

CO NA TO VĚDA: Věda za terapií PEMF při prevenci a léčbě osteoporózy

Osteoporóza je jedním z nejčastějších onemocnění v klinické praxi, charakterizovaná významnou ztrátou kostní hmoty a zhoršením mikroarchitektury kostí, což vede k křehkosti kostí a zvýšenému riziku zlomenin. Osteoporóza se stala hlavní příčinou úmrtnosti a morbidit a představuje obrovskou ekonomickou a sociální zátěž jak pro rozvinuté, tak pro rozvojové země [1]. Tradiční farmakologické látky, které buď podporují tvorbu kostí (např. parathormon, inzulinu podobný růstový faktor a růstový hormon), nebo inhibují resorpci kostí (např. kalcitonin, estrogen a bisfosfonáty), mohou částečně pomoci předcházet osteoporóze a zvrátit ji, ale vysoké náklady a potenciální vedlejší účinky se mohou stát nezanedbatelným omezením [2-4]. Proto je nezbytné aplikovat ekonomičtější a bezpečnější nefarmakologické přístupy k prevenci a léčbě osteoporózy, které mohou být přínosem pro většinu populace.

Osteoporóza je onemocnění s vysokou celosvětovou prevalencí. Podle statistik je celosvětová prevalence osteoporózy 19,7 %, přičemž ženy jsou postiženy výrazně vyšší mírou (27,4 %) než muži (10,6 %) [5]. V důsledku toho byla osteoporóza historicky považována za onemocnění zaměřené na ženy, přičemž veškerý výzkum, intervenční studie a klinické směrnice se zaměřují převážně na ženy [6,7]. Nicméně výskyt osteopenie je mírně vyšší u mužů (44,8 %) než u žen (42,1 %) [8]. Pokud se osteoporóza neléčí, může nakonec vést k osteoporotickým zlomeninám. Ačkoli je výskyt osteoporózy u žen téměř třikrát vyšší než u mužů, výskyt zlomenin u mužů ve věku 40 let a více je srovnatelný s výskytem u žen [9]. V mnoha populacích se odhaduje, že jeden z pěti mužů starších 50 let může během zbytku života utrpět osteoporotickou zlomeninu [10,11]. Proto by léčba osteoporózy u mužů neměla být opomíjena.

Epidemiologická data v České republice odhalují alarmující dopady osteoporózy. Nejméně jednu osteoporotickou frakturu již utrpělo přibližně 30 % žen a 20 % mužů starších 50 let, přičemž incidence těchto úrazů s postupujícím věkem exponenciálně narůstá. Důsledky jsou často fatální, plného návratu k původní funkční zdatnosti dosáhne pouhá pětina pacientek po zlomenině krčku stehenní kosti. Nadpoloviční většina zasažených přichází o soběstačnost a více než 40 % z nich zůstává trvale odkázáno na pomůcky či asistenci při chůzi. Femorální i vertebální fraktury tak představují nejen dramatický zásah do kvality života, ale jsou přímým faktorem spojeným se signifikantně zvýšenou mortalitou populace [12].

Kost jako metabolicky aktivní tkáň a proces její remodelace

Kost je metabolicky aktivní tkáň, nezbytná pro různé fyziologické procesy spojené s pohybem. Poskytuje strukturální oporu, usnadňuje pohyb, ukládá minerály a růstové faktory, reguluje homeostázu minerálů a acidobázy, chrání životně důležité struktury, působí jako svalové páky a slouží jako místo pro hematopoézu. Obecná struktura kosti se skládá z centrálního prostoru dřeně obklopeného periostem a kostní tkáním [13]. Remodelace kostí je dynamický proces zahrnující periodickou náhradu staré kosti za nově vzniklou na stejném místě a hraje klíčovou roli v osteoporóze. Rovnováha mezi vstřebáním a tvorbou kostí je zásadní pro udržení homeostázy kostí. Během remodelace osteoblasty přivádějí osteoklastovy prekursorové buňky do oblasti osteonu, což usnadňuje jejich interakci [14]. Cyklus remodelace kostí začíná osteoklastickou resorpcí, následovanou tvorbou osteoblastické kosti, která závisí na diferenciaci mezenchymálních stromálních/kmenových buněk (MSC) odvozených z kostní dřeně. Mezenchymální kmenové buňky (BMSC) odvozené z kostní dřeně slouží jako prekursor různých buněčných linií, včetně osteoblastů, chondrocytů, myoblastů, adipocytů a fibroblastů [15]. Výzkumy ukazují, že defekty u raných mezenchymálních prekursorů, pravděpodobně MSC, mohou vést ke snížení produkce osteoprogenitorových buněk a mohou přispívat k různým muskuloskeletálním problémům, včetně osteoporotických syndromů [16].

PEMF a osteoporóza: Cesta k obnově kostní tkáně

Pulzní elektromagnetické pole (PEMF) je fyzikální terapie, která je charakteristická krátkou vlnou se specifickým tvarem signálu a nízkou frekvencí (5–300 Hz) generovanou střídavým proudem přes dvě nebo více externích elektromagnetických cívek. Terapie PEMF funguje na principu, že elektromagnetické pole mohou ovlivňovat buněčné chování a stimulovat biologické procesy. V kontextu osteoporózy se PEMF snaží zlepšit tvorbu kostí a

snížit resorpci kostí modulací aktivity osteoblastů a osteoklastů, klíčových buněk zapojených do remodelace kostí [17].

Od roku 1979 je PEMF schválen americkým Úřadem pro kontrolu potravin a léčiv (FDA) pro léčbu nesrůstajících se zlomenin a neúspěšných artrodéz pro své výhody neinvazivnosti, nízkých nákladů a malého počtu nežádoucích účinků [18].

Od prvního použití pulzních elektromagnetických polí (PEMF) Bassetem a kol. při urychlení klinického hojení kostí v roce 1974 [19,20], získaly biologické účinky PEMF rozsáhlou pozornost. Za poslední čtyři desetiletí se shromáždily významné a rostoucí důkazy, které ukazují, že terapie PEMF jako alternativní neinvazivní metoda je schopna přinášet uspokojivé terapeutické účinky na různá onemocnění kostí, jako jsou čerstvé a nesrostlé zlomeniny [21,22] a osteoartróza [23,24], atd. Několik experimentálních studií prokázalo, že stimulace PEMF může výrazně podporovat osteogenezi a zlepšit mineralizaci kostí jak in vivo, tak in vitro [25-31]. Klinické studie dále ukázaly, že PEMF může pomoci zvýšit hustotu kostních minerálů (BMD) a snížit riziko zlomenin u osteoporotických pacientů [32-34].

V poslední době se hromadí důkazy, které naznačují, že PEMF je účinný i při zhoršení postmenopauzální osteoporózy. PEMF je stejně účinné jako alendronát při udržování kostní hmoty [35] a může dokonce účinně předcházet úbytku kostní hmoty, snižovat bolest a zlepšovat výsledky léčby pacientů [36-38] bez specifických nežádoucích účinků [39].

Mechanismy modulace kostní remodelace prostřednictvím pulzních elektromagnetických polí

Kostní tkáň je dynamický systém, který prochází neustálou remodelací. Tento proces je řízen jemnou rovnováhou mezi odbouráváním staré kosti (resorpcí) a tvorbou kosti nové. Terapie pulzním elektromagnetickým polem (PEMF) působí jako neinvazivní fyzikální stimul, který na buněčné úrovni tuto rovnováhu prokazatelně posouvá ve prospěch osteogeneze (tvorby kostí).

1. Stimulace osteoblastů a podpora osteogeneze

Osteoblasty jsou buňky zodpovědné za syntézu kostní matrix a její následnou mineralizaci. PEMF terapie stimuluje jejich aktivitu prostřednictvím několika klíčových mechanismů:

Aktivace kalciových kanálů (L-typ): Působení elektromagnetického pole indukuje otevírání napětově řízených vápníkových kanálů v buněčné membráně osteoblastů. To vede k okamžitému vstupu vápenatých iontů (Ca^{2+}) do cytoplazmy [40-42].

Kaskáda CaM/CaMKII: Zvýšená koncentrace vápníku aktivuje kalmodulin (CaM) a následně kalmodulin-dependentní proteinkinázu II (CaMKII). Tato signální dráha spouští transkripci genů klíčových pro stavbu kosti [41,43].

Up-regulace růstových faktorů: Výrazně se zvyšuje exprese kostního morfogenetického proteinu 2 (BMP-2) a transformujícího růstového faktoru beta 1 (TGF-1). Tyto proteiny stimulují diferenciaci kmenových buněk na zralé osteoblasty [44,45].

Zvýšení produkce kolagenu a ALP: Dochází k syntéze kolagenu typu I (základní stavební protein kostní matrix) a enzymu alkalické fosfatázy (ALP), který je nezbytný pro ukládání minerálů (hydroxyapatitu) do této matrix [46,47].

2. Inhibice osteoklastů a tlumení kostní resorpce

Osteoklasty jsou obří vícejaderné buňky odvozené od makrofágů, které rozkládají kostní minerál a matrix. PEMF dokáže jejich nadměrnou aktivitu (typickou pro osteoporózu) efektivně tlumit:

Modulace systému RANKL / OPG: Toto je nejvýznamnější mechanismus kontroly. Za normálních okolností protein RANKL (produkovaný osteoblasty) stimuluje RANK receptory na osteoklastech a aktivuje je k resorpci. PEMF terapie však mění tento poměr: snižuje expresi RANKL a naopak zvyšuje produkci osteoprotegerinu (OPG). OPG funguje jako "falešný receptor", který na sebe RANKL naváže a zabráni mu v aktivaci osteoklastů [48, 49].

Indukce apoptózy osteoklastů: PEMF selektivně zkracuje životní cyklus zralých osteoklastů tím, že spouští proces jejich řízené buněčné smrti (apoptózy), čímž se snižuje celkový objem odbourávané kostní hmoty [50].

3. Piezoelektrický jev a mechanotransdukce

PEMF v podstatě napodobuje přirozené mechanické zatížení kosti. Když se kost ohýbá pod vahou těla, generuje mikroskopické elektrické potenciály (piezoelektrický jev). Osteocyty, buňky zapuštěné hluboko v kosti, které fungují jako mechanické senzory, zachytí elektromagnetické pulzy z PEMF terapie jako signál, že kost je pod mechanickou zátěží. Vysílají proto chemické signály k posílení struktury právě v místech působení pole [43, 51,52].

Výsledným efektem této duální modulace, kde na jedné straně stojí akcelerovaná práce osteoblastů a na druhé utlumená resorpce ze strany osteoklastů je zvýšení hustoty kostního minerálu (BMD) a zlepšení mikroarchitektury kostních trámčů [53].

Účinné frekvenční rozsahy PEMF terapie při léčbě osteoporózy

Na základě klinických studií a animálních modelů se prokazuje, že kostní tkáň je velmi citlivá na specifické tzv. „biologické okno“ frekvencí a intenzit. Pro stimulaci osteogeneze a potlačení osteoporózy se jako nejúčinnější ukázaly specifické parametry. V klinických studiích osteoporózy se nejúčinnější frekvence pulzního elektromagnetického pole (PEMF) obecně pohybují v rozsahu extrémně nízkých frekvencí (ELF) od 15 Hz do 75 Hz. Studie ukazují, že toto pásmo stimuluje osteoblasty (buňky tvořící kost), snižuje resorpci kostí a zvyšuje hustotu kostních minerálů (BMD) [54-60].

Kostní tkáň optimálně reaguje na nízké frekvence, které věrně napodobují přirozené biopotenciály generované při mechanickém zatížení, jako je chůze či běh, přičemž hlavní terapeutické okno se nachází v rozmezí 15 Hz až 50 Hz. V odborné literatuře je za zlatý standard pro aktivaci osteoblastů a zvýšení exprese kostního morfogenetického proteinu (BMP-2) nejčastěji označována frekvence 15 Hz. Naproti tomu vyšší frekvence kolem 50 Hz vykazují silný účinek na up-regulaci osteoprotegerinu (OPG), což vede k efektivnějšímu blokování aktivity osteoklastů a následnému tlumení kostní resorpce [61].

Výzkum a klinické studie poukazují na specifické frekvence, které přinášejí pozitivní výsledky:

15 Hz - 50 Hz: Výzkum ukazuje, že frekvence 16 Hz věrně napodobuje mechanické síly chůze, což silně indukuje funkci osteoblastů a tvorbu kostí. Studie zaměřené na modely po ovariektomii často využívají 50 Hz ke zlepšení mikrostrukturálních vlastností kostí [43, 59, 62,63,64].

72 Hz - 100 Hz: Různé studie u postmenopauzálních a starších pacientek s osteoporózou pozorovaly významné zvýšení BMD a markerů tvorby kostí při použití frekvencí mezi 72 Hz a 100 Hz [65-67].

V případě osteoporózy byli mezi prvními klinickými lékaři, kteří aplikovali terapii PEMF, také Bassett a Tabrah et al. V roce 1990 potvrdili, že PEMF (72 Hz, 2,85 mT) může vyvolat zvýšení BMD v trabekulární oblasti u náchylných žen s osteoporózou, což naznačuje určitý preventivní účinek na osteoporózu [65].

Při terapii osteoporózy pomocí pulzního elektromagnetického pole (PEMF) se standardně využívají nízké až střední intenzity magnetické indukce v rozsahu 1 až 5 mT (tedy 10 až 50 Gaussů). Správné nastavení je klíčové, neboť příliš nízké hodnoty nedokážou překročit prahovou úroveň buněčné odezvy, zatímco nadměrně vysoká intenzita může buněčnou aktivitu naopak utlumit. Výzkumy přitom potvrzují, že efektivní minimum začíná již na hranici 1,5 mT, při níž dochází ke spuštění kaskády vápníkových kanálů na membránách osteoblastů a k následné stimulaci tvorby kostní tkáně [68].

Typické klinické protokoly využívané při terapii pulzním elektromagnetickým polem (PEMF) zahrnují denní sezení v délce 30 až 90 minut. Měřitelné zlepšení minerální hustoty kostí (BMD) a potlačení markerů kostní

resorpce jsou ve studiích nejčastěji dokumentovány po přibližně 12 týdnech trvání léčby. Výsledky klinických metaanalýz navíc jednoznačně zdůrazňují, že PEMF dosahuje nejvyšších účinků jako doplňková (adjuvantní) terapie v kombinaci s konvenční farmakologickou léčbou a s cíleným pohybovým režimem [60,69,70].

Závěr:

Osteoporóza je onemocnění, které způsobuje oslabení kostí se zvýšeným rizikem zlomenin, což je obzvláště časté u starších dospělých. Nastává v momentě, když tělo ztrácí hustotu kostí rychleji, než ji dokáže obnovit. Tato nerovnováha (která může být způsobena čímkoli od stravy až po dědičnost) vede k pórovitým, křehkým kostem, které jsou náchylnější k zlomeninám. K tomuto stavu přispívají faktory jako věk, hormonální změny, nedostatek vápníku a fyzická neaktivita. Existuje však pokročilá neinvazivní léčba, která s tímto onemocněním umí bojovat: terapie pulzním elektromagnetickým polem (PEMF), které stimuluje tvorbu kostí a potenciálně zpomaluje jejich úbytek.

PEMF terapie je druh léčby, při které pulzující elektromagnetická pole podporují hojení a regeneraci v těle. PEMF terapie stimuluje buněčnou aktivitu, zlepšuje průtok krve a podporuje opravu tkání tím, že dodává nízkofrekvenční elektromagnetické vlny do cílových oblastí. Původně se používal k léčbě zlomenin a poranění měkkých tkání, jeho využití v oblasti zdraví kostí v posledních letech vzbudilo značnou pozornost. Terapie pulzním elektromagnetickým polem (PEMF) se ukázala jako slibná neinvazivní léčebná metoda v léčbě různých muskuloskeletálních onemocnění, včetně osteoporózy. Koncept využití elektromagnetických polí pro terapeutické účely sahá až do poloviny 20. století a v posledních desetiletích zaznamenal významný pokrok. Rostoucí důkazy ukazují, že pulzní elektromagnetické pole (PEMF) jako alternativní neinvazivní metoda může podporovat pozoruhodnou in vivo i in vitro osteogenezi.

Obrovskou výhodou moderních PEMF přístrojů je jejich celková dostupnost a snadné ovládání. Uživatelé již nemusí pravidelně docházet do specializovaných center ani absolvovat časově náročná ošetření, veškerou sílu účinné elektromagnetické terapie mohou využívat kdykoliv během dne. PEMF přístroje slouží jako ideální nástroj pro prevenci, kdy pomáhají udržovat kosti pevné a zdravé ještě před vznikem potíží, stejně tak jako vysoce účinná domácí terapie při již probíhajících problémech či rehabilitaci. Stačí se pohodlně usadit v křesle, přístroj zapnout a dopřát tělu hloubkovou buněčnou regeneraci bez stresu, bolesti a vedlejších účinků.

Zdroje:

1. Kanis, J.A., Borgstrom, F., De Laet, C. et al. Assessment of fracture risk. Osteoporos Int 16, 581–589 (2005). Zdroj: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00198-004-1780-5>

2. Musette P, Brandi ML, Cacoub P, Kaufman JM, Rizzoli R, et al. (2010) Treatment of osteoporosis: recognizing and managing cutaneous adverse reactions and drug-induced hypersensitivity. Osteoporos Int 21: 723–732. Zdroj: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00198-009-1097-5>

3. Rizzoli R, Reginster JY, Boonen S, Breart G, Diez-Perez A, et al. (2011) Adverse reactions and drug-drug interactions in the management of women with postmenopausal osteoporosis. Calcif Tissue Int 89: 91–104. Zdroj: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00223-011-9499-8>

4. Mahavni V, Sood AK. Hormone replacement therapy and cancer risk. Curr Opin Oncol. 2001 Sep;13(5):384-9. doi: 10.1097/00001622-200109000-00012. PMID: 11555717. Zdroj: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11555717/>

5. Xiao, PL., Cui, AY., Hsu, CJ. et al. Global, regional prevalence, and risk factors of osteoporosis according to the World Health Organization diagnostic criteria: a systematic review and meta-analysis. Osteoporos Int 33, 2137–2153 (2022). Zdroj: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00198-022-06454-3>

6. Fuggle, N.R., Beaudart, C., Bruyère, O. et al. Evidence-Based Guideline for the management of osteoporosis in men. Nat Rev Rheumatol 20, 241–251 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41584-024-01094-9>. Zdroj: <https://www.nature.com/articles/s41584-024-01094-9>

7. Vilaca T, Eastell R, Schini M. Osteoporosis in men. Lancet Diabetes Endocrinol. 2022 Apr;10(4):273-283. doi: 10.1016/S2213-8587(22)00012-2. Epub 2022 Mar 2. PMID: 35247315. Zdroj:

[https://www.thelancet.com/journals/landia/article/PIIS2213-8587\(22\)00012-2/abstract](https://www.thelancet.com/journals/landia/article/PIIS2213-8587(22)00012-2/abstract)

8. Naso, C.M., Lin, SY., Song, G. et al. Time trend analysis of osteoporosis prevalence among adults 50 years of age and older in the USA, 2005–2018. *Osteoporos Int* 36, 547–554 (2025). Zdroj: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00198-025-07395-3>

9. Wang L, et al. Prevalence of Osteoporosis and Fracture in China: The China Osteoporosis Prevalence Study. *JAMA Netw Open*. 2021 Aug 2;4(8):e2121106. Zdroj: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34398202/>

10. Kanis JA, Johnell O, Oden A, Sembo I, Redlund-Johnell I, Dawson A, De Laet C, Jonsson B. Long-term risk of osteoporotic fracture in Malmö. *Osteoporos Int*. 2000;11(8):669-74. doi: 10.1007/s001980070064. PMID: 11095169. Zdroj: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11095169/>

11. Byberg L, Gedeberg R, Cars T, Sundström J, Berglund L, Kilander L, Melhus H, Michaëlsson K. Prediction of fracture risk in men: a cohort study. *J Bone Miner Res*. 2012 Apr;27(4):797-807. doi: 10.1002/jbmr.1498. PMID: 22189702; PMCID: PMC3415621. Zdroj: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22189702/>

12. Tomasová Studýnková J. Osteoporóza - prevence, diagnostika a léčba. *Vnitr Lek*. 2025;71(5):295-304. doi: 10.36290/vnl.2025.056. Zdroj: <https://www.casopisvnitrnilekarstvi.cz/pdfs/vnl/2025/05/04.pdf>

13. Buck DW 2nd, Dumanian GA. Bone biology and physiology: Part I. The fundamentals. *Plast Reconstr Surg*. 2012 Jun;129(6):1314-1320. doi: 10.1097/PRS.0b013e31824eca94. PMID: 22634648. Zdroj: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22634648/>

14. Siddiqui JA, Partridge NC. Physiological Bone Remodeling: Systemic Regulation and Growth Factor Involvement. *Physiology (Bethesda)*. 2016 May;31(3):233-45. doi: 10.1152/physiol.00061.2014. PMID: 27053737; PMCID: PMC6734079. Zdroj: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27053737/>

15. Kfoury Y, Scadden DT. Mesenchymal cell contributions to the stem cell niche. *Cell Stem Cell*. 2015 Mar 5;16(3):239-53. doi: 10.1016/j.stem.2015.02.019. PMID: 25748931. Zdroj: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25748931/>

16. Bonyadi M, Waldman SD, Liu D, Aubin JE, Grynpas MD, Stanford WL. Mesenchymal progenitor self-renewal deficiency leads to age-dependent osteoporosis in Sca-1/Ly-6A null mice. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2003 May 13;100(10):5840-5. doi: 10.1073/pnas.1036475100. Epub 2003 May 5. PMID: 12732718; PMCID: PMC156288. Zdroj: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/12732718/>

17. Hug K. and Rösli M., Therapeutic effects of whole-body devices applying pulsed electromagnetic fields (PEMF): a systematic literature review, *Bioelectromagnetics*. (2012) 33, no. 2, 95–105, <https://doi.org/10.1002/bem.20703>, 2-s2.0-84855342328. Zdroj: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/bem.20703>

18. Bassett C. A., Mitchell S. N., and Gaston S. R., Pulsing electromagnetic field treatment in ununited fractures and failed arthrodeses, *JAMA, the Journal of the American Medical Association*. (1982) 247, no. 5, 623–628, <https://doi.org/10.1001/jama.247.5.623>. Zdroj: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/7054564/>

19. Bassett CA, Pawluk RJ, Pilla AA (1974) Augmentation of bone repair by inductively coupled electromagnetic fields. *Science* 184: 575–577. Zdroj: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/4821958/>

20. Bassett CA, Pawluk RJ, Pilla AA (1974) Acceleration of fracture repair by electromagnetic fields. A surgically noninvasive method. *Ann N Y Acad Sci* 238: 242–262. Zdroj: <https://nyaspubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1749-6632.1974.tb26794.x>

21. Bassett CA, Mitchell SN, Gaston SR (1982) Pulsing electromagnetic field treatment in ununited fractures and failed arthrodeses. *JAMA* 247: 623–628. <https://jamanetwork.com/journals/jama/article-abstract/367355>

22. Assiotis, A., Sachinis, N.P. & Chalidis, B.E. Pulsed electromagnetic fields for the treatment of tibial delayed unions and nonunions. A prospective clinical study and review of the literature. *J Orthop Surg Res* 7, 24 (2012). . Zdroj: <https://link.springer.com/article/10.1186/1749-799X-7-24>

23. Ryang We S, Koog YH, Jeong KI, Wi H (2013) Effects of pulsed electromagnetic field on knee osteoarthritis: a systematic review. *Rheumatology* (Oxford) 52: 815–824. Zdroj: <https://academic.oup.com/rheumatology/article-abstract/52/5/815/1815326>
24. Thamsborg G, Florescu A, Oturai P, Fallentin E, Tritsarlis K, et al. (2005) Treatment of knee osteoarthritis with pulsed electromagnetic fields: a randomized, double-blind, placebo-controlled study. *Osteoarthritis Cartilage* 13: 575–581. Zdroj: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1063458405000609>
25. Rubin CT, McLeod KJ, Lanyon LE (1989) Prevention of osteoporosis by pulsed electromagnetic fields. *J Bone Joint Surg Am* 71: 411–417. Zdroj: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/2925715/>
26. Chang K, Chang WH (2003) Pulsed electromagnetic fields prevent osteoporosis in an ovariectomized female rat model: a prostaglandin E₂-associated process. *Bioelectromagnetics* 24: 189–198. Zdroj: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/bem.10078>
27. Jing D, Cai J, Shen G, Huang J, Li F, et al. (2011) The preventive effects of pulsed electromagnetic fields on diabetic bone loss in streptozotocin-treated rats. *Osteoporos Int* 22: 1885–1895. Zdroj: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00198-010-1447-3>
28. Jing D, Shen G, Huang J, Xie K, Cai J, et al. (2010) Circadian rhythm affects the preventive role of pulsed electromagnetic fields on ovariectomy-induced osteoporosis in rats. *Bone* 46: 487–495. Zdroj: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S8756328209019309>
29. Shen WW, Zhao JH (2010) Pulsed electromagnetic fields stimulation affects BMD and local factor production of rats with disuse osteoporosis. *Bioelectromagnetics* 31: 113–119. Zdroj: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/bem.20535>
30. Diniz P, Shomura K, Soejima K, Ito G (2002) Effects of pulsed electromagnetic field (PEMF) stimulation on bone tissue like formation are dependent on the maturation stages of the osteoblasts. *Bioelectromagnetics* 23: 398–405. Zdroj: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/bem.10032>
31. Zhang X, Zhang J, Qu X, Wen J (2007) Effects of different extremely low-frequency electromagnetic fields on osteoblasts. *Electromagn Biol Med* 26: 167–177. Zdroj: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15368370701580756>
32. Tabrah F, Hoffmeier M, Gilbert F Jr, Batkin S, Bassett CA (1990) Bone density changes in osteoporosis-prone women exposed to pulsed electromagnetic fields (PEMFs). *J Bone Miner Res* 5: 437–442. Zdroj: <https://academic.oup.com/jbmr/article-abstract/5/5/437/7501831>
33. Eyres KS, Saleh M, Kanis JA (1996) Effect of pulsed electromagnetic fields on bone formation and bone loss during limb lengthening. *Bone* 18: 505–509. Zdroj: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S8756328296000701>
34. Garland DE, Adkins RH, Matsuno NN, Stewart CA (1999) The effect of pulsed electromagnetic fields on osteoporosis at the knee in individuals with spinal cord injury. *J Spinal Cord Med* 22: 239–245. Zdroj: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10790268.1999.11719576>
35. Liu H. F., Yang L., He H. C., Zhou J., Liu Y., Wang C. Y., Wu Y. C., and He C. Q., Pulsed electromagnetic fields on postmenopausal osteoporosis in Southwest China: a randomized, active-controlled clinical trial, *Bioelectromagnetics*. (2013) 34, no. 4, 323–332. Zdroj: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23362148/>
36. Catalano A., Loddo S., Bellone F., Pecora C., Lasco A., and Morabito N., Pulsed electromagnetic fields modulate bone metabolism via RANKL/OPG and Wnt/ β -catenin pathways in women with postmenopausal osteoporosis: a pilot study, *Bone*. (2018) 116, 42–46. Zdroj: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30010081/>
37. Liu W., Jin X., Guan Z., and Zhou Q., Pulsed electromagnetic field affects the development of postmenopausal osteoporotic women with vertebral fractures, *BioMed Research International*. (2021) 2021. Zdroj: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34327227/>

38. Wang T., Yang L., Jiang J., Liu Y., Fan Z., Zhong C., and He C., Pulsed electromagnetic fields: promising treatment for osteoporosis, *Osteoporosis International*. 2019a, 30, no. 2, 267–276. Zdroj: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30603841/>
39. Zhu S., He H., Zhang C., Wang H., Gao C., Yu X., and He C., Effects of pulsed electromagnetic fields on postmenopausal osteoporosis, *Bioelectromagnetics*. (2017) 38, no. 6, 406–424. Zdroj: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28665487/>
40. Caliozna L, Bina V, Brancato AM, Gastaldi G, Annunziata S, Mosconi M, Grassi FA, Benazzo F, Pasta G. The Role of PEMFs on Bone Healing: An In Vitro Study. *Int J Mol Sci*. 2022 Nov 18;23(22):14298. doi: 10.3390/ijms232214298. PMID: 36430775; PMCID: PMC9693979. Zdroj: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9693979/>
41. Kaadan A, Salati S, Setti S, Aaron R. Augmentation of Deficient Bone Healing by Pulsed Electromagnetic Fields-From Mechanisms to Clinical Outcomes. *Bioengineering (Basel)*. 2024 Dec 3;11(12):1223. doi: 10.3390/bioengineering11121223. PMID: 39768041; PMCID: PMC11672986. Zdroj: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11672986/>
42. Ma T, Ding Q, Liu C, Wu H. Electromagnetic fields regulate calcium-mediated cell fate of stem cells: osteogenesis, chondrogenesis and apoptosis. *Stem Cell Res Ther*. 2023 May 16;14(1):133. doi: 10.1186/s13287-023-03303-w. PMID: 37194107; PMCID: PMC10190032. Zdroj: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10190032/>
43. Zhang X., Liu X., Pan L., Lee I. Magnetic Fields at Extremely Low-Frequency (50 Hz, 0.8 mT) Can Induce the Uptake of Intracellular Calcium Levels in Osteoblasts. *Biochem. Biophys. Res. Commun*. 2010;396:662–666. doi: 10.1016/j.bbrc.2010.04.154. Zdroj: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20438704/>
44. Ongaro A, Pellati A, Bagheri L, Fortini C, Setti S, De Mattei M. Pulsed electromagnetic fields stimulate osteogenic differentiation in human bone marrow and adipose tissue derived mesenchymal stem cells. *Bioelectromagnetics*. 2014 Sep;35(6):426-36. doi: 10.1002/bem.21862. Epub 2014 Aug 6. PMID: 25099126.. zdroj: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25099126/>
45. Martini F, Pellati A, Mazzoni E, Salati S, Caruso G, Contartese D, De Mattei M. Bone Morphogenetic Protein-2 Signaling in the Osteogenic Differentiation of Human Bone Marrow Mesenchymal Stem Cells Induced by Pulsed Electromagnetic Fields. *Int J Mol Sci*. 2020 Mar 19;21(6):2104. doi: 10.3390/ijms21062104. PMID: 32204349; PMCID: PMC7139765. Zdroj: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32204349/>
46. Iwasa K, Reddi AH. Pulsed Electromagnetic Fields and Tissue Engineering of the Joints. *Tissue Eng Part B Rev*. 2018 Apr;24(2):144-154. doi: 10.1089/ten.TEB.2017.0294. Epub 2017 Nov 17. PMID: 29020880; PMCID: PMC5905856. Zdroj: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5905856/>
47. Zavadskis, S., Gasser, A.S., Karas, M. et al. Interaction of pulsed low frequency electromagnetic field (PEMF) with mitochondria. *Sci Rep* 16, 6681 (2026). <https://doi.org/10.1038/s41598-026-37527-6>. Zdroj: <https://www.nature.com/articles/s41598-026-37527-6>
48. Zhou J, Chen S, Guo H, Xia L, Liu H, Qin Y, He C. Pulsed electromagnetic field stimulates osteoprotegerin and reduces RANKL expression in ovariectomized rats. *Rheumatol Int*. 2013 May;33(5):1135-41. doi: 10.1007/s00296-012-2499-9. Epub 2012 Sep 5. PMID: 22948539. Zdroj: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22948539/>
49. Chang K, Chang WH, Huang S, Huang S, Shih C. Pulsed electromagnetic fields stimulation affects osteoclast formation by modulation of osteoprotegerin, RANK ligand and macrophage colony-stimulating factor. *J Orthop Res*. 2005 Nov;23(6):1308-14. doi: 10.1016/j.orthres.2005.03.012.1100230611. PMID: 15913941. Zdroj: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15913941/>
50. Chang K, Chang WH, Tsai MT, Shih C. Pulsed electromagnetic fields accelerate apoptotic rate in osteoclasts. *Connect Tissue Res*. 2006;47(4):222-8. doi: 10.1080/03008200600858783. PMID: 16987754. Zdroj: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16987754/>

51. Martinez Mendez, Juan. (2025). The Human Body as a Liquid-Crystal Piezoelectric Continuum. 10.13140/RG.2.2.33103.14245. Zdroj: https://www.researchgate.net/publication/395414695_The_Human_Body_as_a_Liquid-Crystal_Piezoelectric_Continuum
52. Wu Y, Zou J, Tang K, Xia Y, Wang X, Song L, Wang J, Wang K, Wang Z. From electricity to vitality: the emerging use of piezoelectric materials in tissue regeneration. *Burns Trauma*. 2024 Jul 2;12:tkae013. doi: 10.1093/burnst/tkae013. PMID: 38957661; PMCID: PMC11218788. Zdroj: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11218788/>
53. Wang, T., Liang, Z., Wang, C. et al. Pulsed electromagnetic fields mediate sensory nerve regulation for bone formation in aging models. *Nat Commun* 16, 8223 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41467-025-63703-9> . Zdroj: <https://www.nature.com/articles/s41467-025-63703-9>
54. Ebid A, El-Boshy M, El-Shamy S, Thabet A, Abedalla M, Ali T. Long-term effect of full-body pulsed electromagnetic field and exercise protocol in the treatment of men with osteopenia or osteoporosis: A randomized placebo-controlled trial. *F1000Res*. 2021 Jul 26;10:649. doi: 10.12688/f1000research.54519.3. PMID: 34900231; PMCID: PMC8637238. Zdroj: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8637238/>
55. Chen, Y.; Braun, B.J.; Menger, M.M.; Ronniger, M.; Falldorf, K.; Histing, T.; Nussler, A.K.; Ehnert, S. Intermittent Exposure to a 16 Hz Extremely Low Frequency Pulsed Electromagnetic Field Promotes Osteogenesis In Vitro through Activating Piezo 1-Induced Ca²⁺ Influx in Osteoprogenitor Cells. *J. Funct. Biomater*. 2023, 14, 165. <https://doi.org/10.3390/jfb14030165>. Zdroj: <https://www.mdpi.com/2079-4983/14/3/165>
56. Di Bartolomeo M, Cavani F, Pellacani A, Grande A, Salvatori R, Chiarini L, Nocini R, Anesi A. Pulsed Electro-Magnetic Field (PEMF) Effect on Bone Healing in Animal Models: A Review of Its Efficacy Related to Different Type of Damage. *Biology (Basel)*. 2022 Mar 5;11(3):402. doi: 10.3390/biology11030402. PMID: 35336776; PMCID: PMC8945722. Zdroj: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8945722/>
57. Ehnert, S.; Schröter, S.; Aspera-Werz, R.H.; Eisler, W.; Falldorf, K.; Ronniger, M.; Nussler, A.K. Translational Insights into Extremely Low Frequency Pulsed Electromagnetic Fields (ELF-PEMFs) for Bone Regeneration after Trauma and Orthopedic Surgery. *J. Clin. Med*. 2019, 8, 2028. <https://doi.org/10.3390/jcm8122028>. Zdroj: <https://www.mdpi.com/2077-0383/8/12/2028>
58. Eid MM, El-Gendy AM, Abdelbasset WK, Elkholi SM, Abdel-Fattah MS. The effect of magnetic therapy and moderate aerobic exercise on osteoporotic patients: A randomized clinical study. *Medicine (Baltimore)*. 2021 Oct 1;100(39):e27379. doi: 10.1097/MD.00000000000027379. PMID: 34596156; PMCID: PMC8483884. Zdroj: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8483884/>
59. An Z, Wang L, Wu Y, Pang Y, Chen K, Gao Y. [Experimental study on the treatment of postmenopausal osteoporosis with low-frequency pulsed electromagnetic fields]. *Sheng Wu Yi Xue Gong Cheng Xue Za Zhi*. 2025 Oct 25;42(5):1054-1061. Chinese. doi: 10.7507/1001-5515.202501026. PMID: 41152178; PMCID: PMC12568744. Zdroj: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/41152178/>
60. Rajalekshmi R, Agrawal DK. Energizing Healing with Electromagnetic Field Therapy in Musculoskeletal Disorders. *J Orthop Sports Med*. 2024;6(2):89-106. doi: 10.26502/josm.511500147. Epub 2024 May 17. PMID: 39036742; PMCID: PMC11258965. Zdroj: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11258965/>
61. Masante B, Gabetti S, Silva JC, Putame G, Israel S, Bignardi C and Massai D (2025) Insights into bone and cartilage responses to pulsed electromagnetic field stimulation: a review with quantitative comparisons. *Front. Bioeng. Biotechnol*. 13:1557572. doi: 10.3389/fbioe.2025.1557572. Zdroj: <https://www.frontiersin.org/journals/bioengineering-and-biotechnology/articles/10.3389/fbioe.2025.1557572/full>
62. Di Bartolomeo M, Cavani F, Pellacani A, Grande A, Salvatori R, Chiarini L, Nocini R, Anesi A. Pulsed Electro-Magnetic Field (PEMF) Effect on Bone Healing in Animal Models: A Review of Its Efficacy Related to Different

- Type of Damage. *Biology* (Basel). 2022 Mar 5;11(3):402. doi: 10.3390/biology11030402. PMID: 35336776; PMCID: PMC8945722. Zdroj: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8945722/>
63. Sert C, Mustafa D, Düz MZ, Akşen F, Kaya A. The preventive effect on bone loss of 50-Hz, 1-mT electromagnetic field in ovariectomized rats. *J Bone Miner Metab.* 2002;20(6):345-9. doi: 10.1007/s007740200050. PMID: 12434162. Zdroj: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/12434162/>
64. Ebid A, El-Boshy M, El-Shamy S, Thabet A, Abedalla M, Ali T. Long-term effect of full-body pulsed electromagnetic field and exercise protocol in the treatment of men with osteopenia or osteoporosis: A randomized placebo-controlled trial. *F1000Res.* 2021 Jul 26;10:649. doi: 10.12688/f1000research.54519.3. PMID: 34900231; PMCID: PMC8637238. Zdroj: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34900231/>
65. Tabrah F, Hoffmeier M, Gilbert F Jr, Batkin S, Bassett CA. Bone density changes in osteoporosis-prone women exposed to pulsed electromagnetic fields (PEMFs). *J Bone Miner Res.* 1990 May;5(5):437-42. doi: 10.1002/jbmr.5650050504. PMID: 2195843. Zdroj: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/2195843/>
66. Liu J, Ren W, Wang S, Yang J, Zhang H, Zeng Y, Yin D, Shang P. The effects and mechanisms of electromagnetic fields on bone remodeling: From clinical to laboratory. *J Orthop Translat.* 2025 Mar 24;52:14-26. doi: 10.1016/j.jot.2025.03.003. PMID: 40226335; PMCID: PMC11986540. Zdroj: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214031X25000348>
67. Popović T, Matavulj M, Nežić L, Radulović TN, Škrbić R. Pulsed electromagnetic field attenuates bone fragility in estrogen-deficient osteoporosis in rats. *Technology and Health Care.* 2023;31(4):1343-1353. doi:10.3233/THC-220642. Zdroj: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36641696/>
68. Zhang T, Zhao Z, Wang T. Pulsed electromagnetic fields as a promising therapy for glucocorticoid-induced osteoporosis. *Front Bioeng Biotechnol.* 2023 Mar 3;11:1103515. doi: 10.3389/fbioe.2023.1103515. PMID: 36937753; PMCID: PMC10020513. Zdroj: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10020513/>
69. Ebid A, El-Boshy M, El-Shamy S, Thabet A, Abedalla M, Ali T. Long-term effect of full-body pulsed electromagnetic field and exercise protocol in the treatment of men with osteopenia or osteoporosis: A randomized placebo-controlled trial. *F1000Res.* 2021 Jul 26;10:649. doi: 10.12688/f1000research.54519.3. PMID: 34900231; PMCID: PMC8637238. Zdroj: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8637238/>
70. Ebid A, El-Shamy S, Thabet A et al. Effect of pulsed electromagnetic field versus pulsed high intensity laser in the treatment of men with osteopenia or osteoporosis: a randomized controlled trial [version 1; peer review: 1 approved]. *F1000Research* 2022. Zdroj: <https://f1000research.com/articles/11-86>



Rybná 1066/15, Staré Město, 110 00 Praha 1

www.bloominds.cz