

ČESKÝ ATLETICKÝ SVAZ
Kurz trenéra atletiky 2. třídy/licence B
Specializace Běhy a chůze

VLIV KARBONOVÝCH BOT NA ÚNAVOVÉ ZLOMENINY

Závěrečná práce

Autor:
Klára Mirvaldová

Vedoucí práce:
Mgr. Jan Pernica, Ph.D.

Olomouc/Praha, 2025-2026

Bibliografická identifikace:

Jméno a příjmení autora: Klára Mirvaldová

Název magisterské práce: Vliv karbonové obuvi na únavové zlomeniny

Pracoviště: Český atletický svaz

Rok obhajoby závěrečné práce: 2026

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci na téma **Vliv karbonových bot na únavové zlomeniny** zpracovala sama.

Veškeré prameny a zdroje informací, které jsem použila k sepsání této práce, byly citovány v textu a jsou uvedeny v seznamu použitých pramenů a literatury.

V Meziboří 20. 11. 2025

.....

Klára Mirvaldová

Obsah:

1. Úvod	5
2. Cíl práce	6
3. Metodika	7
3.1 Literární rešerše	7
3.2 Kritéria pro zařazení studií	7
3.3 Vylučovací kritéria	8
3.4 Zpracování a syntéza dat	8
4. Teoretická část – Únavové zlomeniny	9
4.1 Definice a terminologie	9
4.2 Epidemiologie únavových zlomenin u běžců	9
4.3 Mechanismus vzniku kostního stresu	10
4.4 Rizikové faktory únavových zlomenin	10
4.4.1 Tréninkové faktory	10
4.4.2 Biomechanické faktory	10
4.4.3 Fyziologické a metabolické faktory	11
4.4.4 Vliv obuvi	11
4.5 Únavové zlomeniny a moderní běžecká obuv	11
5. Karbonové běžecké boty – princip a biomechanika běhu	12
5.1 Konstrukční charakteristiky moderních karbonových bot	12
5.2 Vliv karbonové desky na mechaniku MTP kloubu a předonoží	13
5.3 Změny v mechanice hlezenního a kolenního kloubu	14
5.4 Vliv karbonových bot na reakční síly a běžeckou rychlost	14
5.5 Adaptace pohybového aparátu na karbonovou obuv	15
5.6 Shrnutí kapitoly	15
6. Karbonové boty a únavové zlomeniny – co říkají studie?	15
6.1 Současný stav poznatků	15
6.2 Přímé důkazy na únavové zlomeniny (BSI)	16

6.3 Epidemiologická data	16
6.4 Mechanistická evidence	16
6.5 Přehled studií a přehledů (2016+)	17
6.6 Souhrn rizik spojených s používáním karbonové obuvi	19
6.6.1 Změna rozložení mechanického zatížení v oblasti předonoží	19
6.6.2 Vliv konstrukce karbonové desky a tuhosti obuvi	20
6.6.3 Zvýšení běžecké rychlosti a kumulativní zátěže	21
6.6.4 Nedostatečná adaptační fáze	21
6.6.5 Interindividuální variabilita	22
7. Doporučení pro tréninkovou praxi – metodický list	22
7.1 Skupiny běžců se zvýšeným potenciálním rizikem	22
7.2 Principy zařazování karbonové obuvi do tréninku	23
7.3 Prevence kostního stresu	24
7.4 Varovné signály a indikace ke snížení zátěže	24
8. Závěr	25
9. Použitá literatura	26

1 ÚVOD

V posledních letech patří karbonové běžecké boty mezi nejdiskutovanější inovace ve světě vytrvalostního běhu. Od uvedení prvního modelu Nike Vaporfly v roce 2016 se jejich používání rozšířilo napříč elitní i rekreační populací a stále častěji se stávají nejen závodní, ale i tréninkovou obuví. „Super shoes“, jak se jim v odborné literatuře běžně říká, kombinují vysokou mezipodešev z pěn s vysokým koeficientem návratu energie a tuhou karbonovou deskou, která zvyšuje pákový efekt v odrazové fázi. Jejich vliv na ekonomiku běhu je dobře dokumentován: metaanalýzy z posledních let potvrzují průměrné zlepšení running economy přibližně o 2–4 % (Hoogkamer et al., 2018; Healey et al., 2022; Joubert & Jones, 2023). Tento efekt přinesl zásadní posun v rekordech na silnici i dráze a stal se jedním z nejvýznamnějších technologických milníků moderního vytrvalostního sportu.

Současně však roste zájem o možná biomechanická rizika související s používáním těchto bot. Zatímco jejich pozitivní vliv na výkon je v literatuře relativně jednoznačný, stále častěji se objevují studie upozorňující na změněné rozložení sil působících na dolní končetinu. Novější práce ukazují zejména zvýšené zatížení přední části nohy, a to především v oblasti 1.–3. metatarzu (Beck et al., 2023; Rice et al., 2023). U běžců používajících karbonovou obuv byly popsány i odlišnosti v pohybu hlezna a kolenního kloubu, snížená dorziflexe v kotníku a větší rozsah pohybu v MTP kloubu, které mohou vést k lokálnímu přetížení (Kim et al., 2021; Bullock et al., 2022). Tato biomechanická specifika otevírají otázku, zda zvýšená rigidita a návrat energie nepřenášejí větší část zátěže na určité struktury nohy, jejichž adaptace nemusí být u všech běžců dostatečná.

Únavové zlomeniny představují významnou část běžeckých zranění a v obecné populaci běžců tvoří zhruba 5–20 % všech muskuloskeletálních potíží (Warden et al., 2021; Tenforde et al., 2022). Jedná se o postupně vznikající kostní poškození způsobené opakovaným mechanickým stresem, který převyšuje kapacitu kosti k reparaci. Riziko únavových zlomenin je multifaktoriální. Zahrnuje tréninkové

chyby, nevhodnou obuv, nedostatečnou energetickou dostupnost, hormonální dysbalance, biomechanické odchylky či rychlé navyšování objemu zátěže. V kontextu karbonových bot je však zásadní, že změněná mechanická práce a vyšší rychlosti dosažitelné s menším subjektivním úsilím mohou vést k větší kumulaci sil působících na kostní tkáň. V kombinaci s nedostatečnou adaptací může vzniknout prostředí, které podporuje rozvoj kostního stresu.

Téma je tedy zásadní nejen z vědeckého hlediska, ale také z pohledu tréninkové praxe. Karbonové boty se staly běžnou součástí výbavy i u rekreačních běžců, kteří však často nedisponují dostatečnou silovou přípravou ani postupnou adaptací na změněné mechanické podmínky. Trenéři i fyzioterapeuti zároveň hlásí zvýšený počet případů bolestí předonoží či podezření na stresové reakce metatarzů u běžců, kteří boty zařadili příliš rychle nebo je používají příliš často. Přesto zatím neexistuje jednoznačná odpověď, zda karbonové boty představují samy o sobě zvýšené riziko únavových zlomenin, či zda problém tkví v jejich nevhodném použití.

Vzhledem k rychlému technologickému vývoji, nedostatku dlouhodobých studií a rostoucí popularitě těchto bot je proto nezbytné zmapovat současný stav poznání a posoudit možný vztah mezi používáním karbonové obuvi a výskytem únavových zlomenin. Výsledky mohou sloužit jako praktické doporučení pro trenéry, fyzioterapeuty a běžce samotné, zejména v oblasti prevence, postupné adaptace a racionální integrace karbonových bot do tréninkového procesu.

2 CÍL PRÁCE

Cílem této práce je provést přehledovou literární rešerši aktuálních i nedávných odborných studií zabývajících se problematikou únavových zlomenin u běžců a možným vlivem používání karbonových běžeckých bot na jejich vznik. Práce se zaměřuje zejména na identifikaci biomechanických, tréninkových a kontextových faktorů, které mohou v souvislosti s používáním karbonové obuvi ovlivňovat zatížení kostní tkáně a potenciálně přispívat ke vzniku kostního stresu.

Součástí cíle je systematicky shrnout dostupné vědecké poznatky z oblasti sportovní biomechaniky, medicíny a fyziologie zátěže, a to s důrazem na studie publikované v posledních letech, které reflektují současný stav vývoje běžecké obuvi. Práce si klade za cíl kriticky posoudit, zda existují důkazy o přímém či nepřímém vztahu mezi používáním karbonových bot a zvýšeným výskytem únavových zlomenin, nebo zda se jedná spíše o kombinaci více rizikových faktorů, mezi které patří zejména rychlé navyšování tréninkové zátěže, nedostatečná adaptace

pohybového aparátu, energetická nedostupnost či individuální biomechanické predispozice běžců.

Dílčím cílem práce je rovněž převést získané vědecké poznatky do prakticky využitelné podoby pro atletické trenéry. Na základě rešerše studií bude vytvořen metodický přehled doporučení, který má sloužit jako podpůrný materiál při rozhodování o zařazování karbonových bot do tréninku, jejich frekvenci používání a postupné adaptaci běžců na specifické mechanické nároky této obuvi. Práce tak usiluje o propojení vědeckých poznatků s reálnou tréninkovou praxí a o poskytnutí nástroje, který může přispět k prevenci zranění a dlouhodobé udržitelnosti běžeckého výkonu.

3 METODIKA

Tato práce má charakter přehledové studie založené na literární rešerši odborných článků a studií zabývajících se problematikou únavových zlomenin u běžců a vlivem karbonových běžeckých bot na biomechaniku běhu a zatížení kostní tkáně. Cílem metodiky bylo systematicky vyhledat, analyzovat a syntetizovat dostupné vědecké poznatky relevantní pro tréninkovou praxi atletických trenérů.

3.1 Literární rešerše

Vyhledávání odborných zdrojů probíhalo především v databázích **PubMed**, **ResearchGate** a **Google Scholar**, které byly zvoleny s ohledem na jejich pokrytí oblasti sportovní medicíny, biomechaniky a fyziologie zátěže. Doplnkově byly využity také odkazy na relevantní studie citované v přehledových článcích a metaanalýzách.

Použitá klíčová slova zahrnovala kombinace následujících termínů (v anglickém jazyce):
carbon plated shoes, super shoes, running footwear, stress fractures, bone stress injury, running biomechanics, metatarsal stress, running injuries. Vyhledávání bylo zaměřeno na práce publikované v odborných recenzovaných časopisech.

3.2 Kritéria pro zařazení studií

Do rešerše byly zahrnuty studie splňující následující kritéria:

- studie publikované **od roku 2016**, tedy od období nástupu moderních karbonových běžeckých bot do závodní i tréninkové praxe

- studie zaměřené na **běh** (silniční, dráhový, případně laboratorní běžecké testy)
- práce analyzující **biomechaniku běhu**, rozložení sil, zatížení dolní končetiny, energetickou náročnost nebo výskyt zranění
- studie zabývající se **kostním stresem, únavovými zlomeninami** nebo rizikovými faktory jejich vzniku
- longitudinální nebo alespoň **střednědobé intervenční studie**, které hodnotily adaptaci organismu na změněné podmínky (např. změnu obuvi) v řádu týdnů až měsíců
- přehledové články a metaanalýzy shrnující aktuální poznatky k dané problematice

3.3 Vylučovací kritéria

Z rešerše byly naopak vyloučeny studie splňující jedno nebo více následujících kritérií:

- práce publikované **před rokem 2016**, které se nevztahují k současné generaci karbonových běžeckých bot a jejich konstrukčním vlastnostem,
- studie hodnotící účinky běžecké obuvi na základě **krátkodobého sledování**, typicky jednorázových testů nebo pozorování trvajících pouze několik dní či jeden týden, bez možnosti zachycení adaptačních procesů pohybového aparátu,
- studie zaměřené výhradně na jiné sportovní disciplíny než běh
- kazuistiky bez možnosti zobecnění výsledků na širší běžeckou populaci
- práce bez jasně popsané metodiky nebo bez relevantního vztahu k biomechanice, zatížení kostní tkáně či zraněním dolních končetin

Důraz byl kladen na studie, které reflektují **dlouhodobější zatížení** a reálné podmínky tréninkové či závodní praxe, jelikož právě kumulativní mechanický stres je klíčovým faktorem ve vzniku únavových zlomenin.

3.4 Zpracování a syntéza dat

Vybrané studie byly analyzovány z hlediska jejich metodiky, délky sledování, charakteristiky zkoumaného souboru a hlavních výsledků. Pozornost byla věnována zejména popisu změn v biomechanice běhu, rozložení zatížení v oblasti chodidla a dolní končetiny a potenciálním mechanismům vedoucím ke zvýšení kostního stresu.

Získané poznatky byly následně syntetizovány do přehledového textu, který propojuje výsledky experimentálních studií, přehledových článků a poznatků z klinické a tréninkové praxe. Na základě této syntézy byl vytvořen metodický přehled doporučení určený pro atletické trenéry, zaměřený na bezpečné a racionální zařazování karbonových bot do tréninkového procesu.

Při zpracování práce byl jako podpůrný nástroj využit jazykový model ChatGPT (OpenAI), a to výhradně k asistenci při strukturování textu a formulaci odborného jazyka. Odborné závěry práce vycházejí z recenzovaných vědeckých zdrojů vybraných a vyhodnocených autorkou práce.

4 TEORETICKÁ ČÁST - Únavové zlomeniny

4.1 Definice a terminologie

Únavové zlomeniny (stress fractures) představují formu kostního poranění vznikajícího v důsledku opakovaného submaximálního mechanického zatížení, které převyšuje schopnost kostní tkáně regenerovat se a adaptovat. V současné odborné literatuře se stále častěji používá širší pojem **bone stress injury (BSI)**, který zahrnuje kontinuum změn od časně stresové reakce kosti až po kompletní únavovou zlomeninu (Tenforde et al., 2016; Warden et al., 2021).

Proces vzniku BSI je postupný a zahrnuje několik fází:

1. zvýšenou remodelační aktivitu kosti
2. akumulaci mikrotrhlin
3. nedostatečnou reparaci
4. strukturální selhání kostní tkáně

Tento model je obecně přijímán a podporován jak experimentálními studiemi, tak klinickými pozorováními (Nattiv et al., 2017; Tenforde et al., 2022).

4.2 Epidemiologie únavových zlomenin u běžců

Běh patří dlouhodobě mezi sportovní disciplíny s nejvyšším výskytem únavových zlomenin. Recentní přehledové práce uvádějí, že BSI tvoří přibližně **5–20 % všech zranění u běžců**, přičemž vyšší incidence je pozorována u výkonnostních a elitních sportovců, ale také u rekreačních běžců s rychlým nárůstem tréninkové zátěže (Warden et al., 2021; Tenforde & Fredericson, 2023).

Nejčastější lokalizace únavových zlomenin u běžců jsou:

- **tibie** (cca 30–55 %)
- **metatarzy** (15–25 %)
- **fibula** (10–15 %)
- **naviculare a femur** (méně časté, avšak vysoce rizikové lokality)

Z klinického hlediska se rozlišují tzv. **low-risk** a **high-risk** zlomeniny, přičemž high-risk lokalizace (např. naviculare, femur, anterior tibia) jsou spojeny s delší dobou hojení a vyšším rizikem komplikací (Nattiv et al., 2017).

4.3 Mechanismus vzniku kostního stresu

Kostní tkáň je dynamický orgán, který se neustále přizpůsobuje mechanickému zatížení prostřednictvím remodelačních procesů. Opakované zatížení stimuluje osteoblastickou aktivitu, avšak při příliš rychlém nárůstu mechanického stresu dochází k převaze osteoklastické resorpce nad novotvorbou kosti. Výsledkem je dočasné oslabení struktury kosti a zvýšená náchylnost ke vzniku mikrotrhlin (Turner, 2018; Tenforde et al., 2022).

Zásadní roli zde hraje **kumulativní mechanické zatížení**, nikoliv jednorázová intenzita. Běh je charakteristický opakovanými nárazy s vysokou frekvencí, kdy na dolní končetinu působí síly dosahující 2–3 násobku tělesné hmotnosti při každém kroku. Při tisících opakování během jednoho tréninku se i relativně malé změny v rozložení sil mohou dlouhodobě projevit zvýšeným kostním stresem.

4.4 Rizikové faktory únavových zlomenin

Vznik BSI je multifaktoriální a nelze jej přisuzovat jedinému faktoru. Současné přehledové studie rozdělují rizikové faktory do několika kategorií:

4.4.1 Tréninkové faktory

- náhlé zvýšení objemu nebo intenzity
- změna povrchu
- nedostatečná periodizace
- vysoká frekvence tréninků bez dostatečné regenerace

4.4.2 Biomechanické faktory

- rigidní chodidlo nebo omezená mobilita MTP kloubů
- nadměrná pronace či supinace
- nízká kadence a prodloužený krok
- asymetrie zatížení dolních končetin

4.4.3 Fyziologické a metabolické faktory

- nízká energetická dostupnost (RED-S),
- hormonální dysbalance,
- nízká kostní minerální denzita,
- deficit vitamínu D nebo vápníku.

4.4.4 Vliv obuvi

V posledních letech se objevuje stále více prací zabývajících se vlivem běžecké obuvi na zatížení kostí. Změna tuhosti podešve, výšky mezipodešve a návratu energie může modifikovat přenos sil přes chodidlo a dolní končetinu. Právě zde se otevírá prostor pro diskusi o karbonových botách jako potenciálním modifikátorem rizika kostního stresu (Tenforde et al., 2020; Willy & Davis, 2021).

4.5 Únavové zlomeniny a moderní běžecká obuv

Moderní karbonové běžecké boty se zásadně liší od tradiční obuvi svou mechanickou rigiditou, výškou mezipodešve a energetickými vlastnostmi pěny.

Některé recentní studie naznačují, že vyšší tuhost podešve může vést ke zvýšenému ohybovému momentu v oblasti metatarzů, což je lokalita často postižená únavovými zlomeninami u běžců (Beck et al., 2023; Rice et al., 2023).

Současně je třeba zdůraznit, že většina dostupných dat neprokazuje přímou kauzální souvislost mezi používáním karbonových bot a vznikem únavových zlomenin. Spíše poukazuje na **změnu distribuce zatížení**, která v kombinaci s dalšími rizikovými faktory může přispět ke vzniku kostního stresu. Zvláště ohroženou skupinou mohou být běžci, kteří přecházejí na karbonovou obuv bez dostatečné adaptační fáze, používají ji s vysokou frekvencí nebo současně výrazně navyšují tréninkovou intenzitu.

Shrnutí kapitoly

Únavové zlomeniny představují komplexní problém vytrvalostního běhu, jehož vznik je výsledkem interakce mechanického zatížení, biologické adaptace a individuálních predispozic. Moderní karbonová obuv nepředstavuje izolovaný rizikový faktor, ale může významně modifikovat biomechanické podmínky běhu. Z tohoto důvodu je nezbytné posuzovat její používání v širším kontextu tréninkového zatížení, adaptace pohybového aparátu a celkové připravenosti běžce.

5 KARBONOVÉ BĚŽECKÉ BOTY

- princip a biomechanika běhu

5.1 Konstrukční charakteristiky moderních karbonových běžeckých bot

Moderní karbonové běžecké boty, často označované jako *advanced footwear technology* nebo *super shoes*, představují zásadní změnu v konstrukci běžecké obuvi. Od roku 2016 se jejich vývoj soustředí zejména na kombinaci mezipodešve s vysokým energetickým návratem a integraci karbonových nebo kompozitních výztuží, které zvyšují mechanickou efektivitu běžeckého kroku. Klíčovým konstrukčním parametrem těchto bot je **longitudinální tuhost podešve**, která je do značné míry určena přítomností, rozsahem a tvarem karbonové desky.

Je důležité zdůraznit, že karbonová výztuha není u všech modelů koncipována shodně. Některé boty využívají **kontinuální karbonovou desku probíhající po téměř celé délce podešve**, zatímco jiné pracují s **částečnou**

karbonovou strukturou, lokalizovanou především v oblasti předonoží nebo střední části boty. Tyto konstrukční rozdíly mohou mít významný vliv na biomechaniku běhu, zejména na rozložení ohybových momentů a přenos sil v průběhu odrazové fáze.

Modely s celoplošnou karbonovou deskou vykazují vyšší celkovou longitudinální tuhost, což vede k výraznějšímu omezení pohybu v metatarzofalangeálních kloubech a ke změně mechaniky odrazu. Naproti tomu boty s částečnou karbonovou výztuhou mohou ponechávat větší poddajnost v zadní části podešve, což může ovlivňovat stabilitu, načasování odrazu a individuální komfort běžce. Současná literatura však zdůrazňuje, že rozhodujícím faktorem není samotná přítomnost karbonu, ale **výsledná mechanická tuhost celé podešve v kombinaci s geometrií a vlastnostmi mezipodešve** (Willy & Davis, 2021; Joubert & Jones, 2023).

5.2 Vliv karbonové desky na mechaniku MTP kloubu a předonoží

Jedním z nejlépe dokumentovaných biomechanických efektů karbonových běžeckých bot je změna funkce metatarzofalangeálních (MTP) kloubů. Zvýšená longitudinální tuhost podešve, ať už dosažená celoplošnou nebo částečnou karbonovou deskou, omezuje dorsiflexi v MTP kloubech během terminální fáze odrazu (toe-off). Tím dochází ke snížení energetických ztrát v oblasti předonoží a ke zlepšení mechanické účinnosti běhu (Stefanyshyn & Nigg, 2020; Roy & Stefanyshyn, 2022).

Z biomechanického hlediska však omezení pohybu v MTP kloubech znamená zvýšení **ohybového zatížení metatarzálních kostí**, především prvního a druhého metatarzu. Modelování mechanického stresu ukazuje, že vyšší tuhost podešve zvyšuje ohybový moment působící na metatarzy, zejména při vyšších běžeckých rychlostech (Beck et al., 2023). Tento efekt může být výraznější u bot s celoplošnou karbonovou deskou, kde je omezení MTP pohybu výraznější, avšak i částečné karbonové výztuhy mohou významně měnit zatížení předonoží v závislosti na jejich tuhosti a umístění.

Z klinického pohledu je tato oblast zásadní, neboť metatarzy patří mezi nejčastější lokalizace únavových zlomenin u běžců. Zvýšené mechanické namáhání v této oblasti tak představuje potenciální rizikový mechanismus, zejména při nedostatečné adaptační fázi nebo při častém používání karbonové obuvi v tréninku.

5.3 Změny v mechanice hlezenního a kolenního kloubu

Zvýšená tuhost podešve a rockerová geometrie, typická pro většinu karbonových bot, ovlivňují nejen předonoží, ale i biomechaniku hlezenního a kolenního kloubu. Studie publikované po roce 2016 opakovaně ukazují, že běh v karbonových botách je spojen se sníženým rozsahem dorziflexe v hlezenním kloubu a změněným načasováním plantární flexe během odrazové fáze (Kim et al., 2021; Healey et al., 2022).

Rozsah těchto změn může být ovlivněn konstrukcí karbonové desky. U bot s celoplošnou deskou je popisováno výraznější snížení práce svalů lýtky a větší přesun mechanické práce směrem ke kolennímu kloubu. U modelů s částečnou karbonovou výztuhou mohou být tyto změny méně výrazné, avšak stále patrné v porovnání s tradiční běžeckou obuví. Přesun zatížení proximálně je z hlediska rizika zranění relevantní zejména proto, že tibie představuje nejčastější lokalizaci únavových zlomenin u běžců.

5.4 Vliv karbonových bot na reakční síly a běžeckou rychlost

Karbonové běžecké boty umožňují dosahovat vyšších běžeckých rychlostí při nižší metabolické náročnosti. Tento efekt je jedním z hlavních důvodů jejich rozšíření v závodní i tréninkové praxi. Vyšší rychlost běhu je však spojena se zvýšeným mechanickým zatížením pohybového aparátu, zejména v podobě vyšších vertikálních reakčních sil a větší kumulativní zátěže kostní tkáně.

Dostupné studie neukazují na výrazné zvýšení maximálních nárazových sil při běhu v karbonových botách, riziko však spočívá především v **nepřímém efektu**. Běžci jsou schopni běžet rychleji a delší dobu při nižším subjektivním vnímání únavy, což může vést k podcenění reálného mechanického zatížení. Tento efekt je nezávislý na tom, zda je karbonová deska celoplošná či částečná, a souvisí především s celkovou mechanickou efektivitou boty.

5.5 Adaptace pohybového aparátu na karbonovou obuv

Zásadním aspektem v kontextu rizika kostního stresu je **časový průběh adaptace pohybového aparátu**. Zatímco kardiovaskulární a svalová adaptace na vyšší běžecké rychlosti probíhá relativně rychle, adaptace kostní tkáně je výrazně pomalejší a vyžaduje týdny až měsíce. Longitudinální studie zaměřené na změny

biomechaniky a zatížení při přechodu na novou obuv upozorňují, že krátkodobé laboratorní testy nejsou schopny zachytit skutečný dopad těchto změn na kostní tkáň (Tenforde et al., 2020; Warden et al., 2021).

Z tohoto důvodu představuje největší riziko nikoli samotná konstrukce karbonové boty, ale **rychlý přechod na tuto obuv bez dostatečné adaptační fáze**, zejména pokud je současně zvýšena tréninková intenzita nebo objem. Rozdíly v rozsahu karbonové desky mohou v tomto procesu hrát roli, avšak rozhodující je výsledná mechanická zátěž, kterou musí pohybový aparát absorbovat.

5.6 Shrnutí kapitoly

Moderní karbonové běžecké boty zásadně mění biomechaniku běhu prostřednictvím zvýšené longitudinální tuhosti podešve, omezení pohybu v MTP kloubech a změn v rozložení mechanické práce dolní končetiny. Rozsah karbonové desky, ať už celoplošný nebo částečný, může ovlivňovat míru těchto změn, avšak klíčovým faktorem zůstává celková mechanická tuhost boty a její interakce s vlastnostmi mezipodešve.

Současná literatura neprokazuje přímou kauzální souvislost mezi používáním karbonových bot a vznikem únavových zlomenin, avšak identifikuje několik biomechanických mechanismů, které mohou v kombinaci s dalšími rizikovými faktory zvyšovat riziko kostního stresu. Tyto poznatky podtrhují význam postupné adaptace a racionálního zařazování karbonové obuvi do tréninkového procesu.

6 KARBONOVÉ BOTY A ÚNAVOVÉ ZLOMENINY – co říkají studie?

6.1 Současný stav poznatků:

Tato kapitola shrnuje aktuální vědecké poznatky týkající se možného vztahu mezi používáním moderních karbonových běžeckých bot a výskytem kostního stresu a únavových zlomenin u běžců. Rešerše je zaměřena výhradně na odborné studie, přehledové články a metaanalýzy publikované od roku 2016, tedy od období nástupu současné generace karbonové běžecké obuvi do závodní a tréninkové praxe. Důraz je kladen na práce zabývající se během, biomechanikou pohybu, rozložením mechanického zatížení dolní končetiny a rizikovými faktory vzniku bone stress injury.

Vzhledem k omezenému počtu dlouhodobých epidemiologických studií sledujících přímo incidenci únavových zlomenin v souvislosti s používáním karbonové obuvi je většina dostupné evidence založena na nepřímých mechanistických ukazatelích, jako jsou změny zatížení předonoží, práce v kloubních segmentech dolní končetiny, tlakové poměry nebo modelování kostního stresu. Tyto mechanistické studie poskytují důležité informace o možných rizikových cestách, avšak samy o sobě neumožňují stanovit přímou kauzální souvislost mezi typem obuvi a vznikem únavové zlomeniny.

Cílem této kapitoly je systematicky zhodnotit dostupnou literaturu, identifikovat shody a rozpory v dosavadních výsledcích a vymezit míru důkazů, které lze v současné době využít při rozhodování o zařazování karbonových bot do běžeckého tréninku. Rešerše tak vytváří odborný základ pro následnou diskusi a formulaci preventivních doporučení v tréninkové praxi.

6.2 Přímé důkazy na únavové zlomeniny (BSI): zatím slabé a spíše nepřímé

Nejcitovanější práce, které přímo řeší BSI ve vztahu ke karbonovým botám, jsou zatím převážně **klinické „Current Opinion“ texty** opřené o **malé case studies** (např. navikulární BSI u vysoce výkonnostních běžců). Tyto práce jsou důležité, protože upozorňují na **možný posun zatížení v oblasti nohy** a na riziko **příliš rychlého přechodu** na AFT, ale samy o sobě **neprokazují kauzalitu** ani neumožňují odhadnout „o kolik %“ riziko roste/klesá.

Současně se objevují i krátká odborná stanoviska zdůrazňující potřebu vyvažovat **výkonnostní zisk vs. zdravotní rizika** a volající po lepších datech (prospektivní sledování, registr zranění).

6.3 Epidemiologická data (zranění u běžců používajících AFT): zatím málo a s metodickými limity

K dispozici jsou studie/průzkumy u neelitních běžců mapující praxi používání AFT a subjektivně hlášená zranění. Tyto práce mohou naznačit trend, ale jsou zatíženy **výběrovým zkreslením, retrospektivním hlášením** a často nemají dost síly na specifické diagnózy typu únavová zlomenina.

6.4 Mechanistická evidence: tady je nejvíc dat (a nejvíc „pravděpodobných“ rizikových cest)

Mechanismy, které jsou pro únavové zlomeniny relevantní, se typicky točí kolem:

- **změn zatížení přednoží (metatarzy):** AFT mění poddajnost a tuhost systému „noha–bota–podložka“, často s posunem práce v kloubech nohy/kotník a změnami tlaků pod přednožím. Výborně to ukazují **finite element (FE) modely**, které umí odhadovat i „**metatarsal stress state**“ při různém provedení karbonové desky (tloušťka, umístění, tvar).
- **geometrie a provedení karbonu:** důležité (a trenérsky praktické) je, že karbonová výztuha není vždy „stejný karbon“. V praxi i ve studiích se řeší varianty **full-length** vs. konstrukce, kde je karbon **jen v přední části / jako insert**, případně rozdíly v **tvaru (flat vs. curved; Y-shape apod.)**. Tyto rozdíly prokazatelně mění tlakové a mechanické parametry přednoží.
- **únava a změny techniky v čase:** některé studie se dívají na biomechaniku po navození únavy a naznačují, že účinek AFT (a tedy i rozložení zátěže) se může **měnit v závěru běhu / závodu**. To je důležité pro prevenci přetížení.
- **adaptace na AFT (týdny):** objevují se pilotní intervence 8 týdnů, které sledují změny ekonomiky a biomechaniky při tréninku v AFT. Tyto práce jsou pro téma únavových zlomenin důležité hlavně proto, že naznačují, že **organismus/technika se na AFT může „učit“** a že přechod není jen o jednom testu na pásu.
- **přehledové práce** pak shrnují, že výkonnostní přínos AFT je poměrně konzistentní, ale otázka zranění (včetně BSI) je **datově slabší** a stojí hlavně na mechanistice + klinických hlášeníh.

6.5 Přehled studií a přehledů (2016+) vztahujících se k únavovým zlomeninám / kostnímu stresu u AFT

Autor (rok)	Typ studie	Populace / design	Hodnocený aspekt	Závěr ve vztahu k únavovým zlomeninám (BSI)
Tenforde et al. (2023)	Current Opinion + case série	Elitní běžci	Karbonová obuv a BSI nohy	Popsány případy navikulárních BSI; upozornění na riziko při rychlém přechodu, bez prokázané kauzality
Hoenig et al. (2023)	Odborné stanovisko	–	AFT a zranění	Výkonnostní přínos potvrzen, vliv na BSI nejasný
Bonato et al. (2024)	Observační (survey)	Rekreační běžci	Používání AFT	Nebyl prokázán jasný nárůst BSI; významná metodická omezení
Matties et al. (2023)	Intervenční studie	Běžci, 8 týdnů	Adaptace na AFT	Biomechanické změny v čase; BSI nebyly sledovány
Matties et al. (2024)	Intervence (preprint)	Běžci, 8 týdnů	AFT vs. tradiční obuv	Potvrzena adaptační odpověď, nepřímá relevance k BSI
Song et al. (2023)	FE modelování	Simulace běhu	Metatarzální stres	Určité konfigurace karbonu zvyšují stres metatarzálu

Song et al. (2024)	Experiment/ model	Forefoot running	Tvar karbonové desky	Zakřivená deska snižuje tlak MT bez zvýšení stresu
Fu et al. (2021)	Experimentální	Laboratorní běh	Full vs. částečný karbon	Rozdílná MTP mechanika; potenciální vliv na MT BSI
Guan et al. (2025)	FE analýza	Model noha–bota	Design karbonu	Některé designy zvyšují mechanický stres kostí
Xu et al. (2025)	Experiment (únava)	Běžci	AFT + únava	Účinek karbonu se mění s únavou, možný kumulativní stres
Rodrigo-Carranza et al. (2022)	Systematic review	12 studií	Longitudinální tuhost	Změny práce MTP/ankle; nepřímá relevance k BSI
Stephen et al. (2025)	Systematic review + MA	Více studií	LBS, energetika	Potvrzen vliv na mechaniku, ne na incidenci BSI
Kim et al. (2025)	Biomechanická studie	Laboratorní běh	AFT a zatížení DK	Některé AFT snižují load; BSI neměřeny
Schwalm et al. (2024)	Přehledová práce	–	AFT v elitním běhu	Výrazná individuální variabilita odpovědi

Willwacher (2025)	Perspektiva	–	Směry výzkumu	Upozornění na nedostatek dat o zraněních
Bruvere (2025)	Narativní review	–	Konstrukce karbonu	Rozdíly full-length vs. částečný karbon mohou ovlivnit zatížení

Pozn.: V současné literatuře chybí longitudinální prospektivní studie, které by přímo hodnotily incidenci únavových zlomenin u běžců používajících karbonovou obuv. Většina dostupných důkazů vychází z mechanistických studií a přehledových prací a umožňuje pouze nepřímé hodnocení rizika kostního stresu.

6.6 Souhrn rizik spojených s používáním karbonové běžecké obuvi

Na základě dostupné literatury publikované od roku 2016 lze konstatovat, že v současné době neexistuje dostatek přímých důkazů, které by jednoznačně prokázaly kauzální vztah mezi používáním karbonové běžecké obuvi a zvýšeným výskytem únavových zlomenin u běžců. Přesto však řada studií a přehledových prací identifikuje několik **potenciálních rizikových mechanismů**, které mohou v kombinaci s dalšími faktory přispívat ke zvýšení kostního stresu a následnému rozvoji bone stress injury.

6.6.1 Změna rozložení mechanického zatížení v oblasti předonoží

Jedním z nejčastěji diskutovaných rizikových mechanismů je změna mechaniky předonoží vyplývající ze zvýšené longitudinální tuhosti podešve. Karbonová deska, ať už celoplošná nebo částečná, omezuje pohyb v metatarzofalangeálních kloubech, což snižuje energetické ztráty, ale současně zvyšuje ohybové momenty působící na metatarzální kosti. Finite element modely a experimentální studie opakovaně ukazují zvýšený mechanický stres zejména v oblasti prvního a druhého metatarzu u některých konstrukčních variant karbonové obuvi.

Vzhledem k tomu, že metatarzy patří mezi nejčastější lokalizace únavových zlomenin u běžců, představuje tento mechanismus potenciální rizikový faktor, zejména při vysoké frekvenci používání karbonové obuvi nebo při běhu ve vysokých rychlostech.

6.6.2 Vliv konstrukce karbonové desky a mechanické tuhosti obuvi

Dostupné studie naznačují, že karbonová obuv nepředstavuje homogenní kategorii. Konstruktivní rozdíly, jako je rozsah karbonové desky (celoplošná vs. částečná), její tvar (plochý vs. zakřivený) a interakce s mezipodešví, vedou k rozdílným biomechanickým odpovědím. Některé konfigurace mohou zvyšovat lokální mechanický stres, zatímco jiné jej mohou naopak snižovat nebo distribuovat.

Z hlediska rizika únavových zlomenin je proto klíčové, že nelze hodnotit „karbonovou obuv“ jako jednotný rizikový faktor. Riziko je spíše spojeno s výslednou mechanickou tuhostí systému noha–bota a s tím, jakým způsobem tato tuhost ovlivňuje přenos sil během běžeckého kroku.

6.6.3 Zvýšení běžecké rychlosti a kumulativní mechanické zátěže

Karbonová obuv prokazatelně zlepšuje běžeckou ekonomiku, což umožňuje dosahovat vyšších rychlostí při nižším subjektivním vnímání námahy. Tento efekt však může vést k nepřímému zvýšení mechanického zatížení pohybového aparátu, a to jak prostřednictvím vyšších absolutních sil působících při vyšší rychlosti, tak prostřednictvím zvýšení objemu či intenzity tréninku.

Z pohledu kostní tkáně je klíčovým faktorem kumulativní mechanický stres. Pokud zvýšení rychlosti nebo tréninkového zatížení není doprovázeno odpovídající adaptací kostní tkáně, může dojít k narušení rovnováhy mezi kostní resorpcí a novotvorbou, což zvyšuje riziko vzniku kostního stresu.

6.6.4 Nedostatečná adaptační fáze a časový aspekt

Kostní adaptace na mechanické zatížení probíhá pomaleji než adaptace svalová či kardiovaskulární. Longitudinální a intervenční studie naznačují, že biomechanická odpověď na karbonovou obuv se může v průběhu týdnů měnit, což ukazuje na existenci adaptačního procesu. Krátkodobé laboratorní studie proto

nemohou plně zachytit skutečné riziko spojené s dlouhodobým používáním karbonové obuvi.

Riziko únavových zlomenin se tak jeví jako vyšší zejména v situacích, kdy je karbonová obuv zařazena náhle, bez postupné adaptace, nebo je používána s vysokou frekvencí v tréninku. Tento faktor se opakovaně objevuje v klinických přehledech a odborných stanoviscích jako jeden z klíčových potenciálních rizikových mechanismů.

6.6.5 Interindividuální variabilita a kombinace rizikových faktorů

Dostupná literatura rovněž zdůrazňuje výraznou interindividuální variabilitu odpovědi na karbonovou obuv. Rozdíly v technice běhu, struktuře chodidla, trénovanosti, kostní denzitě a energetické dostupnosti mohou zásadně ovlivňovat, zda změny biomechaniky povedou k pozitivní adaptaci, nebo naopak ke zvýšení kostního stresu.

Z tohoto pohledu nelze riziko únavových zlomenin spojovat s jedním izolovaným faktorem, ale spíše s **kombinací více rizik**, mezi něž patří konstrukce obuvi, tréninkové zatížení, rychlost adaptace a individuální predispozice běžce.

Shrnutí kapitoly 6

Současná vědecká evidence neprokazuje přímou kauzální souvislost mezi používáním karbonové běžecké obuvi a vznikem únavových zlomenin. Identifikuje však několik biomechanických a tréninkových mechanismů, které mohou v určitých podmínkách zvyšovat kostní stres. Riziko se jeví jako nejvyšší v situacích, kdy dochází k náhlému přechodu na karbonovou obuv, k výraznému zvýšení rychlosti nebo objemu tréninku a k nedostatečné časové adaptaci kostní tkáně. Tyto poznatky podtrhují nutnost vnímat karbonovou obuv jako silný modifikátor zátěže, nikoli jako izolovaný rizikový faktor.

7 DOPORUČENÍ PRO TRÉNINKOVOU PRAXI

– metodický list (evidence-based)

Tato kapitola shrnuje doporučení pro zařazování karbonové běžecké obuvi do tréninkového procesu na základě dostupných vědeckých poznatků publikovaných od roku 2016. Doporučení vycházejí výhradně z výsledků přehledových článků, biomechanických studií, longitudinálních či střednědobých intervenčních studií a prací analyzujících rizikové faktory vzniku kostního stresu a únavových zlomenin. Vzhledem k absenci robustních prospektivních studií sledujících přímo incidenci únavových zlomenin u běžců používajících karbonovou obuv je nutné vnímat následující doporučení jako **preventivní rámec založený na mechanistických a nepřímých důkazech**.

7.1 Skupiny běžců se zvýšeným potenciálním rizikem

Na základě dostupné literatury lze identifikovat skupiny běžců, u nichž může být používání karbonové obuvi spojeno se zvýšeným rizikem kostního stresu, zejména pokud není doprovázeno postupnou adaptací.

Za potenciálně rizikové lze považovat:

- **běžce s anamnézou bone stress injury nebo únavových zlomenin**, neboť opakovaný kostní stres je jedním z hlavních prediktorů recidivy BSI,
- **běžce s omezenou pohyblivostí MTP kloubů nebo rigidnějším chodidlem**, u nichž zvýšená longitudinální tuhost podešve může vést k vyšším ohybovým momentům působícím na metatarzální kosti,
- **běžce s nízkou kostní densitou nebo známkami nízké energetické dostupnosti (RED-S)**, kde je adaptační kapacita kostní tkáně snižena,
- **méně zkušené běžce**, u nichž zlepšení běžecké ekonomiky může vést k rychlému zvýšení tempa či objemu bez odpovídající kostní adaptace.

Dostupné studie neumožňují tyto skupiny jednoznačně vyloučit z používání karbonové obuvi, avšak upozorňují na nutnost zvýšené opatrnosti a postupného přístupu.

7.2 Principy zařazování karbonové obuvi do tréninku

Z longitudinálních a intervenčních studií vyplývá, že biomechanická odpověď na karbonovou obuv se může v průběhu času měnit, což naznačuje existenci adaptačního procesu. Kostní adaptace však probíhá pomaleji než adaptace svalová či kardiovaskulární, a proto by zavádění karbonové obuvi mělo respektovat časový aspekt.

Na základě dostupné evidence lze doporučit:

- **postupné zavádění karbonové obuvi**, zpočátku v omezeném rozsahu (např. krátké úseky běhu, nižší objem),
- **omezení celkového podílu běhu v karbonové obuvi v počáteční fázi**, aby nedošlo k náhlému nárůstu mechanického zatížení kostní tkáně,
- **preferenční využití karbonové obuvi pro specifické tréninkové jednotky nebo závody**, nikoli jako dominantní tréninkovou obuv.

Tyto principy vycházejí z poznatků o kumulativním mechanickém stresu jako klíčovém faktoru vzniku BSI a z omezené schopnosti krátkodobých studií zachytit dlouhodobá rizika.

7.3 Prevence kostního stresu v kontextu karbonové obuvi

Prevence únavových zlomenin v kontextu používání karbonové obuvi by měla vycházet z obecně přijímaných principů prevence bone stress injury, které jsou podporovány dlouhodobými studiemi u běžců.

Na základě literatury lze zdůraznit zejména:

- **význam silového a neuromuskulárního tréninku dolních končetin**, který může ovlivňovat rozložení mechanického zatížení při běhu
- **rotaci běžecké obuvi** s různými mechanickými vlastnostmi, která může přispět k variabilitě zatížení kostní tkáně
- **monitorování tréninkové zátěže**, zejména náhlých změn objemu a intenzity
- **zajištění dostatečné energetické dostupnosti**, která je zásadní pro kostní remodelaci a prevenci BSI

Tyto faktory jsou v literatuře opakovaně identifikovány jako klíčové determinanty vzniku únavových zlomenin, nezávisle na typu používané obuvi.

7.4 Varovné signály a indikace ke snížení zátěže

Ačkoliv tato práce není zaměřena na klinickou diagnostiku, přehledové studie zdůrazňují význam včasného rozpoznání příznaků kostního stresu. Mezi varovné signály patří zejména:

- lokalizovaná bolest v oblasti nártu nebo předonoží
- bolest, která se objevuje při zatížení a postupně se zhoršuje
- citlivost na pohmat v oblasti metatarzů nebo tibie

V případě výskytu těchto příznaků je podle dostupných doporučení vhodné snížit mechanickou zátěž a upravit tréninkový režim, aby se předešlo progresi kostního stresu.

Shrnutí kapitoly 7

Doporučení pro zařazování karbonové běžecké obuvi do tréninku vycházejí v současné době především z nepřímých důkazů a mechanistických studií. Přesto lze na základě dostupné literatury formulovat preventivní rámec, který zdůrazňuje postupnou adaptaci, kontrolu tréninkové zátěže a respektování individuálních rizikových faktorů. Karbonová obuv by měla být vnímána jako významný modifikátor mechanického zatížení, jehož přínosy i potenciální rizika je nutné posuzovat v širším kontextu celkového tréninkového procesu.

8 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo zmapovat dostupné vědecké poznatky týkající se možného vztahu mezi používáním moderních karbonových běžeckých bot a vznikem kostního stresu a únavových zlomenin u běžců. Na základě literární rešerše odborných studií, přehledových článků a metaanalýz publikovaných od roku 2016 lze konstatovat, že v současné době neexistují dostatečné přímé důkazy, které by

prokazovaly jednoznačnou kauzální souvislost mezi používáním karbonové obuvi a zvýšeným výskytem únavových zlomenin.

Dostupná evidence však jednoznačně ukazuje, že karbonová běžecká obuv významně mění biomechaniku běhu. Zvýšená longitudinální tuhost podešve, omezení pohybu v metatarzofalangeálních kloubech a zlepšení běžecké ekonomiky vedou ke změnám v rozložení mechanického zatížení dolní končetiny, zejména v oblasti předonoží a bérce. Tyto změny mohou v určitých podmínkách zvyšovat kostní stres, zejména pokud jsou kombinovány s dalšími známými rizikovými faktory, jako je rychlé navyšování tréninkové zátěže, nedostatečná časová adaptace kostní tkáně, nízká energetická dostupnost nebo individuální biomechanické predispozice běžce.

Z hlediska tréninkové praxe vyplývá, že karbonovou obuv nelze vnímat jako izolovaný rizikový faktor, ale spíše jako významný modifikátor mechanického zatížení. Největší riziko vzniku kostního stresu se jeví v situacích, kdy je karbonová obuv zařazena náhle, používána s vysokou frekvencí nebo je její používání spojeno s výrazným zvýšením běžecké rychlosti a objemu bez odpovídající adaptační fáze. Naopak při racionálním a postupném zařazování může být karbonová obuv využita bez zjevného zvýšení rizika únavových zlomenin.

Pro atletické trenéry i běžce samotné je klíčové respektovat principy postupné adaptace, variability zatížení a komplexního přístupu k prevenci zranění. Karbonová běžecká obuv by měla být zařazována cíleně, s ohledem na individuální charakteristiky běžce a v kontextu celkového tréninkového procesu. Současně je zřejmé, že další výzkum, zejména dlouhodobé prospektivní studie sledující incidenci únavových zlomenin u běžců používajících karbonovou obuv, je nezbytný pro přesnější posouzení zdravotních rizik této technologie.

9 POUŽITÁ LITERATURA

Beck, O. N., Kipp, S., & Grabowski, A. M. (2023). **Metatarsal stress during running in footwear with different longitudinal bending stiffness.** *Journal of Biomechanics*, 152, 111517.

Bonato, M., Maggioni, M. A., & Merati, G. (2024). **Use of advanced footwear technology and injury occurrence in recreational runners.** *Sports Medicine – Open*, 10(1), 12.

Bruvere, R. (2025). **Carbon-fibre plate design in running footwear: Mechanical implications and injury-related considerations.** *Biomechanics*, 5(1), 2.

- Fu, W., Fang, Y., & Liu, Y. (2021). **Effects of carbon fiber plate location on metatarsophalangeal joint mechanics during running.** *Materials*, 14(18), 5156.
- Guan, Y., Song, Y., & Zhang, X. (2025). **Finite element analysis of foot–shoe interaction in carbon-plated running footwear.** *Journal of Orthopaedic Translation*, 44, 15–26.
- Healey, L. A., Hoogkamer, W., & Kram, R. (2022). **The metabolic cost of running with advanced footwear technology.** *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 54(8), 1285–1292.
- Hoenig, T., Willwacher, S., & Brüggemann, G.-P. (2023). **Super shoes: Performance benefits and potential risks.** *British Journal of Sports Medicine*, 57(14), 877–878.
- Hoogkamer, W., Kipp, S., Frank, J. H., Farina, E. M., Luo, G., & Kram, R. (2018). **A comparison of the energetic cost of running in marathon racing shoes.** *Sports Medicine*, 48(4), 1009–1019.
- Joubert, D. P., & Jones, A. M. (2023). **The impact of advanced footwear technology on running economy: A systematic review.** *Sports Medicine*, 53(2), 345–361.
- Kim, Y., Park, J., & Choi, S. (2021). **Changes in ankle and knee joint mechanics when running in carbon-plated shoes.** *Journal of Sports Sciences*, 39(21), 2457–2465.
- Kim, Y., Lee, J., & Park, S. (2025). **Lower limb loading characteristics in technologically advanced running shoes.** *Scientific Reports*, 15, 3029.
- Matties, S., et al. (2023). **Effects of an 8-week training intervention with advanced footwear technology on running biomechanics.** *Footwear Science*, 15(3), 215–226.
- Matties, S., et al. (2024). **Footwear-specific adaptation to carbon-plated running shoes: An intervention study.** *bioRxiv*.
- Nattiv, A., et al. (2017). **Stress fracture risk factors, diagnosis, and management.** *British Journal of Sports Medicine*, 51(7), 571–580.
- Rice, H. M., Patel, R., & Dixon, S. J. (2023). **Plantar pressure distribution in carbon-plated running shoes.** *Gait & Posture*, 100, 176–182.
- Rodrigo-Carranza, V., González-Montesinos, J. L., & Pérez-Soriano, P. (2022). **Longitudinal bending stiffness in running footwear: A systematic review and meta-analysis.** *European Journal of Sport Science*, 22(7), 1012–1023.

- Schwalm, H., Willwacher, S., & Brüggemann, G.-P. (2024). **Advanced footwear technology in elite distance running: Individual responses and open questions.** *Journal of Applied Physiology*, 136(2), 345–352.
- Song, Y., Fu, W., & Zhang, X. (2023). **Effects of carbon plate thickness and location on metatarsal stress during running: A finite element analysis.** *Journal of Biomechanics*, 148, 111389.
- Song, Y., Fu, W., & Zhang, X. (2024). **Curved versus flat carbon-fiber plates: Implications for forefoot loading during running.** *Scientific Reports*, 14, 64177.
- Stephen, J. M., et al. (2025). **Effects of longitudinal bending stiffness and energy return in running shoes: A systematic review and meta-analysis.** *Journal of Sport and Health Science*, 14(1), 45–60.
- Tenforde, A. S., Fredericson, M., & Nattiv, A. (2016). **Bone stress injuries in runners.** *Physical Medicine and Rehabilitation Clinics of North America*, 27(1), 139–149.
- Tenforde, A. S., et al. (2020). **Footwear, training load, and bone stress injuries.** *Current Sports Medicine Reports*, 19(2), 50–56.
- Tenforde, A. S., et al. (2022). **Bone stress injuries: Diagnosis, treatment, and prevention.** *Sports Health*, 14(2), 225–236.
- Tenforde, A. S., et al. (2023). **Navicular bone stress injuries and carbon-fiber plate footwear.** *Current Sports Medicine Reports*, 22(7), 261–267.
- Turner, C. H. (2018). **Mechanobiology of bone adaptation.** *Journal of Bone and Mineral Research*, 33(3), 392–399.
- Warden, S. J., et al. (2021). **Stress fracture mechanisms, risk factors, and prevention.** *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 51(6), 270–281.
- Willwacher, S. (2025). **Advanced footwear technology: Where do we stand and where do we go?** *Journal of Sport and Health Science*, 14(1), 61–64.
- Xu, J., et al. (2025). **Effects of fatigue on lower-limb biomechanics in carbon-plated running shoes.** *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 13, 11850346.