärke: 100%	
49	Empfehlung 49	Neu, Stand 2024
Empfehlungsgrad B	Das Kraft-/Schnellkrafttraining eines optimierten Trainings zur Sturzprävention sollte phasenweise Reizhöhen im Bereich $\geq 70\%$ 1RM beinhalten.	
Evidenzgrad 1b	[619,620]	
	Konsensstärke: 100%	
50	Empfehlung 50	Neu, Stand 2024
Empfehlungsgrad B	Das Krafttraining eines optimierten Trainings zur Sturzprävention sollte Phasen schneller Bewegungsausführung gegen moderate und hohe Widerstände enthalten.	
Evidenzgrad 1b	[621,624]	
	Konsensstärke: 100%	

5.4. Trainingsziel „Verbesserung des Sturzvorganges - Sturzimpact verringern“

Der überwiegende Anteil der wissenschaftlichen Forschung zur nicht-ossären Frakturprävention fokussiert sich auf die Prävention, als das Verhindern von Stürzen, während Strategien der sicheren Landung (d.h. Sturz ohne Verletzungsfolge) deutlich weniger Beachtung findet. Bedeutsam erscheint allerdings der Hinweis, dass Trainingsprotokolle zur Sturzreduktion auch sturzbedingte Verletzungen, einschließlich Frakturen [11,555,556,700] positiv beeinflussen können. Wichtig hierbei ist das Training schneller Reaktionen, einschließlich kognitiver Informationsverarbeitungsgeschwindigkeit und schneller sowie schnellkräftiger Bewegungen, insbesondere im Rahmen von Schritt- oder Greifstrategien.

Eine etwas dezidiertere Option zur Vermeidung insbesondere hüftnaher Frakturen ist die Reduktion der beim Sturz auftretenden Kräfte auf den Knochen. Biomechanische Daten zeigen, dass die Energie, die ein Sturz aus dem Stand auf die Trochanter-Region entwickelt, deutlich über der Frakturschwelle des proximalen Femurknochens älterer Menschen liegt [701]. Das Vermeiden von sturzbedingten Frakturen ist eine Energiemanagementfrage, bei der die Aufprallenergie absorbiert werden muss, ohne knochenbelastende Kräfte zu erzeugen, die die Bruchfestigkeit der beteiligten skelettalen Elemente überschreiten [522]. Insofern ist es wichtig, geeignete Mechanismen einzuüben, welche die Stoßwirkung insbesondere bei einem Sturz zur Seite reduzieren. Untersuchungen mit jungen Menschen zeigen, dass das schnelle Vorbringen der Arme und sukzessives Abbremsen der Sturzgeschwindigkeit über die Armstrecker⁶⁹, geeignet ist, um einen Sturz auf das Gesicht zu vermeiden oder die Aufprallenergie auf Unterarm/Handgelenk sowie Hüfte zu reduzieren [702,703]. Zusätzliche Vorteile⁷⁰ ergeben sich durch longitudinale Seitwärtsrollbewegungen über Schulter und Rücken [704]. Ein systematischer Review mit Meta-Analyse [705]⁷¹ untersuchte sieben Landestrategien für Stürze, Squatting (Beugen von Knie und Hüfte unter Muskelspannung), Ellbogenflexion (ausgestreckte Arme, Landung mit gebeugten Ellbogen), Vorwärtsrotation (Drehung des Körpers während Sturz, Landung auf Händen mit gebeugten Ellbogen), Rollen (Beugen des Knies während des Sturzvorgangs, seitliche Rumpfbeuge und Drehung nach hinten, um das Abrollen weg vom Aufprallpunkt zu erleichtern), Arm aufschlagen (Aufschlagen des Arms auf der fallenden Seite beim Aufprall auf den Boden), Entspannung der Muskulatur während des Sturzes, Schrittstrategie (siehe oben) in verschiedenen Sturzrichtungen (vorwärts, seitwärts, rückwärts) und deren Impactstärke auf verschiedene Körperregionen (Hüfte, Ellbogen, Schulter, Handgelenk, Nacken). Die Ergebnisse zeigen, dass alle Strategien mit Ausnahme des Armaufschlagens einen signifikanten Effekt auf die Verringerung des Sturzimpacts haben, wobei lediglich die Strategie „Rollen“ einen signifikanten Einfluss auf die Reduktion des Impacts auf die Hüfte ausweist [705].

Die Übertragbarkeit und Relevanz dieser Ergebnisse auf/für ältere Menschen, vor allem auf solche mit erhöhtem Sturzrisiko und/oder bestehenden funktionellen Einschränkungen, ist unklar. Das Hüftfrakturrisiko ist zudem abhängig von Fallhöhe, -richtung und Landeposition. Die niedrigen Hüftfrakturraten selbstständig lebender, älterer Menschen deuten darauf hin, dass die protektiven Strategien bei funktionell nicht eingeschränkten älteren Menschen auch im Alter gelingen. Bei gebrechlichen Menschen kann der schützende Effekt des Abfangens von

⁶⁹ Reduktion der Sturzenergie um ca. 40% verglichen mit einer „Landung“ mit (durch)gestreckten Armen [702]. Eine ähnliche Strategie, bei welcher der Arm zum Abbremsen des Sturzes eingesetzt wird, senkt die Spitzenaufprallkräfte um 12% an der Hüfte und 16% an der Schulter [703].

⁷⁰ im Vergleich zu einer beidhändigen Schockabsorption, mit einer Reduktion der von den Händen erfahrenen Spitzenstoßkraft um 59% [704].

⁷¹ 13 kleine Untersuchungen mit insgesamt 219 primär jüngeren Personen.

Stürzen mit den oberen Gliedmaßen oft nicht mehr realisiert werden, es kommt zudem zu altersbedingten Abnahmen der Steifigkeit und Energieaufnahmekapazität des trochantären Weichgewebes und zu Veränderungen der Muskelaktivierung beim Aufprall [522,706]. Wohl zum Schutz vor Kopfverletzungen rotieren ältere Menschen während des Sturzes, sodass Stürze nach vorn mit seitlichem Impact assoziiert sind und das Risiko von Hüftfrakturen zunimmt [522,706]. Während die Bedeutung der Kraft der unteren Extremitäten im (Sturz-) Training betont wird, ist eine Konsequenz, dass auch die (Schnell-)Kraft von Rumpf und oberen Extremitäten im Rahmen eines sturzpräventiven Trainings erhöht werden muss.

Bei einem Training, welches das Stürzen „per se“ trainiert, ist im Vorfeld eine Abwägung des Nutzen/Risiko-Potentials, insbesondere bei Menschen mit Osteoporose/bereits vorliegenden Frakturen vorzunehmen. Eine enge Supervision und einschlägige Schulungskompetenz sind absolut obligatorisch. Bisher liegen nur wenige Daten bei gesunden, robusten älteren Menschen vor, nicht jedoch bei geriatrischen Individuen mit funktionellen Einschränkungen [705,707-710]. Nach 5-maligem Sturztraining mit Fallübungen aus Kampfsportarten zeigte sich eine Verringerung des biomechanischen Aufpralls an der Hüfte aus kniender Position von 8% [709]. Supervidierte, gruppenbasierte, anspruchsvolle Mehrkomponenten-Trainingsprogramme, die auch Sturztechniken trainierten, belegen die sichere Machbarkeit dieses Trainingsinhalts sowie einen anhaltenden Effekt (20 Monate) der Sturztechniken [707,710]. In einer weiteren Studie wurden Verbesserungen im kontrollierten Vorwärtsstürzen durch ein Judotraining nach vier Monaten erreicht [708]. Schließlich untersuchte eine randomisierte kontrollierte Studie den Effekt von zwei TE der Sturztechnik „Rollen“ auf den (Hüft-)Impact während des Stürzens aus dem Stand und fand einen Zwischengruppenunterschied von 17% (vs. Kontrolle) sowie einen Transfereffekt auf die nicht-trainierte Seite [705]. Erwähnenswert ist allerdings, dass drei der ursprünglich 17 TN aufgrund von Nacken-, Rücken- oder Hüftschmerzen die ohnehin kurze Studie vorzeitig beenden mussten. Mehr Studien mit größeren Fallzahlen sind notwendig, um die Sicherheit dieser Intervention zu belegen.

Obwohl unklar ist, inwiefern die Sturztechniken im „Falle eines Falles“ eingesetzt werden, ob sie helfen können sturzbedingte Verletzungen zu vermeiden und auch die Aufprallkräfte bei einem unerwarteten, tatsächlichen Sturz wesentlich höher als bei selbst initiiertem "Sturz" liegen [711], könnten Techniken zur Verringerung der Aufprallkräfte bei Stürzen als Bestandteil eines Frakturpräventionstrainings bei funktionell nicht eingeschränkten Menschen erwogen werden. Eine wichtige Voraussetzung ist hierbei die Fähigkeit des Übens auf dem Boden.

Fazit

- Sturz-, Abfang- und Abrolltechniken sowie „Stepping“ können die Spitzenaufprallkräfte eines Sturzes verringern und dadurch helfen, sturzbedingte Verletzungen zu vermeiden bzw. zu reduzieren.
- Menschen mit sehr geringer Knochenfestigkeit/Fragilitätsfrakturen sollen ein entsprechendes Training nicht durchführen.
- Das Training muss sehr eng supervidiert, fachkundig angeleitet und trainingsmethodisch sinnvoll aufgebaut sein.
- Voraussetzung für ein Training zur Impactreduktion ist ein ausreichendes Niveau an Kraft und Beweglichkeit sowie die Fähigkeit des Übens auf dem Boden.
- Ein entsprechendes Training könnte als isolierter Trainingsschwerpunkt beispielsweise in Entlastungs-/Regenerationsphasen des Sturzreduktionstrainings eingeplant werden.

Bewertung der Studienqualität und Transferierbarkeit der Ergebnisse

Die Generierung der vorliegenden Evidenz erfolgte mittels Daten einer Meta-Analyse [705], die allerdings überwiegend junge Kohorten einschloss, randomisierter und nicht randomisierter Interventionsstudien sowie biomechanischer Studien (zusammenfassend Evidenzgrad 1b gemäß AQRH). Die Empfehlung komplexe Sturz-/Abfangtechniken unter der Prämisse ausreichender Expertise, konsequenter Supervision und engem Betreuungsschlüssel durchzuführen, basieren auf den Ergebnissen randomisierter und nicht-randomisierter Studien sowie auf den Ergebnissen der oben genannten Meta-Analyse, die allerdings lediglich eine Studie im Altersbereich dieser Leitlinien einschloss (Evidenzgrad 1b gemäß AQRH). Da mehrere der oben aufgeführten Untersuchungen auf ältere Kohorten (60 Jahre und älter) fokussieren, gehen wir aber von einer ausreichend hohen Transferierbarkeit der Ergebnisse auf die Zielgruppe der vorliegenden Leitlinie aus.

Formulierung der Empfehlung

51	Empfehlung 51	Neu, Stand 2024
Empfehlungsgrad A	Einfache und gefahrlose Strategien der sicheren Landung sollen Bestandteil von Trainingsprogrammen zur Frakturprophylaxe sein.	
Evidenzgrad 1b	[522,711,712]	
	Konsensstärke: 100%	
52	Empfehlung 52	Neu, Stand 2024
Empfehlungsgrad B	Komplexe Sturz-/Abfangtechniken sollten bei Möglichkeit enger und kompetenter Supervidierung Bestandteil von Trainingsprogrammen zur Frakturprophylaxe sein.	
Evidenzgrad 1b	[705,707-710]	
	Konsensstärke: 100%	

5.5. Trainingsziel „Sturzangst“

Die Angst vor Stürzen („fear of falling“) ist mit zunehmendem Alter sehr weit verbreitet⁷² und betrifft Menschen mit und ohne ausgeprägter Sturzgeschichte [713]. Da, wie oben besprochen, die überwiegende Anzahl der Hüftfrakturen mit ihren z.T. dramatischen Auswirkungen auf Morbidität, Selbstständigkeit und Mortalität durch Stürze verursacht werden, ist diese Angst nachvollziehbar und real. Die Angst zu stürzen führt zu eingeschränktem Vertrauen in die eigenen Fähigkeiten, reduzierter Teilhabe und Dekonditionierung. Sie ist ein Risikofaktor für Stürze, den Abbau körperlicher und kognitiver Leistungsfähigkeit [716] und ist mit einer reduzierten Lebensqualität verbunden [533]. Körperliches Training ist eine relevante Säule innerhalb der multimodalen Behandlung der Sturzangst. So belegen eine Vielzahl von Übersichtsarbeiten und Meta-Analysen den positiven (moderat hohen) Effekt eines körperlichen Trainings auf die Angst zu stürzen (u.a. [544,595,717,718]). Über die Rahmenbedingungen und Belastungsinhalte zur optimierten Adressierung der Sturzangst durch Bewegungsinterventionen besteht allerdings kein Konsens. Feng et al. [544] weisen nach Analyse der Trainingsinhalte aus 75 RCTs mit selbstständig lebenden älteren Menschen nach Subgruppenanalyse keine signifikanten Unterschiede aus. Allerdings zeigten Studien, die ein Training der Gleichgewichtsfähigkeit(en) durchführten, die günstigsten Effekte. Eine systematische Literaturrecherche (n=14) von Savvakis et al. [718] kommt zu dem Ergebnis, dass sowohl Muskel-, Gleichgewichts- und Mobilitätstraining zur Reduktion der Sturzangst von gebrechlichen (frail, pre-frail) älteren Erwachsenen beitragen kann. Wahrnehmungsorientiertes Ganzkörpertraining, z.B. Tai-Chi, Yoga und Pilates sowie Gleichgewichtsprogramme sind ebenfalls effektiv, die Sturzangst zu reduzieren [544]. Zhang et al. [595] berichten in ihrer Meta-Analyse (13 RCTs) einen grenzwertig signifikanten, moderat hohen Effekt von Tai Chi auf die Sturzangst bei älteren hospitalisierten Menschen mit motorischen Limitationen. Melo et al. [678] kommen in ihrer Meta-Analyse konsequent supervidierter „Wassergymnastik“ (aquatic physical therapy)-Interventionen mit selbstständig lebenden älteren Menschen (60 Jahre+) zu dem Schluss, dass wasserbasierte Bewegungsangebote die Sturzangst effektiver verbessern als landbasierte Bewegungsangebote (geringe Vertrauenswürdigkeit). Kruisbrink et al. [719] erfasst in seinem meta-analytischen Methodenvergleich die günstigsten Effekte für „holistische“ Trainingsinhalte (hier Tai Chi, Yoga, Pilates), die individualisiert, gemeinschaftlich bzw. in der Gruppe unter Anleitung eines erfahrenen Übungsleiters durchgeführt werden. Insgesamt berichten die Untersuchungen meist kleine bis moderate Effekte auf die Sturzangst (u.a. [544]), die allerdings ausgeprägter als bei kognitiv-behavioralen oder edukativen Programme sind [719]. Hu et al. [717], die den Effekte von kombinierten physischen (körperliches Training)/kognitiv orientierten Interventionen auf die Sturzangst erfassen, zeigen in ihrer Meta-Analyse mit 27 RCTs mit Menschen 60 Jahre und älter grundsätzlich signifikant positive Effekte der kombinierten Intervention (...vs. Kontrollgruppen, bzw. isolierte kognitive Intervention). Ein Vergleich mit isolierter Intervention durch körperliches Training weist allerdings tendenziell etwas ungünstigere Effekte der kombinierten Intervention (SMD: -0,09; -0,27 bis 0,08) auf. Feng et al. [544], die in ihrer systematischen Übersichtsarbeit (75 RCTs) und Meta-Analyse (50 RCTs) die angemessene Anwendung von Belastungsparametern und Trainingsprinzipien (siehe folgendes Kapitel) bei körperlichen Trainingsinterventionen zur Reduktion der Sturzangst zusammenfassen, ziehen das Fazit, dass die Mehrzahl der Untersuchungen zentrale trainingswissenschaftliche Größen nicht angemessen berichtet und (spekulativ) wohl auch nicht adäquat berücksichtigt. Insbesondere die Rahmenbedingungen der Trainingsinter-

⁷² Bis zu 90% der älteren Bevölkerung sind von Sturzangst betroffen [713-715].

vention scheinen zur Generierung positiver Effekte relevant zu sein. So scheint (n.s.) das Training in der Gruppe zur Reduktion der Sturzangst geeigneter [544,719] zu sein, was die Bedeutung psychosozialer Aspekte von Bewegungsinterventionen betont. Allerdings zeigten auch supervidierte heimbasierte Trainingsinterventionen [720,721] signifikant positive Effekte auf die Sturzangst selbstständig lebender Menschen 60 bzw. 70 Jahre und älter.

Fazit

Bei vergleichsweise hoher Evidenz positiver Effekte eines körperlichen Trainings auf die Sturzangst, sind die Trainingsinhalte, Belastungskomponenten, Trainingsprinzipien und Rahmenbedingungen, unter denen ein optimales Bewegungsprogramm zur Reduktion oder Bewältigung der Sturzangst ausgerichtet werden soll, (noch) nicht hinreichend bekannt. Allerdings liegt Evidenz für positive Effekte von Trainingsinhalten wie Gleichgewichts-, Kraft-, Mobilitätstraining, Tai Chi, Yoga und/oder unspezifische Bewegungsübungen im Wasser vor. Niedrig-moderate Evidenz besteht für den Aspekt, dass ein Training in der Gruppe oder ein konsequent supervidiertes Einzeltraining einem Individualtraining ohne Supervidierung überlegen ist.

Bewertung der Studienqualität und Transferierbarkeit der Ergebnisse

Die Generierung der vorliegenden Evidenz erfolgte mittels Daten mehrerer Meta-Analysen s.o. mit moderater bis hoher Vertrauenswürdigkeit (Evidenzgrad 1a gemäß AQRH). Empfehlung 54 ist weniger evidenzbasiert und beruht auf Subanalysen/Meta-Regressionen ohne direkten Vergleich der Konditionen⁷³ (Evidenzgrad 1b gemäß AQRH). Alle aufgeführten Untersuchungen schlossen Studien mit Betroffenen überwiegend in höherem Lebensalter ein, sodass eine Transferierbarkeit der Ergebnisse auf die Zielkollektive der vorliegenden Leitlinie uneingeschränkt möglich ist.

Formulierung der Empfehlung

53	Empfehlung 53	Neu, Stand 2024
Empfehlungsgrad A	Die Sturzangst älterer Menschen soll durch ein angemessenes, individualisiertes Körpertraining im Trainingsprozess berücksichtigt werden.	
Evidenzgrad 1a	[544,595,717,718]	
	Konsensstärke: 100%	
54	Empfehlung 54	Neu, Stand 2024
Empfehlungsgrad B	Ein Training mit Fokus auf die Reduktion der Sturzangst sollte holistische Trainingsinhalte einbeziehen, die individualisiert und falls möglich im Setting einer fachlich eng angeleiteten Teilnehmergruppe durchgeführt werden.	
Evidenzgrad 1b	[544,719]	
	Konsensstärke: 100%	

⁷³ D.h. als günstigsten wird die Kondition mit der höchsten Effektstärke eingeschätzt. Ein direkter Vergleich zwischen den Konditionen (bspw. supervidiert versus nicht supervidiert) wurde nicht durchgeführt.

5.6. Stellenwert ausgewählter Trainingsprinzipien innerhalb eines körperlichen Trainings zur Frakturprophylaxe

Allgemeine Trainingsprinzipien werden in weiten Teilen als konkrete und leitende Handlungsanweisung für ein körperliches Training angesehen. Sie verbinden tradierte physiologische, pädagogische und psychologische Erkenntnisse und das Erfahrungswissen der Trainingslehre bzw. -wissenschaften [72]. Trainingsprinzipien beziehen sich auf alle übergeordneten Aspekte des Trainings und sind weitgehend unabhängig von der fokussierten Zielgröße. Des Weiteren reklamieren Trainingsprinzipien generelle Gültigkeit losgelöst von Anwendungsfeldern wie Leistungs-, Breiten-, Gesundheits- oder Rehabilitationssport [722]. Obwohl insbesondere die zur Auslösung von Anpassungserscheinungen nötigen „Prinzipien der Belastung“ durch ihren übergreifenden Charakter für die Generierung effektiver Trainingsprotokolle absolut essentiell sind [72], ist die Evidenz ihrer Effektivität vielfach (noch) nicht durch dezidierte trainingswissenschaftlich/sportmedizinisch ausgerichtete klinische Studien überprüft worden [723]. Dies gilt besonders für den nicht-athletischen Bereich der Trainingswissenschaften [724] und muss bei der Ableitung der Evidenz bzw. des Evidenzgrades der Empfehlungen berücksichtigt werden.

Je nach Ausdifferenzierungsgrad existieren Modelle, die bis zu 25-30 Trainingsprinzipien unterscheiden [725], die allerdings nicht gleichermaßen relevant das für die Leitlinie bedeutsame Spannungsfeld „Belastung, Beanspruchung und Anpassung“ adressieren. Weineck [72] unterscheidet vier zeitliche und inhaltliche Hauptkategorien von Trainingsprinzipien.

- (1) Prinzipien der Belastung (Auslösung von Anpassungseffekten)
- (2) Prinzipien der Zyklisierung (Sicherung der Anpassung)
- (3) Prinzipien der Spezialisierung (Spezifizierung des Trainings)
- (4) Prinzipien der Proportionalisierung (Ausbildung von Leistungsvoraussetzungen)

Die beiden erstgenannten Kategorien sind für die Gestaltung und Durchführung von optimierten Trainingsprotokollen zur Frakturprophylaxe absolut essenziell, sodass im Weiteren Trainingsprinzipien dieser Kategorien aufgeführt, präzisiert und als Empfehlungen formuliert werden sollen.

5.6.1. Prinzipien der Belastung

Prinzip des trainingswirksamen Reizes („overload principle“).

Zur Auslösung von Anpassungserscheinungen muss der applizierte Reiz deutlich über der individuellen Reizschwelle des adressierten Systems liegen („überschwelliger Reiz“). Reize im Bereich der alltäglichen Belastung lösen keine weiteren Anpassungen aus („unterschwelliger Reiz“), das System verbleibt in der Homöostase⁷⁴. Zu hohe Reize können indes funktionsschädigend wirken [726]. Somit ist es zwingend erforderlich, den Belastungsreiz so zu wählen, dass er vom Organismus letztlich als ungewöhnlich und fordernd erlebt wird und somit eine physiologische Notwendigkeit besteht (System befindet sich in der Heterostase) Anpassungserscheinungen einzuleiten, um weitere Reize gleicher Art ökonomischer zu verarbeiten und/oder Funktionsschädigungen zu vermeiden (d.h. Homöostase soll auf höherem Niveau wiederhergestellt werden). Die Reizschwelle, welche zur Auslösung adaptiver Prozesse überschritten werden muss (MES - minimum effective strain), ist somit der zentrale Ansatzpunkt der Belastungsregelung [72,724]. Eine Umsetzung dieses einleuchtenden

⁷⁴ Ein gutes Beispiel sind die ausbleibenden Effekte eines „Walkingtraining“ auf den Knochenmineralgehalt (siehe dort) bei postmenopausalen Frauen mit Frakturen [110].

Prinzip ist besonders im ossären Spannungsfeld der Frakturprophylaxe leider nicht trivial, da die individuelle Reizschwelle unterschiedlicher Knochenkompartimente [727] nicht bekannt, nur schwer überprüfbar und zudem von mehreren Faktoren abhängig ist. Neben der habituellen, also regelmäßig auftretenden, höchsten mechanischen Belastung des Skelettsegments scheint das hormonelle Milieu, auf das der mechanische Reiz trifft, von Bedeutung zu sein. So bleiben prämenopausal effektive mechanische Belastungsreize im Östradiol-Mangelzustand postmenopausaler Frauen und korrespondierend angehobener Reizschwelle [728] des Knochens unterschwellig und somit ineffektiv [90,384,421].

Trainingsmethodisch empfiehlt sich zu Beginn der Intervention eine langsame und behutsame Steigerung der mechanischen Belastung, auch um den langsam(er) adaptierenden Systemen (Bänder- und Sehnenapparat) ausreichend Zeit für Anpassungen zu geben und Überlastungen zu vermeiden. Angesichts der im Weiteren nötigen, überdauernden Trainingsdurchführung muss der Fokus der ersten Trainingswochen nicht zwingend auf die Überschwelligkeit der Belastung liegen [356].

Fazit

Die Relevanz dieses Trainingsprinzips ist unabhängig vom Trainingsziel unmittelbar eingängig⁷⁵. Schwieriger ist seine Umsetzung. Dies gilt insbesondere für den Knochen, da die zu überwindende Reizschwelle nicht bekannt, individuell sehr unterschiedlich und von mehreren endogenen und exogenen Größen beeinflusst ist.

Bewertung der Studienqualität und Transferierbarkeit der Ergebnisse

Eine Generierung der vorliegenden Evidenz zur Applikation dieses Trainingsprinzips erscheint aufgrund seiner unmittelbar eingängigen Relevanz unnötig. Eine wissenschaftliche Studie, die direkt auf diesen Aspekt abzielt, liegt nachvollziehbarerweise nicht vor. Letztlich belegt aber die Vielzahl von klinischen Studien mit negativem Gesamtergebnis auf den avisierten Endpunkt (bspw. [18]) die Ineffektivität von Trainingsprogrammen die unterschwellige Reize appliziert haben. Die trainingswissenschaftliche Umsetzung in Empfehlung 56 erfolgte mittels Expertenrating der LL-Lenkungsgruppe (Evidenzgrad 4 gemäß AQRH) auf der Basis und in Ableitung vorliegender Ergebnisse von Untersuchungen längerer Studiendauer (u.a. [356]) und Empfehlungspapieren [8,214].

Formulierung der Empfehlungen

55	Empfehlung 55	Neu, Stand 2024
Empfehlungsgrad A	Der Trainingsreiz soll deutlich über dem im Alltag erfolgenden mechanischen, physiologischen und funktionellen Belastungsniveau liegen.	
Evidenzgrad 1a	[18,72,724]	
	Konsensstärke: 100%	
56	Empfehlung 56	Neu, Stand 2024
Empfehlungsgrad B	Je nach Trainingsinhalt sollte eine mehr (WBE mit hohen GRF) oder weniger (DRT an Geräten) behutsame und langsame Steigerung der mechanischen Belastung in Abhängigkeit vom individuellen Leistungsniveau und Risikoprofil erfolgen.	
Evidenzgrad 4	[8,214,356]	
	Konsensstärke: 100%	

⁷⁵ Prinzipiell könnte man an dieser Stelle jede ausreichend lange Trainingsstudie ohne Effekt auf die Knochendichte aufführen.

Prinzip der ansteigenden Belastung („progressive overload“)

Wie bereits herausgearbeitet, führen nur überschwellige Reize zu Anpassungserscheinungen. Daraus folgt, dass ein initial die Reizschwelle überschreitender Reiz nach unveränderter Beibehaltung und erfolgten Anpassungserscheinungen die nun erhöhte Reizschwelle nicht mehr überschreitet und somit keine neuerlichen Anpassungserscheinungen auslöst [72,726]. Ein Beispiel im Bereich der Osteoporose-Erkrankung ist der von verschiedenen Forschern (u.a. [150,729,730]) beobachtete „levelling-off-“ (Plateau)-Effekt der Knochendichte/-masse nach 9 bis 12-monatigem Trainingszeitraum. Dieser Plateaueffekt hängt sehr wahrscheinlich mit dem Aspekt zusammen, dass innerhalb der Interventionsmaßnahmen die Trainingsbelastung im Verlauf nicht oder nicht deutlich genug gesteigert wurde. Auch tierexperimentelle Untersuchungen des Knochens (u.a. [731,732]) heben die Notwendigkeit hervor, die Belastung einerseits progressiv zu steigern und andererseits vielfältig zu variieren. Relevant wird dieses Trainingsprinzip in der Trainingspraxis spätestens nach Anpassung an den initialen Reiz. Nach Donath und Faude [722] ist dies bspw. im ausdauerorientierten Gesundheitssport nach 6 Monaten der Fall. Am Knochen wäre dies bei Zugrundelegung eines Remodelingprozesses [220,221] und initial unterschwelligem Konditionierungszeitraum nach spätestens 9 Monaten Training erreicht. Untersuchungen, welche die Relevanz des Trainingsprinzips „progressive overload“ für die Knochendichte dezidiert (also mittels Vergleich zweier einschlägiger Studienarme) evaluieren, liegen nicht vor. Allerdings existieren Literaturdaten (Übersicht in [733]), welche die Überlegenheit progressiv gesteigerter Trainingsbelastung auch für Untersuchungen mit vergleichsweise kurzer Interventionsdauer (≤ 12 Monate) nahelegen. Die Subgruppenanalyse einer vorliegenden Meta-Analyse, die auf die osteoporotische Hauptfraktur fokussiert [17], berichtet (bei geringer statistischer Power) lediglich tendenziell günstigere Effekte der Studien mit progressiver Belastungserhöhung. Ein Grund für dieses Ergebnis scheint die relativ kurze Studien- bzw. Interventionsdauer vieler Untersuchungen zu sein [17]. Zweifellos gewinnt das „progressive overload“ Prinzip mit zunehmender Interventionsdauer an Relevanz. Für die überdauernd durchzuführenden Trainingsprotokolle zur Frakturprophylaxe ist eine konsequente progressive Belastungsanpassung somit von weitaus höherer Bedeutung als die in dieser Hinsicht limitierte Literaturlage ausweist.

Eine Progression der Trainingsbelastung kann über die Manipulation der Hauptbelastungskomponenten Trainingshäufigkeit, Reizhöhe, Belastungstyp oder Reizdauer/Reizhäufigkeit realisiert werden. Des Weiteren über die Übungsführung, die Bewegungsgeschwindigkeit bzw. -reichweite, die Muskelarbeitsweise, die Kombination mit anderen Belastungsarten, etc. Etwas abweichend von der klassischen Trainingslehre [72] sollte spätestens nach Erhöhung der Trainingshäufigkeit auf ca. 3 TE/Woche [24,465,565] eine progressive Steigerung der Reizhöhe/-rate (WBE, DRT) bzw. der Übungsschwierigkeit (koordinative Fähigkeiten) vorgenommen werden. Die Belastungssteigerung kann im Weiteren „allmählich“ oder „sprunghaft“ durchgeführt werden [72]. Obgleich eine sprunghafte (also eine deutliche) Belastungssteigerung für ein knochenwirksames Training zu präferieren wäre [734], sollte im Spannungsfeld der Frakturprophylaxe älterer Menschen unter Berücksichtigung von Leistungszustand und Osteoporosegrad primär das „Prinzip der allmählichen“ Belastungssteigerung (also sukzessive Steigerung über geringe Belastungserhöhungen) Anwendung finden.

Bewertung der Studienqualität und Transferierbarkeit der Ergebnisse

Die fachspezifische Generierung der vorliegenden Evidenz erfolgte durch eine Ableitung von Daten von RCTs (u.a. [150,729,730]) und Empfehlungspapieren [8,214,733], vorliegender Kohorten- und Outcome-übergreifender Erkenntnisse der Trainingswissenschaften (u.a. [72,726]) sowie einem abschließenden Expertenrating der LL-Lenkungsgruppe (Evidenzgrad 3-4 gemäß AQRH) das final in die Bewertung (s.u.) einging.

Formulierung der Empfehlung

57	Empfehlung 57	Neu, Stand 2024
Empfehlungsgrad A	Eine Progression der Belastung via Reizhöhe/-rate soll insbesondere bei länger andauernden Trainingsmaßnahmen berücksichtigt werden.	
Evidenzgrad ≥ 4	[8,72,214,733]	
	Konsensstärke: 100%	

Prinzip der Spezifität

In Abhängigkeit vom applizierten Trainingsstimulus erfolgen spezifische Anpassungsreaktionen im Organismus [735]. Ein Reiz muss folglich zielgerichtet appliziert werden, um die erwünschte Anpassungserscheinung zu triggern. Dabei spielt das fokussierte Bezugssystem eine wichtige Rolle [722]. Während Laufen und Radfahren bei vergleichbarer Belastungskomposition ähnlich signifikante Effekte auf die Ausdauerleistungsfähigkeit (bspw. VO_{2max}) zeigen, wird für den „non-weight bearing“ Trainingsinhalt „Radfahren“ im Gegensatz zu „Laufen“ tendenziell ein eher negativer Effekt auf die Knochendichte berichtet [207]. Grundsätzlich gilt, dass je ähnlicher sich die Bezugssysteme sind und die Reizsetzung erfolgt, desto eher dürfen Transfereffekte erwartet werden. Dies gilt allerdings nicht in gleichem Maße für Transfereffekte mechanischer und physiologischer Bezugssysteme, bei denen derselbe Trainingsinhalt (bspw. HI-Aerobic) mehrere Bezugssysteme (Knochen, Ausdauer, Koordination) positiv beeinflussen kann [187]. Im Gegensatz dazu dürfen im vergleichsweise unspezifischen Gesundheitssport älterer Menschen Transfereffekte ähnlicher Trainingsinhalte nicht zwingend vorausgesetzt werden. Während Mühlbauer et al. [736] bei gesunden älteren Menschen (70 ± 5 J.) eine hohe Übereinstimmung ($r^2=52\%$) von isometrischer Maximalkraft der Beinextensoren und Sprungleistung nachweisen konnten, zeigten sich keine wesentlichen Übereinstimmungen ($r^2 \leq 9\%$) zwischen kontinuierlicher, reaktiver und proaktiver Gleichgewichtsfähigkeit. Giboin et al. [737] bestätigen diese Ergebnisse für junge Menschen, indem sie nach randomisierter Zuweisung in ein Gleichgewichtstraining auf dem Kippbrett- versus frei schwingenden Plattform keine signifikanten Transfereffekte zur jeweils anderen Methodenvariante erfassten. Ausbleibende Transfereffekte auf statische oder dynamische Gleichgewichtsaufgaben nach Slackline-Training berichten auch Donath et al. [738]. Zusammenfassend legen diese Ergebnisse nahe, dass insbesondere im sturzorientierten Gleichgewichtstraining eine hohe Spezifität der Trainingsausrichtung auf sportmotorische Sturzrisikofaktoren betrieben werden muss. Daneben muss beim Bezugssystem „Knochenfestigkeit“ mit seiner lokalen Anpassung an mechanische Reize die von vielen Autoren belegte „site-specificity“ (u.a. [128,739]) beachtet werden, d.h. dass Anpassungserscheinungen überwiegend an der mechanisch beanspruchten Skelettregion erfolgen.

Bewertung der Studienqualität und Transferierbarkeit der Ergebnisse

Die fachspezifische Generierung der vorliegenden Evidenz erfolgte mittels randomisierter und nicht-randomisierter Studien (Evidenzgrad 1b gemäß AQRH), die für die Empfehlungen 59 und 60 allerdings nicht immer konsistent mit den Zielkollektiven der vorliegenden Leitlinie durchgeführt wurden. Allerdings folgen die Empfehlungen grundsätzlichen, Kohorten- und Outcome-übergreifenden Erkenntnissen (=Trainingsprinzip) der Trainingswissenschaften (u.a. [72,724,726]) sowie Empfehlungspapieren [8,214,356,733].

Formulierung der Empfehlungen

58	Empfehlung 58	Neu, Stand 2024
Empfehlungsgrad A	Trainingsreize sollen zielgerichtet appliziert werden, um die erwünschten, spezifischen Anpassungserscheinungen zu realisieren.	
Evidenzgrad 1b	[128,214,736,739]	
	Konsensstärke: 100%	
59	Empfehlung 5	Neu, Stand 2024
Empfehlungsgrad B	Transfereffekte zwischen Bezugssystemen/Trainingszielen sollten durch geeignete Auswahl geeigneter Trainingsinhalte und deren Belastungskomposition realisiert werden.	
Evidenzgrad 1b	[187,356,736]	
	Konsensstärke: 100%	
60	Empfehlung 60	Neu, Stand 2024
Empfehlungsgrad B	Im Bereich der Gleichgewichtsfähigkeit sollten (bedingt durch limitierte Transfereffekte) alle sturzrelevanten Gleichgewichtskomponenten ⁷⁶ im Training Berücksichtigung finden.	
Evidenzgrad 1b	[567,572,736]	
	Konsensstärke: 100%	

Prinzip der individualisierten Belastung

Die Forderung nach einem individualisierten Bewegungsprogramm, welches in Abhängigkeit von Status, Leistungsfähigkeit und körperlichen Limitationen unterschiedliche Trainingsziele adressiert, findet im Rahmen der Leitlinie „körperliches Training und Frakturprophylaxe“ bereits bei der Zuordnung unterschiedlicher (Fraktur-)Risikokollektive zu priorisierten Trainingszielen Berücksichtigung. Innerhalb der Trainingsdurchführung können gleiche Trainingsbelastungen zu deutlich variierenden individuellen Anpassungserscheinungen führen [740,741]. Donath und Faude [722] empfehlen daher zur Einschätzung des Trainingserfolges Monitoringsysteme einzusetzen. Liegen keine maßgeblichen exogenen oder endogenen Faktoren als Gründe suboptimaler oder ausbleibender Belastungsanpassung vor, ist zu prüfen, ob und inwieweit alternative Trainingsinhalte oder -methoden eingesetzt werden können. Neben Trainingsaspekten sind Zeit- und Transferaspekte, funktionelle Limitationen, Schmerzen sowie die individuelle Neigung wichtige Größen überschwelliger und langfristig durchgeführter Sportpartizipation [742]. Letzterer Aspekt betrifft nicht zuletzt das „Setting“ des Bewegungsangebots. Bei der trainingsmethodischen Umsetzung dieses Aspekts sollte das Kriterium der Gruppenfähigkeit des Teilnehmers bedacht werden [61,62]. Die

⁷⁶ Bspw. statische, dynamische, kontinuierliche, reaktive und proaktive Gleichgewichtsfähigkeit.

effektive Durchführung eines Gruppentraining, als Voraussetzung der Kofinanzierung des „Rehabilitationssports und Funktionstrainings“ [245]) ist durch häufig heterogen zusammengesetzte Gruppen nicht banal [743]. Hier müssen zum einen geeignete Inhalte mit Synergiekomponenten, also Effekten auf unterschiedliche Trainingsziele (bspw. DRT, Tanzen, geeignete Sportspiele), zum anderen differenzierte Belastungsvorgaben für die einzelnen Teilnehmer appliziert werden. Zudem muss innerhalb der Trainingsplanung und -durchführung die altersabhängige biologische Leistungsfähigkeit des Individuums Berücksichtigung finden [744]. Günstigere Effekte auf das erwünschte Outcome bei Anwendung dieses Prinzip, werden in nahezu allen trainingsrelevanten Bereichen nachgewiesen. Exemplarisch sei der Bereich der „Sturzangst“ (s.o.) genannt, bei dem ein individualisiertes körperliches Training die günstigsten Auswirkungen zeigt [719].

Fazit

Eine individualisierte Trainingsdurchführung und -regelung ist maßgeblicher Bestandteil des „Prinzips des trainingswirksamen Reizes“ und trägt wesentlich zur Effektivität des Trainingsprogrammes bei. Dies bezieht sich besonders auf die Auswahl individueller Trainingsziele und deren Ansteuerung über Trainingsinhalte und Belastungskomponenten. Daneben sind individuelle Besonderheiten, Präferenzen und Limitationen zu beachten, um ein verletzungsfreies, attraktives und nachhaltig durchführbares Training zu implementieren.

Bewertung der Studienqualität und Transferierbarkeit der Ergebnisse

Die Generierung der vorliegenden Evidenz zur Applikation dieses Trainingsprinzips leitet sich primär aus grundsätzlichen, Kohorten- und Outcome-übergreifenden Erkenntnissen der Trainingswissenschaften ab (u.a. [72,724,726]). Das Prinzip der individualisierten Belastung kann als Basis der vorgenannten Trainingsprinzipien angesehen werden, sodass sich die Evidenz letztlich aus dem Evidenzgrad dieser vorhergehenden Empfehlungen kumuliert. Spezifische, vergleichende Meta-Analysen oder entsprechende klinische Studien für die Endpunkte Knochenfestigkeit oder Sturzrisiko liegen nicht vor, bzw. können nur eingeschränkt schwer identifiziert werden.

Formulierung der Empfehlung

61	Empfehlung 61	Neu, Stand 2024
Empfehlungsgrad A	Eine weitestmögliche Individualisierung des körperlichen Trainings soll durchgeführt werden.	
Evidenzgrad 1a	[14,17,465]	
	Konsensstärke: 100%	

Prinzip der Variation der Trainingsbelastung

Langfristiges monotones Training mit dauerhaft gleichen Trainingsinhalten und Trainingskomponenten bewirkt neben negativem Einfluss auf die Psyche der Teilnehmer und somit verringerter Compliance eine Desensibilisierung des beanspruchten Systems (u.a. Weineck [72,726]). Bezüglich der Knochenadaptation sind Raab-Cullen et al. [731] sogar der Ansicht, dass es nicht die Reizintensität per se sei, welche die Knochenformation stimuliert, sondern vielmehr der Wechsel im Belastungsniveau. Zur Realisation dieses Trainingsprinzips bietet sich eine Variation der Trainingsinhalte bzw. Körperübungen und/oder Belastungskomponenten an. Beides lässt sich durch regelmäßige Wechsel der Belastungsinhalte (bspw. kleine Spiele, LI-, HI-, Step-Aerobic, Sprünge in unterschiedlicher Ausführung) und der Reizhöhe (bspw. via

intensiver Intervall- vs. Dauermethode) unproblematisch durchführen. Im Krafttraining kann eine Variation der Trainingsbelastung ebenso über die Belastungskomposition idealerweise durch strukturierte Veränderung von Reizhöhe, Ausbelastungsgrad, Bewegungsgeschwindigkeit (Reizrate) [119,175,745] und ggf. Trainingshäufigkeit [745] im Rahmen einer Trainingsperiodisierung herbei geführt werden. Eine regelmäßige Variation der Trainingsübung ist ebenfalls unproblematisch und sinnvoll [119,175]. Auch innerhalb der Sturzprophylaxe ist ein hoher Variationsgrad zur optimalen Schulung der koordinativen Fähigkeiten von allergrößter Bedeutung [746]. Über eine Veränderung der äußeren Bedingungen wie bspw. der Organisationsform, der Trainingsmittel und der Informationsaufnahme kann dieser Forderung auch innerhalb eines Trainings im Gruppenrahmen in hohem Maße entsprochen werden [747]. Eine zu ausgeprägte beliebige Variation der Trainingsbelastung ist allerdings zu vermeiden, da sie dann mit dem übergeordneten Prinzip der Spezifität kollidieren kann.

Fazit

Um dauerhaft Homöostase Störungen auszulösen, eine Desensibilisierung des beanspruchten Systems zu vermeiden und die Trainingsmaßnahme attraktiv zu erhalten, ist eine Variation der Trainingsbelastung eine effektive und einfach realisierbare Strategie.

Bewertung der Studienqualität und Transferierbarkeit der Ergebnisse

Die fachspezifische Generierung der vorliegenden Evidenz erfolgte durch Ableitung von Ergebnissen aus einer Vielzahl (Übersicht in [14,18]) randomisierter kontrollierter Studien mit Teilnehmern im Zielbereich der vorliegenden Leitlinie, die allerdings keinen direkten Vergleich zwischen Trainingsarmen mit Variation der Trainingsbelastung versus kontinuierlich gleichbleibender Trainingsbelastung durchführten.

Formulierung der Empfehlung

62	Empfehlung 62	Neu, Stand 2024
Empfehlungsgrad B	Im Trainingsprozess sollte eine stetige Variation der Trainingsinhalte/Körperübungen, der Trainingsmittel und der Belastungskomponenten erfolgen.	
Evidenzgrad 1b	[14,18]	
	Konsensstärke: 100%	

Prinzip der optimalen Relation von Belastung und Erholung

Innerhalb einer sinnvollen Trainingsplanung bilden Belastung und Regeneration eine Einheit. Ein neuerlicher Trainingsreiz sollte nach Matwejew [748] erst nach vollständiger Wiederherstellung erfolgen, jedoch „nicht erst, wenn die Spuren der vorausgegangenen Belastung völlig verwischt sind“. Die Dauer der Regenerationsphase hängt primär von der Höhe der Ermüdung, vom Trainingszustand und weiteren exogenen und endogenen Faktoren wie u.a. dem Alter, Alltags- und Berufsbelastungen, klimatischen Bedingungen etc. ab [72]. In engem Zusammenhang mit der Gesamtbelastungsintensität liegen ausreichende Evidenzen vor, dass im Bereich der Erhöhung der Knochenfestigkeit eine Trainingshäufigkeit ≥ 2 TE, im Bereich der Sturzreduktion ≥ 3 -malige TE/ Woche mit intermittierenden Ruhetagen bzw. Tagen reduzierter Trainingsbelastung geeignet sind, um auch langfristig positive Effekte zu generieren [14,24,407]. Auch bei Verzicht auf muskuläre Ausbelastung ist nach 3-4 progressiv gesteigerten intensiven/hochintensiven Trainingswochen eine regenerative Woche mit niedriger Gesamtbelastung anzuraten, um Anpassungserscheinungen zu gewährleisten und

Überlastungsprozesse auszuschließen. Das unten aufgeführte „Prinzip der Periodisierung/Zyklisierung“ führt diesen Aspekt weiter aus.

Bewertung der Studienqualität und Transferierbarkeit der Ergebnisse

Die fachspezifische Generierung der vorliegenden Evidenz erfolgte zum einen anhand einer Subgruppen-Analyse einer systematischen Literaturrecherche und Meta-Analyse („Trainingshäufigkeit [24]“), zum anderen anhand ausgewählter randomisierter kontrollierter Studien im Spannungsfeld der Dekonditionierung (s.u. [749,750]), also Evidenzgrad 1b AQRH sowie LL-Lenkungsgruppen-Rating auf der Basis vorliegender Trainingsempfehlungen [8,214](Tab. 1). Eine Transferierung auf die in der Leitlinie adressierten Gruppen ist durch die personelle Zusammensetzung der oben genannten Untersuchungen gewährleistet.

Formulierung der Empfehlung

63	Empfehlung 63	Neu, Stand 2024
Empfehlungsgrad A	Nach initialer Konditionierungsphase soll ein 2-3-maliges Training /Woche mit intermittierenden trainingsfreien Tagen im Sinne von Reizerholungspausen erfolgen.	
Evidenzgrad 1b	[8,14,24,214,749,750]	
	Konsensstärke: 100%	

5.6.2. Prinzipien der Zyklisierung

Prinzip der kontinuierlichen Belastung

Wird die Kontinuität des Trainings über einen längeren Zeitraum, bspw. durch Urlaub, Erkrankung oder fehlende Trainingsmöglichkeit unterbrochen, kommt es auch bei weitgehender Beibehaltung oder Erhöhung der habituellen körperlichen Aktivität⁷⁷ zu einer Reduktion trainings-induzierter Effekte, die in Abhängigkeit von Interventionsdauer /Trainingsstatus [753]⁷⁸, Dauer der Trainingsabstinenz, aber auch zum adressierten Trainingsziel stehen [754]. So führte der dreimonatige COVID-19 induzierte Lockdown von Trainingsstätten im Frühjahr 2020 bei einer Studiengruppe von früh-postmenopausalen osteopenischen Frauen [755], trotz erhöhter habitueller Aktivität und Outdoor-(Ausdauer)-Sport, zu einer signifikanten Reduktion der Knochendichte (KMD) und fettfreien Masse (LBM), nahezu (zurück) auf die Basalwerte der erfolgreichen 13-monatigen Interventionsstudie [749]. Dieselben Ergebnisse zeigten sich für ältere Männer mit einer Osteosarkopenie nach 18 Monaten hochintensiven Krafttrainings. Nach signifikanter Verbesserung von KMD, LBM und Muskelkraft [175,625] führte die COVID-19 bedingte Schließung der Trainingsstätten [750], trotz deutlich erhöhtem habituellen Aktivitätsniveau, zusammengefasst zu einer signifikanten Reduktion der oben genannten Endpunkte. Im Detail erwies sich die Maximalkraft verglichen mit KMD oder LBM als deutlich resilienter gegenüber den Auswirkungen der 6-monatigen „Detrainingsphase“. Für ähnlich lange Zeiträume (8-monatiges Multikomponenten-Training/5-monatiges Detraining) berichten Martinez-Aldao et al. [756] ebenfalls eine signifikante Reduktion der Muskelkraft der unteren Extremitäten und der dynamischen Gleichgewichtsfähigkeit bei Menschen 70 Jahre und älter. Harris et al. [757] zeigen nach 18-wöchigem progressiven Krafttraining mit 61-85-Jährigen und lediglich 6 Wochen Detraining bereits eine signifikante Reduktion der Maximalkraft der oberen und unteren Extremitäten.

⁷⁷ Bei kompletter Immobilität sind die Effekte nochmals deutlich gravierender (u.a. [751,752]).

⁷⁸ Schnell erworbene Verbesserungen/Zuwachsraten gehen schneller, langfristig erworbene langsamer zurück [72].

Allerdings liegt das Kraftniveau nach 6 und 20 Wochen Detraining noch signifikant über dem basalen Niveau. Nach nur 9-wöchiger Trainings- und 6-wöchiger Detrainingsphase berichten Toraman et al. [758] bei 60-85-Jährigen schließlich einen Rückgang funktionaler Fähigkeiten (u.a. chair rise-, 6 min walking test) annähernd auf das Ausgangsniveau. Ohne exakte Kenntnis, wann ein „Detrainingseffekt“ für physiologische oder funktionelle Größen unter bestimmten Voraussetzungen spätestens einsetzt, können somit Unterbrechung eines überschweligen Trainings von >4-6 Wochen [723,754] beim moderat trainierten älteren Menschen bereits als kontraproduktiv angesehen werden.

Bewertung der Studienqualität und Transferierbarkeit der Ergebnisse

Die fachspezifische Generierung der vorliegenden Evidenz erfolgte anhand zweier randomisierter kontrollierter Studien mit hoher methodischer Qualität im Spannungsgeld der Dekonditionierung ([749,750]) (Evidenzgrad 1a gemäß AQRH (Tab. 1)). Eine Transferierung auf die in der Leitlinie adressierten Gruppen ist durch die Zusammensetzung der oben genannten Untersuchungen gewährleistet.

Formulierung der Empfehlung

64	Empfehlung 64	Neu, Stand 2024
Empfehlungsgrad A	Das körperliche Training soll konsistent ohne Trainingspausen von mehr als 4-6 Wochen durchgeführt werden, um dekontitionierende Effekte zu verhindern.	
Evidenzgrad 1a	[749,750]	
	Konsensstärke: 100%	

Prinzip der periodisierten Belastung und Regeneration

Präventive oder rehabilitative Trainingsinterventionen im Spannungsfeld der Frakturprophylaxe zielen zwar nicht auf eine zu einem bestimmten Zeitpunkt zu erbringende Höchstleistung (sog. „Peaking“) ab, trotzdem ist es sinnvoll den Trainingsprozess in Phasen mit unterschiedlichen Trainingszielen und entsprechend abgestimmter Trainingsdurchführung zu gliedern [759]. Saxon et al. [397], die drei 15-wöchige Protokolle mit und ohne intermittierende Ruhe-/Resensibilisierungsphase verglichen, belegen (tierexperimentell) die deutlichsten Effekte auf die Knochenstärke für ein Protokoll mit intermittierender (5-wöchiger) Ruhephase. Von diesen Ergebnissen abgeleitet, kann eine Strukturierung des Trainingsprozesses in Phasen mit intensiven knochenspezifischen Trainingsformen und knochenentlastenden Phasen [357] mit Fokus auf Sturzaspekten (bspw. Impactreduktion durch Falltechniken) oder – bei Frauen ohne erhöhtes Sturzrisiko – einschlägigen kardiometabolischen Größen als „Blockperiodisierung“ [760] erfolgen [126,127,356,755]. Sinnvollerweise sollten bei einer entsprechenden Periodisierung auch Urlaubszeiten oder Feiertage, an denen die Teilnehmer kein spezifisches Training durchführen können oder möchten, berücksichtigt werden. Im Rahmen einer Variation der Trainingsbelastung (s.o.) wird empfohlen eine Periodisierung im Wochenzyklus (insbesondere bei Kraft- und etwas nachrangig beim WBE/High Impact-Inhalten) durchzuführen. Hier bietet sich bspw. eine lineare Periodisierung über die Reizhöhe mit regelmäßigen Entlastungswochen an (Abb. 26).

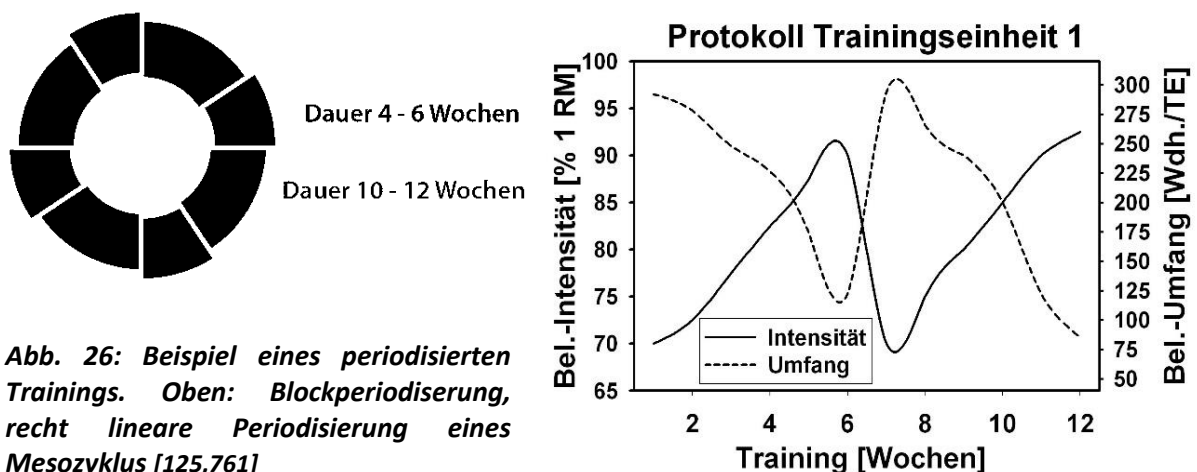


Abb. 26: Beispiel eines periodisierten Trainings. Oben: Blockperiodisierung, rechts lineare Periodisierung eines Mesozyklus [125,761]

Derzeit ist die grundsätzliche Überlegenheit periodisierter Trainingsprotokolle im Spannungsfeld der Knochenfestigkeit bei Trainingsprogrammen für den Menschen nicht ausreichend gesichert [762]. Auch im initialen Bereich der Kraftentwicklung älterer Menschen sind periodisierte Modelle nicht-periodisierten Trainingsprotokollen nicht grundsätzlich überlegen [763]. Vier Untersuchungen zeigen zumindest die Effektivität (KMD, Sturzhäufigkeit) und (einfache) Anwendbarkeit periodisierter Trainingsprotokolle bei postmenopausalen Frauen [126,127,356,755]. Parallel zum Prinzip der Variation der Belastung wird die Relevanz periodisierten Trainings mit fortschreitender Dauer der Trainingsmaßnahme zunehmend relevant. Wichtig ist der Hinweis, dass die Konzeption und Durchführung periodisierter Trainingsprotokolle (auch) im Gruppenrahmen problemlos und insbesondere wenig zeitintensiv durch die Gruppenleitung erfolgen kann [356].

Bewertung der Studienqualität und Transferierbarkeit der Ergebnisse

Die fachspezifische Generierung der vorliegenden Evidenz erfolgte in Ableitung einer tierexperimentellen randomisierten kontrollierten Studien im speziesübergreifenden Spannungsfeld der „Mechanosensitivität“ des Knochens [397] sowie einem Expertenrating innerhalb der LL-Lenkungsgruppe auf der Basis von Trainingsempfehlungen (u.a. [187]). Der Evidenzgrad gemäß AQRH wurde mit 3 angesetzt (Tab. 1). Die Transferierung der (in Bezug auf die Knochenfestigkeit) tierexperimentellen Studienergebnisse auf die Personengruppen der Leitlinie sind allerdings eingeschränkt.

Formulierung der Empfehlung

65	Empfehlung 65	Neu, Stand 2024
Empfehlungsgrad B	Die Trainingsmaßnahme sollte periodisiert durchgeführt werden, um die Variabilität des Trainings zu erhöhen, regelmäßige Entlastungsphasen zu gewährleisten und ein monotones Training zu vermeiden.	
Evidenzgrad 3	[187,397]	
	Konsensstärke: 100%	

5.6.3. Zusammenfassung „Trainingsprinzipien“

Die Berücksichtigung von Trainingsprinzipien ist essenzieller Bestandteil erfolgreicher Trainingsprotokolle im Spannungsfeld der Frakturprophylaxe. Neben Basisprinzipien („überschwelliger Reiz“, „progressive Belastungssteigerung“), deren Relevanz sich unmittelbar erschließen, sollten Trainingsprinzipien wie Spezifität/Transferaspekte, individualisierte Belastung und Variation der Belastung in gesundheitsorientierten Bewegungsangeboten stärker berücksichtigt werden. Schließlich kann der Einsatz von Trainingsprinzipien, die im Leistungssport eingesetzt werden (Periodisierung/Zyklisierung), einen wichtigen Beitrag zur Konzeption effektiver, sicherer und attraktiver Trainingsprogramme leisten.

5.7. Validierung der Trainingsziele, Prozess- und Ergebnisqualität

Die Kontrolle der Zielerreichung über geeignete Tests ist im präventiven und rehabilitativen Gesundheitssport ein zutiefst vernachlässigter Aspekt. Erfolgskontrollen, also die Frage, ob und in welchem Maß die gewählten Trainingsziele realisiert werden, sind inhärenter Bestandteil der Trainingsdefinition und essentieller Bestandteil der Trainingsregelung (Abb. 7). Testverfahren zur Einschätzung der individuellen Leistungsentwicklung und Trainingsregelung sind nicht nur, aber besonders im Bereich der Frakturprophylaxe nicht trivial. Im Spannungsfeld der Knochenfestigkeit stellt die Knochendichte mittels radiologischer Verfahren den wesentlichen Surrogatparameter dar (siehe 6.5. „Exkurs“). Problematisch an der Knochendichte als Steuerungsgröße ist, neben ihrer radiologischen Erfassung, der vglw. langsame ossäre Anpassungsprozess (überwiegend) via Remodeling. Berücksichtigt man zudem die relativ geringen trainingsinduzierten Veränderungen, so ist selbst bei geringem Variationskoeffizient der DXA Messung⁷⁹ ein relativ langer Abstand zwischen den Messungen nötig, um individuelle Veränderungen sicher zu erfassen. Eine schnelle trainingsmethodische Reaktion auf ausbleibende oder gar negative Effekte ist somit schwerlich möglich. Eine elegante Möglichkeit wäre der Einsatz von Biomarkern, die Veränderungen des Knochenmetabolismus relativ schnell erfassen können [765]. Nach Obermayer-Pietsch et al. [765] kann die biologische Reaktion des Knochens auf eine pharmakologische Therapie via geeigneter Knochenstoffwechselmarker direkt monitorisiert werden – im Spannungsfeld des körperlichen Trainings liegen allerdings nur wenige Untersuchungen (u.a. [766]) und somit eine limitierte Evidenz für ein entsprechendes Monitoring vor. Bevor eine ausreichend präzise Trainingsregelung via Biomarker des Knochenstoffwechsels möglich ist und empfohlen werden kann, müssen weitere Untersuchungen erfolgen.

Die belastbare Erfassung der Maximalkraft durch skalierbare Geräte und exakt reproduzierbare Ausführungsposition kann auch bei 1RM-unabhängiger Intensitätsvorgabe (RIR, [363]) einen Beitrag zum angemessenen Leistungs- und Belastungsmonitoring liefern. Wir empfehlen zur Erfassung der Maximalkraft bei ausreichend belastbaren Personen Tests der ausbelasteten Wiederholungsleistung im Bereich 8-12 Wdh. unter Anwendung geeigneter Prädiktionsformeln [361,767]. Der Vorteil gegenüber den klassischen 1RM-Tests (u.a. [768]) liegt weniger in der (nach ausreichend langer Konditionierungsphase und geeigneter Testübungen) ohnehin sehr geringen Verletzungsgefahr [769], als vielmehr der problemlosen Implementierung der Testungen im laufenden Trainingsprozess.

Im Bereich der Sturzprophylaxe sind sportmotorische Test zur Erfassung und Monitoring von Sturzrisikofaktoren eine etablierte Vorgehensweise. Die Bundesinitiative Sturzprävention empfiehlt zur Einschätzung der funktionellen Leistungsfähigkeit im Bereich der Sturzrisikofaktoren [61,62] den „Modified Timed Up-and-Go Test“ (TUG) [770] sowie die „Short Physical Performance Battery“ (SPPB, [771]). Die 2023 Leitlinie DVO „Prophylaxe, Diagnostik und Therapie der Osteoporose“ [60] empfiehlt zur Risikoberechnung die Durchführung des TUG, für den ein hohes prädiktives Potential für Hüft- und osteoporotische Hauptfrakturen angegeben wird [772,773]. Die SPPB enthält die Einzeltests Chair Rise Test (Zeit für 5x vom Stuhl aufstehen und setzen), einen Test der habituellen Ganggeschwindigkeit über 4 m, sowie einen Gleichgewichtstest im geschlossenen-, Semitandem und Tandemstand. Werden diese Tests primär zum Monitoring individueller trainingsbedingter Veränderungen verwendet, muss ggf.

⁷⁹ Ca. 1% für KMD-LWS. Multipliziert man diesen Wert mit dem „least significant change“ (LSC), der als das 2,8-fache des Variationskoeffizienten definiert ist, liegt eine klinisch relevante individuelle Veränderung der Knochendichte im Verlauf erst bei mindestens 2,8% vor [764].

eine individuelle Anpassung insbesondere des Gleichgewichtstests zur Vermeidung eines Boden-⁸⁰ oder Deckeneffektes⁸¹ bzw. zu langer Testdauer vorgenommen werden.

Assessments im Sinne sportmotorischer Tests zur Erfassung von Veränderungen der Leistungsfähigkeit sind sehr fehleranfällig. Auch bei Vorauswahl geeigneter Tests durch ein Expertengremium (s.o.), also hoher Validität („Gültigkeit“), sind weitere Gütekriterien wie Reliabilität und Objektivität penibel zu beachten, um die z.T. geringen individuellen Veränderungen sicher und ausreichend genau erfassen zu können. Aspekte der Reliabilität, also der Zuverlässigkeit mit der das Merkmal gemessen wird, bedürfen einer absolut identischen Testdurchführung unter exakt denselben Rahmenbedingungen [774].

Hohe Erwartungen dürfen an KI-basierte Monitoringsysteme [775] gerichtet werden, die komplexe, sturzrelevante Online-Daten zu Ganganalyse, Gleichgewichtsfähigkeit und Vitalfunktion über geeignete Endgeräte der Nutzer überwachen, dokumentieren und idealerweise zu geeigneten Steuerungsgrößen für ein Körpertraining zusammenfassen können.

Bewertung der Studienqualität und Transferierbarkeit der Ergebnisse

Die Generierung der vorliegenden Evidenz zur Applikation dieses Trainingsprinzips leitet sich primär aus grundsätzlichen, Kohorten- und Outcome-übergreifenden Erkenntnissen der Trainingswissenschaften ab (u.a. [72,726]). Die konkrete Generierung der Evidenz für die unten aufgeführte Empfehlung erfolgte durch Expertenrating der LL-Lenkungsgruppe auf der Basis vorliegender Empfehlungen, Leitlinien und Positionspapieren.

Formulierung der Empfehlung

66	Empfehlung 66	Neu, Stand 2024
Empfehlungsgrad B	Die individuellen trainingsinduzierten Veränderungen von Frakturrisikofaktoren sollten mit geeigneten Methoden in regelmäßigen Abständen überprüft werden.	
Evidenzgrad 4	[60-62]	
	Konsensstärke: 100%	

⁸⁰ leistungsschwacher Teilnehmer schafft es nicht im Tandemstand zu stehen und erzielt somit kein Ergebnis.

⁸¹leistungstarker Teilnehmer ist durch einen Test im geschlossenen Stand nicht gefordert und kann sich nicht steigern.

6. Zusammengefasste trainingsmethodische Empfehlungen

Die Ansteuerung von drei potentiellen Trainingszielen zur Frakturprophylaxe (Abb. 27) mit unterschiedlicher individueller Gewichtung stellt insbesondere unter der Prämisse gesundheitssportlicher Rahmenbedingungen⁸² eine besondere Herausforderung dar.



Abb. 27: Ansatzpunkte und Trainingsziele eines körperlichen Trainings zur Frakturprophylaxe (eigene Grafik in Anlehnung an [73]).

Die Zuweisung primärer und sekundärer Trainingsziele nach Kategorisierung in (Fraktur-) Risikogruppen ist wichtiger Ansatzpunkt von Trainingsempfehlungen (Tab. 12) und erleichtert die trainingsmethodische Ansteuerung und Umsetzung der Maßnahmen im Trainingsprozess. Zwar stellen besonders im nicht-ossären Bereich der Frakturprophylaxe die Trainingsziele „Reduktion der Sturzhäufigkeit“ und „Verbesserung des Sturzablaufes“ individuell nur schwer zu validierende Grobziele dar⁸³, zur Ausrichtung oder/und Proportionalisierung des Trainings (Tab. 12) erscheint die vorgelegte Kategorisierung jedoch ausreichend.

Tab. 12: Zuweisung der kategorisierten Gruppen auf für die Frakturprophylaxe relevanten Trainingsziele (siehe Tab. 6).

Risikogruppen	Trainingsziel
(1) Personen mit erhöhtem Knochenumbau, maximal mäßiggradige Verringerung der Knochenfestigkeit (im Sinne einer Osteopenie) ohne relevant erhöhtes Sturzrisiko	Erhalt/Erhöhung der Knochenfestigkeit
(2) Personen mit deutlich herabgesetzter Knochenfestigkeit im Sinne einer Osteoporose ohne Fraktur und ohne relevant erhöhtes Sturzrisiko*	Erhalt/Erhöhung der Knochenfestigkeit
(3) Personen mit deutlich herabgesetzter Knochenfestigkeit im Sinne einer Osteoporose, ohne Fraktur aber mit wesentlichen Sturzrisikofaktoren*	Erhalt/Erhöhung der Knochenfestigkeit Reduktion der Sturzhäufigkeit Verbesserung des Sturzablaufes
(4) Personen mit Osteoporose-assoziierten Frakturen und multiplen und/oder ausgeprägten Sturzrisikofaktoren*	Reduktion der Sturzhäufigkeit Verbesserung des Sturzablaufes Erhalt/Erhöhung der Knochenfestigkeit
(5) Personen mit multiplen Osteoporose-assoziierten Frakturen, hohem Sturzrisiko und sehr geringer körperlicher Belastbarkeit*	Reduktion der Sturzhäufigkeit Verbesserung des Sturzablaufes

* Die bezeichneten Gruppen sollen gemäß S3 Leitlinie „Prophylaxe, Diagnostik und Therapie der OSTEOPOROSE bei postmenopausalen Frauen und bei Männern ab dem 50. Lebensjahr“ [60] in ein übergreifendes Therapiekonzept eingebunden werden. Dies gilt insbesondere für die gemäß 3-Jahres-Frakturnisiko durchzuführende medikamentöse Therapie [60].

⁸² U.a. limitierte finanzielle und personelle Ressourcen, häufig geringe Neigung zu hoher Trainingsfrequenz.

⁸³ Zur Überprüfung des Trainingserfolges ist eine entsprechende Aufschlüsselung in Sturzrisikofaktoren nötig.

6.1. Übergreifende trainingsmethodische Erwägungen

Trainingsmethodisch ist in den ersten 3-6 Monaten des Körpertrainings unabhängig von Leistungsfähigkeit und Frakturgefährdungsgrad des Betroffenen eine behutsame und vorsichtige Vorgehensweise anzuraten. Trainingsziel dieser Trainingsphase sollte die physische, kognitive und psychische Eingewöhnung und Konditionierung für höhere Belastung sein, die Überschwelligkeit der Belastung ist insbesondere in den ersten Wochen dieses Zeitraums vernachlässigbar. Konkret sollte (falls anwendbar, Tab. 6) zunächst ein Training mit niedrigen Bodenreaktionskräften (keine Sprünge!) und/oder moderatem Krafttraining mit geringer relativer Intensität ($<70\%$ 1RM) und großer Distanz zur muskulären Ausbelastung (nicht-Wiederholungsmaximum, nRM [54,362,363]) durchgeführt werden, u.a. um den langsam(er) adaptierenden Systemen (Bänder- und Sehnenapparat) ausreichend Zeit für Anpassungen zu geben und Überlastungen zu vermeiden. Auf schnell- oder explosivkräftige Methodenvarianten des Krafttrainings („Powertraining“), also Übungen mit hoher Bewegungsgeschwindigkeit, sollte auch bei der Möglichkeit einer gerätegestützten Trainingsdurchführung in der initialen Trainingsphase verzichtet werden. Eine etwas zügigere Progression und Annäherung an definitiv überschwellige Reize wird für den Bereich des Gang-, Gleichgewichts- und funktionellen Trainings (GBCFT), 3D-Trainings (Tai-Chi, Qi Gong, Tanz), IKMT oder des Gleichgewichts-/Perturbationstraining im Spannungsfeld der Sturzprophylaxe empfohlen. Das Prinzip der progressiven Belastungserhöhung [72], mit in der Regel allmählicher und nur im Einzelfall sehr guter Belastbarkeit „sprunghafter“ Belastungssteigerung ist zu berücksichtigen. Ähnliches gilt für das Trainingsziel „Verbesserung des Sturzablaufes“ zumindest für protektive Maßnahmen im Anwendungsbereich von Reaktionsfähigkeit und Flexibilität. Im Gegensatz dazu ist bei einem dedizierten Sturztraining/„Fallschule“, sei es zur Reduktion der Sturzenergie nach vorne (bspw. „fall arrest strategy“ [702]) oder zur Seite (bspw. Abrolltechniken aus dem Kampfsport [709,776]), ein vorhergehendes Training der Kraft-/Schnellkraft, Flexibilität und einschlägiger koordinativer Fähigkeiten zwingend anzuraten. Nach erfolgter Konditionierung ist es sinnvoll, diese zeit- und personalintensiven Trainingsinhalte im Rahmen einer Blockperiodisierung fokussiert, als primäres Trainingsziel, über einen Zeitraum von 4 Wochen durchzuführen (s.u.). Nach initialer Eingewöhnungs- und Konditionierungsphase ist, nach individueller Möglichkeit, eine progressive Steigerung der Reizhöhe sowie eine Variation des Ausbelastungsgrades (im nRM⁸⁴ [54,363]) und der Bewegungsgeschwindigkeit mit Phasen hoher-explodiver Bewegungsgeschwindigkeit sinnvoll und langfristig notwendig, um weitere Anpassungsprozesse zu gewährleisten. Bei maßgeblichen Beschwerden bzw. Degenerationen am Bewegungsapparat sind geringe Bodenreaktionskräfte (Gehen bis langsames Laufen) und (im Krafttraining) eine moderate Reizhöhe von maximal 70-75% 1RM zu empfehlen, während vortrainierte Personen ohne Beschwerden und bei sicherer Bewegungsausführung auch höhere Intensitäten (bis zu 85-90% 1 RM) jeweils im nRM-Bereich⁸⁵ realisieren können. Dabei wird empfohlen, sowohl Bodenreaktionskräfte als auch das Krafttraining nicht dauerhaft hochintensiv zu gestalten, sondern progressiv ansteigende intensive Perioden (8-12 Wochen) mit Phasen (4-6 Wochen) niedriger bis moderater Intensität abzuwechseln [356]. Es bietet sich an, dabei die Entlastungsphasen an Feiertagen (Weihnachten-, Osterferien) oder Urlaubsphasen, also Zeitabschnitten ohne Trainingsdurchführung zu berücksichtigen.

⁸⁴ Nach ausreichender Konditionierung und Schulung der Belastungseinschätzung ist hier der „repetition in reserve“ (RIR) Ansatz [363] zu empfehlen.

⁸⁵ Also ohne muskuläre Ausbelastung.

Vor den nun erfolgenden Trainingsempfehlungen für unterschiedliche Risikogruppen soll nochmals darauf hingewiesen werden, dass es aufgrund unterschiedlicher individueller, logistischer und organisatorischer Rahmenbedingungen das universell anwendbare, effektive und sichere Trainingsprotokoll nicht geben kann. Die unten aufgeführten Empfehlungen sollten also als evidenzbasierte Grundlage und Anregung für die Zusammenstellung individualisierter Trainingsprogramme, nicht aber als verbindliche Handlungsanweisung für ein Training mit Erwachsenen mit erhöhter Frakturgefährdung angesehen werden.

6.2. Personen mit erhöhtem Knochenumbau, maximal mässiggradige Verringerung der Knochenfestigkeit (im Sinne einer Osteopenie) ohne relevant erhöhtes Sturzrisiko

Diese Gruppe setzt sich meist aus relativ leistungsfähigen Frauen in der frühen Menopause mit Östradiolmangel-induzierter muskuloskelettaler Problematik oder Menschen mit Glukokortikoid-induzierter mässiggradig verringerter Knochendichte zusammen. Vorrangiges Trainingsziel ist klar der Erhalt/die Erhöhung der Knochenfestigkeit (Tab. 6). Bei diesem Personenkreis sollte das Knochengewebe über alle Knochenfaktoren⁸⁶ komplex beeinflusst werden. Geeignete Trainingsinhalte sind Trainingsformen mit (gegenüber der habituellen Belastung) erhöhten Bodenreaktionskräften (ground-reaction-forces: GRF) wie Laufen, Tanzen, Aerobic/HI-Aerobic sowie geeignete (intensive) Spiele/Sportspiele mit Sprungbewegungen, Hoch-Tiefentlastung oder schnellen Stops. Intensitätsorientierte Methodenvarianten wie ein (hochintensives) Intervalltraining (HIIT) mit Belastungsspitzen und intermittierenden Phasen niedriger Belastung sind gegenüber der Dauermethode zu präferieren. Eine Sprungsequenz (bspw. 4-6 Sätze mit 8-12 Wdh. multilateraler Sprünge mit 2 Hz und 30-45 s Pause zwischen den Sätzen) mit progressiver Erhöhung der Bodenreaktionskräfte kann dieser einführenden ca. 15-20 min Sequenz folgen. Ein periodisiertes Krafttraining idealerweise aller großen Muskelgruppen (10-13 Übungen) mit variabler Reizintensität (60-90% 1RM) und Bewegungsgeschwindigkeit (4s-1s-4s bis „explosiv“-1s-2s) gegen moderate bis hohe Widerstände (60-80% 1RM) kann je nach zeitlicher Disposition als Einsatz- oder Mehrsatztraining mit oder ohne Kraftgeräte durchgeführt werden. Auch wenn der Schwerpunkt des Trainings auf der positiven Beeinflussung der Knochenfestigkeit liegt, so bewirkt dieses multimodale, intensive Training beiläufig die Verbesserung koordinativer und insbesondere konditioneller Fähigkeiten [175,777], die in engem Zusammenhang mit Sturz und Fraktur [778] gesehen werden. Daneben werden nach entsprechend intensiven Ausdauer- und Kraftsequenzen (s.o.) auch Verbesserungen kardiometabolischer Risikofaktoren berichtet [755,779-781], die in der Menopause bzw. mit höherem Lebensalter zunehmend relevanter werden.

6.3. Personen mit deutlich herabgesetzter Knochenfestigkeit im Sinne einer Osteoporose ohne Fraktur und ohne relevant erhöhtes Sturzrisiko

Die oben genannten Trainingsinhalte gelten mit einigen Einschränkungen auch für Frauen mit Osteoporose ohne klinische Manifestation. Bei der Auswahl der jeweiligen Belastungsinhalte sollte allerdings das höhere Frakturrisiko berücksichtigt werden. Trainingsinhalte wie schnelles Gehen, Laufen, Tanzen, Aerobic oder geeignete Spielformen [782] mit moderaten GRFs können als Trainingsinhalte uneingeschränkt empfohlen werden, während (hoch)intensive Sprungformen (bspw. Tiefsprünge) nicht mehr zum Einsatz kommen sollten. Ein ebenfalls durchzuführendes Kraft-/Schnellkrafttraining sollte insbesondere bei Fokus auf

⁸⁶ axiale Belastung, Muskelzug, Ausschüttung anaboler Substanzen via kurze, intensive Ausdauer oder Kraftbelastung [188].

die Rumpfmuskulatur idealerweise, aber nicht zwingend an Kraftgeräten mit der Möglichkeit geführter Bewegungsausführung durchgeführt werden. Allerdings sollten Übungen mit hoher Rückenextensions-/Flexionsbelastung vermieden werden, um vertebrale Frakturen zu vermeiden (s.u.). Obwohl auch hier der Trainingsschwerpunkt noch klar auf der positiven Beeinflussung der Knochenfestigkeit liegt, ist es sinnvoll, durch höhere Anforderungen und Akzentuierung koordinativer Aspekte von knochenrelevanten Trainingsinhalten wie „Tanzen“, „Aerobic“ und „Spielformen“ sowie durch ein entsprechend ausgerichtetes Kraft-/Schnellkrafttraining (bspw. Kniebeugevariation auf instabilem Untergrund) Trainingsreize mit positivem Einfluss auf Sturzrisikofaktoren [778] zu applizieren.

6.4. Personen mit deutlich herabgesetzter Knochendichte im Sinne einer Osteoporose ohne Fraktur aber mit wesentlichen Sturzrisikofaktoren

In Abhängigkeit vom körperlichen Leistungszustand und Sturzrisiko besitzt bei dieser Zielgruppe ein Training der koordinativen und konditionellen Fähigkeiten zur Sturzprophylaxe zunehmend hohen Stellenwert. Während es bei den vorgenannten Gruppen ausreicht mit relativ unspezifischen und übergreifenden Trainingsinhalten/Übungsformen (Tanzen, Aerobic, Polka, Spielformen) positiven Einfluss auf die Sturzhäufigkeit zu nehmen [126], sollte bei dieser Gruppe ein spezifisches Training des Gleichgewichts mit kontinuierlichen, reaktiven und proaktiven Trainingsinhalten appliziert werden [736]⁸⁷. Ein Krafttraining aller großen Muskelgruppen mit Phasen schneller Bewegungsausführung gegen hohe Widerstände sollte idealerweise und zwingend für die Muskulatur der Extremitäten funktionale Aspekte berücksichtigen. Wichtig ist zudem, dass die Trainingsinhalte und Körperübungen weitgehend in sicherer, nicht sturzrelevanter Position durchgeführt werden. Dies gilt ebenfalls für Spielformen, Aerobic oder Tänze, die durch entsprechende Modifikation von (Spiel-)Regelwerk oder Übungsausführung eine wesentliche Reduktion des Sturzrisikos ermöglichen können.

6.5. Personen mit Osteoporose-assoziierten Frakturen und multiplen und/oder ausgeprägten Sturzrisikofaktoren

Bei Frauen mit manifester Osteoporose und multiplen Sturzrisikofaktoren weist die Sturzprophylaxe bereits einen deutlich höheren Stellenwert auf als die Verbesserung der Knochenfestigkeit (Tab. 1). Dies begründet sich zu einem guten Teil dadurch, dass bei manifester Osteoporose, also bei Vorliegen von Frakturen, eine unmittelbare Verordnungsfähigkeit potenter pharmakologischer Therapie besteht [60]. Bei vorliegender moderater Evidenz [26,27] für weitgehend ausbleibende additive Effekte körperlichen Trainings bei pharmakologischer Osteoporose-Therapie zumindest auf die Knochendichte [26,27,467]⁸⁸ ist eine weitgehende Fokussierung auf die Trainingsziele „Reduktion der Sturzhäufigkeit“ und „Verbesserung des Sturzablaufes“ grundsätzlich gerechtfertigt. Mögliche Synergieeffekte eines sturzreduktions-orientierten funktionalen Kraft-, Tai-Chi, IKMT oder Perturbationstrainings (s.u.) auf die Knochendichte bleiben dabei unbenommen. Im Detail sollte ein funktionelles Krafttraining aller großen Muskelgruppen Trainingsphasen mit hoher Bewegungsgeschwindigkeit mit Fokus auf die Extremitäten enthalten. Die Widerstände, also die Reizhöhe des Schnellkrafttrainings, sollten von moderat bis hoch ($\approx 60\text{--}80\%$ 1 RM) mit deutlicher Distanz zur muskulären Ausbelastung (bspw. 7-8 Wdh. bei 10-12RM [363]) variieren. Übungen unter Rumpfextension und -flexion sollten (falls überhaupt durchgeführt, s.u.) geringe Reizhöhen ($50\text{--}60\%$ 1RM) und niedrige Bewegungsgeschwindigkeiten ($\geq 2\text{s--}1\text{s--}2\text{s}$)

⁸⁷ Details im entsprechenden Beitrag

⁸⁸ Eine Ausnahme bildet die Kombination aus Vibrationstraining und Teriparatid- Behandlung für die KMD-LWS [282].

unter nRM applizieren, um die Gefahr von Wirbelkörperfrakturen zu minimieren. Empfohlen wird, das Krafttraining initial an Geräten auszuführen, um eine gute Bewegungsführung und ein Training mit hoher Reizhöhe und Bewegungsgeschwindigkeit unter hoher Verträglichkeit und Sturzsicherheit realisieren zu können. Neben knochenanabolen Effekten kann über die Kräftigung der Haltemuskulatur eine Verbesserung der Aufrichtung des Rumpfes erreicht werden, was zu einer Entlastung der durch Wirbelkörperfrakturen fehlgestellten bzw. irritierten Wirbelgelenke führt und langfristig eine Schmerzreduktion bewirkt. Bei ausgeprägter Hyperkyphose als Sturzrisikofaktor [542] sollte einem Krafttraining der Rückenmuskulatur [546] besondere Relevanz zukommen. Dass ein Rückenkrafttraining bei Menschen mit vertebrealen Frakturen sicher und effektiv (insbesondere was Folgefrakturen angeht) mit einfachen Mitteln appliziert werden kann, zeigen mehrere Untersuchungen [783,784]. Allerdings sind Kraftübungen, die mit hohen Kompressionsbelastungen der Wirbelsäule oder mit hohen Stoßbelastungen (Sprünge) verbunden sind, bei diesem Kollektiv absolut kontraindiziert (s.u.). Auch hinsichtlich der zeitlichen Verteilung der Trainingsinhalte sind Übungen zur Verbesserung des statischen (statisch-kontinuierlichen) und dynamischen (dynamisch-kontinuierlichen, proaktiven, reaktiven) Gleichgewichtes Schwerpunkt der Trainingseinheit [572]. Besteht die Möglichkeit zu einem Perturbationstraining an Geräten/Vorrichtungen, sollte diese derzeit schwer zugängliche Trainingstechnologie aufgrund ihrer hohen Zeiteffektivität [582,586] nicht überdauernd, sondern ggf. blockperiodisiert über 2-4 Wochen Dauer in regelmäßigen Abständen angewandt werden. Flankierend zu diesen Trainingsinhalten kann ein (idealerweise) seitenalternierendes Vibrationstraining empfohlen werden [296,466], das insbesondere bei Menschen mit einer Osteoporose [279] ebenfalls günstige Effekte auf die Knochenfestigkeit [280] und Sturzgrößen [466] aufweisen kann.

6.6. Personen mit multiplen Osteoporose-assoziierten Frakturen, hohem Sturzrisiko und sehr geringer körperlicher Belastbarkeit

Personen mit multiplen vertebrealen und extravertebrealen Frakturen wie insb. Hüftfrakturen sowie einer sehr geringen körperlichen Leistungsfähigkeit kommen für ein Training im Gruppenrahmen nur noch sehr bedingt in Betracht. Eine Ausnahme ist das Training im Wasser, das auch für diese Personengruppe bei ausreichender Supervision weitgehend gefahrlos durchführbar ist. Allerdings wird die Evidenz zur Anwendung von Wassergymnastik („aquatic exercise“) im Bereich der Sturzprophylaxe als limitiert betrachtet [669,678]. Insgesamt sollte bei diesem Risikokollektiv über ein individualisiertes Einzel-/Kleingruppentraining versucht werden, ein Mindestmaß an körperlicher Leistungsfähigkeit sowie an Bewegungssicherheit wiederherzustellen, um motorische Risikofaktoren, die mit einem erhöhten Sturzrisiko verbunden sind, zu reduzieren. Krankengymnastische Maßnahmen zur Mobilisation und Kräftigung unter besonderer Berücksichtigung muskulärer Dysbalancen und bestehender Schmerzproblematiken sind ebenfalls angezeigt. Zusammenfassend liegt der Schwerpunkt der Beübung also klar auf der Verbesserung der Alltagsmotorik und der Sturzprophylaxe. Ein sicheres und gut eingeführtes Heimprogramm wie bspw. das Otago Exercise Program [785] mit Fokus auf Übungen zur Kräftigung und zur Verbesserung der Gleichgewichtsfähigkeit kann die angeleitete Trainingsmaßnahme/Behandlung ergänzen. Die Knochenfestigkeit spielt als Trainingsziel eine untergeordnete Rolle, da zum einen angemessene Trainingsinhalte mit der nötigen Reizstärke kaum noch bzw. kaum noch sicher appliziert werden können und zum anderen diese Personengruppe durch eine verschreibungsfähige hocheffektive pharmakologische Therapie zur Verbesserung der Knochenfestigkeit gut versorgt werden kann [60].

7. Kontraindikationen und Vorsichtsmaßnahmen für ein körperliches Training zur Frakturprophylaxe

Angesichts der Vielzahl der Therapieoptionen im Spannungsfeld „körperliches Training und Frakturprophylaxe“ gibt es unabhängig vom Risikoprofil der Personengruppe keine grundsätzliche Kontraindikation für ein Körpertraining, solange eine adäquate Auswahl von Trainingsinhalten und eine individuell angepasste Belastungsdosierung erfolgt.

Selbst kardiovaskuläre und kardiometabolische Erkrankungen stellen aus heutiger Sicht eher eine Indikation denn eine Kontraindikation für körperliches Training dar. Bei entsprechender Priorität kardiovaskulärer/kardiometabolischer Trainingsziele kann über eine sinnvolle Auswahl geeigneter Trainingsinhalte⁸⁹ und -methoden, wie bspw. das sicher [786] und effektiv [787,788] anwendbare „High Intensity Intervall Training“ (HIIT), ein Trainingsprogramm mit potentiell frakturpräventivem Charakter auch in der kardiologischen Rehabilitation realisiert werden. Noch essentieller als im orthopädischen Spannungsfeld ist eine entsprechende fachärztliche Betreuung unter Beachtung von Vorsichtsmaßnahmen und eine qualifizierte Supervision im kardiologischen Bereich. Zur Vermeidung von Komplikationen und insbesondere von belastungsinduzierter Ischämie bei koronarer Herzkrankheit sollte die Belastungsintensität angepasst und die Reizhöhe idealerweise über geeignete Biomarker gesteuert werden. Bei Schwindelgefahr oder rascher Ermüdung können die Übungen in sitzender oder gesicherter Position durchgeführt werden. Auf eine angemessene Atemtechnik und eine Vermeidung des Valsalva beim Krafttraining muss hingewiesen und eingewirkt werden [8].

Eine Beschreibung der Kontraindikationen bei der Durchführung von körperlichem Training zur Frakturprophylaxe im osteoporotischen Handlungsfeld muss stets differenziert mit Blick auf die jeweilige Zielgruppe erfolgen. So gibt es bei leistungsfähigen, lediglich „osteopenischen“ Personen, die keine weiteren Erkrankungen aufweisen, grundsätzlich keine speziellen Kontraindikationen zu beachten. Generell sollten aber über eine langsame, progressive Belastungserhöhung Überlastungen von Strukturen mit längerer Anpassungsdauer (z.B. Sehnen) vermieden werden.

Bei Menschen mit einer herabgesetzten Knochenfestigkeit muss, in Abhängigkeit vom Ausprägungsgrad der Reduktion beachtet werden, dass die Belastbarkeit der Wirbelkörper vermindert und damit das Risiko für trainingsinduzierte Wirbelkörperfrakturen bei intensiven Trainingsbelastungen erhöht ist. Bei hohem Risiko sind die im Zusammenhang mit klinisch manifester Osteoporose beschriebenen Grundsätze zu berücksichtigen, die im Folgenden thematisiert werden.

Bei Menschen mit einer oder mehreren Wirbelkörperfrakturen sind alle Übungen, die zu einer Stoßbelastung der Wirbelsäule (bspw. Sprünge) führen, kontraindiziert. Ebenfalls kontraindiziert sind Übungen, die mit einer hohen Kompressionsbelastung der Wirbelkörper verbunden sind, wie dies bei einem intensitätsbetonten axialen Krafttraining mit hohen Widerständen/Lasten der Fall ist. Die Belastung für Wirbelkörper (und damit das Frakturrisiko) ist in flektierter Position der Wirbelsäule besonders hoch. Demnach ist insbesondere beim Trainingsgerät „Rückenstrecker“, bei dem sich die Trainierenden im Sitzen aus flektierter Position gegen einen Widerstand im Bereich des oberen Rückens aufrichten problematisch, wenn hier mit höheren Lasten gearbeitet wird [8]. Durch eine Ausführung mit niedriger-moderater Reizintensität, Bewegungsgeschwindigkeit sowie einer individualisierten Modifikation der Bewegungsausführung (bspw. Verringerung der Bewegungsamplitude)

⁸⁹ Weight-bearing Belastung anstatt Radfahren oder Schwimmen.

können entsprechende Übungsinhalte trotzdem sicher durchgeführt werden. So sollte die Wirbelsäule bspw. bei der Geräteübung „Rückenstrecker“ in aufrechter Position stabilisiert bleiben und lediglich kleine Bewegungen ausführen, wobei der gesamte Rumpf „en block“ nach hinten bzw. leicht nach vorne geführt wird. Eine Flexion der Wirbelsäule unter Belastung gilt es bei der Übungsauswahl grundsätzlich zu vermeiden, da hier der ventrale Anteil der Wirbelsäule vermehrt belastet wird. Übungen mit Flexion/Extension der Wirbelsäule unter Entlastung („Katzenbuckel/Pferderücken“, „Rückenschaukel“) sind hingegen unproblematisch. Auch Rotationsbelastungen der Wirbelsäule sind dann unproblematisch, wenn sie in entlasteter Position und ohne Schwung ausgeführt werden („Drehdehnlagerung“). Allerdings können in bestimmten Fällen (u.a. bei Instabilitäten, Wirbelgleiten) Rotationsbewegungen als unangenehm empfunden werden und sollten dann nicht ausgeführt werden.

Nach niedrig-traumatischen, stabilen Wirbelkörperfrakturen soll schnellstmöglich eine Mobilisierung erfolgen [789]. Vier bis zwölf Wochen nach der Wirbelkörperfraktur beziehungsweise bei nachlassendem Schmerzniveau kann nach ärztlicher Freigabe ein individualisiertes, von Physio- bzw. Bewegungstherapeuten angeleitetes Trainingsprogramm begonnen werden [790]. In den ersten Wochen des Trainingsprogrammes stehen dabei neben einer allgemeinen Aktivierung, die Verbesserung der körperlichen Funktion und Schmerzfreiheit im Vordergrund. Körperhaltungsschulung und isometrische Stabilisierungsübungen in einer aufrechten Wirbelsäulenposition ohne externe Krafteinwirkung bzw. Widerstände sind dabei zielführende Trainingsinhalte. Eine muskuläre Ausbelastung bis zum Punkt des momentanen Muskelversagens (PmM) [54,362] sollte (wie schon vielfach besprochen) bei einem Krafttraining im osteoporotischen Handlungsbereich unterbleiben.

Der Einsatz multifunktionaler Spinalorthesen⁹⁰, die ebenfalls zur signifikanten Reduktion chronischer Rückenschmerzen, Rückenkräftigung und -aufrichtung (bei Hyperkyphose) beitragen können [791], kann bei akuten vertebralen Frakturen erwogen werden [792,793]. Deutlich höher ist die Evidenz für moderne multifunktionale Spinalorthesen bei länger zurückliegenden vertebralen Frakturen (>12 Wochen). Hier zeigen die vorliegenden Untersuchungen übereinstimmend signifikant positive Effekte auf Schmerzgrößen [794-796], sodass multifunktionale Spinalorthesen als Behandlungsoption in Betracht gezogen werden sollen.

Insbesondere bei Menschen mit einer Kinesiophobie erscheinen passive Interventionsstrategien wie eine Stromtherapie geeignet. Eine Reduktion von chronischen Rückenschmerzen nach Wirbelkörperfrakturen durch mittelfrequente Inferenzstromapplikation berichten u.a. Zambito et al. [797]. Deutlich höhere Evidenzen liegen für chronische, allerdings unspezifische Rückenschmerzen nach Ganzkörper-Elektromyostimulation vor [798-800].

Bei einem Training mit dem Fokus „Sturzreduktion“ ist selbstverständlich zu beachten, dass ein Training selbst keine Stürze provoziert. Die Ziele eines wirksamen Gleichgewichtstrainings, d.h. den Übenden in einer labilen potentiell sturzgefährdeten Position adäquat zu fordern, ohne dass es dadurch zu einem Sturz kommt, ist dabei eine Herausforderung und bedarf einer guten Differenzierung. Im Gruppentraining mit sturzgefährdeten Menschen bietet sich Partnerarbeit an. Leistungsschwache Teilnehmer sollten mit standsicheren, geübten Partnern oder mit dem Bewegungstherapeuten/Übungsleiter arbeiten. Eine Sicherung bspw. über die Wand oder einen gut fixierten Stuhl ist ebenfalls hilfreich.

Bei Personen mit Endoprothesen gilt es, die hier bestehenden Kontraindikationen zu berücksichtigen. Kontraindiziert bei Knie- und Hüft-Endoprothesen sind Stoßbelastungen, wie sie bspw. bei Sprüngen vorkommen. Bei Knie- und Hüft-Endoprothesen sind auch Übungen,

⁹⁰ Hier: Wirbelsäulenaufrichtende Aktivorthesen zur Entlastung und Korrektur der Lenden-/Brustwirbelsäule.

die zu einer Rotationsbelastung der Prothese führen, kontraindiziert. Bei Bodenübungen sollte der Transfer von der Bewegungsfachkraft angelernt und eingeübt werden. Das Risiko der Luxation eines künstlichen Hüftgelenkes wird allerdings meist überschätzt. So dürfen ca. drei Monate nach der entsprechenden Operation alle Bewegungen achsengerecht endgradig ausgeführt werden. Komplexe Bewegungen und insbesondere die kombinierte Bewegung der Flexion-Adduktion-Innenrotation (bspw. zur Dehnung des m. piriformis) bergen allerdings durch die Hebelwirkung ein Risiko für eine Hüftluxation.

In den unten aufgeführten Empfehlungen werden im Weiteren nicht alle der oben aufgeführten Aspekte adressiert, da sie nur bedingt der Thematik der vorliegenden Leitlinie zuzuordnen sind.

Bewertung der Studienqualität und Transferierbarkeit der Ergebnisse

Die Generierung der Evidenz der Empfehlungen basieren auf dem internationalen (Delphi)Consensus-Artikel von Ponzano et al. [790], den internationalen Empfehlungen von Beck et al. [8] sowie einem Konsens innerhalb der Leitlinien-Lenkungsgruppen. Die Generierung der Evidenz für die Empfehlung zum Einsatz von Spinalorthesen bei frischen vertebraalen Frakturen lehnt sich an die DVO-Leitlinie „Prophylaxe, Diagnostik und Therapie der Osteoporose bei postmenopausalen Frauen und bei Männern ab dem 50. Lebensjahr“ [60] an.

Formulierung der Empfehlung

67	Empfehlung 67	Neu, Stand 2024
Empfehlungsgrad A	Nach niedrig-traumatischen, stabilen Wirbelkörperfrakturen soll schnellstmöglich eine Mobilisierung erfolgen.	
Evidenzgrad 2	[789,790]	
	Konsensstärke: 100%	
68	Empfehlung 68	Neu, Stand 2024
Empfehlungsgrad B	Personen mit frischen vertebraalen Frakturen sollten 4-12 Wochen nach der Wirbelkörperfraktur beziehungsweise bei nachlassendem Schmerzniveau nach ärztlicher Freigabe ein supervidiertes, bewegungstherapeutisch ausgerichtetes Trainingsprogramm aufnehmen.	
Evidenzgrad 4	[790]	
	Konsensstärke: 100%	
69	Empfehlung 69	Neu, Stand 2024
Empfehlungsgrad B	Das entsprechende Trainingsprogramm (Empfehlung 68) sollte ein Gleichgewichts-, funktionsgymnastisches Training sowie ein dynamisches Krafttraining idealerweise an Geräten beinhalten.	
Evidenzgrad 4	[8,790]	
	Konsensstärke: 100%	
70	Empfehlung 70	Neu, Stand 2024
Empfehlungsgrad A	Nach Erlernen der technisch korrekten Ausführung soll das Körpertraining (s.o.) mit niedriger mechanischer Belastung und deutlicher Distanz zur muskulären Ausbelastung durchgeführt werden.	
Evidenzgrad 4	[8,790]	
	Konsensstärke: 100%	

71	Empfehlung 71	Neu, Stand 2024
Empfehlungsgrad A	Nach osteoporotischen Wirbelkörperfrakturen soll während der Übungsdurchführung ganz besonders auf eine stabile Haltung und sichere Übungsposition geachtet werden.	
Evidenzgrad 4	[8,790]	
	Konsensstärke: 100%	
72	Empfehlung 72	Neu, Stand 2024
Empfehlungsgrad A	Bei der Übungsauswahl sollen folgende Übungen nicht durchgeführt werden: (1) hohe Stoß- und Scherbelastung des Skelettsystems, (2) endgradige Bewegungen der Wirbelsäule in Flexion oder Extension, (3) hohe Kompressionsbelastungen der Wirbelkörper durch hohe axiale Belastungen oder intensive Muskelanspannungen insbesondere gegen äußere Widerstände, (4) einseitige Belastungen der vorderen Wirbelkörpersegmente durch axiale Belastungen oder Muskelanspannungen in flektierter Wirbelsäulenposition, (5) Rotationsbelastungen der Wirbelsäule, ruckartig und/oder unter Belastung, (6) high-Impact-Belastungen, Bewegungen oder Anspannungen gegen hohe Widerstände und Belastungen der Wirbelsäule in ungünstigen Positionen (insb. in Flexions- und/oder Rotationsposition).	
Evidenzgrad 4	[8,790]	
	Konsensstärke: 100%	
73	Empfehlung 73	Neu, Stand 2024
Empfehlungsgrad 0	Der Einsatz von Spinalorthesen zur Reduktion chronischer Rückenschmerzen, Rückenkräftigung und -aufrichtung innerhalb der ersten Wochen nach der Fraktur kann erwogen werden.	
Evidenzgrad 1a	[791-793]	
	Konsensstärke: 100%	

Pädagogische Hinweise

Grundsätzlich ist die Mehrzahl der Menschen mit manifesten Frakturen oder ausgeprägtem Frakturrisiko tendenziell eher ängstlich und übervorsichtig. Sturz- und Bewegungsangst sind gerade bei Personen mit Osteoporose und insbesondere Menschen mit vertebrealen Frakturen besonders häufig anzutreffen und ausgeprägt [801,802]. Die Betroffenen haben wenig Vertrauen in ihre Belastbarkeit und halten sich oft noch lange an die Belastungsvorgaben der initialen Akutphase. Somit ist entscheidend, dass durch das erfolgreiche Bewältigen von Bewegungsaufgaben Angst abgebaut, Selbstvertrauen/Selbstwirksamkeit gewonnen und eine realistische Einschätzung der Leistungsfähigkeit erlangt wird.

8. Geeignete Settings für ein körperliches Training zur Frakturprophylaxe

Im Rahmen der Primärprävention kann problemlos ein selbstständiges Training idealerweise unter qualifizierter Supervision in gesundheitsorientierten Fitnessstudios oder Sportvereinen betrieben werden. Durch die Möglichkeit der Kombination von Sportspielen (bspw. Badminton, Squash, Volleyball), supervidierten Kursen mit gewichtstragender Belastung (HIIT, HI-Aerobic, Tai Chi), funktionellem Krafttraining (ggf. als Kursangebot), überwachtem Gerätetraining sowie ggf. der Möglichkeit eines WBV-Trainings, können eine Vielzahl potentiell knochenanaboler Trainingsreize gesetzt werden. Trainingsmethodisch passend wäre bspw. ein zweimaliges Training/Woche mit den Inhalten HI-Aerobic und Krafttraining sowie eine TE/Woche „Badminton“ oder „Volleyball“ oder zwei TE von 15 min Vibrationstraining. Regelmäßige Belastungsvariationen und eine Progression der Belastung im Verlauf müssen dabei vom Trainierenden selbst berücksichtigt und in enger Kooperation mit dem meist hochqualifizierten Personal dieser Einrichtungen umgesetzt werden.

Im Bereich der Sekundär- oder Tertiärprävention sollte ein höherer Supervisionsgrad angestrebt werden. Eine wesentliche Entscheidung ist dabei, ob das Training als Einzel- oder Gruppentraining durchgeführt werden soll/kann. Im Bereich der Sturzprävention empfehlen Gross et al. [61] und Jansen et al. [62], Betroffene nach Einschätzung ihrer Sturzgefährdung und Gruppentauglichkeit mittels modifiziertem STEADI-Algorithmus [61,62] strukturierten Trainingsmaßnahmen im Gruppenrahmen oder im Heimtraining als Einzelangebot zuzuweisen. Angebotsstrukturen oder gesetzliche Regelungen für ambulante Sturzpräventions-Maßnahmen als Einzelangebote existieren in Deutschland derzeit allerdings nicht [61]. Bezüglich der Effektivität beider Angebotsformen liegen im Bereich der Sturzprophylaxe, im Gegensatz zu meta-analytischen Daten zur Häufigkeit niedrig-traumatischer Frakturen [16], keine Evidenzen für die Überlegenheit des Einzel- versus Gruppentrainings mit und ohne fachliche Supervision vor [14]. Ein Training in der Gruppe birgt jedoch, was soziale und motivationale Effekte sowie Supervisionsaspekte anbelangt, vielerlei Vorteile. Im Bereich der Primärprävention ist ein (Gruppen-)Training zur Sturzprophylaxe als förderfähige Maßnahme im Leitfaden Prävention der gesetzlichen Krankenkassen im Rahmen § 20, SGB V ausgewiesen [62]. Die Dauer entsprechender Kurse, die einer zentralen Zertifizierung unterliegen, betragen meist 8-12 Wochen mit 1-2 TE von 45-90 min /Woche. Die Teilnehmer, die einer ausgewiesenen Zielgruppe angehören sollen, dürfen keine Kontraindikationen für ein Körpertraining aufweisen. Eine Überschneidung zum unten aufgeführten Rehabilitationssport und Funktionstraining besteht in der Gruppengröße (max. 15 Teilnehmer) sowie dem Ausschluss komplett oder überwiegend gerätegestützter Bewegungsangebote. Es erfolgt eine Vorfinanzierung des Angebots durch den Teilnehmer mit großteiliger Rückerstattung durch die GKV nach ausreichend häufiger Teilnahme.

Ein aus unserer Sicht ideales Gruppentraining zur Frakturprophylaxe für Kollektive mit Osteoporose, mit oder ohne manifeste Frakturen, ist der Rehabilitationssport (RS) und das Funktionstraining (FT) nach § 64 SGB IX [230,245]. RS und FT sind nach ärztlicher Verordnung durch die Rehabilitationsträger (u.a. Rentenversicherung, gesetzliche Krankenkassen) zu bewilligen und werden für den Teilnehmer kostenfrei in einer anerkannten Sportgruppe moderater Größe (max. 15 Personen) unter Leitung eines lizenzierten Übungsleiters mit bundesweit einheitlichem Curriculum durchgeführt. Träger dieser Angebote können Therapie-/Gesundheitszentren, Selbsthilfegruppen, Sportvereine, Fitnessstudios oder Physiotherapiepraxen sein, die einer Überprüfung der Rehabilitationsträger unterliegen. Die Verordnungsanzahl kann bei bis zu 3 Übungsveranstaltungen/Woche mit einer Mindestdauer von 45 min beim Rehabilitationssport bzw. bei FT bei 30 min (Trockengymnastik) bzw. 20 min

(FT im Wasser) liegen. Die Gruppen sind verpflichtet an Qualitätssicherungsprogrammen der Rehabilitationsträger teilzunehmen. Die hohe Anzahl (≈15.000) von RS und FT-Gruppen im Spannungsfeld „Osteoporose“ in Deutschland [803] gewährleistet zudem ein relativ flächendeckendes Angebot. Funktionstraining oder Rehabilitationssport sind einem langfristigen Einsatz von Physiotherapie (insbesondere mit passiven Maßnahmen) vorzuziehen⁹¹. Die grundsätzliche Effektivität des Settings Rehabilitationssport im Spannungsfeld Osteoporose respektive Frakturprophylaxe wurde über eine randomisierte, kontrollierte Untersuchung mit selbstständig lebenden Frauen ≥65 Jahre erbracht, die positive Ergebnisse auf die Studienendpunkte „Knochendichte“, „Sturzhäufigkeit“ sowie der „Frakturhäufigkeit“ nachwies [126]. Eine Limitation dieser Angebote ist, dass sie derzeit für Menschen ohne Osteoporose-Erkrankung, aber hohem Sturzrisiko nicht verordnungsfähig sind.

In Österreich liegt die Zuständigkeit der Primärprävention bei der Pensionsversicherungsanstalt. Im Rahmen der Gesundheitsvorsorge Aktiv, einer sogenannten Kur (evtl. als Heilverfahren) bei Erkrankungen des Stütz- und Bewegungsapparates (stationär, 3 Wochen), umfasst das Leistungsprofil Heilgymnastik als Einzeltherapie (25 min) und als Gruppentherapie (25 min, Gruppengröße max. 12 Personen); eventuell zusätzlich auch als Wassergymnastik. Weitere Bestandteile dieser Primärprävention sind die medizinische Trainingstherapie (Ausdauer- und Krafttraining in der Gruppe) sowie ein Sensomotorik-Training (mit/ohne Gerät ebenfalls in der Gruppe). Thermo- und Mechanotherapien sind weitere Maßnahmen zur frühzeitigen Behandlung von Erkrankungen (im Sinne einer Sekundärprävention).

Nach einer Fragilitätsfraktur sind die Gesundheitskassen gemäß gesetzlicher Vorgabe (Allgemeines Sozialversicherungsgesetz (ASVG): § 154a) dazu verpflichtet, medizinische Maßnahmen der Rehabilitation im Anschluss an die Krankenbehandlung zu gewähren. Diese Rehabilitationsphase 2 kann nach chefärztlicher Bewilligung in Form eines stationären Aufenthaltes in einer entsprechenden Gesundheitseinrichtung (3 Wochen, verlängerbar) oder ambulant (60 Therapieeinheiten von je 50 Minuten in 6 Wochen) wahrgenommen werden. Bei Fortbestehen einer Rehabilitationsbedürftigkeit nach der Rehabilitationsphase 2 kann bei weiterer Rehabilitationsfähigkeit die Rehabilitationsphase 3 in Anspruch genommen werden. Sie inkludiert 90 Therapieeinheiten von je 50 Minuten (ambulant, 2x Woche).

Im Fall von Schmerzen oder Funktionseinschränkungen können Osteoporose-Betroffene mit/ohne Fraktur in Ordinationen für Physikalische Medizin und Rehabilitation sowie in entsprechenden Ambulatorien ambulante Therapien wahrnehmen. Die Krankenbehandlung sollte gemäß ASVG (§ 133) stets ausreichend und zweckmäßig, aber das Maß des Notwendigen nicht übersteigend sein. Die Leistungskataloge in den einzelnen Bundesländern differieren leicht. Physiotherapeuten und Sportwissenschaftler mit entsprechender Registrierung im Gesundheitsministerium leiten die Patientengruppen beim Erlernen der Übungsprogramme an. Des Weiteren werden sowohl im präventiven wie auch im rehabilitativen und kurativen Setting muskelaufbauende (stimulierende) Modalitäten wie neuromuskuläre Elektrostimulation (NMES) sowie schmerzreduzierende Behandlungen (Elektrotherapien, therapeutischer Ultraschall, medizinische Massage, Thermotherapie etc.) verabreicht.

Eine aktuelle Übersicht über Trainings-Angebote zur Sturzprävention im Gruppenrahmen in Deutschland gibt die Bundesinitiative Sturzprävention [62]. Empfohlen werden:

Die „Sturzprävention“ der Landessportbünde. Die Kurse sind mit dem Siegel „Sport pro Gesundheit“ und dem „Deutschen Standard Prävention“ zertifiziert und im Rahmen von § 20,

⁹¹ https://www.g-ba.de/downloads/39-261-4149/2020-01-16_DMP-A-RL_Osteoporose_BAnz.pdf.

SGB V zuzahlungsfähig. Im Rahmen dieser Zertifizierung werden dem Teilnehmer bei regelmäßiger Anwesenheit 70 – 100% der Kosten von der GKV rückerstattet.

„Standfest im Alter“ [804]. Mit dem „Deutschen Standard Prävention“ zertifiziert und im Rahmen von § 20, SGB V zuzahlungsfähig.

„Standfest und Stabil“ des Deutschen Turner Bundes (DTB). Die Kurse sind mit dem Siegel „Sport pro Gesundheit“ und dem „Deutschen Standard Prävention“ zertifiziert und somit im Rahmen von § 20, SGB V zuzahlungsfähig.

„Standfest im Alltag“ der Fachkliniken für Geriatrie in Radeburg. Die Kurse sind mit dem „Deutschen Standard Prävention“ zertifiziert und somit im Rahmen von § 20, SGB V zuzahlungsfähig.

Das multifaktorielle Programm „trittsicher durchs Leben“ mit überwiegend Otago-basiertem Bewegungsprogramm [693]. Das Angebot ist als Ganzkörpertrainingsprogramm mit dem Siegel „Sport pro Gesundheit“ und dem „Deutschen Standard Prävention“ zertifiziert und somit im Rahmen von § 20, SGB V zuzahlungsfähig.

Der Umfang dieser Präventionskurse gemäß § 20, SGB V beträgt gemäß Vorgabe der Zentralen Prüfstelle Prävention (ZPP) grundsätzlich 8-12 Einheiten von 45-90 min, die 1-2-mal/Woche durchgeführt werden können. Die Teilnehmerzahl einer Gruppe soll vergleichbar dem Rehabilitationssport 15 Teilnehmer nicht überschreiten. Alle Teilnehmer der Kurse sollen der ausgewiesenen Zielgruppe angehören („Zielgruppenhomogenität“). Die Leitung der Gruppe obliegt grundsätzlich einschlägig beruflich Vorgebildeten mit Zusatzqualifikationen. Die Zertifizierung der Angebote wird ausschließlich von der ZPP durchgeführt.

Fazit

Körperliches Training zur Frakturprophylaxe ist durch die große Anzahl von Therapieoptionen und Ansatzpunkten in jedem Alter und weitestgehend unabhängig von funktionellem Status und gesundheitlichen Beschwerden sinnvoll und möglich. Mit Ausnahme von Angebotsstrukturen für ambulante Sturzpräventions-Maßnahmen als Einzelangebote [62] existieren im Gesundheitswesen grundsätzlich belastbare Strukturen, die eine eng supervidierte, qualifizierte Trainingsdurchführung unterstützen. Zwar zeigen die überwiegend nicht-supervidierten Heim-Trainingsprotokolle eine signifikant geringere Effektivität auf die Inzidenz niedrig-traumatischer Frakturen [16], im Bereich der Sturzprävention ist die Effektivität heimbasierter Trainingsprogramme als Einzelangebot jedoch unbestritten [62,805]. Inwieweit online-Formate ein Heimtraining mit hohem Anleitungs- und Supervisionsgrad erlauben, wird die nahe Zukunft zeigen. Anwenderseitig waren Pandemie und Lockdown auch und gerade für ältere Menschen eine Schlüsselkomponente, sich verstärkt auf neue Technologien einzulassen.

9. Limitationen der Leitlinie „Körperliches Training zur Frakturprophylaxe“

Ist die Evaluierung von Evidenzen zur Effektivität körperlichen Trainings auf den avisierten Studienendpunkt (Fraktur, Knochendichte, Sturz) und die Kollektive noch einigermaßen übersichtlich, so sind die Ableitung von konkreten evidenz-basierten Trainingsempfehlungen für einige Bereiche eine nur schwer lösbare Aufgabe. Tatsächlich ist die extreme Komplexität und Heterogenität von Interventionsmaßnahmen im Spannungsfeld der Frakturprophylaxe eine Herausforderung, die sich selbst anspruchsvollen biometrischen Methoden entzieht. Unsere Vorgehensweise, zentrale Themen der Leitlinie mittels systematischer Übersichtsarbeit und Meta-Analyse zu adressieren, zeigte insbesondere im Arbeitsbereich der Ableitung evidenzbasierter trainingsmethodischer Empfehlungen nicht immer den erwünschten Erfolg. Dies liegt neben der obengenannten Heterogenität auch daran, dass in einigen Spannungsfeldern der vorliegenden Arbeit keine oder kaum Studien am Menschen durchgeführt wurden. In diesem Falle (bspw. Reizrate oder Reizhäufigkeit) wurde die Evidenz von einzelnen humanen Studien oder tierexperimentellen Untersuchungen mit übergreifendem Charakter abgeleitet. Dies gilt insbesondere für den Aspekt der „Beanspruchung“ der nahe-liegenderweise beim Menschen zumindest längsschnittlich nicht erfasst empirisch und somit nicht in Zusammenhang mit dem Interventionseffekt abgebildet und interpretiert wird. Tierexperimentelle Modelle und Ergebnisse zu grundsätzlichen physiologischen Prozessen wie Modeling und Remodeling oder Effekte ossärer Beanspruchung sind in diesem Zusammenhang zweifellos didaktisch hilfreich, aber im Detail aufgrund unterschiedlicher Knochenanatomie und Anpassungsprozesse nicht konsistent übertragbar. Ein weiterer Aspekt der von der vorliegenden Leitlinie selbstverständlich vorausgesetzt wurde, war die Anpassungsreaktion des Knochens auf Belastung/Beanspruchung beim Erwachsenen via Remodeling. Ob jede osteoanabole Belastungskonstellation beim adulten Menschen aber zwingend eine Knochenadaptation über Remodeling triggert, ist letztlich nicht klar. Ein weiteres Manko der vorliegenden Literatur sind (zu) kurze Studiendauern. Mag eine Interventionsdauer von 12 Monaten im Spannungsfeld muskuloskelettaler Erkrankung ausreichend lange sein, selbst Endpunkte wie die Knochendichte valide zu adressieren, so ist sie als Blaupause der idealerweise überdauernd durchzuführenden Bewegungsangebote trotzdem limitiert. Dies äußert sich häufig durch fehlende oder mangelnde Berücksichtigung essenzieller Trainingsprinzipien aufgrund kurzer Studiendauern. Insofern ist die fehlende oder inadäquate Evidenzbasierung in diesem Bereich zwar nachvollziehbar, aber gleichermaßen unbefriedigend. Wir verwendeten zur Angabe der Evidenzgrade die Einteilung der „Agency for Healthcare Research and Quality“ (AHRQ; <https://www.ahrq.gov/cpi/about/index.html>) die inzwischen als veraltet gilt. Zukünftige Aktualisierungen der Leitlinie sollten die Oxford 2011 Kriterien oder GRADE (Grading of Recommendations, Assessment, Development and Evaluation) verwenden.

10. Ausblick

10.1. Verbreitung und Implementierung der Leitlinie

Die inhaltliche Verbreitung und Implementierung der Leitlinie erfolgt in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern „Behinderten und Rehabilitations-Sportverband Bayern (BVS-Bayern)“, „Deutsche Rheuma-Liga Bundesverband e.V.“ und „Deutscher Verband für Gesundheitssport und Sporttherapie e.V. (DVGS)“. Die genannten Verbände sind für die Durchführung des Rehabilitationssports und Funktionstrainings gemäß § 64 SGB IX verantwortlich, respektive führen sie die verbindliche Übungsleiterzertifizierung u.a. im Fachbereich „Sport mit Osteoporose-Erkrankten“, als eine Voraussetzung zur Vergütung der Kurse durch die Rehabilitationsträger durch. Insgesamt beläuft sich die Anzahl der Rehabilitationssport-/Funktionstrainingsgruppen im Bereich „Sport mit Osteoporose-Erkrankten“ in Deutschland auf ca. 15.000-20.000 [803]. Alleine in Bayern werden jährlich 100-125 Übungsleiter im Bereich „Orthopädische Erkrankung“, in dem die Osteoporose verortet ist, ausgebildet.

Im Rahmen der Disseminierung wurde im Vorfeld der Leitlinienveröffentlichung bereits ein Sonderheft in einer einschlägigen Fachzeitschrift („Osteologie“) veröffentlicht, dass die Ergebnisse und Handlungsanweisungen der vorliegenden Leitlinie strukturiert in mehreren Artikeln zusammenfasst [576,806-810]. Wesentliche Ergebnisse und Handlungsanweisungen erschienen ebenfalls bereits in Buchform [811]. Nach erfolgreichem Abschluss des Leitlinienprozesses ist eine internationale Publikation mit zusammenfassenden Trainingsempfehlungen vorgesehen.

10.2. Materialien für die Anwendung der Leitlinie

Neben den oben genannten Materialien soll eine Kitteltaschenversion der Leitlinie für Übungsleiter erstellt werden. In Zusammenarbeit mit den oben genannten Verbänden und Institutionen sollen weiterhin Materialien für die Übungsleiterausbildung erstellt werden. Auf Patientenebene ist neben den schriftlichen Materialien (Sonderheft, Buch), im Nachgang der Leitlinienerstellung, die Entwicklung und Evaluierung eines interaktiven App-basierten Heimtrainingsprogramms, das auf den Empfehlungen der Leitlinie basiert, geplant.

10.3. Förderliche und hinderliche Aspekte für die Anwendung und Implementierung der Leitlinie

Ein wesentlicher Aspekt der zur erfolgreichen Implementierung und Anwendung der vorliegenden Leitlinie führen sollte, ist die Partizipation einer großen Anzahl einschlägiger medizinischer Fachverbände, Schulungsträger, Interessenverbände und Ausrichter von Bewegungsangeboten im Spannungsfeld der Frakturprophylaxe. Mit Ausnahme des Deutschen Behindertensportverbandes, der über den Bayerischen Landesverband repräsentiert wird, beteiligten sich alle wesentlichen „Player“ des Sports mit Osteoporose-Erkrankten an diesem Leitlinienprojekt. Wie oben bereits beschrieben, liegen belastbare Strukturen für den Rehabilitationssport und das Funktionstraining in bundesweit hoher Dichte gerade für die Osteoporosegruppen vor. Ähnliches, aber in deutlich geringerem Umfang gilt für den Bereich der Sturzprävention. Eine Implementierung der Ergebnisse und Empfehlungen der Leitlinie in die Ausbildung von Trainern, Übungsleitern, Therapeuten, Sportwissenschaftlern und Ärzten sollte über die enge Kooperation mit den Fachverbänden mit vergleichsweise geringem Aufwand (Umstellung Curriculum, Anpassung der Lehrmaterialien) grundsätzlich möglich sein. Die finanziellen Auswirkungen, die durch Implementierung und Anwendung der vorliegenden Leitlinie entstehen können, liegen in einem niedrig-moderaten Bereich. Das mit hoher Evidenz belegte Ergebnis einer nötigen,

mindestens zweimaligen Trainingsfrequenz/Woche zur Verbesserung der Knochendichte, könnte zu höheren Kosten führen, da die derzeitige Versorgungspraxis von Ärzten und/oder Rehabilitationsträger oft eine niedrigere Teilnahmehäufigkeit vorsieht. Daneben führt die nötige, überdauernde Durchführung von Trainingsangeboten, zumindest wenn im Setting Rehabilitationssport/Funktionstraining oder via präventiven Bewegungsangeboten im Rahmen §20 SGB V realisiert, zu höheren Kosten für die Rehabilitationsträger bzw. GKV. Eine vorliegend 18-monatige Interventionsstudie im Setting des Rehabilitationssport bei Osteoporose [126], die mit den Empfehlungen dieser Leitlinie weitgehend konform ging, zeigte in diesem Zusammenhang tendenziell niedrigere Gesundheitskosten in der Interventions- verglichen mit der aktiven Kontrollgruppe (Gesundheitskosten: 2255±2596 € vs. KG: 2780±3318 €/18 Monate), allerdings bei hoher Varianz der Gesundheitskosten innerhalb des älteren (65 Jahre+) Frauenkollektivs.

Auch aus individueller Sicht ist eine dergleichen regelmäßige und überdauernde Trainingsteilnahme besonders bei Menschen mit einer Transferproblematik eine Zutrittsschranke. Hinzu kommt ein Mangel von Rehabilitationssport-/Funktionstrainingsgruppen insbesondere in strukturschwachen Regionen, aber auch in Ballungsräumen der zu längeren Wartezeiten für Betroffene führen kann. Eine Lösung können heimbasierte Trainingsprogramme zur Frakturprophylaxe sein. Problematisch ist derzeit allerdings, dass zwar evidenzbasierte Heimtrainingsprotokolle zur Sturzprophylaxe existieren, entsprechende qualitätsgesicherte Übungsprogramme im Spannungsfeld der Erhöhung der Knochenfestigkeit aber nicht vorliegen.

10.4. Messgrößen für ein Monitoring von Effektivität und Bindungsgrößen

Erfolgskontrollen, also die Frage, ob und in welchem Maß die gewählten Trainingsziele realisiert werden, sind inhärenter Bestandteil der Trainingsdefinition. Die vorliegende Leitlinie konzentriert sich primär auf die Erfassung physiologischer und funktioneller Zielgrößen. Im Bereich „Knochenfestigkeit“ wird eine regelmäßige Erfassung der Knochendichte gemäß der aktuellen Leitlinie „Prophylaxe, Diagnostik und Therapie der Osteoporose bei postmenopausalen Frauen und bei Männern ab dem 50. Lebensjahr“ [60] empfohlen. Zur Steuerung der Reizhöhe im Krafttraining werden bei belastbaren Teilnehmern/Patienten regelmäßige Tests unter annähernder muskulärer Ausbelastung im Wiederholungsbereich 5-10 und die Anwendung von Prädiktionsformeln [361,767] vorgeschlagen.

Zur Einschätzung der funktionellen Leistungsfähigkeit eignen sich bei älteren Kollektiven der Modified Timed Up-and-Go Test (TUG) [770] sowie die Short Physical Performance Battery (SPPB, [771]). Die 2023 Leitlinie DVO „Prophylaxe, Diagnostik und Therapie der Osteoporose“ empfiehlt zur Risikoberechnung die Durchführung des TUG, für den ein hohes prädiktives Potential für Hüft- und osteoporotische Hauptfrakturen angegeben wird [772,773].

Neben physiologischen und funktionellen Zielgrößen sind die Erfassung der Reizhöhe (via subjektivem Ausbelastungsgrad) und insbesondere der Trainingsfrequenz (in TE/Woche) wichtige Kontrollindikatoren, die bei ausbleibender Realisierung der Trainingsziele Erklärungsbeiträge liefern können. Die Trainingsfrequenz wird im Setting des Rehabilitationssports/Funktionstrainings routinemäßig erfasst, da die Leistungsabrechnung mit den Rehabilitationsträgern auf dieser Größe basiert.

Ein strukturiertes Monitoring mit Erfassung von Ergebnissen ausgewählter Outcomes ist im Rahmen des Rehabilitationssports und Funktionstrainings flächendeckend über die Rehabilitationsträger in Kooperation mit den Sportgruppen möglich, wurde aber im Rahmen der vorliegenden Leitlinie nicht durch ein Qualitätsmanagement (QM)-Konzept adressiert. Entsprechende QM-Konzepte für den Rehabilitationssport bei Osteoporose liegen indes vor [812,813] und können relativ problemlos an die vorgelegte Leitlinie angepasst werden.

11.Anhang

(1) Frakturreduktion durch körperliches Training

Tab. 12a. Studien- und Teilnehmercharakteristika der eingeschlossenen Studien. Schattiert: Studien die osteoporotische Hauptfrakturen erfassen.

First author, year, study-type, reference	Stud length [months]	Age [years], status	Female Gender	Body Mass Index, [kg/m ²]	Initial sample size [n]	Dropout [%]	Specific characteristics of the study group	Medication (%) ^a	Fracture as the primary outcome
Ashburn et al. 2007, RCT [814]	6	45-91 cdw	EG: 46% CG: 33%	n.g.	EG: 70 GC: 72	EG: 7 CG: 10	People with Parkinsons Disease, more than one fall last 12 month	EG: ≥89 CG: ≥79	No
Bischoff-Ferrari et al. 2020, RCT [614]	36	75±4 cdw	EG: 62% CG: 62%	26.3±4.2 26.4±4.4	EG: 267 GC: 270	Total: 12	No major health events, sufficiently mobile, good cognitive status, ≥40% with fall history	EG: ≥48 CG: ≥51	Yes
Chan et al. 2004, RCT [101]	12	54±4 cdw	EG: 100% CG: 100%	24.1±4.7 23.5±4.6	EG: 67 GC: 65	EG: 19 GC: 17	Early-postmenopausal healthy women without a history of fractures	none	No
Ebrahim et al. 1997, RCT [110]	24	67±8 n.g.	EG: 100% CG: 100%	n.g.	EG: 81 GC: 84	Total: 41	Women with upper limb fractures during the last 2 years	n.g.	No
Gianouidis et al. 2014, RCT [815]	12	67±6 cdw	EG: 74% CG: 59%	27.2±3.8 27.6±4.8	EG: 81 GC: 81	EG: 6 CG: 9	No osteoporosis or low-trauma fracture in the past 6 months	EG: ≥7 CG: ≥5	No
Gill et al. 2016, RCT [816]	31	79±5 n.g.	EG: 67% CG: 67%	30.1±5.7 30.3±6.2	EG: 818 CG: 817	n.g.	Functional limitations (SPPB ≤9; and 400 m ≤15 min)	EG: 5.3 ^b CG: 5.4	Yes? ^c
Iliffe et al. 2014, cluster-RCT [817]	6	65-94 cdw	FaME: 62% OEP: 62%	All: 26.9±5.0	FaME: 387 OEP: 411 GC: 458	FaME: 38 OEP: 38 CG: 41	Walking independently indoors and outdoors (with/without a walking aid but without help).	All: 4 ^b	No
Karinkanta et al., 2007, RCT [818]	12	70-79 cdw	EG: 100% CG: 100%	28.1±3.8 29.6±3.7	EG: 112 CG: 37	EG: 4 GC: 3	No diseases or medication relevantly affecting falls or bone strength, no osteoporosis	none	No

Kemmler et al., 2010, RCT [126]	18	69±4 cdw	EG: 100% CG: 100%	26.1±4.0 26.9±4.3	EG: 123 CG: 124	EG: 7 CG: 9	No diseases or medication relevantly affecting falls or bone strength	none	No
Kemmler et al., 2015, CT [356]	16 yrs	55±3 cdw	EG: 100% CG: 100%	25.7±3.4 25.3±4.2	EG: 86 GC: 51	EG: 31 CG: 9	Early-postmenopausal (1-8 y) women with osteopenia; no diseases/ medication relevantly affecting falls or bone strength	none	Yes
Korpelainen et al., 2006, RCT [819]	30	70-73 cdw	EG: 100% CG: 100%	25.7±3.4 25.5±3.5	EG: 84 CG: 76	EG: 18 GC: 12	Low KMD at the proximal femur or distal radius (<-2 SD-T-Score)	n.g.	No
Lamb et al, 2020, cluster-RCT [820]	18	78±6 cdw	EG: 53% CG: 52%	27±5 26±5	EG: 3279 GC: 3223	EG1: 16 CG: 14	People at increased risk for falls (fall risk screening questionnaire)	n.g.	Yes
Liu-Ambrose et al., 2019, RCT [560]	12	81±6 cdw	EG: 64% CG: 69%	26.9±5.4 27.1±4.9	EG: 173 GC: 172	Total: 14	History of fall last 12 months; recruited from a fall prevention clinic.	n.g.	No
McMurdo et al., 1997, RCT [821]	24	60-73 cdw	EG: 100% CG: 100%	n.g.	EG: 58 GC: 60	EG: 24 GC: 20	No conditions or medication relevantly affecting bone strength	n.g.	No
Preisinger et al. 1996 ^d , RCT [784]	48	45-75 cdw	EG: 100% CG: 100%	n.g.	EG: 27 GC: 31	EG: 56 GC: 0	Moderate back complaints, no medication relevantly affecting bone strength	n.g.	No
Robertson et al., 2001, RCT [822]	12	75-95 cdw	EG: 68% CG: 67%	n.g.	EG:121 GC: 119	10	Ability to walk around own residence	EG: 3.0 ^d CG: 3.0	No
Sakamoto et al., 2012, RCT [823]	6	ca. 81±4 cdw	EG: 79% CG: 83%	23.2 ^e 23.2	EG:714 GC: 651	EG: 43 CG: 30	People with leg standing time ≤ 15 s; no other conditions relevantly affecting fall risk	n.g.	Yes

Cdw: community dwelling; CT: controlled trial; FaME: fall management exercise; FU: follow-up; n.g.: not given; OEP: Otago Exercise Program; RCT: randomized controlled trial;

^a Only medication with ≥moderate impact on falls or bone strength

^b Overall number of drugs

^c Serious fall injury: "fall resulting in a clinical non-vertebral fracture or that led to hospital admission"

^d We included the "fully compliant subgroup"

^e Based on body height and mass reported by the authors

Tab. 13: Trainingscharakteristika der eingeschlossenen Studien. Schattiert: Studien die osteoporotische Hauptfrakturen erfassen

First author, year, reference	Focus of the intervention	Design, Supervision length	Type of exercise in the EG; (supplementation with Ca and Vit-D)	Exercise/ strain composition	Pogression of intensity	Attendance rate	Type of exercise/ intervention in the CG
Ashburn et al. 2007 [814]	Fall Prevention	IE-PNS 6 weeks	Multi component: Walking, lower extremity DRT, flexibility, balances; no dietary supplements (Vit-D, Ca, Protein)	Individualized exercise with 6 levels of progression. First 6 weeks: leaded by a physiotherapist (once per week?), no further details given	yes	n.g.	No physical intervention (contact with nurse)
Bischoff-Ferrari et al. 2020 [614]	n.g. ^a	IE-PNS 36 months	DRT; no supplements	3x 30 min/week, 5 resistance exercises (sit to stand, one leg stance, pull backs, external shoulder rotation steps), participants received an instruction by a physiotherapist at baseline and every 3 months and video and paper manuals	no	70% ≥ 2 s/w 62% ≥ 3 s/w	Flexibility, 5 exercises for hip, knee, trunk chest, shoulder and ankle mobility, 3x 30 min/ week
Chan et al. 2004 [101]	Bone Strength	JE-PS 12 months	Tai Chi Chun, Yang style; no supplements	5x 50 min/week; all main muscle groups, no details given	no	84%	No intervention
Ebrahim et al. 1997 [110]	Bone Strength and Fall Reduction	IE-PNS 24 months	Brisk walking; no supplements	3 x 40 min/week brisk walking presumably with moderate intensity (details n.g.)	no	100%	Exercises for the upper limb; (details n.g.) study nurse-visits
Gianoudis et al. 2014, [815]	Bone Strength and fall prevention	IE-PS 12 months	Multi component: High velocity DRT at machines and free weights, WBE-/Impact exercise, balance; 1000 IU/d Vit D, 700 mg/d Ca	3 x 60 min/week; DRT: 6 exercises, 2 sets x 8-12 reps at 5-8 RPE (Borg CR10) explosive movements during concentric phase; WB: 2 exercises, 3 sets x 10-20 stamps/hops/jumps; 2 balance exercises à 30-60 sec	yes	74%	No physical intervention, information about osteoporosis
Gill et al. 2016, RCT [816]	Fall prevention	IE-PNS 26 months	Multi component: Walking, lower extremity DRT, flexibility exercises for major muscle groups, balance; no supplements	In total: 5-6 x ≈ 30 min/week; presumably 2-3x 30 min/week walking at RPE 13 (Borg CR-20), 3x week 5 DRT exercises 2 sets x 10 reps at RPE 15-16 (CR 20), 10 min of balance exercise and 3-5 min of stretching	yes	63%	No physical intervention, health education program
Iliffe et al. 2014,	Bone strength and	FaME: JE/IE-PNS	Multi-component: endurance incl. walking, DRT with free	In total 5 sessions/week; 1 x 60 min/week DRT, floor exercises, cardiovascular exercises, "challenging" balance exercises; 2 x 30 min/week	yes	n.g. (< 40%)	No intervention

cluster-RCT [817]	Fall prevention	6 months	weights, floor exercises, axial loading, balance, flexibility; no supplements	home exercise based on OEP (however more "intense"); 2x 30 min walking at moderate pace; details n.g.			
	Fall prevention	OEP: IE-PNS ^e 6 months	Multi-component: Walking, DRT with free weights, balance; no supplements	In total $\geq 3 \times 30$ min/week; 5 DRT-exercises with 4 intensity levels up to 2 sets of 10 reps; and 12 balance exercises with 4 intensity levels; up to 4 sets of 10 steps; 2x 30 min walking with habitual speed	yes	n.g. (<40%)	
Karinkanta et al., 2007 [818]	Bone strength	JE-PS, 12 months	DRT for all main muscle groups vs. balance and high Impact exercise vs. multi-component: (DRT, impact, balance); no supplements	3 x 45-50 min/week; DRT: 7 exercises, 3 sets, reps 8-10 reps at 75-80% 1RM	yes	67%	no intervention
Kemmler et al., 2010 [126]	Bone strength and Fall prevention	JE/IE-PS, 18 months	Multi-component: Aerobic dance, DRT, functional gymnastics, isometric exercise; 500 IU Vit-D/d; 1000 mg/d Ca.	In total 4 sessions/week; 2x 60 min/week JE-S, aerobic dance at 70-85% HRmax, static/dyna-mic balance exercises, isometric/floor exercises at RM, 3 upper body exercises with 2-3 sets, 10-15 reps of with elastic bands at RM-2 reps; 3 leg-exercises with 2 sets with 8 reps at RM-2reps; IE-NS: 2x 25 min, 8 isometric and dynamic strength exercises	yes	60% JE-PS: 77% IE-PNS: 42%	Wellness protocol. 4x 10 week/18 mon. 1x 60 min of mobility and flexibility exercise
Kemmler et al., 2015 [356]	Bone strength and Fall prevention	JE/IE-PS, 16 yrs	Multi-component: High impact aerobic dance, jumping, DRT, functional gymnastics, balance (last 4 years); Up to 500 IU/d Vit-D, 1000 mg Ca.	In total 4 sessions/week; 2x 60 min/week JE-S, 20 min of HI aerobic dance at 70-85% Hrmax, 4x 15 different jumps; periodized DRT 9-13 exercises up to 90% 1RM with periods of high velocity; IE-NS: 2x 25 min, 8 isometric and dynamic strength exercise; 5-6 flexibility exercises.	yes	57% JE-PS: 83% IE-PNS: 31%	No intervention,
Korpelainen et al., 2006 [819]	Bone strength	JE/IE-PNS, 30 months	Multi-component: HI aerobic exercises, jumps, balance, DRT; no supplements	JE-S for 6 months/year: 1 x 60 min/week + 6x 20 min IE-NS intermitted by IE-NS, 7x 20min/week; HI exercises, DRT in circuit mode ≥ 4 exercises, 3 sets of 30 s of exercise – 30 s of rest, focus on maximum reps/30 s, shorter version during IE-NS	yes	<50% JE-PS: 75% IE-PNS: 43%	No physical intervention, Social interaction, health information
Lamb et al, 2020 [820]	Fall prevention	IE-PNS, 18 months	OEP (see Iliffe 2014); No supplements	In total $\geq 3 \times 30$ min/week; 5 DRT-exercises with 4 intensity levels up to 2 sets of 10 reps; and 12 balance exercises with 4 levels; up to 4 sets of 10 steps; 2x 30 min walking with habitual speed	no	n.g.	Advice by mail
Liu-Ambrose et al., 2019 [560]	Fall prevention	IE-PNS, 12 months	OEP (see Iliffe 2014); no supplements	In total $\geq 3 \times 30$ min/week; 5 DRT-exercises with up to 2 sets of 10 reps; and 12 balance exercises with	no	DRT, B: 63% Walking:	"Usual care": evaluation (...and treatment?) by a

				up to 4 sets of 10 steps; 2x 30 min walking with habitual speed + usual care (see control group)		127%	geriatrician at baseline 6 and 12 months
McMurdo et al., 1997 [821]	Bone strength and Fall prevention	JE-P(?), 24 months	Weight bearing aerobic exercise to music; 1000 mg/d Calcium	3 x 45 min/week for 3 x 10 weeks/year	no	76%	No physical intervention
Preisinger et al., 1996 [784]	Bone strength and Back Pain	IE-PNS, 48 months	Physiotherapy incl. postural stability, motor control, coordination, functional DRT, flexibility; no supplements	≥3 x 20 min/week; resistance exercises with elastic bands on unstable surface/seat	no	n.a. ^f	No exercise intervention, partially massage, electrotherapy in EG and CG
Robertson et al., 2001, RCT [822]	Fall prevention	IE-PNS, 12 months	Multi-component: Walking, DRT, Balance; no supplements	In total ≥ 5 sessions/week; ≥3 x 30 min/week “a set of muscle strengthening and balance retraining exercise (?) and ≥2 x week walking (?)	yes	n.g. ^g	“Usual care” (study nurse visits)
Sakamoto et al., 2012 [823]	Fall prevention	IE-PNS, 6 mon.	Balance; no supplements	7x week, 3 sessions/d x 60 sec one leg stand without holding on an object (when possible)	no	n.g.	No intervention
Karinkanta et al., 2009 [824]	See Karinkanta 2007: 5 year FU after a 12 month intervention No structured intervention during FU						No structured intervention during FU
Korpelainen et al., 2010 [825]	See Korpelainen 2006: 5 year FU after a 30 month intervention No structured intervention during FU						No structured intervention during FU
Sinaki et al., 2002 [783]	Bone Strength	IE-PNS, 2 years	8 year FU of a 24 month lower back resistance exercise; no supplements	5 sessions/week, 1 set of 10 reps back extension in a lying prone position with backpacks; backpack weight 30% of the maximal back extensor strength (BES)	yes	n.g.	No intervention during study and FU-period

Ca: Calcium; DRT: Dynamic resistance exercise; FAME: Falls management exercise; FU: Follow-up; IE: Individual exercise (predominately home-based); JE: Joint exercise (predominately facility-based); n.a.: Not applicable; n.g.: Not given; PNS: Predominately non-supervised; PS: Predominately supervised; OEP: Otago Exercise Program; RM: Repetition maximum; RPE: Rate of perceived exertion; s/w: sessions per week, Vit-D: Cholecalciferol

^a The exercise description and study aims (“bone and muscle health”) tend to suggest bone strength, however the exercise program might also include fall reduction.

^b 70% of the participants did at least two sessions per week, 62% at least 3 sessions/week

^c Included were participants who exercised ≥3 x 20 min/week (44%)

^d 43% of the participants did three or more sessions, 72% at least 2 sessions/week

^e The Otago Exercise Program (OEP) conducted 7 supervised and led sessions over 6 months

^f Included were participants who exercised ≥3 x 20 min/week (44%)

^g 43% of the participants did three or more sessions, 72% at least 2 sessions/week

Tab. 14: Methodische Qualität der eingeschlossenen Studien. Schattierte Zeilen: Studien die osteoporotische Hauptfrakturen adressieren.

Author, year, reference	PEDro-Criteria												Additional TESTEX Criteria ¹					
	Eligibility criteria	Random allocation ²	Allocation concealment	Inter group homogeneity	Blinding participants	Blinding personnel	Blinding assessors	participation≥ 85% allocation	Intention to treat analysis ³	Between group comparison	Measure of variability	Total score PEDro	Adverse effects reported	Attendance reported	Activity monitoring in the CG	Relative exercise intensity constant	Exercise volume & energy expended	Total score TESTEX
Ashburn et al. 2007 [814]	Y	+	+	+	-	-	-	+	+	+	+	7	-	-	-	+	-	10
Bischoff-Ferrari et al. 2020 [614]	Y	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+	8	+	+	-	-	-	12
Chan et al. 2004 [101]	Y	+	-	+	-	-	-	-	-	+	+	4	-	+	-	-	-	7
Ebrahim et al. 1997 [110]	Y	+	-	+	-	-	-	-	-	+	+	4	-	+	-	-	-	7
Gianouidis et al. 2014[815]	Y	+	+	+	-	-	-	+	+	+	+	7	+	+	+	+	+	14
Gill et al. 2016 [816]	Y	+	+	+	-	-	+	-	+	+	+	7	-	+	-	+	+	12
Iliffe et al. 2014 [817]	Y	+	+	-	-	-	-	-	+	+	+	5	+	+	-	+	-	10
Karinkanta et al., 2007 [818]	Y	+	+	+	-	-	-	+	+	+	+	7	+	+	+	+	+	14
Kemmler et al., 2010 [126]	Y	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	9	+	+	+	+	+	14
Kemmler et al., 2015 [356]	Y	-	-	+	-	-	+	-	-	+	+	4	+	+	+	+	+	11
Korpelainen et al., 2006 [819]	Y	+	+	+	-	-	+	-	+	+	+	7	+	+	+	+	-	13
Lamb et al, 2020 [820]	Y	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	6	+	+	-	+	+	11
Liu-Ambrose et al., 2019 [560]	Y	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+	8	+	+	-	+	-	13
McMurdo et al., 1997 [821]	Y	+	-	-	-	-	-	-	-	+	+	3	-	+	-	+	-	6
Preisinger et al. 1996 [784]	Y	+	-	-	-	-	-	-	-	+	+	3	-	+	-	-	-	7
Robertson et al., 2001 [822]	Y	+	-	+	-	-	+	+	+	+	+	7	-	+	-	+	-	10
Sakamoto et al., 2012 [823]	Y	+	-	+	-	-	-	-	-	+	+	4	+	-	-	-	-	7
Sinaki et al. 2002 [783]	Y	+	-	+	+	-	-	-	-	+	+	5	-	-	-	-	-	6

TESTEX awards one point for listing the eligibility criteria and, also in contrast to PEDro, a further point for the between group comparison of at least one secondary outcome

² Studies that either have not randomly assigned participants to the groups (-) or retrospectively analyze for training frequency (n.a.)

³ or all participants received treatment or control as allocated (...or were retrospectively analyzed

(2) Effekte auf die Knochendichte: Postmenopausale Frauen

Tab. 15: Studien- und Teilnehmercharakteristika der eingeschlossenen Studien

First author year	Sample size (n)	Age (years)	Bone status	Menopausal age (years)	BMI (kg/m ²)
Adami 1999	E: 125 C: 125	E: 65±6 C: 63±7	Healthy	E: 16±7 C: 14±8	E: 25±3 C: 24±3
Basat 2013	RE: 14 HI: 14 C: 14	RE: 56±5 HI: 56±3 C: 56±4	Osteopenia	RE: 6±4 HI: 7±2 C: 6±3	RE: 25±5 HI: 26±4 C: 28±4
Bassey 1998	E: 45 C: 32	E: 56±3 C: 55±4	Healthy	E: 7±4 C: 5±4	E: 25±3 C: 25±3
Bassey 1995	E: 31 ¹ C: 32	E: 54±4 C: 55±3	Healthy	E: 7±4 C: 7±5	E: 25±3 C: 25±4
Bello 2014	E: 10 C: 10	E: 61±6 C: 61±6	Healthy	n.g. n.g.	n.g. n.g.
Bemben 2010	E: 22 ² C: 12	E: 64±1 C: 63±1	Healthy	>5 >5	E: 30±1 C: 29±1
Bemben 2000	HR: 11 HL: 13 C: 11	HR: 52±2 HL: 50±2 C: 52±1	Healthy	HL: 4±1 HR: 2±1 C: 3±1	HL: 29±2 HR: 23±1 C: 24±2
Bergström 2008	E: 60 C: 52	E: 59±4 C: 60±3	forearm fractures	n.g.. n.g.	E: 24±3 C: 25±2
Bloomfield 1993	E: 7 C: 7	E: 62±1 C: 59±4	Healthy	E: 11±3 C: 15±2	E: 28±1 C: 25±1
Bocalini 2009	E: 23 C: 12	E: 69±9 C: 67±8	Healthy	n.g. n.g.	E: 28±4 C: 27±6
Bolton 2012	E: 19 C: 20	E: 60±6 C: 56±5	Osteopenia	E: 13±7 C: 12±7	E: 25±4 C: 25±4
Brooke-Wavell 2001	E: 18 C: 21	E: 65±3 C: 65±3	Healthy	>5 >5	#E: 26 #C: 27
Brooke-Wavell 1997	E: 43 C: 41	E: 65±3 C: 64±3	Healthy	E: 15±5 C: 15±7	E: 26±4 C: 26±4
Caplan 1993*	E: 19 C: 11	E: 66±1 C: 65±1	Healthy	E: 18±2 C: 21±3	E: 25±1 C: 24±1
Chan 2004	E: 67 C: 65	E: 54±3 C: 54±3	Healthy	E: 5±2 C: 4±2	E: 24±5 C: 24±5
Chilibeck 2013	E+Pl: 86 Pl: 88	E+Pl: 55±6 Pl: 56±7	Healthy	>1 >1	#E+Pl: 28 #Pl: 28
Chilibeck 2002*	E: 14 C: 14	E: 57±2 C: 59±2	Healthy	E: 9±2 C: 8±2	E: 27±2 C: 27±1
Choquette 2011	E+Pl: 25 Pl: 26	E+Pl: 58±6 Pl: 59±6	Healthy	E+Pl: 8±8 Pl: 10±8	E+Pl: 29±4 Pl: 31±3
Chuin 2009	E+Pl: 11 Pl: 7	E+Pl: 65±3 Pl: 67±4	Healthy	n.g. n.g.	E+Pl: 27±3 Pl: 26±3
de Matos 2009	E: 30 C: 29	E: 57±5 C: 57±5	≥Osteopenia	10 7	E: 24±3 C: 26±3
Deng 2009	E: 45 C: 36	E: 54±4 C: 51±5	Healthy	E: 4±3 C: 3±2	n.g. n.g.
de Oliveira 2018	E: 17 C: 17	E: 56±7 C: 54±5	Healthy	E: 8±7 C: 9±7	E: 27±3 C: 27±3
Duff 2016	E: 22 C: 22	E: 65±5 C: 65±5	Healthy	n.g. n.g.	n.g. n.g.
Ebrahim 1997	E: 81 C: 84	E: 66±8 C: 68±8	Previous upper limb fractures	n.g. n.g.	E: 27±4 C: 26±5
Englund 2005	E: 24 C: 24	E: 73±4 C: 73±5	Healthy	n.g. n.g.	E: 25±3 C: 26±3

Evans 2007	E+SP: 11 ³ SP: 10	E+SP: 62±5 SP: 63±5	Healthy	E+SP:8±6 SP: 8±5	#E+SP: 25 #SP: 26
Going 2003	E: 91 C: 70	E: 56±5 C: 57±5	Healthy	>3	E: 26±3 C: 26±4
Grove 1992	LI: 5 HI: 5 C: 5	LI: 57±4 HI: 54±2 C: 56±4	Healthy	LI: 3±2 HI: 4±3 C: 4	n.g. n.g. n.g.
Hans 2002	E: 110 C: 35	E: 68±5 C: 66±5	≥Osteopenia	>5 >5	E: 24 C: 23
Hartard 1996	E: 18 C: 16	E: 64±6 C: 67±10	Osteopenia	>2 >2	#E: 25 #: 25
Hartley 2020	E:32 C: 32	E: 62± 4 C: 62±4	Healthy	E: 11±6 C: 11±6	E: 24±3 C: 24±3
Hatori 1993	E: 23 ⁴ C: 12	H: 56±4 M: 58±5 C: 58±8	Healthy	H: 7±5 M: 6±4 C: 9±8	H: 23±2 M: 24±2 C: 25±3
Hettchen 2021	E:21 C: 20	E: 54±2 C: 54±2	Osteopenia	E: 4±1 C: 4±1	E:24± 3 C: 25±5
Holubiac 2022	E: 15 C: 14	E: 56±3 C: 57±2	≥Osteopenia	n.g.	E:25±2 C:25±2
Iwamoto 2001	E: 8 C: 20	E: 65±5 C: 65±6	Osteoporosis	E: 16±6 C: 15±6	E: 20±1 C: 20±2
Jessup 2003	E: 10 C: 10	E: 69±3 C: 69±4	Healthy	E: 24±11 C: 22±11	n.g. n.g.
Karakiriou 2011*	E: 10 C: 9	E: 53±1 C: 53±1	Osteopenia	E: 5±1 C: 3±1	E: 28±1 C: 30±1
Kemmler 2013	E: 43 C: 42	E: 52±2 C: 52±3	Healthy	E: 2±1 C: 2±1	#E:26 #C: 26
Kemmler 2010	E: 123 C: 123	E: 69±4 C: 69±4	Healthy	n.g. n.g.	#E: 26 #C: 27
Kemmler 2004	E: 86 C: 51	E: 55±3 C: 56±3	Osteopenia	>1 >1	E: 25±3 C: 25±4
Kemmler 1999	E-PM: 15 L-PM: 17 C: 18	E-PM: 54±5 L-PM: 65±6 C: 56±8	Healthy	E-PM ≤ 8 L-PM > 8 C >1	E-PM: 26±4 L-PM: 26±4 C: 27±5
Kerr 2001	RE: 42 Fit: 42 C: 42	RE: 60±5 Fit: 59±5 C: 62±6	Healthy	RE: 11±6 Fit: 9±5 C: 12±6	#RE: 27 #Fit: 25 #C: 26
Kerr 1996	En: 28 ⁵ RE: 28	En: 56±5 RE: 58±4	Healthy	En: 6±4 RE: 8±3	En: 26 RE:25
Kohrt 1997*	JRF: 15 GRF: 18 C: 15	JRF: 65±1 GRF: 66±1 C: 68±1	Healthy	n.g. n.g. n.g.	#JRF: 27 #GRF: 27 #C: 27
Kohrt 1995	E: 8 ⁶ C: 8	E: 65±3 C: 66±3	Healthy	>10 >10	#E: 25 #C: 25
Korpelainen 2006	E: 84 C: 76	E: 73±1 C: 73±1	Osteopenia	n.g. n.g.	E: 26±3 C: 26±4
Kwon 2008	E: 20 C: 20	E: 77±2 C: 77±3	Healthy	n.g. n.g.	E: 26±2 C: 25±3
Lau 1992	E+PI: 15 PI: 15	E+PI: 79 PI: 75	Healthy	n.g. n.g.	n.g. n.g.
Liu 2015	E: 50 C: 48	E: 63±7 C: 62±8	Osteoporosis	E: 14±6 C: 13±7	n.g. n.g.
Lord 1996	E: 90 C: 89	E: 72±5 C: 71±5	Healthy	n.g. n.g.	#E: 27 #C: 26
Maddalozzo 2007	E: 35 C: 34	E: 52±3 C: 52±3	Healthy	E: 2±1 C: 2±1	n.g. n.g.
Marin-Cascales 2019	E:13 C: 10	E: 58±7 C: 62±5	Healthy (?)	≥3 ≥3	E: 30±4 C: 29±5
Marques	E: 30	E: 70±5	Healthy	n.g.	E: 28±4

2011	C: 30	C: 68±5		n.g.	C: 28±4
Marques 2011	RE: 23 AE: 24 C: 24	RE: 67±5 AE: 70±5 C: 68±6	Healthy	n.g. n.g. n.g.	RE: 29±5 AE: 28±4 C: 28±4
Martin 1993	45 ^m E: 25 30 ^m E: 27 C: 24	45 ^m E: 58±7 30 ^m E: 60±8 C: 57±7	Healthy	45 ^m E: 9±9 30 ^m E: 13±9 C: 8±7	#45m E: 26 #30mE: 26 #C: 28
Milliken 2003	E: 26 C: 30	E: 57±5 C: 57±5	Healthy	E: 6±3 C: 6±3	#E: 26 #C: 26
Montgomery 2020	E1: 5 E2: 5 C: 7	Co:56±3 In: 53±3 C: 54±4	Healthy	≤5 ≤5 ≤5	Co: 25±2 In: 25±5 C: 25±3
Nelson 1994	E: 21 C: 19	E: 61±4 C: 57±6	Healthy (6 women with spine frx)	E: 12±5 C: 10±5	E: 24±3 C: 23±2
Nelson 1991*	E: 21 ⁷ C: 20	E: 60±1 C: 60±1	Healthy	E: 11±1 C: 11±1	E: 24 ±1 E: 24±1
Nichols 1995*	E: 17 C: 17	E: 68±2 C: 65±1	Healthy	E: 18±1 C: 18±1	#E: 26 #C: 27
Nicholson 2015	E: 28 C: 29	E: 66±4 C: 66±5	Healthy	>5 >5	E: 26±3 C: 25±3
Orsatti 2013	E+Pl: 20 Pl: 20	E+Pl: 56±9 Pl: 55±8	Healthy	E+Pl: 9±6 Pl: 8±6	E+Pl: 26±3 Pl: 30±5
Park 2008	E: 25 C: 25	E: 68±4 C: 68±3	Healthy	E: 18±2 C: 19±3	n.g. n.g.
Prince 1995	E+Ca: 42 Ca: 42	E+Ca: 63±5 Ca: 62±5	Healthy	E+Ca: 16±5 Ca: 16±6	n.g. n.g.
Pruitt 1995	HI: 15 LI: 13 C: 12	HI: 67 LI: 68±1 C: 70±4	Healthy	n.g. n.g. n.g.	HI: 25±3 LI: 24±2 C: 25±3
Pruitt 1992*	E: 17 C: 10	E: 54±1 C: 56±1	Healthy	E: 3 C: 4±1	#E: 25 #C: 25
Rhodes 2000	E: 22 C: 22	E: 69±3 C: 68±3	Healthy	n.g. n.g.	#E: 26 #C: 24
Ryan 1998	E: 18 C: 18	E: 62±6 C: 63±6	Healthy	>2 >2	E: 31±3 C: 31±3
Sakai 2010*	E: 49 C: 45	E: 68±1 C: 68	Healthy	n.g. n.g.	E: 22±0 C: 23±0
Silverman 2009	E: 46 C: 40	E: 60±5 C: 58±5	Healthy	E: 12±8 C: 11±7	E: 32±4 C: 33±5
Sinaki 1989	E: 34 C: 34	E: 56±4 C: 56±4	Healthy	>0,5 >0,5	E: 25 C: 26
Sugiyama 2002*	E: 13 ⁸ C: 13	E: 52±1 C: 53±1	Healthy 3 y post	E: 3 C: 2	E: 23±1 C: 22±1
Tartibian 2011	E: 20 C: 18	E: 61±7 C: 59±8	Healthy	>8 >8	E: 25±7 C: 29±4
Tolomio 2009	E: 81 C: 79	E: 62±5 C: 64±5	≥Osteopenia	n.g. n.g.	#E: 26 #C: 25
Verschueren 2004	E: 22 C: 24	E: 64±4 C: 64±3	Healthy	E: 15±6 C: 15±7	E: 27±4 C: 27±6
Waltman 2022	E: 92 C: 93	E: 54±3 C: 54±3	Osteopenia	E: 4±4 C: 4±2	E: 26±4 C: 26±5
Wang 2015	TC: 40 TCRT: 40 C: 39	TC: 58±3 TCRT: 58±3 C: 58±3	Healthy	>0,5 >0,5 >0,5	#TC: 24 #TCRT: 23 #C: 24
Woo 2007	TC: 30 RE: 30 C: 30	TC: 70±3 RE: 70±3 C: 69±3	Healthy	n.g. n.g. n.g.	TC: 24±4 RE: 25±4 C: 25±3

Wu	E+Pl: 34	E+Pl: 55±3	Healthy	E+Pl: 4±2	E+Pl: 22±3
-----------	-----------------	-------------------	----------------	------------------	-------------------

2006	Pl: 34	Pl: 55±3		Pl: 4±2	Pl: 21±2
Yamazaki 2004*	E: 32 C: 18	E: 64±3 C: 66±3	≥Osteopenia	E: 17±2 C: 15±2	E: 21±1 C: 21±1

All values are presented as mean value ± SD, otherwise it is stated; *Numbers are presented as mean ± SE.

#calculated (body mass (kg)/body height (m²)). "Bone status": We focus on osteoporosis/osteopenia and fractures - otherwise subjects were considered "healthy"

¹According to the text, 63 women were randomized equally.

²It is not stated to which groups the seven drop outs belong.

³It is not stated to which group the nine drop outs belong.

⁴It is not clear to which exercise groups two persons who failed to complete the program belong.

⁵One side of body is considered as control and the other side as intervention.

⁶No data concerning participants/group; we assumed an equal allocation.

⁷Exercise with or without 831 mg/d Ca vs. sedentary control with or without 831 mg/d Ca.

⁸According to the baseline table, there are 13 women in the exercise group; six persons in exercise groups were excluded due to low compliance, but it is not clear whether these participants are in the pre- or postmenopausal group.

AE: Aerobic exercise; C: Control; Ca: Calcium E: Exercise; En: Endurance; Fit: Fitness; GRF: Ground-reaction forces; H: High; HI: High impact; HL: High load; HR: High repetition; JRF: Joint-reaction forces; LI: Low impact; M: Moderate; n.g., not given; Pl: Placebo; RE: resistance exercise; SP: Soy protein; TC: Tai Chi; TCRT: Tai Chi resistance training.

Tab. 16: Trainingscharakteristika der eingeschlossenen Studien

First Autor Year	Study length (months)	Life style status	Major type of exercise	Exercise/strain composition Exercise frequency (n/week), duration of the session (min/week), type of exercise, sets/repetitions or duration of the exercise, exercise intensity	Atten- dence
Adami 1999	6	Sedentary	DRT (focus on forearm sites), volleyball in a sitting/standing position	SJE: 2x 95-110 min: 15-30 min warm up (walking), 70 min press-up, volleyball, 10 min DRT for the forearm with a 500 g weight. Number of reps (10-25)/min increased progressively. HE: 7x 30 min: "Repeat all exercise"	S-JE: 83% HE: ng
Basat 2013	6	No-BSE	DRT (lower body with few trunk exercises)	3x 60 min: 15 min warm up (walking, cycling), 30-40 min RT (≥ 9 exercises, 1 set, 10 reps (more details ng))	>60%
	6		Rope skipping	7x 35 min: 15 min warm up (walking, cycling), maximum 50 jumps/session (more details ng)	>60%
Bassey 1995	12	No-BSE	Heel-drops, jumping, skipping	HE: 7x ?min/w, 50 heel-drops barefoot on a thinly covered floor with knee & hip extended. S-JE: 1x? jumping and skipping (More details ng)	84%
Bassey 1998	12	No vigorous Ex >1h/week	Jumping: counter-movement jumps (CMJ)	6x 10 min: 50 CMJ barefoot with both legs, 5 sets x 10 reps with ground reaction forces (GRF): 4x body mass	91%
Bello 2014	8	No- BSE	Walking, DRT (all main muscle groups), aquatic exercise (DRT)	3x 40-?min/w min: 40 min walking 1 x w, WBE-circuit training 1 x w with easy loads: 6 exercises, 3 sets, 15-20 reps. Aquatic exercise 1 x w: 4 exercise, 3 sets, 15-20 reps, all at RPE 12-15 of Borg CR 20. 1x week each type of exercise	85%
Bemben 2000	6	No-RT	DRT (all main muscle groups) with machines	High intensity: 3x 60 min: DRT: 45 min, 8 exercises, 3 sets, 8 reps, 80% 1RM	87%
				Low intensity: 3x 60 min: DRT: 45 min, 8 exercises, 3 sets, 16 reps, 40% 1RM	93%
Bemben 2010	8	No-RT	DRT (all main muscle groups) with machines	3x $\approx$ 60 min: 5 min warm up (walking, cycling), 8 exercises, 3 sets, 10 reps, 80% 1RM & dumbbell wrist curls, abdominal flexion low-moderate intensity	90%
Bergström 2008	12	No- BSE	DRT (all main muscle groups), AET, walking	4-5x week: S-JE: 1-2x 60 min, 25 min DRT, 25 min WB-AET (more details ng), HE: 3x30 min fast walking (more details ng)	95%
Bloomfield 1993	8	Sedentary	Cycle ergometer	3x 50 min: 15 min warm up (flexibility & calisthenics (more details ng)), 30 min cycling at 60-80% HR _{max} , 5 min walking (cool down) (more details ng)),	82%
Bocalini 2009	6	Sedentary	DRT (all main muscle groups)	3x 60 min: 10 min warm up (low impact running), 12 exercises, 3 sets, 10 reps, 85% 1RM with focus on eccentric exercises, 1 min rest (alternate upper & lower body exercises) between exercises	>90%
Bolton 2012	12	No- BSE	DRT (muscle groups ng: "loading the proximal femur"), jumping	S-JE: 3x 60 min: 40 min (?) exercises, 2 sets, 8 reps, 80% 1RM with slow velocity, 1 set with reduced load & high velocity (12 rep). HT: Daily 3 sets, 10 reps of jumps (more details ng)	88%

Brooke-Wavell 1997	12	Sedentary	Brisk walking	In total 140 min/w, 20-50 min long for each walk, $\approx 70\%$ HR _{max}	100%
Brooke-Wavell 2001	12	Sedentary	Brisk walking	4-5x 25-35 min at $\approx 70\%$ HR _{max}	>90%
Caplan 1993	24	n.g.	Aerobic dance, ball games, DRT: floor exercises (more details ng)	2x 60 min: 20-25 min AET, 10 min ball games (more details ng) $\geq 1 \times 20-30$ min DRT (more details ng)	ng
Chan 2004	12	Sedentary	Tai Chi: Yang Style (all main muscle groups)	5x 50 min: Slow, smooth movements with constant velocity (more details ng)	$\approx 84\%$
Chilibeck 2002	12	No vigorous exercise	DRT (all main muscle groups) on machines	3x ?min/w,: 12 exercises, 2 sets, 8-10 reps, $\approx 70\%$ 1RM	78%
Chilibeck 2013	24	No BSE	Walking, DRT (all main muscle groups) on machines	6x week: S-JE: 2x ng: 15 exercises, 2 sets, 8 reps, 80% 1RM HT & S-JE: 4x20-30 min: walking at 70% HR _{max}	77%
Choquette 2011	6	Sedentary	AET (treadmill & cycling), DRT (all main muscle groups) on machines and with free weights	3x 60, AET: 30 min at 40-85% HR _{max} , after 3 months H-intensity intervals of 4x 4 min $\geq 90\%$ HR _{max} , 3 min rest at 50-65% HR _{max} . RT: 30 min, ? exercise, 1 set, 12-15 rep increased to 4 sets 4-6 reps, at 60%-85% 1RM	$\geq 85\%$
Chuin 2009	6	n.g.	DRT (most main muscle groups) on machines	3x 60 min: 15 min warm up (treadmill/cycle ergometer), DRT: 45 min, 8 exercises, 3 sets, 8 reps at 80% 1RM, rest between sets 90-120 s, 1RM-test each 4 weeks	>90%
De Matos 2009	12	n.g.	DRT (all main muscle groups) on machines or free weights, AET (bike, treadmill)	3x 45-65 min, WB-/ non-WB-AET (Bike, treadmill, Stepper): 5-20 min (RPE 4-6 on Borg CR 10). DRT: 30-40 min, 9 exercises, ? sets, 10-15 reps, ? 1RM, TUT: 3 s conc-3 s eccentric, 1 min rest between sets / exercise (more details ng).	ng
Deng 2009	12	No-BSE	Brisk walking, stepping, jumping, DRT (all main muscle groups) on machines with free weights	5-7x w: S-EJ: 2x 60 min: 45 min DRT, 9 exercises, 2-5 sets, 12-40 reps, at 50-60% 1RM, self-selected rest (more details ng)., HE: 3-5x60 min:30 min walking, at 50-80% HR _{max} , 15 min step routine, 50-300 jumps from a 4-inch bench	82%
De Oliveira 2018	6	Sedentary	Pilates (all main muscle groups) on machines	3x 60 min: 21 exercises (strengthening & flexibility) , 1 set, 10 reps, 1 min rest between exercises, 5-6 at Borg CR10	93%
Duff 2016	9	No RT	DRT (all main muscle groups) on machines & with free weights	3x?min/w: 12 exercises, 2 sets, 8-12 reps to muscular fatigue, ? 1RM (more details ng)	84%
Ebrahim 1997	24	No limit	Brisk walking	3x 40 min: 40 min walking, "faster than usual, but not so fast as to be uncomfortable"	100%

Englund 2005	12	n.g.	Walking/jogging, DRT (all main muscle groups)	2x 50 min, WB-AET: 10 min warm up, 15 min walking/jogging. DRT: 12 min, 2 sets, 8-12 reps., ? 1RM (more details ng)	67%
Evans 2007	9	n.g.	Walking/running, rowing, stair-climbing (machines)	3x 45 min: WB & Non-WB AET (machines) at 55-80% $VO_{2, peak}$. Rest by changing exercise mode	ng
Going 2003	12	No RT, <120 min/w. exercise	WB with weighted vests, DRT (all main muscle groups) on machines with free weights	3x $\approx$ 60 min: 10 min warm up (walking), 20-25 min WB-AET (Walking, Jogging, skipping, hopping, stepping) at 60% HR_{max} , 120-300 stair/steps with 5- 13 kg weighted vest. DRT: 7 exercises, 2 sets, 6-8 reps 70-80% 1RM	72%
Grove 1992	12	Sedentary	Jumping variations, heel drops ($GRF \geq 2x$ body mass)	3x 60 min: 20 min of high impact exercises. 15 min cool down (RT with abdominal and leg adduction/abduction exercises) (more details ng)	83%
	12		Walking, Charleston, heel jacks ($GRF < 1.5x$ body mass)	3x 60 min: 20 min of low impact exercises. 15 min cool down (RT with abdominal & leg adduction/abduction exercises) (more details ng)	80%
Hans 2002	24	n.g.	Heel-drops: barefoot on a force measuring platform (osteocare protocol)	5x 3-5 min: Impact loading: strength or height 25-50% above the estimated resting force, daily 120 correct force impacts	65%
Hartard 1996	6	No BSE	DRT (all main muscle groups) on machines	2x ?min/w: 14 exercises, 1-2 sets, 8-12 reps, 70% 1RM, TUT: concentric: 3-4s – eccentric 3-4s. ≥ 2 min rest between sets	>83%
Hartley 2020	6	Sedentary	Unilateral multidirectional hopping	7x 10 min, warm up (n.g.), 5 sets x 10 reps of unilateral multidirectional hops, 15 s rest between set, GRF: $\approx 2.2x$ body weight	77%
Hatori 1993	7	Sedentary	Walking below the anaerobic threshold at “flat grass covered ground”	3x 30 min: 30 min walking at 90% anaerobic threshold HR (6.2 km/h)	ng
			Walking above the anaerobic threshold on “flat grass covered ground”	3x 30 min: 30 min walking at 110% anaerobic threshold HR (7.2 km/h)	ng
Hettchen 2021	13	No BSE	Block periodized AET, jumping, isometric & DRT (all main muscle groups) exercise on machines with free weight, body mass	3x 45-60 min, 2x 45 min Aerobic-Dance (GRF: 2-3x body mass), 8 sets x 7 reps of high and drop jumps with 20 s rest/sets (GRF: 4-4.5x body mass), circuit training with free weights: 1-2 sets x 6-20 reps at 55-80% 1RM, 30 s rest/exercise. 1x 60 min DRT on machines: 12 exercises, 1 sets, 8-16 rep, 30 s rest up, with varying movement velocity, 60-85% 1RM (12 weeks) intermitted by 8-10 weeks of 25 min of non-supervised floor/functional exercise at home (more details ng).	79%
Holubiac 2022	6	No BSE	DRT (all main muscle groups) with machines	2x 60 min: 11 exercises, 2 sets, 12 reps, at 50-70% 1RM.	ng
Iwamoto 2001	24	Sedentary	Walking, DRT (“Gymnastics”: lower limbs & trunk exercises)	Daily (walking) min?,: Additionally (to basic activity walking) ≈ 3000 steps/d, 2x daily DRT: ≥ 4 exercises, 2 sets, 15 reps, ?% 1RM (more details ng).	ng

Jessup 2003	8	Sedentary	Walking, stairclimbing, DRT (most main muscle groups) on machines	3x 60-90 min, DRT: 20-35 min, 8 exercises, ? sets, 8-10 reps, 50%- 75% 1RM. WB-AET: 30-45 min with weighted vest (increased up to 10% body-mass)	ng
Karakiriou 2011	6	Sedentary	Step aerobic exercise, DRT (all main muscle groups)	3x w: 1x 15 min warm up (walking on treadmill / cycling ergometer & jumping). Abdominal and back extension exercises (one exercise for all main muscle groups, 2-4 sets of 16 repetitions (more details ng)). DRT: 2x : 11 exercises, 2-3 sets, 10-12 reps at 70% 1RM, 30 s rest between exercises, 3 min between sets. AET: 1x 45 min AET: 20 min, 9 exercise, 2 circuits of 40 s, rest: 20 s between exercises, 2 min between circuits, 70-85% HR _{max}	80%
Kemmler 1999	9	No BSE	Running, gaming, jumping, DRT (all main muscle groups)	4x week: 2x 90 min: AET: 25 min at 70-80% HR _{max} . RT: 65 min, 12-15 exercises, 2-4 sets of 8 s maximum isometric contractions, 6 trunk, upper back, lower extremity exercises, 20-25 reps at 60-65% 1RM. 2x 35 min, HT: resistance exercises	S-JE: 82% HE: 59%
Kemmler 2004	26	No BSE	Aerobic dance, jumping, DRT (all main muscle groups) on machines with free weight, and own body mass	4x week: 2x 60-70 min, AET: 20 min at 65-85% HR _{max} . Jumping started after 5-6 months with 4x 15 multi-lateral jumps. DRT: 30-40 min, 1/w. The first 6 month: 13 ex, 2 sets, 20-12 rep, TUT: 2s concentric, 2s eccentric at 50-65% 1RM, 90 s rest between sets & exercises. Then, 12 w blocks of H-intensity at 70-90% 1RM interleaved by 4 w at 55-79% 1RM. Isometric RT: 30-40 min, 1/w, 12-15 exercises (trunk& femur), 2-4 sets, 15-20 rep, 15-20 s rest. 2x 25 min, HT: rope skipping (3 set, 20 rep), RT (more details ng)	S-JE: 79% HE: 61%
Kemmler 2010	18	No BSE	Aerobic dance, DRT (all main muscle groups)	4x w: 2x 60, AET: 20 min at 70-85% HR _{max} . RT: 10-15 exercises, 1-3 sets of 6-10s maximum isometric contractions, 20-30 s rest, 3 upper body exercises, 2-3 sets 10-15 reps, TUT: 2s concentric, 2s eccentric at 65-70% 1RM, 3 lower extremity exercises, 2 sets 8 reps, 1 min rest at 80% 1RM. 2x 20, HE: RT 1-2 sets, 6-8 exercise, 10-15 rep. 2-3 belt exercises, 2 sets, 10-15 rep (more details ng)	S-JE: 76% HE: 42%
Kemmler 2013	12	No BSE	Block periodized AET, jumping, isometric & DRT (all main muscle groups) exercise on machines with free weight, body mass	3x 45-60 min: Block I: 1x 45 min/w H-Impact aerobic 75-85% HR _{max} , 2x 20 min/w aerobic 75-85% HR _{max} , 4x 15-20 jumps, 90 s rest. RT: 15 min, 8-12 floor exercises (trunk, hip, legs), 1-2 sets, rep?, 30 s rest. RT: 20 min, 8 exercises, 2 sets, 8-9 rep, 45 s rest up, TUT: 2s concentric, 2s eccentric. to 80% 1RM	67%
Kerr 1996	12	No RT, no racquet sports,	Unilateral DRT (all main muscle groups, randomized allocation of the left side or right side to exercise or control group) on machines or free weights	3x 45-60 min: 13 exercises, 3 sets at 20 RM, 3-5 rep ($\approx$ 60-65% 1RM), 2-3 min rest between sets	89%
	12	$\leq$ 3 h/w exercise		3x 20-30: 13 exercises, 3 sets at 8 RM, 3-5 rep ($\approx$ 75-80% 1RM), 2-3 min rest between sets	87%
Kerr	24	$\leq$ 2 h/w Exercise	DRT (all main muscle groups)	3x 60 min: $\approx$ 30 min brisk walking & stretching, RT: 30 min, 9 exercises, 3 sets at 8 RM ($\approx$ 75-80% 1RM)	74%

2001	24		DRT (all main muscle groups), Stationary cycling	3x 60 min: ≈30 min brisk walking & stretching. RT: 30 min, 9 exercises, 3 set, 8 rep, 40 sec/exercise with “minimal load”, 10 s rest between the exercises (more details ng). Stationary cycling 40s, HR <150 beats/min	77%
	12		Unilateral DRT (see above)	3x 20-30: 13 exercises, 3 sets at 8 RM, 3-5 rep (≈75-80% 1RM), 2-3 min rest between sets	87%
Kohrt 1995	11	Sedentary	Walking, jogging, stair climbing	3-5x 45 min: First 2 months flexibility, 9 months WB: 5-10 min warm up (treadmill 60-70% HR _{max}), 30 min WB at 65-85% HR _{max}	≈70%
Kohrt 1997	11	lower intensity compared to intervention	Walking, jogging, stair climbing	3-5x 30-45 min: First 2 months flexibility, 9 months WB at 60-85% HR _{max}	≈70%
	11		DRT (all main muscle groups) with free weights and on machines, rowing	3-5x 40-60 min: First 2 months flexibility, DRT: 2/w, ≈20-30 min, 8 exercises, 2-3 sets, 8-12 reps “to fatigue” (≈70-80% 1RM). Rowing: 3/w, 15-30 min, 2-3 sets x 10 min at 60-85% HR _{max}	≈70%
Korpe-lainen 2006	30	n.g.	Jumping, walking/jogging, dancing, stamping, chair climbing	8x w: S-JE: 45 min WB-AET. The first six months: 1x 60 min S-JE & daily x 20 min HE. The second six months: HE: daily x 20 min HE applying the same exercise to S-JE (more details ng).	≈75%
Kwon 2008	6	<2 h/w exercise	Aerobic dance, DRT (6 upper & lower body exercises) with free weights	3x 80 min: 30 min AET at 40-75% HR _{max} , 30 min DRT of 6 exercises, ? sets, 3-10 reps to voluntary fatigue (i.e. 75% 1RM)	ng
Lau 1992	10	n.g.	Stepping up and down, Upper trunk movements	4x ≈20-25 min: 100 steps on a 23cm block, 15 min upper trunk movements (?) in a standing position with sub-maximum effort (more details ng)	ng
Liu 2015	12	n.g.	Tai-Chi	3x daily ≈3-5 min: 8 exercise brocade, 7 rep (raising slowly the arms coming on the toes stretching the back and go back on the heel with arms hanging down) (more details ng).	96%
Lord 1996	12	lower intensity compared to intervention	Conditioning period: Brisk walking, multilateral stepping, lunges, heel rises, DRT (all main muscle groups) using own's body mass	2x 60 min: 5 min warm up (paced walking), conditioning period 35-40 min: AET & guided functional gymnastics for all main muscle groups (sets?, reps?, intensity?) (more details ng).	73%
Madda-lozzo 2007	12	n.g.	DRT (back squat, deadlifts) with free weights	2x 50 min: 15-20 min warm up (exercise focusing on posture, muscle engagement, abdominal strength, flexibility) 2 sets, 10-12 reps, 50% 1RM. Main part: 20-25 min, 2 exercises, 3 sets, 8-12 reps, 60 s rest between sets at 60-75% 1RM, TUT: 1-2s concentric, 2-3s eccentric	85%
Marín-Cascales 2019	6	Sedentary	Multi-component E, Drop-jumps, AE	3x w, 4-6 sets x 10 drop jumps from 5-25 cm height and 30-60 min walking at 50-75% HRR (progressively increased during the intervention)	96%
Marques 2011	8	sedentary	Marching, bench stepping, heel-drops, DRT (most main muscle groups) with weighted vests, elastic bands, free weights	2x 60 min: 15 min WB-AET with Peak-GRF up to 2.7x body mass & high strain frequency (120-125 beats/min), 10 min for ≥7 muscle endurance exercises, 1-3 sets, 8-15 reps, ?1RM (more details ng), 10 min balance & dynamic exercise	72%

				(walking, playing with ball, rope, sticks, etc.), 10 min agility training (coordination, balance, ball games, dance) (more details ng)	
Marques 2011	8	Sedentary	Walking, stepping, skipping, jogging, dancing	3x 60 min: Only the first 6 w 10 min DRT (lower body). 35-40 min of WB-AET (50-85% HRR) with Peak-GRF up to 2.7x body mass with up to 120 beats/min	78%
	8		DRT (all main muscle groups) on machines	3x 60 min: 8-10 min warm up (cycling/rowing ergometer) at low intensity. 30-40 min DRT, 8 exercises, 2 sets, 15-6 reps, 50-80% 1RM with variable TUT (3-6s/rep.), 120 s rest between sets, 5-10 min cool down (walking & stretching)	78%
Martin 1993	12	No BSE	Brisk walking on treadmill	3x 36-40 min: 30 min brisk walking (4-6.2 km/h at 3-7% incline) at 70-85% HR _{max}	79%
	12		Brisk walking on treadmill	3x 51-55 min: 45 min brisk walking (4-6.2 km/h at 3-7% incline) at 70-85% HR _{max}	82%
Milliken 2003	12	<2h/w exercise	Walking, skipping, multilateral stepping, jumping with weighted vests, DRT (all main muscle groups) with free weights, on machines, functional gymnastics	3x 75 min: 20 min WB-AET at 50-70% HR _{max} . 35 min DRT: 8 exercises, 2 sets, 6-8 reps, 70-80% 1RM. Functional gymnastics for shoulder and abdominals using elastic bands and physio-balls	ng
Montgomery 2020	12	No-BSE	Continuous jumping	3x 30 reps/session of high impact jumps (frequency 15 jumps per minute) "jump as high as possible and land on feet-balls", barefoot on hard surface	60%
	12		Intermittent jumping	3x 30 reps/session of high impact jumps (frequency 4 jumps per minute) "jump as high as possible and land on feet-balls", barefoot on hard surface	68%
Nelson 1991	12	Sedentary	Walking with weighted vest	4x 50 min: Walking with a 3.1 kg weighted vest at 75-80% HR _{max}	90%
Nelson 1994	12	Sedentary	DRT (most main muscle groups) on machines	2x 55 min: 45 min, 5 exercises, 3 sets, 8 reps, 50- 80% 1RM, TUT-6-9 s/rep, 3s rest between reps, 90-120 s rest between sets	88%
Nichols 1995	12	≥3x 30 min/w exercise	DRT (all main muscle groups) on machines	3x ≈45-60 min: 5 min warm up (walking), 8 exercises, 1-3 sets, 10-12 reps, 50-80% 1RM, 30-60s rest between exercises, 60s rest between sets	82%
Nicholsen 2015	6	No RT	DRT (all main muscle groups): „Body Pump Release 83“ (i.e. barbell exercises)	2x 50 min: 10x up to 6 min blocks of exercises for all main muscle groups (21 exercises in total), up to 108 reps (squats), ≤30% 1RM	89%
Orsatti 2013	9	Sedentary	DRT (all main muscle groups) with free weights and on machines	3x 50-60 min: 8 exercises 3 sets, 8-15 reps at 40-80% 1RM, 3 sets -20-30 reps for trunk flexion & calf raises (more details ng), 1-2 min rest between sets	ng
Park 2008	12	≤7h/w exercise	WB-AET, RT (more details ng)	3x 60 min: 10 min RT, 23 min of WB exercise at 65-70% HR _{max} (more details ng)	ng
Prince 1995	24	≤2h/w exercise	WB-AET (more details ng)	4x 60 min: 4x WB exercise (including 2x walking) at 60% HR _{max} (more details ng)	39%

Pruitt 1992	9	No BSE	DRT (all main muscle groups) with free weights and on machines	3x 60 min: 40 min, 11 exercises, 1 set, at 10 -12 RM for upper body & 10-15 RM for lower body (more details ng)	83%
Pruitt 1995	12	No RT	DRT (all main muscle groups) on machines	3x 55-65 min: 50-55 min, 10 exercises, 1 warm up set, 14 reps, at 40% 1RM, 2 sets, 7 reps, 80% 1RM	81%
	12		DRT (all main muscle groups) on machines	3x 55-65 min: 50-55 min, 10 exercises, 3 sets, 14 reps, at 40% 1RM	77%
Rhodes 2000	12	Sedentary	DRT (all main muscle groups) on machines	3x 60 min: 10 min warm up (cycle ergometer), DRT: 40 min, ≥6 exercises, 3 set, 8 reps, 75% 1RM, TUT: 2-3s concentric – 3-4s eccentric movement/rep applied in a circuit mode	85%
Ryan 1998	6	Sedentary	Walking, jogging on treadmill	3x 55 min: Up to (4th month) 35 min walking/jogging at 50-70% $VO_{2,max}$, 10 min cool down (cycle ergometer), Energy-intake restriction of 250-350 kcal/d (weight loss study).	>90%
Sakai 2010	6	n.g.	Unilateral standing on one leg	7x 2 min: 3 sets (early, at noon, in the evening) of unilateral standing for 1 min on each leg with eyes open (more details ng)	≥70%
Silverman 2009	6	Sedentary	Walking	3x 45-60 min: walking at 50-75% HR_{max} Energy-intake restriction of 250-350 kcal/d (weight loss study)	78%
Sinaki 1989	24	n.g.	DRT (back strengthening exercise in a prone position using a back pack, ≈hyperextensions) with free weights	5x ? : One back strengthening exercise, 1 set, 10 reps, with a weight equivalent to 30% of the maximum isometric back muscle strength in pounds (maximum 23 kg)	ng
Sugiyama 2002	6	n.g.	Rope skipping (more details ng)	2-3x ?min/w.: 100 jump/session (more details ng)	82%
Tartibian 2011	6	Sedentary	Walking/jogging on treadmill	3-6x 25-45 min: First 12 w: 3-4x 25-30 min at 45-55% HR_{max} , second 12 weeks: 4-6x 40-45 min at 55-65% HR_{max}	95%
Tolomio 2009	11	n.g.	DRT (joint mobility, elastic bands, balls), aquatic exercise (more details ng)	3x 60 min: The first 11 w only in gym, then 2 times in gym & once in water. 15 min warm up (brisk walking, stretching), 2x 30 min/w RT, 1x 30 min/w water gymnastics (more details ng). 2 periods (6, 10 w) training at home (more details ng)	ng
Verschueren 2004	6	n.g.	DRT (leg press, leg extension)	3x 60 min: 20 min warm up (running, stepping, or cycling) at 60-80% HR_{max} , DRT:2 exercise, 1-3 set, 20-8 rep	ng
Wang 2015	12	No Tai Chi	Tai Chi (Yang style)	4x 60 min: 40 min: 5 reps x 6 min set, 42 type compositions each, 2 min rest (more details ng)	ng
	12		Tai Chi-RT (includes 4 Chen style actions)	4x 60 min: 40 min: 6 reps x 5min exercise, 2 min rest (more details ng)	ng
Waltman 2022	12	n.g.	Jogging, DRT (all main muscle groups) with machines	3x ?min/w , Jogging with weighted vest, DRT: ?exercises, ?sets, 8-12 reps at 70 to 85% of 1RM (more details ng)	59%

Woo 2007	12	Sedentary	Tai-Chi (Yang style)	3x ?min/w: 24 forms of Yang-Style Tai Chi (more details ng)	81%
	12		DRT (arm-lifting, hip abduction, heel raise, hip-flexion,-extension, squat) using elastic bands	3x ?min/w: 6 exercises, 30 reps (more details ng)	76%
Wu 2006	12	Sedentary	Walking	3x 60 min: 45 min of walking with 5-6 km/h	ng
Yamazaki 2004	12	Sedentary	Walking	≥4x 60 min: 8000 steps/session at 50% $VO_{2,max}$	100%

AET: Aerobic exercise training; BSE: Bone specific exercise; DRT: Dynamic resistance training; GRF: Ground Reaction Forces; H: high; HE: Home Exercise; HRmax: maximum heart rate; JE: joint exercise program; n.g.: not reported; RPE: rate of perceived exertion; S: Supervised; TUT: time under tension; $VO_{2,max}$: maximum oxygen uptake; WB: weight bearing; 1RM: one repetition maximum; ?: no clear information.

Composition of strain/exercise parameters per session: AET: Frequency/week, exercise duration per session, exercise intensity; DRT: exercises/number of exercises; number of sets, number of repetitions; exercise intensity. Jumping: type of jumps, number of jumps and intensity of jumps. Tai-Chi: style, number of forms.

Tab. 17: Methodische Qualität der eingeschlossenen Studien.

First author, Year	Eligibility criteria ¹	Random allocation	Allocation concealment	Inter group homogeneity	Blinding subjects	Blinding caregivers	Blinding assessors	participation ≥ 85% allocation	Intention to treat analysis ²	Between group comparison	Measure of variability	Overall Score
Adami 1999	+	-	-	+	-	-	-	+	-	+	+	4
Basat 2013	+	+	+	+	-	-	-	-	-	+	+	5
Bassey 1998	+	+	-	+	-	-	+	-	-	+	+	5
Bassey 1995	+	+	-	+	-	-	-	-	-	+	+	4
Bello 2014	+	+	-	+	-	-	-	-	+	+	+	5
Bemben 2010	+	-	-	+	-	-	-	+	+	+	+	5
Bemben 2000	+	+	-	+	-	-	-	-	-	+	+	4
Bergström 2008	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	6
Bloomfield 1993	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	4
Bocalini 2009	+	+	-	+	-	-	+	-	-	+	+	5
Bolton 2012	+	+	+	-	-	-	+	+	+	+	+	7
Brooke-Wavell 2001	+	-	-	+	-	-	-	+	+	+	+	5
Brooke-Wavell 1997	+	+	-	+	-	-	-	+	-	+	+	5
Caplan 1993	+	-	-	+	-	-	-	+	+	+	+	5
Chan 2004	+	+	-	+	-	-	-	-	+	+	+	5
Chilibeck 2013	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+	8
Chilibeck 2002	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+	8
Choquette, 2011	+	+	-	+	-	-	-	-	+	+	+	5
Chuin 2009	+	+	-	+	-	-	-	-	+	+	+	5
de Matos 2009	+	-	-	+	-	-	-	-	-	+	+	3
Deng 2009	+	-	-	+	-	-	-	+	-	+	+	4
de Oliveira 2018	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+	8
Duff 2016	+	+	+	+	+	-	+	-	+	+	+	8

Ebrahim 1997	+	+	+	+	-	-	+	-	+	+	+	7
Englund 2005	+	+	-	+	-	-	-	-	-	+	+	4
Evans 2007	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	6
Going 2003	+	+	-	+	-	-	-	-	+	+	+	5
Grove 1992	+	+	-	+	-	-	-	+	+	+	+	6
Hans 2002	+	+	-	+	-	-	-	-	+	+	+	5
Hartley 2019	+	+	+	+	-	-	-	-	-	+	+	5
Hartard 1996	+	-	-	+	-	-	-	+	+	+	+	5
Hatori 1993	+	+	-	+	-	-	+	+	-	+	+	6
Hettchen 2021	+	+	+	+	-	-	+	-	+	+	+	7
Holubiac 2022	+	-	-	+	-	-	-	+	+	+	+	5
Iwamoto 2001	+	+	-	+	-	-	-	-	+	+	+	5
Jessup 2003	+	+	+	-	-	-	+	+	+	+	+	7
Karakiriou 2011	+	+	-	-	-	-	-	-	-	+	+	3
Kemmler 2013	+	+	-	+	+	-	+	-	+	+	+	7
Kemmler 2010	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	9
Kemmler 2004	+	-	-	+	-	-	-	-	+	+	+	4
Kemmler 1999	+	-	-	+	-	-	-	+	+	+	+	5
Kerr 2001	+	+	-	+	-	-	-	-	+	+	+	5
Kerr 1996	+	+	-	+	-	-	-	-	+	+	+	5
Kohrt 1997	+	-	-	+	-	-	-	-	+	+	+	4
Kohrt 1995	+	-	-	+	-	-	-	-	+	+	+	4
Korpelainen 2006	+	+	+	+	-	-	+	-	+	+	+	7
Kwon 2008	+	-	-	+	-	-	-	-	-	+	+	3
Lau 1992	+	+	+	+	-	-	-	-	+	-	+	5
Liu 2015	+	+	-	+	-	-	-	+	+	+	+	6
Lord 1996	+	+	-	+	-	-	-	-	+	+	+	5
Maddalozzo 2007	+	+	-	+	-	-	-	+	+	+	+	6
Marin-Cascales 2019	+	+	+	+	-	+	-	-	-	+	+	6
Marques 2011	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	6

Marques 2011	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	6
Martin 1993	+	+	-	+	-	-	-	-	+	+	+	5
Milliken 2003	+	+	-	+	-	-	-	+	+	+	+	6
Montgomery 2020	+	+	+	+	-	-	+	-	-	+	+	6
Nelson 1994	+	+	-	+	-	-	-	+	+	+	+	6
Nelson 1991	+	-	-	+	-	-	-	+	+	+	+	5
Nichols 1995	+	+	-	+	-	-	-	-	+	+	+	5
Nicholson 2015	+	+	+	+	-	-	-	+	+	+	+	7
Orsatti 2013	+	+	+	+	-	-	-	+	+	+	+	7
Park 2008	+	+	+	+	-	-	-	+	+	+	+	7
Prince 1995	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	6
Pruitt 1995	+	+	-	+	-	-	-	-	+	+	+	5
Pruitt 1992	+	-	-	+	-	-	-	+	+	+	+	5
Rhodes 2000	+	+	-	+	-	-	-	+	+	+	+	6
Ryan 1998	+	-	-	+	-	-	-	-	+	+	+	4
Sakai 2010	+	+	+	+	-	-	-	+	-	+	+	6
Silverman 2009	+	-	-	+	-	-	+	-	-	+	+	4
Sinaki 1989	+	+	-	+	-	-	-	+	+	+	+	6
Sugiyama 2002	+	-	-	+	-	-	-	-	-	+	+	3
Tartibian 2011	+	+	-	+	-	-	-	+	+	+	+	6
Tolomio 2009	+	+	-	+	-	-	-	+	-	+	+	5
Verschueren 2003	+	+	+	+	-	-	+	-	-	+	+	6
Waltman 2022	+	+	+	+	-	-	-	-	-	+	+	5
Wang 2015	+	+	-	+	-	-	-	+	+	+	+	6
Woo 2007	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+	8
Wu 2006	+	+	-	+	+	-	-	-	+	+	+	6
Yamazaki 2004	+	-	-	+	-	-	-	-	+	+	+	4

¹ This item is not reflected in the calculation of the PEDro score; ²The point is awarded not only for intention to treat analysis, but also when "all subjects for whom outcome measures were available received the treatment or control condition as allocated".

IVhet Analysis of Change of Bone Mineral Density of Lumbar Spine

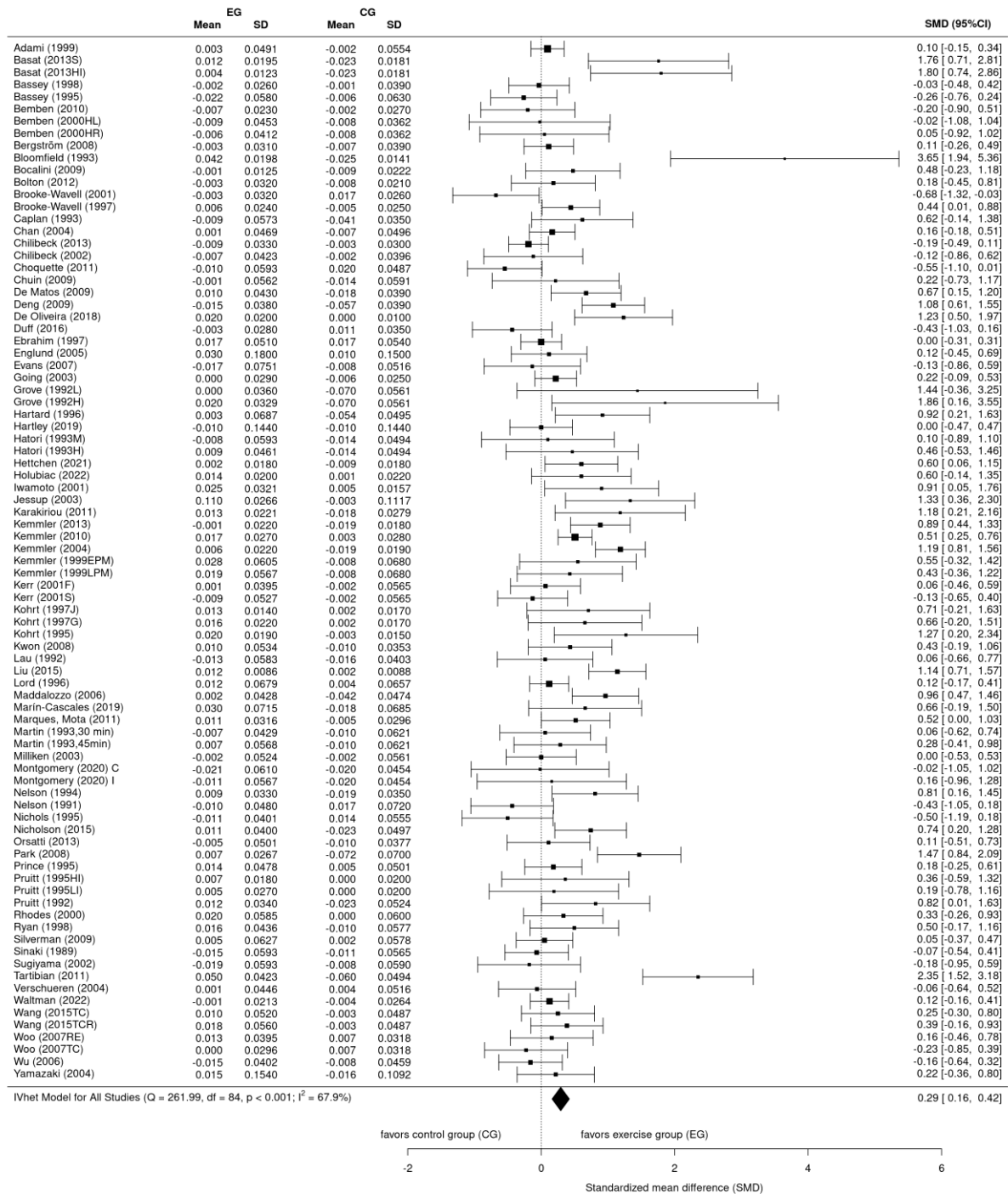


Abb. 28: Forest-plot der Studienergebnisse für die LWS-KMD (IVhet Modell). Zusammengefasste Standardisierte Mittelwertdifferenz (SMD) mit 95% Konfidenzintervall (95%-KI) für Veränderungen in Trainings- (EG) versus Kontrollgruppe (CG).

IVhet Analysis of Change of Bone Mineral Density of Femoral Neck

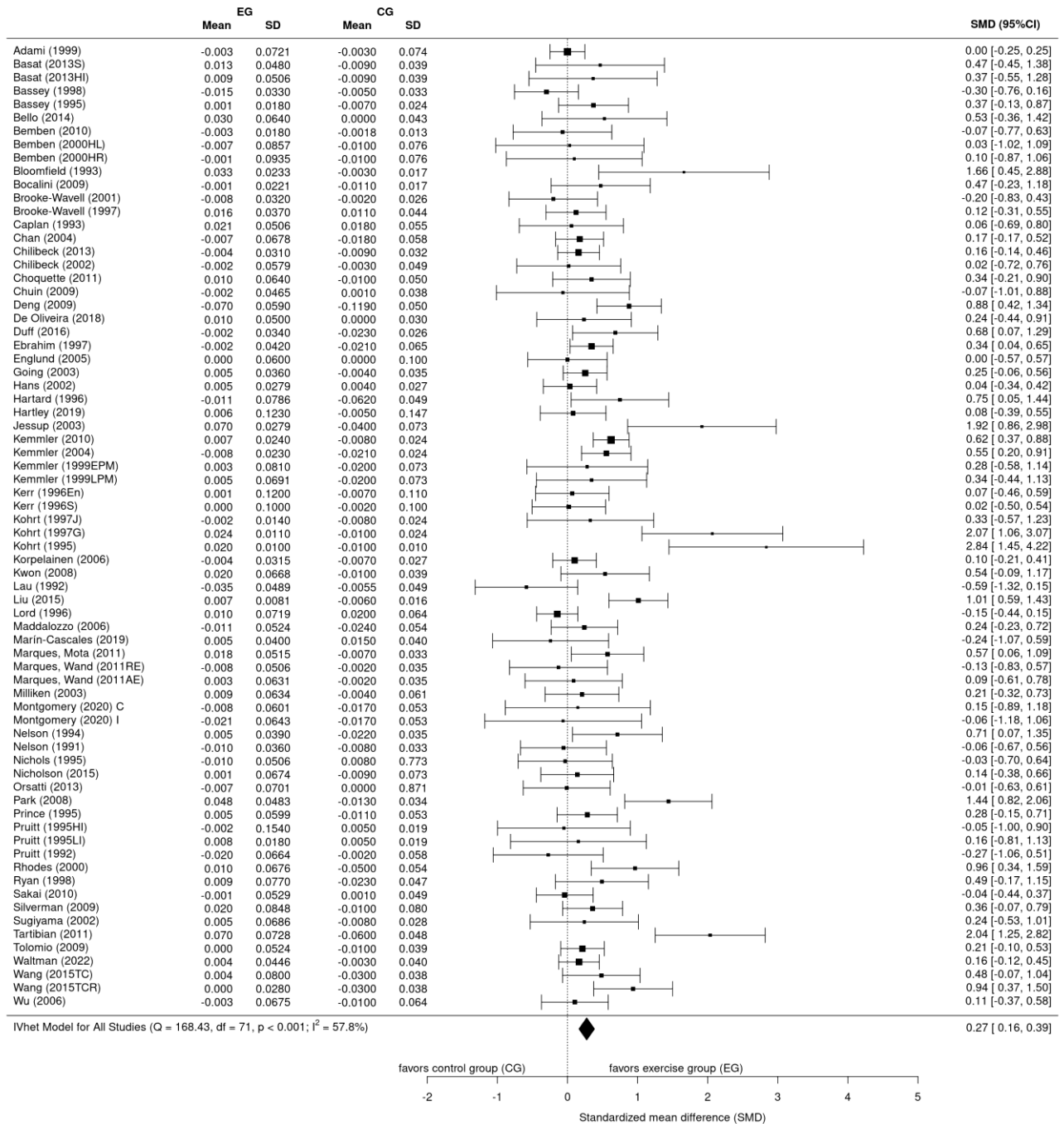


Abb. 29: Forest-plot der Studienergebnisse für die FN-KMD (IVhet Modell). Standardisierte Mittelwertdifferenz (SMD) mit 95%-KI für Veränderungen in Trainings- versus Kontrollgruppe.

IVhet Analysis of Change of Bone Mineral Density of Hip

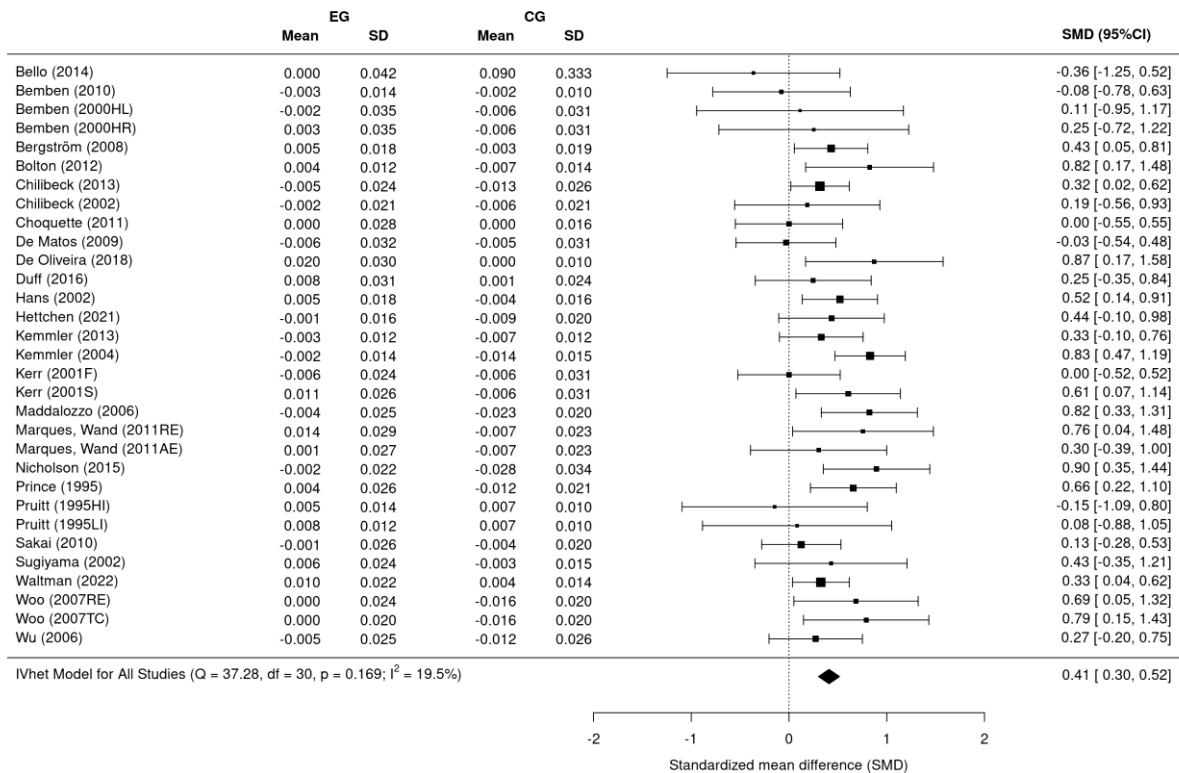


Abb. 30: Forest-plot der Studienergebnisse für die total hip-KMD (IVhet Modell). Standardisierte Mittelwertdifferenz (SMD) mit 95%-KI für Veränderungen in Trainings- versus Kontrollgruppe.

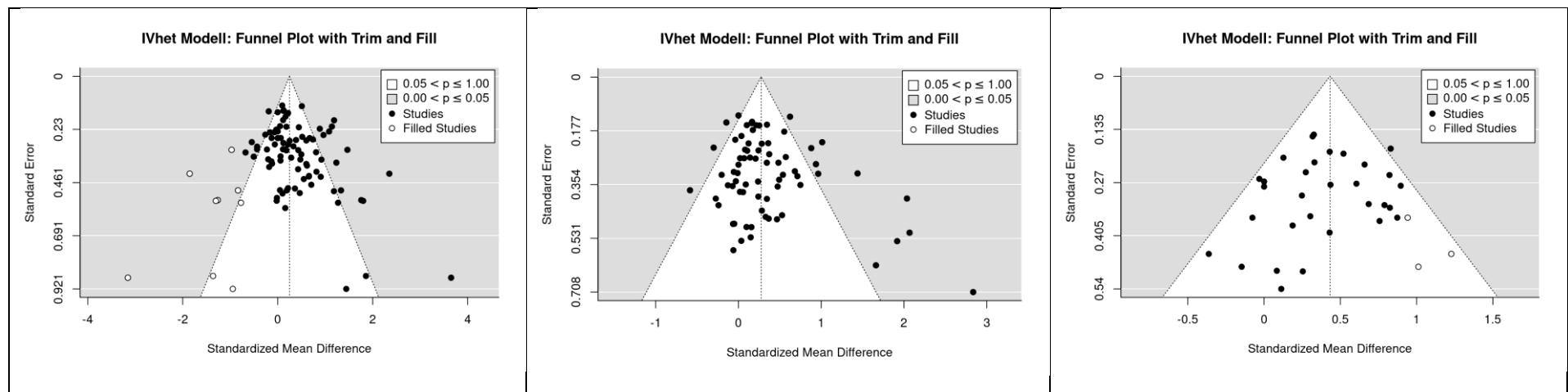


Abb. 31: Trichterdiagramme der KMD-Studienergebnisse an LWS (linke Grafik), FN (Grafik Mitte) und TH (rechte Grafik) für postmenopausale Frauen

(3) Effekte auf die Knochendichte: Männer 45 Jahre und älter

Tab. 18: Studien- und Teilnehmercharakteristika der eingeschlossenen Untersuchungen

First Author, year, origin (country)	Initial sample size (n)	drop out, loss to FU (%)	Age (years)	BMI (kg/m ²)	Health status, bone status	Medication with impact on bone
Allison, 2013 UK	EG:50 CG: 50	30	69.9 + 4.0	26.2 + 2.3	Healthy, no KMD restriction	n.g
Bolam, 2015 Australia	HI-EG: 13 CG: 14	23 7	62.1 + 6.9 58.7 + 7.4	25.8 + 2.8 26.6 + 3.4	Healthy, no osteoporosis	n.g
Ghayomzadeh*, 2020 Iran	EG: 10 CG: 10	10 5	36.2 + 6.7 38.3 + 5.6	26.45 + 3.33 25.23 + 2.99	HIV-infected men, osteopenia or osteoporosis at hip and/or LS	No medication known to relevantly affect bone metabolism
Harding, 2020 Australia	HiRIT-EG: 34 IAC-EG: 33 CG: 26	12 9 19	64.9 + 8.6 69.0 + 6.8 67.4 + 6.3	27.2 + 3.5 26.6 + 4.0 26.3 + 2.8	Healthy, osteopenia or osteoporosis at the hip and/or LS	Apart from 2 men in the HiRIT- and IAC-EG each, no medication known to relevantly affect bone metabolism
Helge, 2014 Denmark	Soccer-EG: 9 RT-EG: 9 CG: 8	0 11 25	68.0 + 4.0 69.1 + 3.1 67.4 + 2.7	26.1 + 3.9 27.4 + 2.8 27.9 + 4.6	Healthy, no KMD restriction	n.g
Huuskonen, 2001 Finland	EG: 70 CG: 70	6	58.1 + 2.9 58.2 + 2.9	27.1 ^c 27.2 ^c	n.g, n.g. (probably healthy without KMD restrictions)	n.g
Jones*, 2020 UK	EG:7 CG: 8	4 13	46.1 + 11.9 52.3 + 13.6	26.0 + 3.1 27.1 + 5.1	Quiescent or mildly-active Crohns disease, no KMD restriction	No medication known to relevantly affect bone metabolism
Kemmler, 2020 Germany	EG: 21 CG: 22	10 5	77.8 + 3.6 79.2 + 4.7	25.0 + 3.0 24.5 + 1.9	Sarcopenia, osteopenia or osteoporosis at the hip and/or LS	No medication known to relevantly affect bone metabolism
Kukuljan, 2011 Australia	EG: 46 CG: 44	4 4	60.7 + 7.1 59.9 + 7.4	28.1 + 3.3 26.7 + 2.9	n.g., partially osteopenia or osteoporosis at the hip and/or LS	No medication known to relevantly affect bone metabolism
Santa Clara, 2003 Portugal	AE-EG: 13 AE+RT-EG: 13	n.g	57 + 11 55 + 10	28.1 + 4.2 27.2 + 2.3	Coronary artery diseases, no KMD restriction	

	CG: 10		57 + 11	26.0 + 3.3		No medication known to relevantly affect bone metabolism
Whiteford, 2010 Australia	RT-EG: 73	11	64 + 6	26.4 + 3.1	Healthy, no osteoporosis	No medication known to relevantly affect bone metabolism
	CG: 70	4	64 + 6	26.3 + 3.0		
Woo ^a , 2007 Hong Kong	RT-EG: 30	2	68.67 + 3.0	24.1 + 3.4	Healthy, no KMD restriction	n.g
	TaiChi-EG: 30		68.2 + 2.4	23.6 + 3.4		
	CG: 30		68.1 + 2.7	23.9 + 3.1		

Tab. 19: Trainingscharakteristika der eingeschlossenen Studien

Author, year	exercise status	Study length (months)	Progression of intensity?	Type of exercise, methods	Setting/ Supervision	Intervention, exercise composition	attendance	Site specificity
Allison, 2013	untrained	12	Yes	Unilateral “hops” Unloaded leg: CG	IE/NS	7 session/week, 5 sets of 10 multi-directional, unilateral hops with peak GRF of $\approx 3 \times$ body weight; 15 s rest between sets	91%	LS: Yes TH: Yes
Bolam, 2016 ¹	untrained	9	Yes	DRT (upper body) on machines and with free weights; multidirectional jumps with high GRF	JE/S IE/NS	4 sessions/week: 2 $\times$ 60 min/week: jumping (see below) and upper body DRT with 4 exercises. 2 sets of 12 reps at 60% 1RM; and 2 jumping sessions/week with 3 exercises, 2-4 sets, 5-18 reps and GRF: 4.6-5.8x body weight; 1 min rest between sets High volume jumping group (HV). 80 jumps/session Low volume jumping group (LV): 40 jumps/session	HVJ: 53% LVJ: 65%	LS: Yes TH: Yes
Ghayomzadeh, 2020	untrained	6	Yes	DRT (all main muscle groups) on machines and with free weights; WBE: Treadmill walking/running	JE/S	3 sessions/week, 8 exercises; 4-20 reps at 60 – 85% 1RM (i.e first session 80-85%; second session 60-80%, third session 50-65% 1RM); each session ≈ 23 minutes of walking/running at up to $\approx 70\%$ HRmax	85%	LS: Yes TH: Yes
Harding, 2020	no RT	8	Yes	DRT (deadlift, squat, and overhead press) and “jumping chin-ups”	JE/S	2 sessions/week; 3 exercises (deadlift, squat, and overhead press), 5 sets of 5 repetitions with 80-85% 1RM (RPE ≥ 16), 5 sets of 5 repetitions jumping chin-ups with “flat footed landing”	78%	LS: Yes TH: Yes
			Yes	Isometric-Axial-Comp-ression (IAC) at machines	JE/S	2 sessions/week, 4 exercises (chest press, leg press, core pull, vertical lift; bioDensity device), near-maximal 5-s isometric contraction (RPE ≥ 16)	79%	LS: Yes TH: Yes
Helge, 2014	not given	12	Yes	Soccer (on natural grass)	JE/S	2-3 sessions/week, 4 set $\times$ 15min FB at 65-90% HRmax, 2min rest between sets.	66%	LS: Yes TH: Yes
			Yes	DRT (all main muscle groups) on machines and with free weights	JE/S	2-3 sessions/week; 5-7 exercises (leg press, leg extension, leg curl, pull-down, and lateral raises, lunges, seated row) 4 sets at 8RM (i.e. 8 reps at $\approx 75\%$ 1RM), explosive concentric movement	73%	LS: Yes TH: Yes
Huuskonen, 2001	not given	48	Yes	Brisk walking	IE/NS	5 sessions/week 60 min of brisk walking at 40-60% of VO2max (aerobic threshold pace)	not given	LS: Yes TH: Yes

Jones, 2020	RT <2 s/w.	6	Yes	DRT (all main muscle groups) with own body weight and elastic bands; rope skipping, multi-directional jumps	IE/ mainly NS	3 sessions/week, 5 min rope skipping, 2-3 sets of 10-15 reps of 5 different jumps (e.g. squat, broad, scissor jump); 8-10 RT exercises, 2-3 sets of 10-15 repetitions with “moderate-hard effort” (i.e. $\approx$ 65-75% 1RM)	62% ^a	LS: Yes TH: yes
Kemmler, 2020	RT $\leq$ 45 min /w.	18	Yes	DRT (all main muscle groups) on machines	JE/S	2 sessions/week, periodized single set RT with periods of high intensity (up to 85% 1RM), high effort (by RM, supersets, drop sets) and high velocity (explosive concentric movement)	95%	LS: Yes TH: Yes
Kukuljan, 2011	untrained	18	Yes	DRT (all main muscle groups) on machines and with free weights and jumps (IE)	JE/S IE/S	3 sessions/week, periodized RT with up to 85% 1RM and explosive velocity during the concentric phase (last 6 month), and 2-3 sets of different jumps with 20 reps with peak GRF of 1.5-9.7x body weight	63%	LS: Yes TH: Yes
Santa Clara, 2003	not given	12	Yes	WBE: walking/running on treadmill	JE/n.g.	3 sessions/week 50 min treadmill walking/running at 60-70% HRR	85%	LS: Yes TH: Yes
			Yes	DRT (all main muscle groups) on machines and treadmill walking/running	JE/n.g.	3 sessions/week 30 min Treadmill walking/running at 60-70% HRR and DRT: 8 exercises, 2 sets of 8-12 reps at 40-50% 1RM; 2x20 reps of abdominal exercises; 2x10 reps of back exercises (intensity n.g.)	82%	LS: Yes TH: Yes
Whiteford, 2010 ²	$\leq$ 2 s/w. $\leq$ moderate intensity	12	Yes	DRT (all main muscle groups) on machines and with free weights	JE/S	3 sessions/week, 10 exercises, 3 set at 8RM (i.e. 8 reps at $\approx$ 75% 1RM)	71%	LS: Yes TH: Yes
Woo, 2007	untrained	12	No	Tai Chi (Yang Style)	n.g.	3 session/week, 24 Forms of Yang Style, intensity n.g.	81%	LS: ? TH: yes
			No	DRT with elastic bands	n.g.	3 sessions/week, 6 exercises (arm lifting, hip abduction, heel raise, hip flexion, -extension, ankle dorsiflexion), 30 reps with an elastic band of low-moderate strength; intensity n.g. (presumably low)	76%	LS: Yes TH: Yes

DRT: Dynamic Resistance Training; GRF: ground reaction forces; HRmax: maximum heart rate; HRR: heart rate reserve; IE: individual exercise; JE: joint (group) exercise, LS: lumbar spine; NS: non supervised; S: supervised; s/w: session/week; FN: femoral neck; WB:E weight bearing exercise; 1-RM 1-repetition maximum; ¹we only included results from the High volume exercise group in this analysis; ²active control group (3x 30 min of walking/week recomme

Tab. 20: Methodische Qualität der eingeschlossenen Studien

Author, year	PEDro-Criteria												Additional TESTEX Criteria ¹					
	Eligibility criteria	Random allocation	Allocation concealment	Inter group homogeneity	Blinding subjects	Blinding personnel	Blinding assessors	participation $\geq$ 85%	Intention to treat analysis ²	Between group comparison	Measure of variability	Total score PEDro	Adverse effects reported	Attendance reported	Activity monitoring in control groups	Relative exercise intensity constant	Exercise volume & energy expended	Total score TESTEX
Allison et al. 2013	y	+	n.a.	+	-	-	+	-	+	+	+	6	+	+	+	n.a.	+	11
Bolam et al. 2016	y	+	+	+	-	-	-	+	+	+	+	7	+	+	-	+	+	13
Ghayomzadeh et al. 2020	y	+	-	+	-	-	+	+	+	+	+	7	+	+	-	+	+	12
Harding et al. 2020	y	+	+	-	-	-	+	+	+	+	+	7	+	+	+	+	+	14
Helge et al. 2014	y	+	-	+	-	-	-	+	-	+	+	5	-	+	-	+	+	10
Huuskonen et al. 2001	y	+	-	+	-	-	-	+	-	+	+	5	-	-	-	+	+	8
Jones et al. 2020	y	+	+	-	-	-	+	+	+	+	+	7	-	+	-	+	+	13
Kemmler et al. 2020	y	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+	8	+	+	+	+	+	14
Kukuljan et al. 2011	y	+	+	+	-	-	-	+	+	+	+	7	-	+	+	+	+	11
Santa Clara et al. 2003	y	-	-	+	-	-	-	-	-	+	+	3	-	+	-	-	+	7
Whiteford et al. 2010	y	+	-	+	-	-	-	+	+	+	+	6	+	+	-	+	+	12
Woo et al. 2007	y	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+	8	+	+	-	-	-	10

¹TESTEX awards one point for listing the eligibility criteria and, also in contrast to PEDro, a further point for the between group comparison of at least one secondary outcome

²... or all subjects received treatment or control as allocated. However, this aspect differs from TESTEX that specifically required an ITT analysis only.

Random-effects Analysis of Change of Bone Mineral Density of Lumbar Spine

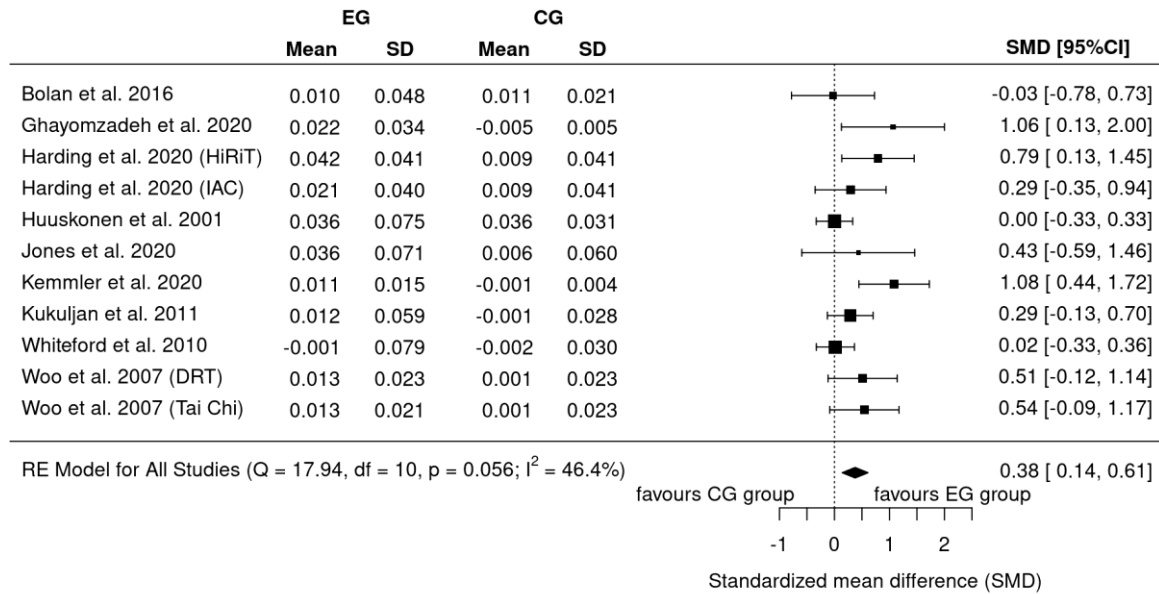


Abb. 32: Forest-plot der Studienergebnisse für die LWS-KMD. Standardisierte Mittelwertdifferenz (SMD) mit 95%-KI für Veränderungen in Trainings- (EG) versus Kontrollgruppe (CG).

Random-effects Analysis of Change of Bone Mineral Density of Femoral Neck

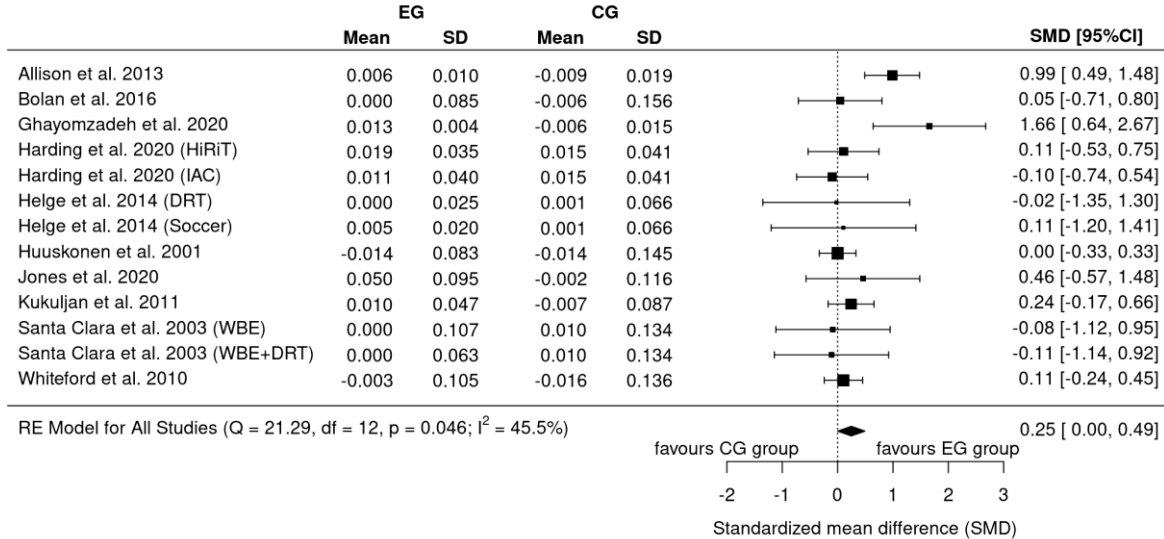


Abb. 33: Forest-plot der Studienergebnisse für die FN-KMD. Standardisierte Mittelwertdifferenz (SMD) mit 95%-KI für Veränderungen in Trainings- (EG) versus Kontrollgruppe (CG).

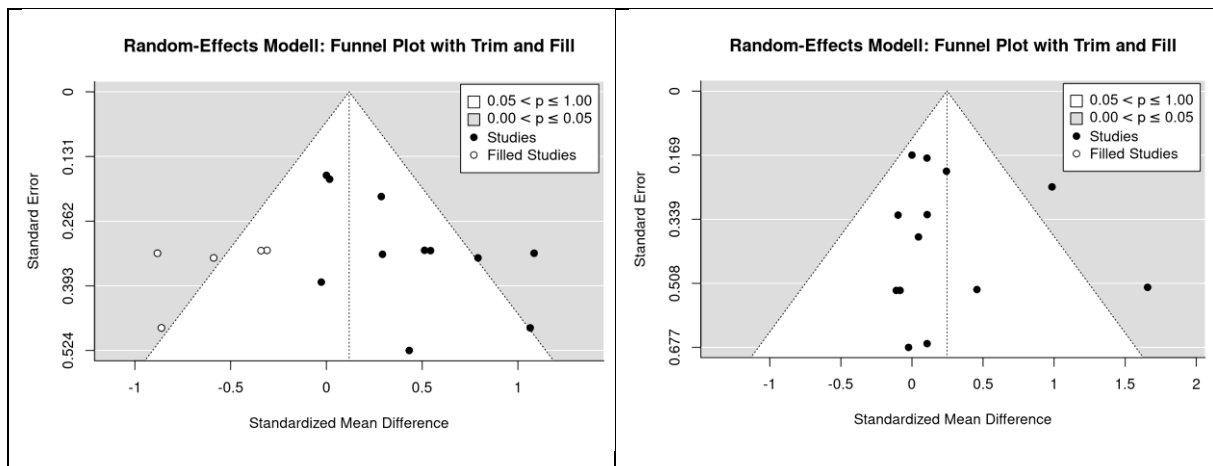


Abb. 34: Trichterdiagramme der KMD-Studienergebnisse an LWS (linke Grafik) und FN (rechte Grafik) für Männer 45 Jahre und älter.

(4) Effekte auf die Knochendichte bei Menschen mit Glukokortikoid-induzierter Osteoporose (GIOP)

Tab. 21: Basale Studien-/Teilnehmercharakteristika der eingeschlossenen Studien

Author, year	Study arm	Number of participant (gender) [n]	Health status	Age [years]	Body- height [cm]	Body-mass [kg]	KMD-LS baseline [g/cm ³]	KMD-FN baseline [g/cm ³]	Drop-out [%]
Braith et al. 1996	Glucocorticoids	8 (m)	Heart transplant recipients	56±6	173±9	85±11	.716±.087	.921±.078	n.g.
	Glucocorticoids + Exercise	8 (m)		56±6	173±5	78±8	.701±.064	.972±.085	
Mitchell et al. 2003	Glucocorticoids	8 (w: 1, m: 7)	Lung transplant recipients	55±6	173±13	81±20	.528±.180	-----	n.g.
	Glucocorticoids + Exercise	8 (w: 2, m: 6)		49±7	173±10	172±19	.543±.170	-----	
Westby et al. 2000	Glucocorticoids	16 (w)	Rheumatoid Arthritis	56±11	164±7	63.4±13.6	1.004±.141	.755±.055	7
	Glucocorticoids + Exercise	14 (w)		56±10	162±8	61.7±10.8	.969±.118	.726±.118	

Tab. 22: Pharmakologische Therapie der eingeschlossenen Untersuchungen

Author, year	Glucocorticoid	Start of pharmaceutical therapy	Calcium	Vitamin D	Other medication
Braith et al. 1996	Progressive reduction from 1000 mg to 10 mg/d oral methyl-prednisolone after 20 week, in case of acute rejection (n=20) higher doses	During surgery, i.e. two months pre-exercise	n.g.	n.g.	n.g.
Mitchell et al. 2003	Progressive reduction from 500 mg (surgery) to 10-15 mg/d oral methylprednisolone during the intervention	During surgery, i.e. two months pre-exercise	n.g.	n.g.	Cyclosporin, azathioprine, details n.g.
Westby et al. 2000	Continuously 2.5 to 7.5 mg/d prednisone	n.g. (..taking continuous low-dose prednisone)	Calcium-carbonate 1000 mg/Td	400 IU/d	DMARDs; non-steroidal anti-inflammatory drugs (NSAID) details n.g.

Tab. 23: Trainingscharakteristika der eingeschlossenen Studien

Autor, year	Pre-intervention exercise status	Design/Supervision	Intervention-length (months)	Type of exercise	Exercise protocol.	Progression of intensity	Attendance	Activity in control group
Braith et al. 1996	n.g. presumably (DRT) untrained	RCT consistently supervised	6	DRT, all main muscle groups at machines	3 sessions per week: 1x week lumbar extension at specific MedX device and 2x week 8 upper and lower body exercises with 1 set of 10-15 reps at RM, walking training with similar intensity and volume (n.g.) in both groups	yes	n.g.	walking
Mitchell et al. 2003	untrained	RCT, consistently supervised	6	DRT lumbar extension training on machine	1 sessions per week lumbar extension at specific MedX device; 1 set with 15-20 reps to voluntary muscle fatigue, time under tension/rep: 2 s (concentric) – 1 s isometric – 4s eccentric) walking training with similar intensity and volume (n.g.) in both groups	yes	n.g.	walking
Westby et al. 2000	untrained	RCT, predominately non-supervised	12	Aerobic Dance and DRT (major peripheral muscle groups)	3x week, 15-20 min of moderate intensity aerobic dance, 10-15 min of floor exercises, cuff weight exercises with low intensity; more details n.g.	n.g.	71%	n.g.

DRT: Dynamic Resistance Training; n.g.: not given; RCT: randomized controlled trial - randomisierte kontrollierte Studie; reps: repetitions; RM: repetition maximum (i.e. work to failure)

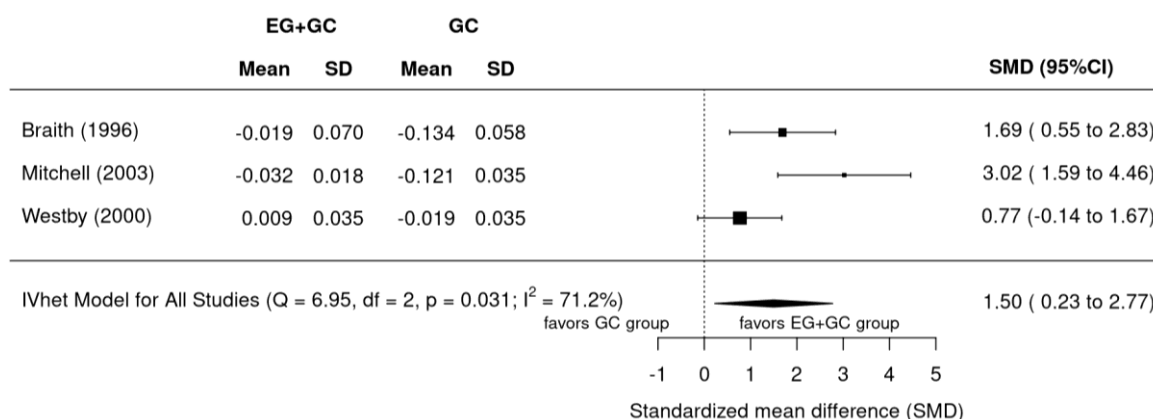
Tab. 24: Methodische Qualität der eingeschlossenen Studien

	PEDro-Criteria												Additional TESTEX Criteria ⁹²					
Author, year	Eligibility criteria	Random allocation	Allocation concealment	Inter group homogeneity	Blinding subjects	Blinding personnel	Blinding assessors	participation≥ 85% allocation	Intention to treat analysis ⁹³	Between group comparison	Measure of variability	Total score PEDro	Adverse effects reported	Attendance reported	Activity monitoring in control groups	Relative exercise intensity constant	Exercise volume & energy expended	Total score TESTEX
Braith, 1996	Y	+	-	+	-	-	-	+	+	+	+	6	-	-	-	+	+	9
Mitchell, 2003	Y	+	-	+	-	-	-	+	+	+	+	6	-	-	-	+	+	9
Westby, 2000	Y	+	-	+	-	-	-	-	-	+	+	4	-	+	-	-	-	7

⁹² TESTEX awards one point for listing the eligibility criteria and, also in contrast to PEDro, a further point for the between group comparison of at least one secondary outcome.

⁹³ or all subjects received treatment or control as allocated (...or were retrospectively analyzed).

IVhet Analysis of Change of Bone Mineral Density of Lumbar Spine



IVhet Analysis of Change of Bone Mineral Density of Hip

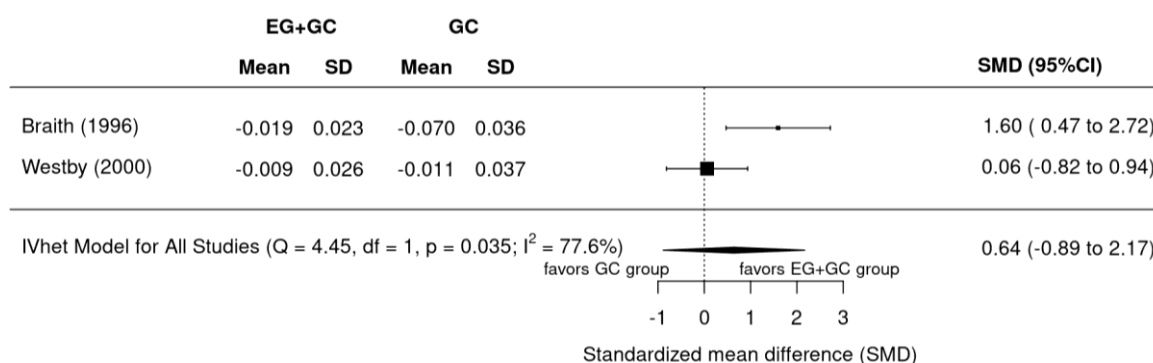


Abb. 35: Forest-plot der Studienergebnisse für die LWS- (oben) und FN-KMD (unten). Zusammengefasste Standardisierte Mittelwertdifferenz (SMD) mit 95%-KI für Veränderungen in kombinierter Gruppe (GC+EX) versus isolierter Glukokortikoid-Therapie (GC).

IVhet Model: Funnel Plot with Trim and Fill

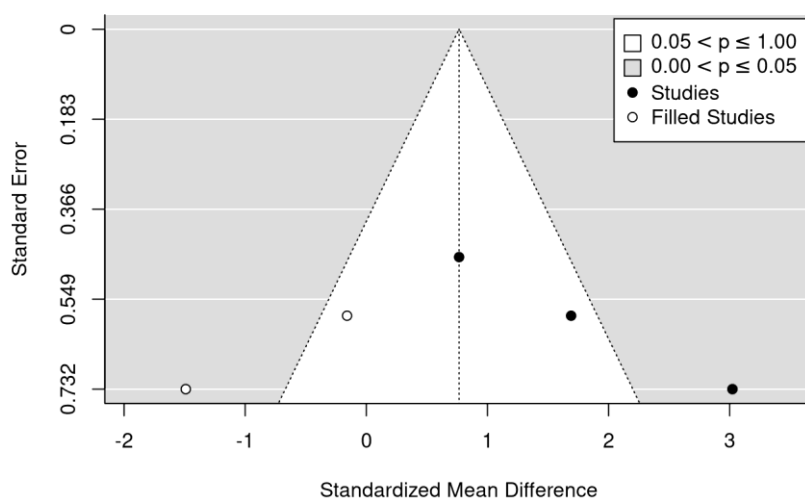


Abb. 36: Trichterdiagramme der KMD-Studienergebnisse an der LWS (auf Darstellung der KMD-FN Ergebnisse wurde verzichtet) bei Studien mit Teilnehmern mit GIOP.

(5) Ableitung von Trainingsempfehlungen

Trainingsinhaltliche Empfehlungen: WBE, DRT, kombinierte Protokolle

Tab. 25: Basale Studien-/Teilnehmercharakteristika der eingeschlossenen Studien

First author, year	Sample size (n)	Age (years)	Menopausal age (years)	Body mass (kg)	Height (cm)	BMI (kg/m ²)
Adami 1999	E: 125 C: 125	E: 65±6 C: 63±7	E: 16±7 C: 14±8	n.g. n.g.	n.g. n.g.	E: 24.6±3.3 C: 23.8±3.8
Basat, 2013	RE: 14 HI: 14 C: 14	RE: 56±5 HI: 56±3 C: 56±4	RE: 6±4 HI: 7±2 C: 6±3	n.g. n.g. n.g.	n.g. n.g. n.g.	RE: 25±4.7 HI: 26.4±3.5 C: 27.5±3.7
Bassey, 1995	E: 31 ¹ C: 32	E: 54±4 C: 55±3	E: 7±4 C: 7±5	E: 63.3±11.4 C: 64.7±6.7	E: 163±6 C: 159±5	E: 24.6±2.7 C: 24.9±3.8
Bassey, 1998	E: 45 C: 32	E: 56±3 C: 55±4	E: 7±4 C: 5±4	E: 64.7±7.3 C: 66.5±7.8	E: 161±6 C: 163±6	E: 25±2.6 C: 25.1±2.6
Bello, 2014	E: 10 C: 10	E: 61±6 C: 61±6	n.g. n.g.	n.g. n.g.	n.g. n.g.	n.g. n.g.
Bemben, 2010	E: 22 ² C: 12	E: 64±1 C: 63±1	>5	E: 76.6±3.2 C: 77.9±4.5	E: 161±2 C: 163±1	E: 30±1 C: 29±1
Bemben, 2000	HR: 11 HL: 13 C: 11	HL: 50±2 HR: 52±2 C: 52±1	HL: 4±1 HR: 2±1 C: 3±1	HL: 74.7±5.6 HR: 62.7±3.4 C: 66.5±4.2	HL: 162±2 HR: 165±2 C: 166±2	HL: 28.7±2.4 HR: 23.2±1.2 C: 24.2±1.7
Bergström, 2008	E: 60 C: 52	E: 59±4 C: 60±3	n.g. n.g.	n.g. n.g.	n.g. n.g.	E: 24.4±2.6 C: 24.9±2.3
Bocalini, 2009	E: 23 C: 12	E: 69±9 C: 67±8	n.g. n.g.	E: 68±6 C: 69±7	n.g. n.g.	E: 28±4 C: 27±6
Bolton, 2012	E: 19 C: 20	E: 60±6 C: 56±5	E: 13±7 C: 12±7	E: 64.5±9.7 C: 63.6±11.9	E: 160±4 C: 160±6	E: 25.2±4.3 C: 25±4.4
Brooke-Wavell, 1997	E: 43 C: 41	E: 65±3 C: 64±3	E: 15±5 C: 15±7	E: 67.7±10.9 C: 67.9±10.6	E: 162±6 C: 163±7	E: 25.8±3.8 C: 25.6±3.5
Brooke-Wavell, 2001	E: 18 C: 21	E: 65±3 C: 65±3	>5	E: 68.5±8.9 C: 71.4±12.1	E: 163±7 C: 164±7	n.g. n.g.
Caplan, 1993*	E: 19 C: 11	E: 66±1 C: 65±1	E: 18±2 C: 21±3	E: 63.2±2.5 C: 60.6±2.9	E: 158±2 C: 160±2	E: 25.4±0.9 C: 23.5±0.8
Chan, 2004	E: 67 C: 65	E: 54±3 C: 54±3	E: 5±2 C: 4±2	E: 55.4±7.9 C: 54±10.3	E: 150±10 C: 150±20	E: 24.1±4.7 C: 23.5±4.6
Chilibeck, 2013	E+Pl: 86 Pl: 88	E+Pl: 55±6 Pl: 56±7	>1	E+Pl: 73.4±14.1 Pl: 73.6±15.9	E+Pl: 163±5 Pl: 163±6	n.g. n.g.
Chilibeck, 2002*	E: 14 C: 14	E: 57±2 C: 59±2	E: 9±2 C: 8±2	E: 72±4.3 C: 73.2±4.8	E: 164±2 C: 165±1	E: 27±1.7 C: 26.6±1.2
Choquette, 2011	E+Pl: 25 Pl: 26	E+Pl: 58±6 Pl: 59±6	E+Pl: 8±8 Pl: 10±8	E+Pl: 75.4±12.1 Pl: 79.5±9.2	E+Pl: 161±6 Pl: 160±6	E+Pl: 29.1±3.9 Pl: 31±2.9
Chuin, 2009	E+Pl: 11 Pl: 7	E+Pl: 65±3 Pl: 67±4	n.g. n.g.	E+Pl: 66.6±8.5 Pl: 64.2±7.6	n.g. n.g.	E+Pl: 26.5±2.7 Pl: 26±2.8
de Matos, 2009	E: 30 C: 29	E: 57±5 C: 57±5	10 7	E: 59.8±7.6 C: 65±8.3	E: 158±4 C: 159±8	E: 23.9±3.3 C: 25.6±3.1
Deng, 2009	E: 45 C: 36	E: 54±4 C: 51±5	E: 4±3 C: 3±2	E: 58.8±8 C: 58.3±7.5	E: 157±5 C: 159±5	n.g. n.g.
de Oliveira 2018	E: 17 C: 17	E: 56±7 C: 54±5	E: 8±7 C: 9±7	E: 67.4±8.6 C: 64.6±6.6	E: 157±6 C: 154±4	E: 27.2±2.7 C: 27.3±2.5

Duff, 2016	E: 22 C: 22	E: 65±5 C: 65±5	n.g. n.g.	n.g. n.g.	E: 162±6 C: 160±7	n.g. n.g.
Ebrahim, 1997	E: 81 C: 84	E: 66±8 C: 68±8	n.g. n.g.	n.g. n.g.	n.g. n.g.	E: 26.6±4.3 C: 26.3±4.8
Englund, 2005	E: 24 C: 24	E: 73±4 C: 73±5	n.g. n.g.	E: 66.9±8.7 C: 67.7±8.5	E: 162±6 C: 160±6	E: 25.2±2.7 C: 26.1±3.2
Evans, 2007	E+SP: 11 ³ SP: 10	E+SP: 62±5 SP: 63±5	E+SP: 8±6 SP: 8±5	E+SP: 66.7±13.3 SP: 67.6±7.3	E+SP: 163±7 SP: 161±6	n.g. n.g.
Going, 2003	E: 91 C: 70	E: 56±5 C: 57±5	>3	E: 68.9±11.4 C: 67.8±11.4	E: 163±7 C: 163±5	E: 25.8±3.4 C: 25.5±4
Grove, 1992	LI: 5 HI: 5 C: 5	LI: 57±4 HI: 54±2 C: 56±4	LI: 3±2 HI: 4±3 C: 4	LI: 69±12.7 HI: 72.3±19.2 C: 70.5±10.1	n.g. n.g. n.g.	n.g. n.g. n.g.
Hans, 2002	E: 110 C: 35	E: 68±5 C: 66±5	>5	E: 63±7.3 C: 59.5±7.5	E: 161±8 C: 159±8	n.g. n.g.
Hartard, 1996	E: 18 C: 16	E: 64±6 C: 67±10	>2	E: 67±7.7 C: 63.8±11.2	E: 162±7 C: 158±6	n.g. n.g.
Hatori, 1993	E-H: 12 ⁴ E-M: 9 C: 12	H: 56±4 M: 58±5 C: 58±8	H: 7±5 M: 6±4 C: 9±8	H: 54±5 M: 53.4±6.8 C: 53.9±6	H: 151±3 M: 151±5 C: 151±5	H: 23.3±2.3 M: 23.5±2.4 C: 24.6±3.3
Iwamoto, 2001	E: 8 C: 20	E: 65±5 C: 65±6	E: 16±6 C: 15±6	E: 45.5±6.5 C: 45.8±4	E: 152±8 C: 152±6	E: 19.7±1.3 C: 19.9±2.1
Jessup, 2003	E: 10 C: 10	E: 69±3 C: 69±4	E: 24±11 C: 22±11	E: 78±9.2 C: 84.2±17.7	n.g. n.g.	n.g. n.g.
Karakiriou, 2011*	E: 10 C: 9	E: 53±1 C: 53±1	E: 5±1 C: 3±1	E: 71.2±2.8 C: 75.4±2	E: 159±1 C: 157±2	E: 28.1±1.1 C: 30.4±0.8
Kemmler, 1999	E-PM: 15 L-PM: 17 C: 18	EPM: 54±5 LPM: 65±6 C: 56±8	EPM ≤ 8 LPM > 8 C > 1	n.g. n.g. n.g.	n.g. n.g. n.g.	EPM: 25.5±4.2 LPM: 26.2±3.8 C: 27.4±5.3
Kemmler, 2004	E: 86 C: 51	E: 55±3 C: 56±3	>1	E: 67.6±9.7 C: 64.8±13.6	E: 164±6 C: 162±7	E: 25.1±3.3 C: 24.7±3.9
Kemmler, 2010	E: 123 C: 123	E: 69±4 C: 69±4	n.g. n.g.	E: 68.1±10.9 C: 69.5±12	E: 162±6 C: 160±6	n.g. n.g.
Kemmler, 2013	E: 43 C: 42	E: 52±2 C: 52±3	E: 2±1 C: 2±1	E: 69.5±9.6 C: 70.9±16.8	E: 165±5 C: 165±6	n.g. n.g.
Kerr, 2001	RE: 42 Fit: 42 C: 42	RE: 60±5 Fit: 59±5 C: 62±6	RE: 11±6 Fit: 9±5 C: 12±6	RE: 72.2±12 Fit: 69±11.4 C: 69.3±14.6	RE: 163±5 Fit: 165±6 C: 162±7	n.g. n.g. n.g.
Kerr, 1996	En: 28 ⁵ S: 28	En: 56±5 S: 58±4	En: 6±4 S: 8±3	En: 70.8±10 S: 69.4±11.4	En: 165±6 S: 165±7	n.g. n.g.
Kohrt, 1997*	JRF: 15 GRF: 18 C: 15	JRF: 65±1 GRF: 66±1 C: 68±1	n.g. n.g. n.g.	JRF: 72.6±2.3 GRF: 70.9±4.2 C: 71.6±1.8	JRF: 164±2 GRF: 163±1 C: 163±2	n.g. n.g. n.g.
Kohrt, 1995	E: 8 ⁶ C: 8	E: 65±3 C: 66±3	>10	E: 63.4±11.9 C: 63.4±8.1	E: 161±5 C: 161±5	n.g. n.g.
Korpelainen, 2006	E: 84 C: 76	E: 73±1 C: 73±1	n.g. n.g.	E: 61.2±7.9 C: 62.2±9.2	E: 154±5 C: 156±5	E: 25.7±3.4 C: 25.5±3.5
Kwon, 2008	E: 20 C: 20	E: 77±2 C: 77±3	n.g. n.g.	E: 56.4±3.8 C: 58.1±5.6	E: 149±6 C: 152±3	E: 25.9±1.9 C: 25.2±2.8
Lau, 1992	E+PI: 15 PI: 15	E+PI: 79 PI: 75	n.g. n.g.	n.g. n.g.	n.g. n.g.	n.g. n.g.
Liu, 2015	E: 50 C: 48	E: 63±7 C: 62±8	E: 14±6 C: 13±7	n.g. n.g.	E: 154±4 C: 157±4	n.g. n.g.
Lord, 1996	E: 90 C: 89	E: 72±5 C: 71±5	n.g. n.g.	E: 66±11.4 C: 64.7±14.4	E: 157±6 C: 157±7	n.g. n.g.

Maddalozzo, 2007	E: 35 C: 34	E: 52±3 C: 52±3	E: 2±1 C: 2±1	E: 70±8.7 C: 67.1±12.6	n.g. n.g.	n.g. n.g.
Marques 2011	E: 30 C: 30	E: 70±5 C: 68±5	n.g. n.g.	n.g. n.g.	n.g. n.g.	E: 28.4±3.7 C: 28.2±3.7
Marques-Wanderley, 2011	RE: 23 AE: 24 C: 24	RE: 67±5 AE: 70±5 C: 68±6	n.g. n.g. n.g.	n.g. n.g. n.g.	n.g. n.g. n.g.	RE: 28.8±4.6 AE: 27.5±3.8 C: 28.1±3.5
Martin, 1993	45 ^{min} E:25 30 ^{min} E:27 C: 24	45 ^{min} : 58±7 30 ^{min} : 60±8 C: 57±7	45 ^{min} : 9±9 30 ^{min} : 13±9 C: 8±7	45 ^{min} : 65.6±11.9 30 ^{min} : 68.9±11.5 C: 72.9±15.5	45 ^{min} : 159±5 30 ^{min} : 162±7 C: 162±4	n.g. n.g. n.g.
Milliken, 2003	E: 26 C: 30	E: 57±5 C: 57±5	E: 6±3 C: 6±3	E: 68.4±10.6 C: 68.4±10.6	E: 162±6 C: 162±6	n.g. n.g.
Nelson, 1994	E: 21 C: 19	E: 61±4 C: 57±6	E: 12±5 C: 10±5	E: 64.7±7.7 C: 62.2±8.9	E: 163±6 C: 164±8	E: 24.4±2.5 C: 23.1±2.2
Nelson, 1991*	E: 21 ⁷ C: 20	E: 60±1 C: 60±1	E: 11±1 C: 11±1	E: 64±1.4 C: 64±1.4	E: 162±1 C: 162±1	E: 24.4±0.5 E: 24.4±0.5
Nichols, 1995*	E: 17 C: 17	E: 68±2 C: 65±1	E: 18±1 C: 18±1	E: 68.8±2.8 C: 72±13.5	E: 163±1 C: 164±1	n.g. n.g.
Nicholson, 2015	E: 28 C: 29	E: 66±4 C: 66±5	>5	E: 70.6±9.1 C: 66.8±10.7	E: 164±4 C: 163±5	E: 26±3.2 C: 24.5±2.9
Orsatti, 2013	E+Pl: 20 Pl: 20	E+Pl: 56±9 Pl: 55±8	E+Pl: 9±6 Pl: 8±6	n.g. n.g.	n.g. n.g.	E+Pl: 26±3 Pl: 30.4±5.3
Park, 2008	E: 25 C: 25	E: 68±4 C: 68±3	E: 18±2 C: 19±3	n.g. n.g.	E: 153±4 C: 152±4	n.g. n.g.
Prince, 1995	E+Ca: 42 Ca: 42	E+Ca: 63±5 Ca: 62±5	E+Ca: 16±5 Ca: 16±6	n.g. n.g.	n.g. n.g.	n.g. n.g.
Pruitt, 1992*	E: 17 C: 10	E: 54±1 C: 56±1	E: 3 C: 4±1	E: 64.2±1.9 C: 65.5±2.9	E: 162±1 C: 163±2	n.g. n.g.
Pruitt, 1995	H-int: 15 L-int: 13 C: 12	H-int: 67±1 L-int: 68±1 C: 70±4	n.g. n.g. n.g.	H-int: 64.5±9.2 L-int: 61.5±4.6 C: 63.8±9.1	H-int: 162±7 L-int: 160±5 C: 160±9	H-int: 24.5±3.4 L-int: 23.9±1.6 C: 25.1±3.1
Ryan, 1998	E: 18 C: 18	E: 62±6 C: 63±6	>2	E: 79.3±8 C: 83.1±11.3	n.g. n.g.	E: 30.5±2.8 C: 30.9±3
Sakai, 2010*	E: 49 C: 45	E: 68±1 C: 68	n.g. n.g.	E: 51.4±1.1 C: 51.7±0.9	E: 151±1 C: 151±1	E: 22.4±0.4 C: 22.6±0.4
Silverman, 2009	E: 46 C: 40	E: 60±5 C: 58±5	E: 12±8 C: 11±7	E: 84.6±11.3 C: 87.4±14.4	n.g. n.g.	E: 32.1±4.2 C: 32.6±4.6
Sinaki, 1989	E: 34 C: 34	E: 56±4 C: 56±4	>0.5	E: 66.2±9.3 C: 66.1±10.6	E: 163±6 C: 161±5	n.g. n.g.
Sugiyama, 2002*	E: 13 C: 13	E: 52±1 C: 53±1	E: 3 C: 2	E: 54.7±3.4 C: 50.9±1.7	E: 155±2 C: 153±1	E: 22.7±1.2 C: 21.7±0.7
Tartibian, 2011	E: 20 C: 18	E: 61±7 C: 59±8	>8	E: 77.5±10.4 C: 75.9±17.2	E: 167±8 C: 168±16	E: 25.1±7.1 C: 28.5±3.7
Tolomio, 2009	E: 81 C: 79	E: 62±5 C: 64±5	n.g. n.g.	E: 66±10.9 C: 63±9.7	E: 161±10 C: 159±10	n.g. n.g.
Verschueren, 2004	E: 22 C: 24	E: 64±4 C: 64±3	E: 15±6 C: 15±7	E: 70.5±9.6 C: 68.6±14.5	E: 161±6 C: 160±6	E: 27.4±3.5 C: 26.5±5.8
Wang, 2015	TC: 40 TC+RT:40 C: 39	TC: 58±3 TCRT: 58±3 C: 58±3	>0.5	TC: 60.5±8.3 TCRT: 60±6 C: 60.5±8.3	TC: 159±5 TCRT: 161±4 C: 159±5	n.g. n.g. n.g.
Woo, 2007	TC: 30 RE: 30 C: 30	TC: 70±3 RE: 70±3 C: 69±3	n.g. n.g. n.g.	n.g. n.g. n.g.	n.g. n.g. n.g.	TC: 24.4±4.3 RE: 24.6±4 C: 24.9±3
Wu, 2006	E+Pl: 34 Pl: 34	E+Pl: 55±3 Pl: 55±3	E+Pl: 4±2 Pl: 4±2	E+Pl: 54.1±7.3 Pl: 51.4±7.1	E+Pl: 155±6 Pl: 157±6	E+Pl: 22.4±2.9 Pl: 20.9±2.2

Yamazaki, 2004*	E: 32 C: 18	E: 64±3 C: 66±3	E: 17±2 C: 15±2	E: 51.2±1.4 C: 50.1±1.6	E: 155±1 C: 156±1	E: 21.2±0.7 C: 21.1±1.1
----------------------------	----------------	--------------------	--------------------	----------------------------	----------------------	----------------------------

¹ 63 women were randomized equally. ² Not stated to which groups the 7 drop out belong. ³ Not stated to which groups the 9 drop outs belong. ⁴ Not clear to which groups the two persons who failed to complete the program belong. ⁵ Unilateral exercise: One side of body as control and the other side as intervention. ⁶ No data concerning participants/group; we assumed an equal allocation. ⁷ Exercise with or without Ca vs sedentary control with or without Ca-supplements.

AE: aerobic exercise; C: control; Ca: calcium; E: exercise; En: Endurance; EPM: early postmenopausal; Fit: fitness; GRF: ground-reaction forces (i.e., walking); H: High; HI: high impact; H-int: high intensity; HL: high load; HR: high repetition; JRF: joint-reaction forces; LI: low impact; L-int: Low intensity; LPM: late postmenopausal; M: Moderate; n.g.: not given; Pl: Placebo; RE: resistance exercise; S: Strength; SP: soy protein; TCRT: Tai Chi resistance training; TC: Tai Chi; All values are presented as mean ± SD, if not otherwise stated; *Numbers are presented as mean ± SE.

Tab. 26: Trainingscharakteristika der eingeschlossenen Studien, kategorisiert entsprechend dem Trainingsinhalt (WB, DRT, kombinierte Intervention)

WB type exercise (n=30)							
First Autor, Year	Health, menopausal and exercise status	Duration (months)	Progression Intensity	Types and specifications of the exercise content	Site specificity	Volume (min/w), Supervision (Attendance)	Exercise/strain composition and further details of the protocol
Basat, 2013	Osteopenia 6±4 y post No-BSE	6	No	Rope skipping	? Yes	7x35, S-JE (>60%)	15 min warm up (walking), maximum 50 jumps/session (more details n.g.)
Bassey, 1995	Healthy 7±4 y post No-BSE	12	No	Heel-drops, jumping, skipping	? Yes	1x?, S-JE 7x?, HE (84%)	HE: 50 heel-drops barefoot on a thinly covered floor with knee & hip extended. S-JE: jumping & skipping (more details n.g.)
Bassey, 1998	Healthy 7±4 y post No vigorous Ex > 1h/w	12	No	Jumping: counter-movement jumps (CMJ)	? Yes	5x10, HE 1x10, S-JE (91%)	50 CMJ barefoot with both legs, 5 sets x 10 reps with ground reaction forces (GRF): 4x body mass
Brooke-Wavell, 2001	Healthy >5 y post Sedentary	12	No	Brisk walking	No Yes	>3x>20 (140 min/w), Non-supervised (>90%)	4-5x 25-35- min/d ≈ 70% HRmax
Brooke-Wavell, 1997	Healthy 15±6 y post Sedentary	12	No	Brisk walking	No Yes	140 min/w, Non-supervised (100%)	20-50 min long for each walk, ≈ 70% HRmax
Chan, 2004	Healthy 5±2 y post No >0.5 h/w	12	No	Tai Chi: Yang Style (all main muscle groups (more details n.g.))	? Yes	5x50, S-JE (≈84%)	Slow, smooth movements with constant velocity
Ebrahim, 1997	Healthy (upper limb fractures) 66±8 y No limit	24	No	Brisk walking	No Yes	3x40, HE (100%)	40 min walking, “faster than usual, but not so fast as to be uncomfortable”
Evans, 2007	Healthy ≈8±6 y post n.g.	9	Yes	Walking/running, stair-climbing (machines)	? Yes	3x45, S-JE (n.g.)	WB & Non-WB AET (machines) at 55-80% VO ₂ peak. Rest by changing exercise mode
Hans, 2002	≥Osteopenia >5 y post n.g.	24	Yes (?)	Heel-drops: barefoot on a force measuring platform (osteocare)	? Yes	5x3-5, HE (65%)	Impact loading: strength or height 25-50% above the estimated resting force, daily 120 correct force impacts

Hatori, 1993	Healthy ≈7±5 y post n.g.	7	No	Walking below the anaerobic threshold	No Yes	3x30, n.g. (n.g.)	30 min walking at 90% anaerobic threshold HR (6.2 km/h) at “flat grass covered ground”
		7	No	Walking above the anaerobic threshold	No Yes	3x30, n.g. (n.g.)	30 min walking at 110% anaerobic threshold HR (7.2 km/h) at “flat grass covered ground”
Kohrt, 1995	Healthy >8 y post Sedentary	11	Yes	Walking, jogging, stair climbing	? Yes	3-5x45, HE (≈70%)	First 2 months flexibility, 9 months WB: 5-10 min warm up (treadmill 60-70% HRmax), 30 min WB at 65-85% HRmax
Kohrt, 1997	Healthy >8 y post Sedentary	11	Yes	Walking, jogging, stair climbing	? Yes	3-5x30-45, n.g. (presumably S-HE) (≈70%)	First 2 months flexibility, 9 months WB at 60-85% HRmax
Korpelainen, 2006	Osteopenia >8 y post n.g.	30	Yes	Jumping, walking/jogging, dancing, stamping, chair climbing	? Yes	1x60, S-JE 7x20, HE (≈75%)	S-JE: 45 min WB AET. The first six months: 1x 60 min S-JE & daily x 20 min HE. The second six months: HE: daily x 20 min HE applying the same exercise to S-JE
Lau, 1992	Healthy >8 y post n.g.	10	No	Stepping up and down, Upper trunk movements	? Yes	4x≈20-25, S-JE (n.g.)	100 steps on a 23 cm block 15 min upper trunk movements (?) in a standing position with sub-maximum effort (more details n.g.)
Liu, 2015	Osteoporosis 14±6 y post n.g.	12	No	Tai-Chi	? Yes	3x daily ≈3-5, HE (96%)	8 exercise brocade, 7 reps (slowly raising the arms, moving to tip toe, stretching the back and go back on the heel with arms hanging down)
Marques, 2011	Healthy >8 y post Sedentary	8	Yes	Walking, stepping, skipping, jogging, dancing, DRT (first 6 weeks only)	? Yes	3x60, S-JE (78%)	Only the first 6 w 10 min DRT (lower body). 35-40 min of WB AET (50-85% HRR) with Peak-GRF up to 2.7x body mass with up to 120 beats/min
Martin, 1993	Healthy ≈11±9 y post No-BSA	12	Yes	Brisk walking on treadmill	No Yes	3x36-40, n.g. (presumably S-JE) (79%)	30 min brisk walking (4-6.2 km/h at 3-7% incline) at 70-85% HRmax
		12	Yes	Brisk walking on treadmill	No Yes	3x51-55, n.g. (presumably S-JE) (82%)	45 min brisk walking (4-6.2 km/h at 3-7% incline) at 70-85% HRmax
Nelson, 1991	Healthy 11±1 y post Sedentary	12	No	Walking with weighted vest	No Yes	4x50, S-JE (90%)	Walking with a 3.1 kg weighted vest at 75-80% HRmax
Prince, 1995	Healthy >8 y post ≤2 h/w Ex	24	No	WB AET (more details n.g.)	? Yes	4x60, 2x S-JE/2x HE (39%)	4x WB exercise (including 2x walking) at 60% HRmax (more details n.g.)
Ryan, 1998	Healthy >2 y post Sedentary	6	Yes	Walking, jogging on treadmill	? Yes	3x55, S-E (>90%)	Up to (4th month) 35 min walking/jogging at 50-70% VO ₂ max, 10 min cool down (cycle ergometer), Energy-intake restriction of 250-350 kcal/d (weight loss study).
Sakai, 2010	Healthy >8 y post	6	No	Unilateral standing on one leg	No Yes	7x2, HE (≥70%)	3 sets (early, at noon, in the evening) of unilateral standing for 1 min on each leg with eyes open

	n.g.						
Silverman, 2009	Healthy 12±8 y post Sedentary	6	No	Walking	No Yes	3x45-60, S-JE >1session (78%)	walking at 50-75% HRmax, energy-intake restriction of 250-350 kcal/d (weight loss study)
Sugiyama, 2002	Healthy 3 y post n.g.	6	No	Rope skipping (more details n.g.)	? Yes	2-3x?, HE (82%)	100 jump/session (more details n.g.)
Tartibian, 2011	Healthy >8 y post Sedentary	6	Yes	Walking/jogging on treadmill	? Yes	3-6x25-45, S-JE (95%)	First 12 weeks: 3-4x 25-30 min at 45-55% HRmax, second 12 weeks: 4-6x 40-45 min at 55-65% HRmax
Wang, 2015	Healthy >0.5 y post No Tai Chi	12	No	Tai Chi (Yang-style)	? Yes	2x60, S-JE 2x60, Group E with video (n.g.)	40 min: 5 reps x 6 min set, 42 type compositions each, 2 min rest (more details n.g.)
Woo, 2007	Healthy >8 y post Sedentary	12	No	Tai-Chi (Yang Style)	? Yes	3x?, S-JE (81%)	24 forms of Yang-Style Tai Chi
Wu, 2006	Healthy 4±2 y post Sedentary	12	No	Walking	No Yes	3x60, S-JE (n.g.)*	45 min of walking with 5-6 km/h
Yamazaki, 2004	≥Osteopenia 17±8 y post Sedentary	12	No	Walking	No Yes	≥4x60, n.g. (presumably HE) (100%)	8000 steps/session at 50% VO ₂ max

DRT type exercise (n=18)							
First Autor, Year	Health, menopausal and exercise status	Duration (months)	Progression Intensity	Types and specifications of the exercise content	Site specificity	Volume (min/w), Supervision (Attendance)	Exercise/strain composition of the protocol
Bemben, 2000	Healthy 3±1 y post No-RT	6	Yes	DRT (all main muscle groups) with machines	Yes Yes	3x60, S-JE (87%)	DRT:45 min, 8 exercises, 3 sets, 8 reps, 80% 1RM
		6	Yes	DRT (all main muscle groups) with machines	Yes Yes	3x60, S-JE (93%)	DRT: 45 min, 8 exercises, 3 sets, 16 reps, 40% 1RM
Chilibeck, 2002	Healthy 9±2 y post No-vigorous Ex	12	Yes	DRT (all main muscle groups) on machines	Yes Yes	3x?, S-JE (78%)	12 exercises, 2 sets, 8-10 reps, ≈70% 1RM
De Oliveira, 2018	Healthy 8±7 y post Sedentary	6	Yes	Pilates (all main muscle groups) on machines	Yes Yes	3x60, S-JE (93%)	21 exercises (strengthening & flexibility) , 1 set, 10 reps, 1 min rest between exercises, 5-6 at Borg CR10
Duff, 2016	Healthy >8 y post No-RT	9	Yes	DRT (all main muscle groups) on machines & with free weights	Yes Yes	3x?, S-JE (84%)	12 exercises, 2 sets, 8-12 reps to muscular fatigue, ? 1RM (more details n.g.)
Hartard, 1996	Osteopenia >2 y post <1 h/w, No-BSE	6	Yes	DRT (all main muscle groups) on machines	Yes Yes	2x?, S-JE (>83%)	14 exercises, 1-2 sets, 8-12 reps, 70% 1RM, TUT: concentric: 3-4s – eccentric 3-4s. ≥2 min rest between sets
Kerr, 1996	Healthy ≈7±4 y post No-RT, No-Ex>3h/w	12	Yes	Unilateral DRT (all main muscle groups, randomized allocation of the left side or right side to exercise or control group) on machines or free weights	Yes Yes	3x45-60, S-JE (89%)	13 exercises, 3 sets at 20 RM, 3-5 rep (≈60-65% 1RM), 2-3 min rest between sets
		12	Yes	Unilateral DRT (see above)	Yes Yes	3x20-30, S-JE (87%)	13 exercises, 3 sets at 8 RM, 3-5 rep (≈75-80% 1RM), 2-3 min rest between sets
Maddalozzo, 2007	Healthy 1-3 y post n.g.	12	Yes	DRT (back squat, deadlifts) with free weights	Yes Yes	2x50, S-JE (85%)	15-20 min warm up (exercise focusing on posture, muscle engagement, abdominal strength, flexibility) 2 sets, 10-12 reps, 50% 1 RM. Main part: 20-25 min, 2 exercises, 3 sets, 8-12 reps, 60 s rest between sets at 60-75% 1RM, TUT: 1-2s concentric, 2-3s eccentric

Nelson, 1994	Healthy (6 women with 1 spine fracture) 12±5 y post Sedentary	12	Yes	DRT (most main muscle groups) on machines	Yes Yes	2x55, S-JE (88%)	45 min, 5 exercises, 3 sets, 8 reps, 50- 80% 1RM, TUT-6-9 s/rep, 3s rest between reps, 90-120 s rest between sets
Nicholsen, 2015	Healthy >5 y post No-RT	6	Yes	DRT (all main muscle groups): „Body Pump Release 83“ (i.e. barbell exercises)	Yes Yes	2x50, S-JE (89%)	10x up to 6 min blocks of exercises for all main muscle groups (21 exercises in total); up to 108 reps (squats), ≤30% 1RM
Orsatti, 2013	Healthy 9±6 y post Sedentary	9	Yes	DRT (all main muscle groups) with free weights and on machines	Yes Yes	3x50-60, S-JE (n.g.)	8 exercises 3 sets, 8-15 reps at 40-80% 1RM, 3 sets -20-30 reps for trunk flexion & calf raises, 1-2 min rest between sets
Pruitt[151], 1992	Healthy 3 ± 1 y post No-BSE	9	Yes	DRT (all main muscle groups) with free weights and on machines	Yes Yes	3x60, S-JE (83%)	40 min, 11 exercises, 1 set, at 10 -12 RM for upper body & 10-15 RM for lower body (more details n.g.)
Pruitt, 1995	Healthy >8 y post No-RT	12	Yes	DRT (all main muscle groups) on machines	Yes Yes	3x55-65, S-JE (81%)	50-55 min, 10 exercises, 1 warm up set, 14 reps, at 40% 1 RM, 2 sets, 7 reps, 80% 1RM
	Healthy >8 y post No-RT	12	Yes	DRT (all main muscle groups) on machines	Yes Yes	3x55-65, S-JE (77%)	50-55 min, 10 exercises, 3 sets, 14 reps, at 40% 1RM
Sinaki, 1989	Healthy >0.5 y post n.g.	24	Yes	DRT (back strengthening exercise in a prone position using a back pack; ≈hyperextensions) with free weights	Yes No	5x?, HE (n.g.)	One back strengthening exercise, 1 set, 10 reps, with a weight equivalent to 30% of the maximum isometric back muscle strength in pounds (maximum 23 kg)
Wang, 2015	Healthy >0.5 y post No Tai Chi	12	No	Tai Chi-RT (includes 4 resistance based Chen style actions)	? Yes	2x60, S-JE 2x60, Group E with video (n.g.)	40 min: 6 reps x 5min exercise, 2 min rest (more details n.g.)
Woo, 2007	Healthy >8 y post Sedentary	12	No	DRT (arm-lifting, hip abduction, heel raise, hip-flexion,-extension, squat) with elastic bands	Yes Yes	3x?, S-JE (76%)	6 exercises, 30 reps (no more information given)

Combined WB und DRT (n=36)							
First Autor, Year	Health, menopausal and exercise status	Duration (months)	Progression Intensity	Types and specifications of the exercise content	Site specificity	Volume (min/w), Supervision (Attendance)	Exercise/strain composition of the protocol
Adami, 1999	Healthy 16±7 y post Sedentary	6	No	Walking, DRT; volleyball in a sitting/standing position	No Yes	2x95-110, SJE (83%) 7x30 HE (n.g.)	SJE: 15-30 min warm up (walking), 70 min press-up, volleyball, 10 min DRT for the forearm with a 500 g weight. Number of reps (10-25)/min increased progressively. HE: Repeat all exercise
Basat, 2013	Osteopenia 6±4 y post No-BSE	6	No	Walking, DRT (focus on lower body with few trunk exercises)	Yes Yes	3x60, S-JE (>60%)	15 min warm up (walking), 30-40 min RT: ≥9 exercises, 1 set, 10 reps (more details n.g.)
Bello, 2014	Diabetes 61±6 y Low intensity	8	No	Walking; DRT (all main muscle groups); aquatic exercise (RT main muscle groups)	Yes Yes	3x40-?, S-JE (85%)	40 min walking 1 x w, WB circuit training 1 x w with easy loads: 6 exercises, 3 sets, 15-20 reps. Aquatic RT exercise 1 x w: 4 exercise, 3 sets, 15-20 reps; all at RPE 12-15 of Borg CR 20. 1x week each type of exercise
Bemben, 2010	Healthy >5 y post No-RT	8	No	Walking, DRT (all main muscle groups) with machines	Yes Yes	3x≈60, S-JE (90%)	5 min warm up (walking), 8 exercises, 3 sets, 10 reps, 80% 1RM + dumbbell wrist curls & seated abdominal flexion L/M intensity
Bergström, 2008	Osteopenia 59±4 y No-BSE	12	Yes	Walking, DRT (all main muscle groups);	Yes Yes	1-2x60, S-JE 3x30, HE HT & S-JE (95%)	S-JE: 25 min DRT, 25 min WB AET (more details n.g.) HE: fast walking (more details n.g.)
Bocalini, 2009	Healthy >8 y post Sedentary	6	Yes	Running, DRT (all main muscle groups)	Yes Yes	3x60, S-JE (>90%)	10 min warm up (low impact running), 12 exercises, 3 sets, 10 reps, 85% 1RM with focus on eccentric exercises, 1 min rest (alternate upper & lower body exercises) between ex
Bolton, 2012	Osteopenia 13±7 y post No-BSE	12	Yes	Jumping, DRT (muscle groups n.g.: "loading the proximal femur")	No Yes	3x60, S-JE 1/w (88%) Daily HT	S-JE: 40 min (?) exercises, 2 sets, 8 reps, 80% 1RM with slow velocity, 1 set with reduced load & high velocity (12 rep). HT: Daily 3 sets, 10 reps of jumps (more details n.g.)
Caplan, 1993	Healthy 18±8 y post n.g.	24	No	Aerobic dance, ball games; DRT: floor exercises (more details n.g.)	? Yes	2x60, S-JE (n.g.) ≥1x20-30, HT (n.g.)	20-25 min AET, 10 min ball games (more details n.g.) 20-30 min DRT (more details n.g.)
Chilibeck, 2013	Healthy >1 y post No-BSE	24	Yes	Walking; DRT (all main muscle groups) on machines	Yes Yes	2xn.g., S-JE 4x20-30, HT & S-JE (77%)	S-JE: 15 exercises, 2 sets, 8 reps, 80% 1RM HT & S-JE: walking at 70% HRmax
Choquette, 2011	Healthy 8±8 y post Sedentary	6	Yes	Running & cycling; DRT (all main muscle groups) on machines & with free weights	Yes Yes	3x60, S-JE (≥85%)	AET: 30 min at 40-85% HRmax; after 3 months H-intensity intervals of 4x4 min ≥90% HRmax, 3 min rest at 50-65% HRmax. RT: 30 min, ? exercise, 1 set, 12-15 rep increased to 4 sets 4-6 reps, at 60%-85%1RM

Chuin, 2009	Healthy >8 y post n.g.	6	Yes	Running & cycling, DRT (most main muscle groups) on machines	Yes Yes	3x60, S-JE (>90%)	15 min warm up (treadmill/cycle ergometer), DRT: 45 min, 8 exercises, 3 sets, 8 reps at 80% 1RM, rest between sets 90-120 s, 1 RM-test each 4 weeks
De Matos, 2009	≥Osteopenia 10 y post n.g.	12	Yes	Running, stepping, cycling, DRT (all main muscle groups) on machines or free weights;	Yes Yes	3x45-65, n.g. (presumably S-JE) (n.g.)	WB / non-WB AET (treadmill, stepper, bike): 5-20 min (RPE 4-6 on Borg CR 10). DRT: 30-40 min, 9 exercises, ? sets, 10-15 reps, ? 1RM, TUT: 3 s conc-3 s eccentric; 1 min rest between sets & exercise
Deng, 2009	Healthy 4±3 y post No-BSE	12	Yes	Brisk walking, stepping, jumping; DRT (all main muscle groups) on machines with free weights	Yes Yes	2x60, S-JE 3-5x60, HE (82%)	S-EJ: 45 min DRT, 9 exercises, 2-5 sets, 12-40 reps, at 50-60% 1RM, self-selected rest (more details n.g.). HE: 30 min walking, at 50-80% HRmax, 15 min step routine, 50-300 jumps from a 4 inch bench
Englund, 2005	Healthy >8 y post n.g.	12	Yes	Walking/jogging; DRT (all main muscle groups)	Yes Yes	2x50, S-JE (67%)	WB AET: 10 min warm up, 15 min walking/jogging. DRT: 12 min, 2 sets, 8-12 reps., ? 1RM (more details n.g.)
Going, 2003	Healthy 3-11 y post No-RT, <120min Ex	12	Yes	Walking, Jogging, skipping, hopping, stepping with weighted vests; DRT (all main muscle groups) on machines with free weights	Yes Yes	3x≈60, S-JE (72%)	10 min warm up (walking), 20-25 min WB AET at 60% HRmax, 120-300 stair/steps with 5- 13 kg weighted vest. DRT: 7 exercises, 2 sets, 6-8 reps 70-80% 1 RM
Grove , 1992	Healthy 4±3 y post Sedentary	12	No	Jumping variations, heel drops (GRF≥2x body mass); DRT	? Yes	3x60, S-JE (83%)	20 min of high impact exercises. 15 min cool down (RT with abdominal & leg adduction/abduction exercises)
		12	No	Walking, charleston, heel jacks (GRF<1.5x body mass), DRT	No Yes	3x60, S-JE (80%)	20 min of low impact exercises. 15 min cool down (RT with abdominal & leg adduction/abduction exercises)
Iwamoto , 2001	Osteoporosis 16±6 y post Sedentary	24	Yes	Walking; DRT (“Gymnastics”: lower limbs & trunk exercises)	Yes Yes	Daily (walking), ?, HE 2x daily RT?, HE (n.g.)	Additionally (to basic activity walking) ≈3000 steps/d, RT: ≥4 exercises, 2 sets, 15 reps, ?% 1RM
Jessup , 2003	Healthy >8 y post Sedentary	8	Yes	Walking, stairclimbing; DRT (most main muscle groups) on machines	Yes Yes	3x60-90, S-JE (n.g.)	DRT: 20-35 min, 8 exercises, ? sets, 8-10 reps, 50%- 75% 1RM. WB AET: 30-45 min with weighted vest (increased up to 10% body-mass)
Karakiriou , 2011	Osteopenia 5±2 y post Sedentary	6	No	Walking, jumping, step aerobic exercise; DRT (all main muscle groups)	Yes Yes	2x? RT, S-JE 1x45 min AET (80%)	15 min warm up (walking, cycling, jumping). 2x RT/w.:11 exercises, 2-3 sets, 10-12 reps at 70% 1RM, 30 s rest between exercises, 3 min between sets. 1x Step aerobic/w.: 20 min, 9 exercise, 2 circuits of 40 s; rest: 20 s between exercises, 2 min between circuits, 70-85% HRmax
Kemmler, 1999	Healthy Early-post-menopausal No-BSE	9	Yes	Running, gaming, jumping; DRT (all main muscle groups)	Yes Yes	2x90, S-JE (82%) 2x35, HT (59%)	AET: 25 min at 70-80% HRmax. RT: 65 min, 12-15 exercises, 2-4 sets of 8 s maximum isometric contractions; 6 trunk, upper back, lower extremity exercises, 20-25 reps at 60-65% 1 RM. HT: resistance exercises
	Healthy Late-post-menopausal No-BSE	9	Yes	Running, gaming, jumping; DRT (all main muscle groups)	Yes Yes	2x90, S-JE (82%) 2x35, HT (59%)	AET: 25 min at 70-80% HRmax. RT: 65 min, 12-15 exercises, 2-4 sets of 8 s maximum isometric contractions; 6 trunk, upper back, lower extremity exercises, 20-25 reps at 60-65% 1 RM. HT: resistance exercises

Kemmler, 2004	Osteopenia 1-8 y post No-BSE	26	Yes	Running, HI-aerobic dance jumping; DRT (all main muscle groups) on machines, with free weight, body mass	Yes Yes	2x60-70, S-JE (79%) 2x25, HT (61%)	AET: 20 min at 65-85% HRmax. Jumping started after 5-6 months with 4x 15 multi-lateral jumps. DRT: 30-40 min, 1/w. The first 6 month: 13 ex, 2 sets, 20-12 rep, TUT: 2s concentric, 2s eccentric at 50-65% RM, 90 s rest between sets & exercises. Then, 12 w blocks of H-intensity at 70-90% 1RM interleaved by 4 w at 55-79% 1RM. Isometric RT: 30-40 min, 1/w, 12-15 exercises (trunk& femur), 2-4 sets, 15-20 rep, 15-20 s rest. HT: rope skipping (3 set, 20 rep), RT
Kemmler, 2010	Healthy >8 y post Sedentary	18	Yes	HI-aerobic dance; DRT (all main muscle groups)	Yes Yes	2x60, S-JE (76%) 2x20, HE (42%)	AET: 20 min at 70-85% HRmax. RT: 10-15 exercises, 1-3 sets of 6-10 s maximum isometric contractions, 20-30 s rest, 3 upper body exercises, 2-3 sets 10-15 reps, TUT: 2s concentric, 2s eccentric at 65-70% 1RM; 3 lower extremity exercises, 2 sets 8 reps, 1 min rest at 80% 1RM. HT: RT 1-2 sets, 6-8 exercise, 10-15 rep. 2-3 belt exercises, 2 sets, 10-15 rep
Kemmler, 2013	Healthy 2±1 y post No-BSE	12	Yes	HI-aerobic dance, walking/running, jumping; isometric & DRT (all main muscle groups) exercise on machines, with free weight, body mass	Yes Yes	3x45-60, S-JE (67%)	Block I: 1x 45 min/w H-Impact aerobic 75-85% HRmax, 2x 20 min/w aerobic 75-85% HRmax, 4x 15-20 jumps, 90 s rest. RT: 15 min, 8-12 floor exercises (trunk, hip, legs), 1-2 sets, 10-20 rep, 30 s rest. RT: 20 min, 8 exercises, 2 sets, 8-9rep, 45 s rest up, TUT: 2s concentric, 2s eccentric. to 80% 1RM
Kerr, 2001	Healthy ≈10±6 y post <2 h/w	24	Yes	Walking, DRT (all main muscle groups)	Yes Yes	3x60, S-JE (74%)	≈30 min brisk walking & stretching, RT: 30 min, 9 exercises, 3 sets at 8 RM (≈75-80% 1RM)
		24	No	Walking, DRT (all main muscle groups); Stationary cycling	Yes Yes	3x60, S-JE (77%)	≈30 min brisk walking & stretching. RT: 30 min, 9 exercises, 3 set, 8 rep, 40 sec/exercise with “minimal load”; 10 s rest between the exercises (more details n.g.). Stationary cycling 40s, HR <150 beats/min
Kwon, 2008	Healthy >8 y post No-Ex>2/w	6	Yes RT?	Aerobic dance; DRT (6 upper & lower body exercises) with free weights	Yes Yes	3x80, n.g. (presumably S-JE) (n.g.)	30 min AET at 40-75% HRmax, 30 min DRT of 6 exercises, ? sets, 3-10 reps to voluntary fatigue (i.e. 75% 1RM)
Lord, 1996	Healthy >8 y post No equal intensity with the intervention	12	No	Brisk walking, multilateral stepping, lunges, heel rises; DRT (all main muscle groups) using owns body mass	Yes Yes	2x60, S-JE (73%)	5 min warm up (paced walking), conditioning period 35-40 min: AET & guided functional gymnastics for all main muscle groups (sets?, reps?, intensity?)
Marques & Mota, 2011	Healthy >8 y post Sedentary	8	Yes	Marching, bench stepping, heel-drops; DRT (most main muscle groups) with weighted vests, elastic bands, free weights	Yes Yes	2x60, S-JE (72%)	15 min WB AET with Peak-GRF up to 2.7x body mass & high strain frequency (120-125 beats/min), 10 min for ≥7 muscle endurance exercises, 1-3 sets, 8-15 reps, ?1RM (more details n.g.), 10 min balance & dynamic exercise (walking, playing with ball, rope, sticks, etc.), 10 min agility training (coordination, balance, ball games, dance)
Marques & Wanderley, 2011	Healthy >8 y post Sedentary	8	Yes	DRT (all main muscle groups) on machines, walking during cool down	Yes Yes	3x60, S-JE (78%)	8-10 min warm up (cycling/rowing ergometer) at low intensity. 30-40 min DRT, 8 exercises, 2 sets, 15-6 reps, 50-80% 1RM with

							variable TUT (3-6s/rep.), 120 s rest between sets, 5-10 min cool down (walking & stretching)
Milliken, 2003	Healthy 6±3 y post <2 h/w	12	Yes	Walking, skipping, multilateral stepping, jumping with weighted vests; DRT (all main muscle groups) with free weights, on machines; functional gymnastics	Yes Yes	3x75, S-JE (n.g.)	20 min WB AET at 50-70% HRmax. 35 min DRT: 8 exercises, 2 sets, 6-8 reps, 70-80% 1 RM. Functional gymnastics for shoulder & abdominals using elastic bands and physio-balls
Nichols, 1995	Healthy >8 y post ≥3 x 30min/w	12	Yes	Walking, DRT (all main muscle groups) on machines	Yes Yes	3x≈45-60, S-JE (82%)	5 min warm up (walking), 8 exercises, 1-3 sets, 10-12 reps, 50-80% 1RM; 30-60s rest between exercises, 60s rest between sets
Park, 2008	Healthy >8 y post ≤7 h/w M-Ex	12	No	WB AET; RT (more details n.g.)	? Yes	3x60, n.g. (n.g.)	10 min RT, 23 min of WB exercise at 65-70% HRmax (more details n.g.)
Tolomio, 2009	≥Osteopenia 2-22 y post n.g.	11	No	Walking, DRT (joint mobility, elastic bands, balls); aquatic exercise (more details n.g.)	? Yes	3x60, S-JE & 1 x HE (n.g.)	The first 11 w only in gym, then 2 times in gym & once in water. 15 min warm up (brisk walking, stretching), 2x 30 min/week RT, 1x 30 min/week water gymnastics (more details n.g.). 2 periods (6 & 10 w) training at home (more details n.g.)
Verschueren, 2004	Healthy 15±6 y post n.g.	6	Yes	Running, Stepping, DRT (leg press, leg extension)	? Yes	3x60, n.g. (presumably S-JE) (n.g.)	20 min warm up (running, stepping, or cycling) at 60-80% HRmax, DRT: 2 exercise, 1-3 set, 20-8 rep

*Presumably low, according to the additional number steps/day compared with the sedentary control group. AET: aerobic exercise training; BSE: Bone specific exercise; DRT: dynamic resistance training; GRF: Ground Reaction Forces; HE: Home Exercise; JE (joint exercise program); PS: Partially supervised; PR-INT: Progression of intensity parameters; PRint: Progression of Intensity; RPE: rate of perceived exertion; S: Supervised; WB: weight bearing; TUT: time under tension; L: low; M: moderate; H: high. **Status:** With few exceptions, we focus on osteoporosis/osteopenia and fractures. **Period of menopausal status:** In the case of no information, the mean age was reported. **Physical activity:** Predominately we used the characterization of the authors. In some cases (e.g. Martin 1993) we summarize the information given to no bone specific exercise (no BSE). **Progression:** We only consider the progression of exercise intensity. **Type of exercise:** We subsume the information given in weight-bearing (WB) vs. Non-WB aerobic exercise training (AET); resistance (RT) or dynamic resistance exercise (DRT), jumping, aquatic exercise or Tai Chi; **Site specificity:** First line: Estimated site specific of the exercise type on LWS-KMD; Second line: Estimated site specific of the exercise type on FN-KMD. **Exercise volume/week; setting, attendance:** Number of sessions per week x minutes per session (e.g. 3x 60); setting of the exercise application, i.e. either supervised group exercise (S-JE) or home exercise or exercise individually performed without supervision (HE). In parenthesis: Attendance as defined as rate of sessions performed (%). **Composition of strain/exercise parameters per session:** AET: specific exercise (i.e. walking, jogging, aerobic dance), exercise duration, exercise intensity; DRT: exercises/number of exercises; number of sets, number of repetitions; exercise intensity; jumping: type of jumps, number of jumps, intensity of jumps; Tai-Chi: style, number of forms. ⌘We did not include warm up in the table, if the authors did not report the duration and type of exercise as warm-up; cycle ergometer ≤ 5 min as warm-up, stretching and balance as cool-down have not been included in the table.

Tab. 27: Methodische Qualität der eingeschlossenen Studien

First author, year	Eligibility criteria	Random allocation	Allocation concealment	Inter group homogeneity	Blinding subjects	Blinding personnel	Blinding assessors	participation ² 85% allocation	Intention to treat analysis ¹	Between group comparison	Measure of variability	Total score
Adami, 1999	Y	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	4
Basat, 2013	Y	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	5
Bassey, 1995	Y	1	0	1	0	0	0	0	0	1	1	4
Bassey, 1998	Y	1	0	1	0	0	0	0	0	1	1	4
Bello, 2014	Y	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	5
Bemben, 2000	Y	1	0	1	0	0	0	0	0	1	1	4
Bemben, 2010	Y	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	5
Bergström, 2008	Y	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	6
Bocalini, 2009	Y	1	0	1	0	0	1	0	0	1	1	5
Bolton, 2012	Y	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	7
Brooke-Wavell, 1997	Y	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	5
Brooke-Wavell, 2001	Y	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	5
Caplan, 1993	Y	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	5
Chan, 2004	Y	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	5
Chilibeck, 2002	Y	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	8
Chilibeck, 2013	Y	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	8
Choquette, 2011	Y	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	5
Chuin, 2009	Y	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	5
de Matos, 2009	Y	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	3
Deng, 2009	Y	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	4
de Oliveira, 2019	Y	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	8
Duff, 2016	Y	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	8
Ebrahim, 1997	Y	1	1	1	0	0	1	0	1	1	1	7
Englund, 2005	Y	1	0	1	0	0	0	0	0	1	1	4
Evans, 2007	Y	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	6
Going, 2003	Y	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	5
Grove, 1992	Y	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	6
Hans, 2002	Y	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	5
Hartard, 1996	Y	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	5
Hatori, 1993	Y	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1	6
Iwamoto, 2001	Y	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	5
Jessup, 2003	Y	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	7
Karakiriou, 2011	Y	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	3
Kemmler, 1999	Y	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	5
Kemmler, 2004	Y	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	4
Kemmler, 2010	Y	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	9
Kemmler, 2013	Y	1	0	1	1	0	1	0	1	1	1	7
Kerr, 1996	Y	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	5
Kerr, 2001	Y	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	5
Kohrt, 1995	Y	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	4

Kohrt, 1997	Y	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	4
Korpelainen, 2006	Y	1	1	1	0	0	1	0	1	1	1	7
Kwon, 2008	Y	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	3
Lau, 1992	Y	1	1	1	0	0	0	0	1	0	1	5
Liu, 2015	Y	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	6
Lord, 1996	Y	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	5
Maddalozzo, 2007	Y	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	6
Marques, 2011	Y	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	6
Marques, 2011	Y	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	6
Martin, 1993	Y	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	5
Milliken, 2003	Y	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	6
Nelson, 1991	Y	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	5
Nelson, 1994	Y	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	6
Nichols, 1995	Y	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	5
Nicholson, 2015	Y	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	7
Orsatti, 2013	Y	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	7
Park, 2008	Y	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	7
Prince, 1995	Y	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	6
Pruitt, 1992	Y	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	5
Pruitt, 1995	Y	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	5
Ryan, 1998	Y	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	4
Sakai, 2010	Y	1	1	1	0	0	0	1	0	1	1	6
Silverman, 2009	Y	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	4
Sinaki, 1989	Y	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	6
Sugiyama, 2002	Y	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	3
Tartibian, 2011	Y	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	6
Tolomio, 2009	Y	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	5
Verschueren, 2003	Y	1	1	1	0	0	1	0	0	1	1	6
Wang, 2015	Y	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	6
Woo, 2007	Y	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	8
Wu, 2006	Y	1	0	1	1	0	0	0	1	1	1	6
Yamazaki, 2004	Y	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	4

¹ The point is awarded either for intention to treat analysis or when "all subjects for whom outcome measures were available received the treatment or control condition as allocated".

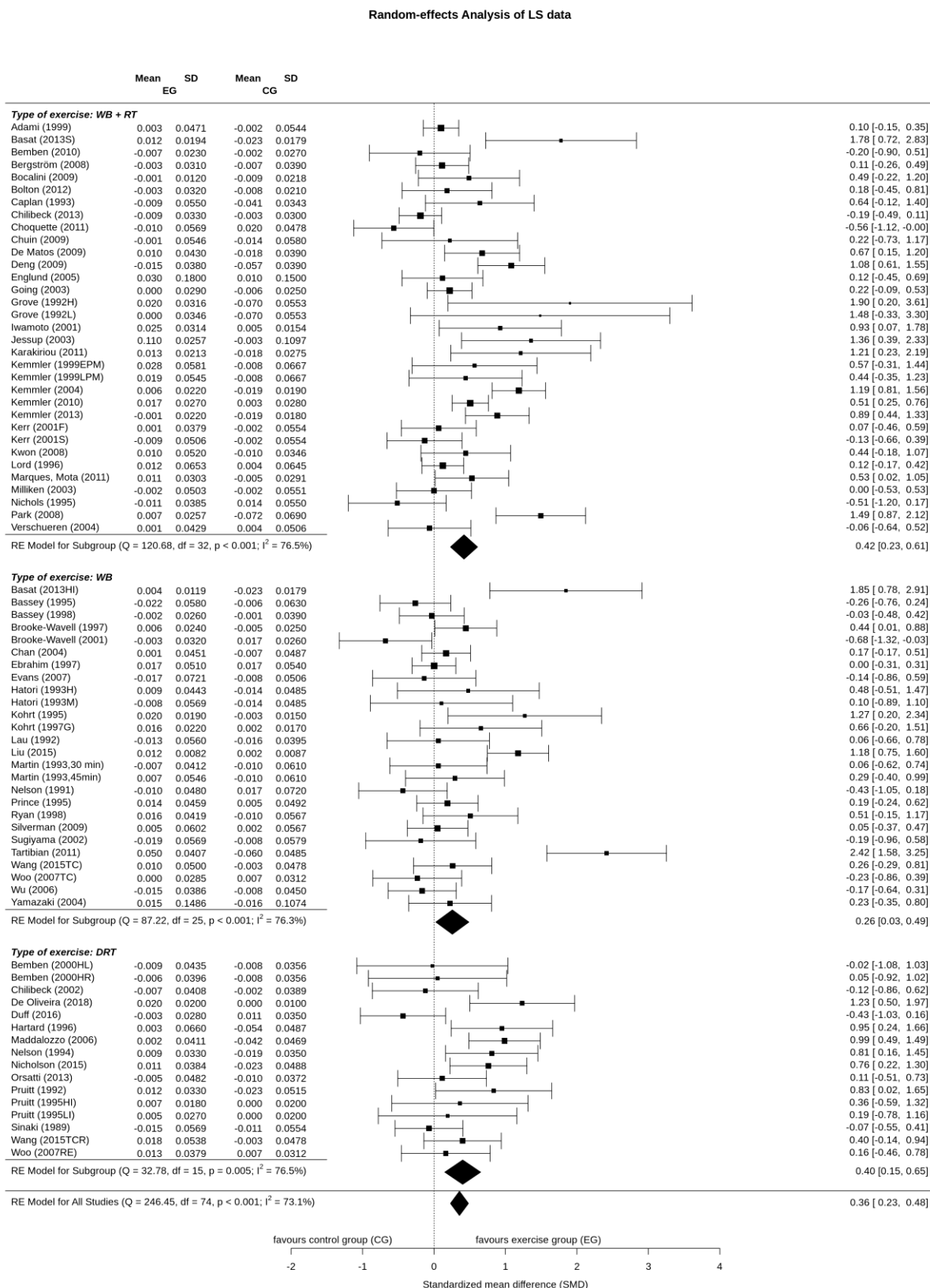


Abb. 37: Forest-plot der Studienergebnisse für die LWS-KMD kategorisiert gemäß den Trainingsinhalten WBE&DRT (oben), WBE (Mitte) und DRT (unten). Zusammengefasste standardisierte Mittelwertdifferenz (SMD) mit 95%-KI für Veränderungen in Trainings (EG) versus Kontrollgruppe (CG).

Random-effects Analysis of FN data

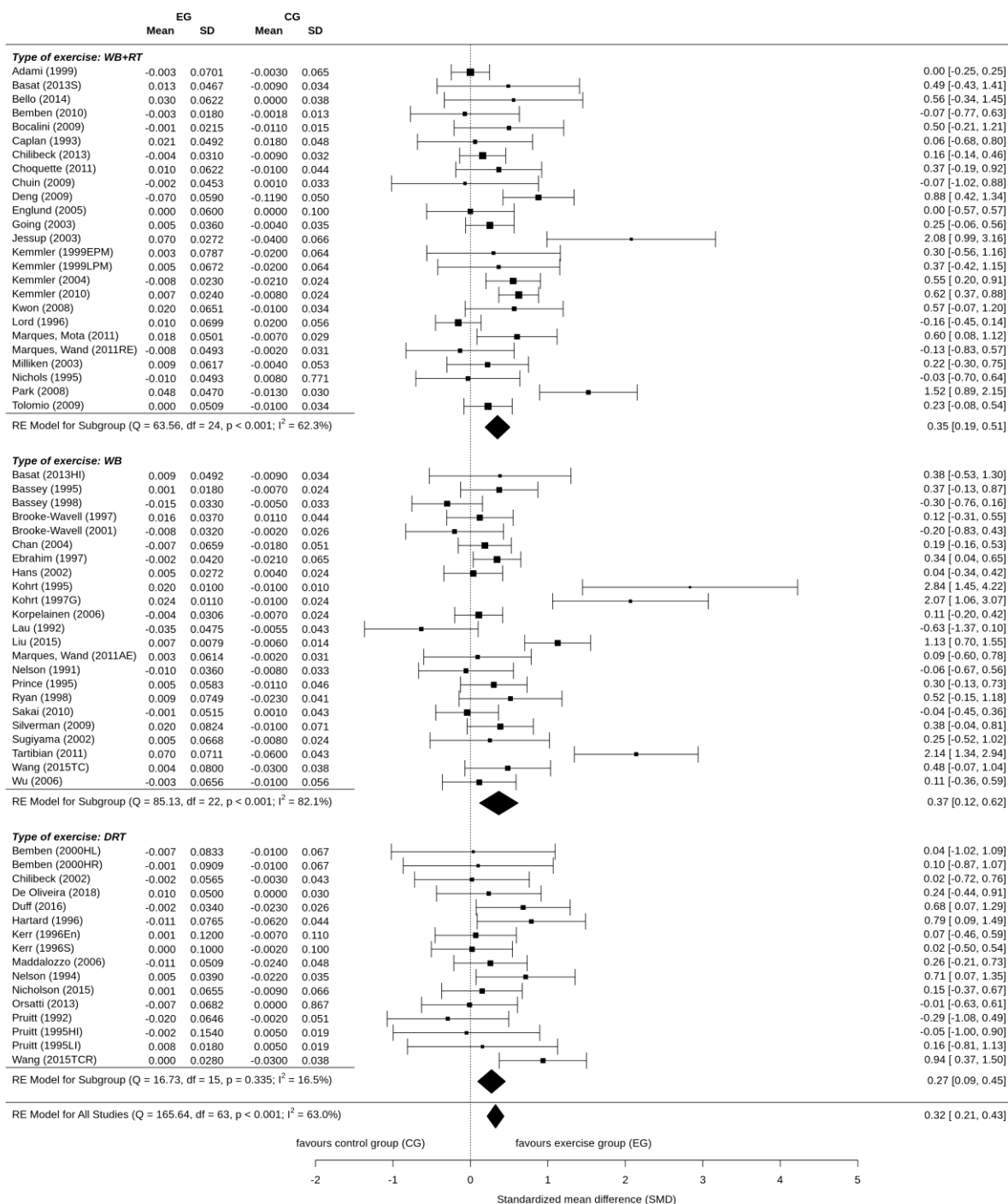


Abb. 38: Forest-plot der Studienergebnisse für die FN-KMD kategorisiert gemäß den Trainingsinhalten WBE&DRT (oben), WBE (Mitte) und DRT (unten). Zusammengefasste standardisierte Mittelwertdifferenz (SMD) mit 95%-KI für Veränderungen in Trainings- (EG) versus Kontrollgruppe (CG).

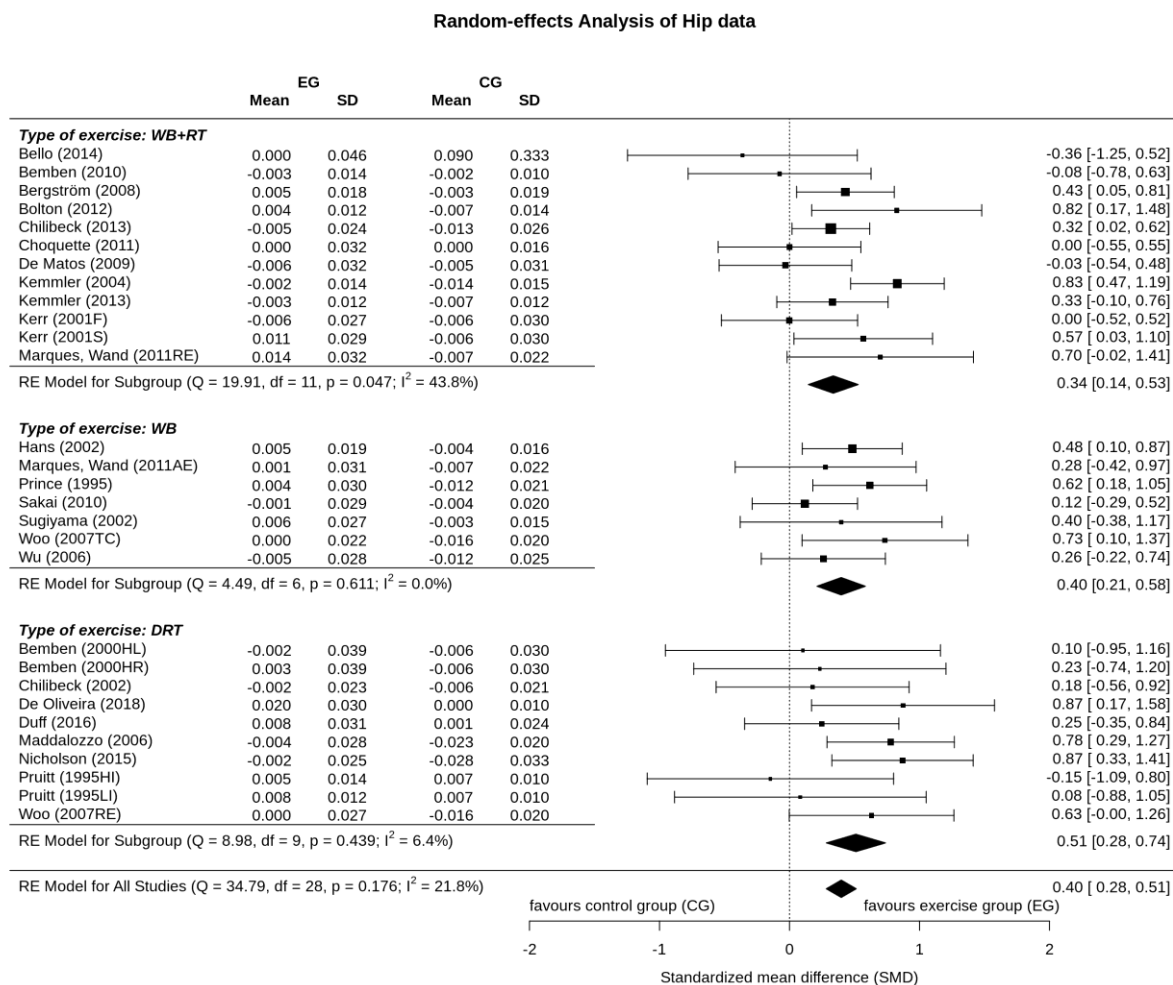


Abb. 39: Forest-plot der Studienergebnisse für die total Hip-KMD kategorisiert gemäß den Trainingsinhalten WBE&DRT (oben), WBE (Mitte) und DRT (unten). Zusammengefasste standardisierte Mittelwertdifferenz (SMD) mit 95%-KI für Veränderungen in Trainings- (EG) versus Kontrollgruppe (CG).

Trainingsinhaltliche Empfehlungen: Wassergymnastik

Tab. 28: Basale Charakteristika der eingeschlossenen Studien

First author year	Study Design	Sample size (n)	Age (years)	Bone Status	Menopausal age (years)	BMI (kg/m ²)
Aboarrage 2018 [236]	RCT	EG: 15 CG: 10	57-75	Healthy	n.g.	EG: 30±5 CG: 27±7
Borba-Pinheiro 2010 [237]	NRCT	EG: 8 CG: 7	EG: 57±7 CG: 54±4	Osteopenia, Osteoporosis	EG: 4±1 CG: 3±1	EG: 26 ^a CG: 26
Borba-Pinheiro 2012 [238]	RCT	EG: 43 CG: 41	EG: 55±6 CG: 54±5	Osteopenia, Osteoporosis	EG: 4 ± 1 CG: 4 ± 1	EG: 27 ^a CG: 27 ^a
Littrell 2004 [239]	NRCT	EG: 27 CG: 32	EG: 67±9 CG: 67±11	n.g.	EG: 21±10 CG: 18±10	EG: 29 ^a CG: 25 ^a
Moreira 2014 [240]	RCT	EG: 64 CG: 44	EG: 59±7 CG: 59±6	Normal, Osteopenia, Osteoporosis	At least 5 years	EG: 30 ^a CG: 31 ^a
Pernambuco 2013 [241]	RCT	EG: 36 CG: 31	EG: 67±4 ^c CG: 67±3	Low KMD	EG: 45±2 ^{b, c} CG: 45±2 ^{b, c}	EG: 29±3 CG: 24±3
Ramirez- Villada 2016 [234]	NRCT	EG: 17 CG: 18	EG: 60±4 ^c CG: 63±4 ^c	Healthy	n.g.	EG: 28±3 ^c CG: 26±3 ^c
Rotstein 2008 [242]	NRCT	EG: 25 CG: 10	EG: 55±4 CG: 56±4	Healthy	EG: 5±6 CG: 6±4	EG: 29 ^a CG: 27 ^a
Tsukahara 1994 [243]	NRCT	EG: 15 CG: 30	EG: 62±4 CG: 60±2	Healthy	EG: 51±3 ^b CG: 51±3 ^b	EG: 23±1 CG: 23±2
Wochna 2019 [244]	NRCT	EG: 9 CG: 9	EG: 58±3 CG: 60±3	Healthy	EG: 10±4 CG: 12±6	EG: 27±3 CG: 29±4
Wu 2000 [235]	NRCT	EG: 22 CG: 19	EG: 60±6 CG: 59±5	n.g.	EG: 50±3 ^b CG: 51±4 ^b	EG: 23±2 CG: 22±2

^a Calculated based on reported study results on body height and mass, ^b age at menopause, ^c data of participants that finished the study. CG: control group; EG: exercise group; n.g.: not given; NRCT: non-randomized controlled trial; RCT: randomized controlled trial.

Tab. 29: Trainingscharakterika der eingeschlossenen Untersuchungen

First Autor Year	Intervention length (mo.)	Training status	Exercise/strain composition Exercise frequency x duration of the session (in min/week), type of exercise, sets/repetitions or duration of the exercise, exercise intensity, movement velocity	Atten- dence rate (%)	Loss to follow up (%)
Aboarrage 2018 [236]	6	Specifically untrained for 3 month	Water-based jump exercise (water depth n.g.): 3x 30 min/w.: 5 min warm-up/cool down with stretching and free movements, jump-based exercise (single leg, ankle hops, tuck jumps, jumps with hip abduction and adduction) with 20 sets of 30 s with high intensity ("all out") and 30 s of passive recovery between the bouts; GRF n.g.	n.g.	0
Borba-Pinheiro 2010 [237]	12	Specifically untrained for 12 month	Water-based functional gymnastic and jumping (water depth 145 cm): 3x 60 min/w.: bimonthly periodized resistance exercises, 8-12 exercises (balance body displacements, shoulder adduction/abduction, jumps with knee extension, knee flexion, elbow flexion/-extension, squats), 3 series of 6-20 reps at RPE 14-16 Borg CR20; all participants under Alendronate-therapy	n.g.	n.g.
Borba-Pinheiro 2012 [238]	12	n.g.	Water-based functional gymnastic and jumping (145 cm): 3x 60 min/w.: bimonthly periodized resistance exercises, 8-12 exercises (balance body displacements, shoulder adduction/abduction, jumps with knee extension, knee flexion, elbow flexion/-extension, squats), 3 series of 6-20 reps at RPE 14-16 Borg CR20; all participants under Alendronate-therapy	n.g.	n.g.
Littrell 2004 [239]	12	Specifically untrained	Shallow water exercise (110-137 cm): 3x 45 min/w.; warm up/cool down (walking/jogging, stretching), aerobics (jumping jacks, tuck jumps, jogging, rocks, leg curls, cross-country skis), one/two leg jumps, heel drops, muscle fitness/stability (upper body and trunk exercises), fall recovery/balance exercise; exercise intensity n.g.	93	25
Morreira 2014[240]	6	sedentary	Aquatic exercise (110-130 cm): 3x 50-60 min/w. with progressive exercise intensity: strength and power training: 2 -5 sets 30-10 s with maximum movement speed at RPE 6-9 Borg CR10 with 60-100s breaks; 16-7 min continuous (?) cardiorespiratory exercise at RPE 6-9 Borg CR10; 10 min of warm up/cool down	93	8
Pernambuco 2013 [241]	8	No regular exercise last 6 month	Aquatic aerobic (140 cm): 2x 50 min/w. warm up with stretching and leg and of arms movements; 5 sequences of 7 min: Stationary running, ski movements with trunk rotations, elbow and leg flexion/rotation, with and without barbells, jumps with hip hyperextension, plantar flexion, isometric contraction of the gluteus/quadriceps Exercise intensity was not reported	n.g.	14
Ramirez- Villada 2016 [234]	6	2-3 exercise sessions/w.	Aquatic exercise with explosive movements (water depth n.g.): 3x 90 min/w. vertical and horizontal jumping, short sprints, 3 exercises with 2-3 sets of 8 reps each, 25-30 min of aerobic dance, exercise intensity n.g.	77	12

Rotstein 2008 [242]	7	n.g.	Aquatic exercise (chest level): 3x 60 min; 10 min warm up, 20 min aerobic exercise 12-16 Borg CR20 [826], 20 min strengthening and “bone loading” using devices to increase water resistance and elastic bands, four movement patterns: compression, twisting, stretching/extension, bending/flexion; intensity n.g. 10 min of static and dynamic stretching	n.g.	20
Tsukahara 1994 [243]	12	n.g.	Aquatic aerobic exercise (water depth n.g.): $\geq 1 \times 45$ min/week; 10 min warm-up, 20 min of aerobic exercise and deep breathing (?), 10 min of swimming at ≈ 120 beats/min	n.a.	n.g.
Wohna 2019 [244]	6	No systematic physical activity	Aquatic fitness (deep water: neck line): 2x 45 min/week with equipment that increased the water resistance; predominately movements to music in a vertical position; exercise intensity n.g.	n.g.	n.g.
Wu 2000 [235]	24	n.g.	Aquatic exercise, swimming (effectively) 1.5x 60 min/week: 1000 m swimming (5-6 x 150-200 m breaststroke, backstroke, crawl), water gymnastic, stretching, water walking; details n.g.	n.a.	0

Tab. 30: Methodische Qualität der Studien gemäß PEDro [33] und TESTEX[34]

	PEDro-Criteria												Additional TESTEX Criteria ^a					
Author, year	Eligibility criteria	Random allocation	Allocation concealment	Inter group homogeneity	Blinding subjects	Blinding personnel	Blinding assessors	participation≥ 85% allocation	Intention to treat analysis ^b	Between group comparison	Measure of variability	Total score PEDro	Adverse effects reported	Attendance reported	Activity monitoring in control groups	Relative exercise intensity constant	Exercise volume & energy expended	Total score TESTEX
Aboarrage et al. 2018	Y	+	-	+	-	-	+	+	+	+	+	7	+	-	-	-	-	10
Borba-Pinheiro et al. 2010	Y	-	-	-	-	-	-	+	-	+	-	2	-	-	-	+	+	7 ^c
Borba-Pinheiro et al. 2012	Y	+	-	-	-	-	-	-	-	+	+	3	-	-	-	+	+	7
Littrell et al. 2004	Y	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	2	+	+	+	-	-	7
Moreira et al. 2014	Y	+	-	+	-	-	-	+	-	+	+	5	+	+	+	+	+	12
Pernambuco et al. 2012	Y	+	+	+	-	-	+	-	-	+	+	6	-	-	-	-	-	8
Ramirez-Villada et al. 2015	Y	-	-	+	-	-	+	-	-	+	+	4	+	+	-	-	+	9
Rotstein et al. 2008	Y	-	-	+	-	-	-	+	-	+	+	4	-	-	-	+	+	8
Tsukahara et al. 1993	Y	-	-	+	-	-	-	-	-	-	+	2	-	-	-	-	-	3 ^c
Wochna et al. 2019	Y	-	-	+	-	-	-	-	-	+	+	3	-	-	-	-	-	6
Wu et al. 2000	Y	-	-	+	-	-	-	+	+	+	+	5	-	-	+	-	-	8

^a TESTEX awards one point for listing the eligibility criteria and, also in contrast to PEDro, a further point for the between group comparison of at least one secondary outcome

^b or all subjects received treatment or control as allocated (...or were retrospectively analyzed)

^c TESTEX awards one point if all outcomes are reported with point estimates, in contrast to PEDro which only awards one point if both point estimates and measures of variability

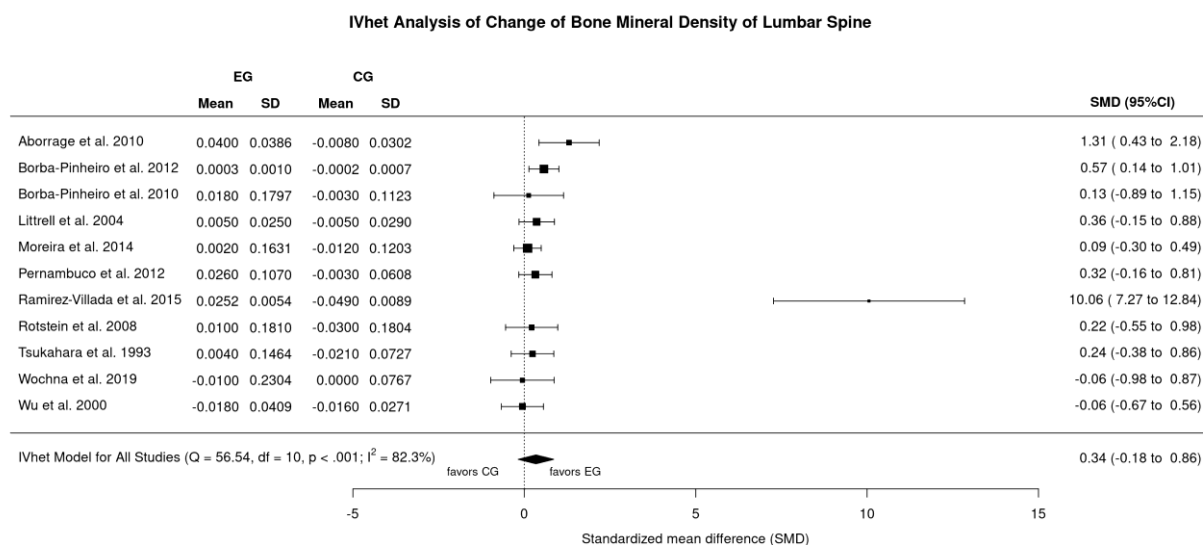
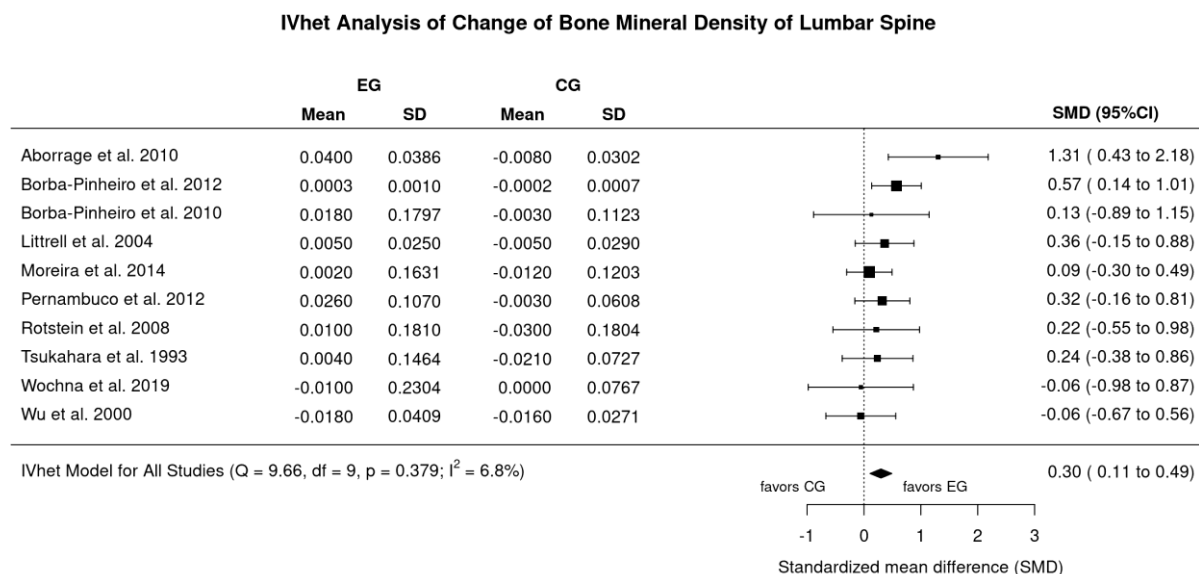


Abb. 40: Forest-plot der Studienergebnisse für die LWS-KMD mit (oben) und ohne (unten) einer Untersuchung mit sehr hohen Effekten [234]. Standardisierte Mittelwertdifferenz (SMD) mit 95%-KI für Veränderungen in der Wassergymnastik- versus Kontrollgruppe



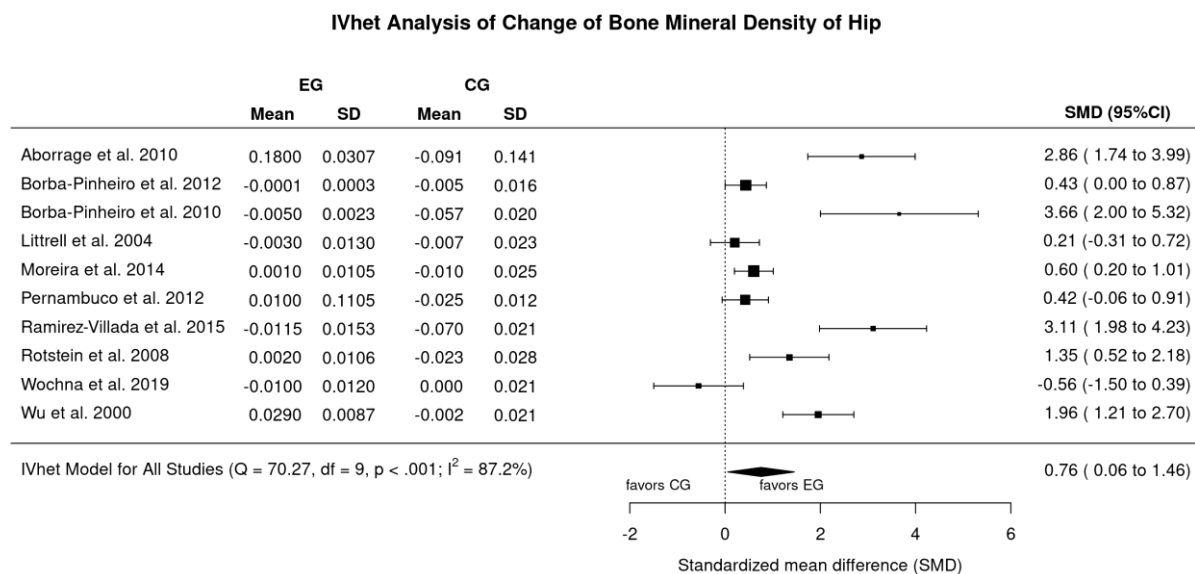


Abb. 41: Forest-plot der Studienergebnisse für die Schenkelhals-KMD. Standardisierte Mittelwertdifferenz (SMD) mit 95%-KI für Veränderungen in der Wassergymnastik- versus Kontrollgruppe

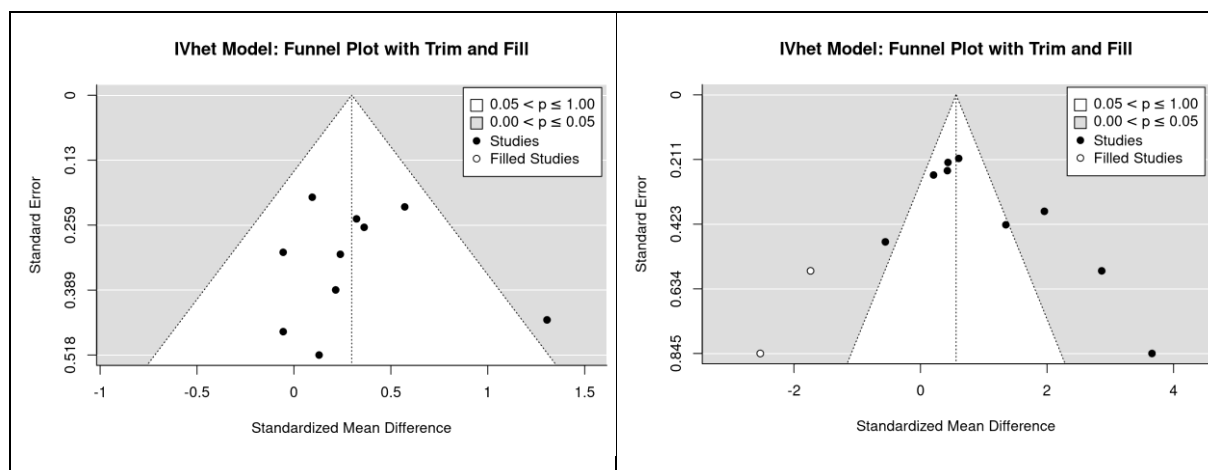


Abb. 42: Trichterdiagramme der KMD-Studienergebnisse an LWS (linke Grafik) und FN (rechte Grafik): Wassergymnastik- versus Kontrollgruppe.

Trainingsinhaltliche Empfehlung: Trainingsmittel im Krafttraining

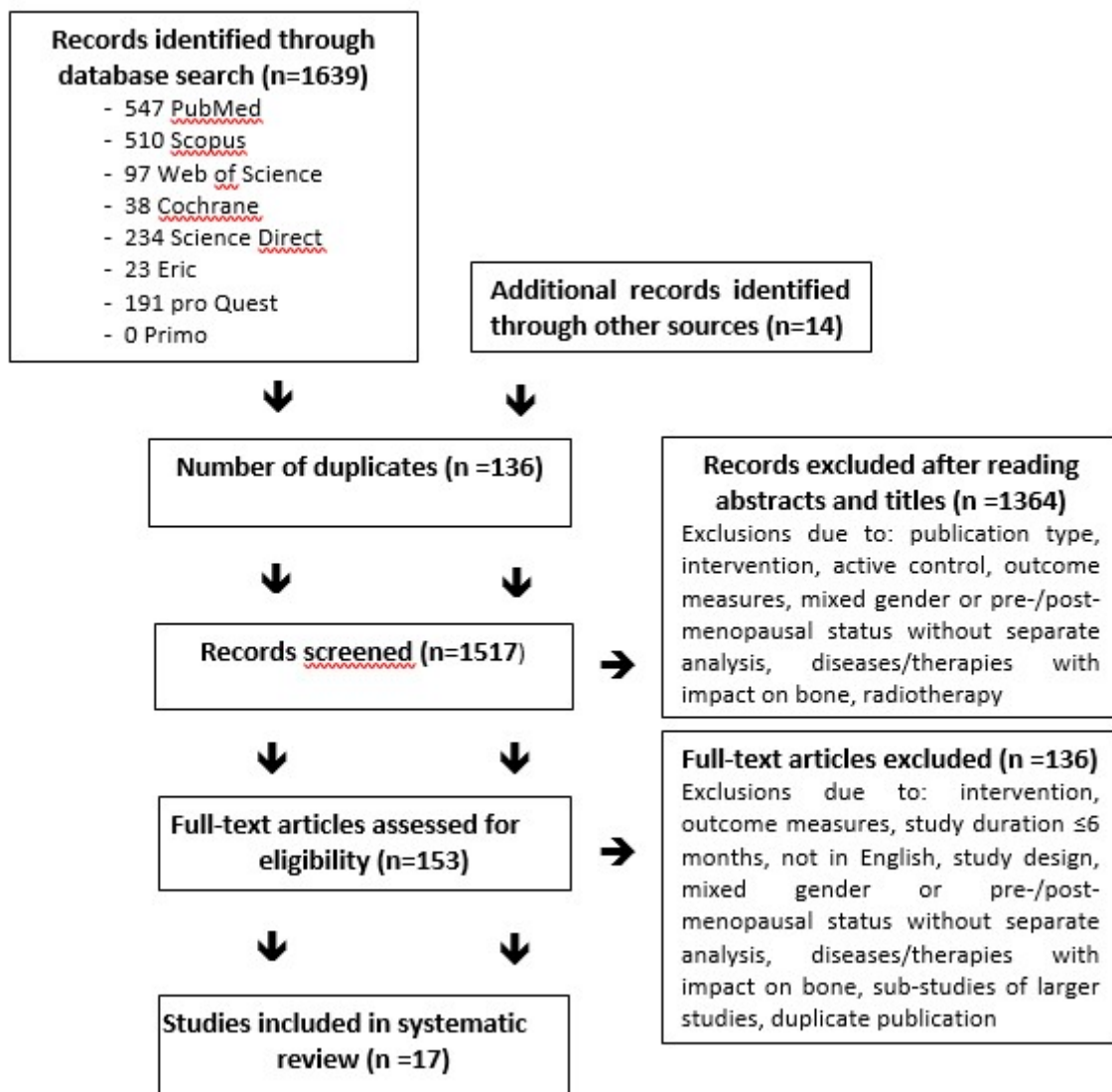


Abb. 43: Flussdiagramm des Suchprozesses „dynamisches Krafttraining und Veränderung der Knochendichte bei postmenopausalen Frauen“[37].

Tab. 31: Trainingscharakteristika der eingeschlossenen Studien mit dynamischen Krafttraining

Autor, year	Health and exercise status	Length months	PR-INT	Type of exercise, amount of exercises, methods	Site specificity	Volume in min/w.; setting; (attendance rate)	Exercise-/strain composition
Bemben, 2000 Low intensity	Healthy, no RT	6	yes	DRT (most main muscle groups) on machines	LS: Yes TH: Yes	3x 60; S-JE; (93%)	8 exercises, 3 sets, 16 reps, 40% 1RM
Bemben, 2000 High intensity	Healthy, no RT	6	yes	DRT (most main muscle groups) on machines	LS: Yes TH: Yes	3x 60; S-JE; (87%)	8 exercises, 3 sets, 8 reps, 80% 1RM
Bemben, 2010	Healthy, no RT	8	No	DRT (most main muscle groups) on machines	LS: Yes TH: Yes	3x 60; S-JE(92%)	8 exercises, 3 sets, 10 reps, 80% 1RM
Chilibeck, 2002	Healthy, no BSE	12	Yes	DRT (all main muscle groups) on machines	LS: Yes TH: Yes	3x RT; S-JE; (78%)	12 exercises, 2 sets, 8-10 reps, $\approx$ 70-80% 1RM ("a weight that could be lifted comfortably for 10 reps")
Campos de Oliveira, 2018	Healthy, Sed/HA	6	Yes	Pilates (strengthening and flexibility; all mains muscle groups) on Pilates "devices".	LS: Yes TH: Yes	3x 60; S-JE; (93%)	21 exercises (strengthening and flexibility) , 1 set, 10 reps, RPE 5-6 at Borg CR10
Duff, 2016	Healthy, no RT	9	yes	DRT (all main muscle groups) on machines and with free weights	LS: Yes TH: Yes	3x RT; S-JE; (n.g.)	12 exercises, 2 sets of 8-12 reps to muscular fatigue
Hartard, 1996	Osteopenia, <1 h week	6	yes	DRT (all main muscle groups) on machines, stretching	LS: Yes TH: Yes	2x $\approx$ 60; S-JE; n.g.	14 exercises, 2 sets, 8-12 reps to "marked fatigue" ($\approx$ 70% 1RM), 3-4s per reps
Kerr, 1996 Low intensity	Healthy, no RT	12	Yes	Unilateral DRT (randomized allocation of the upper or hip/lower limb to exercise or control) on machines or free weights.	LS: ? TH: yes	3x $\approx$ 120; S-JE; (82%)	12 exercises; 3 sets, 20 RM ($\approx$ 60-65% 1RM), 2-3 min rest between sets
Kerr, 1996 High intensity	Healthy, no RT	12	Yes	Unilateral DRT (see above) on machines or free weights.	LS: ? TH: yes	3x $\approx$ 100 S-JE; (82%)	12 exercises; 3 sets, 8 RM ($\approx$ 75-80% 1RM), 2-3 min rest between sets
Kohrt, 1997	Healthy, Sed/HA	11	yes	DRT (most main muscle groups) on machines and with free weights, rowing	LS: Yes TH: Yes	5x 45-50; n.g. (presumably S-JE); ($\approx$ 70%)	DRT: 2x week, 8 exercises, 2-3 sets, 8-12 reps "to fatigue" ($\approx$ 70-80% 1RM) and rowing: 3x week, 2-3 sets x 10 min at 80-85% HRmax
Maddalozzo, 2007	Healthy, n.g.	12	Yes	DRT (back squat, deadlifts) with free weights; subordinate: exercises that focus on alignment, flexibility, posture, abdominal strength	LS: Yes TH: Yes	2x 50; S-JE; (85%)	2 exercises, 2 warm-ups sets, 10-12 reps, 50% 1RM; 3 sets, 8-12 reps, 60-75% 1RM; TUT: 1-2s concentric – 0 s isometric -2-3s eccentric
Nelson, 1994	Healthy, Sed/HA	12	Yes	DRT ("most" main muscle groups) on machines.	LS: Yes TH: Yes	2x 45; S-JE; (88%)	5 exercises, 3 sets, 8 reps, 80% 1RM; TUT-6-9 s/rep; 3 s rest between reps, 90-120 s rest between sets
Nicholson, 2015	Healthy, no RT	6	yes	DRT (all main muscle groups): „Body Pump Release 83“ (i.e. barbell exercises with (very) low intensity)	LS: Yes TH: Yes	2x 50, S-JE; (89%)	10x $\approx$ 4-6 min blocks of exercises for all main muscle groups (21 exercises in total); up to 108 reps (squats), $\leq$ 30% 1RM

Orsatti, 2013	Healthy, Sed/HA	9	yes	DRT (all main muscle groups) on machines and with free weights	LS: Yes TH: Yes	3x 50-60, S-JE; (n.g.)	8 exercises 3 sets at 8-12 RM; 3 sets, 20-30 reps for trunk flexion and calf raises ; 1-2 min rest
Pruitt, 1992	Healthy, no BSE	9	yes	DRT (all main muscle groups) on machines and with free weights	LS: Yes TH: Yes	3x 60; S-JE; (83%)	11 exercises, 1 set at 10 RM (no more details given)
Pruitt, 1995 High intensity	Healthy no RT	12	yes	DRT (all main muscle groups) on machines	LS: Yes TH: Yes	3x 60; S-JE; (79%)	10 exercises , 1 warm up set, 14 reps, 40% and 2 sets, 7 reps, 80% 1RM
Pruitt, 1995 Low intensity	Healthy No RT	12	yes	DRT (all main muscle groups) on machines	LS: Yes TH: Yes	3x 60; S-JE; (79%)	10 exercises , 3 sets, 14 reps, 40% 1RM
Rhodes, 2000	Healthy, "no organized sports"	12	yes	DRT (all main muscle groups) on machines	LS: Yes TH: Yes	3x 60; PS-IE; (86%)	≥6 exercises (n.g. in detail), 3 sets, 8 reps, ≈75% 1RM, TUT: 2-3s concentric – 3-4s eccentric movement/rep applied in a circuit mode.
Sinaki, 1989	Healthy, n.g.	24	No	DRT (back strengthening exercise in a prone position using a back pack; ≈hyperextensions) with a free weight	LS: Yes -----	5x ≈1-2 min; HE; n.g.	One back strengthening exercise, 1 set, 10 reps, with a weight „equivalent to 30% of the maximum isometric back muscle strength in pounds (maximum 23 kg)
Woo, 2007	Healthy, no RT	12	No	DRT (arm-lifting, hip-abduction, heel raise, hip-flexion,-extension, squat) using resistance bands	LS: ? TH: Yes	3x ≈15 min; (n.g.); (76%)	6 exercises, 1 set, 30 reps with an resistance band "of medium strength" (no more information given).

BSE: bone specific exercise, Sed/HA: sedentary/habitually active PrInt: Progression of exercise intensity; BSE: Bone specific exercise; DRT: dynamic resistance exercise; S: Supervised; PS: Partially supervised; JE: Joint exercise program; HE: Home exercise program; RPE: Rate of perceived exertion; TUT: Time under tension. **Notes:** *Health status:* We focused on reported osteoporosis/osteopenia and fractures only. Otherwise, women were listed as "healthy". *Exercise status:* we mainly used the characterization of the authors. In some cases, we summarize the information given as "no bone specific exercise". *Progression:* We only considered the progression of exercise intensity during the intervention. *Site specificity:* Estimated site specificity of the exercise to address LS- or hip-KMD. *Exercise volume/week, setting, attendance:* Number of sessions per week x minutes per session (e.g. 3x 60). Setting of the exercise session, i.e. either supervised group (S-JE), partially supervised individual (PS-IE) or home exercise / exercise individually performed without supervision (HE). Attendance defined as rate of sessions performed in relation to total exercise sessions (%). *Composition of strain/exercise variables per session:* number of exercises, number of sets, number of repetitions; exercise intensity, set endpoint (e.g. ... "to failure"), time under tension per rep/movement velocity, rest pauses between sets.

Trainingsinhaltliche Empfehlung: Belastungskomponenten: Einfluss der Trainingsfrequenz

Tab. 32: Basale Studien-/Teilnehmercharakteristika der eingeschlossenen Studien

First Author, year	Health status Gender [n]	Training frequency [ts/week]	Initial sample size [n]	Drop-Out [%]	Mean age [years]	Body mass [kg]	Height [cm]	Medication use
Bailey, 2010	Healthy women	2	21	24	31 ± 7	58 ± 8	164 ± 5	none
		4	22	41	32 ± 10	60 ± 10	164 ± 7	none
		7	22	27	35 ± 8	61 ± 10	163 ± 8	none
Bemben, 2011 ^{1,2}	Healthy women: n=98 men: n=62	2HI	39	21	65 ± 1 64 ± 0	w: 70 ± 2 m: 84 ± 2	w: 163 ± 1 m: 177 ± 1	HRT: 75% ²
		2LI	41	17				
		3HI	34	29				
		3LI	46	24				
Borba-Pinheiro, 2016	Osteopenia/ Osteoporosis, women	2	20	20	61 ± 8	64 ± 7	149 ± 6	Alendronate: 55%
		3	20	0	56 ± 5	57 ± 6	149 ± 3	Alendronate: 35%
Cussler, 2005 ^{2,3,4}	Healthy women	≈1.0	48	n.a.	56 ± 4	69 ± 11	163 ± 7	HRT: 63%
		≈2.1	48	n.a.				HRT: 77%
Daly 2021 ³	Healthy men	1 - <2	20	n.a.	61 ± 7	82 ± 12	174 ± 6	none
		≥2	54	n.a.				
Kemmler, 2014 ³	Osteopenia, women	1 - <2	16	n.a.	54 ± 4	65 ± 9	161 ± 8	none
		≥2	25	n.a.	55 ± 3	68 ± 10	165 ± 6	none
Kemmler, 2013 ³	Healthy women	1 - <2	36	n.a.	70 ± 4	70 ± 13	163 ± 7	none
		≥2	79	n.a.	69 ± 4	67 ± 10	162 ± 6	none

¹values are MV±SE; ²distribution per group not given; ³retrospective analysis; n=52 for vLS as assessed by QCT;

⁴baseline data listed by Going et al. HI: high intensity exercise group; LI: low intensity exercise group, n.a.: not applicable, only "finishers" were considered for the retrospective assignment to the low vs. high frequency group.

Health Status: We focus on osteoporosis/osteopenia and fractures reported only. Otherwise, subjects were considered as "healthy". Table contains only exercise groups.

Tab. 33: Trainingscharakteristika der eingeschlossenen Studien/Studienarme hoher vs. niedriger Trainingsfrequenz

First author, year	Prestudy exercise status	Design, Supervision Duration	Type of exercise	Exercise composition per session	Exercise Frequency (sessions/week)	Progression of intensity	Attendance	Site Specificity of exercise	KMD Region of Interest
Bailey 2010	no HI or WB in the last year	RCT, NS-IE, 6 month	Multidirectional hops (unilateral)	5 sets of 10 different hops without shoes, peak GRF: 2-4x body mass, 15 s of rest between the sets	LF: 2 s/week HF: 4 s/week very HF: 7 s/w.	yes yes yes	84% 90% 86%	yes	hip
Bemben 2011	no DRT in the last year	NRT, S-JE, 10 months	DRT (all main muscle groups) with machines	12 exercises, 3 sets of 16 reps (LI) at 40% 1RM	LF: 2x week HF: 3x week	yes yes	80% 74%	yes yes	LS, hip
				12 exercises, 3 sets of 8 reps (HI) at 80% 1RM	LF: 2x week HF: 3x week	yes yes	79% 70%		
Borba-Pinheiro 2016	no regular exercise in the last year	RCT, S-JE, 13 months	DRT (most main muscle groups) with machines	9 exercises (predominately for lower extremities), periodized protocol, 3 sets at 60-90% 10RM	LF: 2x week HF: 3x week	yes yes	81% 86%	yes yes	LS, hip
Cussler 2005¹	<2h/week HI or WB	n.a. S-JE ² 48 months	DRT (all main muscle groups) on machines and with free weights	≥8 exercises, 3 sets with 6 or 8 reps at 70% or 80% 1RM	LF: ≈1 s/week HF: ≈2 s/week	yes yes	n.a. n.a.	yes yes	LS, hip
Daly 2021¹	no DRT in the last 6 months	n.a. S-JE, 18 month	DRT (major muscle groups) on machines and with free weights and vertical, multilateral jumps	3 sessions/week, periodized RT with up to 85% 1RM and explosive velocity during the concentric phase and 2-3 sets of different jumps with 20 reps with peak GRF of 1.5-9.7x body mass	LF: 1 -<2 s/week HF: ≥2 s/week	yes yes	n.a. n.a.	yes yes	LS, hip
Kemmler 2013¹	No regular exercise in the last 2 years	n.a. S-JE (2x) and IE (2x) 18 months	Mixed moderate-high impact exercise and DRT (all main muscle groups), free weights, functional gymnastics	Low- and high impact aerobic dance (15-20 min, GRF: up to 3x body mass), 13-18 functional exercises, periodized protocol with 1-2 sets, 10-15 reps at RM to RM -2 reps	LF: <2 s/week HF: >2 s/week	yes yes	n.a. n.a.	yes yes	LS, hip
Kemmler 2014¹	No athletic history in the last 10 years	n.a. S-JE (2x) and IE (2x) 12 years	Mixed high impact WB and DRT (all main muscle groups) on machines, free weights, functional gymnastics	High impact aerobic dance (15-20 min), rope skipping (4x 20 different hops); 9-13 exercises, periodized protocol with 1-3 sets, 4-12 reps at 70-92.5% 1RM and functional gymnastics with high effort.	LF: <2 s/week HF: >2 s/week	yes yes	n.a. n.a.	yes yes	LS, hip

¹ Retrospectively analyzed for training frequency; ² at least during year one (see Going et al. 2003)

DRT: dynamic resistance training; GRF: Ground Reaction Forces; HF: High (training) frequency; HI: High Impact exercise, JE (joint exercise program); LF: low (exercise) frequency; n.a.: not applicable (due to retrospective classification); NRT: non-randomized trial; NS-IE: non-supervised individual exercise; RM: repetition maximum; RCT: randomized controlled trial (i.e. control group implemented); RT: randomized trial; S: Supervised; WB: weight bearing exercise, **Note:** Site specificity: First line: Estimated site specific of the exercise type on LWS-KMD; Second line: Estimated site specific of the exercise type on FN-KMD.

Tab. 34: Methodische Qualität der eingeschlossenen Studien

Author, year	PEDro Criteria												Additional TESTEX Criteria					
	Eligibility criteria	Random allocation	Allocation concealment	Inter group homogeneity	Blinding subjects	Blinding personnel	Blinding assessors	participation≥ 85% allocation	Intention to treat analysis	Between group comparison	Measure of variability	Total score PEDro	Adverse effects reported	Attendance reported	Activity monitoring in control groups	Relative exercise intensity constant	Exercise volume & energy expended	Total score TESTEX
Bailey et al. 2010	Yes	+	-	+	-	-	-	-	-	+	+	4	-	+	-	+	+	9
Bemben et al. 2011	Yes	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	3	-	+	+	+	+	8
Borba-Pinero et al. 2016	Yes	+	-	+	-	-	+	+	-	+	+	6	-	+	-	+	+	11
Cussler et al. 2005	Yes	n.a.	n.a.	-	-	-	-	n.a.	n.a.	+	+	2	-	+	-	+	+	7
Daly et al. 2021	Yes	n.a.	n.a.	+	-	-	-	n.a.	n.a.	+	+	3	+	+	-	+	+	8
Kemmler et al. 2013	Yes	n.a.	n.a.	+	-	-	+	n.a.	n.a.	+	+	4	-	+	+	+	+	9
Kemmler et al. 2014	Yes	n.a.	n.a.	+	-	-	+	n.a.	n.a.	+	+	4	-	+	+	+	+	9

Random-effects Analysis of Change of Bone Mineral Density of Lumbar Spine

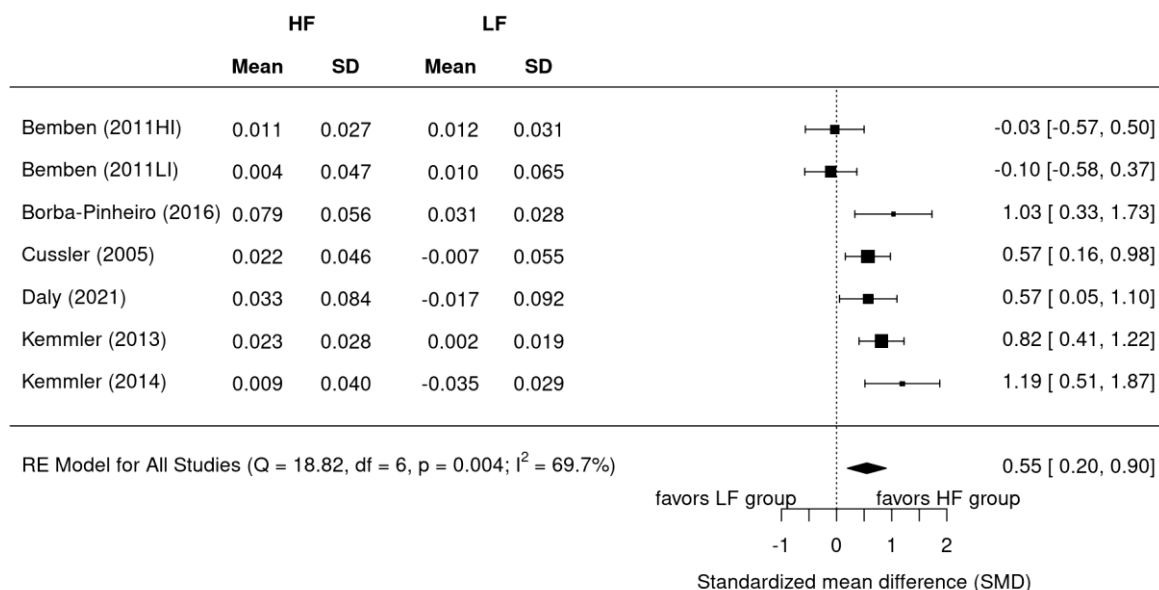


Abb. 44: Forest-plot der Studienergebnisse für die LWS-KMD: Hohe (HF) versus niedrige (LF) Trainingshäufigkeit. Zusammengefasste standardisierte Mittelwertdifferenz (SMD) mit 95%-KI für Veränderungen in Gruppe mit hoher (HF) versus niedriger Trainingshäufigkeit (LF)

Random-effects Analysis of Change of Bone Mineral Density of Femoral Neck

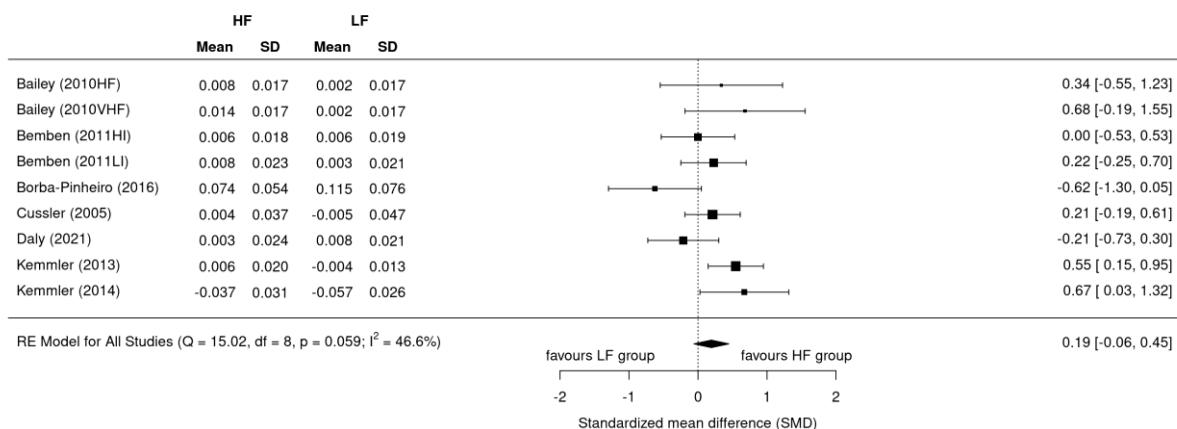


Abb. 45: Forest-plot der Studienergebnisse für die FN-KMD: Hohe (HF) versus niedrige (LF) Trainingshäufigkeit. Standardisierte Mittelwertdifferenz (SMD) mit 95%-KI für Veränderungen in Gruppe mit hoher (HF) versus niedriger Trainingshäufigkeit (LF)

Trainingshäufigkeit: Modulierender Effekt der Interventionsdauer

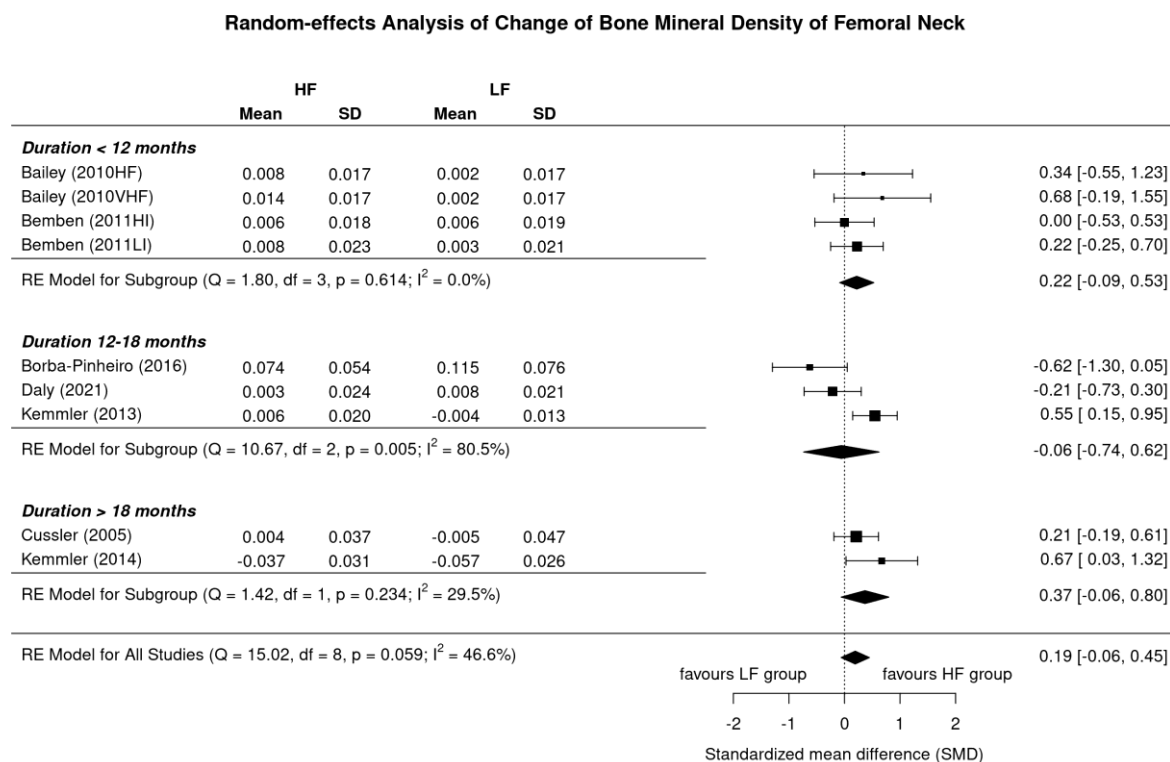
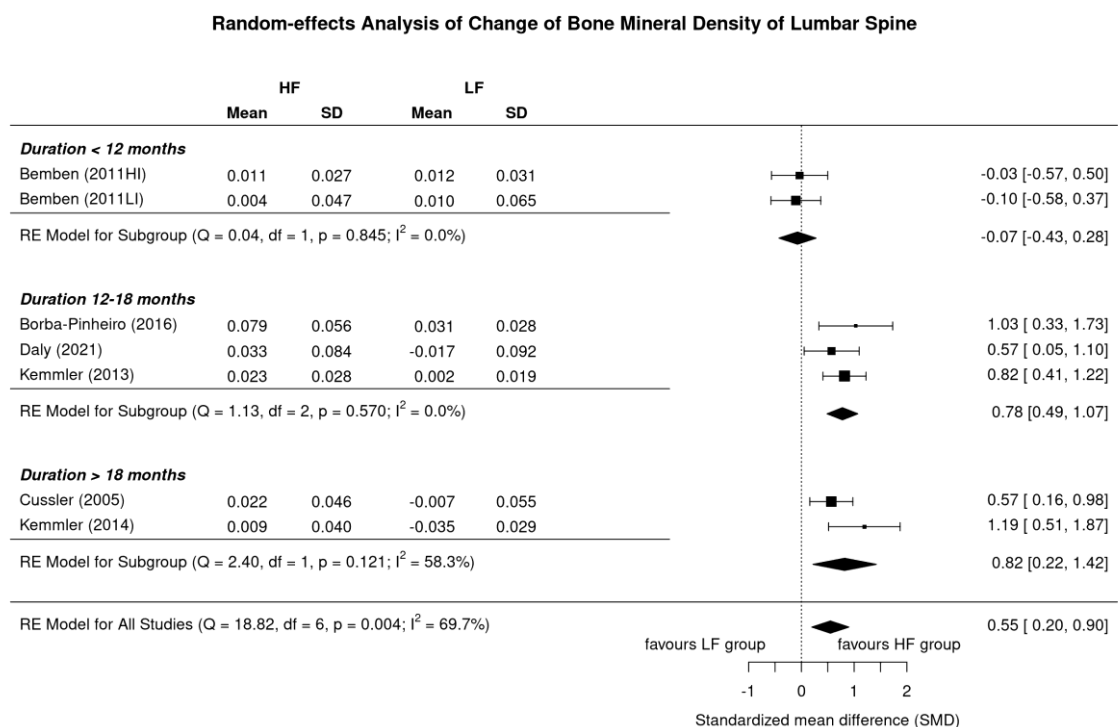


Abb. 46: Modifizierender Effekt unterschiedlicher Interventionsdauer auf den Effekt der Trainingsfrequenz auf die Knochendichte an LWS (oben) und FN (unten).

Trainingshäufigkeit: Modulierender Effekt des Trainingsinhaltes

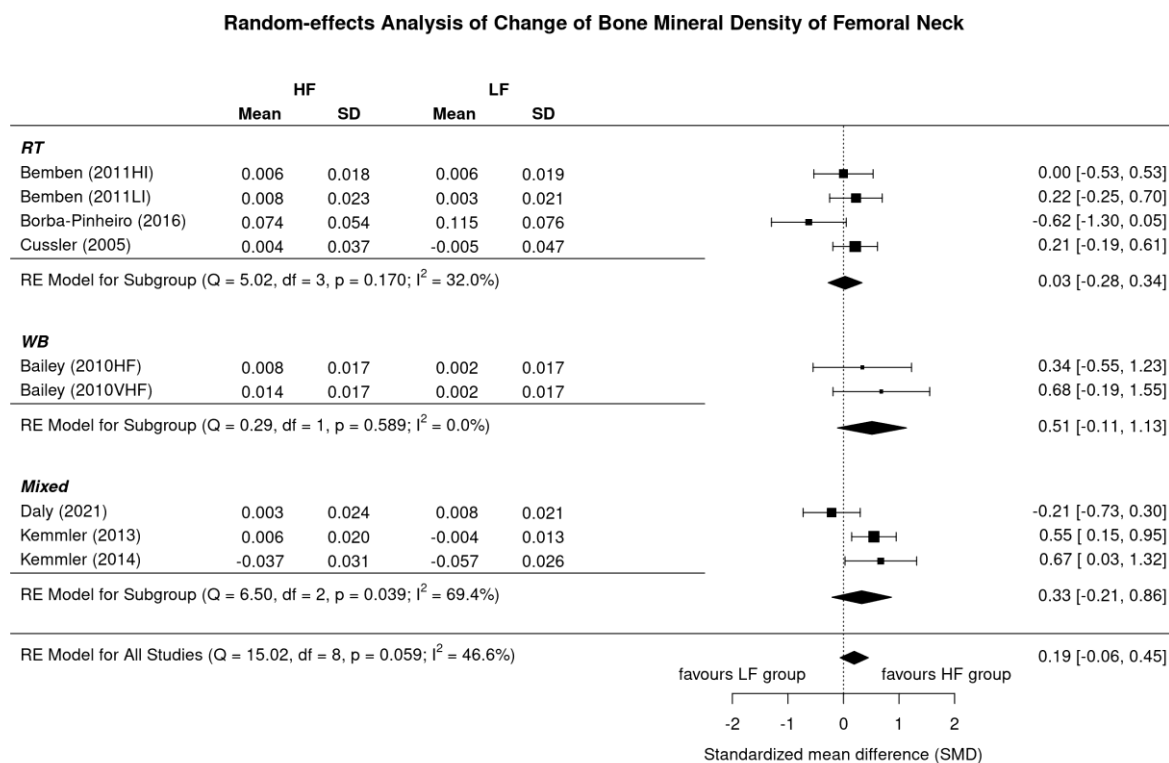
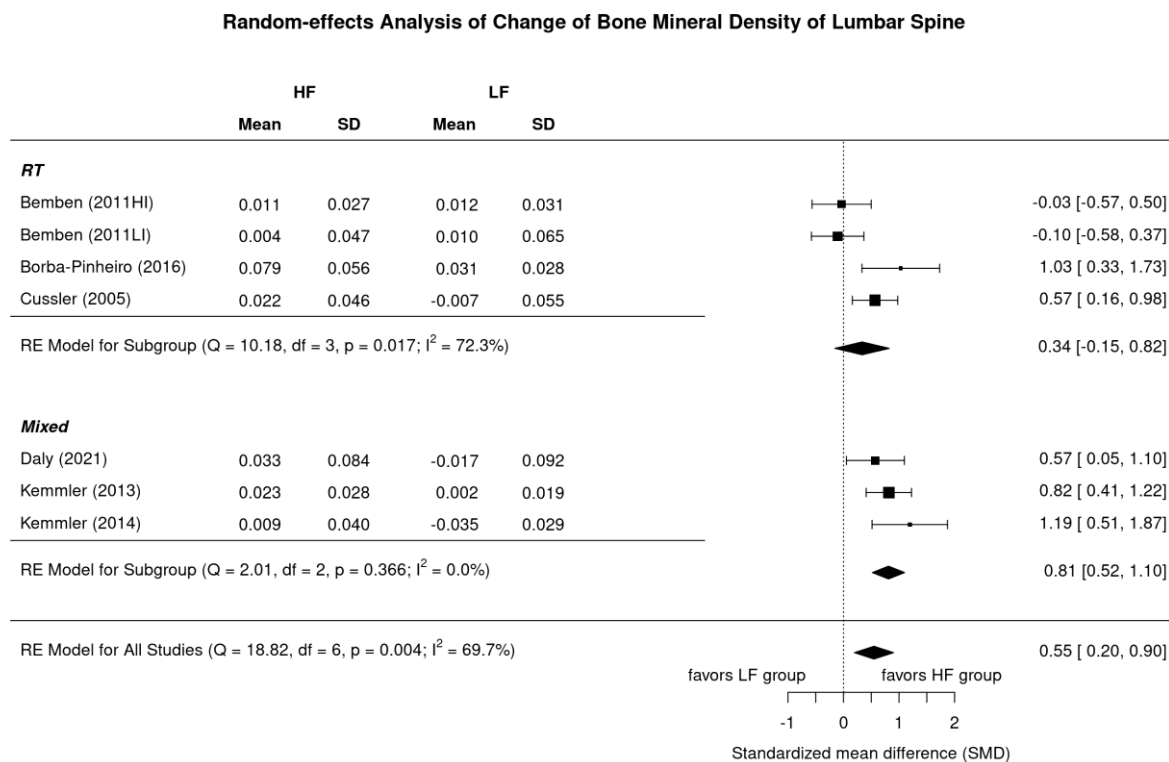


Abb. 47: Modifizierender Effekt unterschiedlicher Trainingsinhalte auf den Effekt der Trainingsfrequenz auf die Knochendichte an LWS (oben) und FN (unten).

Trainingshäufigkeit: Modulierender Effekt der Interventionsdauer

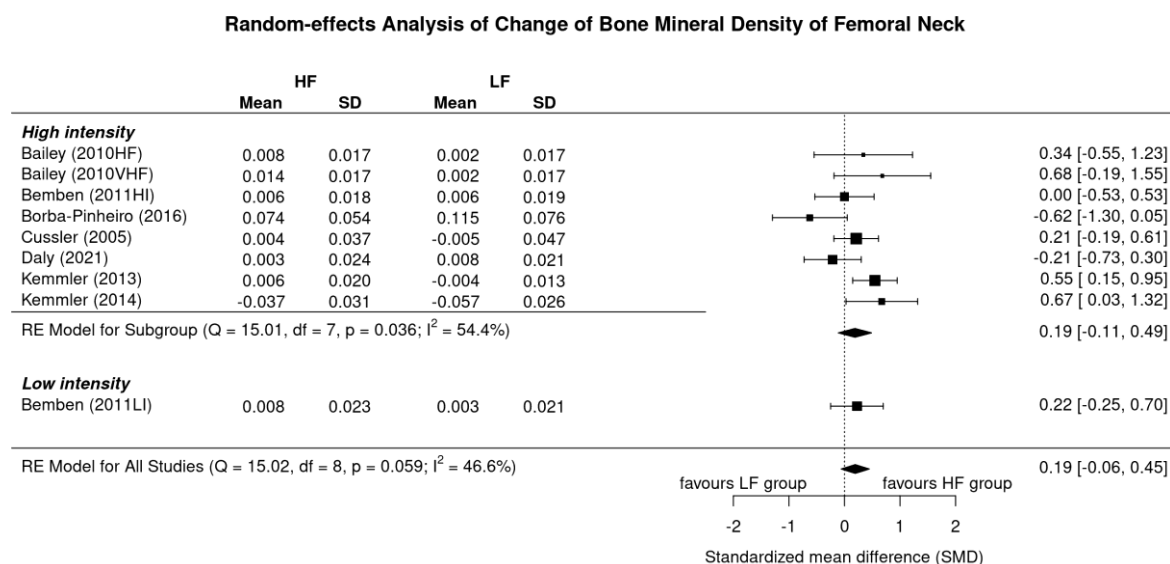
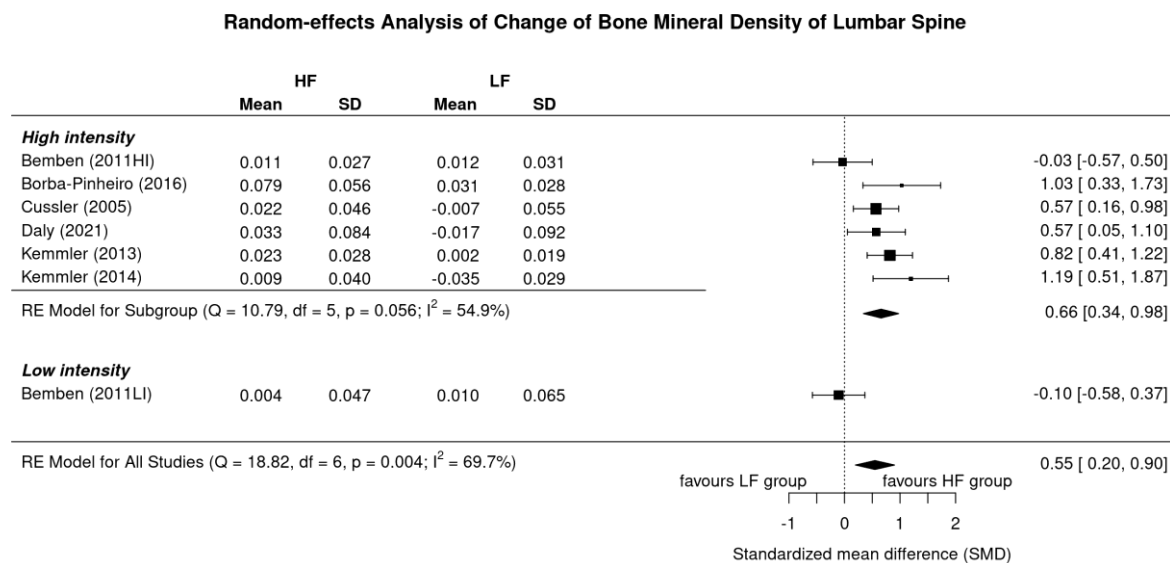


Abb. 48: Modifizierender Effekt unterschiedlicher Reizhöhe auf den Effekt der Trainingsfrequenz auf die Knochendichte an LWS (oben) und FN (unten).

Trainingsinhaltliche Empfehlung: Belastungskomponenten: Einfluss der Reizhöhe

Tab. 36: Basale Studien-/Teilnehmercharakteristika der eingeschlossenen Studien

First Author, year of publication	Health status	Gender	Exercise intensity	Initial sample size [n]	Drop-Out [%]	Mean age [years]	Body mass [kg]	Height [cm]	Medication use
Bemben, 2000¹	healthy	w	HI	13	23	51±2	74.7±5.6	162±2	none
			LI	11	36	52±2	62.7±3.4	165±2	none
Bemben, 2011^{1,2}	healthy	w: 98 m: 62	2HI	39	21	w:64 m:65±1	w: 69.7±1.5 m: 83.5±1.6	w:163±1 m:177±1	Partially HRT, (75%)
			2LI	41	17				
			3HI	34	29				
			3LI	46	24				
Borer, 2007¹	healthy	w	HI	13*	n.g.	59±1	76.4±2.7	162±2	HRT, ≈58%
			LI	12*	n.g.	58±1	78.5±3.0	162±2	HRT, ≈67%
Brentano, 2008	healthy	w	HI	10	0	66±4	56.7±5.8	162±0	HRT, ≈50%
			LI	9	0	66±3	60.6±8.8	160±0	HRT, ≈50%
Grove, 1992	healthy	w	HI	5	0	54±2	72.3±19.2	n.g.	HRT, 40%
			LI	5	0	57±4	69.0±12.7	n.g.	HRT, 40%
Hatori, 1993	healthy	w	HI	12	0	56±4	54.0±5.0	152±3	none
			LI	11	18	58±5	53.4±6.8	151±5	none
Kerr, 1996	healthy	w	HI	28	11	58±4	69.4±11.4	165±7	none
			LI	28	25	56±5	70.8±10.0	165±6	none
Maddalozzo, 2000	healthy	w: 26 m: 28	HI	w: 12 m: 15	25 20	53±3 53±3	71.3±9.6 85.4±13.2	n.g. n.g.	none
			LI	w: 14 m: 13	36 8	53±3 55±3	69.3±14.2 93.2±18.4	n.g. n.g.	none
Pruitt, 1995	healthy	w	HI	15	47	67±1	64.5±9.2	163±7	none
			LI	13	46	68±1	61.5±4.6	161±5	none
			LI	28	14	59±4	65.8±10.4	165±7	none
Vincent, 2002	healthy	w & m ²	HI	30	27	67±7	74.8±15	167±9	n.g.
			LI	34	29	68±6	74.4±16	167±11	n.g.
von Stengel, 2007	Osteopenia	w	HI	25	12	57±4	69.9±8.7	164±7	none

¹values are MV±S

²distribution per group not consistently given

HI: high intensity; HRT: Hormone replacement therapy; LI: low intensity; n.g.: not given

Tab. 37: Trainingscharakteristika der eingeschlossenen Studien/Studienarme mit hoher vs. niedriger Reizhöhe

First author, year	Prestudy exercise status	Design, Supervision Duration	Type of exercise	Exercise composition	Exercise Intensity	Progression of intensity	Attendance	Site Specificity of exercise	KMD Region of Interest ¹
Bemben, 2000	no RT in the last 6 months	RCT, S-JE, 6 months	DRT (all main muscle groups) with machines	3x60 min/week, 12 exercises, 3 sets, 8 reps (HI) versus 16 reps (LI)	HI: 80% 1RM LI: 40% 1RM	yes yes	87% 93%	yes yes	LS, hip
Bemben, 2011	no RT in the last year	RNCT, S-JE, 10 mon.	DRT (all main muscle groups) with machines	2x60 min/week, 12 exercises, 3 sets of 8 reps (HI) versus 16 reps (LI)	HI: 80% 1RM LI: 40% 1RM	yes yes	79% 80%	yes yes	LS, hip
				3x60 min/week, 12 exercises, 3 sets of 8 reps (HI) versus 16 reps (LI)	HI: 80% 1RM LI: 40% 1RM	yes yes	70% 74%	yes yes	
Borer, 2007	<60 min/week of regular exercise	RNCT, S-JE, 7 mon.	Brisk walking	5x 4.8 km/week at 88% VO ₂ max (≈6.4 km/h; GRF: 1.3-1.4x BW, HI) versus 67% VO ₂ max; (≈5.5 km/h, GRF: 1.1-1.2x BW, LI)	HI: ≈6.4 km/h LI: ≈5.5 km/h	yes yes	78% 70%	yes (?) yes	LS, pelvis (TB-Scan)
Brentano, 2008	no regular exercise	RCT, S-JE, 6 mon.	DRT (all main muscle groups) on machines and with free weights	3x60 min/week, 10 exercises, 2-4 sets of 6-15 reps (HI) with 2 min rest versus 2-3 sets of 10-20 reps (LI) without rest between exercises	HI: up to 80% 1RM LI: up to 60% 1RM	yes yes	77% 81%	yes yes	LS, hip
Grove, 1992	no exercise in the last year	RCT, NS-IE, 12 mon.	High impact WB: Jumping vs. low impact WB: Walking, dancing	3x60 min/week, focus on 20 min high impact exercises (HI) versus low impact exercise (LI) (no more information given)	HI: GRF≥2x BW LI: GRF≤1.5x BW	no no	83% 80%	yes	LS
Hatori, 1993	n.g.	RCT, n.g., 7 mon.	Brisk walking	3x30 min/week walking at 110% anaerobic threshold HR (7.2 km/h; HI) versus at 90% anaerobic threshold HR (6.2 km/h; LI)	HI: ≈7.2 km/h LI: ≈6.2 km/h	n.g. n.g.	n.g. n.g.	yes (?)	LS

Kerr, 1996	no RT in last 5 years, no exercise > 3 h/week	RCT, S-JE, 12 mon.	Unilateral DRT (main muscle groups) on machines or free weights	HI: 3x20-30 min/week (LI: 3x45-60 min/week); 12 exercises, 3 sets at 8 RM, i.e. 8 reps (HI) versus 3 sets at 20 RM, i.e. 20 reps (LI)	HI: ≈75-80% 1RM LI: ≈55-60% 1RM	yes yes	87% 89%	yes	hip
Maddalozzo, 2000	no RT/ exercise program in the last 2 years	RNCT, S-JE 6 mon.	DRT (all main muscle groups) sitting on machines (LI) or standing with free weights (HI)	3x75 min/week; 13 exercises, 3 sets of 10-13 reps (LI) versus periodized RT: 12 (other) exercises, 3 sets of 2-10 reps (HI)	HI: 70-90% 1RM LI: 40-60% 1RM	yes yes	92% 94%	yes yes	LS, hip
Pruitt, 1995	no RT before	RCT, S-JE, 12 mon.	DRT (all main muscle groups) on machines	3x60 min/week; 10 exercises, 3 sets of 7 reps (HI) vs. 14 reps (LI)	HI: 80% 1RM LI: 40% 1RM	yes yes	≈79% ≈79%	yes yes	LS, hip
Vincent, 2002	no RT for at least one year	RCT; S-JE 6 mon.	DRT (all main muscle groups) on machines	3x30 min/week; 12 exercises, one set of 8 (HI) vs. 13 (LI) reps	HI: 80% 1RM LI: 50% 1 RM	yes yes	>85% >85%	yes yes	LS, hip
von Stengel, 2007	Regular exercise in the last 3 years	RCT, S-JE, 24 mon.	Mixed high impact WB and DRT (all main muscle groups) on machines	3x60 min/week; 10-12 exercises, 2-4 sets of 4-12 reps at 70-93% 1RM, high velocity (explosive-4s) vs. low velocity (4s-2s-4s); 1x HE (20 min: 5 min rope skipping, 15 min of RT)	HI: 16% higher loading magnitude, 262% higher loading rate compared to LI	yes yes	70% 65%	yes yes	LS, hip

¹ measured by DXA, except Grove et al. who applied DPA

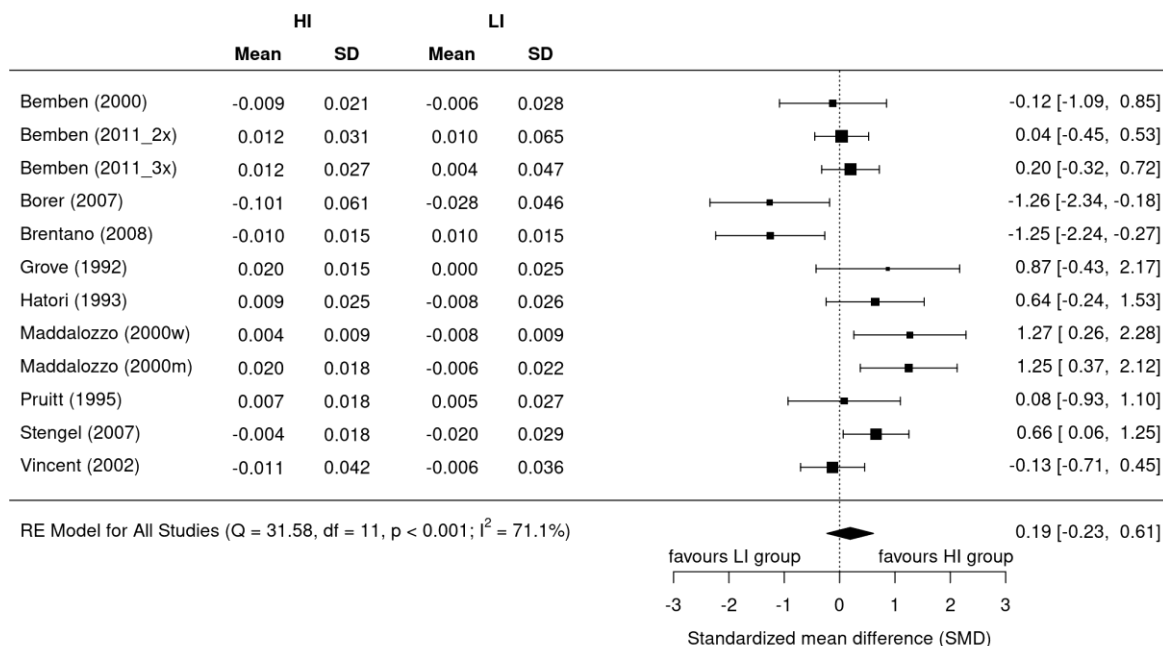
1RM: one repetition maximum; DRT: dynamic resistance training; GRF: Ground Reaction Forces; HE: home exercise; HI: high intensity; JE: joint exercise program; LI: low intensity; NS-IE: non-supervised individual exercise; RCT: randomized controlled trial; RNCT: randomized non-controlled trial; RT: resistance exercise; S: Supervised; WB: weight-bearing exercise

Note: Depending on the exercises applied, DRT was considered as the site specific for both KMD ROIs. **Pre-study exercise status:** Predominately we used the characterization of the authors. **Type of exercise:** (a) dynamic resistance exercise, (b) Weight bearing exercise that involved any kind of loading of axial skeletal sites due to gravity (e.g. Tai Chi, walking, running, dancing, jumping). (c) Exercise studies that combined weight bearing and DRT exercise, even though WB exercise was only applied briefly during warm-up. **Exercise composition:** Number of sessions per week x minutes per session (e.g. 3 x 60); number of exercises; number of sets, number of repetitions, exercise intensity; jumping: number of jumps, intensity of jumps. In parenthesis: **Attendance** defined as rate of sessions performed. **Site specificity:** First line: Estimated site specific of the exercise type on LS-KMD; Second line: Estimated site specific of the exercise type on hip-KMD (FN or TH).

Tab. 38: Methodische Qualität der eingeschlossenen Studien

Author, year	PEDro Criteria												Additional TESTEX Criteria ¹					
	Eligibility criteria	Random allocation	Allocation concealment	Inter group homogeneity	Blinding subjects	Blinding personnel	Blinding assessors	participation ≥ 85% allocation	Intention to treat analysis	Between group comparison	Measures of variability	Total score PEDro	Adverse effects reported	Attendance reported	Activity monitoring in control groups	Relative exercise intensity constant	Exercise volume &	Total score TESTEX
Bemben, 2000	Yes	+	-	-	-	-	-	-	-	+	+	3	-	+	n.a.	+	+	8
Bemben, 2011	Yes	+	-	-	-	-	-	-	-	+	+	3	-	+	n.a.	+	+	9
Borer, 2007	Yes	+	-	+	-	-	-	-	-	+	+	4	-	+	n.a.	+	+	9
Brentano, 2008	Yes	+	-	+	-	-	-	-	-	+	+	4	-	-	n.a.	+	+	8
Grove, 1992	Yes	+	-	+	-	-	-	+	-	+	+	5	-	+	n.a.	-	-	8
Hatori, 1993	Yes	+	-	+	-	-	-	+	-	+ ²	+	5	+	-	n.a.	+	+	10
Kerr, 1996	Yes	+	-	+	-	-	-	-	-	-	+	3	+	+	n.a.	+	+	8
Maddalozzo, 2000	Yes	+	-	+	-	-	-	-	-	+	+	4	+	+	n.a.	+	+	10
Pruitt, 1995	Yes	+	-	+	-	-	-	-	-	+	+	4	+	+	n.a.	+	+	10
Vincent, 2002	Yes	+	-	+	-	-	-	-	-	+	+	4	+	+	n.a.	+	+	10
von Stengel, 2007	Yes	+	-	+	-	-	-	+	-	+	+	5	-	+	n.a.	+	+	10

Random-effects Analysis of Change of Bone Mineral Density of Lumbar Spine



Random-effects Analysis of Change of Bone Mineral Density of Hip

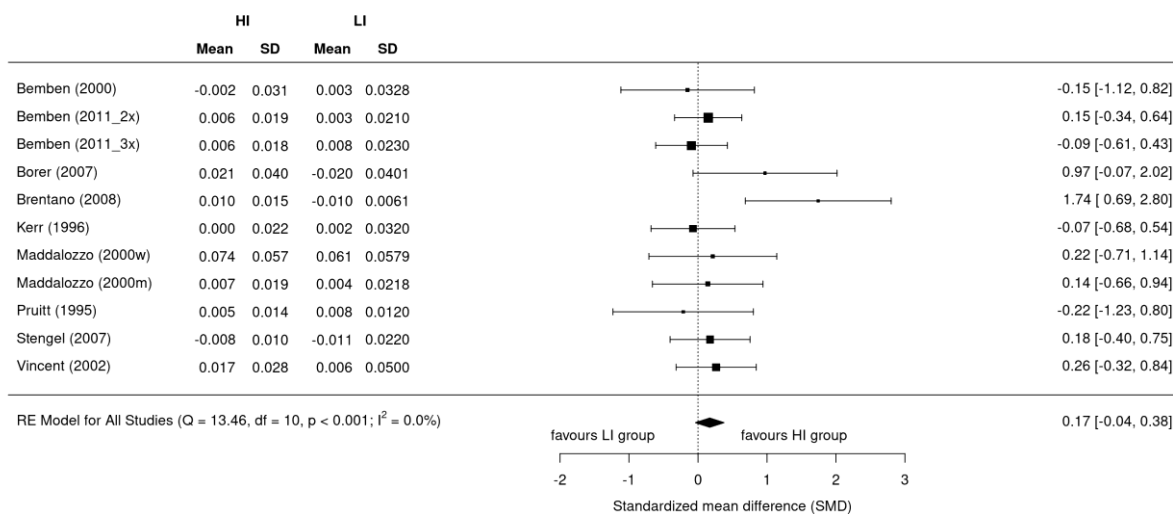
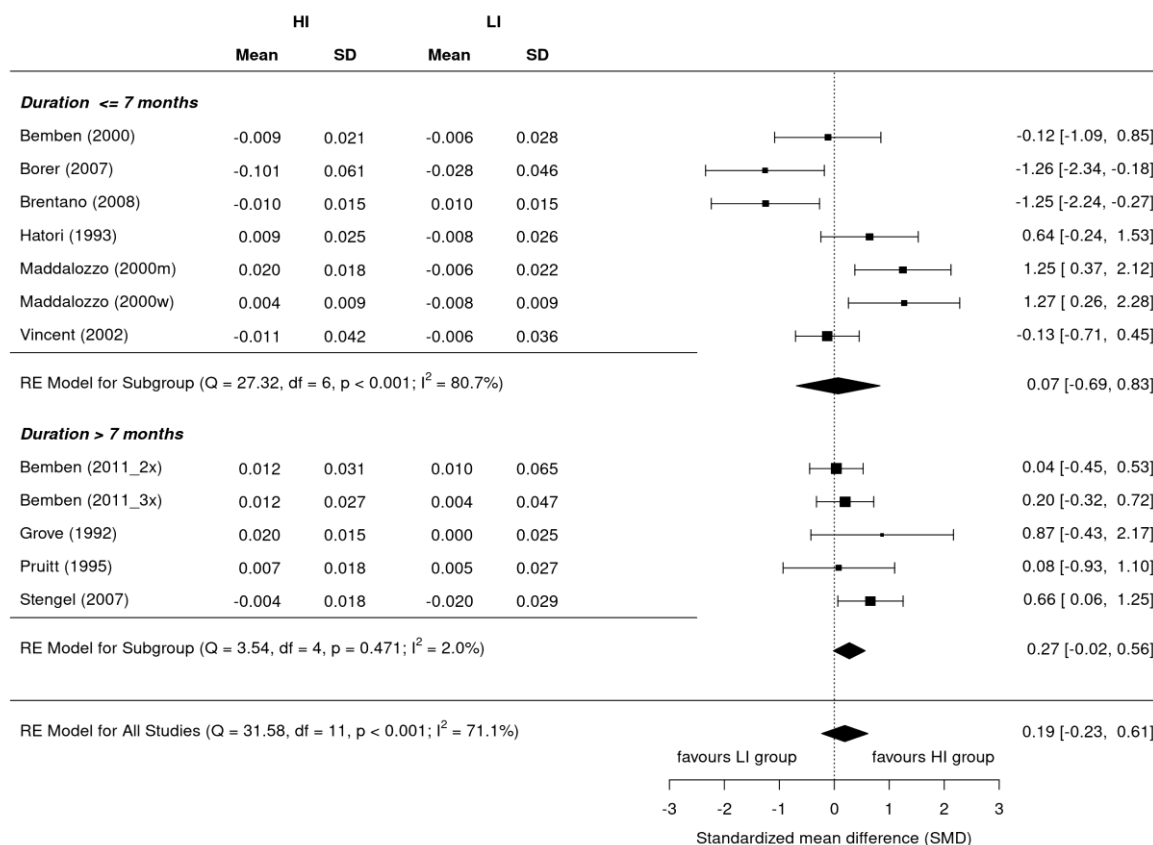


Abb. 49: Forest-plot der Studienergebnisse für die LWS (oben) und FN-(unten) KMD: hohe (HI) versus niedrige (LI) Reizhöhe. Zusammengefasste standardisierte Mittelwertdifferenz (SMD) mit 95%-KI für Veränderungen in HI versus LI.

Reizhöhe: Modulierender Effekt der Interventionsdauer

Random-effects Analysis of Change of Bone Mineral Density of Lumbar Spine



Random-effects Analysis of Change of Bone Mineral Density of Hip

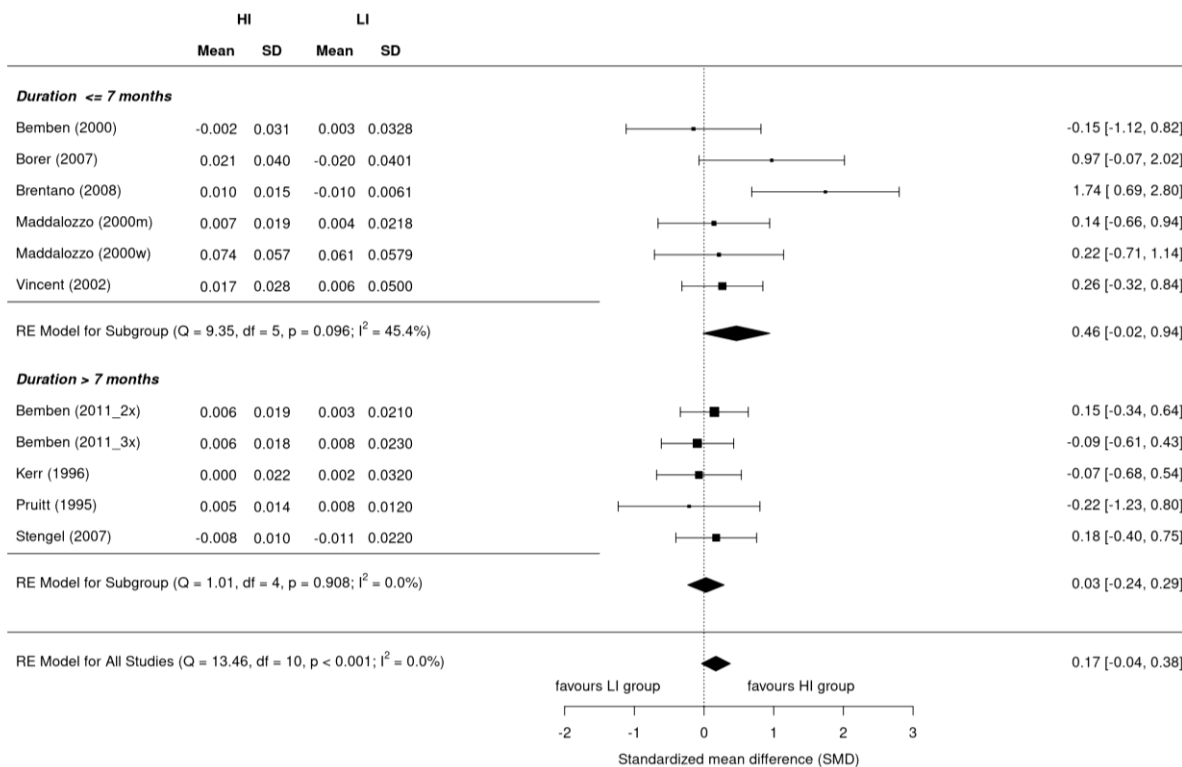


Abb. 50: Modifizierender Effekt unterschiedlicher Interventionsdauer auf den Effekt der Reizhöhe auf die Knochendichte an LWS (oben) und FN (unten).

Random-effects Analysis of Change of Bone Mineral Density of Lumbar Spine

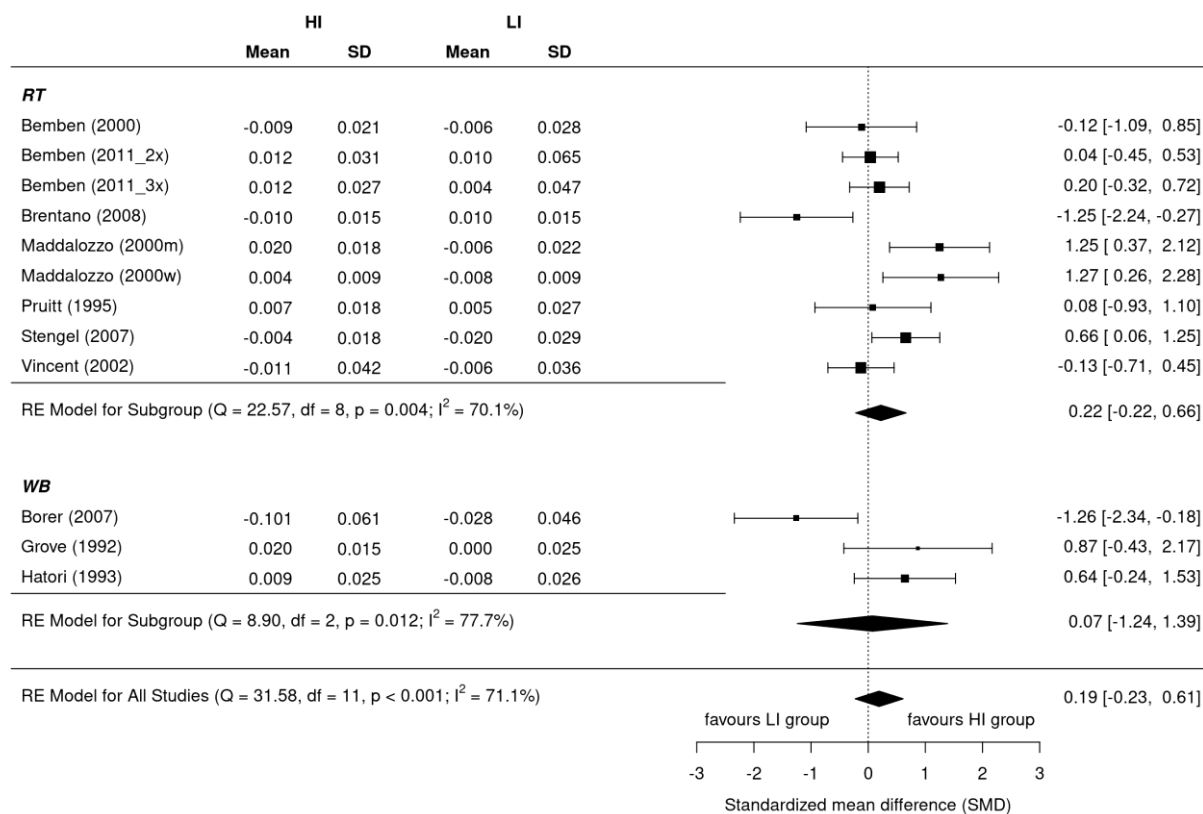


Abb. 51: Modifizierender Effekt unterschiedlicher Trainingsinhalte auf den Effekt der Reizhöhe auf die Knochendichte an der LWS.

(6) Kombination von körperlichem Training und medikamentöser Therapie/Supplementen

Interaktion von HRT und körperlichem Training

Tab. 39: Basale Studien-/Teilnehmercharakteristika der eingeschlossenen Studien

First author, year	Sample size				Mean age (year)				Mean height (cm)				Mean weight (kg)				Body fat (%)				Health status	Ca supplementation	Drop-out EG (%)
Groups	HRT +E	E	HRT	C	HRT +E	E	HRT	C	HRT +E	E	HRT	C	HRT +E	E	HRT	C	HRT +E	E	HRT	C			
Bassey (1998)	24	45	22	32	54	55	53	55	162	161	161	163	64	65	64	67	38	37	39	38	healthy	Ca: 1400-1650mg /day total intake	16
Cheng (2002)	20	20	20	20	54	54	54	54	161	165	161	163	64	67	70	68	28	31	34	30	healthy	n.g.	47,5
Going (2003)	86	91	73	70	55	55	55	57	163	163	163	163	68	69	68	68	39	39	39	39	healthy	Ca: 800mg/day supplementation	17
Kohrt (1995)	8	8	8	8	66	65	67	66	162	161	159	161	64	63	64	63	40	37	42	39	healthy	Ca: 1500 mg/day total intake	6,25
Maddalozzo (2007)	33	29	34	29	52	52	52	53	n.g.	n.g.	n.g.	n.g.	65	70	69	67	30	32	33	32	healthy	n.g.	13,5
Milliken (2003)	17	26	21	30	54	57	54	57	163	162	163	162	69	68	69	68	n.g.	n.g.	n.g.	n.g.	healthy	Ca: 1500mg/day total intake	11

HRT: isolated hormone therapy, HRT+E: combined HRT and exercise; E: isolated exercise, C: control group, Ca: calcium

Tab. 40: Trainingscharakteristika der eingeschlossenen Studien/Studienarme

First author, year	Prestudy exercise status	Design, Supervision Duration	Type of exercise	Exercise composition per session	Progression of intensity	Attendance	Site Specificity of exercise	KMD Region of Interest
Bassey 1998	<1h/w. of intense exercise during the last years	RCT ³ , S-JE ($\geq 1x$) NS-IE ($\leq 5x$) 12 months	High impact exercise	6 sessions/week, 5 sets of 10 vertical jumps at 1 Hz, landing with flexed legs followed by a heel strike, peak GRF: 4x body-weight	no	n.g. n.g.	Yes yes	LS FN
Cheng 2002	n.g.	RCT, S-JE (2x) NS-IE (4x) 12 months	High impact exercise & RT (3-4 upper body exercises)	6 sessions/week; up to 200 jumps/session at GRF 3.4-5.2x body-mass additionally in S-JE: 3-4 upper body exercises (details not given)	yes	CoG: 60% ¹ EG: 50%	n.a. yes	n.a., FN
Going 2003	<120 min PA/week, no weightlifting	RCT ³ , S-JE, 12 months	WB with weighted vests and DRT (most main muscle groups)	3 sessions/week, moderate intensity WB exercise (walking, skipping, hopping); 7 exercises with 2 sets 6-8 reps at 70% 1 RM, 300 steps/session with weighted vests (5-13 kg)	yes	CoG: 72% EG: 72%	yes yes	LS FN
Kohrt 1995	Not engaged in regular exercise	NRT, S-JE 11 months	WB-exercise	3-5 sessions/week; After 2 months of flexibility exercise, walking/jogging/stair-climbing 30-60 min at 60-70% VO ₂ max ($\approx 82\%$ HRmax).	yes	n.a. ² n.a.	yes yes	LS, FN
Maddalozzo 2007	n.g.	RCT ³ S-JE 12 months	DRT (back squat, dead lift)	2 sessions/week, 2 exercises with free weights (back squat, dead lift) 2 warm up sets at 50% 1RM, 3 sets, 8, 10, 12 reps at 60-75% 1RM, 60 s of rest	yes	CoG: 86% EG: 85%	yes yes	LS, FN
Milliken 2003	<120 min WB-exercise/week for 1 year	RCT ³ , S-JE 12 month	WB (with weighted vests) and DRT (all main muscle groups)	3 sessions/week, 20 min of WB-exercise (jumping, stepping, skipping) with weighted vests, DRT: 8 exercises, 2 sets with 6-8 reps at 70-80% 1 RM	yes	n.a. n.a.	yes yes	LS, FN

¹ attendance is only given for the S-JE; ² factually 3.3 - 3.6 sessions/week; ³ randomized for exercise only; participants were on or off HRT before randomization and were stratified (albeit not consistently across all studies) for HRT.

DRT: dynamic resistance training; GRF: Ground Reaction Forces; HF: High (training) frequency; HI: High Impact exercise, JE (joint exercise program); LF: low (exercise) frequency); n.a.: not applicable (due to retrospective classification); NRT: non-randomized trial; NS-IE: non-supervised individual exercise; RM: repetition maximum; RCT: randomized controlled trial (i.e. control group implemented); RT: randomized trial; S: Supervised; WB: weight bearing exercise, **Note:** Site specificity: First line: Estimated site specific of the exercise type on LS-KMD; Second line: Estimated site specific of the exercise type on FN-KMD.

Tab. 41: HRT-Charakteristika der eingeschlossenen Studien

Study	Pharmaceutic agent	Trade name, country	Application
Bassey (1998)	Not given	-----	-----
Cheng (2002)	Combined estradiol (2mg) + Norethisteron acetate (1mg)	Kliogest, Novo Nordisk	oral
Going (2003)	32% with estrogen (oral) 51% estrogen + progesterone (oral) 12% estrogen + progesterone (trans- dermal)	-----	oral transdermal
Kohrt (1995)	Conjugated estrogen 0.625mg/day Medroxyprogesterone acetate 5mg/day	Wyeth-Ayerst, US Upjohn, US	oral
Maddalozzo (2007)	Conjugated estrogen 0.625mg/day	Premarin; US	oral
Milliken (2003)	26% with estrogen (oral) 8% estrogen (transdermal) 61% estrogen + progesterone (oral) 5% estrogen + testosterone (oral)	-----	oral transdermal

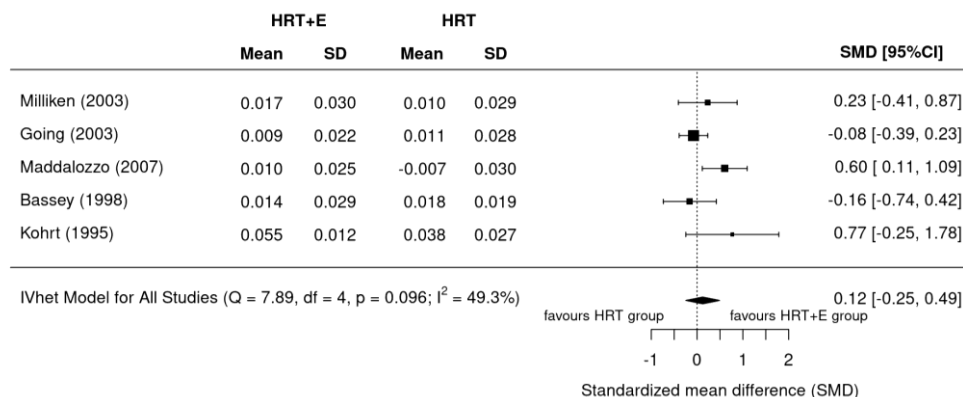
Tab. 42: Methodische Qualität der eingeschlossenen Studien (körperliches Training und HRT)

	PEDro-Criteria												“Additional” TESTEX Criteria ¹					
Author, year	Eligibility criteria	Random allocation	Allocation concealment	Inter group homogeneity	Blinding subjects	Blinding personnel	Blinding assessors	participation ≥ 85%	Intention to treat analysis ²	Between group comparison	Measure of variability	Total score PEDro	Adverse effects reported	Attendance reported	Activity monitoring in control groups	Relative exercise intensity constant	Exercise volume & energy expended	Total score TESTEX
Bassey (1998)	Y	1	0	1	0	0	0	0	0	1	1	4	0	0	0	0	1	7
Cheng (2002)	Y	1	0	1	0	0	0	0	0	1	1	4	0	1	0	1	0	8
Going (2003)	Y	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	6	0	1	0	1	1	10
Kohrt (1995)	Y	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	4	0	0	0	1	1	8
Maddalozzo (2007)	Y	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	5	0	1	0	1	1	11
Milliken (2002)	Y	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	4	0	0	0	1	1	8

¹TESTEX awards one point for listing the eligibility criteria and, also in contrast to PEDro, a further point for the between group comparison of at least one secondary outcome

²... or all subjects received treatment or control as allocated. However, this aspect differs from TESTEX that specifically required an ITT analysis only.

IVhet Analysis of Change of Bone Mineral Density of Lumbar Spine



IVhet Analysis of Change of Bone Mineral Density of Femoral Neck

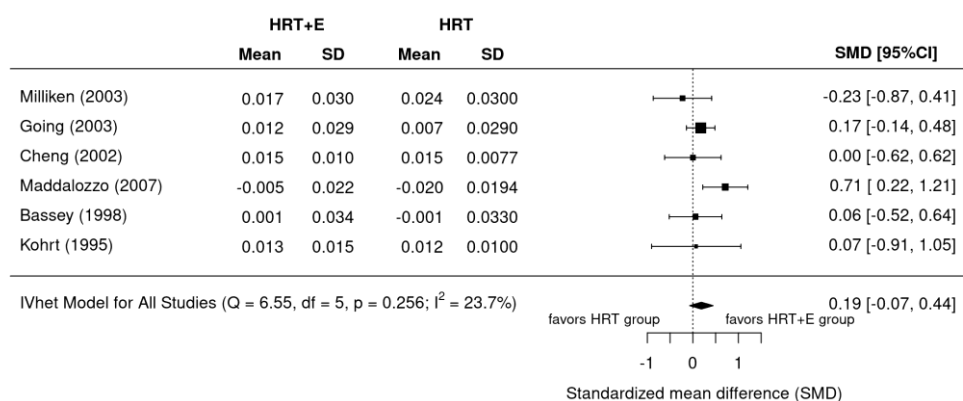


Abb. 52: Forest-plot der Studienergebnisse für die LWS- (oben) und FN-KMD (unten). Standardisierte Mittelwertdifferenz (SMD) mit 95%-KI für Veränderungen in kombinierter HRT+E versus isolierter HRT-Gruppe.

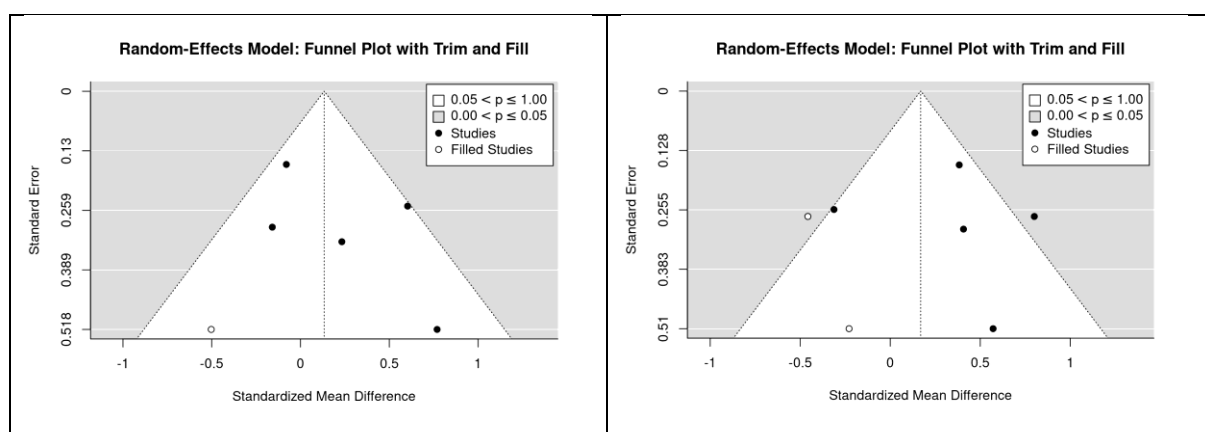


Abb. 53: Trichterdiagramme der KMD-Studienergebnisse an LWS (linke Grafik) und FN (rechte Grafik): HRT+Training (HRT+E) versus HRT.

Interaktion von Bisphosphonaten und körperlichem Training

Tab. 43: Basale Charakteristika der eingeschlossenen Studien

Autor, Jahr	Studienarm	Anzahl der Teilnehmer [n]	Gesundheitsstatus	KMD-LWS basal [g/cm ³]	KMD-FN basal [g/cm ³]	Lebensalter [Jahre]	Körpergröße [cm]	Körpermasse [kg]	BMI [kg/m ²]	Körperfett [%]	Drop-out [%]
Borba-Pinheiro et al. (2013)	Bisphosphonat	7	Gesund, Osteopenie/ Osteoporose	1,003±0,150	0,870±0,100	53,8 ± 4,4	153 ± 6	61,8 ± 12,2	n.g.	n.g.	25
	Bisphosphonat + Körpertraining	11		0,883±0,070	0,766±0,10	52,2 ± 5,3	156 ± 7	58,1 ± 12,8	n.g.	n.g.	
Chilibeck et al. (2002)	Bisphosphonat	14	Gesund, keine Osteoporose	0,951±0,153	0,781±0,135	58,3 ± 6,7	161 ± 4	72,0 ± 11,6	27,7 ± 4,1	43 ± 8	16
	Bisphosphonat + Körpertraining	12		0,935±0,142	0,742±0,103	55,9 ± 8,3	164 ± 4	71,3 ± 16,3	26,5 ± 5,9	40 ± 7	
Fu et al. (2021)	Bisphosphonat	54 (w: 31, m: 23)	Typ 2 Diabetes (T2DM), Osteoporose	0,862±0,139	0,858±0,121	62,0 ± 5,3	n.g.	n.g.	24,7 ± 3,7	n.g.	0
	Bisphosphonat + Körpertraining	63 (w: 34, m: 29)		0,868±0,118	0,858±0,13	63,7 ± 5,6	n.g.	n.g.	24,6 ± 3,8	n.g.	
Uusi-Rasi et al. (2003)	Bisphosphonat	38	Gesund, keine Osteoporose	4,23±0,78*	3,02±0,54*	54,2 ± 2,4	164 ± 5	71,7 ± 10,6	26,7 ± 3,6	n.g.	7
	Bisphosphonat + Körpertraining	38		4,18 ± 0,63*	2,91±0,42*	53,0 ± 2,8	164 ± 6	70,9 ± 9,4	26,3 ± 3,5	n.g.	

* Knochenmasse; BMC-Werte

Tab. 44: Charakteristika der Bisphosphonate-Therapie der eingeschlossenen Studien

Autor (Jahr)	Bisphosphonat	Therapiebeginn Bisphosphonate	Kalzium	Vitamin D	Sonstige Medikamente
Borba-Pinheiro et al. (2013)	Alendronat 70mg/Woche	TG: > 1 Jahr KG: ≈4 Jahre	n.g.	n.g.	n.g.
Chilibeck et al. (2002)	Etidronat 400mg/Tag für 14 Tage alle 3 Monate	Unmittelbar zu Studienbeginn	Kalziumkarbonat 500 mg/d für die folgenden 76 Tage nach Etidronatgabe	400 IE/Tag	n.g.
Fu et al. (2021)	Alendronat 70mg/Woche	Unmittelbar zu Studienbeginn	Kalziumkarbonat 1200 mg/Tag	250 IE/Tag	Acarbose-Tabletten 50 mg/d oder subkutane Injektion Insulin Glargin 8-30 U/Tag
Uusi-Rasi et al. (2003)	Alendronat 5mg/Tag	Unmittelbar zu Studienbeginn	Kalziumzitat 630 mg/Tag	400 IE/Tag	n.g.

Tab. 45: Trainingscharakterika der eingeschlossenen Untersuchungen

Autor, Jahr	Trainings-status	Design/ Supervision	Strategische Ausrichtung	Interventions-dauer (Monate)	Art der Übung	Zusammensetzung der Trainingseinheit (TE)	Progression der Reiz- Intensität	Spezifität der Übung	KMD- ROI
Borba-Pinheiro et al. (2013)	Kein regelmäßiges Training > 1 Jahr	Quasi-experimentell, beaufsichtigt	Knochenfestigkeit (KMD)	24	Angepasstes Judotraining mit z.T. hoher Bewegungsgeschwindigkeit und Reizintensität	3 TE/Woche (Anwesenheit: n.g.) Dehnen, Laufübungen, kleine Sprünge (n.g.) Spezifische Judo-Übungen: Abfangen von Stürzen; Abrollen in verschiedene Richtungen, grundlegende Wurf- und Bodenkampftechniken (kein Sparring) mit moderater-hoher Intensität (periodisiert)	Ja	Ja Ja	LWS Schenkelhals
Chilibeck et al. (2002)	Ausschluss: „Kürzliche“ Teilnahme an Krafttraining	RCT, beaufsichtigt	Knochenfestigkeit (KMD)	12	Dynamisches Krafttraining an Geräten, alle großen Muskelgruppen	3 TE/Woche (Anwesenheit: 75±3%) Aufwärmen: 5 min Radfahren und Dehnen 12 Übungen jeweils 2 Sätze mit 8-10 Wiederholungen mit 70-75% 1RM (≈10RM)	Ja	Ja Ja	LWS Schenkelhals
Fu et al. (2021)	n.g.	RCT, Familie/Freunde beaufsichtigen	Knochenfestigkeit (KMD)	6	Trainingsart nach Probandenwunsch	Täglich 60-90 Minuten/d verteilt auf 2-3 TE, (Anwesenheit: n.g.), z.B. Joggen, Gymnastik, tanzen, klettern, schwimmen, Schattenboxen usw. mit niedrig-moderater Intensität (HF: 170-Lebensalter x 85%)	Nein	? ?	LWS Schenkelhals
Uusi-Rasi et al. (2003)	Kein regelmäßiges Training ≥ 2/Woche	RCT, beaufsichtigt	Knochenfestigkeit, physische Leistung	12	Sprungübungen und Callisthenics	3x 60 min/Woche (Anwesenheit: 53%) 15 min Aufwärmen: (Inhalte n.g.); 20 min multidirektionale Sprünge: GRF: 2.1-5.6x KG; 15 min Übungen mit eigenem Körpergewicht (n.g. „callisthenics“), 10 min cool-down (n.g.)	Ja	Ja Ja	LWS Schenkelhals

GRF: Ground Reaction Forces – Bodenreaktionskräfte; KG: Körpergewicht; n.g.: nicht genannt; TE: Trainingseinheit; RCT: randomized controlled trial - randomisierte kontrollierte Studie; ROI: Region of Interest; 1RM: one repetition maximum (Einwiederholungsmaximum); ?: fraglich – je nach gewähltem Trainingsinhalt...

Tab. 46: Methodische Qualität der Studien gemäß PEDro

Autor (Jahr)	Ein-/Ausschluss-kriterien	Zufällige Zuteilung	Verborgene Zuordnung	Homogenität zwischen den Gruppen	Verblindung der Probanden	Verblindung der Therapeuten	Verblindung Untersucher	Beteiligung $\geq 85\%$	Intention to Treat Analyse	Gruppenvergleich		Maß für die Variabilität	Gesamtpunktzahl PEDro
Borba-Pinheiro et al. (2013)	Ja	+	+	+	-	-	-	-	-	+		+	5
Chilibeck et al. (2002)	Ja	+	-	+	-	-	+	-	-	+		+	5
Fu et al. (2021)	Ja	+	-	+	-	-	-	+	+	+		+	6
Uusi-Rasi et al. (2003)	Ja	+	-	+	-	-	+	+	-	+		+	6

IVhet Analysis of Change of Bone Mineral Density of Lumbar Spine

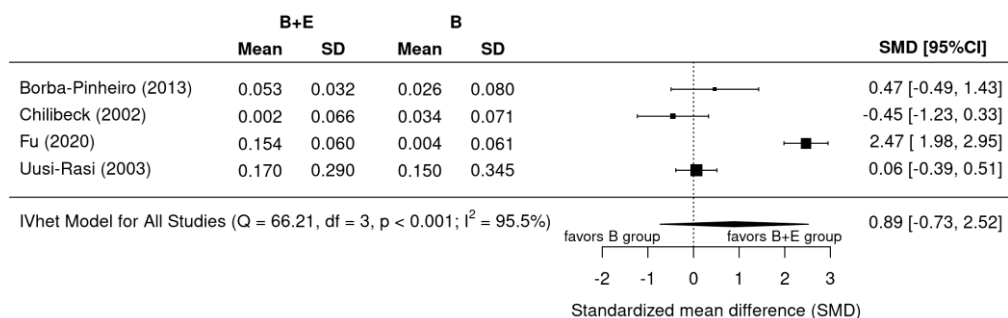


Abb. 54: Forest-plot der Studienergebnisse für die LWS- (oben) und FN-KMD (unten). Standardisierte Mittelwertdifferenz (SMD) mit 95%-KI für Veränderungen in der kombinierten Bisphosphonate und körperliches Training- (B+E) versus isolierter Bisphosphonat-Gruppe (B).

IVhet Analysis of Change of Bone Mineral Density of Lumbar Spine

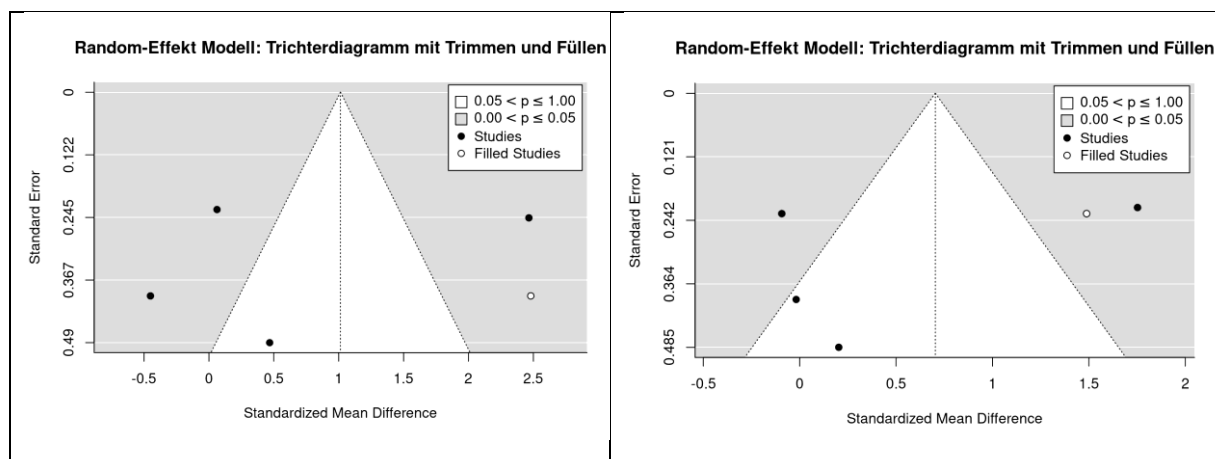
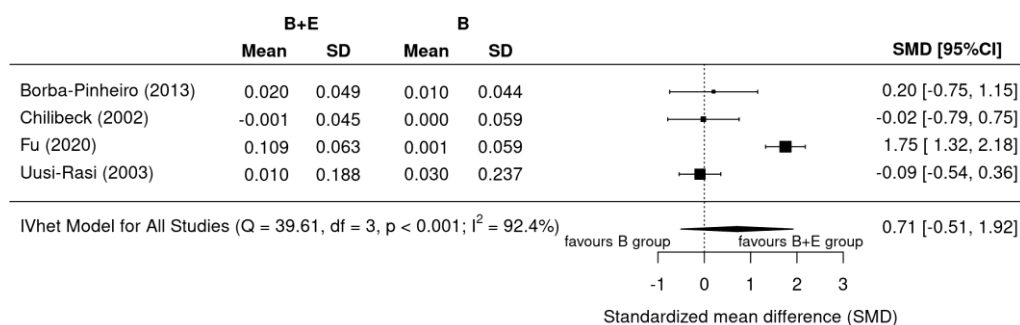


Abb. 55: Trichterdiagramme der KMD-Studienergebnisse an LWS (linke Grafik) und FN (rechte Grafik): Bisphosphonate und körperliches Training versus Bisphosphonate

Interaktion von körperlichem Training und knochenanaboler Osteoporose-Therapie

Tab. 47: Basale Charakteristika der eingeschlossenen Untersuchungen

Author, year	Studyarm	Number of participant (gender) [n]	Health status	KMD-LS baseline [g/cm ³]	KMD- Hip baseline [g/cm ³]	Age [years]	BMI [kg/m ²]	Drop-out [%]
Jepsen et al. 2019	PTH (1-34)	18	Osteoporosis: T-Score < -3 SD or ≥2 vertebral Fractures	0.729 ± 0.137	0.615 ± 0.106	69 ± 8	24.1 ± 4.3	5,7
	PTH (1-34) + Exercise (WBV)	17		0.674 ± 0.103	0.618 ± 0.096	69 ± 5	24.5 ± 4.1	

Table 48: Pharmakologische Charakteristika der eingeschlossenen Studien

Study	Pharmaceutic agent, dose	Application
Jepsen et al. 2019	Teriparatide, 20 microgram/day	subcutaneous

Table 49: Trainingsprotokoll der eingeschlossenen Untersuchungen

First author, year	Pre-study exercise status	Design, Duration Supervision	Main type(s) of exercise	Exercise composition per session	Progression of intensity	Attendance rate	KMD Region of Interest ^c
Jepsen et al. 2019	n.g.	RCT, 12 months Consistently-NS	Whole body vibration	3x 12 min/week multidimensional (3 planes) WBV on "Power plate My5" platform with 1 min of vibration and 1 min of rest (duty cycle 1-1) with 30 Hz. Amplitude: 1 mm, peak acceleration: 35.53 ms ⁻² (3.6 g)	yes ^a	≥75% ^b	LS TH

^a First 8 weeks; ^b 13 of 15 WBV-"finisher" reported >75% training adherence; ^c in addition tibia- and radius bone parameters by high resolution pQCT, CTX and N1NP

Tab. 50: Methodische Studienqualität der eingeschlossenen Untersuchung (n=1) gemäß PEDro and TESTEX Score.

	PEDro Criteria												Additional TESTEX Criteria ^a					
Author, year	Eligibility criteria	Random allocation ^b	Allocation concealment	Inter group homogeneity	Blinding subjects	Blinding personnel	Blinding assessors	participation≥ 85% allocation	Intention to treat analysis ^c	Between group comparison	Measure of variability	Total score PEDro	Adverse effects reported	Attendance reported	Activity monitoring in control groups	Relative exercise intensity constant	Exercise volume & energy expended	Total score TESTEX
Jepsen et al. 2019	Yes	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+	8	+	+	-	-	+	12

^aTESTEX awards one point for listing the eligibility criteria and, also in contrast to PEDro, a further point for the between-group comparison of at least one secondary outcome. Further, TESTEX did not address blinding of study participants, personal/care givers. Finally, “random allocation” as defined by TESTEX refers only to the patient/participant

^b Computer-generated randomization methods were considered as “random allocation”.

^c or all subjects received treatment or control as allocated...(TESTEX however focuses on the application of an ITT-analysis)

Interaktion von Vitamin-D Supplementierung und körperlichem Training

Tab. 51: Basale Charakteristika der eingeschlossenen Studien

	Sample size		Gender	Age (years)	Body Height (cm)	Body mass (kg)	Health status	Medication with impact on bone	Drop-out (%)		Comments
	EX	EX+ Vit-D							EX	EX+ Vit-D	
Garcia-Gomariz et al. (2022)	9	16	W	>55	----	26 ± 2^a	Osteopenia/ Osteoporosis	No	n.a.	6	Design: EX vs. EX+Vit-D/Ca (vs. walking +Vit-D/Ca)
Kukuljan et al. (2011)	46	45	m	61 ± 7	174 ± 6	84 ± 11	healthy	no	4	4	Design: EX vs. EX+Vit-D/Ca
Mason et al. (2016)	109	109	w	59 ± 5	n.g.	87 ± 16	overweight or obese	no	16	19	Design: EX vs. EX+Vit-D ...during weight loss program
Nelson et al. (1991)	12	9	w	60 ± 1	161 ± 1	64 ± 1	healthy	no	25	0	Design: EX vs. EX+Vit-D/Ca (vs. Vit-D/Ca)
Uusi-Rasi et al. (2015)	103	102	w	74 ± 3	159 ± 6	72 ± 11	healthy	no	12	6	Design: EX vs. EX+Vit-D (vs. Vit-D)

EX: Exercise group (EX); EX+Vit-D: Exercise and Vit-D; m: men; n.a.: not applicable; n.g.: not given; w: women; ^a BMI

Tab. 52: Trainingscharakterika der eingeschlossenen Untersuchungen

First author, year	Pre-study exercise status	Design, Duration Supervision	Main type(s) of exercise	Exercise composition per session	Progression of intensity	Attendance rate	KMD Region of Interest
Garcia-Gomariz et al. (2022)	n.g.	Non RCT, 24 months Consistently-S	DRT, WB	3x 45 min/week; 10-15 min of walking and balance exercises, 30 min of high impact exercise (jumps) and DRT (free weights, elastic bands, etc.); no more details were given	n.g.	>85% >85%	LS TH
Kukuljan et al. (2011)	No RT or HI-WB last 6 mo.	RCT, 12 months, Partially-S	DRT (focus on spine, hip muscles groups) and high impact WB	3x week; linearly periodized DRT, up to 13 exercises, 2 sets 8-12 reps, one warm-up set at 60-65% 1RM, one set at 60-85% 1RM; 90-180 reps/session of stepping, jumping, landing with GRF 1.5-9.7x body weight	yes	65% (EX) 69%	LS TH
Mason et al. (2016)	No recent exercise	RCT, 12 months, Partially-S	Aerobic exercise (WB and non WB)	5x 45 min/week walking, jogging, bicycling and other aerobic machines 70-85% H _{rmax}	yes	56% (EX) 59%	LS FN
Nelson et al. (1991)	sedentary	Non RCT, 12 months, Consistently-S	Walking with weighted vests	4x 50 min/week walking with a 3.1 kg weighted vest at 75-80% H _{rmax}	no	>90%	LS FN
Uusi-Rasi et al. (2015)	No mod.-intense EX >2 h/week	RCT, 24 months, Partially-S	DRT, WB, balance and mobility	1 ¹ -2x week group-EX and daily HE (5-15 min). DRT: ?exercises, ?sets, ?reps at up to 75% 1RM, no details on WB, balance and mobility exercises were given	yes	73% (GE) 66% (HE)	LS FN

¹ last 12 months; DRT: dynamic resistance exercise; EX: exercise; FN: femoral neck; GRF: ground reaction forces; HE: home exercise training; LS: lumbar spine; reps: repetitions; RT: resistance training; S: supervised; TH: total hip; WB: weight bearing

Tab. 53: Charakteristika der Vitamin-D Supplementierung der eingeschlossenen Studien

Study	Baseline intake Vit-D (IU/d)	Baseline 25(OH)D-levels (ng/ml)	Vit-D Supple- mentation (IU/d)	Baseline intake calcium (mg/d)	Ca-Supple- mentation (mg/d)
Garcia-Gomariz et al. (2022)	EX: n.g. Comb: n.g.	n.g. n.g.	400	n.g. n.g.	600
Kukuljan et al. (2011)	EX: 32±44 ¹ Comb: 48±84	34±16 36±12	800	911±360 1064±449	1000
Mason et al. (2016)	EX: 580 ² Comb: 515	21±6 21±6	2000	1170±633 1071±564	-----
Nelson et al. (1991)	EX: 116±60 ¹ Comb: 140±96	30±10 28±13	284	869±228 889±303	831
Uusi-Rasi et al. (2015)	EX: 412±144 Comb: 416±156	28±7 26±7	800	1119±346 1109±385	-----

Tab. 54: Methodische Qualität der Studien gemäß PEDro [33] und TESTEX [34]

Author, year	Eligibility criteria	Random allocation ²	Allocation concealment	Inter group homogeneity	Blinding subjects	Blinding personnel	Blinding assessors	participation ≥ 85% allocation	Intention to treat analysis ³	Between group comparison	Measure of variability	Total score PEDro	Adverse effects reported	Attendance reported	Activity monitoring in control groups	Relative exercise intensity constant	Exercise volume & energy expended	Total score TESTEX
García-Gomariz et al. 2022	Yes	-	-	+	-	+	+	+ ⁴	+	+	+	7	+	+ ⁴	+	-	+	10
Kukuljan et al. 2011	Yes	+	+	+	-	-	-	+	+	+	+	7	+	+	-	+	+	13
Mason et al. 2016	Yes	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+	8	+	+	-	+	+	12
Nelson et al. 1991	Yes	-	-	+	+	+	-	+	+	+	+	7	-	+	-	+	+	10
Uusi-Rasi et al. 2015	Yes	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+	8	+	+	-	+	-	13

¹TESTEX awards one point for listing the eligibility criteria and, also in contrast to PEDro, a further point for the between-group comparison of at least one secondary outcome. Further, TESTEX did not address blinding of study participants, personal/care givers. Finally, “random allocation” as defined by TESTEX refers only to the patient/participant

² Computer-generated randomization methods were considered as “random allocation”.

³ or all subjects received treatment or control as allocated...(TESTEX however focuses on the application of an ITT-analysis)

⁴.... Data were provided by the authors upon request.

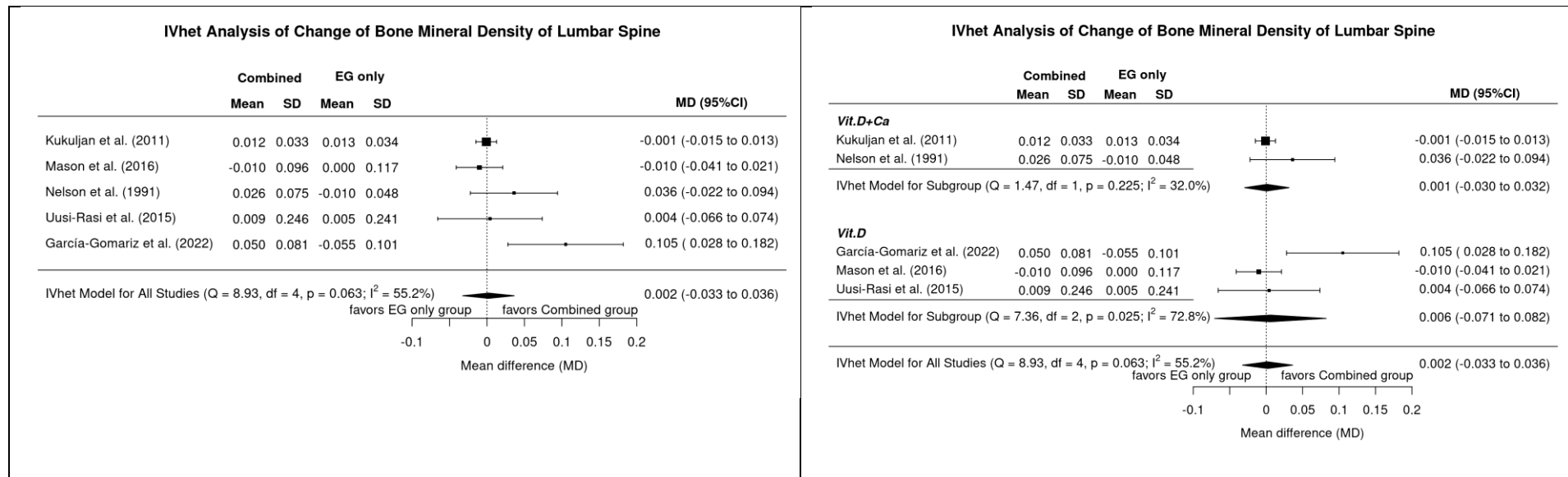


Abb. 56: Forest-plot der Studienergebnisse für die LWS-KMD. Links: Hauptanalyse (VitD-TG versus Training). Rechts: Differenzierung der Studien gemäß zusätzlicher Kalziumsupplementierung. Standardisierte Veränderungen in der kombinierten VitD und körperliches Training- (combined) versus isoliertem körperlichen Training (EG only).

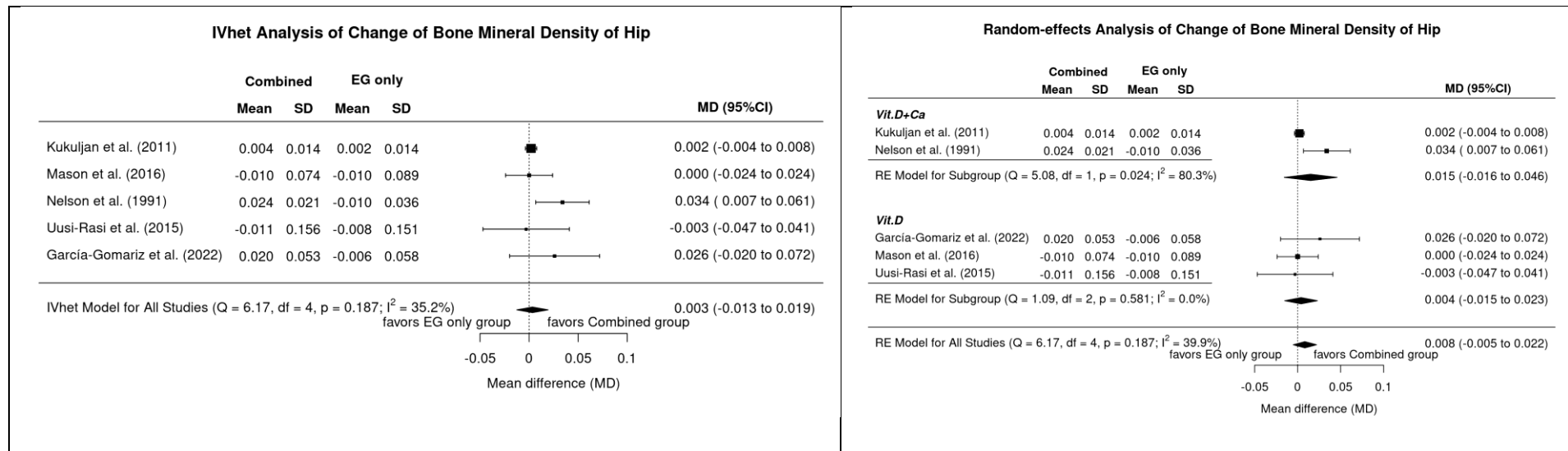


Abb. 57: Forest-plot der Studienergebnisse für die FN-KMD. Links: Hauptanalyse (VitD-TG versus TG). Rechts: Differenzierung der Studien gemäß zusätzlicher Kalziumsupplementierung. Standardisierte Veränderungen in der kombinierten VitD&“exercise“ Gruppe- versus isoliertem körperlichem Training.

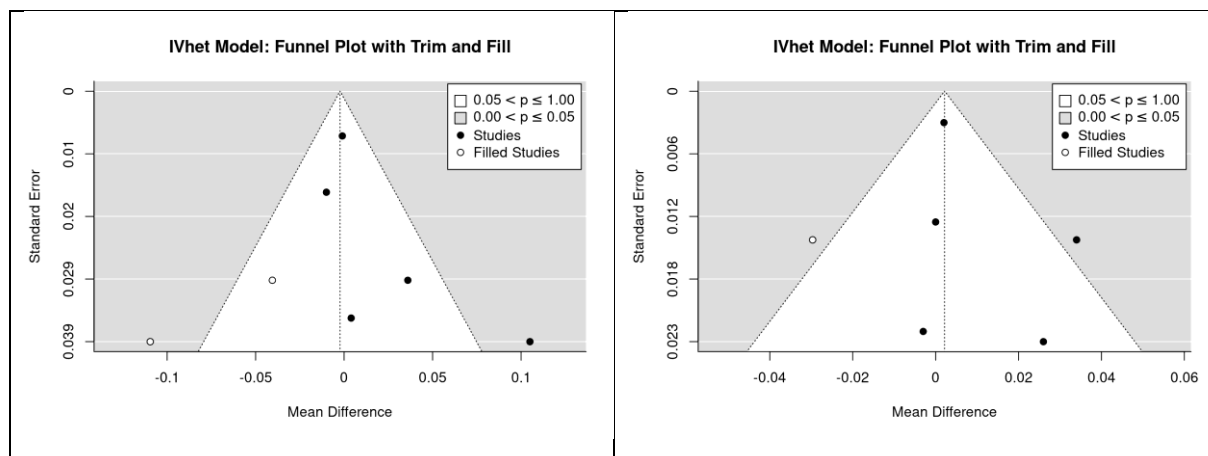


Abb. 58: Trichterdiagramme der KMD-Studienergebnisse an LWS (linke Grafik) und FN (rechte Grafik): Vitamin D und körperliches Training versus körperliches Training.

Interaktion von Proteinsupplementierung und körperlichem Training

Tab. 55: Studien- und Teilnehmercharakteristika der eligible Studien

Study Author (Country, Year)	RCT Design	Setting	Sample Size (n analyzed)	Female %	Age Mean (SD)	Health Status/ Characteristics	Topic
Amasene (Spain, 2019)	parallel single-blind placebo-controlled	community post- hospitalization	A1: 21 (15) A2: 20 (13)	A1: 46.7 A2: 53.8	A1: 82.9 (5.6) A2: 81.7 (6.5)	sarcopenic	1
Daly (Australia, 2014)	cluster	self-care retirement villages	A1: 53 (48) A2: 47 (43)	A1: 100 A2: 100	A1: 72.1 (6.4) A2: 73.6 (7.7)	postmenopausal	1
De Azevedo Bach (Brazil, 2022)	parallel double-blind placebo-controlled	community	A1: 18 (15) A2: 18 (16)	A1: 66.7 A2: 75.0	A1: 66.9 (4.3) A2: 65.8 (5.0)	healthy, older	1
Evans (USA, 2007)	parallel double-blind placebo-controlled	NR	Total: 61(43) A1: (10) A2: (12) A3: (11) A4: (10)	A1: 100 A2: 100 A3: 100 A4: 100	A1: 63.5 (4.8) A2: 62.8 (5.3) A3: 62.5 (5.3) A4: 59.7 (5.2)	postmenopausal	2
Fernandes (Brazil, 2018)	parallel double-blind placebo-controlled	community	A1: 16 A2: 16	A1: 100 A2: 100	A1: 67.3 (4.1) A2: 67.8 (4.0)	physically independent	1
Leenders (Netherlands, 2013)	parallel double-blind placebo-controlled	community	A1: 30 (27) A2: 30 (26)	A1: 44 A2: 46	A1: W: 72 (2) M: 70 (1) A2:W: 69 (1) M: 70 (1)	living independently	1
Roschel (Brazil, 2021)	parallel double-blind placebo-controlled	community	A1: 45 (39) A2: 22 (20) A3: 45 (41)	A1: 49 A2: 100 A3: 49	A1: W: 72 (6),M: 73 (8) A2: W: 72 (6) A3: W: 73 (6),M: 72 (5)	pre-frail or frail	1
Shenoy (India, 2014)	parallel	NR	A1: 20 A2: 20	A1: 100 A2: 100	A1: 54.6 (5.2) A2: 54.1 (6.9)	postmenopausal osteopenic or osteoporotic	2
Verdijk (Netherlands, 2009)	parallel double-blind placebo-controlled	community	A1: 14 (13) A2: 14 (13)	A1: 0 A2: 0	A1: 72 (2) A2: 72 (2)	living independently	1
Zdzieblik (Germany, 2015)	parallel double-blind placebo-controlled	community	A1: 30 (26) A2: 30 (27)	A1: 0 A2: 0	A1: 72.3 (3.7) A2: 72.1 (5.53)	loss in muscular strength or physical performance within the last 3 – 4 years	1

A: Study Arm; M: Men; W: Women; Topic 1: Additional effect of protein on exercise; Topic 2: Additional effect of exercise on protein

Tab. 56: Interventionscharakteristika der eligible Studien

Author, Year	Duration [wk]	Protein Intervention(s)	Control	Exercise Co-Intervention
Amasene 2019	12 wk	Whey Supplement: - B-lactoglobulin (20 g/bottle) - L-Leucine (3 g/bottle) - 150 ml - 2x/wk after training	Placebo Supplement: - Maltodextrin (23 g/bottle) - Hydroxyethylcellulose (0.200 g/bottle) - 150 ml - 2x/wk after training	Resistance training: - 1h/session, 2x/wk - supervised - progressive (50%-70% of 1-RM) - 2 sets per exercise Content: - warm up - strengthening of upper and lower limbs (arm-curl, knee extension, standing knee flexion, side hip raise, standing hip extension and chair stand), - dynamic balance
Daly 2014	16 wk	Lean red meat: - 220 g (raw weight) of veal, lamb, or beef cuts) prepared by participants - Distributed over 2 meals/d at 6 d/wk - individual counselling	High carbohydrates: - Usual diet + ≥ 1 serving of rice/pasta - 1x daily - individual counselling	Resistance and balance-agility training: - 45 – 60 min/session, 2x/w - Supervised - Progressive - first 2 wk: 3 sets of 12 repetitions; thereafter 3 sets of 8 – 12 repetitions Content: - Warm up (rhythmic exercise) - Resistance training (included squats, lunges, box step-ups, leg extensions, standing leg curls, hip abductions, calf raises, shoulder press, upright row, bicep curls, wall pushups, and triceps kickback) - Balance-agility exercises
De Azevedo Bach 2022	12wk	Whey supplement: - 20 g whey protein isolate - diluted in 100 ml water - 2x/day (after breakfast and dinner)	Placebo supplement: - 20 g of maltodextrin - diluted in 100 ml water - 2x/day (after breakfast and dinner)	Resistance training: - 2x/wk - supervised, group based (6-8 persons) - progressive (3wks: 2 sets of 12-15 RM, 3 wks: 3 sets of 10-12 RMs, 3 wks: 4 sets 8-10 RMs, 3 wks: 4 sets of 6-8 RMs) - training load increased from 2.5 to 5.0 kg whenever participants were able to perform more repetitions than prescribed Content: - chest press, bilateral knee extension, lat pull-down, bilateral elbow extension, hip abduction, bilateral elbow flexion, and hip adduction
Fernandes 2018	12 wk	Whey supplement: - 35 g of hydrolyzed whey protein - diluted in 200 ml water - 3x/wk	Placebo supplement: - 35 g of maltodextrin - diluted in 200 ml water - 3x/wk	Resistance training: - 3x/wk - supervised - progressive (training weight was adjusted on a weekly basis using the weight test for repetition maximum) - 3 sets of 8 – 12 repetitions maximum Content: - whole body training (chest press, horizontal leg press, seated row, knee extension, preacher curl, leg curl, triceps pushdown, seated calf raises)
Leenders 2013	24	Protein supplement:	Placebo supplement:	Resistance training: - 3x/wk

		- 15 g of protein (milk protein concentrate); 80% of casein and 20% of whey protein - 0.5 g of fat, 7.13 g of lactose, and 0.42 g of calcium - 250 ml - 1x daily	- no protein or fat, 7.13 g lactose and 0.42 g calcium - 250 ml - 1x daily	- supervised - progressive (1 RM was increased in the first 4 wk of training from 60% (10 – 15 repetitions/set) to 75% (8 – 10 repetitions/set), from week 5 onwards: 8 repetitions at 75% - 80%) <u>Content:</u> - warm-up - leg press, leg extension, chest press, horizontal row in every session; vertical lat pull, abdominals, biceps curl, triceps extension were alternated between subsequent sessions
Roschel 2021	16	Whey supplement: - 15 g/d of whey mixed in 150 ml of water - 2x daily <u>OR</u> Soy supplement: - 15 g/d of soy mixed in 150 ml of water - 2x daily	Placebo supplement: - 15 g/d of corn starch mixed in 150 ml of water - 2x daily	Resistance training: - 2x/wk - supervised - progressive (ranged from 2 sets at 50% 1-RM (first 4 weeks of training) to 4 sets at 70% 1-RM (last 4 weeks of training) for each exercise) <u>Content:</u> - Exercises for the main muscle groups (inclined leg press, leg extension, horizontal bench press, shoulder press, lat pull down)
Verdijk 2009	12	Protein supplement: - 10 g protein as casein hydrolysate - as 250 ml beverage - 2x per session (during warm up and cooling down)	Placebo supplement: - water (250 ml) - 2x per session (during warm up and cooling down)	Resistance training: - 3x/wk - Supervised - Progressive (from 60% of 1RM (10–15 repetitions in each set) to 75–80% of 1RM (8 – 10 repetitions) within the first 4 weeks; from week 5: 8 repetitions at 75 – 80%) - 4 sets per exercise <u>Content:</u> - warm up - leg press, leg-extension
Zdzieblik 2015	12	Collagen supplement: - 15 g/d (molecular weight of approximately 3 kDa, included 2.7% leucine) - in 250 ml water - 1x daily	Placebo supplement: - silicon dioxide - in 250 ml water - 1x daily	Resistance training: - 3x/wk, 60 min - supervised - progressive (wk 1-4: 15 repetitions, wk 5-9: 10 repetitions, wk 10-12: 8 repetitions; 4 s/repetition) <u>Content:</u> - All larger muscle groups (pull down, leg press, bench press, back press, etc.)

Abbreviations: A Arm, BW Body Weight, d day, wk week, min minutes, RM Repetition Maximum, RT Resistance Training, NR Not Reported

Tab. 57: Interventionscharakteristika. Hier: Interventionen für RCTs, in denen untersucht wurde, ob eine zusätzliche Bewegungsintervention die Auswirkungen einer Protein-/Aminosäure-Intervention auf die Knochengesundheit bei Erwachsenen mittleren und höheren Alters verbessern kann

Author, Year	Duration [wk]	Exercise Intervention	Control	Protein Co-Intervention
Evans 2007	39	Endurance exercise: - 3x/wk (increased until 45 min/session) - Supervised - progressive (intensity of 55% to 60% of peak aerobic capacity (VO₂peak) and progressed gradually to 75% to 80% of VO₂peak within 4 to 6 weeks) <u>Content:</u> - different exercise modes were used (e.g. a four-lane 17-lap per mile indoor track, treadmills, rowing ergometers, and stair-climbing ergo-meters) - individualized on the basis of participant preferences	No Exercise - maintain usual physical activity	Soy (2 groups): - 25.6 g of protein and 91.2 mg aglycone units of isoflavones - daily Or Milk protein isolate (2 groups): - 25.6 g of protein and 0 mg aglycone units of isoflavones - daily
Shenoy 2014	12	Resistance training: - 4x/wk (40-50 min/session) - Supervised - Progressive (1 set of 15 repetitions at 40-50% of 1RM until 3 sets of 8-12 repetitions at 60-80% of 1RM) <u>Content:</u> - step up and down, prone leg curl, wrist leg curl, biceps curl, seated and supine triceps extension, standing calf/heel raise, wall push-up, knee flexion/extension shoulder press	No Exercise	Soy isolate protein: - 40 g of soy protein powder/day mixed in 200 ml - 250 ml milk twice a day

Abbreviations: d day, wk week, min minutes, RM Repetition Maximum, NR Not Reported

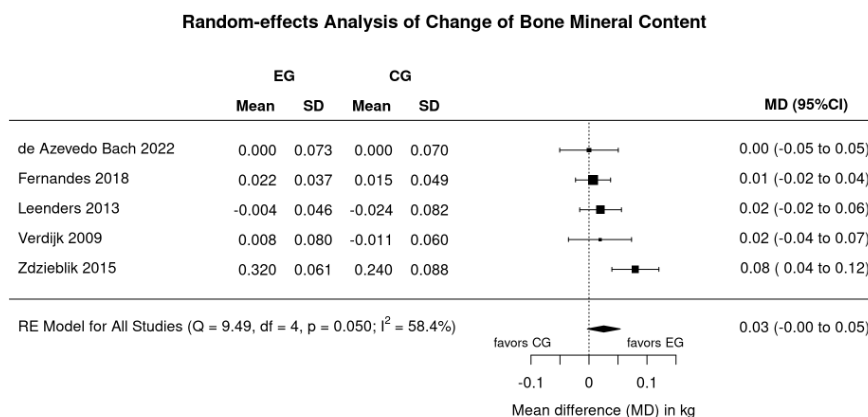
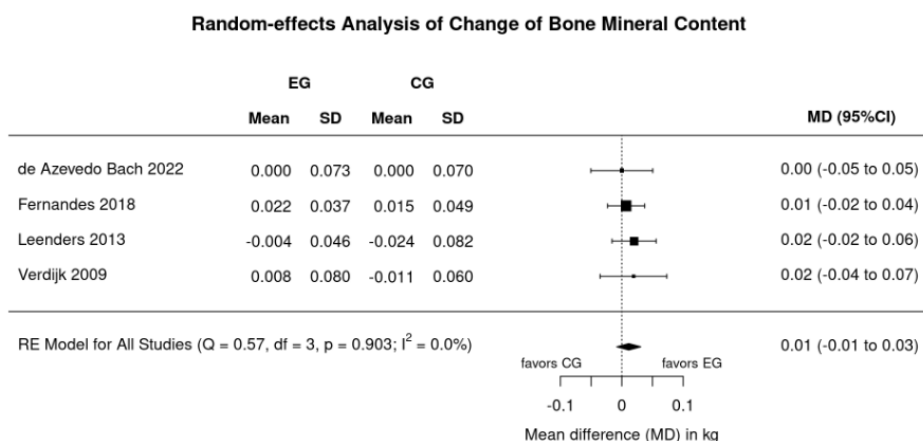


Abb. 59: Oben: Forest-plot der Studienergebnisse für Veränderungen des BMC durch Bewegungstraining + Proteinsupplementierung (EG) im Vergleich zu einmaligem Bewegungstraining (CG). Unten: Sensitivitätsanalyse ohne die Untersuchung von Zdzieblik et al. [493]



		Risk of bias domains					Overall
		D1	D2	D3	D4	D5	
Study	Amasene 2019 (BMC)	⊗	-	⊗	+	-	⊗
	De Azevedo Bach 2022 (BMC)	+	-	+	+	-	-
	Evans 2007 (BMD)	-	-	⊗	+	-	⊗
	Fernandes 2018 (BMC)	-	-	-	+	-	-
	Leenders 2013 (BMC)	-	-	+	+	-	-
	Roschel 2021 (BMD)	-	+	+	+	-	-
	Shenoy 2014 (BMD)	-	+	+	+	-	-
	Verdijk 2009 (BMC)	-	-	+	+	-	-
	Zdzieblik 2015 (BMC)	+	-	+	+	-	-

Domains:

D1: Bias arising from the randomization process.

D2: Bias due to deviations from intended intervention.

D3: Bias due to missing outcome data.

D4: Bias in measurement of the outcome.

D5: Bias in selection of the reported result.

Judgement

⊗ High

- Some concerns

+

Low

Abb. 60: Zusammenfassung der Bewertung des Verzerrungsrisikos der eingeschlossenen RCTs mit individueller Randomisierung (n=9) nach ROB II.

(7) Sturzprävention

Interaktiv kognitiv-motorisches Training (IKMT) verglichen mit aktiven oder passiven Kontrollen zur Reduktion von Stürzengrößen

Tab.58: Studien und Teilnehmercharakteristika der Untersuchung (Interaktives kognitiv-motorisches Training)

Author	year	Sample size (n)	Trial Location	Mean Age (years)	% women	Setting	Function	Falls risk	Inclusion criteria related to falls
Alagumoorthi, G.	2022	192	India	69,1±9,9	41	NR	TUG 57±53 s	y	Parkinson Disease
Duque, G.	2013	70	Australia	76,8±8,9	62	community	gait speed 0,8±0,3 ms	y	previous falls
Eggenberger, P.	2015	89	Switzerland	78,9±5,4	65	community & residence facil.	gait speed 1,2±0,5 ms	n	—
Fu, A.S.	2015	60	Hong-Kong	82,4±4,1	65	nursing home	TUG 19,3±3,1 s	y	previous falls
Gschwind, Y. J.	2015	153	GER, ESP, Australia	74,7±6,2	61	community	TUG 9,9±2,9 s	n	—
Hoang, P.	2024	462	Australia	52,3±11,6	79	community	gait speed 1,1±0,3 ms	y	Multiple Sclerosis
Hoang, P.	2015	50	Australia		76	community	gait speed 1,2±0,5 ms	y	MS
Kramer, A.	2014	61	Germany	47±9	72	rehabilitation facility	gait speed 1,2±0,2 ms	y	MS
Kwok, B. C.	2016	80	Singapore	70,2±7,1	85	community	TUG 12,0±5 s	y	frailty
Lauzé, M.	2017	42	Canada	81,2±7,2	78	assisted living facilities	TUG 12,1±2,7 s	y	assisted living
Mirelman, A.	2016	109	Belgium, Israel,	76±6	25	community	gait speed 1,1±0,25 ms	y	previous falls
		43	Italy, Netherlands,	78±5	48	community	gait speed 1,0±0,26 ms	y	previous falls
		130	UK	71±6	52	community	GS 0,97±0,28 ms	y	previous falls
Montero-Alía, P.	2019	977	Spain	75,3±5,9	59	community	POMA 27 (26–28)	n	—
EP da Fonseca, E.	2017	30	Brasil	52,4±8,9	63	community	DGI 14,8±5,3 points	y	hemiparesis (stroke)
Prvu Bettger, J.	2020	306	USA	65,3±8,5	63	community	gait speed 1,0±0,3 ms	y	Knee TEP
Rossi-Izquierdo, M.	2018	139	Spain	76,2±6,3	84	community	TUG 21,2±8,3 s	y	postural instability
Schoene, D.	2015	90	Australia	82±7	67	community	TUG 12,3±3,9	n	—
Song, J.	2018	60	Australia	67 ±7	60	community	TUG 9,6±2,3 s	y	PD
Stanmore, E. K.	2019	106	UK	77,9±9,5	78	assisted living facility	BBS 41±13 points	y	assisted living
Sturnieks, D.S.	2024	769	Australia	72,6±5,5	71	community	TUG 8,2±2,0 s	n	—
van der Kolk, N. M.	2019	130	Netherlands	59,3±8,8	39	community	TUG 8,6±0,5 s	y	PD
van der Kolk, N. M.	2018	37	Netherlands, USA	58,9±8,8	35	community	TUG 15,7±2,8 s	y	PD
Zhao	2023	50	China	72,7±3,5	58	care institution	NR	y	care home

Tab. 59: Interventionscharakteristika der vorliegenden Studie (Interaktives kognitiv-motorisches Training)

Author	IKMT intervention (type of exercise)	Length of intervention (weeks)	frequency per week (n)	Length of session (hours)	Delivery mode	Participants per instructor (n)	Individualized	progression	Physical co-intervention	Adherence (%)	Control interventions (type of exercise)
Alagumoorthi, G.	Wi Sports (6 games) and resort (2games)	12	3	0,58	2	1	n.r.	n.r.	yes	n.r.	conventional balance training
Duque, G.	Balance training, 30 min visual-vestibular rehabilitation+ postural training virtual exercises (3 exercises)	6	2	0,5	2	1	y	y	yes	97	usual falls prevention care (education, reaccommodation Otago...)
Eggenberger, P.	Video game dancing	26	2	0,33	1	6	y	y	yes	80	memory training and treadmill walking
Fu, A.S.	Wii fit inkl. balance board (3 games: soccer, table tilt, bubbles)	6	3	1	n.r.	n.r.	n.r.	y	n	93	conventional exercise
Gschwind, Y. J.	iStoppFalls: personal computer + Google TV set top box, Kinect, Seniore Mobility Monitor, tablet	16	3	1	2	1	y	y	n	n.r.	usual care and encouraged to follow habitual exercise routines
Hoang, P.	8 games, exergames step training, step mats	24	n.r.	n.r.	3	1	n	y	n.r.	n.r.	usual care
Hoang, P.	2 games, exergames step training, step mats	12	2	0,5	3	1	n	y	n	88	usual care
Kramer, A.	Wii sports/ Resorts/ Fit + posturomed (stance in progression)	3	3	0,5	2	1	y	y	n	95	posturomed + 5 exercises out of a pool of 15 exercises
Kwok, B. C.	Wii active exercise, balance board, resistance band	12	1	0,33	1	6	n	y	y	79	gymbased intervention
Lauzé, M.	Kinect (Jintronix)	12	2	0,75	3	1	y	y	n	89	no intervention
Mirelman, A.	Treadmill + VR	13,5	3	0,75	2	1	y	y	n.r.	n.r.	treadmill
Montero-Alía, P.	wiifit, 8 games, balance board	12	2	0,5	1	4	y	y	n	64	usual care: phys. activity, exercise, falls
EP da Fonseca, E.	wii	10	2	1	2	1	n.r.	y	y	n.r.	Stretching, trunk mobilization, active or assistive movement of legs, balance-, gait training
Prvu Bettger, J.	Virtual PT	12	5,9	n.r.	2	1	y	y	n	88	usual care
Rossi-Izquierdo, M.	"Smart equitest" computerized dynamic posturography	2	5	0,25	2	1	y	y	n	76	home exercise, passive (encouraged to walk) vestibular exercises
Schoene, D.	4 games, exergames step training, step mats	16	1,99	0,46	3	1	n	y	n	82	brochure, usual activities
Song, J.	1 game, exergames step training, step mats	12	2,6	0,25	3	1	n	y	n	86	no intervention

Author	IKMT intervention (type of exercise)	Length of intervention (weeks)	frequency per week (n)	Length of session (hours)	Delivery mode	Participants per instructor (n)	Individualized	progression	Physical co-intervention	Adherence (%)	Control interventions (type of exercise)
Stanmore, E. K.	Exergames (16 games: Balance, strength, co-ordination, flexibility)	12	2,08	0,24	2	1	y	y	n	88	usual care + incl. encouraged to do 3 Otago exercises)
Sturnieks, D.S.	8 games, exergames step training, step mats	48	n.r.	1,32	3	1	n	y	n	n.r.	seated brain training, touch pad stretching, flexibility and relaxation (strength, balance and endurance excluded)
van der Kolk, N. M.	Aerobic exercise on hometrainer + VR	24	2,25	0,63	2	1	y	y	y	75	usual physical activities
van der Kolk, N. M.	Aerobic exercise on hometrainer + VR	24	3	0,63	2	1	y	y	n	92	medium-intensity aerobic gymnastics and RT
Zhao	VR (mask, skiing, diving, running)	48	3	0,83	NR	NR	NR	NR	n	96	

Delivery mode: 1; group, 2: individually supervised 3: group supervised, 4: group and home training

Tab. 60: Assessment der Vertrauenswürdigkeit der Evidenz nach der GRADE Methodik (Interaktives kognitiv-motorisches Training)

Certainty assessment							Summary of findings				
Teilnehmende (Studien) Follow-up	Risk of bias	Inkonsistenz	Indirektheit	Impräzision	Publication bias	Overall certainty of evidence	Studien Ereignisraten (%)		Relativer Effekt (95%-KI)	Antizipierte absolute Effekte	
							mit aktiven oder passiven Kontrollen	mit IKMT		Risiko mit aktiven oder passiven Kontrollen	Risiko- differenz mit IKMT
Sturzrate (follow-up: range 3 months to 12 months; assessed with: number of falls per person per time)											
2701 (22 RCTs)	serious ^a	serious ^b	serious ^c	not serious	publication bias strongly suspected ^d	⊕○○○ Very low	3343/1473	2547/1228	IRR 0.75 (0.54 to 1.02)		*
Anteil Stürzer (follow-up: range 3 months to 12 months)											
2943 (17 RCTs)	serious ^e	serious ^f	serious ^c	serious ^g	none	⊕○○○ Very low	649/1635 (39.7%)	440/1308 (33.6%)	OR 0.72 (0.58 to 0.91)	397/1000	75 fewer per 1,000 (from 121 fewer to 22 fewer) NNT 13,3
Anteil wiederholte Stürzer (follow-up: range 3 months to 12 months)											
1799 (11 RCTs)	serious ^a	serious ^f	serious ^c	serious ^h	none	⊕○○○ Very low	266/1030 (25.8%)	224/769 (29.1%)	OR 0.97 (0.81 to 1.16)	258/1000	6 fewer per 1,000 (from 38 fewer to 29 more) NNT 166,7
Anteil Stürzer mit Verletzungen											
1458 (5 RCTs)	serious ^a	not serious	serious ^c	very serious ⁱ	none	⊕○○○ Very low	286/855 (33.5%)	195/603 (32.3%)	OR 0.92 (0.76 to 1.10)	335/1000	18 fewer per 1,000 (from 58 fewer to 22 more) NNT 55,6

Certainty assessment						Summary of findings					
----------------------	--	--	--	--	--	---------------------	--	--	--	--	--

Anteil Stürzer mit ernsthaften Verletzungen (follow-up: range 3 months to 12 months)

689 (3 RCTs)	serious ^a	not serious	serious ^c	serious ^g	none	⊕○○○ Very low	22/338 (6.5%)	12/351 (3.4%)	OR 0.51 (0.25 to 1.04)	65/1000	31 fewer per 1,000 (from 48 fewer to 2 more) NNT 32,3
-----------------	----------------------	-------------	----------------------	----------------------	------	------------------	------------------	------------------	----------------------------------	---------	---

Anteil Stürzer mit Frakturen (follow-up: range 3 months to 12 months)

1322 (4 RCTs)	serious ^a	not serious	serious ^c	serious ^g	none	⊕○○○ Very low	34/790 (4.3%)	14/532 (2.6%)	OR 0.57 (0.30 to 1.06)	43/1000	18 fewer per 1,000 (from 30 fewer to 2 more) NNT 55,6
------------------	----------------------	-------------	----------------------	----------------------	------	------------------	------------------	------------------	----------------------------------	---------	---

CI: confidence interval; **IRR:** incidence rate ratio; **OR:** odds ratio; **NNT:** number needed to treat

*Für Raten (kein binärer Endpunkt) wird kein absoluter Effekt berechnet

Explanations

- a. downgraded by 1 due to >2/3 of studies with some concerns in RoB rating
- b. downgraded by 1 due to several studies not crossing the relevant effect of IRR 0.8
- c. downgraded by 1 due to missing general population (no healthy middle-aged individuals; only diseased samples (PD, MS, stroke))
- d. downgraded by 1 due asymmetric funnel plot and significant mixed-effects Egger's test
- e. downgraded by 1 due to >1/3 of studies with high risk of bias and no changes in effect estimate in sensitivity analysis
- f. downgraded by 1 due to wide variance of point estimates
- g. downgraded by 1 due to CI crosses absolute effect MID towards a trivial effect
- h. downgraded by 1 due to CI crossing to potential harm
- i. downgraded by 2 due to CI crossing meaningful and harmful effect

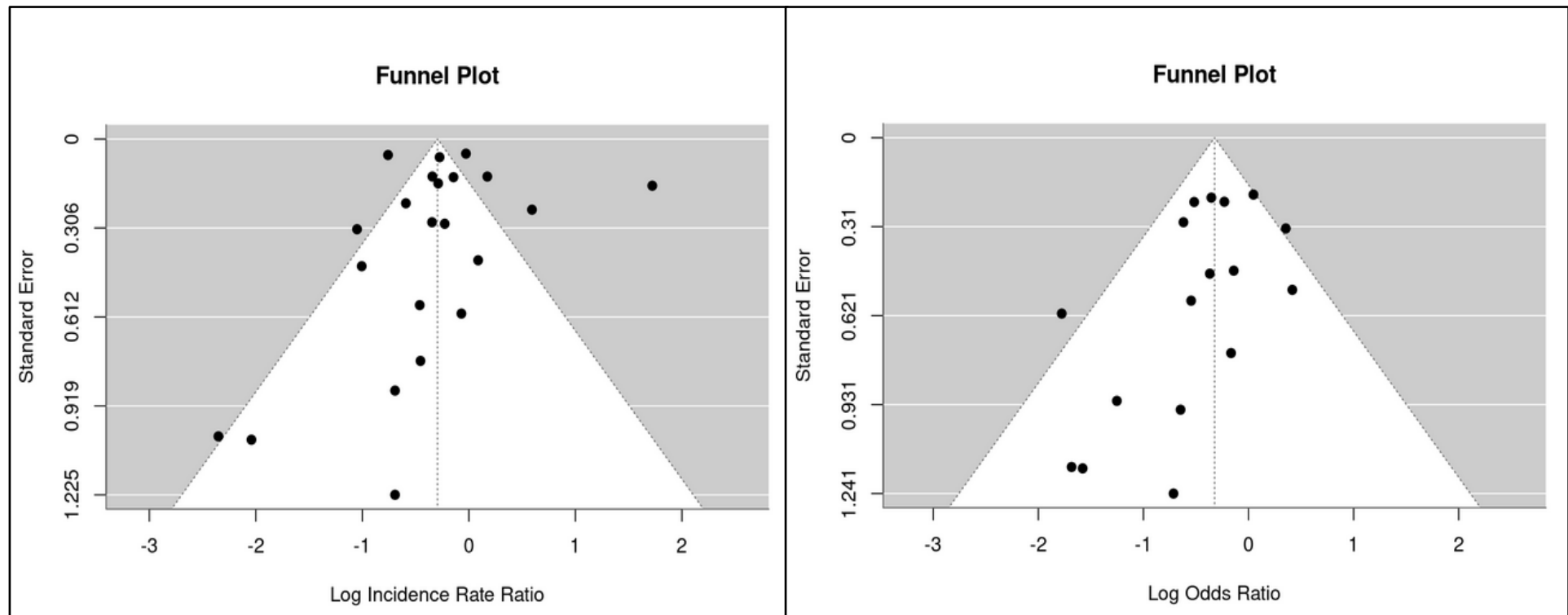


Abb. 61: Funnelplot der Ergebnisse Einfluss von Interaktivem kognitiv-motorischem Trainings auf die Sturzrate (links) und die Anzahl der Stürzenden (rechts)

8.) Methodische Studienqualität der für die Leitlinie erstellten systematischen Übersichtsarbeiten und Meta-Analysen

R-AMSTAR [32] Bewertungskriterien und Checkliste (<https://www.perosh.eu/wp-content/uploads/2014/02/R-AMSTAR-Checklist-OSH-Evidence.pdf>)

How to use the R-AMSTAR tool?

The tool contains 11 questions with regard to the quality of the review. These questions are in the left column. Based on the criteria mentioned in the right column, every question should be assigned a score from 1 to 4. The sum of all scores is the overall quality score of the systematic review.

AMSTAR items	Criteria
1. Was an "a priori" design provided? The research question and inclusion criteria should be established before the conduct of the review.	A A clearly focused (PICO-based) question B Description of inclusion criteria C Study protocol is published and/or registered in advance 3 criteria → 4, 2 → 3, 1 → 2, 0 → 1
Explanation: A. It should be explicitly mentioned that a protocol was published or registered, for example in PROSPERO an online international prospective register of systematic reviews. C. The question contains Population, Intervention/exposure, Comparator/control and Outcome.	
2. Was there duplicate study selection and data extraction? There should be at least two persons who independently extracted data and a consensus procedure for disagreements should be in place.	A At least two persons independently extracted the data, explicitly stated B Statement of consensus procedure for disagreements C Disagreements among extractors resolved properly as stated or implied 3 criteria → 4, 2 → 3, 1 → 2, 0 → 1
3. Was a comprehensive literature search performed? At least two electronic sources should be searched. The report must include years and databases used (e.g., Central, EMBASE, and MEDLINE). Key words and/or MESH terms must be stated, and where feasible, the search strategy should be provided. All searches should be supplemented by consulting current contents, reviews, textbooks, specialized registers, or experts in the particular field of study, and by reviewing the references in the studies found.	A At least two electronic sources are searched B Years and databases used are mentioned C Key words and/or MESH terms are stated and where feasible the search strategy outline is provided D Searches should be supplemented by consulting current contents, reviews, textbooks, registers and by reviewing the references in the studies found E Journals are hand-searched or manual searched 4 or 5 criteria → 4, 3 → 3, 2 → 2, 1 or 0 → 1
Explanation: E. hand-searched means identifying highly relevant journals and conducting a manual, page-by-page search of their contents looking for potentially eligible studies.	
4. Was the status of publication (i.e., grey literature) used as an inclusion criterion? The authors should state that they searched for reports regardless of their publication type. The authors should state whether or not they excluded any reports (from the systematic review), based on their publication status, language etc.	A The authors state that they searched for reports regardless of their publication type. B The authors state whether or not they excluded any reports based on their publication status, language etc. C "Non-English papers were translated" or readers sufficiently trained in foreign language D No language restriction or recognition of non-English articles 3 or 4 criteria → 4, 2 → 3, 1 → 2, 0 → 1

AMSTAR items	Criteria
5. Was a list of studies (included and excluded) provided? A list of included and excluded studies should be provided.	A Table/list/figure of included studies, a reference list does not suffice B Table/list/figure of excluded studies either in the article or in a supplemental source C Satisfactory/sufficient statement of the reason for exclusion of the seriously considered studies D Reader is able to retrace the included and the excluded studies anywhere in the article bibliography, reference or supplemental source 4 criteria → 4, 3 → 3, 2 → 2, 1 → 1
Explanation: "Excluded studies" refers to those studies seriously considered on the basis of title and/or abstract, but rejected after reading the body of the text.	
6. Were the characteristics of the included studies provided? In an aggregated form, such as a table, data from the original studies should be provided on the participants, interventions/exposure, and outcomes. The ranges of characteristics in all the studies analyzed, e.g., age, race, sex, relevant socioeconomic data, disease status, duration, severity, or other diseases should be reported.	A In an aggregated form such as a table, data from the original studies are provided on the participants, interventions/exposure and outcomes B Ranges are provided of the relevant characteristics in the studies analyzed C The information provided appears to be complete and accurate 3 criteria → 4, 2 → 3, 1 → 2, 0 → 1
7. Was the scientific quality of the included studies assessed and documented? "A priori" methods of assessment should be provided (e.g., for effectiveness studies if the author(s) chose to include only randomized, double-blind, placebo-controlled studies, or allocation concealment as inclusion criteria); for other types of studies, alternative items will be relevant.	A "A priori" methods are provided B The scientific quality of the included studies appears to be meaningful C Discussion/recognition/awareness of level of evidence is present D Quality of evidence is rated/ranked base on characterized instruments 4 criteria → 4, 3 → 3, 2 → 2, 1 or 0 → 1
Explanation: D. A characterized instrument is a created instrument that ranks the level of evidence, e.g. GRADE [Grading of Recommendations Assessment, Development and Evaluation].	
8. Was the scientific quality of the included studies used appropriately in formulating conclusions? The results of the methodological rigor and scientific quality should be considered in the analysis and the conclusions of the review, and explicitly stated in formulating recommendations.	A The scientific quality is considered in the analysis and the conclusions of the review B The scientific quality is explicitly stated in formulating recommendations C Conclusions integrated/drives towards practice guidelines D Clinical consensus statement drives toward revision or confirmation of practice guidelines 4 criteria → 4, 3 → 3, 2 → 2, 1 or 0 → 1
9. Were the methods used to combine the findings of studies appropriate? For the pooled results, a test should be done to ensure the studies were combinable, to assess their homogeneity (i.e., Chi-squared test for homogeneity, I^2). If heterogeneity exists, a random effects model should be used and/or the clinical appropriateness of combining should be taken into consideration (i.e., is it sensible to combine?).	A Statement of criteria that were used to decide that the studies analyzed were similar enough to be pooled B For the pooled results, a test is done to ensure the studies were combinable, to assess their homogeneity C a recognition of heterogeneity or lack of thereof is present D If heterogeneity exists a 'random effects model' is used and/or the

AMSTAR items	Criteria
10. Was the likelihood of publication bias assessed? An assessment of publication bias should include a combination of graphical aids (e.g., funnel plot, other available tests) and/or statistical tests (e.g., Egger regression test).	rationale of combining is taken into consideration E If homogeneity exists, author state a rationale or a statistical test 4 or 5 criteria → 4, 3 → 3, 2 → 2, 1 or 0 → 1
	A Recognition of publication bias or file-drawer effect B Graphical aids (e.g. funnel plot) C Statistical tests (e.g. Egger regression test) 3 criteria → 4, 2 → 3, 1 → 2, 0 → 1
	A Statement of sources of support B No conflict of interest. This is subjective and may require some deduction or searching. C An awareness/statement of support or conflict of interest in the primary inclusion studies 3 criteria → 4, 2 → 3, 1 → 2, 0 → 1
11. Was the conflict of interest included? Potential sources of support should be clearly acknowledged in both the systematic review and the included studies.	

Maximum quality score sum: 44

Tab. 61: Bewertung der Studienqualität der erstellten systematischen Übersichten und Meta-Analysen gemäß R-AMSTAR [32]

No	Study name	1. Was an a priori' design provided	2. Was there duplicate study selection and data extraction	3. Was a comprehensive literature search performed	4. Was the status of publication (i.e. grey literature) used as an inclusion criterion	5. Was a list of studies (included and excluded) provided	6. Were the characteristics of the included studies provided	7. Was the scientific quality of the included studies assessed and documented	8. Was the scientific quality of the included studies used appropriately in formulating	9. Were the methods used to combine the findings of studies appropriate	10. Was the likelihood of publication bias assessed	11. Was the conflict of interest included	Total score (of 44 Scorepoints)
1	Körperliches Training undFrakturen [16,17]	4	4	4	4	2	4	3	2	4	3	4	38
2	...Effekte bei postmenopausale Frauen [18]	4	4	4	3	2	4	3	2	4	3	4	37
3	... Effekte bei Männern [19]	4	4	4	4	2	4	3	2	4	3	4	38
4	...Glucocorticoid-induzierte Osteoporose [20]	4	4	4	4	2	4	3	2	4	3	4	38
5	Effektive Trainingsinhalte [21]	2	4	4	2	2	4	3	2	4	3	4	34
6	Effekte von Wassergymnastik [23]	4	4	4	4	2	4	3	2	4	3	4	38
7	Relevanz von Trainingsmitteln [22]	4	4	4	2	2	4	3	2	4	3	4	36
8	Relevanz der Trainingshäufigkeit [24]	4	4	4	4	2	4	3	2	4	3	4	38
9	Relevanz der Reizhöhe [25]	4	4	4	4	2	4	3	2	4	3	4	38
10	Bisphosphonate & "exercise"[27]	4	4	4	4	2	4	3	2	4	3	4	38
11	Hormon Ersatz Therapie & "exercise" [26]	4	4	4	4	2	4	3	2	4	3	4	38
12	"exercise" & Vitamin-D [29]	4	4	4	4	2	4	3	2	4	3	4	38
13	Körperliches Training und Proteingabe [30]	4	4	4	4	4	4	4	3	4	4	4	43
14	Interaktives kognitiv-motorisches Trainings*	4	4	4	4	4	4	4	3	4	4	4	43

***Derzeit noch nicht publiziert**

12.Übersicht Interessenkonflikte

Declaration of interests and management of conflicts of interest (<https://interessenerklaerung-online.awmf.org/leitlinien/IKE1037/ike-verwaltung>)

In the following, the declarations of interests are presented as a tabular summary together with the results of the conflict of interest assessment. It includes resulting consequences that were decided by the guideline group after discussion of the issues.

Guideline coordination: Kemmler, Wolfgang

Guideline: Körperliches Training zur Frakturprophylaxe

Registry number: 183-002

	Work as consult/expert	Work in a Scientific Advisory Board	Paid role as lecturer and/or educator	Paid authorship and/or co-authorship	Research projects/ conducting clinical trials)	Proprietary interests (patent, copyright law, share ownership)	Indirect interests	Guideline topics affected by conflicts of interest, Classification by relevance, Consequence
Professor Dr. Becker, Clemens	EFPIA Mobilise-D Konsortium	keine	Amgen, Novartis	No	keine	keine	Member: keine, Scientific activity: Validierung digitaler Biomarker der Mobilität, Clinical activity: keine, Participation in education/training: keine, Personal relationships: keine	COL: none: none
Büttner, Carl Christopher	No	No	No	No	No	No	Scientific activity: Mandatsträger für weitere Leitlinien	COL: none: none
Dr. Clausen, Jürgen	No	No	No	No	No	No	Member: Deutsche Rheuma-Liga Bundesverband e.V.	COL: none: none
Dr. Degenhardt, Stefan	No	No	No	No	No	No	No	COL: none: none
Dr. Eva, Kiesswetter	No	No	No	No	No	No	No	COL: none: none COL: none: none
Univ.-Prof. Dr.med.univ. Gosch, Markus	IQTIG	UCB, DGG, DGG, Intercongress, DGG, DGG, DGG, DGG, DGG	AO Foundation, Pfizer, Bayer, BMS, KH Fürth, Sanofi, Pfizer, Pfizer, Pfizer, DKOU, Amgen, Grünenthal, Pfizer, Amgen, BMS, Amgen,	Mediengruppe Oberfranken, Infektopharm, Thieme Verlag	No	No	No	COL: none: none none COL: none: none

	Work as consult/expert	Work in a Scientific Advisory Board	Paid role as lecturer and/or educator	Paid authorship and/or co-authorship	Research projects/ conducting clinical trials)	Proprietary interests (patent, copyright law, share ownership)	Indirect interests	Guideline topics affected by conflicts of interest, Classification by relevance, Consequence
			Grand Concept, Amgen, AUC, AGATE, BMS, Bethesda Klinik Ulm, Pfizer, AUC, Novartis					
Prof.Dr. Hadji, Peyman	No	No	No	No	No	No	Member: Vorstand Dachverband Osteologie (DVO), Scientific activity: Osteoporose , Clinical activity: Osteoporose	COL: none: none
Prof.Dr. Jakob, Franz	Amgen, Alexion, Novo Nordisk Foundation, German Research Society DFG, European Commission EMA	Amgen, Alexion	Alexion, Amgen, Bund der Internisten BDI, Lilly, Gedeon-Richter	No	Amgen, Alexion, Novartis	No	Member: Bund der Internisten BDI, Member: Deutsche Gesellschaft für Osteologie, Member: Deutsche Akademie der osteologischen und rheumatologischen Wissenschaften , Scientific activity: Bone Metabolism, Osteoporosis, Rare Bone Diseases, Skeletal Metastases, Tissue Regeneration including Mesenchymal Stem Cell Research, Muscle wasting and sarcopenia, Exercise and bone and muscle maintenance , Clinical activity: Osteology Outpatient Clinics, Participation in education/training: Julius Maximilians University of Wuerzburg, Medical Faculty,	COL: none: none COL: none: none none COL: none: none COL: none: none
Frau Kast, Stephanie	No	No	No	No	No	No	No	COL: none: none COL: none: none
Professor Dr. Katharina, Kersch-Schindl	Med Media Verlag und Mediaservice	Gedeon Richter, Stada	Amgen, Forum für medizinische Fortbildung, OSTAK, Ärztekammer für Niederösterreich	No	No	No	Member: Österreichische Gesellschaft zur Erforschung des Knochen- und Mineralstoffwechsels, Scientific activity: Osteoimmunologie, Immobilisation, körperliche Aktivität, Knochenstoffwechsel, Clinical activity: FÄ für Physikalische Medizin Rehabilitation, Participation in education/training: Arznei und Vernunft, Personal relationships: keine	COL: none: none
Prof. Dr. Kemmler, Wolfgang	keine	keine	keine	keine	keine	keine	Member: Deutsche Akademie der osteologischen und rheumatologischen Wissenschaften e.V. , Scientific activity: körperliches Training und Gesundheit, alternative Trainingstechnologien, Alterssport, Clinical activity: Osteologie, Gerontologie, Participation in education/training: Ausbildungsleiter Orthopädie, Behinderten und	COL: none: none

	Work as consult/expert	Work in a Scientific Advisory Board	Paid role as lecturer and/or educator	Paid authorship and/or co-authorship	Research projects/ conducting clinical trials)	Proprietary interests (patent, copyright law, share ownership)	Indirect interests	Guideline topics affected by conflicts of interest, Classification by relevance, Consequence
							Rehabilitationssportverband Bayern e.V., Personal relationships: nein	
Prof. Dr. med. Kladny, Bernd	Grünenthal	No	No	No	No	No	Member: 2015 Generalsekretär der Deutschen Gesellschaft für Orthopädie und Unfallchirurgie (DGOU e.V.) 2016–2017 stv. Generalsekretär der Deutschen Gesellschaft für Orthopädie und Unfallchirurgie (DGOU e.V.) 2018–2019 Generalsekretär der Deutschen Gesellschaft für Orthopädie und Unfallchirurgie (DGOU e.V.) Seit 2015 Vizepräsident der Deutschen Hüftgesellschaft (DHG e.V.) Seit 2015 Mitglied Vorstand der Deutschen Gesellschaft für Chirurgie (DGCH e.V.) Seit 2015 Generalsekretär der Deutschen Gesellschaft für Orthopädie und Orthopädische Chirurgie (DGOOC e.V.) Seit 2020 stv. Generalsekretär der Deutschen Gesellschaft für Orthopädie und Unfallchirurgie (DGOU e.V.) 2022–2023 Generalsekretär der Deutschen Gesellschaft für Orthopädie und Unfallchirurgie (DGOU e.V.) DHG (Deutsche Hüftgesellschaft e. V.) Vizepräsident DGCh (Deutsche Gesellschaft für Chirurgie e. V.) Vorstandsmitglied DGIHV (Deutsche Gesellschaft für interprofessionelle Hilfsmittelversorgung e. V.) Vorstandsmitglied ANO (Arbeitsgemeinschaft Nicht- operativer Orthopädischer Akut-Kliniken e. V.) Beirat DWG (Deutsche Wirbelsäulengesellschaft e. V.) Mitglied Referat Wirbelsäule des Berufsverbandes Deutscher Neuro-chirurgen (BDNC) und des Berufsverbandes Orthopädie und Unfallchirurgie (BVOU) Mitglied Verband Ltd. Orthopäden und Unfallchirurgen (VLOU) LV Bayern Mitglied Sektion Rehabilitation – Physikalische Medizin – der DGOU Mitglied IGOST (Interdisziplinäre Gesellschaft für orthopädische/unfallchirurgische und allgemeine	COI: none: none

	Work as consult/expert	Work in a Scientific Advisory Board	Paid role as lecturer and/or educator	Paid authorship and/or co-authorship	Research projects/ conducting clinical trials)	Proprietary interests (patent, copyright law, share ownership)	Indirect interests	Guideline topics affected by conflicts of interest, Classification by relevance, Consequence
							Schmerztherapie e. V.) Mitglied Ausschuss Fort- und Weiterbildung der DGOU Mitglied Ausschuss Versorgung und Qualität der DGOU Mitglied VTO (Vereinigung für Technische Orthopädie e. V.) Mitglied DGRh (Deutsche Gesellschaft für Rheumatologie e. V.) Mitglied DGORh (Deutsche Gesellschaft für Orthopädische Rheumatologie e. V.) Mitglied DGPMR Mitglied DGMM (Deutsche Gesellschaft für Manuelle Medizin e. V.) Mitglied VSOU (Vereinigung Süddeutscher Orthopäden und Unfallchirurgen e. V.) Mitglied Rheumazentrum Erlangen Mitglied OGO (Orthopädische Gesellschaft für Osteologie e. V.) Mitglied REKO Nordbayern (Regionale Expertenkreise Osteoporose) Mitglied, Scientific activity: entsprechend Publikationsverzeichnis, Clinical activity: konservative Orthopädie und Unfallchirurgie; Rehabilitation; Frührehabilitation, Participation in education/training: Deutscher Kongress Orthopädie und Unfallchirurgie; Akademie Orthopädie und Unfallchirurgie, Personal relationships: nein	
Dr. Kleinöder, Heinz	keine	keine	keine	keine	keine	keine	Member: keine, Scientific activity: Training und Leistung, Clinical activity: Trainingswissenschaft, Participation in education/training: A-Trainer-Ausbildung beim DTB Trainerakademie Ausbildung, Personal relationships: nein	COL: none: none
Klößner, Nicole	No	No	No	No	No	No	Member: Leitlinie Schulterimpingement, Member: Leitlinie Frakturprophylaxe	COL: none: none
Professor Dr. Kohl, Matthias	No	No	No	No	No	No	Scientific activity: Biostatistik, Bioinformatik, Data Science	COL: none: none
Univ.-Prof. Dr. Lange, Uwe	No	No	Rheuma-Akademie; Akademie der DGPRM	No	No	No	No	COL: none: none
Prof. Dr. med. Meyer-Olson,	No	No	Novartis, No	No	No	n/a	Member: Deutsche Gesellschaft für Rheumatologie/Sprecher der Kommission	COL: none: none

	Work as consult/expert	Work in a Scientific Advisory Board	Paid role as lecturer and/or educator	Paid authorship and/or co-authorship	Research projects/ conducting clinical trials)	Proprietary interests (patent, copyright law, share ownership)	Indirect interests	Guideline topics affected by conflicts of interest, Classification by relevance, Consequence
Dirk							Rehabilitation, Physikalische Medizin und Sozialmedizin	
Dr. med Middeldorf, Stefan	No	No	No	No	No	No	Clinical activity: Rehabilitation, Begutachtung, Schmerztherapie	COI: none: none
Dr. Peters, Stefan	No	No	DAK-Gesundheit, IST-Hochschule Düsseldorf	No	Universität Tübingen, AOK, Techniker Krankenkasse, weitere Konsortialpartner, DAK-Gesundheit	No	Member: Gesellschaft für Versicherungswissenschaft und -gestaltung (GVG) e. V.; Aktives Mitglied in Arbeitsgruppen, Member: Deutsches Netzwerk Versorgungsforschung (DNVF) e. V. Stellvertretende Sprecherrolle der AG Bewegungsbezogene Versorgungsforschung , Member: Bundesvereinigung Prävention und Gesundheitsförderung (BVPF) e. V.; Aktives Mitglied, z. B. Veranstaltung von Symposien, Member: Deutsche Gesellschaft für Rehabilitationswissenschaften (DGRW) e. V.; Aktives Mitglied in Arbeitsgruppen, Member: Deutsche Gesellschaft für Medizinische Rehabilitation (DEGEMED) e.V.; Aktives Mitglied in Arbeitsgruppen, Member: Arbeitsgruppe Bewegungsförderung im Alltag (Bundesministerium für Gesundheit); Aktive AG-Mitarbeit, Member: Konföderation der deutschen Rückenschulen (KddR) e. V.; Aktives Mitglied, Scientific activity: Schriftleitung der Zeitschrift Bewegungstherapie und Gesundheitssport (Thieme, Stuttgart), Scientific activity: Co-Autorenschaft bei Publikationen zum Projekt ImPuls - Bewegungstherapie bei psychischen Erkrankungen. Z.B.: Wolf, S., Seiffer, B., Zeibig, J. M., Welkerling, J., Bauer, L. L., Frei, A. K., Studnitz, T., Rosenstiel, S., Fiedler, D. V., Helmholt, F., Ray, A., Herzog, E., Takano, K., Nakagawa, T., Kropp, S., Franke, S., Peters, S., El-Kurd, N., Zwanzleitner, L., Sundmacher, L., ... Ehring, T. (2021). Efficacy and cost-effectiveness of a Transdiagnostic group-based exercise intervention: study protocol for a pragmatic multi-site randomized controlled trial. BMC	COI: none: none

	Work as consult/expert	Work in a Scientific Advisory Board	Paid role as lecturer and/or educator	Paid authorship and/or co-authorship	Research projects/ conducting clinical trials)	Proprietary interests (patent, copyright law, share ownership)	Indirect interests	Guideline topics affected by conflicts of interest, Classification by relevance, Consequence
							psychiatry, 21(1), 540. https://doi.org/10.1186/s12888-021-03541-3 , Scientific activity: Co-Autorenschaft bei einer Vielzahl von Publikationen, welche bereits aus der Leitlinienarbeit zur vorliegenden LL entstanden sind. Zum Beispiel: Zitzmann, A. L., Shojaa, M., Kast, S., Kohl, M., von Stengel, S., Borucki, D., Gosch, M., Jakob, F., Kersch-Schindl, K., Kladny, B., Lange, U., Middeldorf, S., Peters, S., Schoene, D., Sieber, C., Thomasius, F., Uder, M., Kemmler, W. (2022). The effect of different training frequency on bone mineral density in older adults. A comparative systematic review and meta-analysis. Bone, 154, 116230., Participation in education/training: Der Deutsche Verband für Gesundheitssport und Sporttherapie unterhält neben anderen Tätigkeitsfeldern auch Fort- und Weiterbildungen	
Herr Sahar, Jamil	keine	keine	keine	keine	keine	keine	Member: Geschäftsführer Behinderten und Rehabilitations-Sportverband Bayern e.V., Scientific activity: keine, Clinical activity: keine, Participation in education/training: Geschäftsführer Behinderten und Rehabilitationssportverband Bayern e.V. u. a. verantwortlich für Rehabilitationssport Ausbildung in Bayern, Personal relationships: nein	COI: none: none
AWMF Moderation Schwier, Frauke	keine	keine	DGKiM e.V.	Institut für Sozialarbeit und Sozialpädagogik e.V.	DGKiM e.V., German Cancer Aid Foundation, German Federal Joint Committee independent Funding Programme for Clinical Practice Guidelines developed under the auspices of	keine	Member: DGKiM e.V. DGfPI e.V. DGKCH e.V.	COI: none: none

	Work as consult/expert	Work in a Scientific Advisory Board	Paid role as lecturer and/or educator	Paid authorship and/or co-authorship	Research projects/ conducting clinical trials)	Proprietary interests (patent, copyright law, share ownership)	Indirect interests	Guideline topics affected by conflicts of interest, Classification by relevance, Consequence
					AWMF member societies, German Ministry for Education and Research (BMBF)			
Dr. Schöne, Daniel	No	No	No	No	Techniker Krankenkasse, Federal Ministry of Education and Research, Elsbeth Bonhoff Foundation	No	Member: German Society for Gerontology and Geriatrics e.V. (DGGG), Member: Federal initiative for fall prevention (BIS), Scientific activity: European Geriatric Medicine Society (EuGMS) special interest group "Systematic Review and Meta Analysis" , Clinical activity: European Geriatric Medicine Society (EuGMS) special interest group "Falls and Fractures"	COI: none: none
Dr. Shojaa, Mahdiah	No	No	No	No	No	No	No	COI: none: none COI: none: none
Professor Dr. Sieber, Cornel	No	No	No	No	No	No	No	COI: none: none
Dr. Thomasius, Friederike	Theramex, Gedeon Richter	Kyowa Kirin	Amgen, UCB, Stadapharm, Das Fortbildungs-kolleg	No	Novartis	No	Member: [Vorsitzende der Leitlinienkommission des Dachverbandes Osteologie', 'Co-Editorin und Section Editorin der Zeitschrift Osteologie, Thieme Verlag], Scientific activity: Publikationen zum Thema Leitlinien Update in der Zeitschrift OSTEOLOGIE einmal pro Quartal, Scientific activity: Mitgliedschaft Deutsche Gesellschaft für Osteologie, Präsidentin der Deutschen Gesellschaft für Osteologie seit Juni 2023, Scientific activity: Mitgliedschaft deutsche Gesellschaft für Rheumatologische und osteologische Wissenschaften (DAdorW), Scientific activity: Mitglied der American Society of Bone and Mineral Research, Scientific activity: Mitglied des Scientific Advisory Boards der European Society for Clinical and Economic Aspects of Osteoporosis, Osteoarthritis and Musculoskeletal Diseases ESCEO, Clinical activity: Arbeit im Frankfurter Hormon Osteoporosezentrum, Betreuung, Diagnostik und Therapie von Patient*innen mit osteologischen Erkrankungen, v.a. Osteoporose,	COI: none: none

	Work as consult/expert	Work in a Scientific Advisory Board	Paid role as lecturer and/or educator	Paid authorship and/or co-authorship	Research projects/ conducting clinical trials)	Proprietary interests (patent, copyright law, share ownership)	Indirect interests	Guideline topics affected by conflicts of interest, Classification by relevance, Consequence
							Leitung klinische Osteologie, Participation in education/training: Osteologie Akademie (OSTAK), Personal relationships: Zeitschrift OSTEOLOGIE Co-Editor und Section Editor	
PD Dr. von Stengel, Simon	No	No	No	No	No	No	No	COI: none: none

¹ Here, the summary table only includes the details determined to be thematically related to the guideline after the guideline development group discussed and evaluated the facts fully disclosed to the AWMF in the corresponding form. The completed declarations will be filed with the guideline secretariat.

Zusammenfassend wurde für keinen der oben genannten Beteiligten ein Interessenkonflikt mit Themenbezug zur vorliegenden Leitlinie erfasst.

13. Literatur

1. Kanis JA, Johnell O, Oden A et al. FRAX and the assessment of fracture probability in men and women from the UK. *Osteoporos Int* 2008; 19: 385-397.
2. DVO. *Leitlinie Physiotherapie und Bewegungstherapie bei Osteoporose* 2008.
3. Weineck J, Kemmler W, Fröhlich M. Trainingsziele, -inhalte, -mittel und -methoden im Sport. In *Bewegung, Training, Leistung und Gesundheit.*, Güllich, A., Krüger, M., Eds.; Springer: Berlin, Heidelberg, Germany, 2022.
4. Haussler B, Gothe H, Gol D et al. Epidemiology, treatment and costs of osteoporosis in Germany-the BoneEVA Study. *Osteoporos Int* 2007; 18: 77-84.
5. Compston JE, McClung MR, Leslie WD. Osteoporosis. *Lancet* 2019; 393: 364-376.
6. Bleibler F, Konnopka A, Benzinger P et al. The health burden and costs of incident fractures attributable to osteoporosis from 2010 to 2050 in Germany-a demographic simulation model. *Osteoporos Int* 2013; 24: 835-847.
7. Greß S, Jesberger C. Strukturdefizite in der Finanzierung der gesetzlichen Krankenversicherung. *IFO-Schnelldienst* 2022; 75: 3-6.
8. Beck BR, Daly RM, Singh MA et al. Exercise and Sports Science Australia (ESSA) position statement on exercise prescription for the prevention and management of osteoporosis. *J Sci Med Sport* 2016; 20: 438-445.
9. de Souto Barreto P, Rolland Y, Vellas B et al. Association of Long-term Exercise Training With Risk of Falls, Fractures, Hospitalizations, and Mortality in Older Adults: A Systematic Review and Meta-analysis. *JAMA Intern Med* 2019; 179: 394-405.
10. Kemmler W, Haberle L, von Stengel S. Effects of exercise on fracture reduction in older adults : A systematic review and meta-analysis. *Osteoporos Int* 2013; 24: 1937-1950.
11. Wang Q, Jiang X, Shen Y et al. Effectiveness of exercise intervention on fall-related fractures in older adults: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *BMC Geriatr* 2020; 20: 322.
12. Hamilton BR, Staines KA, Kelley GA et al. The Effects of Exercise on Bone Mineral Density in Men: A Systematic Review and Meta-Analysis of Randomised Controlled Trials. *Calcif Tissue Int* 2022; 110: 41-56.
13. Shojaa N, von Stengel S, Schoene D et al. Effect of exercise training on bone mineral density in postmenopausal women: A systematic review and meta-analysis of intervention studies. *Front Physiol* 2020; 11: 1427–1444.
14. Sherrington C, Fairhall NJ, Wallbank GK et al. Exercise for preventing falls in older people living in the community. *Cochrane Database Syst Rev* 2019; 1: CD012424.
15. Giangregorio LM, Ponzano M. Exercise and physical activity in individuals at risk of fracture. *Best Pract Res Clin Endocrinol Metab* 2022; 36: 101613.
16. Hoffmann I, Shojaa M, Kohl M et al. Exercise reduces the number of overall and major osteoporotic fractures in adults. Does supervision make a difference? Systematic review and meta-analysis. *JBMR* 2022; 37: 2132–2148.
17. Hoffmann I, Kohl M, von Stengel S et al. Exercise and the prevention of major osteoporotic fractures in adults: a systematic review and meta-analysis with special emphasis on intensity progression and study duration. *Osteoporos Int* 2022; 4: 15-28.
18. Mohebbi R, Shojaa M, Kohl M et al. Exercise training and bone mineral density in postmenopausal women: An updated systematic review and meta-analysis of intervention studies with emphasis on potential moderators. *Osteo Int* 2023; 34: 1145-1178.
19. Mages M, Shojaa M, Kohl M et al. Exercise Effects on Bone Mineral Density in Men. *Nutrients* 2021; 13: 4244.

20. Kast S, Jakob F, Kohl M et al. Exercise effects on glucocorticoid induced bone loss in adults. A systematic review and meta-analysis. *Rheumatology* 2023; 6: 1.
21. Kemmler W, Shojaa M, Kohl M et al. Effects of Different Types of Exercise on Bone Mineral Density in Postmenopausal Women: A Systematic Review and Meta-analysis. *Calcif Tissue Int* 2020; 107: 409-439.
22. Shojaa M, von Stengel V, Kohl M et al. Effects of dynamic resistance exercise on Bone Mineral Density in postmenopausal women- A systematic review and meta-analysis with special emphasis to exercise parameters. *Osteo Int* 2020; 31: 1427–1444.
23. Schinzel E, Kast S, Kohl M et al. The effect of aquatic exercise on bone mineral density in older adults. A systematic review and meta-analysis. *Front Physiol* 2023; 13:
24. Zitzmann AL, Shojaa M, Kast S et al. The effect of different training frequency on bone mineral density in older adults. A comparative systematic review and meta-analysis. *Bone* 2022; 154: 116230.
25. Kast S, Shojaa M, Kohl M et al. Effects of different exercise intensity on bone mineral density in adults: a comparative systematic review and meta-analysis. *Osteoporos Int* 2022; 33: 1643-1657.
26. Born C, Jakob F, Shojaa M et al. Effects of hormone therapy and exercise on bone mineral density in healthy women - A systematic review and meta-analysis. *J Clin Endocrinol Metab* 2022; 107: 2389-2401.
27. Klotz C, Jakob F, Kohl M et al. Effects of exercise and bisphosphonate-therapy on bone mineral density in healthy women – A systematic review and meta-analysis. *Osteology* 2022; 31: 184-195.
28. Kaiser S, Schoene D, Jakob F et al. Efficacy of physical activity and exercise interventions in patients with osteoporosis receiving pharmaceuic therapy with denosumab, romosozumab, abaloparatide or teriparatide. A systematic review. *SM Journal of Orthopedics* 2024; 7: 1-6.
29. Fischer C, Jakob F, Kohl M et al. Additive Effects of Exercise and VitaminD Supplementation (with and without Calcium) on Bone Mineral Density in Older Adults: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Journal of Osteoporosis* 2023; 5570030,;
30. Wolf J, Schoene D, Kohl M et al. Effects of combined protein and exercise interventions on bone health in middle-aged and older adults – a systematic literature review. *Osteo Int* 2025; online first.
31. Page MJ, McKenzie JE, Bossuyt PM et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ* 2021; 372: 71.
32. Kung J, Chiappelli F, Cajulis OO et al. From Systematic Reviews to Clinical Recommendations for Evidence-Based Health Care: Validation of Revised Assessment of Multiple Systematic Reviews (R-AMSTAR) for Grading of Clinical Relevance. *Open Dent J* 2010; 4: 84-91.
33. Maher CG, Sherrington C, Herbert RD et al. Reliability of the PEDro scale for rating quality of randomized controlled trials. *Phys Ther* 2003; 83: 713-721.
34. Smart NA, Waldron M, Ismail H et al. Validation of a new tool for the assessment of study quality and reporting in exercise training studies: TESTEX. *Int J Evid Based Healthc* 2015; 13: 9-18.
35. Ribeiro de Avila V, Bento T, Gomes W et al. Functional Outcomes and Quality of Life After Ankle Fracture Surgically Treated: A Systematic Review. *J Sport Rehabil* 2018; 27: 274-283.
36. Bundesärztekammer, Kassenärztliche-Bundesvereinigung, Arbeitsgemeinschaft_der_Wissenschaftlichen_Medizinischen_Fachgesellschaften. *Programm für Nationale VersorgungsLeitlinien – Methodenreport*; 2017.
37. Moher D, Shamseer L, Clarke M et al. Preferred reporting items for systematic review and meta-analysis protocols (PRISMA-P) 2015 statement. *Syst Rev* 2015; 4: 1.
38. RACGP. *Osteoporosis prevention, diagnosis and management in postmenopausal women and men over 50 years of age*, The Royal Australian College of General Practitioners and Osteoporosis Australia; East Melbourne, 2017.

39. Fletcher JA. Canadian Academy of Sport and Exercise Medicine position statement: osteoporosis and exercise. *Clin J Sport Med* 2013; 23: 333-338.
40. Giangregorio LM, McGill S, Wark JD et al. Too Fit To Fracture: outcomes of a Delphi consensus process on physical activity and exercise recommendations for adults with osteoporosis with or without vertebral fractures. *Osteoporos Int* 2015; 26: 891-910.
41. National_Steering_Group. *Best Practice Guidelines to Prevent and Manage Osteoporosis and Fractures*; 2008.
42. Min SK, Oh T, Kim SH et al. Position Statement: Exercise Guidelines to Increase Peak Bone Mass in Adolescents. *J Bone Metab* 2019; 26: 225-239.
43. SIGN. *Management of osteoporosis and the prevention of fragility fractures. A national clinical guideline*; Edinburgh, 2021.
44. Songpatanasilp T, Sritara C, Kittisomprayoonkul W et al. Thai Osteoporosis Foundation (TOPF) position statements on management of osteoporosis. *Osteoporos Sarcopenia* 2016; 2: 191-207.
45. Kohrt WM, Bloomfield SA, Little KD et al. American College of Sports Medicine Position Stand: physical activity and bone health. *Med Sci Sports Exerc* 2004; 36: 1985-1996.
46. Brouwers MC, Kho ME, Browman GP et al. AGREE II: advancing guideline development, reporting and evaluation in health care. *CMAJ* 2010; 182: E839-842.
47. Kemmler W, von Stengel S. Validierung evidenzbasierter Empfehlung im Setting des Rehabilitationssports für Menschen mit Osteoporose-Erkrankung: Die randomisierte, kontrollierte Senioren Fitness- und Präventionsstudie (SEFIP). *Osteologie* 2020; 29: 215-220.
48. Kemmler W, von Stengel S. Structure and evidence-based implementation of exercise in secondary and tertiary prevention in Germany using "osteoporosis" as an example. In *Physical Activity and Health: Bridging Theory and Practice*, Macci, G., Benvenuti, F., Eds.; Edizione Nuova Cultura: Rome, 2021.
49. ACSM. American College of Sports Medicine position stand. Osteoporosis and exercise. *Med Sci Sports Exerc*. 1995; 27: 1-7.
50. Chodzko-Zajko WJ, Proctor DN, Fiatarone Singh MA et al. American College of Sports Medicine position stand. Exercise and physical activity for older adults. *Med Sci Sports Exerc* 2009; 41: 1510-1530.
51. Garber CE, Blissmer B, Deschenes MR et al. American College of Sports Medicine position stand. Quantity and quality of exercise for developing and maintaining cardiorespiratory, musculoskeletal, and neuromotor fitness in apparently healthy adults: guidance for prescribing exercise. *Med Sci Sports Exerc* 2011; 43: 1334-1359.
52. Souza D, Barbalho M, Ramirez-Campillo R et al. High and low-load resistance training produce similar effects on bone mineral density of middle-aged and older people: A systematic review with meta-analysis of randomized clinical trials. *Exp Gerontol* 2020; 138: 110973.
53. Kistler-Fischbacher M, Weeks BK, Beck BR. The effect of exercise intensity on bone in postmenopausal women (part 2): A meta-analysis. *Bone* 2021; 143: 115697.
54. Steele J, Fisher J, Giessing J et al. Clarity in Reporting Terminology and Definitions of Set End Points in Resistance Training. *Muscle Nerve* 2017; 10: 368-374.
55. Felsenberg D, Dietzel R, Pthy M et al. Leitlinie Physiotherapie und Bewegungstherapie bei Osteoporose. Guideline 2008; Long version:
56. Toigo M, Boutellier U. New fundamental resistance exercise determinants of molecular and cellular muscle adaptations. *Eur J Appl Physiol* 2006; 97: 643-663.
57. Rubin CT, Lanyon LE. Regulation of bone mass by mechanical strain magnitude. *Calcif Tissue Int* 1985; 37: 411-417.
58. Turner CH, Owan I, Takano Y. Mechanotransduction in bone: role of strain rate. *Am J Physiol Endocrinol Metab* 1995; 269: E438-E442.

59. 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* 1998; 23: 313-318.
60. DVO. Prophylaxe, Diagnostik und Therapie der OSTEOPOROSE bei postmenopausalen Frauen und bei Männern ab dem 50. Lebensjahr. <https://dv-osteologie.org/osteoporose-leitlinien> 2023; 34: 1145-1178.
61. Gross M, Jansen C-P, Blessing U et al. Empfehlungspapier für das körperliche Training zur Sturzprävention als Einzelangebot bei älteren, zu Hause lebenden Menschen. *physioscience* 2020; 16: 176-183.
62. Jansen CP, Gross M, Kramer-Gmeiner F et al. Empfehlungspapier für das körperliche Gruppentraining zur Sturzprävention bei älteren, zu Hause lebenden Menschen. Aktualisierung des Empfehlungspapiers der Bundesinitiative Sturzprävention von 2009. *Z Gerontol Geriat* 2021; 54: 229-239
63. Viechtbauer W. Conducting Meta-Analyses in R with the metafor Package. *J Stat Softw* 2010; 36: 1-48.
64. Luo S, Chen Y, Su X et al. mmeta: An R Package for Multivariate Meta-Analysis. *J Stat Softw* 2014; 56: 11.
65. R-Core-Team *R. A language and environment for statistical computing.*, stij; <https://www.R-project.org/>. Vienna, Austria, 2021.
66. Higgins J, Thomas J, Chandler J et al. Cochrane Handbook for Systematic Reviews of Interventions version 6.2 (updated February 2021). *Cochrane*, 2021. **2021**, Available from www.training.cochrane.org/handbook.
67. Begg CB, Mazumdar M. Operating characteristics of a rank correlation test for publication bias. *Biometrics* 1994; 50: 1088-1101.
68. Zhao R, Feng F, Wang X. Exercise interventions and prevention of fall-related fractures in older people: a meta-analysis of randomized controlled trials. *Int J Epidemiol* 2017; 46: 149-161.
69. Franco M, Howard K, Sherrington C et al. Eliciting older people's preferences for exercise programs: a best-worst scaling choice. *J Physiother* 2015; 61: 34-41.
70. Cohen-Mansfield J, Marx MS, Guralnik JM. Motivators and barriers to exercise in an older community-dwelling population. *Journal of aging and physical activity* 2003; 11: 242-253.
71. Fisher J, Steele, J., Wolf, M., Androulakis-Korakakis, P., Smith, D., Giessing, J., Wescott, W.L. The role of supervision in resistance training; an exploratory systematic review and meta-analysis. *Sportrxiv* 2021; DOI: 10.51224/SRXIV.18:
72. Weineck J. *Optimales Training*; Spitta-Verlag: Erlangen, 2019.
73. Kemmler W, Weineck, J., Hensen, J., Lauber, D., Kalender, W.A., Engelke, K. Empfehlungen für ein körperliches Training zur Verbesserung der Knochenfestigkeit: Schlussfolgerungen aus Tiermodellen und Untersuchungen an Leistungssportlern. *Dtsch Z Sportmed* 2003; 54: 306-316.
74. Sambrook PN, Cameron ID, Chen JS et al. Influence of fall related factors and bone strength on fracture risk in the frail elderly. *Osteoporos Int* 2007; 18: 603-610.
75. WHO. Consensus development conference: diagnosis, prophylaxis, and treatment of osteoporosis. *Am J Med* 1993; 94: 646-650.
76. Ammann P, Rizzoli R. Bone strength and its determinants. *Osteoporos Int* 2003; 14: S13-18.
77. Konermann W, Stubbe F, Link T et al. Axiale Bruchfestigkeit von thorakolumbalen Wirbelkörpern - eine experimentelle biomechanische Studie. *Z Orthopädie* 1999; 137: 223-231.
78. Veenland JF, Link TM, Konermann W et al. Unraveling the role of structure and density in determining vertebral bone strength. *Calcif Tissue Int* 1997; 61: 474-479.
79. Friedman AW. Important determinants of bone strength: beyond bone mineral density. *J Clin Rheumatol* 2006; 12: 70-77.

80. Jarvinen TL, Kannus P, Sievanen H et al. Randomized controlled study of effects of sudden impact loading on rat femur. *J Bone Miner Res* 1998; 13: 1475-1482.
81. 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* 1999; 14: 321-329.
82. R_Development_Core_Team. R: A language and environment for Statistical Computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. 2020:
83. Doi SA, Barendregt JJ, Khan S et al. Advances in the meta-analysis of heterogeneous clinical trials I: The inverse variance heterogeneity model. *Contemp Clin Trials* 2015; 45: 130-138.
84. Duval SJ, Tweedie RL. A nonparametric "trim and fill" method of accounting for publication bias in meta-analysis. *JASA* 2000; 95: 89-98.
85. Furuya-Kanamori L, Barendregt JJ, Doi SAR. A new improved graphical and quantitative method for detecting bias in meta-analysis. *Int J Evid Based Healthc* 2018; 16: 195-203.
86. Harlow SD, Gass M, Hall JE et al. Executive summary of the Stages of Reproductive Aging Workshop + 10: addressing the unfinished agenda of staging reproductive aging. *Menopause* 2012; 19: 387-395.
87. Adami S, Gatti D, Braga V et al. Site-specific effects of strength training on bone structure and geometry of ultradistal radius in postmenopausal women. *J Bone Miner Res* 1999; 14: 120-124.
88. Basat H, Esmaeilzadeh S, Eskiurt N. The effects of strengthening and high-impact exercises on bone metabolism and quality of life in postmenopausal women: a randomized controlled trial. *J Back Musculoskelet Rehabil* 2013; 26: 427-435.
89. Bassey EJ, Ramsdale SJ. Weight-bearing exercise and ground reaction forces: a 12-month randomized controlled trial of effects on bone mineral density in healthy postmenopausal women. *Bone* 1995; 16: 469-476.
90. Bassey EJ, Rothwell MC, Littlewood JJ et al. Pre- and postmenopausal women have different bone mineral density responses to the same high-impact exercise. *J Bone Miner Res* 1998; 13: 1805-1813.
91. Bello M, Sousa MC, Neto G et al. The effect of a long-term, community-based exercise program on bone mineral density in postmenopausal women with pre-diabetes and type 2 diabetes. *J Hum Kinet* 2014; 43: 43-48.
92. Bemben DA, Fethers NL, Bemben MG et al. Musculoskeletal responses to high- and low-intensity resistance training in early postmenopausal women. *Med Sci Sports Exerc* 2000; 32: 1949-1957.
93. Bemben DA, Palmer IJ, Bemben MG et al. Effects of combined whole-body vibration and resistance training on muscular strength and bone metabolism in postmenopausal women. *Bone* 2010; 47: 650-656.
94. Bergström I, Landgren BM, Brinck J et al. Physical training preserves bone mineral density in postmenopausal women with forearm fractures and low bone mineral density. *Osteoporos Int* 2008; 19: 177-183.
95. Bloomfield SA, Williams NI, Lamb DR et al. Non-weightbearing exercise may increase lumbar spine bone mineral density in healthy postmenopausal women. *Am J Phys Med Rehabil* 1993; 72: 204-209.
96. Bocalini DS, Serra AJ, dos Santos L et al. Strength training preserves the bone mineral density of postmenopausal women without hormone replacement therapy. *J Aging Health* 2009; 21: 519-527.
97. Bolton KL, Egerton T, Wark J et al. Effects of exercise on bone density and falls risk factors in postmenopausal women with osteopenia: a randomised controlled trial. *J Sci Med Sport* 2012; 15: 102-109.
98. Brooke-Wavell K, Jones PR, Hardman AE. Brisk walking reduces calcaneal bone loss in postmenopausal women. *Clin Sci (Lond)* 1997; 92: 75-80.

99. Brooke-Wavell K, Jones PR, Hardman AE et al. Commencing, continuing and stopping brisk walking: effects on bone mineral density, quantitative ultrasound of bone and markers of bone metabolism in postmenopausal women. *Osteoporos Int* 2001; 12: 581-587.
100. Caplan GA, Ward JA, Lord SR. The benefits of exercise in postmenopausal women. *Aust J Public Health* 1993; 17: 23-26.
101. Chan K, Qin L, Lau M et al. A randomized, prospective study of the effects of Tai Chi Chun exercise on bone mineral density in postmenopausal women. *Arch Phys Med Rehabil* 2004; 85: 717-722.
102. Chilibeck PD, Davison KS, Whiting SJ et al. 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* 2002; 80: 941-950.
103. Chilibeck PD, Vatanparast H, Pierson R et al. Effect of exercise training combined with isoflavone supplementation on bone and lipids in postmenopausal women: a randomized clinical trial. *J Bone Miner Res* 2013; 28: 780-793.
104. Choquette S, Riesco E, Cormier E et al. Effects of soya isoflavones and exercise on body composition and clinical risk factors of cardiovascular diseases in overweight postmenopausal women: a 6-month double-blind controlled trial. *Br J Nutr* 2011; 105: 1199-1209.
105. Chuin A, Labonte M, Tessier D et al. Effect of antioxidants combined to resistance training on BMD in elderly women: a pilot study. *Osteoporos Int* 2009; 20: 1253-1258.
106. de Matos O, Lopes da Silva DJ, Martinez de Oliveira J et al. Effect of specific exercise training on bone mineral density in women with postmenopausal osteopenia or osteoporosis. *Gynecol Endocrinol* 2009; 25: 616-620.
107. Deng S. Effects of exercise therapy on bone mineral density in early postmenopausal women: a controlled trial. *Front Med China* 2009; 3: 323-329.
108. de Oliveira LC, de Almeida Pires-Oliveira DA. Effects of Whole-Body Vibration Versus Pilates Exercise on Bone Mineral Density in Postmenopausal Women: A Randomized and Controlled Clinical Trial. *J Geriatr Phys Ther* 2019; 42: E23-E31.
109. Duff WR, Kontulainen SA, Candow DG et al. Effects of low-dose ibuprofen supplementation and resistance training on bone and muscle in postmenopausal women: A randomized controlled trial. *Bone Rep* 2016; 5: 96-103.
110. Ebrahim SB, Thompson PW, Baskaran V et al. Randomized placebo controlled trial of brisk walking in the prevention of postmenopausal osteoporosis. *Age and Aging* 1997; 26: 252-260.
111. Englund U, Littbrand H, Sundell A et al. A 1-year combined weight-bearing training program is beneficial for bone mineral density and neuromuscular function in older women. *Osteoporos Int* 2005; 16: 1117-1123.
112. Evans EM, Racette SB, Van Pelt RE et al. Effects of soy protein isolate and moderate exercise on bone turnover and bone mineral density in postmenopausal women. *Menopause* 2007; 14: 481-488.
113. Going S, Lohman T, Houtkooper L et al. Effects of exercise on bone mineral density in calcium-replete postmenopausal women with and without hormone replacement therapy. *Osteoporos Int* 2003; 14: 637-643.
114. Grove KA, Londeree BR. Bone density in postmenopausal women: high impact vs low impact exercise. *Med Sci Sports Exerc* 1992; 24: 1190-1194.
115. Hans D, Genton L, Drezner MK et al. Monitored impact loading of the hip: initial testing of a home-use device. *Calcif Tissue Int*. 2002; 71: 112-120.
116. Hartard M, Haber P, Ilieva D et al. Systematic strength training as a model of therapeutic intervention. *Arch Phys Med Rehabil* 1996; 75: 21-28.
117. Hartley C, Folland JP, Kerslake R et al. High-Impact Exercise Increased Femoral Neck Bone Density With No Adverse Effects on Imaging Markers of Knee Osteoarthritis in Postmenopausal Women. *J Bone Miner Res* 2020; 35: 53-63.

118. Hatori M, Hasegawa A, Adachi H et al. The effects of walking at the anaerobic threshold level on vertebral bone loss in postmenopausal women. *Calcif Tissue Int* 1993; 52: 411-414.
119. Hettchen M, von Stengel S, Kohl M et al. Changes in Menopausal Risk Factors in Early Postmenopausal Osteopenic Women After 13 Months of High-Intensity Exercise: The Randomized Controlled ACTLIFE-RCT. *Clin Interv Aging* 2021; 16: 83-96.
120. Holubiak IS, Leuciuc FV, Craciun DM et al. Effect of Strength Training Protocol on Bone Mineral Density for Postmenopausal Women with Osteopenia/Osteoporosis Assessed by Dual-Energy X-ray Absorptiometry (DEXA). *Sensors (Basel)* 2022; 22:
121. Iwamoto J, Takeda T, Ichimura S. Effects of exercise training and detraining on bone mineral density in postmenopausal women with osteoporosis. *J Orthop Sci* 2001; 6: 128-132.
122. Jessup JV, Horne C, Vishen RK et al. Effects of exercise on bone density, balance, and self-efficacy in older women. *Biol Res Nurs* 2003; 4: 171-180.
123. Karakiriou S, Douda H, Smilios I et al. Effects of vibration and exercise training on bone mineral density and muscle strength in post-menopausal women. *Eur JSport Science*. 2012; 12: 81-88.
124. Kemmler W. Einfluß unterschiedlicher Lebensabschnitte auf die belastungsabhängige Reaktion ossärer Risikofaktoren einer Osteoporose. *Dtsch Z Sportmed* 1999; 50: 114-119.
125. Kemmler W, Lauber D, Weineck J et al. Benefits of 2 years of intense exercise on bone density, physical fitness, and blood lipids in early postmenopausal osteopenic women: results of the Erlangen Fitness Osteoporosis Prevention Study (EFOPS). *Arch Intern Med* 2004; 164: 1084-1091.
126. Kemmler W, von Stengel S, Engelke K et al. Exercise effects on bone mineral density, falls, coronary risk factors, and health care costs in older women: the randomized controlled senior fitness and prevention (SEFIP) study. *Arch Intern Med* 2010; 170: 179-185.
127. Kemmler W, Bebenek M, von Stengel S et al. Effect of block-periodized exercise training on bone and coronary heart disease risk factors in early post-menopausal women: a randomized controlled study. *Scand J Med Sci Sports* 2013; 23: 121-129.
128. Kerr D, Morton A, Dick I et al. Exercise effects on bone mass in postmenopausal women are site-specific and load-dependent. *J Bone Miner Res* 1996; 11: 218-225.
129. Kerr D, Ackland T, Maslen B et al. Resistance training over 2 years increases bone mass in calcium-replete postmenopausal women. *J Bone Miner Res* 2001; 16: 175-181.
130. Kohrt WM, Snead DB, Slatopolsky E et al. Additive effects of weight-bearing exercise and estrogen on bone mineral density in older women. *J Bone Miner Res* 1995; 10: 1303-1311.
131. Kohrt WM, Ehsani AA, S.J. B. Effects of exercise involving predominantly either joint-reaction or ground-reaction forces on bone mineral density in older women. *J Bone Miner Res* 1997; 12: 1253-1261.
132. Korpelainen R, Keinanen-Kiukaanniemi S, Heikkinen J et al. Effects of impact exercise on bone mineral density in elderly women with low BMD: a population based randomized controlled 30-month intervention. *Osteoporos Int* 2006; 17: 109-118.
133. Kwon Y, Park SK, Kim E et al. The effects of multi-component exercise training on VO₂max, muscle mass, whole bone mineral density and fall risk in community-dwelling elderly women. *JPN J PHYS FIT SPORT* 2008; 57: 339-348.
134. Lau EM, Woo J, Leung PC et al. The effects of calcium supplementation and exercise on bone density in elderly Chinese women. *Osteoporos Int* 1992; 2: 168-173.
135. Liu BX, Chen SP, Li YD et al. The Effect of the Modified Eighth Section of Eight-Section Brocade on Osteoporosis in Postmenopausal Women: A Prospective Randomized Trial. *Medicine (Baltimore)* 2015; 94: e991.
136. Lord SR, Ward JA, Williams P et al. The effect of a community exercise program on fracture risk factors in older women. *Osteoporos Int* 1996; 6: 361-367.

137. Maddalozzo GF, Widrick JJ, Cardinal BJ et al. The effects of hormone replacement therapy and resistance training on spine bone mineral density in early postmenopausal women. *Bone* 2007; 40: 1244-1251.
138. Marin-Cascales E, Rubio-Arias JA, Alcaraz PE. Effects of Two Different Neuromuscular Training Protocols on Regional Bone Mass in Postmenopausal Women: A Randomized Controlled Trial. *Front Physiol* 2019; 10: 846.
139. Marques EA, Mota J, Machado L et al. Multicomponent training program with weight-bearing exercises elicits favorable bone density, muscle strength, and balance adaptations in older women. *Calcif Tissue Int* 2011; 88: 117-129.
140. Marques EA, Wanderley F, Machado L et al. Effects of resistance and aerobic exercise on physical function, bone mineral density, OPG and RANKL in older women. *Exp Gerontol* 2011; 46: 524-532.
141. Martin D, Notelovitz M. Effects of aerobic training on bone mineral density of postmenopausal women. *J Bone Miner Res* 1993; 8: 931-936.
142. Milliken LA, Going SB, Houtkooper LB et al. Effects of exercise training on bone remodeling, insulin-like growth factors, and bone mineral density in postmenopausal women with and without hormone replacement therapy. *Calcif Tissue Int* 2003; 72: 478-484.
143. Montgomery GJ, Abt G, Dobson CA et al. A 12-month continuous and intermittent high-impact exercise intervention and its effects on bone mineral density in early postmenopausal women: a feasibility randomized controlled trial. *J Sports Med Phys Fitness* 2020; 60: 770-778.
144. Nelson ME, Fisher EC, Dilmanian FA et al. A 1-y walking program and increased dietary calcium in postmenopausal women: effects on bone. *Am J Clin Nutr* 1991; 53: 1304-1311.
145. Nelson ME, Fiatarone MA, Morganti CM et al. Effects of high-intensity strength training on multiple risk factors for osteoporotic fractures. A randomized controlled trial. *Jama* 1994; 272: 1909-1914.
146. Nichols JF, Nelson KP, Peterson KK et al. Bone Mineral density responses to high-intensity strength training in older women. *Journal of Age and Physical Activity* 1995; 3: 26-38.
147. Nicholson VP, McKean MR, Slater GJ et al. Low-Load Very High-Repetition Resistance Training Attenuates Bone Loss at the Lumbar Spine in Active Post-menopausal Women. *Calcif Tissue Int* 2015; 96: 490-499.
148. Orsatti F, Petri-Nahas E, Nahas-Neto J et al. Effects of isoflavone and counter-resistance training on bone mineral density in postmenopausal women. *Rev Bras Cineantropom Desempenho Hum* 2013; 15: 726-736.
149. Park H, Kim KJ, Komatsu T et al. Effect of combined exercise training on bone, body balance, and gait ability: a randomized controlled study in community-dwelling elderly women. *J Bone Miner Metab* 2008; 26: 254-259.
150. 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* 1995; 10: 1068-1075.
151. Pruitt LA, Jackson RD, Bartels RL et al. Weight-training effects on bone mineral density in early postmenopausal women. *J Bone Miner Res* 1992; 7: 179-185.
152. Pruitt LA, Taaffe DR, Marcus R. Effects of a one-year high-intensity versus low-intensity resistance training program on bone mineral density in older women. *J Bone Miner Res* 1995; 10: 1788-1795.
153. Rhodes EC, Martin AD, Taunton JE et al. Effects of one year of resistance training on the relation between muscular strength and bone density in elderly women. *Br J Sports Med* 2000; 34: 18-22.
154. Ryan AS, Nicklas BJ, Dennis KE. Aerobic exercise maintains regional bone mineral density during weight loss in postmenopausal women. *J Appl Physiol* 1998; 84: 1305-1310.
155. Sakai A, Oshige T, Zenke Y et al. Unipedal standing exercise and hip bone mineral density in postmenopausal women: a randomized controlled trial. *J Bone Miner Metab* 2010; 28: 42-48.

156. Silverman NE, Nicklas BJ, Ryan AS. Addition of aerobic exercise to a weight loss program increases BMD, with an associated reduction in inflammation in overweight postmenopausal women. *Calcif Tissue Int* 2009; 84: 257-265.
157. Sinaki M, Wahner HW, Offord KP et al. Efficacy of nonloading exercises in prevention of vertebral bone loss in postmenopausal women: a controlled trial. *Mayo Clin Proc* 1989; 64: 762-769.
158. 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* 2002; 20: 196-200.
159. Tartibian B, Hajizadeh Maleki B, Kanaley J et al. Long-term aerobic exercise and omega-3 supplementation modulate osteoporosis through inflammatory mechanisms in post-menopausal women: a randomized, repeated measures study. *Nutr Metab (Lond)* 2011; 8: 71.
160. Tolomio S, Lalli A, Travain G et al. Effects of a combined weight- and non weight-bearing (water) exercise program on bone mass and quality in postmenopausal women with low bone mineral density. *Clin Ter* 2009; 160: 105-109.
161. Verschueren SM, Roelants M, Delecluse C et al. Effects of 6-month whole body vibration training on hip density; muscle strength, and postural control in postmenopausal women: A randomized controlled pilot study. *J Bone Min Res* 2004; 19: 352-359.
162. Waltman N, Kupzyk KA, Flores LE et al. Bone-loading exercises versus risedronate for the prevention of osteoporosis in postmenopausal women with low bone mass: a randomized controlled trial. *Osteoporos Int* 2022; 33: 475-486.
163. Wang H, Yu B, Chen W et al. Simplified Tai Chi Resistance Training versus Traditional Tai Chi in Slowing Bone Loss in Postmenopausal Women. *Evid Based Complement Alternat Med* 2015; 2015: 379451.
164. Woo J, Hong A, Lau E et al. A randomised controlled trial of Tai Chi and resistance exercise on bone health, muscle strength and balance in community-living elderly people. *Age Ageing* 2007; 36: 262-268.
165. Wu J, Oka J, Tabata I et al. Effects of isoflavone and exercise on BMD and fat mass in postmenopausal Japanese women: a 1-year randomized placebo-controlled trial. *J Bone Miner Res* 2006; 21: 780-789.
166. Yamazaki S, Ichimura S, Iwamoto J et al. Effect of walking exercise on bone metabolism in postmenopausal women with osteopenia/osteoporosis. *J Bone Miner Metab* 2004; 22: 500-508.
167. Kemmler W, Riedel H. Einfluß eines intensiven 9monatigen körperlichen Trainings auf Knochendichte, Gesamtkalzium und Wirbelkörperbreite bei Frauen mit Osteoporose, Osteopenie und Knochengesunden. *Osteologie* 1998; 7: 203-210.
168. Ghayomzadeh M, Earnest CP, Hackett D et al. Combination of resistance and aerobic exercise for six months improves bone mass and physical function in HIV infected individuals: A randomized controlled trial. *Scand J Med Sci Sports* 2021; 31: 720-732.
169. Jones K, Baker K, Speight RA et al. Randomised clinical trial: combined impact and resistance training in adults with stable Crohn's disease. *Aliment Pharmacol Ther* 2020; 52: 964-975.
170. Allison SJ, Folland JP, Rennie WJ et al. High impact exercise increased femoral neck bone mineral density in older men: a randomised unilateral intervention. *Bone* 2013; 53: 321-328.
171. Bolam KA, Skinner TL, Jenkins DG et al. The Osteogenic Effect of Impact-Loading and Resistance Exercise on Bone Mineral Density in Middle-Aged and Older Men: A Pilot Study. *Gerontology* 2015; 62: 22-32.
172. Harding AT, Weeks BK, Lambert C et al. A Comparison of Bone-Targeted Exercise Strategies to Reduce Fracture Risk in Middle-Aged and Older Men with Osteopenia and Osteoporosis: LIFTMOR-M Semi-Randomized Controlled Trial. *J Bone Miner Res* 2020; 35: 1404-1414.
173. Helge EW, Andersen TR, Schmidt JF et al. Recreational football improves bone mineral density and bone turnover marker profile in elderly men. *Scand J Med Sci Sports* 2014; 24 Suppl 1: 98-104.

174. Huuskonen J, Väisänen SB, Kröger H et al. Regular physical exercise and bone mineral density: a four-year controlled randomized trial in middle-aged men. *Osteoporos Int* 2001; 12: 249-355.
175. Kemmler W, Kohl M, Jakob F et al. Effects of High Intensity Dynamic Resistance Exercise and Whey Protein Supplements on Osteosarcopenia in Older Men with Low Bone and Muscle Mass. Final Results of the Randomized Controlled FrOST Study. *Nutrients* 2020; 12: 2341.
176. Kukuljan S, Nowson CA, Sanders KM et al. Independent and combined effects of calcium-vitamin D3 and exercise on bone structure and strength in older men: an 18-month factorial design randomized controlled trial. *J Clin Endocrinol Metab* 2011; 96: 955-963.
177. Santa-Clara H, Fernhall B, Baptista F et al. Effect of a one-year combined exercise training program on body composition in men with coronary artery disease. *Metabolism* 2003; 52: 1413-1417.
178. Whiteford J, Ackland TR, Dhaliwal SS et al. Effects of a 1-year randomized controlled trial of resistance training on lower limb bone and muscle structure and function in older men. *Osteoporos Int* 2010; 21: 1529-1536.
179. Lu X, Wei J, Liu Y et al. Effects of exercise on bone mineral density in middle-aged and older men: A comprehensive meta-analysis. *Arch Osteoporos* 2023; 18: 108.
180. Braith RW, Mills RM, Welsch MA et al. Resistance exercise training restores bone mineral density in heart transplant recipients. *J Am Coll Cardiol* 1996; 28: 1471-1477.
181. Mitchell MJ, Baz MA, Fulton MN et al. Resistance training prevents vertebral osteoporosis in lung transplant recipients. *Transplantation* 2003; 76: 557-562.
182. Westby MD, Wade JP, Rangno KK et al. A randomized controlled trial to evaluate the effectiveness of an exercise program in women with rheumatoid arthritis taking low dose prednisone. *J Rheumatol* 2000; 27: 1674-1680.
183. Laurent MR, Goemaere S, Verroken C et al. Prevention and Treatment of Glucocorticoid-Induced Osteoporosis in Adults: Consensus Recommendations From the Belgian Bone Club. *Front Endocrinol (Lausanne)* 2022; 13: 908727.
184. Orcel P. Updated recommendations on the management of glucocorticoid-induced osteoporosis. *Joint Bone Spine* 2014; 81: 465-468.
185. Leipe J, Holle JU, Weseloh C et al. German Society of Rheumatology recommendations for management of glucocorticoid-induced osteoporosis. *Z Rheumatol* 2021; 80: 49-63.
186. LoCascio V, Bonucci E, Imbimbo B et al. Bone loss in response to long-term glucocorticoid therapy. *Bone Miner* 1990; 8: 39-51.
187. Kemmler W, Stengel V. The Role of Exercise on Fracture Reduction and Bone Strengthening. In *Muscle and Exercise Physiology*, Zoladz J., Ed.; Academic Press: London, 2019.
188. Senn E. Grundlagen der positiv-trophischen Wirksamkeit physikalischer Belastung auf normales, osteopenisches und osteoporotisches Knochengewebe. *Phys Med* 1994; 4: 133-134.
189. Lanyon LE. Biomechanical factors in adaption of bone structure to function. In *Current concepts of bone fragility*, Uhthoff, H.K., Ed.; Springer: Berlin, 1986.
190. 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* 1996; 18: 375-435.
191. Rubin CT, Lanyon LE. Regulation of bone formation by applied dynamic loads. *J Bone Joint Surg Am* 1984; 66: 397-402.
192. Rubin CT, Lanyon LE. Dynamic strain similarity in vertebrates; an alternative to allometric limb bone scaling. *J Theor Biol* 1984; 107: 321-327.
193. Frost HM. Why do marathon runners have less bone than weight lifters? A vital-biomechanical view and explanation. *Bone* 1997; 20: 183-189.
194. Schoenau E, Frost HM. The muscle-bone unit in children and adolescents. *Calc Tiss Int* 2002; 75: 405-407.

195. Turner CH. Three rules for bone adaptation to mechanical stimuli. *Bone* 1998; 23: 399-407.
196. Tenforde AS, Fredericson M. Influence of sports participation on bone health in the young athlete: a review of the literature. *PM R* 2011; 3: 861-867.
197. Jansson D, Lindberg AS, Lundberg E et al. Effects of Resistance and Endurance Training Alone or Combined on Hormonal Adaptations and Cytokines in Healthy Children and Adolescents: A Systematic Review and Meta-analysis. *Sports Med Open* 2022; 8: 81.
198. Maimoun L, Sultan C. Effect of physical activity on calcium homeostasis and calciotropic hormones: a review. *Calcif Tissue Int* 2009; 85: 277-286.
199. Frost HM. The role of changes in mechanical usage set points in the pathogenesis of osteoporosis. *J Bone Miner Res* 1992; 7: 253-261.
200. Scofield KL, Hecht S. Bone health in endurance athletes: runners, cyclists, and swimmers. *Curr Sports Med Rep* 2012; 11: 328-334.
201. Sabo D, Reiter A, Güßbacher A. Einfluß von Hochleistungstraining auf den Mineralgehalt des Knochens - DEXA bei Topathleten. *Physikalische Medizin* 1994; 4: 141.
202. Heinonen A, Oja P, Kannus P et al. Bone mineral density in female athletes representing sports with different loading characteristics of the skeleton. *Bone* 1995; 17: 197-203.
203. Constantini NW, Warren MP. Menstrual dysfunction in swimmers: a distinct entity. *J Clin Endocrinol Metab* 1995; 80: 2740-2744.
204. Creighton DL, Morgan AL, Boardley D et al. Weight bearing exercise and markers of bone turnover in female athletes. *J Appl Physiol* 2001; 90: 565-570.
205. Gomez-Bruton A, Gonzalez-Aguero A, Gomez-Cabello A et al. Is bone tissue really affected by swimming? A systematic review. *PLoS One* 2013; 8: e70119.
206. Nagle KB, Brooks MA. A Systematic Review of Bone Health in Cyclists. *Sports Health* 2011; 3: 235-243.
207. Olmedillas H, Gonzalez-Aguero A, Moreno LA et al. Cycling and bone health: a systematic review. *BMC Med* 2012; 10: 168.
208. Haapasalo H, Kannus P, Sievanen H et al. Long-term unilateral loading and bone mineral density and content in female squash players. *Calcif Tissue Int* 1994; 54: 249-255.
209. Haapasalo H, Kannus P, Sievanen H et al. Effect of long-term unilateral activity on bone mineral density of female junior tennis players. *J Bone Miner Res* 1998; 13: 310-319.
210. Howe TE, Shea B, Dawson LJ et al. Exercise for preventing and treating osteoporosis in postmenopausal women. *Cochrane Database Syst Rev* 2011: CD000333.
211. Rahimi GRM, Smart NA, Liang MT et al. The Impact of Different Modes of Exercise Training on Bone Mineral Density in Older Postmenopausal Women: A Systematic Review and Meta-analysis Research. 2020: 1-14.
212. Liu S, Wu S, Qi J et al. Effect of traditional Chinese fitness exercises on bone mineral density in postmenopausal women: a network meta-analysis of randomized controlled trials. *Front Endocrinol (Lausanne)* 2024; 15: 1323595.
213. Martyn-St James M, Carroll S. A meta-analysis of impact exercise on postmenopausal bone loss: the case for mixed loading exercise programmes. *Br J Sports Med* 2009; 43: 898-908.
214. Daly RM, Dalla Via J, Duckham RL et al. Exercise for the prevention of osteoporosis in postmenopausal women: an evidence-based guide to the optimal prescription. *Braz J Phys Ther* 2019; 23: 170-180.
215. Börjesson M, Hellenius ML, Jansson E et al. *Physical Activity in the Prevention and Treatment of Disease*; Swedish Institute of Health: Stockholm, 2010.
216. Ma D, Wu L, He Z. Effects of walking on the preservation of bone mineral density in perimenopausal and postmenopausal women: a systematic review and meta-analysis. *Menopause* 2013; 20: 1216-1226.

217. Martyn-St James M, Carroll S. Meta-analysis of walking for preservation of bone mineral density in postmenopausal women. *Bone* 2008; 43: 521-531.
218. Palombaro KM. Effects of walking-only interventions on Bone Mineral Density at various skeletal sites: A meta-analysis. *Journal of Geriatric Physical Therapy* 2005; 28: 102-107.
219. Rodrigues IB, Ponzano M, Butt DA et al. The Effects of Walking or Nordic Walking in Adults 50 Years and Older at Elevated Risk of Fractures: A Systematic Review and Meta-Analysis. *J Aging Phys Act* 2021; 29: 886-899.
220. Erben RG. Hypothesis: Coupling between Resorption and Formation in Cancellous bone Remodeling is a Mechanically Controlled Event. *Front Endocrinol (Lausanne)* 2015; 6: 82.
221. Eriksen EF. Cellular mechanisms of bone remodeling. *Rev Endocr Metab Disord* 2010; 11: 219-227.
222. Hanson S, Jones A. Is there evidence that walking groups have health benefits? A systematic review and meta-analysis. *Br J Sports Med* 2015; 49: 710-715.
223. Dook JE, James JE, Henderson NK et al. Exercise and bone mineral density in mature female athletes. *Med Sci Sports Exerc* 1996; 29: 291-296.
224. Taaffe DR, Snow-Harter C, Connolly DA et al. Differential effects of swimming versus weight-bearing activity on bone mineral status of eumenorrheic athletes. *J Bone Miner Res* 1995; 10: 586-593.
225. Gomez-Bruton A, Montero-Marin J, Gonzalez-Aguero A et al. The Effect of Swimming During Childhood and Adolescence on Bone Mineral Density: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Sports Med* 2016; 46: 365-379.
226. Su Y, Chen Z, Xie W. Swimming as Treatment for Osteoporosis: A Systematic Review and Meta-analysis. *Biomed Res Int* 2020; 2020: 6210201.
227. Mohr M, Helge EW, Petersen LF et al. Effects of soccer vs swim training on bone formation in sedentary middle-aged women. *Eur J Appl Physiol* 2015; 115: 2671-2679.
228. Connolly LJ, Nordsborg NB, Nyberg M et al. Low-volume high-intensity swim training is superior to high-volume low-intensity training in relation to insulin sensitivity and glucose control in inactive middle-aged women. *Eur J Appl Physiol* 2016; 116: 1889-1897.
229. Mohr M, Nordsborg NB, Lindenskov A et al. High-intensity intermittent swimming improves cardiovascular health status for women with mild hypertension. *Biomed Res Int* 2014; 2014: 728289.
230. BAR. (Bundesarbeitsgemeinschaft für Rehabilitation) Rahmenvereinbarung über den Rehabilitationssport und das Funktionstraining vom 01. Oktober 2003, i. d. F. vom 01. Januar 2011 Frankfurt am Main, 2011.
231. BAR. *Rehabilitationssport und Funktionstraining Rahmenvereinbarung*; Frankfurt am Main, 2022.
232. Lv X, Wang J, Bao Y et al. The effectiveness of balneotherapy and aquatic exercise on bone metabolism: A systematic review and meta-analysis. *Complement Ther Clin Pract* 2021; 44: 101429.
233. Simas V, Hing W, Pope R et al. Effects of water-based exercise on bone health of middle-aged and older adults: a systematic review and meta-analysis. *Open Access J Sports Med* 2017; 8: 39-60.
234. Ramirez-Villada JF, Leon-Ariza HH, Arguello-Gutierrez YP et al. [Effect of high impact movements on body composition, strength and bone mineral density on women over 60 years]. *Rev Esp Geriatr Gerontol* 2016; 51: 68-74.
235. Wu J, Yamakawa J, Tabata I et al. The effects of swimming exercise on bone mineral density in postmenopausal women. *Japanese Journal of Physical Fitness and Sports Medicine* 2000; 49: 543-548.
236. Aboarrage Junior AM, Teixeira CVS, Dos Santos RN et al. A High-Intensity Jump-Based Aquatic Exercise Program Improves Bone Mineral Density and Functional Fitness in Postmenopausal Women. *Rejuvenation Res* 2018; 21: 535-540.

237. Borba-Pinheiro CJ, de Alencar Carvalho MC, da Silva NS et al. Bone density, balance and quality of life of postmenopausal women taking alendronate participating in different physical activity programs. *Ther Adv Musculoskelet Dis* 2010; 2: 175-185.
238. Borba-Pinheiro CJ, Gurgel de Alencar Carvalho MC, Drigo AJ et al. Bone variables after a water aerobics program in postmenopausal women undergoing pharmacological treatment. *Sport Sciences for Health* 2012; 7: 13-18.
239. Littrell TR. *Water Exercise Effects on Bone Density and Fall Risk in Postmenopausal Women*. Oregon State University, Corvallis, USA, 2004.
240. Moreira LD, Fronza FC, Dos Santos RN et al. The benefits of a high-intensity aquatic exercise program (HydrOS) for bone metabolism and bone mass of postmenopausal women. *J Bone Miner Metab* 2014; 32: 411-419.
241. Pernambuco CS, Borba-Pinheiro CJ, Vale RG et al. Functional autonomy, bone mineral density (BMD) and serum osteocalcin levels in older female participants of an aquatic exercise program (AAG). *Arch Gerontol Geriatr* 2013; 56: 466-471.
242. Rotstein A, Harush M, Vaisman N. The effect of a water exercise program on bone density of postmenopausal women. *J Sports Med Phys Fitness* 2008; 48: 352-359.
243. Tsukahara N, Toda A, Goto J et al. Cross-sectional and longitudinal studies on the effect of water exercise in controlling bone loss in Japanese postmenopausal women. *Journal of Nutritional Science and Vitaminology* 1994; 40: 37-47.
244. Wochna K, Nowak A, Huta-Osiecka A et al. Bone Mineral Density and Bone Turnover Markers in Postmenopausal Women Subjected to an Aqua Fitness Training Program. *Int J Environ Res Public Health* 2019; 16:
245. SGB_IX. Sozialgesetzbuch Neuntes Buch – Rehabilitation und Teilhabe behinderter Menschen: § 64 Ergänzende Leistungen. . **2019**.
246. Alberton CL, Tartaruga MP, Pinto SS et al. Vertical ground reaction force during water exercises performed at different intensities. *Int J Sports Med* 2013; 34: 881-887.
247. Falagas ME, Zarkadoulia E, Rafailidis PI. The therapeutic effect of balneotherapy: evaluation of the evidence from randomised controlled trials. *Int J Clin Pract* 2009; 63: 1068-1084.
248. Hinman RS, Heywood SE, Day AR. Aquatic physical therapy for hip and knee osteoarthritis: results of a single-blind randomized controlled trial. *Phys Ther* 2007; 87: 32-43.
249. Barry DW, Kohrt WM. Acute effects of 2 hours of moderate-intensity cycling on serum parathyroid hormone and calcium. *Calcif Tissue Int* 2007; 80: 359-365.
250. Maimoun L, Lumbroso S, Manetta J et al. Testosterone is significantly reduced in endurance athletes without impact on bone mineral density. *Horm Res* 2003; 59: 285-292.
251. Maimoun L, Georgopoulos NA, Sultan C. Endocrine disorders in adolescent and young female athletes: impact on growth, menstrual cycles, and bone mass acquisition. *J Clin Endocrinol Metab* 2014; 99: 4037-4050.
252. Penko AL, Zimmerman NM, Crawford M et al. Effect of Aerobic Exercise on Cardiopulmonary Responses and Predictors of Change in Individuals With Parkinson's Disease. *Arch Phys Med Rehabil* 2021; 102: 925-931.
253. Hsieh YF, Robling AG, Ambrosius WT et al. Mechanical loading of diaphyseal bone in vivo: the strain threshold for an osteogenic response varies with location. *J Bone Miner Res* 2001; 16: 2291-2297.
254. Turner CH, Forwood MR, Rho JY et al. Mechanical loading thresholds for lamellar and woven bone formation. *J Bone Miner Res* 1994; 9: 87-97.
255. O'Connor JA, Lanyon LE. The influence of strain rate on adaptive bone remodelling. *J Biomechanics* 1982; 15: 767-781.
256. Skerry TM. Mechanical loading and bone: what sort of exercise is beneficial to the skeleton? *Bone* 1997; 20: 179-181.

257. Skerry TM, Peet NM. "Unloading" exercise increases bone formation in rats. *J Bone Miner Res* 1997; 12: 1520.
258. Cullen DM, Smith RT, Akhter MP. Bone-loading response varies with strain magnitude and cycle number. *J Appl Physiol* 2001; 91: 1971-1976.
259. Umemura Y, Ishiko T, Yamauchi T et al. Five jumps per day increase bone mass and breaking force in rats. *J Bone Miner Res* 1997; 12: 1480-1485.
260. McLeod KJ, Rubin CT. Sensitivity of the bone remodeling response to the frequency of applied strain. *Trans Orthop Res Soc* 1992; 17: 533.
261. Rubin CT, McLeod KJ. Promotion of bony ingrowth by frequency specific, low-amplitude mechanical strain. *Clin Orthop* 1994; 298: 165-174.
262. Hsieh YF, Turner CH. Effects of loading frequency on mechanically induced bone formation. *J Bone Miner Res* 2001; 16: 918-924.
263. Weinbaum S, Cowin SC, Zeng Y. A model for the excitation of osteocytes by mechanical loading-induced bone fluid shear stresses. *J Biomech* 1994; 27: 339-360.
264. Chen J, Ruan H, Liu Y et al. Therapeutic effects of whole-body vibration on fracture healing in ovariectomized rats: a systematic review and meta-analysis. *Menopause* 2019; 26: 677-686.
265. Mozayani H, Torkaman G, Anbarian M et al. The Effect of Whole Body Vibration on the Mechanical Properties of the Femur and Tibia in Ovariectomized Rats. *Studies in Sport Medicine* 2018; 10: 17-32.
266. Rubinacci A, Marenzana M, Cavani F et al. Ovariectomy sensitizes rat cortical bone to whole-body vibration. *Calcified tissue international* 2008; 82: 316-326.
267. Sehmisch S, Galal R, Kolios L et al. Effects of low-magnitude, high-frequency mechanical stimulation in the rat osteopenia model. *Osteoporos Int* 2009; 20: 1999-2008.
268. Liu X, Gao X, Tong J et al. Improvement of Osteoporosis in Rats With Hind-Limb Unloading Treated With Pulsed Electromagnetic Field and Whole-Body Vibration. *Phys Ther* 2022; 102:
269. Rubin C, Xu G, Judex S. The anabolic activity of bone tissue, suppressed by disuse, is normalized by brief exposure to extremely low-magnitude mechanical stimuli. *Faseb J* 2001; 15: 2225-2229.
270. Yang P, Jia B, Ding C et al. Whole-body vibration effects on bone before and after hind-limb unloading in rats. *Aviation, space, and environmental medicine* 2009; 80: 88-93.
271. Minematsu A, Nishii Y. Effects of whole body vibration on bone properties in growing rats. *International Biomechanics* 2022; 9: 19-26.
272. Xie L, Rubin C, Judex S. Enhancement of the adolescent murine musculoskeletal system using low-level mechanical vibrations. *Journal of applied physiology* 2008; 104: 1056-1062.
273. Xie L, Jacobson JM, Choi ES et al. Low-level mechanical vibrations can influence bone resorption and bone formation in the growing skeleton. *Bone* 2006; 39: 1059-1066.
274. Chen G-X, Zheng S, Qin S et al. Effect of low-magnitude whole-body vibration combined with alendronate in ovariectomized rats: a random controlled osteoporosis prevention study. *PLoS One* 2014; 9: e96181.
275. Rubin C, Turner AS, Bain S et al. Anabolism. Low mechanical signals strengthen long bones. *Nature* 2001; 412: 603-604.
276. von Stengel S, Kemmler W. Steigerung der Knochenfestigkeit durch Ganzkörpervibration - Eine Übersicht über die aktuelle Studienlage. *Osteologie* 2015; 24: 30-41.
277. Pel J, Bagheri J, Van Dam L et al. Platform accelerations of three different whole-body vibration devices and the transmission of vertical vibrations to the lower limbs. *Medical engineering & physics* 2009; 31: 937-944.
278. DadeMatthews OO, Agostinelli PJ, Neal FK et al. Systematic review and meta-analyses on the effects of whole-body vibration on bone health. *Complement Ther Med* 2022; 65: 102811.

279. Zha DS, Zhu QA, Pei WW et al. Does whole-body vibration with alternative tilting increase bone mineral density and change bone metabolism in senior people? *Aging Clin Exp Res* 2012; 24: 28-36.
280. de Oliveira RDJ, de Oliveira RG, de Oliveira LC et al. Effectiveness of whole-body vibration on bone mineral density in postmenopausal women: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Osteoporosis International* 2023; 34: 29-52.
281. ElDeeb A, Abdel-Aziem A. Effect of whole-body vibration exercise on power profile and bone mineral density in postmenopausal women with osteoporosis: a randomized controlled trial. *Journal of Manipulative and Physiological Therapeutics* 2020; 43: 384-393.
282. Jepsen D, Ryg J, Hansen S et al. The combined effect of Parathyroid hormone (1–34) and whole-body Vibration exercise in the treatment of postmenopausal Osteoporosis (PaVOS study): a randomized controlled trial. *Osteoporosis International* 2019; 30: 1827-1836.
283. Sen E, Esmaeilzadeh S, Eskiurt N. Effects of whole-body vibration and high impact exercises on the bone metabolism and functional mobility in postmenopausal women. *Journal of bone and mineral metabolism* 2020; 38: 392-404.
284. von Stengel S, Kemmler W, Engelke K et al. Effects of whole body vibration on bone mineral density and falls: results of the randomized controlled ELVIS study with postmenopausal women. *Osteoporos Int* 2011; 22: 317-325.
285. Marin-Cascales E, Alcaraz PE, Rubio-Arias JA. Effects of 24 Weeks of Whole Body Vibration Versus Multicomponent Training on Muscle Strength and Body Composition in Postmenopausal Women: A Randomized Controlled Trial. *Rejuvenation Res* 2017; 20: 193-201.
286. Santin-Medeiros F, Santos-Lozano A, Rey-López J et al. Effects of eight months of whole body vibration training on hip bone mass in older women. *Nutrición Hospitalaria* 2015; 31: 1654-1659.
287. Slatkowska L, Alibhai SM, Beyene J et al. Effect of 12 months of whole-body vibration therapy on bone density and structure in postmenopausal women: a randomized trial. *Ann Intern Med* 2011; 155: 668-679, W205.
288. Verschueren SM, Bogaerts A, Delecluse C et al. The effects of whole-body vibration training and vitamin D supplementation on muscle strength, muscle mass, and bone density in institutionalized elderly women: a 6-month randomized, controlled trial. *J Bone Miner Res* 2010; 26: 42-49.
289. Gusi N, Raimundo A, Leal A. Low-frequency vibratory exercise reduces the risk of bone fracture more than walking: a randomized controlled trial. *BMC Musculoskelet Disord* 2006; 7: 92.
290. Lai CL, Tseng SY, Chen CN et al. Effect of 6 months of whole body vibration on lumbar spine bone density in postmenopausal women: a randomized controlled trial. *Clin Interv Aging* 2013; 8: 1603-1609.
291. Beck BR, Norling TL. The effect of 8 months of twice-weekly low- or higher intensity whole body vibration on risk factors for postmenopausal hip fracture. *Am J Phys Med Rehabil* 2010; 89: 997-1009.
292. Liphardt A, Schipilow J, Hanley D et al. Bone quality in osteopenic postmenopausal women is not improved after 12 months of whole-body vibration training. *Osteoporosis international* 2015; 26: 911-920.
293. Fratini A, Bonci T, Bull AM. Whole Body Vibration Treatments in Postmenopausal Women Can Improve Bone Mineral Density: Results of a Stimulus Focussed Meta-Analysis. *PLoS One* 2016; 11: e0166774.
294. von Stengel S, Kemmler W, Bebenek M et al. Einfluss eines Ganzkörper-Vibrationstrainings auf unterschiedlichen Geräten auf die Knochendichte und Parameter der neuromuskulären Leistungsfähigkeit postmenopausaler Frauen. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin* 2009; 60: 228.
295. von Stengel S, Kemmler W, Bebenek M et al. Effects of Whole Body Vibration Training on Different Devices on Bone Mineral Density and Falls. *Med Sci Sports Exerc* 2011; 43: 1071-1079.

296. Leung KS, Li CY, Tse YK et al. Effects of 18-month low-magnitude high-frequency vibration on fall rate and fracture risks in 710 community elderly-a cluster-randomized controlled trial. *Osteoporos Int* 2014; 25: 1785-1795.
297. Rajapakse C, Johncola A, Batzdorf A et al. Effect of Low-Intensity Vibration on Bone Strength, Microstructure, and Adiposity in Pre-Osteoporotic Postmenopausal Women: A Randomized Placebo-Controlled Trial. *Journal of Bone and Mineral Research* 2021; 36: 673-684.
298. Rubin CT, Cullen DM, Ryaby J et al. Prevention of postmenopausal bone loss by a low-magnitude, high frequency mechanical stimuli: a clinical trial assessing compliance efficacy, and safety. *J Bone Min Res* 2004; 19: 343-351.
299. Rittweger J. Whole Body Vibration as an Exercise Modality to Prevent Sarcopenia and Osteoporosis. In *Osteoporotic Fracture and Systemic Skeletal Disorders*; Springer: 2022.
300. Muir J, Kiel DP, Rubin CT. Safety and severity of accelerations delivered from whole body vibration exercise devices to standing adults. *J Sci Med Sport* 2013; 16: 526-531.
301. Kemmler W, Eifler C, Fröhlich M. *Ganzkörper-Elektromyostimulation: Effekte, Limitationen, Perspektiven einer innovativen Trainingsmethode*; Springer-Spektrum: Heidelberg, 2022.
302. Eifler C. Marktsituation, Trends und Entwicklungen. In *Ganzkörper-EMS*, Kemmler, W., Fröhlich, M., Eifler, C., Eds.; Springer Spektrum: Wiesbaden, 2022.
303. BMU, (Ed.) *Verordnung zum Schutz vor schädlichen Wirkungen nichtionisierender Strahlung bei der Anwendung am Menschen (NiSV)*. Bundesanzeiger Verlag: Bonn, 2019.
304. BMU, (Ed.) *Anforderungen an den Erwerb der Fachkunde für Anwendungen nichtionisierender Strahlungsquellen am Menschen*. Bundesanzeiger Verlag: Bonn, 2020.
305. Kemmler W, Von Stengel S, Schwarz J et al. Effect of whole-body electromyostimulation on energy expenditure during exercise. *J Strength Cond Res* 2012; 26: 240-245.
306. Arija-Blazquez A, Ceruelo-Abajo S, Diaz-Merino MS et al. Effects of electromyostimulation on muscle and bone in men with acute traumatic spinal cord injury: A randomized clinical trial. *J Spinal Cord Med* 2014; 37: 299-309.
307. Clark JM, Jelbart M, Rischbieth H et al. Physiological effects of lower extremity functional electrical stimulation in early spinal cord injury: lack of efficacy to prevent bone loss. *Spinal Cord* 2007; 45: 78-85.
308. BeDell KK, Scremin AM, Perell KL et al. Effects of functional electrical stimulation-induced lower extremity cycling on bone density of spinal cord-injured patients. *Am J Phys Med Rehabil* 1996; 75: 29-34.
309. Belanger M, Stein RB, Wheeler GD et al. Electrical stimulation: can it increase muscle strength and reverse osteopenia in spinal cord injured individuals? *Arch Phys Med Rehabil* 2000; 81: 1090-1098.
310. Chen SC, Lai CH, Chan WP et al. Increases in bone mineral density after functional electrical stimulation cycling exercises in spinal cord injured patients. *Disabil Rehabil* 2005; 27: 1337-1341.
311. Eser P, de Bruin ED, Telley I et al. Effect of electrical stimulation-induced cycling on bone mineral density in spinal cord-injured patients. *Eur J Clin Invest* 2003; 33: 412-419.
312. Kemmler W, von Stengel S. Exercise and osteoporosis-related fractures: Perspectives and recommendations of the sports and exercise scientist. *Physician and Sportmedicine* 2011; 39: 142-157.
313. Kemmler W, Kleinoder H, Fröhlich M. Editorial: Whole-Body Electromyostimulation: A Training Technology to Improve Health and Performance in Humans? *Front Physiol* 2020; 11: 523.
314. Kemmler W, Teschler M, Weissenfels A et al. Whole-body electromyostimulation to fight sarcopenic obesity in community-dwelling older women at risk. Results of the randomized controlled FORMOSA-sarcopenic obesity study. *Osteoporos Int* 2016; 27: 3261-3270.

315. Kemmler W, Weissenfels A, Teschler M et al. Whole-body Electromyostimulation and protein supplementation favorably affect Sarcopenic Obesity in community-dwelling older men at risk. The Randomized Controlled FranSO Study. *Clin Interv Aging* 2017; 12: 1503-1513.
316. Ferretti JL, Cointry GR, Capozza RF et al. Bone mass, bone strength, muscle-bone interactions, osteopenias and osteoporoses. *Mech Ageing Dev* 2003; 124: 269-279.
317. Qin YX, Lam H, Ferreri S et al. Dynamic skeletal muscle stimulation and its potential in bone adaptation. *J Musculoskelet Neuronal Interact* 2010; 10: 12-24.
318. Amaro-Gahete FJ, De-la OA, Jurado-Fasoli L et al. Effects of different exercise training programs on body composition: A randomized control trial. *Scand J Med Sci Sports* 2019; 29: 968-979.
319. Paclikova A, Struhar I, Kotkova et al. IMPACT OF WHOLE-BODY ELECTROMYOSTIMULATION AND RESISTANCE TRAINING ON BONE MINERAL DENSITY IN WOMEN AT RISK OF OSTEOPOROSIS. *Journal of Physical Education and Sport Sciences* 2021; 6: 69-79.
320. von Stengel S, Bebenek M, Engelke K et al. Whole-Body Electromyostimulation to Fight Osteopenia in Elderly Females: The Randomized Controlled Training and Electrostimulation Trial (TEST-III). *J Osteoporos* 2015; 2015: 643520.
321. Müllerová M, Vaculíková P, Potůčková A et al. Impact of Whole-Body Electromyostimulation and Resistance Training Programme on Strength Parameters and Body Composition in Group of Elderly Women at Risk of Sarcopenia. *Studia sportiva* 2022; 16: 292-304.
322. Sánchez-Infante J, Bravo-Sánchez A, Abiánb P et al. The influence of whole-body electromyostimulation training in middle-aged women. *Isokinet Exerc Sci* 2020; 1: 1-9.
323. Kemmler W, Shojaa M, Steele J et al. Efficacy of Whole-Body Electromyostimulation (WB-EMS) on body composition and muscle strength in non-athletic adults. A systematic review and meta-analysis. *Front Physiol* 2021; 12: 640657.
324. Kemmler W, Von Stengel S, Bebenek M. Effekte eines Ganzkörper-Elektromyostimulations-Trainings auf die Knochendichte eines Hochrisikokollektivs für Osteopenie . Eine randomisierte Studie mit schlanken und sportlich inaktiven Frauen. *Osteologie* 2013; 22: 121-128.
325. Kemmler W, Engelke K, Von Stengel S. Ganzkörper-Elektromyostimulation zur Prävention der Sarkopenie bei einem älteren Risikokollektiv. Die TEST-III Studie. *Dtsch Z Sportmed* 2012; 63: 16-23.
326. Stollberger C, Finsterer J. Side effects of whole-body electro-myo-stimulation. *Wien Med Wochenschr* 2019; 169: 173-180.
327. Teschler M, Mooren FC. (Whole-Body) Electromyostimulation, Muscle Damage, and Immune System: A Mini Review. *Front Physiol* 2019; 10: 1461.
328. Teschler M, Weissenfels A, Bebenek M et al. Very high creatine kinase CK levels after WB_EMS. Are there implications for health? *Int J Clin Exp Med* 2016; 9: 22841-22850.
329. Bloeckl J, Raps S, Weineck M et al. Feasibility and Safety of Whole-Body Electromyostimulation in Frail Older People-A Pilot Trial. *Front Physiol* 2022; 13: 856681.
330. von Stengel S, Fröhlich M, Ludwig O et al. Revised contraindications for the use of non-medical WB-electromyostimulation. Evidence-based German consensus recommendations. *Front Sports Act Living* 2024; 6: 1371723.
331. Kemmler W, Fröhlich M, Ludwig O et al. Position statement and updated international guideline for safe and effective whole-body electromyostimulation training-the need for common sense in WB-EMS application. *Front Physiol* 2023; 14: 1174103.
332. Kemmler W, Shojaa M, Kohl M et al. Dynamisches Krafttraining und Knochendichte an der Lendenwirbelsäule postmenopausaler Frauen. *Osteologie* 2020; 29: 194-206.
333. Haff GG. Roundtable Discussion: Machines Versus Free Weights. *Strength and Conditioning Journal* 2000; 22: 18-30.

334. Ratamess NA, Alvar BA, Evetoch TK et al. American College of Sports Medicine position stand. Progression models in resistance training for healthy adults. *Med Sci Sports Exerc* 2009; 41: 687-708.
335. Newman AB, Kupelian V, Visser M et al. Strength, but not muscle mass, is associated with mortality in the health, aging and body composition study cohort. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci* 2006; 61: 72-77.
336. Roshanravan B, Patel KV, Fried LF et al. Association of Muscle Endurance, Fatigability, and Strength With Functional Limitation and Mortality in the Health Aging and Body Composition Study. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci* 2017; 72: 284-291.
337. Visser M, Goodpaster BH, Kritchevsky SB et al. Muscle mass, muscle strength, and muscle fat infiltration as predictors of incident mobility limitations in well-functioning older persons. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci* 2005; 60: 324-333.
338. Iversen VM, Norum M, Schoenfeld BJ et al. No Time to Lift? Designing Time-Efficient Training Programs for Strength and Hypertrophy: A Narrative Review. *Sports Med* 2021; 51: 2079-2095.
339. Kerr ZY, Collins CL, Dawn Comstock R. Epidemiology of weight training-related injuries presenting to United States emergency departments, 1990 to 2007. *The American Journal of Sports Medicine* 2010; 38: 765-771.
340. Haugen ME, Varvik FT, Larsen S et al. Effect of free-weight vs. machine-based strength training on maximal strength, hypertrophy and jump performance - a systematic review and meta-analysis. *BMC Sports Sci Med Rehabil* 2023; 15: 103.
341. Kemmler W, Beeskow C, Pintag R et al. Umsetzung moderner trainingswissenschaftlicher Erkenntnisse in ein knochenanaboles Training für früh-postmenopausale Frauen - Die Erlanger Fitness und Osteoporose Präventions Studie (EFOPS). *Osteologie* 2004; 13: 65-77.
342. Gentil P, Arruda A, Souza D et al. Is There Any Practical Application of Meta-Analytical Results in Strength Training? *Front Physiol* 2017; 8: 1.
343. Kemmler W. Meta-analysis and exercise related sports medicine [Meta-Analysen im trainingswissenschaftlichen und sportmedizinischen Spannungsfeld]. *Dt Ztschr Sportmedizin* 2013; 64: 96-98.
344. Herrmann M, Engelke K, Ebert R et al. Interactions between Muscle and Bone-Where Physics Meets Biology. *Biomolecules* 2020; 10:
345. Nederveen JP, Warnier G, Di Carlo A et al. Extracellular Vesicles and Exosomes: Insights From Exercise Science. *Front Physiol* 2020; 11: 604274.
346. Fruhbeis C, Helmig S, Tug S et al. Physical exercise induces rapid release of small extracellular vesicles into the circulation. *J Extracell Vesicles* 2015; 4: 28239.
347. Oliveira GP, Jr., Porto WF, Palu CC et al. Effects of Acute Aerobic Exercise on Rats Serum Extracellular Vesicles Diameter, Concentration and Small RNAs Content. *Front Physiol* 2018; 9: 532.
348. Bemben DA, Bemben MG. Dose-response effect of 40 weeks of resistance training on bone mineral density in older adults. *Osteoporos Int* 2011; 22: 179-186.
349. Borer KT, Fogleman K, Gross M et al. Walking intensity for postmenopausal bone mineral preservation and accrual. *Bone* 2007; 41: 713-721.
350. Brentano MA, Cadore EL, Da Silva EM et al. Physiological adaptations to strength and circuit training in postmenopausal women with bone loss. *J Strength Cond Res* 2008; 22: 1816-1825.
351. Maddalozzo GF, Snow CM. High intensity resistance training: effects on bone in older men and women. *Calcif Tissue Int* 2000; 66: 399-404.
352. von Stengel S, Kemmler W, Kalender WA et al. Differential effects of strength versus power training on bone mineral density in postmenopausal women: a 2-year longitudinal study. *Br J Sports Med* 2007; 41: 649-655; discussion 655.

353. Vincent KR, Braith RW. Resistance exercise and bone turnover in elderly men and women. *Med Sci Sports Exerc* 2002; 34: 17-23.
354. Kelley GA, Kelley KS, Kohrt WM. Effects of ground and joint reaction force exercise on lumbar spine and femoral neck bone mineral density in postmenopausal women: a meta-analysis of randomized controlled trials. *BMC Musculoskelet Disord* 2012; 13: 177.
355. Kitagawa T, Hiraya K, Denda T et al. A comparison of different exercise intensities for improving bone mineral density in postmenopausal women with osteoporosis: A systematic review and meta-analysis. *Bone Rep* 2022; 17: 101631.
356. Kemmler W, Bebenek M, Kohl M et al. Exercise and fractures in postmenopausal women. Final results of the controlled Erlangen Fitness and Osteoporosis Prevention Study (EFOPS). *Osteoporos Int* 2015; 26: 2491-2499.
357. Turner CH, Robling AG. Exercise as an anabolic stimulus for bone. *Curr Pharm Des* 2004; 10: 2629-2641.
358. Lasevicius T, Schoenfeld BJ, Silva-Batista C et al. Muscle Failure Promotes Greater Muscle Hypertrophy in Low-Load but Not in High-Load Resistance Training. *J Strength Cond Res* 2019; 36:
359. McDonald F, Yettram AL, MacLeod K. The response of bone to external loading regimes. *Med Eng Phys* 1994; 16: 384-397.
360. Barbalho M, Gentil P, Raiol R et al. High 1RM Tests Reproducibility and Validity are not Dependent on Training Experience, Muscle Group Tested or Strength Level in Older Women. *Sports (Basel)* 2018; 6: 171.
361. Kemmler W, Lauber D, Mayhew D et al. Predicting maximal strength in trained postmenopausal woman. *J Strength Cond Res* 2006; 20: 838-842.
362. Gießing J. *HIT-Hochintensitätstraining* Novagenics-Verlag: Arnsberg, 2008.
363. Zourdos MC, Klemp A, Dolan C et al. Novel Resistance Training-Specific Rating of Perceived Exertion Scale Measuring Repetitions in Reserve. *J Strength Cond Res* 2016; 30: 267-275.
364. Ritsch M. Verletzungen und Überlastungsschäden im Kraftsport. *Sports Orthopaedics and Traumatology* 2020; 36: 260-270.
365. Judex S, Zernicke RF. High-impact exercise and growing bone: relation between high strain rates and enhanced bone formation. *J Appl Physiol* 2000; 88: 2183-2191.
366. Judex S, Zernicke RF. Does the mechanical milieu associated with high-speed running lead to adaptive changes in diaphyseal growing bone? *Bone* 2000; 26: 153-159.
367. Martyn-St James M, Carroll S. Effects of different impact exercise modalities on bone mineral density in premenopausal women: a meta-analysis. *J Bone Miner Metab* 2011; 28: 251-267.
368. Babatunde OO, Forsyth JJ, Gidlow CJ. A meta-analysis of brief high-impact exercises for enhancing bone health in premenopausal women. *Osteoporos Int* 2012; 23: 109-119.
369. Kato T, Terashima T, Yamashita T et al. Effect of low-repetition jump training on bone mineral density in young women. *J Appl Physiol* (1985) 2006; 100: 839-843.
370. von Stengel S, Kemmler W, Lauber D et al. Power Training is more Effective than Strength Training to Maintain Bone Mineral Density in Postmenopausal Woman. *J Appl Physiol* 2005; 99: 181-188.
371. Kemmler W, Engelke K, von Stengel S et al. Long-term four-year exercise has a positive effect on menopausal risk factors: the Erlangen Fitness Osteoporosis Prevention Study. *J Strength Cond Res* 2007; 21: 232-239.
372. Liu CJ, Latham NK. Progressive resistance strength training for improving physical function in older adults. *Cochrane Database Syst Rev* 2009: CD002759.
373. Mangione KK, Miller AH, Naughton IV. Cochrane review: Improving physical function and performance with progressive resistance strength training in older adults. *Phys Ther* 2010; 90: 1711-1715.

374. Raymond MJ, Bramley-Tzerefos RE, Jeffs KJ et al. Systematic review of high-intensity progressive resistance strength training of the lower limb compared with other intensities of strength training in older adults. *Arch Phys Med Rehabil* 2013; 94: 1458-1472.
375. Haque I, Schlacht TZ, Skelton DA. The effects of high velocity resistance training on bone mineral density in older adults: A systematic review. *Bone* 2023; 179: 116986.
376. Schoenfeld BJ. The mechanisms of muscle hypertrophy and their application to resistance training. *J Strength Cond Res* 2010; 24: 2857-2872.
377. Schoenfeld BJ. Does exercise-induced muscle damage play a role in skeletal muscle hypertrophy? *J Strength Cond Res* 2012; 26: 1441-1453.
378. Schoenfeld BJ. Potential mechanisms for a role of metabolic stress in hypertrophic adaptations to resistance training. *Sports Med* 2013; 43: 179-194.
379. Qin YX, Rubin CT, McLeod KJ. Nonlinear dependence of loading intensity and cycle number in the maintenance of bone mass and morphology. *J Orthop Res* 1998; 16: 482-489.
380. 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* 2002; 17: 349-357.
381. Biewener AA. Safety factors in bone strength. *Calcif Tissue Int* 1993; 53 Suppl 1: S68-74.
382. Allen SH. Exercise considerations for postmenopausal women with osteoporosis. *Arthritis Care Res* 1994; 7: 205-214.
383. McDonald F, Yettram AL, MacLeod K. The response of bone to external loading regimens. *Med Eng Phys* 1994; 16: 384-397.
384. Saarto T, Sievanen H, Kellokumpu-Lehtinen P et al. Effect of supervised and home exercise training on bone mineral density among breast cancer patients. A 12-month randomised controlled trial. *Osteoporos Int* 2012; 23: 1601-1612.
385. Turner CH, Forwood MR, Otter MW. Mechanotransduction in bone: do bone cells act as sensors of fluid flow? *Faseb J* 1994; 8: 875-878.
386. Burr DB, Robling AG, Turner CH. Effects of biomechanical stress on bones in animals. *Bone* 2002; 30: 781-786.
387. Hassler CG, Rybicki EF, Cummings KD et al. Quantification of bone stresses during remodeling. *J. Biomechanics* 1980; 13: 185-190.
388. Meade JB, Cowins SC, Klawitter JJ et al. Bone remodelling due to continuously applied loads. *Calcif Tiss Int* 1984; 36: S25-S30.
389. Robling AG, Duijvelaar KM, Geevers JV et al. Modulation of appositional and longitudinal bone growth in the rat ulna by applied static and dynamic force. *Bone* 2001; 29: 105-113.
390. LaMothe JM, Zernicke RF. Rest insertion combined with high-frequency loading enhances osteogenesis. *J Appl Physiol* 2004; 96: 1788-1793.
391. Robling AG, Burr DB, Turner CH. Recovery periods restore mechanosensitivity to dynamically loaded bone. *J Exp Biol* 2001; 204: 3389-3399.
392. Srinivasan S, Gross TS. Intermittent rest enhances osteoblastic activation induced by mechanical loading. *Trans Orthop Res Soc* 2000; 25: 628.
393. Srinivasan S, Weimer DA, Agans SC et al. Low-magnitude mechanical loading becomes osteogenic when rest is inserted between each load cycle. *J Bone Miner Res* 2002; 17: 1613-1620.
394. Umemura Y, Sogo N, Honda A. Effects of intervals between jumps or bouts on osteogenic response to loading. *J Appl Physiol* 2002; 93: 1345-1348.
395. Robling AG, Burr DB, Turner CH. Partitioning a daily mechanical stimulus into discrete loading bouts improves the osteogenic response to loading. *J Bone Miner Res* 2000; 15: 1596-1602.
396. Robling AG, Hinant FM, Burr DB et al. Shorter, more frequent mechanical loading sessions enhance bone mass. *Med Sci Sports Exerc* 2002; 34: 196-202.

397. Saxon LK, Robling AG, Alam IM et al. Mechanosensitivity of the rat skeleton decreases after a long period of loading, but is improved with time off. *Bone* 2005; 36: 454-464.
398. Carlson SA, Fulton JE, Schoenborn CA et al. Trend and prevalence estimates based on the 2008 Physical Activity Guidelines for Americans. *Am J Prev Med* 2010; 39: 305-313.
399. Statistisches-Bundesamt. *Gesundheit in Deutschland [Health in Germany]*; Berlin, 2016.
400. Rütten A, Abu-Omar K, Lampert T et al. *Körperliche Aktivität [Physical Activity]. Report*; Statistisches Bundesamt: Berlin, 2005.
401. DESTATIS. *Gesundheit - Ausgaben 2014*; Wiesbaden, 2016.
402. Bailey CA, Brooke-Wavell K. Optimum frequency of exercise for bone health: randomised controlled trial of a high-impact unilateral intervention. *Bone* 2010; 46: 1043-1049.
403. Borba-Pinheiro CJ, Dantas EH, Vale RG et al. Resistance training programs on bone related variables and functional independence of postmenopausal women in pharmacological treatment: A randomized controlled trial. *Arch Gerontol Geriatr* 2016; 65: 36-44.
404. Cussler EC, Going SB, Houtkooper LB et al. Exercise frequency and calcium intake predict 4-year bone changes in postmenopausal women. *Osteoporos Int* 2005; 16: 2129-2141.
405. Daly RM, Dalla Via J, Fyfe JJ et al. Effects of exercise frequency and training volume on bone changes following a multi-component exercise intervention in middle aged and older men: Secondary analysis of an 18-month randomized controlled trial. *Bone* 2021; 148: 115944.
406. Kemmler W, von Stengel S. Exercise frequency, health risk factors, and diseases of the elderly. *Arch Phys Med Rehabil* 2013; 94: 2046-2053.
407. Kemmler W, von Stengel S. Dose-response effect of exercise frequency on bone mineral density in post-menopausal, osteopenic women. *Scand J Med Sci Sports* 2014; 24: 526-534.
408. Kemmler W, von Stengel S, Kohl M. Exercise frequency and bone mineral density development in exercising postmenopausal osteopenic women. Is there a critical dose of exercise for affecting bone? Results of the Erlangen Fitness and Osteoporosis Prevention Study. *Bone* 2016; 89: 1-6.
409. Mori T, Crandall CJ, Ganz DA. Cost-effectiveness of combined oral bisphosphonate therapy and falls prevention exercise for fracture prevention in the USA. *Osteoporos Int* 2017; 28: 585-595.
410. Aloia JF, McGowan DM, Vaswani AN et al. Relationship of menopause to skeletal and muscle mass. *Am J Clin Nutr* 1991; 53: 1378-1383.
411. Hoga L, Rodolpho J, Goncalves B et al. Women's experience of menopause: a systematic review of qualitative evidence. *JBIM Database System Rev Implement Rep* 2015; 13: 250-337.
412. Sirola J, Rikkinen T. Muscle performance after the menopause. *J Br Menopause Soc* 2005; 11: 45-50.
413. Sowers M, Zheng H, Tomey K et al. Changes in body composition in women over six years at midlife: ovarian and chronological aging. *J Clin Endocrinol Metab* 2007; 92: 895-901.
414. Overlie I, Moen MD, Morkrid L. The endocrine transition around menopause - a five year prospective study with profiles of gonadotropins, estrogens, androgens and SHBG among healthy women. *Acta Obstet Gynecol Scand* 1999; 78: 642-647.
415. McKinlay SM. The normal menopause transition: an overview. *Maturitas* 1996; 23: 137-145.
416. Finkelstein JS, Brockwell SE, Mehta V et al. Bone mineral density changes during the menopause transition in a multiethnic cohort of women. *J Clin Endocrinol Metab* 2008; 93: 861-868.
417. Okano H, Mizunuma H, Soda M et al. The long-term effect of menopause on postmenopausal bone loss in Japanese women: results from a prospective study. *J Bone Miner Res* 1998; 13: 303-309.
418. Shipman AJ, Guy GW, Smith I et al. Vertebral bone mineral density, content and area in 8789 normal women aged 33-73 years who have never had hormone replacement therapy. *Osteoporos Int* 1999; 9: 420-426.

419. Bamman MM, Hill VJ, Adams GR et al. Gender differences in resistance-training-induced myofiber hypertrophy among older adults. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci* 2003; 58: 108-116.
420. Teixeira PJ, Going SB, Houtkooper LB et al. Resistance training in postmenopausal women with and without hormone therapy. *Med Sci Sports Exerc* 2003; 35: 555-562.
421. Sugiyama T, Price JS, Lanyon LE. Functional adaptation to mechanical loading in both cortical and cancellous bone is controlled locally and is confined to the loaded bones. *Bone* 46: 314-321.
422. Devlin MJ. Estrogen, exercise, and the skeleton. *Evol Anthropol* 2011; 20: 54-61.
423. Cheng S, Sipilä S, Taaffe DR et al. Change in bone mass distribution induced by hormone replacement therapy and high-impact physical exercise in post-menopausal women. *Bone* 2002; 31: 126-135.
424. Kohrt WM, Ehsani AA, Birge SJ, Jr. HRT preserves increases in bone mineral density and reductions in body fat after a supervised exercise program. *J Appl Physiol* 1998; 84: 1506-1512.
425. Orr-Walker BJ, Evans MC, Clearwater JM et al. Effects of hormone replacement therapy on bone mineral density in postmenopausal women with primary hyperparathyroidism: four-year follow-up and comparison with healthy postmenopausal women. *Arch Intern Med* 2000; 160: 2161-2166.
426. Wells G, Tugwell P, Shea B et al. Meta-analyses of therapies for postmenopausal osteoporosis. V. Meta-analysis of the efficacy of hormone replacement therapy in treating and preventing osteoporosis in postmenopausal women. *Endocr Rev* 2002; 23: 529-539.
427. Writing_Group. Effects of hormone therapy on bone mineral density: results from the postmenopausal estrogen/progestin interventions (PEPI) trial. The Writing Group for the PEPI. *JAMA* 1996; 276: 1389-1396.
428. Windler E, Hadji P, Ortmann O. Hormone replacement therapy and prevention according to S3 guidelines. *J Gynäkologische Endokrinologie* 2020; 18: 14-20.
429. RKI. *Gesundheitliche Lage der Frauen in Deutschland*.
; Destatis: Berlin, 2020.
430. Zhao R, Xu Z, Zhao M. Effects of Oestrogen Treatment on Skeletal Response to Exercise in the Hips and Spine in Postmenopausal Women: A Meta-Analysis. *Sports Med* 2015; 45: 1163-1173.
431. Evans EM, Van Pelt RE, Binder EF et al. Effects of HRT and exercise training on insulin action, glucose tolerance, and body composition in older women. *J Appl Physiol* 2001; 90: 2033-2040.
432. Sipilä S, Taaffe DR, Cheng S et al. Effects of hormone replacement therapy and high impact physical exercise on skeletal muscle in post-menopausal women: a randomized placebo-controlled trial. *Clinical Science* 2001; 101: 147-157.
433. Suzuki T, Harada A, Shimada H et al. Assessment of eldecalcitol and alendronate effect on postural balance control in aged women with osteoporosis. *J Bone Miner Metab* 2020; 38: 859-867.
434. Uusi-Rasi K, Kannus P, Cheng S et al. Effect of alendronate and exercise on bone and physical performance of postmenopausal women: a randomized controlled trial. *Bone* 2003; 33: 132-143.
435. Zhou J, Liu B, Qin MZ et al. Fall Prevention and Anti-Osteoporosis in Osteopenia Patients of 80 Years of Age and Older: A Randomized Controlled Study. *Orthop Surg* 2020; 12: 890-899.
436. Fu W, Fan J. Intervention effect of exercise rehabilitation therapy on patients with type 2 diabetic osteoporosis. *American Journal of Translational Research* 2021; 13: 3400.
437. Cummings SR, San Martin J, McClung MR et al. Denosumab for prevention of fractures in postmenopausal women with osteoporosis. *N Engl J Med* 2009; 361: 756-765.
438. McClung MR, Lewiecki EM, Cohen SB et al. Denosumab in postmenopausal women with low bone mineral density. *N Engl J Med* 2006; 354: 821-831.
439. Beck BR, Scott D, Daly RM et al. Does Denosumab Really Improve Muscle Strength? Current Evidence Is Weak. *Ann Geriatr Med Res* 2023; 27: 179-180.

440. Aryana I, Rini SS, Setiati S. Denosumab's Therapeutic Effect for Future Osteosarcopenia Therapy : A Systematic Review and Meta-Analysis. *Ann Geriatr Med Res* 2023; 27: 32-41.
441. Miedany YE, Gaafary ME, Toth M et al. Is there a potential dual effect of denosumab for treatment of osteoporosis and sarcopenia? *Clin Rheumatol* 2021; 40: 4225-4232.
442. Rupp T, von Vopelius E, Strahl A et al. Beneficial effects of denosumab on muscle performance in patients with low BMD: a retrospective, propensity score-matched study. *Osteoporos Int* 2022; 33: 2177-2184.
443. Martinez-Reina J, Calvo-Gallego JL, Pivonka P. Combined Effects of Exercise and Denosumab Treatment on Local Failure in Post-menopausal Osteoporosis-Insights from Bone Remodelling Simulations Accounting for Mineralisation and Damage. *Front Bioeng Biotechnol* 2021; 9: 635056.
444. Chotiarnwong P, McCloskey E, Eastell R et al. A Pooled Analysis of Fall Incidence From Placebo-Controlled Trials of Denosumab. *J Bone Miner Res* 2020; 35: 1014-1021.
445. Kistler-Fischbacher M, Yong JS, Weeks BK et al. A Comparison of Bone-Targeted Exercise With and Without Antiresorptive Bone Medication to Reduce Indices of Fracture Risk in Postmenopausal Women With Low Bone Mass: The MEDEX-OP Randomized Controlled Trial. *J Bone Miner Res* 2021; 36: 1680-1693.
446. Cosman F, Crittenden DB, Adachi JD et al. Romosozumab Treatment in Postmenopausal Women with Osteoporosis. *N Engl J Med* 2016; 375: 1532-1543.
447. Davis S, Simpson E, Hamilton J et al. Denosumab, raloxifene, romosozumab and teriparatide to prevent osteoporotic fragility fractures: a systematic review and economic evaluation. *Health Technol Assess* 2020; 24: 1-314.
448. McClung MR, Grauer A, Boonen S et al. Romosozumab in postmenopausal women with low bone mineral density. *N Engl J Med* 2014; 370: 412-420.
449. Simpson EL, Martyn-St James M, Hamilton J et al. Clinical effectiveness of denosumab, raloxifene, romosozumab, and teriparatide for the prevention of osteoporotic fragility fractures: A systematic review and network meta-analysis. *Bone* 2020; 130: 115081.
450. Miyauchi A, Matsumoto T, Sugimoto T et al. Effects of teriparatide on bone mineral density and bone turnover markers in Japanese subjects with osteoporosis at high risk of fracture in a 24-month clinical study: 12-month, randomized, placebo-controlled, double-blind and 12-month open-label phases. *Bone* 2010; 47: 493-502.
451. Möckel L, Bartneck M, Mockel C. Risk of falls in postmenopausal women treated with romosozumab: Preliminary indices from a meta-analysis of randomized, controlled trials. *Osteoporos Sarcopenia* 2020; 6: 20-26.
452. Sugiyama T, Torio T, Miyajima T et al. Romosozumab and blosozumab: alternative drugs of mechanical strain-related stimulus toward a cure for osteoporosis. *Front Endocrinol (Lausanne)* 2015; 6: 54.
453. Hagino H, Okano T, Akhter MP et al. Effect of parathyroid hormone on cortical bone response to in vivo external loading of the rat tibia. *J Bone Miner Metab* 2001; 19: 244-250.
454. Ma Y, Jee WSS, Yuan Z et al. Parathyroid hormone and mechanical usage have a synergistic effect in rat tibia diaphyseal cortical bone. *J Bone Miner Res* 1999; 14: 439-448.
455. Sugiyama T, Saxon LK, Zaman G et al. Mechanical loading enhances the anabolic effects of intermittent parathyroid hormone (1-34) on trabecular and cortical bone in mice. *Bone* 2008; 43: 238-248.
456. Cosman F, Lane NE, Bolognese MA et al. Effect of transdermal teriparatide administration on bone mineral density in postmenopausal women. *J Clin Endocrinol Metab* 2010; 95: 151-158.
457. Neer RM, Arnaud CD, Zanchetta JR. Effect of parathyroid hormone (1-34) on fractures and bone mineral density in postmenopausal women with osteoporosis. *N Engl J Med* 2001; 344: 1434-1441.

458. Rooney AM, Bostrom MPG, Dempster DW et al. Loading modality and age influence teriparatide-induced bone formation in the human femoral neck. *Bone* 2020; 136: 115373.
459. Orwoll ES, Scheele WH, Paul S et al. The effect of teriparatide [human parathyroid hormone (1-34)] therapy on bone density in men with osteoporosis. *J Bone Miner Res* 2003; 18: 9-17.
460. Tsai JN, Uihlein AV, Lee H et al. Teriparatide and denosumab, alone or combined, in women with postmenopausal osteoporosis: the DATA study randomised trial. *Lancet* 2013; 382: 50-56.
461. Turner RT, Lotinun S, Hefferan TE et al. Disuse in adult male rats attenuates the bone anabolic response to a therapeutic dose of parathyroid hormone. *J Appl Physiol* (1985) 2006; 101: 881-886.
462. Edwards WB, Simonian N, Haider IT et al. Effects of Teriparatide and Vibration on Bone Mass and Bone Strength in People with Bone Loss and Spinal Cord Injury: A Randomized, Controlled Trial. *J Bone Miner Res* 2018; 33: 1729-1740.
463. Iconaru L, Baleanu F, Charles A et al. Which treatment to prevent an imminent fracture? *Bone Reports* 2021; 15: 101105.
464. Möckel L. Weniger Stürze unter Teriparatid in Patienten mit Osteoporose: Eine Meta-Analyse. *Osteologie* 2020; 29: 31-38.
465. Sherrington C, Fairhall N, Kwok W et al. Evidence on physical activity and falls prevention for people aged 65+ years: systematic review to inform the WHO guidelines on physical activity and sedentary behaviour. *Int J Behav Nutr Phys Act* 2020; 17: 144.
466. Jepsen DB, Thomsen K, Hansen S et al. Effect of whole-body vibration exercise in preventing falls and fractures: a systematic review and meta-analysis. *BMJ Open* 2017; 7: e018342.
467. Schumm AK, Craige EA, Arora NK et al. Does adding exercise or physical activity to pharmacological osteoporosis therapy in patients with increased fracture risk improve bone mineral density and lower fracture risk? A systematic review and meta-analysis. *Osteoporos Int* 2023;
468. Amrein K, Scherkl M, Hoffmann M et al. Vitamin D deficiency 2.0: an update on the current status worldwide. *Eur J Clin Nutr* 2020; 74: 1498-1513.
469. Holick MF, Binkley NC, Bischoff-Ferrari HA et al. Evaluation, treatment, and prevention of vitamin D deficiency: an Endocrine Society clinical practice guideline. *J Clin Endocrinol Metab* 2011; 96: 1911-1930.
470. Bouillon R, Carmeliet G, Verlinden L et al. Vitamin D and human health: lessons from vitamin D receptor null mice. *Endocr Rev* 2008; 29: 726-776.
471. Willems HM, van den Heuvel EG, Carmeliet G et al. VDR dependent and independent effects of 1,25-dihydroxyvitamin D3 on nitric oxide production by osteoblasts. *Steroids* 2012; 77: 126-131.
472. Lips P, Cashman KD, Lamberg-Allardt C et al. Current vitamin D status in European and Middle East countries and strategies to prevent vitamin D deficiency: a position statement of the European Calcified Tissue Society. *Eur J Endocrinol* 2019; 180: P23-P54.
473. Garcia-Gomariz C, Igual-Camacho C, Sanchis-Sales E et al. Effects of Three Interventions Combining Impact or Walking at Intense Pace Training, with or without Calcium and Vitamin Supplements, to Manage Postmenopausal Women with Osteopenia and Osteoporosis. *Int J Environ Res Public Health* 2022; 19:
474. Mason C, Tapsoba JD, Duggan C et al. Effects of Vitamin D3 Supplementation on Lean Mass, Muscle Strength, and Bone Mineral Density During Weight Loss: A Double-Blind Randomized Controlled Trial. *J Am Geriatr Soc* 2016; 64: 769-778.
475. Uusi-Rasi K, Patil R, Karinkanta S et al. Exercise and vitamin D in fall prevention among older women: a randomized clinical trial. *JAMA Intern Med* 2015; 175: 703-711.
476. Bischoff-Ferrari HA, Freystatter G, Vellas B et al. Effects of vitamin D, omega-3 fatty acids, and a simple home strength exercise program on fall prevention: the DO-HEALTH randomized clinical trial. *Am J Clin Nutr* 2022; 115: 1311-1321.

477. Bischoff-Ferrari HA, Willett WC, Manson JE et al. Combined Vitamin D, Omega-3 Fatty Acids, and a Simple Home Exercise Program May Reduce Cancer Risk Among Active Adults Aged 70 and Older: A Randomized Clinical Trial. *Front Aging* 2022; 3: 852643.
478. Carlberg C. Vitamin D in the Context of Evolution. *Nutrients* 2022; 14:
479. Bischoff-Ferrari H. Vitamin D: what is an adequate vitamin D level and how much supplementation is necessary? *Best Pract Res Clin Rheumatol* 2009; 23: 789-795.
480. Shams-White MM, Chung M, Du M et al. Dietary protein and bone health: a systematic review and meta-analysis from the National Osteoporosis Foundation. *Am J Clin Nutr* 2017; 105: 1528-1543.
481. Wallace TC, Frankenfeld CL. Dietary Protein Intake above the Current RDA and Bone Health: A Systematic Review and Meta-Analysis. *J Am Coll Nutr* 2017; 36: 481-496.
482. Groenendijk I, den Boeft L, van Loon LJC et al. High Versus low Dietary Protein Intake and Bone Health in Older Adults: a Systematic Review and Meta-Analysis. *Comput Struct Biotechnol J* 2019; 17: 1101-1112.
483. Wu AM, Sun XL, Lv QB et al. The relationship between dietary protein consumption and risk of fracture: a subgroup and dose-response meta-analysis of prospective cohort studies. *Sci Rep* 2015; 5: 9151.
484. Zittermann A, Schmidt A, Haardt J et al. Protein intake and bone health: an umbrella review of systematic reviews for the evidence-based guideline of the German Nutrition Society. *Osteoporos Int* 2023; 34: 1335-1353.
485. Amasene M, Besga A, Echeverria I et al. Effects of Leucine-Enriched Whey Protein Supplementation on Physical Function in Post-Hospitalized Older Adults Participating in 12-Weeks of Resistance Training Program: A Randomized Controlled Trial. *Nutrients* 2019; 11:
486. Daly RM, O'Connell SL, Mundell NL et al. Protein-enriched diet, with the use of lean red meat, combined with progressive resistance training enhances lean tissue mass and muscle strength and reduces circulating IL-6 concentrations in elderly women: a cluster randomized controlled trial. *Am J Clin Nutr* 2014; 99: 899-910.
487. de Azevedo Bach S, Radaelli R, Beck Schemes M et al. Can supplemental protein to low-protein containing meals superimpose on resistance-training muscle adaptations in older adults? A randomized clinical trial. *Exp Gerontol* 2022; 162: 111760.
488. Fernandes RR, Nabuco HCG, Sugihara Junior P et al. Effect of protein intake beyond habitual intakes following resistance training on cardiometabolic risk disease parameters in pre-conditioned older women. *Exp Gerontol* 2018; 110: 9-14.
489. Leenders M, Verdijk LB, Van der Hoeven L et al. Protein supplementation during resistance-type exercise training in the elderly. *Med Sci Sports Exerc* 2013; 45: 542-552.
490. Roschel H, Hayashi AP, Fernandes AL et al. Supplement-based nutritional strategies to tackle frailty: A multifactorial, double-blind, randomized placebo-controlled trial. *Clin Nutr* 2021; 40: 4849-4858.
491. Shenoy S, Bedi R, Sandhu JS. Effect of soy isolate protein and resistance exercises on muscle performance and bone health of osteopenic/osteoporotic post-menopausal women. *J Women Aging* 2013; 25: 183-198.
492. Verdijk LB, Jonkers RA, Gleeson BG et al. Protein supplementation before and after exercise does not further augment skeletal muscle hypertrophy after resistance training in elderly men. *Am J Clin Nutr* 2009; 89: 608-616.
493. Zdzieblik D, Oesser S, Baumstark MW et al. Collagen peptide supplementation in combination with resistance training improves body composition and increases muscle strength in elderly sarcopenic men: a randomised controlled trial. *Br J Nutr* 2015; 114: 1237-1245.
494. Hidayat K, Tong X, Rizzoli R et al. The skeletal safety of milk-derived proteins: A meta-analysis of randomized controlled trials. *Osteoporos Int* 2023; 34: 1937-1949.

495. Wright CS, McMorrow AM, Weinheimer-Haus EM et al. Whey protein supplementation and higher total protein intake do not influence bone quantity in overweight and obese adults following a 36-week exercise and diet intervention. *The Journal of nutrition* 2017; 147: 179-186.
496. Khodadadi F, Morvaridzadeh M, Khodadadi H et al. The effect of Whey protein and MBP (milk basic protein) on bone health parameters: A systematic review and meta-analysis of randomized clinical trials. *Nutrition and Food Sciences Research* 2023; 10: 3.
497. DGE. *Referenzwerte für die Nährstoffzufuhr*; DGE: Frankfurt, 2024.
498. Bauer J, Biolo G, Cederholm T et al. Evidence-based recommendations for optimal dietary protein intake in older people: a position paper from the PROT-AGE Study Group. *J Am Med Dir Assoc* 2013; 14: 542-559.
499. Jarvinen TL, Sievanen H, Khan KM et al. Shifting the focus in fracture prevention from osteoporosis to falls. *BMJ* 2008; 336: 124-126.
500. Parkkari J, Kannus P, Palvanen M et al. Majority of hip fractures occur as a result of a fall and impact on the greater trochanter of the femur: a prospective controlled hip fracture study with 206 consecutive patients. *Calcif Tissue Int* 1999; 65: 183-187.
501. Masud T, Morris RO. Epidemiology of falls. *Age Ageing* 2001; 30 Suppl 4: 3-7.
502. Lord SR, Sherrington C, Hicks C. Epidemiology of falls and fall-related injuries. Falls in older people: risk factors, strategies for prevention and implications for practice 2021; 3: 3-22.
503. Rubenstein LZ. Falls in older people: epidemiology, risk factors and strategies for prevention. *Age Ageing* 2006; 35 Suppl 2: ii37-ii41.
504. Rapp K, Freiburger E, Todd C et al. Fall incidence in Germany: results of two population-based studies, and comparison of retrospective and prospective falls data collection methods. *BMC Geriatr* 2014; 14: 105.
505. Gribbin J, Hubbard R, Smith C et al. Incidence and mortality of falls amongst older people in primary care in the United Kingdom. *QJM* 2009; 102: 477-483.
506. Kannus P, Parkkari J, Niemi S et al. Fall-induced deaths among elderly people. *Am J Public Health* 2005; 95: 422-424.
507. Stevens JA, Hasbrouck LM, Durant TM et al. Surveillance for injuries and violence among older adults. *MMWR CDC Surveill Summ* 1999; 48: 27-50.
508. Sylliaas H, Idland G, Sandvik L et al. Does mortality of the aged increase with the number of falls? Results from a nine-year follow-up study. *Eur J Epidemiol* 2009; 24: 351-355.
509. Scott V, Pearce M, Pengelly C. Technical report: hospitalizations due to falls among Canadians age 65 and over. Report on Seniors' falls in Canada. Canada, Minister of Public Works and Government Services 2005:
510. Harvey LA, Close JC. Traumatic brain injury in older adults: characteristics, causes and consequences. *Injury* 2012; 43: 1821-1826.
511. Rubenstein LZ, Josephson KR. Causes and prevention of falls in elderly people. In *Falls, ballance and gait disorders in the elderly*, Vellas, B., Toupet, M., Rubenstein, L.Z., Albaredo, J.L., Christen, J., Eds.; Elsevier: Paris, 1992.
512. Rubenstein LZ, Robbins AS, Schulman BL et al. Falls and instability in the elderly. *J Am Ger Soc* 1988; 36: 266-278.
513. Sattin RW. Falls among older persons: A public health perspective. *Annual Review of Public Health* 1992; 13: 489-508.
514. Stubbs B, Perara G, Koyanagi A et al. Risk of Hospitalized Falls and Hip Fractures in 22,103 Older Adults Receiving Mental Health Care vs 161,603 Controls: A Large Cohort Study. *J Am Med Dir Assoc* 2020; 21: 1893-1899.
515. Tinetti ME, Speechley M, Gintner SF. Risk factors for falls among elderly persons living in the community. *N Engl J Med* 1988; 319: 1701-1707.

516. Snow CM. Fall related factors in the elderly. *Osteoporos Int* 1999; 9: S13.
517. Evans WJ. After a fall: consequences and implications of falls by old people. In *Falls, balance, and gait disorders in the elderly*, Vellas, B., Toupet, M., Rubenstein, L.Z., Albaredo, J.L., Christen, J., Eds.; Elsevier: Paris, 1992.
518. Kannus P. Preventing osteoporosis, falls, and fractures among elderly people. Promotion of lifelong physical activity is essential. *BMJ* 1999; 318: 205-206.
519. Kannus P. Fall-induced injuries and death among older adults. *JAMA* 1999; 271: 1895-1899.
520. Pinilla TP, Boardman KC, Bouxsein ML et al. Impact direction from a fall influences the failure load of the proximal femur as much as age-related bone loss. *Calcif Tissue Int* 1996; 58: 231-235.
521. Sturnieks DL. Biomechanics of Balance and Falling. *Falls in Older People: Risk Factors, Strategies for Prevention and Implications for Practice* 2021: 105.
522. Komisar V, Robinovitch SN. The Role of Fall Biomechanics in the Cause and Prevention of Bone Fractures in Older Adults. *Curr Osteoporos Rep* 2021; 19: 381-390.
523. Kiel DP, O'Sullivan P, Teno JM et al. Health care utilization and functional status in the aged following a fall. *Med Care* 1991; 29: 221-228.
524. Tinetti ME, Williams CS. Falls, injuries due to falls, and the risk of admission to a nursing home. *N Engl J Med* 1997; 337: 1279-1284.
525. Donald IP, Bulpitt CJ. The prognosis of falls in elderly people living at home. *Age Ageing* 1999; 28: 121-125.
526. Aoyagi K. Falls among community dwelling elderly in Japan. *J Bone Miner Res* 1998; 14: 1468-1474.
527. Scheffer AC, Schuurmans MJ, van Dijk N et al. Fear of falling: measurement strategy, prevalence, risk factors and consequences among older persons. *Age Ageing* 2008; 37: 19-24.
528. Donoghue OA, Cronin H, Savva GM et al. Effects of fear of falling and activity restriction on normal and dual task walking in community dwelling older adults. *Gait Posture* 2013; 38: 120-124.
529. Vellas BJ, Wayne SJ, Romero LJ et al. Fear of falling and restriction of mobility in elderly fallers. *Age Ageing* 1997; 26: 189-193.
530. Murphy SL, Williams CS, Gill TM. Characteristics associated with fear of falling and activity restriction in community-living older persons. *J Am Geriatr Soc* 2002; 50: 516-520.
531. Wijnhuizen GJ, de Jong R, Hopman-Rock M. Older persons afraid of falling reduce physical activity to prevent outdoor falls. *Prev Med* 2007; 44: 260-264.
532. Salkeld G, Cameron ID, Cumming RG et al. Quality of life related to fear of falling and hip fracture in older women: a time trade off study. *BMJ* 2000; 320: 341-346.
533. Schoene D, Heller C, Aung YN et al. A systematic review on the influence of fear of falling on quality of life in older people: is there a role for falls? *Clin Interv Aging* 2019; 14: 701-719.
534. Ambrose AF, Paul G, Hausdorff JM. Risk factors for falls among older adults: a review of the literature. *Maturitas* 2013; 75: 51-61.
535. Deandrea S, Lucenteforte E, Bravi F et al. Risk factors for falls in community-dwelling older people: a systematic review and meta-analysis. *Epidemiology* 2010; 21: 658-668.
536. Lord SR, Sherrington C, Naganathan V. *Falls in Older People*; Cambridge University Press: 2021.
537. Montero-Odasso M, van der Velde N, Martin FC et al. World guidelines for falls prevention and management for older adults: a global initiative. *Age Ageing* 2022; 51:
538. Becker C, Roigk P, Groß M. Sturzprävention. In *Weißbuch Alterstraumatologie und Orthogeriatric, Liener, U.C., Becker, C., Rapp, K., Raschke, M.J., Kladny, B., Wirtz, D.C., Eds.; Kohlhammer: Stuttgart, 2022.*
539. Mikos M, Winnicki K, Henry BM et al. Link between cardiovascular disease and the risk of falling: A comprehensive review of the evidence. *Pol Arch Intern Med* 2021; 131: 369-376.

540. Dhalwani NN, Fahami R, Sathanapally H et al. Association between polypharmacy and falls in older adults: a longitudinal study from England. *BMJ Open* 2017; 7: e016358.
541. Ziere G, Dieleman JP, Hofman A et al. Polypharmacy and falls in the middle age and elderly population. *Br J Clin Pharmacol* 2006; 61: 218-223.
542. van der Jagt-Willems HC, de Groot MH, van Campen JP et al. Associations between vertebral fractures, increased thoracic kyphosis, a flexed posture and falls in older adults: a prospective cohort study. *BMC Geriatr* 2015; 15: 34.
543. Morrison S, Colberg SR, Parson HK et al. Walking-Induced Fatigue Leads to Increased Falls Risk in Older Adults. *J Am Med Dir Assoc* 2016; 17: 402-409.
544. Feng C, Adebero T, DePaul VG et al. A Systematic Review and Meta-Analysis of Exercise Interventions and Use of Exercise Principles to Reduce Fear of Falling in Community-Dwelling Older Adults. *Phys Ther* 2022; 102:
545. Fu Q, Vangundy TB, Shibata S et al. Exercise training versus propranolol in the treatment of the postural orthostatic tachycardia syndrome. *Hypertension* 2011; 58: 167-175.
546. Katzman WB, Vittinghoff E, Lin F et al. Targeted spine strengthening exercise and posture training program to reduce hyperkyphosis in older adults: results from the study of hyperkyphosis, exercise, and function (SHEAF) randomized controlled trial. *Osteoporos Int* 2017; 28: 2831-2841.
547. Krogh J, Nordentoft M, Sterne JA et al. The effect of exercise in clinically depressed adults: systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *J Clin Psychiatry* 2011; 72: 529-538.
548. Nystoriak MA, Bhatnagar A. Cardiovascular Effects and Benefits of Exercise. *Front Cardiovasc Med* 2018; 5: 135.
549. Shumway-Cook A, Woollacott MH. *Motor control: translating research into clinical practice*; Lippincott Williams and Wilkins: Philadelphia, USA, 2007.
550. Todd C, Skelton D. *What are the main risk factors for falls amongst older people and what are the most effective interventions to prevent these falls?*; World Health Organization. Regional Office for Europe: 2004.
551. Lamb SE, Becker C, Gillespie LD et al. Reporting of complex interventions in clinical trials: development of a taxonomy to classify and describe fall-prevention interventions. *Trials* 2011; 12: 125.
552. Caristia S, Campani D, Cannici C et al. Physical exercise and fall prevention: A systematic review and meta-analysis of experimental studies included in Cochrane reviews. *Geriatr Nurs* 2021; 42: 1275-1286.
553. Sherrington C, Michaleff ZA, Fairhall N et al. Exercise to prevent falls in older adults: an updated systematic review and meta-analysis. *Br J Sports Med* 2017; 51: 1750-1758.
554. Tricco AC, Thomas SM, Veroniki AA et al. Comparisons of Interventions for Preventing Falls in Older Adults: A Systematic Review and Meta-analysis. *JAMA* 2017; 318: 1687-1699.
555. Dautzenberg L, Beglinger S, Tsokani S et al. Interventions for preventing falls and fall-related fractures in community-dwelling older adults: A systematic review and network meta-analysis. *J Am Geriatr Soc* 2021; 69: 2973-2984.
556. Zhao R, Bu W, Chen X. The efficacy and safety of exercise for prevention of fall-related injuries in older people with different health conditions, and differing intervention protocols: a meta-analysis of randomized controlled trials. *BMC Geriatr* 2019; 19: 341.
557. Finnegan S, Seers K, Bruce J. Long-term follow-up of exercise interventions aimed at preventing falls in older people living in the community: a systematic review and meta-analysis. *Physiotherapy* 2019; 105: 187-199.
558. Li F, Harmer P, Eckstrom E et al. Efficacy of exercise-based interventions in preventing falls among community-dwelling older persons with cognitive impairment: is there enough evidence? An updated systematic review and meta-analysis. *Age Ageing* 2021; 50: 1557-1568.

559. Bruce J, Hossain A, Lall R et al. Fall prevention interventions in primary care to reduce fractures and falls in people aged 70 years and over: the PreFIT three-arm cluster RCT. *Health Technol Assess* 2021; 25: 1-114.
560. Liu-Ambrose T, Davis JC, Best JR et al. Effect of a Home-Based Exercise Program on Subsequent Falls Among Community-Dwelling High-Risk Older Adults After a Fall: A Randomized Clinical Trial. *JAMA* 2019; 321: 2092-2100.
561. Thomas S, Mackintosh S, Halbert J. Does the 'Otago exercise programme' reduce mortality and falls in older adults?: a systematic review and meta-analysis. *Age and ageing* 2010; 39: 681-687.
562. Sherrington C, Lord SR, Close J. *Best-practice recommendations for physical activity to prevent falls in older adults: a rapid review. An Evidence Check rapid review brokered by the Sax Institute (<http://www.saxinstitute.org.au>) for the Centre for Health Advancement, NSW Department of Health; 2008. ; 2008.*
563. Hamed A, Bohm S, Mersmann F et al. Follow-up efficacy of physical exercise interventions on fall incidence and fall risk in healthy older adults: a systematic review and meta-analysis. *Sports Med Open* 2018; 4: 56.
564. Sibley KM, Thomas SM, Veroniki AA et al. Comparative effectiveness of exercise interventions for preventing falls in older adults: A secondary analysis of a systematic review with network meta-analysis. *Exp Gerontol* 2021; 143: 111151.
565. Sun M, Min L, Xu N et al. The Effect of Exercise Intervention on Reducing the Fall Risk in Older Adults: A Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials. *Int J Environ Res Public Health* 2021; 18:
566. Gillespie LD, Robertson MC, Gillespie WJ et al. Interventions for preventing falls in older people living in the community. *Cochrane Database Syst Rev* 2012; 9: CD007146.
567. Granacher U, Gollhofer A, Hortobagyi T et al. The importance of trunk muscle strength for balance, functional performance, and fall prevention in seniors: a systematic review. *Sports Med* 2013; 43: 627-641.
568. Kummel J, Kramer A, Giboin LS et al. Specificity of Balance Training in Healthy Individuals: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Sports Med* 2016; 46: 1261-1271.
569. Berg WP, Alessio HM, Mills EM et al. Circumstances and consequences of falls in independent community-dwelling older adults. *Age Ageing* 1997; 26: 261-268.
570. Cali CM, Kiel DP. An epidemiologic study of fall-related fractures among institutionalized older people. *J Am Geriatr Soc* 1995; 43: 1336-1340.
571. Norton R, Campbell AJ, Lee-Joe T et al. Circumstances of falls resulting in hip fractures among older people. *J Am Geriatr Soc* 1997; 45: 1108-1112.
572. Granacher U, Muehlbauer T, Gschwind Y et al. Diagnostik und Training von Kraft und Gleichgewicht zur Sturzprävention im Alter. *Zeitschrift für Gerontologie und Geriatrie* 2014; 47: 513-526.
573. Gschwind YJ, Kressig RW, Lacroix A et al. A best practice fall prevention exercise program to improve balance, strength / power, and psychosocial health in older adults: study protocol for a randomized controlled trial. *BMC Geriatr* 2013; 13: 105.
574. Muehlbauer T, Roth R, Bopp M et al. An exercise sequence for progression in balance training. *J Strength Cond Res* 2012; 26: 568-574.
575. Nørgaard JE, Andersen S, Ryg J et al. Effect of Treadmill Perturbation-Based Balance Training on Fall Rates in Community-Dwelling Older Adults: A Randomized Clinical Trial. *JAMA Netw Open* 2023; 6: e238422.
576. Schoene D, Gross M, von Stengel S et al. Empfehlungen für ein körperliches Training zur Sturzprävention bei älteren, selbständig lebenden Menschen. *Osteologie* 2023; 32: 183-195.
577. McCrum C, Bhatt TS, Gerards MHG et al. Perturbation-based balance training: Principles, mechanisms and implementation in clinical practice. *Front Sports Act Living* 2022; 4: 1015394.

578. Okubo Y, Sturnieks DL. Volitional and Reactive Step Training. *Falls in Older People: Risk Factors, Strategies for Prevention and Implications for Practice* 2021: 271.
579. Tokur D, Grimmer M, Seyfarth A. Review of balance recovery in response to external perturbations during daily activities. *Hum Mov Sci* 2020; 69: 102546.
580. Grabiner MD, Crenshaw JR, Hurt CP et al. Exercise-based fall prevention: can you be a bit more specific? *Exerc Sport Sci Rev* 2014; 42: 161-168.
581. Devasahayam AJ, Farwell K, Lim B et al. The effect of reactive balance training on falls in daily life: an updated systematic review and meta-analysis. *medRxiv* 2023: 2022.2001. 2027.22269969.
582. Pai YC, Bhatt T, Yang F et al. Perturbation training can reduce community-dwelling older adults' annual fall risk: a randomized controlled trial. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci* 2014; 69: 1586-1594.
583. Lurie JD, Zagaria AB, Ellis L et al. Surface Perturbation Training to Prevent Falls in Older Adults: A Highly Pragmatic, Randomized Controlled Trial. *Phys Ther* 2020; 100: 1153-1162.
584. DePasquale L, Toscano L. The Spring Scale Test: a reliable and valid tool for explaining fall history. *J Geriatr Phys Ther* 2009; 32: 159-167.
585. Okubo Y, Schoene D, Caetano MJ et al. Stepping impairment and falls in older adults: A systematic review and meta-analysis of volitional and reactive step tests. *Ageing Res Rev* 2021; 66: 101238.
586. Okubo Y, Schoene D, Lord SR. Step training improves reaction time, gait and balance and reduces falls in older people: a systematic review and meta-analysis. *Br J Sports Med* 2017; 51: 586-593.
587. Shigematsu R, Okura T, Nakagaichi M et al. Square-stepping exercise and fall risk factors in older adults: a single-blind, randomized controlled trial. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci* 2008; 63: 76-82.
588. Shigematsu R, Okura T, Sakai T et al. Square-stepping exercise versus strength and balance training for fall risk factors. *Aging Clin Exp Res* 2008; 20: 19-24.
589. Yamada M, Higuchi T, Nishiguchi S et al. Multitarget stepping program in combination with a standardized multicomponent exercise program can prevent falls in community-dwelling older adults: a randomized, controlled trial. *J Am Geriatr Soc* 2013; 61: 1669-1675.
590. Okubo Y, Duran L, Delbaere K et al. Rapid Inhibition Accuracy and Leg Strength Are Required for Community-Dwelling Older People to Recover Balance From Induced Trips and Slips: An Experimental Prospective Study. *J Geriatr Phys Ther* 2022; 45: 160-166.
591. Schoene D, Delbaere K, Lord SR. Impaired Response Selection During Stepping Predicts Falls in Older People-A Cohort Study. *J Am Med Dir Assoc* 2017; 18: 719-725.
592. Mattle M, Chocano-Bedoya PO, Fischbacher M et al. Association of Dance-Based Mind-Motor Activities With Falls and Physical Function Among Healthy Older Adults: A Systematic Review and Meta-analysis. *JAMA Netw Open* 2020; 3: e2017688.
593. Zhong D, Xiao Q, Xiao X et al. Tai Chi for improving balance and reducing falls: An overview of 14 systematic reviews. *Ann Phys Rehabil Med* 2020; 63: 505-517.
594. Winsor SJ, Tsang WW, Krishnamurthy K et al. Does Tai Chi improve balance and reduce falls incidence in neurological disorders? A systematic review and meta-analysis. *Clin Rehabil* 2018; 32: 1157-1168.
595. Zhang W, Sun J, Feng X et al. Effectiveness of Tai Chi exercise on fear of falling and balance in older adults: A meta-analysis. *Geriatric Nursing* 2023; 51: 194-201.
596. Wehner C, Blank C, Arvandi M et al. Effect of Tai Chi on muscle strength, physical endurance, postural balance and flexibility: a systematic review and meta-analysis. *BMJ Open Sport Exerc Med* 2021; 7: e000817.
597. Yu X, Wu X, Hou G et al. The Impact of Tai Chi on Motor Function, Balance, and Quality of Life in Parkinson's Disease: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Evid Based Complement Alternat Med* 2021; 2021: 6637612.
598. Zheng X, Wu X, Liu Z et al. The Influences of Tai Chi on Balance Function and Exercise Capacity among Stroke Patients: A Meta-Analysis. *Evid Based Complement Alternat Med* 2021; 2021: 6636847.

599. Tsang WW, Hui-Chan CW. Effects of exercise on joint sense and balance in elderly men: Tai Chi versus golf. *Med Sci Sports Exerc* 2004; 36: 658-667.
600. Xu D, Hong Y, Li J et al. Effect of tai chi exercise on proprioception of ankle and knee joints in old people. *Br J Sports Med* 2004; 38: 50-54.
601. Gatts SK, Woollacott MH. Neural mechanisms underlying balance improvement with short term Tai Chi training. *Aging Clin Exp Res* 2006; 18: 7-19.
602. McGibbon CA, Krebs DE, Parker SW et al. Tai Chi and vestibular rehabilitation improve vestibulopathic gait via different neuromuscular mechanisms: preliminary report. *BMC Neurol* 2005; 5: 3.
603. Li JX, Xu DQ, Hong Y. Changes in muscle strength, endurance, and reaction of the lower extremities with Tai Chi intervention. *J Biomech* 2009; 42: 967-971.
604. Li F, Fisher KJ, Harmer P et al. Falls self-efficacy as a mediator of fear of falling in an exercise intervention for older adults. *J Gerontol B Psychol Sci Soc Sci* 2005; 60: P34-40.
605. Wayne PM, Walsh JN, Taylor-Piliae RE et al. Effect of tai chi on cognitive performance in older adults: systematic review and meta-analysis. *J Am Geriatr Soc* 2014; 62: 25-39.
606. Huang ZG, Feng YH, Li YH et al. Systematic review and meta-analysis: Tai Chi for preventing falls in older adults. *BMJ Open* 2017; 7: e013661.
607. Eyigor S, Karapolat H, Durmaz B et al. A randomized controlled trial of Turkish folklore dance on the physical performance, balance, depression and quality of life in older women. *Arch Gerontol Geriatr* 2009; 48: 84-88.
608. Merom D, Mathieu E, Cerin E et al. Social Dancing and Incidence of Falls in Older Adults: A Cluster Randomised Controlled Trial. *PLoS Med* 2016; 13: e1002112.
609. Trombetti A, Hars M, Herrmann FR et al. Effect of music-based multitask training on gait, balance, and fall risk in elderly people: a randomized controlled trial. *Arch Intern Med* 2011; 171: 525-533.
610. Fernandez-Arguelles EL, Rodriguez-Mansilla J, Antunez LE et al. Effects of dancing on the risk of falling related factors of healthy older adults: a systematic review. *Arch Gerontol Geriatr* 2015; 60: 1-8.
611. Hwang PW, Braun KL. The Effectiveness of Dance Interventions to Improve Older Adults' Health: A Systematic Literature Review. *Altern Ther Health Med* 2015; 21: 64-70.
612. Marmeleira JF, Pereira C, Cruz-Ferreira A et al. Creative dance can enhance proprioception in older adults. *J Sports Med Phys Fitness* 2009; 49: 480-485.
613. Claudino JG, Afonso J, Sarvestan J et al. Strength Training to Prevent Falls in Older Adults: A Systematic Review with Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials. *J Clin Med* 2021; 10:
614. Bischoff-Ferrari HA, Vellas B, Rizzoli R et al. Effect of Vitamin D Supplementation, Omega-3 Fatty Acid Supplementation, or a Strength-Training Exercise Program on Clinical Outcomes in Older Adults: The DO-HEALTH Randomized Clinical Trial. *JAMA* 2020; 324: 1855-1868.
615. Buchner DM, Cress ME, de Lateur BJ et al. The effect of strength and endurance training on gait, balance, fall risk, and health services use in community-living older adults. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci* 1997; 52: M218-224.
616. Serra-Rexach JA, Bustamante-Ara N, Hierro Villaran M et al. Short-term, light-to moderate-intensity exercise training improves leg muscle strength in the oldest old: a randomized controlled trial. *Journal of the American Geriatrics Society* 2011; 59: 594-602.
617. Bean JF, Leveille SG, Kiely DK et al. A comparison of leg power and leg strength within the InCHIANTI study: which influences mobility more? *J Gerontol A Biol Sci Med Sci* 2003; 58: 728-733.
618. Reid KF, Fielding RA. Skeletal muscle power: a critical determinant of physical functioning in older adults. *Exerc Sport Sci Rev* 2012; 40: 4-12.

619. Jimenez-Lupion D, Chiroso-Rios L, Martinez-Garcia D et al. Effects of Power Training on Functional Capacity Related to Fall Risk in Older Adults: A Systematic Review and Meta-analysis. *Arch Phys Med Rehabil* 2023; 104: 1514-1525.
620. Simpkins C, Yang F. Muscle power is more important than strength in preventing falls in community-dwelling older adults. *J Biomech* 2022; 134: 111018.
621. Steib S, Schoene D, Pfeifer K. Dose-response relationship of resistance training in older adults: a meta-analysis. *Med Sci Sports Exerc* 2010; 42: 902-914.
622. Kim Y, Vakula MN, Bolton DAE et al. Which Exercise Interventions Can Most Effectively Improve Reactive Balance in Older Adults? A Systematic Review and Network Meta-Analysis. *Front Aging Neurosci* 2021; 13: 764826.
623. Latham NK, Anderson CS, Lee A et al. A randomized, controlled trial of quadriceps resistance exercise and vitamin D in frail older people: the Frailty Interventions Trial in Elderly Subjects (FITNESS). *J Am Geriatr Soc* 2003; 51: 291-299.
624. Borde R, Hortobagyi T, Granacher U. Dose-Response Relationships of Resistance Training in Healthy Old Adults: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Sports Med* 2015; 45: 1693-1720.
625. Kemmler W, Kohl M, Fröhlich M et al. Effects of High Intensity Resistance Training on Fitness and Fatness in Older Men with Osteosarcopenia. *Front Physiol* 2020; 11: 1014.
626. Voukelatos A, Merom D, Sherrington C et al. The impact of a home-based walking programme on falls in older people: the Easy Steps randomised controlled trial. *Age Ageing* 2015; 44: 377-383.
627. Okubo Y, Osuka Y, Jung S et al. Walking can be more effective than balance training in fall prevention among community-dwelling older adults. *Geriatr Gerontol Int* 2016; 16: 118-125.
628. Sherrington C, Tiedemann A, Fairhall N et al. Exercise to prevent falls in older adults: an updated meta-analysis and best practice recommendations. *NSW Public Health Bull* 2011; 22: 78-83.
629. Beyer N, Simonsen L, Bulow J et al. Old women with a recent fall history show improved muscle strength and function sustained for six months after finishing training. *Aging Clin Exp Res* 2007; 19: 300-309.
630. Freiburger E, Menz HB, Abu-Omar K et al. Preventing falls in physically active community-dwelling older people: a comparison of two intervention techniques. *Gerontology* 2007; 53: 298-305.
631. Means KM, Rodell DE, O'Sullivan PS. Balance, mobility, and falls among community-dwelling elderly persons: effects of a rehabilitation exercise program. *Am J Phys Med Rehabil* 2005; 84: 238-250.
632. Morone G, Paolucci T, Luziatelli S et al. Wii Fit is effective in women with bone loss condition associated with balance disorders: a randomized controlled trial. *Aging Clin Exp Res* 2016; 28: 1187-1193.
633. Suzuki T, Kim H, Yoshida H et al. Randomized controlled trial of exercise intervention for the prevention of falls in community-dwelling elderly Japanese women. *Journal of bone and mineral metabolism* 2004; 22: 602-611.
634. Carrasco C, Tomas-Carus P, Bravo J et al. Understanding fall risk factors in community-dwelling older adults: A cross-sectional study. *Int J Older People Nurs* 2020; 15: e12294.
635. Amboni M, Barone P, Hausdorff JM. Cognitive contributions to gait and falls: evidence and implications. *Mov Disord* 2013; 28: 1520-1533.
636. Boisgontier MP, Beets IA, Duysens J et al. Age-related differences in attentional cost associated with postural dual tasks: increased recruitment of generic cognitive resources in older adults. *Neurosci Biobehav Rev* 2013; 37: 1824-1837.
637. Anstey KJ, Wood J, Kerr G et al. Different cognitive profiles for single compared with recurrent fallers without dementia. *Neuropsychology* 2009; 23: 500-508.
638. Bolton DAE, Richardson JK. Inhibitory Control and Fall Prevention: Why Stopping Matters. *Front Neurol* 2022; 13: 853787.

639. Mirelman A, Herman T, Brozgov M et al. Executive function and falls in older adults: new findings from a five-year prospective study link fall risk to cognition. *PLoS One* 2012; 7: e40297.
640. de Bruin ED, Schoene D, Pichierri G et al. Use of virtual reality technique for the training of motor control in the elderly. Some theoretical considerations. *Z Gerontol Geriatr* 2010; 43: 229-234.
641. Lapierre N, Um Din N, Belmin J et al. Exergame-Assisted Rehabilitation for Preventing Falls in Older Adults at Risk: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Gerontology* 2023; 69: 757-767.
642. Eggenberger P, Theill N, Holenstein S et al. Multicomponent physical exercise with simultaneous cognitive training to enhance dual-task walking of older adults: a secondary analysis of a 6-month randomized controlled trial with 1-year follow-up. *Clin Interv Aging* 2015; 10: 1711-1732.
643. Schoene D, Valenzuela T, Toson B et al. Interactive Cognitive-Motor Step Training Improves Cognitive Risk Factors of Falling in Older Adults - A Randomized Controlled Trial. *PLoS One* 2015; 10: e0145161.
644. Kwok BC, Pua YH. Effects of WiiActive exercises on fear of falling and functional outcomes in community-dwelling older adults: a randomised control trial. *Age Ageing* 2016; 45: 621-627.
645. Fu AS, Gao KL, Tung AK et al. Effectiveness of Exergaming Training in Reducing Risk and Incidence of Falls in Frail Older Adults With a History of Falls. *Arch Phys Med Rehabil* 2015; 96: 2096-2102.
646. Mirelman A, Rochester L, Maidan I et al. Addition of a non-immersive virtual reality component to treadmill training to reduce fall risk in older adults (V-TIME): a randomised controlled trial. *Lancet* 2016; 388: 1170-1182.
647. Duque G, Boersma D, Loza-Diaz G et al. Effects of balance training using a virtual-reality system in older fallers. *Clin Interv Aging* 2013; 8: 257-263.
648. Lauze M, Martel DD, Aubertin-Leheudre M. Feasibility and Effects of a Physical Activity Program Using Gerontechnology in Assisted Living Communities for Older Adults. *J Am Med Dir Assoc* 2017; 18: 1069-1075.
649. Schoene D, Hansen H, Kohl M et al. **The effect of interactive cognitive-motor training in reducing fall risk in older people: a systematic review and meta-analysis.** In progress 2024:
650. Alagumoorthi G, D BJ, Thirunavukarasu S et al. Effectiveness of Wii sports- based strategy training in reducing risk of falling, falls and improving quality of life in adults with idiopathic Parkinson's disease- a randomized comparative trial. *Clin Rehabil* 2022; 36: 1097-1109.
651. Gschwind Y, Eichberg S, Ejupi A et al. ICT-based system to predict and prevent falls (iStoppFalls): results from an international multicenter randomized controlled trial. *European Reviews of Aging & Physical Activity* 2015; 12: 1-11.
652. Hoang P, Schoene D, Gandevia S et al. Effects of a home-based step training programme on balance, stepping, cognition and functional performance in people with multiple sclerosis--a randomized controlled trial. *Mult Scler* 2016; 22: 94-103.
653. Hoang P, Sturnieks DL, Butler A et al. A custom-built step exergame training programme to prevent falls in people with multiple sclerosis: a multicentre randomised controlled trial. *Multiple sclerosis (Houndmills, Basingstoke, England)* 2024: 13524585241229360.
654. Kramer A, Dettmers C, Gruber M. Exergaming with additional postural demands improves balance and gait in patients with multiple sclerosis as much as conventional balance training and leads to high adherence to home-based balance training. *Arch Phys Med Rehabil* 2014; 95: 1803-1809.
655. Kwok BC, Mamun K, Chandran M et al. Evaluation of the Frails' Fall Efficacy by Comparing Treatments (EFFECT) on reducing fall and fear of fall in moderately frail older adults: study protocol for a randomised control trial. *Trials* 2011; 12: 155.
656. Song J, Paul SS, Caetano MJD et al. Home-based step training using videogame technology in people with Parkinson's disease: a single-blinded randomised controlled trial. *Clin Rehabil* 2018; 32: 299-311.

657. Stanmore EK, Mavroeidi A, de Jong LD et al. The effectiveness and cost-effectiveness of strength and balance Exergames to reduce falls risk for people aged 55 years and older in UK assisted living facilities: a multi-centre, cluster randomised controlled trial. *BMC Med* 2019; 17: 49.
658. Sturnieks DL, Hicks C, Smith N et al. Exergame and cognitive training for preventing falls in community-dwelling older people: a randomized controlled trial. *Nat Med* 2024; 30: 98-105.
659. van der Kolk NM, de Vries NM, Penko AL et al. A remotely supervised home-based aerobic exercise programme is feasible for patients with Parkinson's disease: results of a small randomised feasibility trial. *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 2018; 89: 1003-1005.
660. van der Kolk NM, de Vries NM, Kessels RPC et al. Effectiveness of home-based and remotely supervised aerobic exercise in Parkinson's disease: a double-blind, randomised controlled trial. *Lancet Neurol* 2019; 18: 998-1008.
661. Zhao R, Zhao X, Guan J et al. The effect of virtual reality technology on anti-fall ability and bone mineral density of the elderly with osteoporosis in an elderly care institution. *Eur J Med Res* 2023; 28: 204.
662. Montero-Alía P, Miralles-Basseda R, López-Jiménez T et al. Controlled trial of balance training using a video game console in community-dwelling older adults. *Age and ageing* 2019; 48: 506-512.
663. Prvu Bettger J, Green CL, Holmes DN et al. Effects of Virtual Exercise Rehabilitation In-Home Therapy Compared with Traditional Care After Total Knee Arthroplasty: VERITAS, a Randomized Controlled Trial. *J Bone Joint Surg Am* 2020; 102: 101-109.
664. Avelar NC, Bastone AC, Alcantara MA et al. Effectiveness of aquatic and non-aquatic lower limb muscle endurance training in the static and dynamic balance of elderly people. *Rev Bras Fisioter* 2010; 14: 229-236.
665. Moreira L, Fronza FC, dos Santos RN et al. High-intensity aquatic exercises (HydrOS) improve physical function and reduce falls among postmenopausal women. *Menopause* 2013; 20: 1012-1019.
666. Simmons V, Hansen PD. Effectiveness of water exercise on postural mobility in the well elderly: an experimental study on balance enhancement. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci* 1996; 51: M233-238.
667. Terrens AF, Soh SE, Morgan P. The safety and feasibility of a Halliwick style of aquatic physiotherapy for falls and balance dysfunction in people with Parkinson's Disease: A single blind pilot trial. *PLoS One* 2020; 15: e0236391.
668. Volpe D, Giantin MG, Maestri R et al. Comparing the effects of hydrotherapy and land-based therapy on balance in patients with Parkinson's disease: a randomized controlled pilot study. *Clin Rehabil* 2014; 28: 1210-1217.
669. Martinez-Carbonell Guillamon E, Burgess L, Immins T et al. Does aquatic exercise improve commonly reported predisposing risk factors to falls within the elderly? A systematic review. *BMC geriatrics* 2019; 19: 1-16.
670. Arnold CM, Busch AJ, Schachter CL et al. A Randomized Clinical Trial of Aquatic versus Land Exercise to Improve Balance, Function, and Quality of Life in Older Women with Osteoporosis. *Physiother Can* 2008; 60: 296-306.
671. da Cunha MF, Lazzareschi L, Gantus MC et al. The physical therapy influence in the prevention of falls in elderly in the community: comparative study. *MOTRIZ-REVISTA DE EDUCACAO FISICA* 2009; 15: 527-536.
672. de Oliveira MR, da Silva RA, Dascal JB et al. Effect of different types of exercise on postural balance in elderly women: a randomized controlled trial. *Arch Gerontol Geriatr* 2014; 59: 506-514.
673. Irandoust K, Taheri M, Mirmoezzi M et al. The Effect of Aquatic Exercise on Postural Mobility of Healthy Older Adults with Endomorphic Somatotype. *Int J Environ Res Public Health* 2019; 16:

674. Wang TJ, Lee SC, Liang SY et al. Comparing the efficacy of aquatic exercises and land-based exercises for patients with knee osteoarthritis. *J Clin Nurs* 2011; 20: 2609-2622.
675. Aveiro MC, Avila MA, Pereira-Baldon VS et al. Water- versus land-based treatment for postural control in postmenopausal osteoporotic women: a randomized, controlled trial. *Climacteric* 2017; 20: 427-435.
676. Nissim M, Livny A, Barmatz C et al. Effects of aquatic physical intervention on fall risk, working memory and hazard-perception as pedestrians in older people: a pilot trial. *BMC Geriatr* 2020; 20: 74.
677. Oh S, Lim JM, Kim Y et al. Comparison of the effects of water- and land-based exercises on the physical function and quality of life in community-dwelling elderly people with history of falling: a single-blind, randomized controlled trial. *Arch Gerontol Geriatr* 2015; 60: 288-293.
678. Melo RS, Cardeira CSF, Rezende DSA et al. Effectiveness of the aquatic physical therapy exercises to improve balance, gait, quality of life and reduce fall-related outcomes in healthy community-dwelling older adults: A systematic review and meta-analysis. *PLoS One* 2023; 18: e0291193.
679. Sievanen H, Piirtola M, Tokola K et al. Effect of 10-Week Whole-Body Vibration Training on Falls and Physical Performance in Older Adults: A Blinded, Randomized, Controlled Clinical Trial with 1-Year Follow-Up. *Int J Environ Res Public Health* 2024; 21:
680. von Stengel S, Kemmler W, Engelke K et al. Effects of whole body vibration training on the fracture risk of postmenopausal women. Preliminary results of the Erlangen Longitudinal Vibration Study (ELVIS). *Med Sci Sports Exerc* 2008; 40: 313.
681. Alam M, Khan A, Farooq M. Effect of whole-body vibration on neuromuscular performance: A literature review. *Work* 2018; 59: 571-583.
682. Bemben D, Stark C, Taiar R et al. Relevance of whole-body vibration exercises on muscle strength/power and bone of elderly individuals. *Dose-Response* 2018; 16: 1559325818813066.
683. Lam FM, Lau RW, Chung RC et al. The effect of whole body vibration on balance, mobility and falls in older adults: a systematic review and meta-analysis. *Maturitas* 2012; 72: 206-213.
684. Rogan S, Taeymans J, Radlinger L et al. Effects of whole-body vibration on postural control in elderly: An update of a systematic review and meta-analysis. *Archives of Gerontology and Geriatrics* 2017; 73: 95-112.
685. Wu S, Ning H, Xiao S et al. Effects of vibration therapy on muscle mass, muscle strength and physical function in older adults with sarcopenia: a systematic review and meta-analysis. *European Review of Aging and Physical Activity* 2020; 17: 1-12.
686. Corrie H, Brooke-Wavell K, Mansfield NJ et al. Effects of vertical and side-alternating vibration training on fall risk factors and bone turnover in older people at risk of falls. *Age Ageing* 2015; 44: 115-122.
687. Abercromby AF, Amonette WE, Layne CS et al. Variation in neuromuscular responses during acute whole-body vibration exercise. *Med Sci Sports Exerc* 2007; 39: 1642-1650.
688. Al Masud A, Shen C, Chyu M. On the Optimal Whole-Body Vibration Protocol for Muscle Strength. *Biomechanics* 2022; 2: 547-561.
689. Perchthaler D, Horstmann T, Grau S. Variations in neuromuscular activity of thigh muscles during whole-body vibration in consideration of different biomechanical variables. *Journal of sports science & medicine* 2013; 12: 439.
690. Ritzmann R, Gollhofer A, Kramer A. The influence of vibration type, frequency, body position and additional load on the neuromuscular activity during whole body vibration. *European journal of applied physiology* 2013; 113: 1-11.
691. Sievanen H, Karinkanta S, Moisio-Vilenius P et al. Feasibility of whole-body vibration training in nursing home residents with low physical function: a pilot study. *Aging Clin Exp Res* 2014; 26: 511-517.

692. Lacroix A, Hortobagyi T, Beurskens R et al. Effects of Supervised vs. Unsupervised Training Programs on Balance and Muscle Strength in Older Adults: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Sports Med* 2017; 47: 2341-2361.
693. Gardner MM, Buchner DM, Robertson MC et al. Practical implementation of an exercise-based falls prevention programme. *Age Ageing* 2001; 30: 77-83.
694. Yang Y, Wang K, Liu H et al. The impact of Otago exercise programme on the prevention of falls in older adult: A systematic review. *Front Public Health* 2022; 10: 953593.
695. Kyrdaalen IL, Moen K, Roysland AS et al. The Otago Exercise Program performed as group training versus home training in fall-prone older people: a randomized controlled Trial. *Physiother Res Int* 2014; 19: 108-116.
696. Weber M, Belala N, Clemson L et al. Feasibility and Effectiveness of Intervention Programmes Integrating Functional Exercise into Daily Life of Older Adults: A Systematic Review. *Gerontology* 2018; 64: 172-187.
697. Clemson L, Fiatarone Singh MA, Bundy A et al. Integration of balance and strength training into daily life activity to reduce rate of falls in older people (the LiFE study): randomised parallel trial. *BMJ* 2012; 345: e4547.
698. Anding-Rost K, von Gersdorff G, von Korn P et al. Exercise during Hemodialysis in Patients with Chronic Kidney Failure. *NEJM Evid* 2023; 2: EVIDoa2300057.
699. Lesinski M, Hortobagyi T, Muehlbauer T et al. Effects of Balance Training on Balance Performance in Healthy Older Adults: A Systematic Review and Meta-analysis. *Sports Med* 2015; 45: 1721-1738.
700. El-Khoury F, Cassou B, Charles MA et al. The effect of fall prevention exercise programmes on fall induced injuries in community dwelling older adults: systematic review and meta-analysis of randomised controlled trials. *BMJ* 2013; 347: f6234.
701. Kiel DP. New strategies to prevent hip fracture. *Hospital Practice* 1994; 29: 47-54.
702. DeGoede KM, Ashton-Miller JA. Fall arrest strategy affects peak hand impact force in a forward fall. *J Biomech* 2002; 35: 843-848.
703. Sabick MB, Hay JG, Goel VK et al. Active responses decrease impact forces at the hip and shoulder in falls to the side. *J Biomech* 1999; 32: 993-998.
704. Abdolshah S, Rajaei N, Akiyama Y et al. Longitudinal rollover strategy as effective intervention to reduce wrist injuries during forward fall. *IEEE Robotics and Automation Letters* 2018; 3: 4187-4192.
705. Moon Y, Sosnoff JJ. Safe Landing Strategies During a Fall: Systematic Review and Meta-Analysis. *Arch Phys Med Rehabil* 2017; 98: 783-794.
706. Robinovitch SN, Dojnov A, Komisar V et al. Protective responses of older adults for avoiding injury during falls: evidence from video capture of real-life falls in long-term care. *Age Ageing* 2022; 51: afac273.
707. Arkkukangas M, Stromqvist Baathe K, Ekholm A et al. High Challenge Exercise and Learning Safe Landing Strategies among Community-Dwelling Older Adults: A Randomized Controlled Trial. *Int J Environ Res Public Health* 2022; 19:
708. Ciaccioni S, Pesce C, Capranica L et al. Effects of a judo training program on falling performance, fear of falling and exercise motivation in older novice judoka. *Ido Movement for Culture. Journal of Martial Arts Anthropology* 2021; 21: 9-17.
709. Groen BE, Smulders E, de Kam D et al. Martial arts fall training to prevent hip fractures in the elderly. *Osteoporos Int* 2010; 21: 215-221.
710. Weerdesteyn V, Groen BE, van Swigchem R et al. Martial arts fall techniques reduce hip impact forces in naive subjects after a brief period of training. *J Electromyogr Kinesiol* 2008; 18: 235-242.
711. Robinovitch SN, Brumer R, Maurer J. Effect of the "squat protective response" on impact velocity during backward falls. *J Biomech* 2004; 37: 1329-1337.

712. Moon Y, Bishnoi A, Sun R et al. Preliminary investigation of teaching older adults the tuck-and-roll strategy: Can older adults learn to fall with reduced impact severity. *J Biomech* 2019; 83: 291-297.
713. Lopes K, Costa D, Santos L et al. Prevalence of fear of falling among a population of older adults and its correlation with mobility, dynamic balance, risk and history of falls. *Brazilian Journal of Physical Therapy* 2009; 13: 223-229.
714. Mane AB, Sanjana T, Patil PR et al. Prevalence and correlates of fear of falling among elderly population in urban area of Karnataka, India. *Journal of mid-life health* 2014; 5: 150-155.
715. Zijlstra G, Van Haastregt J, Van Eijk JTM et al. Prevalence and correlates of fear of falling, and associated avoidance of activity in the general population of community-living older people. *Age and ageing* 2007; 36: 304-309.
716. Payette MC, Belanger C, Leveille V et al. Fall-Related Psychological Concerns and Anxiety among Community-Dwelling Older Adults: Systematic Review and Meta-Analysis. *PLoS One* 2016; 11: e0152848.
717. Hu Y, Wang K, Gu J et al. Effect of combined physical and cognitive intervention on fear of falling in older adults: A systematic review and meta-analysis. *Arch Gerontol Geriatr* 2024; 117: 105173.
718. Savvakis I, Adamakidou T, Kleisiaris C. Physical-activity interventions to reduce fear of falling in frail and pre-frail older adults: a systematic review of randomized controlled trials. *European Geriatric Medicine* 2024: 1-12.
719. Kruisbrink M, Delbaere K, Kempen G et al. Intervention Characteristics Associated With a Reduction in Fear of Falling Among Community-Dwelling Older People: A Systematic Review and Meta-analysis of Randomized Controlled Trials. *Gerontologist* 2021; 61: e269-e282.
720. Delbaere K, Bourgois J, Van Den Noortgate N et al. A home-based multidimensional exercise program reduced physical impairment and fear of falling. *Acta Clinica Belgica* 2006; 61: 340-350.
721. Padala KP, Padala PR, Lensing SY et al. Home-based exercise program improves balance and fear of falling in community-dwelling older adults with mild Alzheimer's disease: a pilot study. *Journal of Alzheimer's disease* 2017; 59: 565-574.
722. Donath L, Faude O. Trainingsprinzipien. *MSK-Muskuloskelettale Physiotherapie* 2022; 26: 81-85.
723. Hottenrott K, Neumann G. *Trainingswissenschaft: Ein Lehrbuch in 14 Lektionen.*; Meyer&Meyer Verlag: Aachen, 2010.
724. Donath L, Faude O. (Evidenzbasierte) Trainingsprinzipien. In *Handbuch Sport und Sportwissenschaft*, Güllich, A., Krüger, M., Eds.; Springer: Heidelberg, 2020.
725. Martin D, Karl K, Lehnertz K. *Handbuch Trainingslehre*; Hofmann Verlag: Schorndorf, 1991.
726. Weineck J. *Sportbiologie*; Spitta Verlag: Erlangen, 2010.
727. Smith EL, Raab DM. Osteoporosis and physical activity. *Acta Med Scand Suppl* 1986; 711: 149-156.
728. Turner CH. Homeostatic control of bone structure: an application of feedback theory. *Bone* 1991; 12: 203-217.
729. Dalsky GP, Stocke KS, Ehsani AA et al. Weight-bearing exercise training and lumbar bone mineral content in postmenopausal women. *Ann Intern Med* 1988; 108: 824-828.
730. Lohman T, Going S, Pamentier 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* 1995; 10: 1015-1024.
731. Raab-Cullen DM, Akhter MP, Kimmel DB et al. Bone response to alternate-day mechanical loading of the rat tibia. *J Bone Miner Res* 1994; 9: 203-211.
732. Westerlind KC, Fluckey JD, Gordon SE et al. Effect of resistance exercise training on cortical and cancellous bone in mature male rats. *J Appl Physiol* 1998; 84: 459-464.

733. Devries MC, Giangregorio L. Using the specificity and overload principles to prevent sarcopenia, falls and fractures with exercise. *Bone* 2023; 166: 116573.
734. Frost HM. Bone's mechanostat: a 2003 update. *Anat Rec A Discov Mol Cell Evol Biol* 2003; 275: 1081-1101.
735. Roux W. *Gesammelte Abhandlungen über Entwicklungsmechanik der Organismen*; Engelmann: Leipzig, 1895.
736. Muehlbauer T, Besemer C, Wehrle A et al. Relationship between strength, power and balance performance in seniors. *Gerontology* 2012; 58: 504-512.
737. Giboin LS, Gruber M, Kramer A. Task-specificity of balance training. *Hum Mov Sci* 2015; 44: 22-31.
738. Donath L, Roth R, Zahner L et al. Slackline training (balancing over narrow nylon ribbons) and balance performance: a meta-analytical review. *Sports Medicine* 2017; 47: 1075-1086.
739. Winters-Stone KM, Snow CM. Site-specific response of bone to exercise in premenopausal women. *Bone* 2006; 39: 1203-1209.
740. Bouchard C, Rankinen T. Individual differences in response to regular physical activity. *Med Sci Sports Exerc* 2001; 33: S446-451; discussion S452-443.
741. Scharhag-Rosenberger F, Walitzek S, Kindermann W et al. Differences in adaptations to 1 year of aerobic endurance training: individual patterns of nonresponse. *Scand J Med Sci Sports* 2012; 22: 113-118.
742. Pahmeier I. Bindung an Gesundheitssport. Habilitation, Universität Bayreuth, Bayreuth, 1999.
743. Werle J, Klein I. Zur Analyse ambulanter Bewegungsangebote für Osteoporose-Patienten. *Mobiles Leben* 1994; 6: 23-29.
744. Seidel EJ, Wick C, Scheibe J. Besonderheiten des sportlichen Trainings beim älteren Menschen. *Phys Med* 1994; 4: 158-159.
745. Kemmler W, Von Stengel S, Lauber D et al. Umsetzung leistungssportlicher Prinzipien in der Osteoporose-Prophylaxe - Zusammenfassende Ergebnisse der Erlangen Fitness und Osteoporose Präventions-Studie (EFOPS). *Dtsch Z Sportmed* 2007; 58: 427-432.
746. Schnabel G, Harre H-D, Krug J et al. *Trainingslehre, Trainingswissenschaft: Leistung - Training - Wettkampf* Meyer & Meyer: Aachen, 2008.
747. Kempf HD, Streicher H, Wagner P et al. Methodisch-didaktische Überlegungen beim Einsatz von Trainingsgeräten. In *Funktionelles Training mit Hand- und Kleingeräten*, Kempf, H.D., Ed.; Springer-Verlag: Berlin Heidelberg, 2014.
748. Matwejew LP. *Periodisierung des sportlichen Trainings*; Barthels & Wernitz: Berlin, 1978.
749. Kemmler W, Hettchen M, Kohl M et al. Detraining Effects on Musculoskeletal Parameters in Early Postmenopausal Osteopenic Women: 3-Month Follow-Up of the Randomized Controlled ACTLIFE Study. *Calcif Tissue Int* 2021; 109: 1-11.
750. Kemmler W, Kohl M, Fröhlich M et al. Detraining effects after 18 months of high intensity resistance training on osteosarcopenia in older men-Six-month follow-up of the randomized controlled Franconian Osteopenia and Sarcopenia Trial (FrOST). *Bone* 2021; 142: 115772.
751. Beller G, Belavy DL, Sun L et al. WISE-2005: bed-rest induced changes in bone mineral density in women during 60 days simulated microgravity. *Bone* 2011; 49: 858-866.
752. Rittweger J, Frost HM, Schiessl H et al. Muscle atrophy and bone loss after 90 days' bed rest and the effects of flywheel resistive exercise and pamidronate: results from the LTBR study. *Bone* 2005; 36: 1019-1029.
753. Sherk KA, Bemben DA, Brickman SE et al. Effects of resistance training duration on muscular strength retention 6-month posttraining in older men and women. *J Geriatr Phys Ther* 2012; 35: 20-27.

754. Modaberi S, Saemi E, Federolf PA et al. A Systematic Review on Detraining Effects after Balance and Fall Prevention Interventions. *J Clin Med* 2021; 10: 4656.
755. Hettchen M, von Stengel S, Kohl M et al. Effects of high-intensity aerobic exercise and resistance training on cardiometabolic risk in early-postmenopausal women. 16-week results of the randomized controlled ACTLIFE-ER study. *DZSM* 2021; 72: 28-35.
756. Martinez-Aldao D, Diz JC, Varela S et al. Impact of a five-month detraining period on the functional fitness and physical activity levels on active older people. *Arch Gerontol Geriatr* 2020; 91: 104191.
757. Harris C, DeBeliso M, Adams KJ et al. Detraining in the older adult: effects of prior training intensity on strength retention. *J Strength Cond Res* 2007; 21: 813-818.
758. Toraman NF. Short term and long term detraining: is there any difference between young-old and old people? *Br J Sports Med* 2005; 39: 561-564.
759. Bompa TO, Haff GG. *Periodization. Theorie and methodology of training*; Human Kinetics: Champaign, 2009.
760. Issurin V. Block periodization versus traditional training theory: a review. *J Sports Med Phys Fitness* 2008; 48: 65-75.
761. Kemmler W, Lauber D, Von Stengel S et al. Developing maximum strength in older adults - a series of studies. In *Current results of strength training research*, Gießing, J., Fröhlich, M., Preuss, P., Eds.; Cuvillier Verlag: Göttingen, 2005.
762. Strohacker K, Fazzino D, Breslin WL et al. The use of periodization in exercise prescriptions for inactive adults: A systematic review. *Prev Med Rep* 2015; 2: 385-396.
763. Conlon JA, Newton RU, Tufano JJ et al. Periodization Strategies in Older Adults: Impact on Physical Function and Health. *Med Sci Sports Exerc* 2016; 48: 2426-2436.
764. Kalender WA. Physik und Methodik der Knochenmineraldichtemessung. In *Osteoporose*, Schild, H.H., Heller, M., Eds.; Thieme Verlag: Stuttgart, 1992.
765. Obermayer-Pietsch B, Schwetz V. [Biochemical markers of bone metabolism and their importance]. *Z Rheumatol* 2016; 75: 451-458.
766. Kim S, Bemben MG, Knehans AW et al. Effects of an 8-Month Ashtanga-Based Yoga Intervention on Bone Metabolism in Middle-Aged Premenopausal Women: A Randomized Controlled Study. *J Sports Sci Med* 2015; 14: 756-768.
767. Beia R, Wassermann A, Raps S et al. Developing Accurate Repetition Prediction Equations for Trained Older Adults with Osteopenia. *Sports (Basel)* 2024; 12: 20240828.
768. Kraemer WJ, Gordon SE, Fleck SJ et al. Endogenous anabolic hormonal and growth factor responses to heavy resistance exercise in males and females. *Int J Sports Med* 1991; 12: 228-235.
769. Shaw CE, McCully KK, Posner JD. Injuries during the one repetition maximum assessment in the elderly. *J Cardiopulm Rehabil* 1995; 15: 283-287.
770. Podsiadlo D, Richardson S. The timed "Up & Go": a test of basic functional mobility for frail elderly persons. *J Am Geriatr Soc* 1991; 39: 142-148.
771. Guralnik JM, Simonsick EM, Ferrucci L et al. A short physical performance battery assessing lower extremity function: association with self-reported disability and prediction of mortality and nursing home admission. *J Gerontol* 1994; 49: M85-94.
772. Larsson BAM, Johansson L, Johansson H et al. The timed up and go test predicts fracture risk in older women independently of clinical risk factors and bone mineral density. *Osteoporos Int* 2021; 32: 75-84.
773. Zhu K, Devine A, Lewis JR et al. "'Timed up and go' test and bone mineral density measurement for fracture prediction. *Arch Intern Med* 2011; 171: 1655-1661.
774. Bös K. *Handbuch sportmotorischer Tests*; Hogrefe: Göttingen, 2017.

775. Bargiotas I, Wang D, Mantilla J et al. Preventing falls: the use of machine learning for the prediction of future falls in individuals without history of fall. *J Neurol* 2023; 270: 618-631.
776. Groen BE, Weerdesteyn V, Duysens J. Martial arts fall techniques decrease the impact forces at the hip during sideways falling. *J Biomech* 2007; 40: 458-462.
777. Kemmler W, Weineck M, Kohl M et al. High Intensity Resistance Exercise Training to Improve Body Composition and Strength in Older Men With Osteosarcopenia. Results of the Randomized Controlled Franconian Osteopenia and Sarcopenia Trial (FrOST). *Front Sports and Active Living* 2020; 2: 1-12.
778. Kenny RA, Rubenstein LZ, Martin FC et al. Guideline for the prevention of falls in older persons. American Geriatrics Society, British Geriatrics Society, and American Academy of Orthopaedic Surgeons Panel on Falls Prevention. *J Am Geriatr Soc* 2001; 49: 664-672.
779. Kemmler W, Basara K, Engelke K et al. Einfluss körperlichen Trainings auf Blutfette und Lipoproteine bei postmenopausalen Frauen mit metabolischem Syndrom. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin* 2009; 60: 248.
780. Kemmler W, Kohl M, von Stengel S et al. Effect of High-Intensity Resistance Exercise on Cardiometabolic Health in Older Men with Osteosarcopenia. The Randomized Controlled Franconian Osteopenia and Sarcopenia Trial (FrOST). *BMJopen* 2020; 6: 10.1136/bmjsem-2020-000846.
781. Von Stengel S, Löffler V, Kemmler W. Körperliches Training und das 10-Jahres CHD-Risiko bei Frauen über 65 Jahren mit metabolischem Syndrom. *Dtsch Z Sportmed* 2009; 60: 281-287.
782. Milanovic Z, Covic N, Helge EW et al. Recreational Football and Bone Health: A Systematic Review and Meta-analysis. *Sports Med* 2022; 52: 3021-3037.
783. Sinaki M, Itoi E, Wahner HW et al. Stronger back muscles reduce the incidence of vertebral fractures: a prospective 10 year follow-up of postmenopausal women. *Bone* 2002; 30: 836-841.
784. Preisinger E, Alacamlioglu Y, Pils K et al. Exercise therapy for osteoporosis: results of a randomised controlled trial. *Br J Sports Med* 1996; 30: 209-212.
785. Campbell AJ, Robertson MC, Gardner MM et al. Falls prevention over 2 years: a randomized controlled trial in women 80 years and older. *Age Ageing* 1999; 28: 513-518.
786. Rognmo O, Moholdt T, Bakken H et al. Cardiovascular risk of high- versus moderate-intensity aerobic exercise in coronary heart disease patients. *Circulation* 2012; 126: 1436-1440.
787. Guiraud T, Nigam A, Gremeaux V et al. High-intensity interval training in cardiac rehabilitation. *Sports Med* 2012; 42: 587-605.
788. Weston KS, Wisloff U, Coombes JS. High-intensity interval training in patients with lifestyle-induced cardiometabolic disease: a systematic review and meta-analysis. *Br J Sports Med* 2013; 48: 1227-1234.
789. Cha KH, Cho TG, Kim CH et al. Comparative study on the period of absolute bed rest of vertebral compression fracture. *Korean J Spine* 2013; 10: 144-148.
790. Ponzano M, Tibert N, Brien S et al. International consensus on the non-pharmacological and non-surgical management of osteoporotic vertebral fractures. *Osteoporos Int* 2023; 34: 1065-1074.
791. Jin YZ, Lee JH. Effect of Brace to Osteoporotic Vertebral Fracture: a Meta-Analysis. *J Korean Med Sci* 2016; 31: 1641-1649.
792. Hofler RC, Jones GA. Bracing for Acute and Subacute Osteoporotic Compression Fractures: A Systematic Review of the Literature. *World Neurosurg* 2020; 141: e453-e460.
793. Pieroh P, Spiegl UJA, Volker A et al. Spinal Orthoses in the Treatment of Osteoporotic Thoracolumbar Vertebral Fractures in the Elderly: A Systematic Review With Quantitative Quality Assessment. *Global Spine J* 2023; 13: 59S-72S.
794. Alin CK, Frisendahl N, Kronhed AG et al. Experiences of using an activating spinal orthosis in women with osteoporosis and back pain in primary care. *Arch Osteoporos* 2020; 15: 171.

795. Dionyssiotis Y, Trovas G, Thoma S et al. Prospective study of spinal orthoses in women. *Prosthet Orthot Int* 2015; 39: 487-495.
796. Hettchen M, Willert S, von Stengel S et al. Effects of the "Spinomed active" orthosis on chronic back pain in kyphotic women with osteoporotic vertebral fractures three months and older: A randomized controlled study. *Front Pain Res (Lausanne)* 2022; 3: 1038269.
797. Zambito A, Bianchini D, Gatti D et al. Interferential and horizontal therapies in chronic low back pain due to multiple vertebral fractures: a randomized, double blind, clinical study. *Osteoporos Int* 2007; 18: 1541-1545.
798. Konrad KL, Baeyens J-P, Birkenmaier C et al. The effects of whole-body electromyostimulation (WB-EMS) in comparison to a multimodal treatment concept in patients with non-specific chronic back pain—A prospective clinical intervention study. *PloS one* 2020; 15: e0236780.
799. Micke F, Weissenfels A, Wirtz N et al. Similar Pain Intensity Reductions and Trunk Strength Improvements following Whole-Body Electromyostimulation vs. Whole-Body Vibration vs. Conventional Back-Strengthening Training in Chronic Non-specific Low Back Pain Patients: A 3-armed randomized controlled trial. *Front Physiol* 2021; 13: 664991.
800. Weissenfels A, Teschler M, Willert S et al. Effects of whole-body electromyostimulation on chronic nonspecific low back pain in adults: a randomized controlled study. *J Pain Res* 2018; 11: 1949-1957.
801. Gunendi Z, Eker D, Tecer D et al. Is the word "osteoporosis" a reason for kinesiophobia? *European journal of physical and rehabilitation medicine* 2018; 54: 671-675.
802. Ponzano M, Gibbs JC, Adachi JD et al. Exploring Fear of Falling and Exercise Self-Efficacy in Older Women With Vertebral Fractures. *J Aging Phys Act* 2021; 29: 219-224.
803. Beck L, Sahar J. Rehabilitationssport und Funktionstraining als Vehikel für ein körperliches Training für Osteoporose-Betroffene – Grundlagen, Perspektiven und Limitationen. *Osteologie* 2020; 29: 227-230.
804. Freiburger E, Haberle L, Spirduso WW et al. Long-term effects of three multicomponent exercise interventions on physical performance and fall-related psychological outcomes in community-dwelling older adults: a randomized controlled trial. *J Am Geriatr Soc* 2012; 60: 437-446.
805. Heupel-Reuter M, Maurer C, Becker C et al. [Exercises and multimodal interventions for prevention of falls in independently living older people]. *Z Gerontol Geriatr* 2019; 52: 694-700.
806. Shojaa M, Hoffmann I, Kohl M et al. Effektivität eines körperlichen Trainings zur Reduktion niedrig-traumatischer und osteoporotischer Hauptfrakturen in Erwachsenen. Systematische Übersichtsarbeit und Meta-Analyse [Exercise Effects on the Reduction of Low-Traumatic and Major Osteoporotic Fractures in Adults. Systematic Review and Meta-Analysis]. *Osteologie* 2023; 32: 156-165.
807. Mohebbi R, von Stengel S, Kohl M et al. Trainingsziele und Risikokategorisierung im Spannungsfeld körperliches Training und Frakturprophylaxe: Ansatzpunkte für individualisierte Trainingsprogramme [Training Aims and Risk Categorization in The Area of Exercise and Fracture Prevention. Targets for Individualized Training Programs]. *Osteologie* 2023; 32: 166-170.
808. Willert S, von Stengel S, Kohl M et al. Körperliches Training und Frakturprävention. Trainingsinhaltliche Empfehlungen zur Verbesserung der Knochenfestigkeit [Exercise and fracture prevention. Recommendations on types of exercise for bone strengthening]. *Osteologie* 2023; 32: 171-175.
809. von Stengel S, Kohl M, Jakob F et al. Stellenwert ausgewählter Trainingsprinzipien innerhalb eines körperlichen Trainings zur Frakturprophylaxe. [Relevance of Selected Training Principles in the Field of Exercise and Fracture Prevention]. *Osteologie* 2023; 32: 196-201.
810. von Stengel S, Schöne D, Kohl M et al. Zusammengefasste Empfehlungen für ein körperliches Training zur Frakturprophylaxe postmenopausaler Frauen und Männer 45 Jahre und älter. *Osteologie* 2023; 32: 202-209.
811. Kemmler W, Von Stengel S, Fröhlich M et al. *Sport, körperliches Training und Osteoporose*; Springer Berlin Heidelberg: 2024.

812. Faul M. Konzipierung eines Qualitätsmanagements für den ambulanten Rehabilitationssport bei Osteoporose in Bayern. Master Thesis, Friedrich-Alexander University of Erlangen-Nurnberg, Erlangen, 2010.
813. Faul M, Kemmler W. Konzeption und Umsetzung eines Qualitätsmanagements für den ambulanten Rehabilitationssport bei Osteoporose in Bayern. *Osteologie* 2020; 29: 231-235.
814. Ashburn A, Fazakarley L, Ballinger C et al. A randomised controlled trial of a home based exercise programme to reduce the risk of falling among people with Parkinson's disease. *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 2007; 78: 678-684.
815. Gianoudis J, Bailey CA, Ebeling PR et al. Effects of a targeted multimodal exercise program incorporating high-speed power training on falls and fracture risk factors in older adults: a community-based randomized controlled trial. *J Bone Miner Res* 2014; 29: 182-191.
816. Gill TM, Pahor M, Guralnik JM et al. Effect of structured physical activity on prevention of serious fall injuries in adults aged 70-89: randomized clinical trial (LIFE Study). *BMJ* 2016; 352: i245.
817. Iliffe S, Kendrick D, Morris R et al. Multicentre cluster randomised trial comparing a community group exercise programme and home-based exercise with usual care for people aged 65 years and over in primary care. *Health Technol Assess* 2014; 18: vii-xxvii, 1-105.
818. Karinkanta S, Heinonen A, Sievanen H et al. A multi-component exercise regimen to prevent functional decline and bone fragility in home-dwelling elderly women: randomized, controlled trial. *Osteoporos Int* 2007; 18: 453-462.
819. Korpelainen R, Keinänen-Kiukaanniemi S, Heikkinen J et al. Effect of exercise on extraskeletal risk factors for hip fractures in elderly women with low BMD: a population-based randomized controlled trial. *J Bone Miner Res* 2006; 21: 772-779.
820. Lamb SE, Bruce J, Hossain A et al. Screening and Intervention to Prevent Falls and Fractures in Older People. *N Engl J Med* 2020; 383: 1848-1859.
821. McMurdo ME, Mole PA, Paterson CR. Controlled trial of weight bearing exercise in older women in relation to bone density and falls. *BMJ* 1997; 314: 569.
822. Robertson MC, Devlin N, Gardner MM et al. Effectiveness and economic evaluation of a nurse delivered home exercise programme to prevent falls. 1: Randomised controlled trial. *BMJ* 2001; 322: 697-701.
823. Sakamoto K, Endo N, Harada A et al. Why not use your own body weight to prevent falls? A randomized, controlled trial of balance therapy to prevent falls and fractures for elderly people who can stand on one leg for ≤ 15 s. *J Orthop Sci* 2013; 18: 110-120.
824. Karinkanta S, Heinonen A, Sievanen H et al. Maintenance of exercise-induced benefits in physical functioning and bone among elderly women. *Osteoporos Int* 2009; 20: 665-674.
825. Korpelainen R, Keinänen-Kiukaanniemi S, Nieminen P et al. Long-term outcomes of exercise: follow-up of a randomized trial in older women with osteopenia. *Arch Intern Med* 2010; 170: 1548-1556.
826. Borg E, Kaijser L. A comparison between three rating scales for perceived exertion and two different work tests. *Scand J Med Sci Sports* 2006; 16: 57-69.

Versionsnummer: 1.1

Erstveröffentlichung: 02/2025

Nächste Überprüfung geplant: 02/2030

Die AWMF erfasst und publiziert die Leitlinien der Fachgesellschaften mit größtmöglicher Sorgfalt - dennoch kann die AWMF für die Richtigkeit des Inhalts keine Verantwortung übernehmen. **Insbesondere bei Dosierungsangaben sind stets die Angaben der Hersteller zu beachten!**