



Potenciál elektrostimulace v podpoře axonální regenerace v terapii periferních nervových paréz

HORNÍČEK Jiří ^{1,2}, KOLÁŘOVÁ Barbora ¹, KOLÁŘ Petr ¹

¹ Oddělení rehabilitace, Fakultní nemocnice Olomouc, Česká republika.

² Katedra biofyziky, Lékařská fakulta Univerzity Palackého v Olomouci, Česká republika.

*Corresponding author: petr.kolar@fnol.cz

ABSTRACT

Úvod: Periferní nervové parézy jsou důsledkem poškození axonů, které vedou ke svalové slabosti, atrofii a v konečném důsledku k funkční disabilitě. Regenerace nervu je pomalý proces ovlivněný věkem, lokalizací a typem léze. Cílem tohoto přehledového článku je analyzovat současné možnosti využití elektrostimulace v terapii periferních nervových paréz se zaměřením na její potenciál ovlivnit axonální regeneraci.

Metodika: Článek vychází z narativní rešerše odborné literatury (PubMed, Scopus, Web of Science) z let 2000–2025. Zahrnuty byly experimentální studie na animálních modelech, klinické studie a přehledové práce hodnotící vliv různých typů elektrostimulace na regeneraci periferních nervů.

Diskuse: Současná elektrostimulace má význam zejména v prevenci svalové atrofie a udržení svalové kontraktility, nikoli v přímé podpoře axonální regenerace. Naproti tomu invazivní elektrostimulace aplikovaná perioperačně přímo na nerv aktivuje intracelulární signální dráhy, zvyšuje expresi neurotrofních faktorů a urychluje axonální regeneraci. Elektroakupunktura, jako miniinvazivní metoda, kombinuje neuromodulační účinky s možností ambulantní aplikace; studie především na animálních modelech potvrzují její vliv na proliferaci Schwannových buněk, inhibici apoptózy a podporu neuroplasticity.

Závěr: Invazivní elektrostimulace a elektroakupunktura se jeví jako slibný přístup pro cílené ovlivnění regenerace periferních nervů. Další výzkum by měl směřovat k optimalizaci stimulačních parametrů a ověření dlouhodobých klinických výsledků, zejména v kontextu běžné praxe.

KEYWORDS

electrostimulation, electroacupuncture, peripheral nerve injury, nerve regeneration, Schwann cells, neurotrophic factors.

EN-DOI: [10.61983/lcrh.v63i3.182](https://doi.org/10.61983/lcrh.v63i3.182)

1 ÚVOD

Periferní paréza je důsledkem poškození axonu periferního nervu, klinicky se manifestuje ztrátou aktivního pohybu ve svaích inervovaných daným nervem a změnou vnímání pohybu. Často přímo souvisí s více či méně vyjádřenou pohybovou disabilitou, která může negativně ovlivnit kvalitu života pacientů, zejména v případech, kdy je síla výchozího svalu výrazně snížena nebo zcela vymizelá¹. Přímé poranění periferního nervu je často doprovodným nežádoucím jevem při traumatickém poškození horních či dolních končetin. Není výjimkou ani poškození iatrogenní. K nepřímému poranění nervu může vést lokální ischemizace, útlak či imunitní nebo metabolické procesy. Schopnost regenerace axonu je závislá na věku pacienta, mechanismu poranění a místě poranění². Například při poranění digitálního nervu je prognóza regenerace velmi dobrá, zatímco poranění v oblasti brachiálního plexu je zpravidla funkčně zcela devastující³. V současné době jsou možnosti léčby periferní parézy, respektive obnovy aktivní hybnosti, nedostatečné nebo neuspokojivé³. Léčbou první volby je pohybová terapie v kombinaci s elektrostimulací paretických svalů.

Cílem předkládaného článku je poukázat na stávající možnosti elektrostimulace denervovaného svalu a perspektivu stimulace poškozeného nervu s důrazem na elektroakupunkturu.

1.1 Faktory ovlivňující průběh motorické obnovy

Úplné funkční zotavení paretických svalů po poranění periferního nervu je v klinické praxi vzácné. Denervované svaly a senzorické struktury podléhají progresivním atrofickým změnám, které vedou k náhradě svalových vláken vazivovou či tukovou tkání^{4,5}. Tento proces je multifaktoriální a zahrnuje zejména:

- **Prodlouženou dobu axonální regenerace**, která často přesahuje dobu, po kterou je sval schopen udržet svou strukturální integritu. I při pravidelné aplikaci elektrostimulace se nedaří zachovat všechna svalová vlákna, což vede k jejich postupné atrofii a přestavbě.
- **Nízký počet regenerujících axonů**, kterým se podaří prorůst až k místu inserce do svalu. Tento deficit je částečně kompenzován schopností reinervovaných motorických jednotek expandovat až pětinasobně, což může funkčně nahradit 80% ztrátu motoneuronů⁶.
- **Nespecifické zacílení regenerujících axonů**, které nemusí vždy navázat spojení s původními svalovými vlákny. I přes zvýšenou senzitivitu denervovaného svalu k regenerujícím axonům může dojít k tzv. náhodné reinzerce, kdy se axon spojí s vlákny jiné motorické jednotky⁷. Tento jev může vést k fenoménu synkineze, typicky pozorovanému například u lézí nervus facialis, kdy dochází k simultánní aktivaci funkčně odlišných svalových skupin.
- **Snížený krevní průtok v denervovaném svalu**, který negativně ovlivňuje metabolické prostředí a přispívá k progresi atrofie⁸.

Axonální poškození má dopad nejen na svalový aparát reprezentující pohybovou periferii, ale vede i ke komplexním změnám na úrovni centrálního nervového systému (CNS), které zahrnují kortikální reorganizaci⁹. Po poranění periferního nervu směřují buňky spinálních motoneuronů k apoptóze na základě oxidativního stresu a zvýšené exprese genů regulujících apoptózu včetně receptoru TNF. Bylo však prokázáno, že neurotrofický faktor odvozený z gliálních buněk (Glial cell-derived neurotrophic factor; GDNF) nacházející se v bezprostřední blízkosti buněk motoneuronů zabraňuje axotomií indukované atrofii motoneuronů¹⁰. Jako odpověď na zánětlivou reakci po poranění periferního nervu dochází v oblasti spinální míchy k proliferaci mikroglií. Významnou roli v regeneraci poškozených periferních nervů hraje nervový růstový faktor (NGF). Jedná se o první objevený a nejlépe popsany neurotrofický faktor, o kterém je známo, že má rozhodující ochrannou roli ve vývoji a přežití sympatiku a cholinergních neuronů předního mozku¹¹ a hraje klíčovou roli v regeneraci periferních nervů¹².

1.2 Neurofyzilogický kontext regenerace axonů

Klasifikace periferních nervových lézí dle Seddona rozlišuje tři základní typy poškození: neurapraxii, axonotmezi a neurotmezi. Neurapraxie představuje nejmírnější formu poruchy vedení, která nevyžaduje specifickou léčbu a obvykle se spontánně upravuje v oknu několika hodin až dvou týdnů. Naproti tomu

axonotmeze a neurotmeze jsou spojeny s přerušением axonální kontinuity, což vede k Wallerově degeneraci – procesu, při němž dochází k fragmentaci a následné fagocytóze distálního pahýlu axonu prostřednictvím Schwannových buněk (SB) a makrofágů¹³⁻¹⁵. Neurotmeze se dále dělí podle rozsahu poškození nervových obalů (endoneurium, perineurium, epineurium)¹⁶. Při porušení endoneuria může dojít k částečné regeneraci, léze perineuria a epineuria zpravidla vyžaduje chirurgickou revizi. K operaci na periferním nervu se přistupuje i v případech, kdy konzervativní terapie není efektivní¹⁷. Bylo zjištěno, že po přímé sutuře nervu 42 % axonů regenerovalo do svalu, při použití autoštetpu pak jen 25 %¹⁸.

Regenerace axonů je ovlivněna axonálním transportem a neurotrofními růstovými faktory, které jsou vylučovány SB po poranění nervu. Rychlost regenerace je teoreticky 1-3 mm / den. Nicméně klinická praxe tomu neodpovídá a rychlost závisí na řadě faktorů. Reálně lze usuzovat o rychlosti 25 mm za 8-10 týdnů¹⁹. V případě sutury periferního nervu je třeba navíc počítat s latentním obdobím 3-7 dnů, kdy axony prochází místem chirurgického zákroku²⁰⁻²². Neuronální odpověď SB na poškození je spojena s expresí neurotrofních faktorů, transkripčních faktorů, látek stimulujících růst, molekul adheze buněk (např. N-kadherin), složek extracelulární matrix, intracelulárních signálních enzymů a proteinů regulujících cytoskeletální buněčný povrch²³⁻²⁵. Největší sekrece růstových faktorů ze SB dosahuje 15. den po poranění a navrací se k normálu 35. den po poranění²⁶. Schopnost SB exprimovat růstové faktory ovšem v průběhu času postupně klesá a trvalá denervace vede k atrofii a apoptóze SB²⁷. Atrofie SB způsobuje zpoždění růstu axonů²⁸. Přesto existuje možnost, že dorůstající axon znovu aktivuje SB, například v případě opožděného neurochirurgického zákroku²⁵.

Dalším faktorem, který přispívá ke zpomalené axonální regeneraci jsou endoteliální buňky tvořící bariéru krev-nerv. Její prolomení přispívá ke zpomalení axonální regenerace²⁹. V neposlední řadě to může být stav endoneurální trubice po zánětlivé reakci makrofágů. Dlouhodobá absence axonu endoneurálně může vést ke kolapsu endoneurálního prostoru nebo k nadměrné tvorbě kolagenních vláken. Tyto fibrotické změny způsobují ztlustění nervových obalů, zvýšení obsahu kolagenu a pojivové tkáně, což snižuje jejich elasticitu a vede k méně efektivnímu pučení axonů³⁰.

1.3 Diagnostika periferních paréz

Stávající diagnostika periferních paréz je založena na kombinaci klinického vyšetření, elektrofyziologických metod a zobrazovacích technik. Komplexní přístup začíná kvalitní anamnézou a klinickým vyšetřením lékaře, následovaným specifickým fyzioterapeutickým vyšetřením, včetně kineziologického rozboru. Tento přístup zahrnuje hodnocení svalové síly, rozsahu pohybu, reflexů, senzitivních funkcí a je doplněn specifickými funkčními testy. Součástí funkční diagnostiky periferních nervových lézí je i posouzení mechanosenzitivity neurálních struktur³¹. Klíčovou součástí diagnostiky je jehlová elektromyografie (EMG), která dokáže detekovat i velmi malé změny přenosu informace z periferního nervu na sval. EMG je považována za zlatý standard pro přesné určení charakteru a lokalizace nervové léze. V rámci komplexního funkčního vyšetření může být využita i povrchová elektromyografie³². Ze zobrazovacích metod se uplatní například ultrazvuk periferních nervů či magnetická rezonance, které umožňují detekovat kompresi, neurom nebo změny po traumatu.

2 STÁVAJÍCÍ MOŽNOSTI LÉČBY PERIFERNÍCH NERVOVÝCH PARÉZ

Zásady klinické léčby po poškození nervů nebyly v širším kontextu v posledních 35 letech měněny, navzdory podstatně většímu porozumění neuropatofyziologie a odpovídajícím klinickým výsledkům^{3,4}. V případě úplných lézí, kdy je porušena makroskopická integrita nervu je indikována chirurgická intervence, zatímco částečné nebo kompresní léze se zpravidla řeší konzervativně – rehabilitací včetně elektrostimulace denervovaných svalů. Tato terapie je spíše podpůrná a snaží se oddalovat atrofické změny ve svalu, udržet jeho elasticitu a tím i pohyb v kloubu. Nedojde-li k reinervaci, je důležité nalézt kompenzační mechanismus

Působení elektrického proudu na tkáň dokáže vyvolat změnu membránového potenciálu nervových i svalových vláken, což vede k jejich depolarizaci. Překročí-li depolarizace prahovou hodnotu, dojde k vyvolání akčního potenciálu, který vede v případě nervového vlákna ke vzniku nervového impulzu nebo ke kontrakci u svalů.

Historicky byla účinnost elektrického proudu na svalovou tkáň poprvé popsána již v 18. století Luigim Galvanim, čímž vznikl základ pro moderní elektroterapii. Jeden z prvních důkazů, že slabé elektrické proudy urychlují regeneraci nervů po poranění periferního nervu, přinesl Pomeranz et al.³³. Přímý vliv elektrostimulace na regeneraci periferních nervů, zejména na axonální růst, je dosud převážně sledován v experimentálních studiích na animálních modelech a není jednoznačně prokázán v klinické praxi. Dosaďadní důkazy naznačují, že krátkodobá elektrická stimulace může urychlit axonální růst a zlepšit funkční obnovu, avšak její plošné využití v klinické rehabilitaci vyžaduje další výzkum a standardizaci protokolů³⁴.

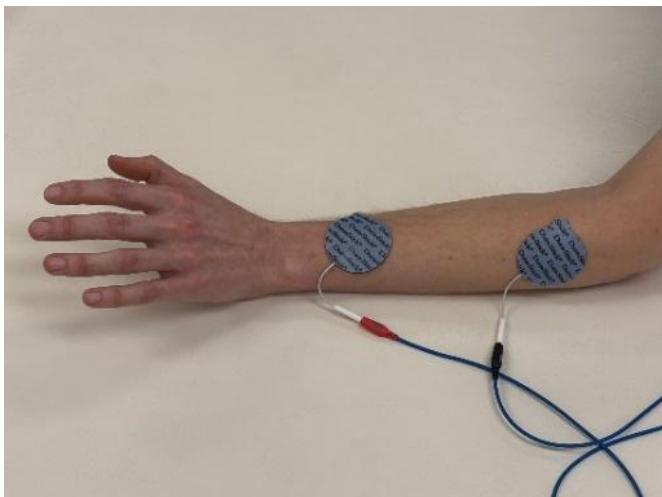
V posledních desetiletích jsou využívány různé typy proudů s ohledem na intenzitu, frekvenci, charakter a lokalizaci aplikace. Elektrostimulaci lze rozdělit do několika kategorií podle typu aplikace:

2.1 Neinvazivní formy stimulace

2.1.1 Svalová elektrostimulace

Selektivní elektrostimulace denervovaného svalu představuje neinvazivní terapeutický přístup, při němž je elektrický proud aplikován přes kůži. Tento název je taktéž znám jako elektrostimulace dle I/t křivky (intenzita–čas). Tato vyjadřuje vztah mezi intenzitou stimulačního proudu a délkou impulzu nezbytnou k vyvolání svalové kontrakce. Tento koncept umožňuje cílenou stimulaci svalových vláken s různým stupněm inervace. V praxi se využívají šikmé impulzy s variabilní délkou trvání^{35,37,38}, jelikož denervované svaly mají menší schopnost akomodace. Přičemž se sledují parametry dráždivosti, zejména práh kontrakce,

chronaxie a reobáze³⁵. Přenos stimulačního signálu probíhá skrze vodivé vrstvy tkání – epidermis, dermis a podkoží – až k cílové svalové tkáni. Bylo prokázáno, že větší stimulační potenciál má katoda³⁵⁻³⁷, proto se často umísťuje nad motorický bod svalu (oblast svalu, ve které se nachází největší počet nervosvalových plotének). U malých svalů se používají bodové elektrody, u větších plošné. Typické stimulační impulzy pro denervované svaly se pohybují v rozmezích několika set ms^{35,38}. U denervovaných svalů je nutné aplikovat delšími impulzy a vyšší intenzitou vzhledem ke snížené excitabilitě tkáně, zatímco u zdravých nebo částečně reinervovaných svalů postačují kratší impulzy s nižší intenzitou³⁶. Intenzita se volí tak, aby byla dosažena viditelná kontrakce bez nadměrného diskomfortu pa-



Obrázek 1: Svalová elektrostimulace

cienta (obrázek 1).

2.1.2 NMES (Neuromuscular Electrical Stimulation) and FES (Funkční elektrická stimulace)

NMES a FES jsou považovány za neinvazivní formy elektrické stimulace, ale nejsou určeny ke stimulaci zcela denervovaného svalu při paréze periferních nervů. Mohou být však aplikovány v případech částečné denervace nebo po alespoň částečné reinervaci, kdy byl obnoven funkční neuromuskulární přenos. Zatímco FES je ze své podstaty zaměřena na funkční úkoly a pohyby specifické pro daný úkol^{36, 39}, jako je úchop nebo dorzální flexe během chůze (viz obrázek 2), NMES se primárně zaměřuje na vyvolání svalové kontrakce, usnadnění



Obrázek 2: Funkční elektrická stimulace nervus peroneus při chůzi

aktivace, či posílení kontrakce nebo neuromuskulární kontrolu.

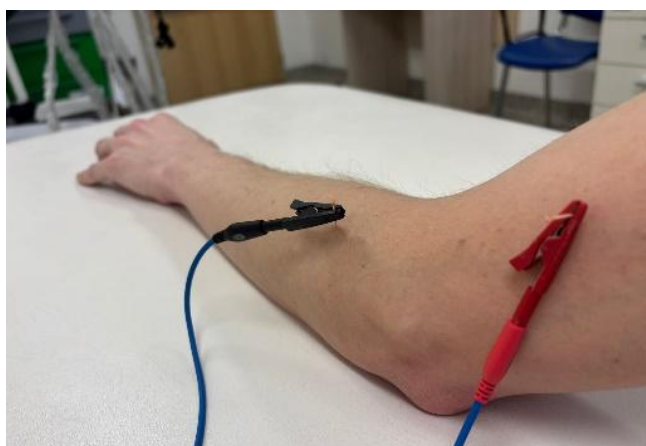
2.2 Invazivní formy elektrostimulace periferního nervu

2.2.1 Perioperační elektrostimulace

Zahrnuje postupy, při nichž jsou stimulační elektrody umístěny přímo k perifernímu nervu, což vyžaduje chirurgický zákrok. Tyto postupy jsou dočasné, aplikované přímo na nerv během nebo krátce po operaci v souvislosti s chirurgickou rekonstrukcí nervu. Typické parametry elektrostimulace používané ve studiích^{34,40-44} jsou poměrně konzistentní: nejčastěji se aplikuje frekvence 20 Hz, šířka pulzu 0,1–1 ms a intenzita v rozmezí 3–30 V (nebo kolem 2 mA). Délka stimulace se pohybuje mezi 20 a 60 minutami, přičemž elektrody jsou umístěny proximálně od místa poškození nervu během nebo bezprostředně po chirurgické rekonstrukci. Tento postup je dnes považován za slibný doplněk neurochirurgických operací.

2.2.2 Elektroakupunktura

V léčbě periferních paréz představuje poměrně inovativní metodu. Jedná se o kombinaci klasické akupunktury s elektrostimulací. Lze ji považovat za miniinvazivní formu elektrostimulace. Na rozdíl od invazivní stimulace periferního nervu nemá umístěny elektrody přímo do periferního nervu. Elektroakupunktura využívá zavedení tenkých jehel do specifických (akupunkturních) bodů, čímž překonává vysoký kožní odpor, který je jistým limitujícím faktorem u transkutánních elektrostimulačních metod. Díky tomu je elektrický proud aplikován do hlubších vrstev, což umožňuje selektivnější stimulaci cílových nervosvalových struktur⁴⁵. (Obrázek 3).



Obrázek 3: Elektroakupunktura

V tradiční medicíně jsou akupunkturní dráhy interpretovány jako energetické kanály.

Lze poukázat na jejich částečnou anatomickou korelaci s průběhem periferních nervů (např. nervus radialis – dráha tlustého střeva, nervus peroneus profundus – dráha žaludku, nervus peroneus superficialis – dráha žlučníku)⁴⁶.

2.3 Další poznatky k ovlivnění regenerace periferního nervu

Pokroky v léčbě zahrnují i aplikaci buněčných kultur (Schwannovy buňky, mesenchymální buňky, buňky kostní dřeně), které produkují růstové faktory, k místu nervové léze⁴⁷. Konzervativní farmakoterapie (vitaminy B, methylkobalamin, exogenní neurotrofické faktory) se však ukazuje jako málo účinná kvůli nízké koncentraci léčiv v místě poškození nervu⁴⁸⁻⁵⁰.

3 METODIKA

Tento přehledový článek vychází z narativní rešerše odborné literatury zaměřené na využití elektrostimulace v terapii periferních nervových paréz. Vyhledávání bylo provedeno v databázích PubMed, Scopus a Web of Science v období od roku 2000 do roku 2025. Zahrnuty byly především experimentální studie na animálních modelech, klinické studie a přehledové články, které se zabývaly vlivem různých typů elektrostimulace na regeneraci periferních nervů. Studie byly vybírány na základě relevance k tématu, dostupnosti úplného textu a přítomnosti měřitelných výstupů týkajících se regenerace axonů. Celkem bylo analyzováno přibližně 60 studií, z nichž většina se zaměřovala na elektroakupunkturu a invazivní elektrostimulaci.

4 DISKUSE

Přímý vliv elektrostimulace v oblasti poškozeného nervu na regeneraci, respektive na axonální růst, je dosud převážně sledován v experimentálních studiích na animálních modelech. Dosavadní důkazy

naznačují, že krátkodobá elektrická stimulace může urychlit axonální růst a zlepšit funkční obnovu, avšak její plošné využití v klinické rehabilitaci vyžaduje další výzkum a standardizaci protokolů ²⁵.

4.1 Potenciál elektrostimulace denervovaného svalu

Přestože je svalová elektrostimulace široce využívána, její vliv na samotnou regeneraci axonů zůstává sporný. Cílem této stimulace je zachovat kontraktilní schopnost svalu, zpomalit jeho atrofii a prodloužit časové okno pro reinervaci periferního nervu.

Aplikace NMES na ne zcela denervovaném svalů či na již částečně reinervovaném svalů může dále přispět ke zlepšení svalové síly, zvýšení perfuze a zachování svalového objemu ⁵¹.

V rámci funkční elektrické stimulace (FES) je pak účinek elektrostimulace zesílen tím, že je sval stimulován v průběhu pohybu ⁴³. Zatímco systematické přehledy ukazují, že FES podporuje motorické učení a neuroplasticitu zejména u pacientů s lézemi centrálního nervového systému, u parézy periferních nervů spočívá primární přínos spíše v usnadnění funkčního pohybu a zlepšení pohybových vzorců než v přímé indukci motorického učení ⁵².

4.2 Potenciál invazivní elektrostimulace pro regeneraci periferních nervů

Perioperační elektrostimulace se ukazuje jako účinný nástroj pro podporu regenerace periferních nervů ⁴⁰⁻⁴⁴. Přímá postchirurgická elektrická stimulace má na regeneraci axonů prokazatelně pozitivní vliv, protože krátká stimulace (typicky 20 Hz po dobu 20–60 minut) aplikovaná bezprostředně po sutuře nervu aktivuje intracelulární signální dráhy (např. zvýšení cAMP), které podporují expresi růstových faktorů a zrychlují axonální elongaci. Současně stimuluje SB, čímž vytváří optimální prostředí pro remyelinizaci a reinnervaci cílových svalů ⁴³. Klinické studie ukazují, že tato metoda vede k rychlejší obnově senzitivních i motorických funkcí oproti standardní chirurgické rekonstrukci bez stimulace, a to bez významných nežádoucích účinků. Tento přístup se proto považuje za slibný doplněk neurochirurgických postupů pro zlepšení funkčního výsledku regenerace periferních nervů ^{40,43,44,53,54}.

Na pozitivní vliv elektroakupunktury na regeneraci axonů v kombinaci s rehabilitačními postupy bylo opakovaně poukázáno v experimentálních studiích na animálních modelech ⁵⁵⁻⁵⁷. Elektroakupunktura u pacientů s periferní parézou nervus facialis vedla k lepší prognóze funkčního zotavení ve srovnání s konvenčními metodami ⁵⁸. Mechanismy účinku zahrnují inhibici neuronální apoptózy a redukci periferní zánetlivé odpovědi, což podporuje regeneraci nervových vláken a urychluje obnovu svalové funkce ⁵⁹. Dále bylo zjištěno, že elektroakupunktura stimuluje proliferaci Schwannových buněk, které hrají klíčovou roli v procesu remyelinizace a axonálním růstu ^{60,61}. Regenerační potenciál je zprostředkován zvýšenou expresí neurotrofních faktorů, zejména nervového růstového faktoru (NGF), a dalších molekul, které migrují směrem ke katodě ⁶². Dalším významným mechanismem je příliv Ca^{2+} iontů do proximálního konce přerušeného axonu, což aktivuje signální dráhy podporující růst ⁶³. Umístění katody distálně od místa léze urychluje regeneraci, zatímco její proximální poloha tento proces zpomaluje ⁶³. Elektroakupunktura vykazuje vyšší účinnost než klasická akupunktura, a to nejen z hlediska periferní regenerace, ale i vlivu na reorganizaci somatosenzorické kůry, což naznačuje její schopnost podporovat neuroplasticitu centrálního nervového systému ⁶⁴⁻⁶⁶. Používané parametry elektroakupunktury se pohybují v rozmezí frekvence 5–20 Hz, intenzity 0,2–2 mA, délky jedné aplikace cca 15 minut, s frekvencí 5–6krát týdně po dobu 4 týdnů až 4 měsíců ^{57,62,65,66}.

Naše stávající klinické zkušenosti i dostupná evidence taktéž poukazují na pozitivní vliv elektroakupunktury na urychlení návratu motorické funkce. Tato metoda se jeví jako nejvíce perspektivní pro možnost přímého ovlivnění nervové regenerace. Mezi výhody elektroakupunktury patří miniinvazivita a relativně jednoduchá aplikace erudovaným lékařem. Její miniinvazivní charakter umožňuje bezpečnou a opakovanou ambulantní aplikaci. Za dobu užívání této metody jsme se nesetkali se zásadní komplikací nebo nežádoucími účinky. Je možné ji současně využít i pro elektrostimulaci svalu.

4.3 Limity současných důkazů

Přestože dostupné experimentální a klinické studie naznačují potenciální přínos elektrostimulace v podpoře regenerace periferních nervů, současná úroveň důkazů má několik významných omezení. Většina publikovaných prací hodnotících přímý vliv elektrostimulace na axonální regeneraci byla provedena na

animálných modelech Tyto výsledky nelze bezprostředně přenášet do klinické praxe. Významnou limitací je rovněž značná heterogenita použitých stimulačních parametrů, včetně frekvence, intenzity a délky aplikace, které ztěžují srovnání jednotlivých studií a formulaci jednotných doporučení.

V případě elektroakupunktury je většina dostupných důkazů založena na experimentálních studiích nebo na klinických studiích s omezeným počtem pacientů a rozdílnou metodologií. Přestože výsledky naznačují příznivý vliv na regeneraci periferních nervů a funkční obnovu, stále chybí dostatek kvalitních randomizovaných kontrolovaných studií, které by umožnily jednoznačně stanovit její účinnost a optimální terapeutické protokoly.

5 ZÁVĚR

Současné důkazy naznačují potřebu přehodnocení tradičního pohledu na úlohu elektrostimulace v terapii periferních nervových paréz. Selektivní elektrostimulace denervovaného svalu má hlavní význam v udržení svalové aktivity, prevenci atrofie a prodloužení časového okna pro reinervaci, nikoli však v přímé podpoře axonální regenerace.

Invazivní elektrostimulace se jeví jako slibný doplněk chirurgické rekonstrukce nervu, protože klinické studie potvrzují rychlejší obnovu motorických i senzitivních funkcí při minimálním riziku nežádoucích účinků. Elektroakupunktura představuje další perspektivní metodu, která kombinuje neuromodulační účinky s možností ambulantní aplikace. Studie ukazují, že nejen urychluje návrat motorické funkce, ale také podporuje neuroplasticitu centrálního nervového systému. Obě metody – perioperační invazivní stimulace a elektroakupunktura – se tak jeví jako nejvíce perspektivní přístupy pro cílené ovlivnění regenerace periferních nervů, a to buď přímo v rámci chirurgického zákroku, nebo v průběhu následné rehabilitace. Další výzkum by měl směřovat k optimalizaci parametrů stimulace a k ověření dlouhodobých funkčních výsledků, zejména v kontextu klinické praxe.

Zusammenfassung

Die Einleitung: die periphere Nervenparese sind eine Folge von Axonschädigungen, die zu Muskelschwäche, Atrophie und letztlich funktioneller Behinderung führen. Nervenregeneration ist ein langsamer Prozess, der durch Alter, Lokalisation und Art der Läsion beeinflusst wird. Das Ziel dieses Übersichtsartikels ist es, die aktuellen Möglichkeiten der Anwendung von Elektrostimulation bei der Behandlung der peripheren Nervenparese zu analysieren, mit Fokus auf ihr Potenzial zur axonalen Regeneration.

Die Methoden: der Artikel basiert auf einer narrativen Literaturübersicht (PubMed, Scopus, Web of Science) von 2000–2025. Experimentelle Studien mit Tiermodellen, klinische Studien und Übersichtsarbeiten, die die Wirkung verschiedener Arten von Elektrostimulation auf die Regeneration peripherer Nerven bewerten, wurden eingeschlossen.

Die Diskussion: die gegenwärtige Elektrostimulation ist besonders wichtig zur Verhinderung von Muskelatrophie und zur Aufrechterhaltung der Muskelkontraktilität, nicht zur direkten Unterstützung der axonalen Regeneration. Andererseits aktiviert invasive Elektrostimulation, die perioperativ direkt auf den Nerv angewendet wird, die intrazellulären Signalwege, erhöht die Expression neurotropher Faktoren und beschleunigt die axonale Regeneration. Die Elektroakupunktur als minimalinvasive Methode kombiniert neuromodulatorische Effekte mit der Möglichkeit ambulanter Anwendung; Studien hauptsächlich an Tiermodellen bestätigen ihre Wirkung auf die Schwann-Zellen, die Hemmung der Apoptose und die Förderung der Neuroplastizität.

Die Schlussfolgerung: invasive Elektrostimulation und Elektroakupunktur scheinen ein vielversprechender Ansatz zur gezielten Beeinflussung der peripheren Nervenregeneration zu sein. Weitere Forschung sollte darauf ausgerichtet werden, die Stimulationsparameter zu optimieren und langfristige klinische Ergebnisse zu überprüfen, insbesondere im Kontext der routinemäßigen Praxis.

Die Schlüsselwörter: Elektrostimulation, Elektroakupunktur, periphere Nervenverletzungen, Nervenregeneration, Schwann-Zellen, neurotrophe Faktoren.

REFERENCE

- 1 **Lopes B et al.** (2022). "Peripheral Nerve Injury Treatments and Advances: One Health Perspective". *Int J Mol Sci.* 23(2):918. doi: 10.3390/ijms23020918.
- 2 **Bugalová, M.** (2023). "Lézie periférnych nervov na hornej končatine". *Rehabilitácia.* 60(3), 208–215. doi: 10.61983/lcrh.v60i3.7.
- 3 **Faroni A et al.** (2015) "Peripheral nerve regeneration: experimental strategies and future perspectives". *Adv Drug Deliv Rev.* 82-83:160–167. doi: 10.1016/j.addr.2014.11.010.
- 4 **Lundborg G.** (2000) "A 25-year perspective of peripheral nerve surgery: evolving neuroscientific concepts and clinical significance". *J Hand Surg Am.* 25:391–414. doi: 10.1053/jhsu.2000.4165.
- 5 **Mucha C.** (2002) "Elektroterapeutické postupy v rehabilitačnej liečbe peroneálnej parézy". *Rehabilitácia*, Vol 35, No.2.

- 6 **Gordon T et al.** (1993). "Recovery potential of muscle after partial denervation: a comparison between rats and humans". *Brain Res. Bull.* 30: 477–482. doi: 10.1016/0361-9230(93)90281-f.
- 7 **Thomas CK et al.** (1987). "Patterns of reinnervation and motor unit recruitment in human hand muscles after complete ulnar and median nerve section and resuture". *J Neurol Neurosurg Psychiatry.* 50: 259–268. doi: 10.1136/jnnp.50.3.259.
- 8 **Chu XL et al.** (2022). "Basic mechanisms of peripheral nerve injury and treatment via electrical stimulation". *Neural Regen Res.* 17(10):2185–2193. doi: 10.4103/1673-5374.335823.
- 9 **Dahlin LB.** (2004). "The biology of nerve injury and repair". *J Am Soc Surg Hand.* 4:143–155. doi: 10.1016/j.jassh.2004.06.006.
- 10 **Henderson CE et al.** (1994). "GDNF: a potent survival factor for motoneurons present in peripheral nerve and muscle". *Science.* 11;266(5187):1062–4. doi: 10.1126/science.7973664.
- 11 **Aloe L et al.** (2015). "Nerve Growth Factor: A Focus on Neuroscience and Therapy". *Curr Neuropharmacol.* 13: 294–303. doi: 10.2174/1570159x13666150403231920.
- 12 **Yu H et al.** (2014). "Local delivery of controlled released nerve growth factor promotes sciatic nerve regeneration after crush injury". *Neurosci Lett.* 566:177–181. doi: 10.1016/j.neulet.2014.02.065.
- 13 **Waller A.** (1850). "Experiments on the section of the glossopharyngeal and hypoglossal nerves of the frog, and observations of the alterations produced thereby in the structure of their primitive fibres". *Trans. R. Soc. Lond.* 140: 423–429. doi: 10.1098/rstl.1850.0021.
- 14 **Avellino AM et al.** (1995). "Differential macrophage responses in the peripheral and central nervous system during Wallerian degeneration of axons". *Exp. Neurol.* 136: 183–198. doi: 10.1006/exnr.1995.1095.
- 15 **Hirata K, Kawabuchi M.** (2002). "Myelin phagocytosis by macrophages and nonmacrophages during Wallerian degeneration". *Microsc. Res. Tech.* 57: 541–547. doi: 10.1002/jemt.10108.
- 16 **Sunderland S.** (1951). "A classification of peripheral nerve injuries producing loss of function". *Brain.* 74:491–516. doi: 10.1093/brain/74.4.491.
- 17 **Midha R, Grochmal J.** (2019). "Surgery for nerve injury: current and future perspectives". *J Neurosurg.* 130:675–685. doi: 10.3171/2018.11.JNS181520.
- 18 **De Ruiter et al.** (2008). "Misdirection of regenerating motor axons after nerve injury and repair in the rat sciatic nerve model". *Exp. Neurol.* 211, 339–350. doi: 10.1016/j.expneurol.2007.12.023.
- 19 **Al-Majed AA et al.** (2000). "Brief electrical stimulation promotes the speed and accuracy of motor axonal regeneration". *J Neurosci.* 20(7): 2602–2608. doi: 10.1523/JNEUROSCI.20-07-02602.2000.
- 20 **Gutmann E et al.** (1942). "The rate of regeneration of nerve". *J Exp Biol.* 19 (1): 14–44. doi: 10.1093/oxfordjournals.bmb.a070228.
- 21 **Sunderland S.** (1978). "Nerve Injuries". London: Churchill Livingstone. ISBN: 0443016534, 9780443016530.
- 22 **Kline DG, Hudson AR.** (1995). "Nerve injuries: operative results for entrapments and tumors". Philadelphia: Saunders. Doi: 10.1302/0301-620X.78B3.0780513.
- 23 **Doster SK et al.** (1991). "Expression of the growth-associated protein GAP-43 in adult rat retinal ganglion cells following axon injury". *Neuron.* 6: 635–647. doi: 10.1016/0896-6273(91)90066-9.
- 24 **Raivich G, Makwana M.** (2007). "The making of successful axonal regeneration: genes, molecules and signal transduction pathways". *Brain Res Rev.* 53:287–311. doi: 10.1016/j.brainresrev.2006.09.005 .
- 25 **Gordon T, Borschel GH.** (2017). "The use of the rat as a model for studying peripheral nerve regeneration and sprouting after complete and partial nerve injuries". *Exp Neurol.* 287:331–347. Doi: 10.1016/j.expneurol.2016.01.014.
- 26 **McGregor CE, English AW.** (2018). "The role of BDNF in peripheral nerve regeneration: activity-dependent treatments and Val66Met". *Front Cell Neurosci.* 12:522. doi 10.3389/fncel.2018.00522.
- 27 **Ronchi G et al.** (2017). "Irreversible changes occurring in long-term denervated Schwann cells affect delayed nerve repair". *J Neurosurg.* 127:843–856. doi: 10.3171/2016.9.JNS16140.
- 28 **Reinhold AK, Rittner HL.** (2017). "Barrier function in the peripheral and central nervous system-a review". *Pflugers Arch.* 469:123–134. doi: 10.1007/s00424-016-1920-8.

- 29 **Yi S et al.** (2017). "Microarray and qPCR analyses of wallerian degeneration in rat sciatic nerves". *Front Cell Neurosci.* 11:22. doi:10.3389/fncel.2017.00022.
- 30 **Krarup C et al.** (2017). "Sensation, mechanoreceptor, and nerve fiber function after nerve regeneration". *Ann Neurol.* 82:940–950. doi: **10.1002/ana.25102**.
- 31 **Jendrichovský J, Jendrichovský M.** (2025). "Funkčné východiská diferenciácie podielu mechanosenzitivity neurálnych štruktúr na klinickom obraze radikulárnej a periférnej neuropatickej bolesti". *Rehabilitácia.* 62(2):86–93. doi: <https://doi.org/10.61983/lcrh.v62i2.100>
- 32 **Kolářová B et al.** (2019). "Počítačové a robotické technológie v klinickej rehabilitácii: možnosti vyšetrení a terapie (2., prepracované a doplnené vydání)". *Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci.* ISBN 978-80-244-5403-0.
- 33 **Pomeranz B, Campbell JJ.** (1993). "Weak electric current accelerates motoneuron regeneration in the sciatic nerve of ten-month-old rats". *Brain Research.* 603: 271–278. doi:10.1016/0006-8993(93)91247-P.
- 34 **Gordon T, English AW.** (2016). "Strategies to promote peripheral nerve regeneration: electrical stimulation and/or exercise". *Eur J Neurosci.* 43(3):336-50. doi: 10.1111/ejn.13005.
- 35 **Pieber K et al.** (2015). "Optimizing stimulation parameters in functional electrical stimulation of denervated muscles: a cross-sectional study". *J Neuroeng Rehabil.* 7:12:51. doi: 10.1186/s12984-015-0046-0.
- 36 **Robinson AJ.** (2008). „Physiology of muscle and nerve. In: Robinson AJ, Snyder-Mackler L, editors. Clinical electrophysiology: electrotherapy and electrophysiologic testing“. *Baltimore: Lippincott Williams & Wilkins.* pp. 71–105. ISBN: 9780781744843.
- 37 **Low J, Reed A.** (2000). "Electrical stimulation of nerve and muscle". *Low J, Reed A, editors. Electrotherapy explained: principles and practice. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann.* pp. 53–140.
- 38 **Cummings JP.** (1985). "Conservative management of peripheral nerve injuries utilizing selective electrical stimulation of denervated muscle with exponentially progressive current forms". *J Orthop Sports Phys Ther.* 7(1):11–15. doi: 10.2519/jospt.1985.7.1.11.
- 39 **Vítek J, Kolářová B.** (2026). "Bezprostřední biomechanické a fyziologické změny v kontextu okamžitého účinku peroneální funkční elektrostimulace: pilotní studie". *Rehabilitácia.* 63(1), 13–22. doi: 10.61983/lcrh.v63i1.144.
- 40 **Ni L et al.** (2023). "Electrical stimulation therapy for peripheral nerve injury". *Front Neurol.* 24;14:1081458. doi: 10.3389/fneur.2023.1081458.
- 41 **Huang J et al.** (2013). "Electrical stimulation accelerates nerve regeneration and functional recovery in delayed peripheral nerve injury in rats". *Eur J Neurosci.* 38: 3691–3701. doi: 10.1111/ejn.12370.
- 42 **Power HA et al.** (2020). "Postsurgical electrical stimulation enhances recovery following surgery for severe cubital tunnel syndrome: a double-blind randomized controlled trial". *Neurosurgery.* 86:769–777. doi: 10.1093/neuros/nyz322.
- 43 **Wong JN et al.** (2015). "Electrical stimulation enhances sensory recovery: a randomized controlled trial". *Ann Neurol.* 77:996–1006. doi: 10.1002/ana.24397.
- 44 **Juckett L et al.** (2022). "The Effect of Electrical Stimulation on Nerve Regeneration Following Peripheral Nerve Injury". *Biomolecules.* 12;12(12):1856. doi: 10.3390/biom12121856.
- 45 **Coroneos Ch et al.** (2025). "Clinical evaluation of a novel disposable neurostimulator used to accelerate regeneration of injured peripheral nerves in the hand". *Bioelectron Med.* 25;11(1):9. doi: 10.1186/s42234-025-00171-y.
- 46 **Zhang R et al.** (2014). "Mechanisms of acupuncture–electroacupuncture on persistent pain". *Anesthesiology.* 120(2):482-503. doi: 10.1097/ALN.000000000000101.
- 47 **Focks C.** (2008). "Atlas of acupuncture". *Churchill: Livingstone.* ISBN 978-0-443-10028-4.
- 48 **Kubiak CA et al.** (2020). "Stem-cell-based therapies to enhance peripheral nerve regeneration". *Muscle Nerve.* 61:449–459. doi:10.1002/mus.26760.
- 49 **Ehmedah A et al.** (2019). "Vitamin B complex treatment attenuates local inflammation after peripheral nerve injury". *Molecules.* 24:4615. doi: 10.3390/molecules24244615.
- 50 **Karagyaour M et al.** (2020). "A bicistronic plasmid encoding brain-derived neurotrophic factor and urokinase plasminogen activator stimulates peripheral nerve regeneration after injury". *J Pharmacol Exp Ther.* 372:248–255. doi:10.1124/jpet.119.261594.

- 51 **Sawangjit R et al.** (2020). “Efficacy and safety of mecobalamin on peripheral neuropathy: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials”. *J Altern Complement Med.* 26:1117–1129. doi: 10.1089/acm.2020.0068.
- 52 **Ackermann P et al.** (2024). “Unlocking the potential of neuromuscular electrical stimulation: achieving physical activity benefits for all abilities”. *Front Sports Act Living.* 29:6:1507402. doi: 10.3389/fspor.2024.1507402.
- 53 **Schick, T.** (2022). “Evidence on Functional Electrical Stimulation”. *Schick, T. (eds) Functional Electrical Stimulation in Neurorehabilitation.* Springer. doi: 10.1007/978-3-030-90123-3_17.
- 54 **Geremia NM et al.** (2007). “Electrical stimulation promotes sensory neuron regeneration and growth-associated gene expression”. *Exp Neurol.* 205: 347–359. doi: 10.1016/j.expneurol.2007.01.040.
- 55 **Tang YJ et al.** (2016). “Direct electrical stimulation on the injured ulnar nerve using acupuncture needles combined with rehabilitation accelerates nerve regeneration and functional recovery - A case report”. *Complement Ther Med.* 24: 103–107. doi: 10.1016/j.ctim.2015.12.003.
- 56 **Hoang GS et al.** (2012). “Electro-acupuncture on functional peripheral nerve regeneration in mice: a behavioural study”. *BMC Complement Altern Med.* 12:141. Doi: 10.1186/1472-6882-12-141.
- 57 **Zhang CH et al.** (2019). “Diffusional plasticity induced by electroacupuncture intervention in rat model of peripheral nerve injury”. *J Clin Neurosci.* 69: 250–256. Doi: 10.1016/j.jocn.2019.08.088.
- 58 **Wang WH et al.** (2020). “Electroacupuncture Is Effective for Peripheral Facial Paralysis: A Meta-Analysis. *Evid Based Complement Alternat Med.* 31:5419407. doi: 10.1155/2020/5419407.
- 59 **Fei J et al.** (2019). “Electroacupuncture promotes peripheral nerve regeneration after facial nerve crush injury and upregulates the expression of glial cell-derived neurotrophic factor”. *Neural Regen Res.* 14(4): 673–682. doi: 10.4103/1673-5374.247471.
- 60 **Li QW.** (2007). “Effect of electro-acupuncture on s-100 protein expression of nerve fibers in the repair process of transected sciatic nerve in rats”. *J. Acupunct. Tuina. Sci.* 5:10–13. doi: 10.1007/s11726-007-0010-z.
- 61 **Hu LN et al.** (2018). “Electroacupuncture and moxibustion promote regeneration of injured sciatic nerve through Schwann cell proliferation and nerve growth factor secretion”. *Neural Regen Res.* 13(3):477–483. doi:10.4103/1673-5374.228731
- 62 **Zhang M et al.** (2018). “Effect of long-term electroacupuncture stimulation on recovery of sensorimotor function after peripheral nerve anastomosis”. *Acupunct Med.* 36:170–175. doi: 10.1136/acupmed-2017-011367.
- 63 **Inoue M et al.** (2003). “The Effects of Electroacupuncture on Peripheral Nerve Regeneration in Rats”. *Acupunct Med.* 21(1-2):9–17. doi: 10.1136/aim.21.1-2.9.
- 64 **Napadow V et al.** (2005). “Effects of electroacupuncture versus manual acupuncture on the human brain as measured by fMRI”. *Hum Brain Mapp.* 24: 193–205. doi: 10.1002/hbm.20081.
- 65 **Wu JJ et al.** (2018). “A Longitudinal Mapping Study on Cortical Plasticity of Peripheral Nerve Injury Treated by Direct Anastomosis and Electroacupuncture in Rats”. *World Neurosurg.* e267–e282. doi: 10.1016/j.wneu.2018.02.173.
- 66 **Wu JJ et al.** (2018). “Cortical remodeling after electroacupuncture therapy in peripheral nerve repairing model”. *Brain Res.* 1690:61–73. doi: 10.1016/j.brainres.2018.04.009.



AQUATIZER QZ - 240

Suchá hydromasáž



líder v oblasti inovatívnych
konštrukčných riešení
lôžok na suchú hydromasáž

INCO2

Dávkač plynu
CO₂



Karboxyterapia
- inovatívna
metóda
v medicíne
21. storočia



AQUADELÍCIA



Celotelové anatomicky
tvarované vane pre vírivú,
perličkovú a podvodnú masáž

MEDEXIM

AQUAPEDIS II



Unikátna kombinovaná
vaňa pre vírivú
a perličkovú masáž
horných i dolných
končatín
(vhodná na podávanie
bahenných
a minerálnych
procedúr)

AQUADELÍCIA MINI



Najpredávanejšie
kompaktné
celotelové vane

AQUAPEDIS I



Najpredávanejší model sedacej
vírivky - jediná sedacia vírivka
s tryskami na chodidlá



AQUAPEDIS II galvanic

končatinový galvanický kúpeľ
efektívna sumácia účinku
elektrického prúdu
a hydrostatického efektu vody



MEDEXIM spol. s r.o.

Hlboká 58, 921 01 Piešťany, Slovakia
tel.: +421 33 7724035, 7724687, 7724259
fax: +421 33 7725189
e-mail: medexim@medexim.sk
www.medexim.sk

Nestabilné podložky - stabilné zdravie

PC vankúš kostrčový
K 30 925



PC vankúš
K 30 924

Úsečový vankúš detský
K 30 926 (37 x 27 cm)



Úsečový vankúš
K 30 926 (46 x 37 cm)

PROkinēsis s.r.o.
výroba a predaj rehabilitačných pomôcok
Čsl. parašutistov 11, 931 03 Bratislava
0908 710 536, 0907 726 329

Zdravotnícke pomôcky schválené ŠUKL,
zaradené do vestníka MZSR,
hradené všetkými zdravotnými poisťovňami

www.prokinesis.sk

REHABILITÁCIA, vedecko-odborný, recenzovaný časopis pre otázky liečebnej, pracovnej, psychosociálnej a výchovnej rehabilitácie. Vydáva Vydavateľstvo LIEČREH, s. r. o. Zodpovedný redaktor: Anton Gúth. Kontaktná adresa redakcie a distribúcie: LIEČREH, s. r. o. Na barine 16, 841 03 Bratislava, IČO 366 756 61, tel. 00421/2/902 612 501, e-mail: rehabilitacia@rehabilitacia.sk. Časopis neprechádza jazykovou úpravou. Sadzba, korektúra a technická spolupráca: Liečreh, s. r. o. Tlačiareň: Faber, Bratislava. Vychádza 4-krát ročne v posledný deň štvrtroka (31. 3., 30. 6., 30. 9. a 31. 12.) jeden zošit stojí 8 eur vrátane DPH alebo 196 Kč vrátane DPH (pre Česko) – platné pre rok 2024. Objednávky na predplatné (aj do zahraničia) a inzertnú plochu prijíma redakcia na kontaktnej adrese alebo na adrese rehabilitacia@rehabilitacia.sk. Pri platbách poštovou poukážkou akceptujeme len prevody smerované zo Slovenska na náš účet č. SK92 7500 0000 0040 0815 1880 v ČSOB Bratislava alebo smerované z Česka na náš účet 212130130/0300 v ČSOB Břeclav. Časopis je indexovaný v SCOPUS-e. Internetová stránka: <https://casopis.rehabilitacia.sk>. Dodané články prechádzajú recenzným konaním, po ktorom môžu byť autorovi vrátené. Nevyžiadané rukopisy nevraciam. Za obsah reklám a príspevkov zodpovedá autor. Podávanie „Tlačovín“ v SR povolené Riaditeľstvom pošt Bratislava č. j. 4/96 zo dňa 30. 8. 1996, v ČR na základe dohody o podávaní poštových zásielok „Obchodní psaní“ č. 982607/2010. Indexové číslo: 49 561. Reg. č. MK: EV 2945/09. ISSN 0375-0922



BOLEST' CHRBTICE?

Endoskopická operácia chrbtice

- Miniinvazívny prístup
- Priama dekompresia nervových štruktúr:
cieľ priame odstránenie hernie disku.
- Rýchle zotavenie a rekonvalescencia,
pacienta je možné
do 24 hodín prepustiť
- Využitie aj pri obéznych pacientoch



MUDr. Ihsan AL Khouri, PhD.



📍 Cesta k nemocnici 1, Banská Bystrica ☎️ +421 48 415 36 13 🌐 www.shamsclinic.sk