



Habilitační práce

# **Rehabilitace pacientů s poruchami vestibulárního systému a mozečku**

PhDr. Ondřej Čákr, Ph.D.

Klinika rehabilitace a tělovýchovného lékařství 2. LF UK a FN Motol

Praha 2017

Velice děkuji prof. PaedDr. Pavlu Kolářovi, Ph.D., který mne seznámil s oborem rehabilitace a byl mým učitelem v období pregraduálního i postgraduálního studia. Velké poděkování patří doc. MUDr. Jaroslavu Jeřábkovi, CSc., který mne uvedl do problematiky neurootologie a vestibulární rehabilitace a byl mým rádcem v klinické i experimentální práci. Další díky patří mým nejbližším spolupracovníkům z Kliniky rehabilitace a tělovýchovného lékařství 2. LF UK a FN Motol. Děkuji MUDr. Kryštofovi Slabému a Ing. Tomášovi Fundovi za pomoc s analýzou dat. Děkuji také kolegům z Neurologické kliniky 2. LF UK a FN Motol a Kliniky ORL a chirurgie hlavy a krku 1. LF UK a FN Motol.

Tato práce by nevznikla bez podpory mé rodiny, která mne v práci podporovala a poskytla mi pevné rodinné zázemí.

## OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD.....</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>PŘEHLED PROBLEMATIKY .....</b>	<b>6</b>
2.1	Řízení posturální stability .....	6
2.2	Percepce vertikality .....	7
2.3	Anatomické a fyziologické poznámky .....	8
2.4	Vestibulární syndromy .....	13
2.5	Vestibulární schwannom .....	14
2.6	Poruchy rovnováhy při periferní vestibulární poruše .....	15
2.7	Degenerativní postižení mozečku .....	16
2.8	Poruchy rovnováhy při postižení mozečku .....	16
2.9	Vestibulární rehabilitace .....	17
2.10	Biofeedback v rehabilitaci poruch stability .....	20
2.11	Vestibulární prehabituace .....	22
<b>3</b>	<b>CÍLE.....</b>	<b>23</b>
<b>4</b>	<b>PŘEHLED METODIKY .....</b>	<b>24</b>
4.1	Soubory pacientů .....	24
4.2	Rehabilitační programy .....	25
4.3	Posturografické vyšetření a inerciální měřicí senzory .....	26
4.4	Vyšetření subjektivní vizuální a haptické vertikály .....	27
<b>5</b>	<b>SOUHRN VÝSLEDKŮ .....</b>	<b>28</b>
5.1	Práce hodnotící účinnost rehabilitace .....	28
5.2	Práce hodnotící poruchy percepce vertikály .....	30
5.3	Práce zabývající se využitím posturografie a inerciálních měřících senzorů .....	31
<b>6</b>	<b>DISKUZE .....</b>	<b>32</b>
6.1	Práce hodnotící účinnost rehabilitace .....	32
6.2	Práce hodnotící poruchy percepce vertikály .....	34
6.3	Práce zabývající se využitím posturografie a inerciálních měřících senzorů .....	36
<b>7</b>	<b>ZÁVĚRY.....</b>	<b>37</b>
	<b>LITERATURA.....</b>	<b>38</b>
	<b>SOUBOR PUBLIKACÍ AUTORA SE VZTAHEM K HABILITAČNÍ PRÁCI.....</b>	<b>47</b>

## 1 ÚVOD

Vnímání polohy a pohybu těla v prostoru zajišťuje multisenzoricky uspořádaný systém přijímající aferenci z vestibulárních labyrintů, receptorů somatosenzorického systému a zraku. Velmi důležitý význam pro lidskou motoriku mají labyrinty vnitřního ucha. Informace z receptorů v polokruhových kanálcích a makulách otolitového systému využíváme k udržování posturální stability, zajištění stabilního vizuálního obrazu při pohybech hlavou a k přesnému vnímání vektoru gravitační síly.

Poruchy tohoto systému mají za následek nejen narušení posturální stability a různé formy závratí, ale také ztrátu přesného vnímání prostoru a orientace v něm. Uvedené symptomy jsou zodpovědné za prokazatelné snížení kvality života nemocných a mohou vést k zvýšenému riziku pádů (1). Tato skutečnost s sebou nese zásadní zdravotní, psychosociální a socioekonomické důsledky, jejichž řešení vede k zvýšení objemu financí vynaložených na léčbu pacientů (2).

Prevalence onemocnění vestibulárního systému je v populaci poměrně vysoká. Epidemiologická studie která analyzovala výskyt těchto poruch v americké populaci (National Health and Nutrition Examination 2001 – 2004), odhalila poruchu stability až u 35% dospělých ve věku nad 40 let (n=5086) (3). Studie zaměřená na výskyt vestibulární závratí v Německu zjistila celoživotní prevalenci u 7.4% dotázaných s jednoroční prevalencí okolo 4.9% (n=4869) (4).

Pacienti s onemocněním vestibulárního systému jsou nejčastěji léčeni farmakologicky. Je důležité si uvědomit, že jednu z nejdůležitějších součástí péče o tyto pacienty musí představovat cílená rehabilitace. Toto tvrzení podporují jak zkušenosti z klinické praxe, tak výsledky studií, které se účinností rehabilitace u pacientů s poruchami vestibulárního labyrintu a mozečku zabývaly (5, 6).

Jestliže uvážíme, že v České republice může být podobná prevalence vestibulárních poruch jako v Německu či USA, je problematice rehabilitace pacientů s vestibulárními poruchami věnována malá pozornost.

Habilitační práce je zpracována formou komentovaného souboru vědeckých prací autora a předkládá deset vědeckých publikací, které jsou uvedeny in extenso. V první části jsou uvedeny čtyři studie věnující se problematice rehabilitace pacientů s poruchami vestibulární funkce a mozečku. Druhá část práce prezentuje dvě studie, které se zabývají poruchami vnímání subjektivní vertikály. Hodnotili jsme percepci subjektivní zrakové a haptické vertikály u zdravých seniorů a pacientů s definovanou posturální deformitou – idiopatickou skoliózou. Ve třetí části práce jsou sumarizovány možnosti kvantitativního



hodnocení posturálních výchylek pomocí posturografického vyšetření a inerciálních měřících senzorů. Tyto senzory jsme použili také pro hodnocení inter-individuální variability při provádění Sémontova repositionního manévru užívaného při léčbě benigního paroxysmálního polohového vertiga. Tato část práce je tvořena čtyřmi studiemi.

## 2 PŘEHLED PROBLEMATIKY

### 2.1 Řízení posturální stability

Na percepci polohy těla a následném zajištění stability stoje a chůze se podílí několik aferentních systémů. Hlavními jsou vestibulární, somatosenzorický a vizuální systém. Jednotlivé senzorní systémy zprostředkovávají specifickou informaci o poloze těla v prostoru a jeho pohybu a jsou využívány pro zajištění automatických posturálních a okulomotorických reakcí. Informace z receptorů senzorních systémů jsou zpracovány na mnoha úrovních CNS od mozkového kmene až po mozkovou kůru. Přestože se zdá být tento systém co do objemu informací redundantní, je nutné si uvědomit, že samotný jeden aferentní systém není schopen poskytnout dostatečnou informaci nutnou k správnému určení pozice těla a jeho pohybu v prostoru.

Informace ze zraku využíváme zejména k tomu, abychom se orientovali v prostoru. Zrakový vjem slouží k vyhodnocení, zda se pohybuje naše tělo nebo okolí. Existují hypotézy, že vizuální informaci (pohyb obrázku po retině) využíváme k detekci posturálních výchylek těla. Novější studie Jahna a spol. však ukazuje, že pro regulaci posturálních výchylek je důležitější eferentní kopie okulomotorických reakcí oka (7). Posturální stabilizace pomocí zraku je závislá především na činnosti zrakových center CNS a je ovlivněna vzdáleností oka od fixovaného předmětu (8, 9).

Somatosenzorický systém zprostředkovává informaci o pozici těla a jeho pohybu ve vztahu k opěrné bázi. Receptory somatosenzorického systému jsou zodpovědné za registraci pohybu jednotlivých tělesných segmentů navzájem a ovlivňují naše posturální reakce. Receptory na plantární straně chodidla zprostředkovávají informace o změně tlaku, receptory v kloubním pouzdře informují o pozici kloubu, ale také o úhlové rychlosti pohybu v kloubu. Doposud byl zkoumán zejména vliv narušení stability stoje pomocí translačního pohybu podložky pod vyšetřovanou osobou (10, 11).

Informace z vestibulárního systému jsou důležité jednak k rozpoznání polohy hlavy vzhledem ke směru působení vektoru gravitace, ale také k detekci jejích pohybů. Vestibulární systém registruje i velmi malé pohyby hlavy, které jsou přítomny při fyziologických posturálních výchylkách během stoje a lokomoce. Je nutné si uvědomit, že vestibulární systém je specifický tím, že polokruhové kanálky jsou velmi citlivé k pohybům o vysoké frekvenci. Motorická odpověď při stimulaci labyrintu je zprostředkována pomocí vestibulospinální dráhy. Cílená galvanická stimulace vestibulárního nervu způsobí u člověka iluzi pohybu a zvýší aktivitu ve svalech trupu a dolních končetin (12). Přímá stimulace

vestibulárního systému pohybem hlavy způsobí podobnou posturální odpověď jako při posunu podložky. Amplituda odpovědi, která je získána selektivní galvanickou stimulací labyrintu dosahuje pouze jedné třetiny amplitudy oproti stimulaci při posunu podložky pod vyšetřovanou osobou. Z těchto poznatků vyplývá, že vestibulární systém je zodpovědný za posturální reakci, ale jeho primární úlohou je zajištění stabilizace hlavy v prostoru (13).

## 2.2 Percepce vertikality

Vnímání vektoru gravitační síly je u člověka velmi přesné. Toto umožňuje bezchybná multisenzorická aferentace z oblastí labyrintu, vizuálního systému a somatosenzorického systému. V klinické praxi se často využívá vyšetření subjektivní zrakové vertikály k objektivizaci funkce labyrintu (14).

Na percepci subjektivní vizuální vertikály (SVV) se podílejí zejména informace vestibulárního systému. Autoři Brandt a Dieterich uvádějí, že odchylka SVV je vůbec necitlivějším znakem tonické funkce labyrintu. Za narušení percepce SVV jsou nejčastěji zodpovědné poruchy otolitového systému a to jak jeho periferní, tak centrální části (15).

Centrální část je tvořena tzv. gravicepční dráhou, která se kříží po výstupu z vestibulárních jader na úrovni dolního pontu. Otolitová aferentace se zakončuje v ipsilaterálním horním a mediálním vestibulárním jádře. Odtud vedou spoje cestou fasciculus longitudinalis medialis ke kontralaterálním jádrům mesencefalického tegmenta (nucleus interstitialis Cajal a rostrální intermediální jádro fasciculus longitudinalis medialis) a dále přes posterolaterální jádra thalamu do zadního inzulárního a přilehlého parietálního kortexu (16).

Subjektivní vizuální vertikálu měříme jako odchylku od fyzikální vertikály ve stupních. Subjektivní vizuální vertikála představuje stupeň odchylky interní reprezentace prostoru od skutečné vertikály, tedy chybu souřadnicové soustavy, kterou mozek považuje za správnou a v jejímž rámci jsou kalkulovány všechny kompenzační reakce CNS – posturální, okulomotorické, percepční.

Zdravý člověk určí vertikální linii v opticky izotropním prostředí s vysokou přesností  $\pm 2^\circ$ . SVV je možné změřit různými způsoby, nejjednodušší je měření náklonu fosforeskující tyče ve tmě, po předchozí aktivaci linie nasvícením se místnost zatemní a vyšetřující pomalu otáčí tyčí, až se vyšetřovanému zdá být poloha tyče vertikální. Výsledek se odečítá na goniometru. Existují různé modifikace testu, mnohé z nich nevyžadují zatemnění. Např. „The Bucket Method“ vypracovaná autory z neurologické kliniky Ludwig-Maximilians-University v Mnichově. Zařízení se skládá z neprůhledného válce, na jehož dně je uvnitř vyznačena kontrastní přímka protínající střed. Na zevní straně dna je umístěno měřící zařízení, které tvoří

úhломěr a závaží zavěšené na niti. Nit se závažím vychází ze středu dna válce a reprezentuje směr zemské fyzikální vertikály. Úhломěr je umístěn tak, že  $90^\circ$  odpovídá přímce, která je uvnitř. Při otáčení válce úhломěr ukazuje vychýlení SVV (17).

Autoři metody ověřili její přesnost porovnáním se standardním vyšetřením SVV pomocí „Hemispheric Dome Method“, která je běžně používaná k vyšetřování SVV. Autoři porovnali data získaná z obou metod u pacientů i kontrolní skupiny. Na základě získaných výsledků ji doporučili jako spolehlivou, nenákladnou a časově nenáročnou metodu k měření SVV (17).

Vyšetřovat můžeme také subjektivní haptickou vertikálu (SHV) a subjektivní posturální vertikálu (SPV). Subjektivní haptická vertikála je schopnost orientovat předmět vertikálně pomocí horní končetiny s vyloučením zraku. Subjektivní propioceptivní vertikála je schopnost orientovat celé tělo bez využití zrakové informace do vertikální polohy. Experimenty na zdravých osobách ukazují, že schopnost určit SHV a SPV je také velmi přesná. Normální hodnoty jsou  $\pm 2^\circ$  pro vertikálu propioceptivní a  $\pm 4^\circ$  pro vertikálu haptickou (18, 19). Přesnost určení SHV a SPV vyžaduje bezchybnou funkci somatosenzorického systému (20, 21).

## **2.3 Anatomické a fyziologické poznámky**

### **Vestibulární labyrint**

Labyrint vnitřního ucha tvoří pět receptorových orgánů, které přenášejí signály cestou vestibulární části osmého hlavového nervu do vestibulárních jader umístěných v mozkovém kmeni. Z evolučního hlediska jde o velmi starý systém, který se výrazně zdokonalil s nástupem kostnatých ryb před několika stovkami milionů let (22). Periferní část vestibulárního systému je u člověka umístěna v pyramidě kosti skalní ve vnitřním uchu. Skládá se z kostěného labyrintu, který má část vestibulární a sluchovou. Kostěný labyrint je tvořen třemi polokruhovými kanálky, vestibulem a kochleou. Tato část labyrintu je vyplněna perilymfou, která má složení podobné mozkomíšnímu moku, se kterým komunikuje cestou kochleárního akveduktu. Uvnitř kostěného labyrintu se nachází membranozní labyrint, který tvoří tři polokruhové kanálky a dva otolitové orgány – utrikulus a sakulus. Průřez polokruhového kanálku se rozšiřuje v místě zvaném ampula. Membranozní labyrint je vyplněn endolymfou, která je složením podobná intracelulární tekutině (16).

Senzorické buňky jsou lokalizovány jednak v ampulách polokruhových kanálků a také v otolitových makulách. V ampule se nachází crista ampularis na jejímž povrchu jsou vláskové buňky. Otolitový systém má vláskové buňky uložené na mediální stěně sakulu a

spodně utrikulu. Každá vlásková buňka je inervována aferentním neuronem, jehož tělo je uloženo ve vestibulárním (Scarpově) gangliu, které se nachází v blízkosti ampuly. V oblasti crista ampularis se nachází pohyblivá diafragmatická membrána – kupula, která odděluje polokruhový kanálek od vestibula. Pohybem kupuly jsou drážděny vláskové buňky (16, 23).

Otolitová membrána má složení podobné kupule, na jejím povrchu se nacházejí drobné vápenaté krystaly nazývané otokonie. Specifická hmotnost otokoní patří k nejvyšším z tkání lidského těla a z tohoto důvodu jsou otolitové makuly velmi citlivé k působení vektoru gravitace a lineárnímu zrychlení (13, 23).

### **Fyziologie vestibulárního systému**

Senzorické buňky polokruhových kanálků a otolitových makul převádějí mechanickou energii na neuronální aktivitu vedenou vestibulárním nervem do mozkového kmene a mozečku.

### **Polokruhové kanálky**

Polokruhové kanálky jsou umístěny ve třech, na sebe kolmých rovinách. Kanálky pravého a levého labyrintu jsou uspořádány do párů, které se nacházejí vždy v jedné rovině (pravý laterální – levý laterální, pravý přední – levý zadní, pravý zadní – levý přední). Roviny kanálků odpovídají také směru vektorů, ve kterých pracují jednotlivé okohybné svaly (24). Toto uspořádání zajišťuje, že v kanálcích které tvoří pár, se pohybuje endolymfa opačně vzhledem k poloze ampuly. Hovoříme o tzv. push-pull mechanismu. Toto uspořádání zajišťuje, že v případě výpadku jednoho labyrintu přichází informace o pohybu hlavy z labyrintu zdravého na opačné straně (13). Polokruhové kanálky jsou asymetrickým receptorem, protože pohyb endolymfy směrem ke kupule (ampulopetální pohyb) způsobí depolarizaci a tedy intenzivnější odpověď, než pohyb endolymfy opačným směrem - od kupuly (ampulofugální pohyb), který způsobuje hyperpolarizaci. Při stimulaci vertikálních kanálků (předních a zadních) je tento mechanismus opačný, což prokázal německý fyziolog J.R. Ewald ve svých zákonech (25).

Vláskové buňky polokruhových kanálků zprostředkovávají senzorickou informaci o úhlovém zrychlení hlavy. Tato informace je důležitá pro zajištění vestibulookulárního reflexu, který stabilizuje oči v prostoru při pohybech hlavy (26). Tento mechanismus umožňuje udržení dynamické zrakové ostrosti během běžných denních aktivit, jako jsou chůze, běh či jízda v automobilu. Neurální aktivita ve vestibulárním nervu je úměrná úhlové rychlosti pohybu hlavy, při běžných činnostech má frekvenci 0.5-7 Hz (27).

Vlásokové buňky jsou drážděny změnou polohy svých výběžků, ale produkují nervový signál, který je úměrný úhlovému zrychlení hlavy. Pro tuto transformaci jsou důležité biofyzikální vlastnosti polokruhového kanálku. Lumen kanálku má velmi malý průměr v porovnání s poloměrem zakřivení kanálku. Další důležitou charakteristikou je vysoká viskozita endolymfy, která ovlivňuje tření mezi tekutinou a stěnou kanálku. Toto tření vytváří tlak endolymfy na kupulu, kdy velikost jejího vychýlení odpovídá úhlové rychlosti pohybu hlavy. Další důležitou vlastností polokruhového kanálku je dynamická charakteristika. Při rotaci konstantní rychlosti kanálek produkuje signál úměrný rychlosti rotace jen několik sekund, protože kupula má tendenci se díky své elasticitě vrátit do klidové polohy (13, 27).

### **Otololitový systém**

Otolitové makuly registrují lineární zrychlení a náklon hlavy vzhledem k vektoru gravitace. Tyto dvě fyzikální veličiny nedokáže sám otolitový systém od sebe odlišit. Neidentifikuje, zda dochází k náklonu nebo k translačnímu pohybu. Funkčně se otolitový systém liší od polokruhovitých kanálků ve dvou vlastnostech. Otolitové makuly registrují spíše akceleraci než rychlost a k jejich podráždění dochází více lineárním pohybem hlavy. Tak jako polokruhové kanálky využívají specifických hydrodynamických vlastností endolymfy, otolitový systém potřebuje ke své funkci vápenaté krystaly – otolity – umístěné na otolitové membráně. Otolity jsou schopny detekovat pohyb ve všech třech prostorových rovinách, přestože otolitové váčky máme pouze dva. Sakulus je orientován vertikálně a utrikulus horizontálně. Otolity registrují také náklon hlavy a zajišťují tzv. otolitové reflexy sloužící k řízení polohy bulbů při náklonech hlavy ve frontální rovině (16, 28).

### **Vestibulární nerv**

Vlákna vestibulárního nervu přenášejí aferentní projekci z bipolárních vestibulárních neuronů. Nerv vede z labyrintu vnitřním zvukovodem ke komplexu vestibulárních jader uložených v mozkovém kmeni. Existují dva vzorce neurální aktivity ve vestibulárním nervu. V klidovém stavu je přítomna tonická aktivita s velmi malou variabilitou frekvence akčních potenciálů. Při stimulaci vestibulárního labyrintu pohybem hlavy se variabilita frekvence akčních potenciálů zvýší (29).

## **Centrální zpracování vestibulárních vstupů**

Aferentace z vestibulárního labyrintu je primárně zpracovávána ve dvou oblastech, vestibulárních jádrech a mozečku. Komplex vestibulárních jader primárně zpracovává informace a zprostředkuje jejich rychlý převod do oblasti motorických jader okohybných a posturálních svalů. Mozeček působí více jako komparátor monitorující činnost okolních vestibulárních struktur. V obou oblastech dochází ke konvergenci vestibulární aferentace s vizuálními a somatosenzorickými vjemy (13). Na centrálním zpracování vestibulárních informací se podílí také thalamus a vestibulární kortex.

## **Vestibulární jádra**

Vestibulární jádra tvoří komplex čtyř hlavních jader, která jsou primárně lokalizována laterálněv pontu, ale přesahují také do oblasti prodloužené míchy. Tato jádra přijímají signály z labyrintu vnitřního ucha prostřednictvím bipolárních buněk ganglion vestibulare. Horní (Bechtěrewovo) a mediální (Schwalbeovo) jádro je začleněno do okruhu pro vestibulookulární reflex. Mediální jádro je zodpovědné za koordinaci aktivace krčních svalů s očními pohyby. Laterální (Deitersovo) jádro je důležité pro zajištění vestibulospinálních reakcí. Dolní (Rollerovo) jádro spojuje ostatní jádra s mozečkem. Vestibulární jádra na obou stranách mají komisurální propojení, která zajišťují inhibici. Komplex vestibulárních jader je z funkčního hlediska velmi důležitý pro sensorimotorickou integraci (30).

## **Mozeček**

Mozeček zajišťuje kalibraci vestibulárních reflexů. V případě poruchy mozečku jsou sice vestibulární reflexy přítomny, ale jejich efektivita k zajištění stabilizace postoje a vizuálního obrazu se dramaticky snižuje. Flokulus mozečku řídí gain vestibulookulárního reflexu. Nodus mozečku reguluje délku trvání vestibulookulárního reflexu. V případě poruchy periferní části vestibulárního systému se mozeček významně uplatňuje při vestibulární kompenzaci. Při jeho poruše se často objevuje nystagmus, který je závislý na poloze hlavy s ohledem na směr působení gravitačního vektoru (31). Předpokládá se, že nodulus je klíčovou strukturou v etiopatogenezi kinetóz (32). Poruchy v oblasti předního laloku mozečku způsobují poruchy posturální stability (33). Mozeček je také klíčovou strukturou pro interakci mezi vizuálním a vestibulárním systémem a je zodpovědný za zrakovou supresi vestibulárního nystagmu (16).

## **Vestibulární thalamus**

Další strukturou, která má vztah k vestibulárnímu systému je thalamus. U lidí je velice důležitou strukturou pulvinar thalami, který se aktivuje při optokinetické stimulaci, při stimulaci polokruhovitých kanálků a šíjového svalstva. Vestibulární thalamus je zodpovědný za integraci vestibulárních informací s dalšími sensorickými vjemy a za přenos informace do mozkové kůry. Posterolaterální thalamus je zodpovědný za zpracování graviceptivních informací a za orientaci těla v prostoru (30).

## **Vestibulární kůra**

Vestibulární stimulace vede k aktivaci celé řady kortikálních oblastí zahrnující dolní parietální lalok, zadní inzulu, suplementární motorickou oblast, střední cingulum a oblasti somatosenzorického kortexu. Nejdůležitější fyziologickou funkcí vestibulárního kortexu je integrace multimodálních smyslových vjemů do jednotné percepce prostoru a pohybu. Úkolem komplexního zpracování smyslových vstupů v mozkové kůře je převod koordinátového systému z jednotlivých sensorických orgánů na egocentrický a exocentrický souřadnicový systém. Na zpracování této úlohy se podílejí informace ze všech smyslových systémů, kterým je přidělována váha podle funkčního kontextu pohybu (30, 34).

## **Vestibulookulární reflex**

Motorická odpověď vestibulookulárního reflexu je zprostředkována okohybnými svaly. Uspořádání okohybných svalů je takové, že pár polokruhovitých kanálků je napojen na pár okohybných svalů. Výsledkem je konjugovaný pohyb očí, který probíhá ve stejné rovině jako pohyb hlavy. Převod nervových signálů z vestibulárních jader na motorická jádra okohybných svalů zprostředkovává fasciculus longitudinalis medialis. Vestibulookulární reflex je jednou z nejrychlejších reakcí lidského těla, jeho latence je při rotační stimulaci mezi 7-15 ms (28).

## **Vestibulospinální reflex**

Motorická odpověď vestibulospinálního reflexu je zprostředkována posturálními svaly inervovanými motoneurony v předních rozích míšních. Vestibulospinální projekce je velice komplikovaná. Existuje řada motorických strategií, které využijeme například při odvrácení pádu. Jednotlivé strategie zahrnují plantární flexi hlezna, pohyb v kyčelním kloubu, krokovou strategii, zachycení se horní končetinou, nebo kombinaci těchto strategií. Přenos nervových vzruchů z vestibulárních jader zajišťuje laterální vestibulospinální trakt – tato dráha zajišťuje především obranné extenční reflexy na dolních končetinách. Mediální vestibulospinální trakt



inervuje axiální krční svaly. Na zajištění vestibulospinálních odpovědí se podílí také retikulospinální dráha (35). Vestibulární systém zajišťuje i vestibulokolický reflex, který stabilizuje hlavu v prostoru. V literatuře je též popisován reflex cervikokolický, který stabilizuje hlavu ve vztahu k poloze trupu. Vestibulokolický reflex je zajištěn prostřednictvím vestibulospinální dráhy, zatímco cervikokolický reflex je spouštěn na základě podráždění proprioceptorů šíjového svalstva. Oba reflexy jsou důležité pro prostorovou koordinaci pohybu v rámci prostorové koordinace. Pokud se hlava pohybuje ve vztahu k trupu, tak oba reflexy pracují současně. V případě, že se trup pohybuje a hlava je stabilní, je cervikokolický reflex potlačen. Posturální kontrola a stabilita je závislá na spolupráci obou těchto reflexních okruhů (36).

## **2.4 Vestibulární syndromy**

Periferním vestibulární syndrom je způsoben vyřazením funkce periferní části vestibulárního systému, který je představován labyrintem vnitřního ucha a vestibulární porcí osmého hlavového nervu vedoucího informace do oblasti vestibulárních jader mozkového kmene. Lze ho rozdělit na akutní a chronický. Akutní periferní vestibulární syndrom je typicky přítomný u vestibulární neuronitidy, ale může být přítomen i u jiných onemocnění. Nejčastěji se jedná o jednostranné postižení. Typicky se projevuje přítomností horizontálně-rotatorického nystagmu, který směřuje ke zdravé straně. Tonické úchylny těla směřují naopak na stranu postiženou. Bývá přítomna vegetativní symptomatika v podobě nauzey a zvracení. Periferní vestibulární syndrom může být doprovázený audiologickými symptomy jako je tinnitus a porucha sluchu.

Během několika dní dochází postupně ke kompenzaci stavu, kdy mizí spontánní nystagmus a upravuje se posturální stabilita. Proces kompenzace nastupuje prakticky od začátku onemocnění a trvá několik týdnů (37).

U jednostranného postižení se rozlišuje stav, který je kompenzovaný nebo naopak stav, který vykazuje poruchu kompenzace. Postižení vestibulárního labyrintů může být inkompletní a vzácně se vyskytuje oboustranně (38). Bilaterální postižení vzniká nejčastěji vestibulotoxickým působením antibiotik nebo chemoterapeutik. Jedná se o zvláštní skupinu pacientů, pro které je typická porucha stoje a chůze v závislosti na zrakové kontrole. Tito pacienti netrpí závratí, je pro ně typická oscilopsie vázaná na pohyb hlavy, která vzniká v důsledku výpadku vestibulookulárního reflexu. Pacienti vyžadují speciální terapeutický přístup v podobě vestibulární rehabilitace. Inkompletní periferní léze je nejčastější u vestibulární neuronitidy, kdy může dojít k postižení pouze horní části vestibulárního nervu

(39). Specifickým typem inkompletní léze je benigní paroxysmální polohové vertigo. Pacienti mají polohovací nystagmus, jehož směr odpovídá rovině postiženého kanálku (40).

Centrální vestibulární syndrom je soubor klinických příznaků, které vznikají v důsledku postižení centrálních struktur podílejících se na řízení rovnováhy. K postižení může dojít na úrovni vestibulárních nebo okulomotorických jader, středního mozku, thalamu, mozečku a vestibulárního kortexu. Centrální vestibulární syndrom se může projevovat poruchami vestibulookulárního reflexu, posturálními poruchami, okulomotorickými poruchami a také poruchou vnímání prostoru. Nejčastějšími příčinami centrálního vestibulárního syndromu jsou ischémie a krvácení ve vertebrobasilárním povodí, nádory, rozstroušená skleróza či epilepsie.

## **2.5 Vestibulární schwannom**

Vestibulární schwannom (VS) je intrakraniální benigní nádor, vyrůstající v zadní jámě lební ze Schwannových buněk vestibulární části VIII. hlavového nervu. Vestibulární schwannomy tvoří přibližně jednu desetinu intrakraniálních nádorů. Nejčastěji se onemocnění manifestuje v průběhu čtvrté a páté dekády. Incidence onemocnění je přibližně 0.7 – 1.0/100000 obyvatel/rok (41). V klinické praxi je často používána klasifikace VS podle Koose. Dle velikosti a šíření VS je možné tento typ tumoru klasifikovat na čtyři stádia.

Jednotlivé symptomy VS vznikají útlakem mozkových nervů a struktur zadní jámy lební - mozečku a mozkového kmene. Nádor může ovlivnit také cévní zásobení nebo narušit cirkulaci mozkomíšního moku. Nejčastějším symptomem bývá jednostranná nedoslýchavost, asi u 50-70% pacientů se nedoslýchavost kombinuje s tinnitem. U 10% bývá přítomen pouze jednostranný tinnitus bez poruchy sluchu. Závrať různého typu udává přibližně polovina pacientů. Závrať se často objevuje v počátečním období onemocnění, později se objevují spíše pocity instability. V průběhu růstu nádoru dochází k centrální kompenzaci vestibulární poruchy a zmírnění subjektivních obtíží (42).

Základem stanovení správné diagnózy je zobrazení magnetickou rezonancí se zaměřením na mostomozečkový kout a vnitřní zvukovod. Důležitou součástí je otoneurologické vyšetření hodnotící funkci vestibulárního aparátu a přítomnost mozečkových příznaků. Dále je prováděno ORL vyšetření, včetně subjektivní audiometrie a vyšetření kmenových evokovaných potenciálů (BERA - Brainstem Evoked Responses Audiometry), které slouží k verifikaci suprakochleární léze. V rámci vyšetření vestibulární patologie u pacientů s VS jsou prováděny speciální elektrofyziologické testy. Mezi běžně používané testy patří elektronystagmografie – metoda používaná k hodnocení vestibulookulárního reflexu a okulomotoriky (38). Další metodou z této skupiny testů, která nebývá standardně součástí

diagnostického algoritmu u pacientů s VS, je posturografie. Posturografie slouží ke kvantifikaci posturálních výchylek stojícího člověka a v klinické praxi je využívána pro objektivizaci poruchy stability. Přestože se jedná o metodu senzitivní k poruchám stability stoje, vykazuje pouze malou diagnostickou specifitu a neumožňuje odlišit jednotlivé typy vestibulárního postižení (43). Mezi další testy vestibulárního aparátu patří vyšetření vestibulárních evokovaných myogenních potenciálů a subjektivní vizuální vertikály, které vypovídá o funkci otolitového systému, fotografie očního pozadí a vyšetření dynamické zrakové ostrosti (38).

Léčba VS vychází z klinického nálezu, velikosti tumoru a jeho tendenci k růstu. V rámci léčebného postupu existují tři možnosti. U pacientů s malým tumorem, u kterých není postižen sluch nebo u pacientů, kde bývají ostatní řešení kontraindikována celkovým stavem pacienta, je možná observace. Dalším přístupem je stereotaktická radiochirurgie. Třetí léčebnou možností je chirurgická léčba. Cílem chirurgické léčby je radikální odstranění tumoru s žádným nebo minimálním postižením okolních struktur. Mezi specifická rizika této léčebné modalitě patří ztráta sluchu, porucha funkce VII. hlavového nervu, likvorea, porucha rovnováhy a poruchy dalších hlavových nervů (44).

## **2.6 Poruchy rovnováhy při periferní vestibulární poruše**

Charakter symptomů a jejich tíže jsou při periferním vestibulárním postižení závislé na skutečnosti, zda se jedná o jednostranné nebo oboustranné postižení, rychlosti vzniku léze a jejím rozsahu. Mezi základní příznaky při jednostranném postižení patří spontánní nystagmus, tonické vestibulární úchyly těla a končetin způsobené poruchou vestibulospinálního reflexu. Dále nauzea a závrať, které jsou způsobeny poruchou funkce vestibuloautonomních a vestibulokortikálních drah (45).

U pacienta v akutním stádiu unilaterální vestibulární poruchy lze často pozorovat náklon hlavy ve frontální rovině k postižené straně způsobený výpadkem funkce otolitového systému. Pacient v tomto období také vykazuje ataxii stoje a chůze, která je charakteristická kompenzačním rozšířením stojné báze a úchyly těla k postižené straně. Pro vestibulární chůzi je charakteristická výraznější instabilita při pomalé chůzi (46). Pro posturální instabilitu při vestibulárním postižení je také charakteristická vysoká závislost na vizuální kontrole. V průběhu několika dnů až týdnů po prodělané jednostranné vestibulární poruše dochází k úpravě stability. Mladší pacienti jsou schopni samostatné chůze po několika dnech. Tyto změny spočívají především ve spontánní úpravě funkce labyrintu, centrální vestibulární kompenzaci na úrovni vestibulárních jader a mozečku, která je založena na plasticitě

nervového systému, popřípadě využití náhradních pohybových strategií (47).

## **2.7 Degenerativní postižení mozečku**

Degenerativní onemocnění mozečku představují rozsáhlou heterogenní skupinu onemocnění, jejichž hlavním neurologickým příznakem je progresivní cerebelární ataxie. Patologickou podstatou je degenerace mozečku a jeho aferentních i eferentních nervových spojení. Onemocnění často postihuje také ostatní části centrálního nervového systému, jako jsou bazální ganglia, jádra mozku kmene, míšní dráhy, nebo periferní nervový systém. Z tohoto důvodu mohou být přítomny také extracerebelární příznaky, které zahrnují oftalmoplegii, extrapyramidové a pyramidové příznaky, demenci, epilepsii, kognitivní dysfunkci a periferní neuropatii (48).

Degenerativní mozečkové ataxie můžeme dělit podle etiologie na dědičné a získané. Dědičnost degenerativních mozečkových ataxií může být autozomálně dominantní, autozomálně recesivní, nebo X-vázaná a mitochondriální. Mezi autozomálně dominantní cerebelární ataxie se řadí většina spinocerebelárních degenerací (jednotlivé jednotky spinocerebelárních ataxií (SCA)) a dentato-rubro-pallido-luysiánská atrofie (49).

Mezi nedědičné ataxie patří zejména Idiopatická cerebelární ataxie (IDCA) s pozdní manifestací v angličtině označovaná jako „idiopathic late-onset cerebellar ataxia“ (ILOCA) je sporadicky se vyskytující ataxie neznámé příčiny. Ataxií se projevuje také cerebelární forma mnohočetné systémové atrofie (MSA) (50).

## **2.8 Poruchy rovnováhy při postižení mozečku**

Poruchy mozečku můžeme rozdělit podle lokalizace poškození na neocerebelární, paleocerebelární a archicerebelární syndrom. Poškození neocerebela způsobuje ataxii končetin (dysdiadochokineze, dysmetrie a intenzívní tremor), dysartrii a hypotonii. Léze paleocerebela vedou k titubacím, trupové ataxii a nestabilitě stoje a chůze. Léze archicerebela způsobují narušení posturální stability stoje, chůze a abnormity očních pohybů. Mezi hlavní klinické příznaky při poruše funkce mozečku patří abnormity stoje a chůze. Ty se typicky projevují zvětšenými výchylkami těla. Pacienti při stoji a chůzi rozšiřují bázi. Výrazné obtíže působí například otáčení hlavou při chůzi nebo změna směru chůze (51).

Při stoji dochází k neustálému pohybu těžiště těla a tím se mění poloha působitě tlakové síly – Centre of Pressure (CoP), kterou můžeme registrovat pomocí posturografického vyšetření. Posturální výchylky u zdravých jedinců mají vyšší amplitudu v předozadním než mediolaterálním směru a dosahují frekvence do 2 Hz. U neurologicky nemocných se

výchylky těla mění, často se zvyšuje jejich amplituda a rychlost. Pro některá onemocnění (např. psychogenní poruchy stoje) je typické zvýšení frekvence oscilací (52).

U pacientů s lézemi mozečku jsou změny posturální kontroly specifické pro konkrétní lokalizaci poškození. Při postižení předního laloku mozečku dochází k výskytu posturálního tremoru s frekvencí 3 Hz. Výchylky těla mají nízkou amplitudu, vysokou rychlost a převažuje předozadní směr. Při lézi vestibulocerebela (flokulonodulární části) nemají posturální výchylky směrovou preferenci, mají vysokou amplitudu a jejich frekvence je přibližně 1 Hz. Tuto frekvenci mají také výchylky pacientů s lézí míšních provazců, např. pacienti s Fridreichovou ataxií, zde často převažují výchylky v mediolaterálním směru (53).

Mauritz et al. předpokládají, že posturální 3 Hz mozečkový tremor vzniká v důsledku opožděných odpovědí posturálních reflexů s dlouhou latencí. Tyto reflexy jsou vyvolané protažením svalu a mohou být objektivizovány pomocí elektromyografie. Při protažení svalu dochází k reflexní odpovědi, která má dvě složky. První složka má krátkou latenci a odpovídá myotatickému reflexu. Druhá složka reflexní odpovědi má dlouhou latenci. Předpokládá se, že do jejího reflexního oblouku jsou zařazeny supraspinální nervové struktury jako bazální ganglia a mozeček (54). Mozečkový tremor jsme schopni velmi dobře verifikovat pomocí posturografického vyšetření (55).

## **2.9 Vestibulární rehabilitace**

Vestibulární rehabilitace (VRHB) představuje soubor postupů a technik, které urychlují proces vestibulární kompenzace, umožňují adaptaci na vzniklou vestibulární patologii. Tyto techniky využívají neuroplasticity CNS, popřípadě umožňují vytvoření náhradních motorických strategií, které mohou substituovat narušenou funkci. Cílem rehabilitace je úprava funkčního deficitu pacienta se zřetelem na zlepšení posturální stability, snížení rizika pádu a redukce pocitu závratí. Vestibulární rehabilitace nachází uplatnění u řady onemocnění vestibulárního systému. Vhodná je především pro pacienty s jednostrannou periferní vestibulární poruchou (56). U pacientů s oboustrannou ztrátou funkce labyrintu může být její využití omezené (57). Některé studie dokumentují pozitivní efekt také u centrálních a kombinovaných lézí (58). Samostatnou kapitolou VRHB je léčba benigního paroxysmálního polohového vertiga prostřednictvím specifických repositionálních manévrů (59).

Rehabilitace v léčbě závratí a poruch stability, způsobených poškozením vestibulárního systému, není novou metodou. Již v padesátých letech minulého století využili otorinolaryngolog T. Cawthorne a fyzioterapeut F. S. Cooksey cvičení, které snižovalo pocit závratí a zlepšovalo funkční omezení válečných veteránů, kteří utrpěli traumatické poškození

mozku (5). Mnoho dalších studií ukázalo, že cílená VRHB pozitivně ovlivňuje míru nezávislosti nemocných (60), tyto postupy byly postupně doplněny a upraveny do podoby soudobé VRHB (61, 62).

Za posledních více než 65 let bylo diskutováno několik teorií, které se zabývaly vysvětlením, z jakého důvodu rehabilitace pozitivně ovlivňuje poruchu stability a závrať pacientů. Norré se svými spolupracovníky přikládali efekt zejména procesu habituace (63). Později se však ukázalo, že ne všechny změny motorického chování lze vysvětlit pouhou habituací. Někteří autoři se domnívali že za zlepšením stojí neuroplastické změny spočívající v reorganizaci určitých oblastí mozkové kůry (64). Dalším možným vysvětlením je adaptace vestibulookulárního reflexu (65). Při akutním výpadku funkce labyrintu se výrazně snižuje gain vestibulookulárního reflexu (veličina vyjádřená poměrem rychlosti kompenzačního pohybu oka k úhlové rychlosti pohybu hlavy). Gain klesá při akutní vestibulární lézi přibližně o 75% pro pohyb hlavy k postižené straně a o 50% při pohybu hlavy na opačnou stranu. Postupně dochází k jeho úpravě, ale stále zůstává nižší a asymetrický. Zrak, respektive pohyb obrazu po retině, je podnětem pro rozvoj adaptačních změn vestibulookulárního reflexu (66). Tento pohyb, který vzniká právě při poruše vestibulární funkce, vytváří „chybový signál“, který vyvolá snahu CNS minimalizovat tuto chybu. CNS využívá změny gainu k minimalizaci tohoto chybového signálu. Z tohoto důvodu je základním předpokladem pro navození adaptačních mechanismů provádění aktivních pohybů hlavy nemocného při optické fixaci stabilního vizuálního objektu. Z literatury je patrné, že zrakový vstup je nutným předpokladem změn, které aktivují komisurální spoje mediálního vestibulárního jádra a mění chemické regulace GABAergního systému ve vestibulárních jádrech. Podobným způsobem ovlivňují neuroplasticitu vestibulárního systému také pohyby hlavy a těla (67). Dalším mechanismem, který vysvětluje účinnost rehabilitace, je senzorní substituce. V tomto případě předpokládáme, že pokud nefunguje vestibulární systém optimálně, ostatní systémy mu dopomáhají k zajištění posturální kontroly a vizuální stabilizaci. Cílené cvičení pak vede k recalibraci senzorního systému, který se naučí prioritně využívat zrakový a somatosenzorický systém (68-70).

Hlavními cíli rehabilitace u nemocných s poruchou vestibulárního systému jsou (I) snížení intenzity závratí, (II) úprava posturální stability stoje a chůze, (III) zlepšení zrakové ostrosti při pohybech hlavou (stability retinálního obrazu), (IV) zlepšení celkové kondice a (V) návrat pacienta k dřívějším sociálním a pracovním aktivitám (59).

Důležitým předpokladem úspěšné rehabilitace je také dostatečná motivace pacienta. Je nutné si uvědomit, že rehabilitace by neměla být prováděna pouze tak, že pacient obdrží

návod a pokyny k provádění jednotlivých cviků. Důležité je, aby byl pacient individuálně instruován fyzioterapeutem a během edukace měl možnost si jednotlivá cvičení vyzkoušet a zapamatovat. Toto tvrzení podporují studie, které ukazují, že výrazně lepšího efektu je dosaženo rehabilitací, která je individualizována a je pod supervizí fyzioterapeuta (71). Existují studie, které dokumentují pozitivní účinek kombinace VRHB s kognitivně behaviorální terapií u nemocných s poruchou vestibulárního systému (72).

Zásadním předpokladem pro správnou volbu terapie je důkladné vyšetření pacienta. V neurootologickém centru 1. a 2. lékařské fakulty Univerzity Karlovy a FN Motol provádíme vyšetření, která zhodnotí nejen funkci vestibulárního systému klinickými a elektrofyziologickými metodami, ale zaměřujeme se také na dopad jednotlivých symptomů na funkční schopnosti pacienta. Vedle otorinolaryngologického a kompletního vyšetření neurologického je u pacientů proveden kineziologický rozbor a vyšetření funkčních schopností pacienta, respektive jejich limitů v denních činnostech. Samotnou rehabilitaci provádí tým složený z lékařů, fyzioterapeutů a ergoterapeutů.

Existuje řada faktorů, které ovlivňují výsledek VRHB. Důležitými faktory jsou: typ vestibulární poruchy, použítá farmakologická terapie, komorbidity (zejména neuropatie a zrakové poruchy), úroveň kognitivních funkcí, ale také motivace a sociální zázemí pacienta (73). Aby mohla být rehabilitace úspěšná, je třeba individuální rehabilitační plán s ohledem na výsledky vyšetření, symptomy a disabilitu nemocného (74). V poslední době je velmi diskutovaná otázka vestibulární dysfunkce a úzkostných poruch a deprese. Některé studie dokumentují pozitivní efekt VRHB na míru úzkosti a deprese pacientů s vestibulárním onemocněním (75).

Neexistuje jeden univerzální rehabilitační postup (sada cvičení), který bychom mohli obecně použít pro všechny pacienty s vestibulární poruchou. Pro stanovení optimálního rehabilitačního plánu je nutné pacienta nejprve důkladně vyšetřit. Standardní vyšetření je pak vhodné doplnit o dotazníkové šetření. Mezi nejčastěji používané dotazníky pro pacienty s poruchou vestibulárního systému patří Dizziness Handicap Inventory (DHI), Activities Specific Balance Confidence Scale (ABC) a Vestibular Activities of Daily Living Scale (VADL). Dále se vyšetření zaměřuje na funkční schopnosti. Jejich kvantifikace je možná např. pomocí testů Timed Up & Go, Dynamic Gait Index (DGI). Dalším objektivním vyšetřením, které určí míru poruchy stability je posturografické vyšetření (43).

Pro stanovení přesného terapeutického „okna“, nutného k využití maximálního potenciálu VRHB, zatím nejsou dostatečné poznatky. Zdá se, že tato „okna“ vhodná pro rehabilitaci a úpravu vestibulární funkce se mohou lišit mezi jednotlivými pacienty, jde-li

například o pacienty po resekci vestibulárního schwannomu (76). Z poznatků týkajících se vestibulární kompenzace se doporučuje zahájit rehabilitaci v co nejkratší době po vzniku vestibulární léze (77).

Eleftheriadou et al. uvádí, že VRHB má lepší efekt u pacientů s periferní vestibulární poruchou než u pacientů s centrální vestibulární lézí. Uspokojivějších výsledků dosahují pacienti s jednostrannou lézí v porovnání s oboustrannými poruchami (74). V časném stádiu periferní vestibulární poruchy je vestibulární rehabilitace efektivním nástrojem pro zkrácení trvání symptomů a snížení užívání medikace (78).

U pacientů s centrální vestibulární poruchou je úprava funkce limitována a symptomy přetrvávají déle (27). Toto tvrzení podporují výsledky studie autorů Suarez et al., kteří prokázali, že organické poškození nervové tkáně u pacientů s centrální vestibulární poruchou negativně ovlivňuje schopnost dosáhnout adaptačních změn. Přestože většina pacientů vykazovala po ukončení rehabilitace zlepšení sledovaných parametrů u stabilometrického vyšetření, během několika měsíců po ukončení rehabilitace došlo opět návratu hodnot parametrů do původního stavu a zvýšení rizika pádu. Autoři studie se domnívají, že pro udržení stacionárního stavu je nutné u pacientů s centrálním postižením ve VRHB pokračovat dlouhodobě (79).

## **2.10 Biofeedback v rehabilitaci poruch stability**

Biofeedback (BF) nebo také biologická zpětná vazba je metoda, při které jedinec vědomě ovlivňuje funkci svého těla na základě informací získaných pomocí senzorů snímajících určitou funkci. Získanou informaci využívá jedinec k navození změny fyziologických funkcí, které mohou přetrvávat i po ukončení terapie.

V oblasti léčby pacientů s poruchami vestibulárního systému byl prokázán pozitivní efekt rehabilitace se zpětnou vazbou v řadě studií. Zlepšení stability stoje bylo dokumentováno jak u pacientů s periferním onemocněním vestibulárního aparátu, tak u pacientů s centrální vestibulární poruchou (80-82). Biofeedback pacientovi poskytuje aditivní informaci o poloze a pohybu těla v reálném čase. Informace jsou přijímány senzorickými systémy, které se uplatňují v posturální kontrole. V závislosti na míře postižení senzorického systému může biofeedback sloužit buď pro zesílení nebo pro úplnou náhradu senzorické informace (83).

Díky rozvoji moderních technologií a intenzivnímu výzkumu v oblasti biomedicíny byla vyvinuta nová zařízení, která mohou částečně nahradit ztrátu smyslového orgánu. Tyto arteficiální senzory (např. akcelerometr s gyroskopem) poskytují jedinci informace, které by



za fyziologických podmínek získal ze sensorického systému. Systémy pro BF poskytují informace ve formě energie, která je zpracována jinými, nepostiženými receptory (např. taktilními či sluchovými). Receptory převádějí energii do vzorce impulzů, které jsou vedeny prostřednictvím sensorických drah do CNS, kde jsou dále zpracovány. Hlavní uplatnění sensorické substituce bylo popsáno u jedinců se ztrátou zraku či ztrátou funkce vestibulárního systému (84, 85).

### **Vizuální zpětná vazba**

Při rehabilitaci s vizuální zpětnou vazbou pacient kontroluje polohu svého těla zrakem. Systémy využívají nejčastěji silovou (posturografickou) plošinu, která umožňuje registraci polohy těla a jeho posturálních výchylek pomocí tlakových snímačů. Poloha pacientova těla se po zpracování promítá na monitor počítače či přenosného zařízení jako je tablet. Kurzor na obrazovce informuje pacienta nejen o pozici těla, ale také o směru, rychlosti a velikosti posturálních výchylek (86).

Pacient se v průběhu terapie snaží korigovat polohu těla pomocí posturální reakce v závislosti na zrakovém podnětu. Jednotlivé systémy nabízejí řadu cvičebních aplikací pro trénink různých aspektů posturální kontroly (např. trénink stability stoje, nácvik přesunů těžiště použitím různých pohybových strategií). V České republice je v praxi rozšířený systém BalanceMaster® (NeuroCom, Inc., USA). Princip cvičení při využití tohoto systému spočívá v přesném umístění kurzoru vědomým pohybem těla na zvýrazněný cíl na monitoru.

Pomocí BF s vizuální zpětnou vazbou lze ovlivnit jak stabilitu stoje, tak dynamickou rovnováhu (87). Během cvičení se zvyšuje obtížnost změnou pohybových úkolů od posturálně jednoduchých pozic k obtížnějším. Obtížnost cvičení také můžeme zvyšovat modulací jednotlivých sensorických vstupů (např. stoj na pěnové podložce). V poslední době se v rehabilitaci začínají uplatňovat komerční systémy, které mohou pacienti používat sami v domácím prostředí (88, 89). Objevují se také systémy, kde je dvojrozměrná vizuální scéna nahrazena prostředím virtuální reality (90).

### **Elektrotaktilní stimulace jazyka**

Elektrotaktilní stimulace jazyka může být využita pro substituci zrakových informací či informací o poloze těla. Koncept vznikl na základě dlouholetého výzkumu mozkové plasticity spojené se sensorickou substitucí, který vedl profesor Paul Bach-y-Rita (91). V rámci studií zabývajících se vizuální substitucí bylo zjištěno, že jazyk představuje nejlepší rozhraní pro předání informací CNS pomocí elektrotaktilní stimulace. Na principu elektrotaktilní stimulace

jazyka pracuje přístroj BrainPort® Balance Device (BP) (Wicab, Inc., Middleton, Wisconsin, USA). Jedná se o inovativní, neinvazivní terapeutické zařízení určené pro rehabilitaci pacientů s poruchami rovnováhy. Přístroj byl vyvinut především pro sensorickou substituci při oboustranné ztrátě vestibulární funkce. Dnes má uplatnění v rehabilitaci periferních i centrálních vestibulárních poruch různé etiologie (92-95).

Při nácviku stability s BP mají pacienti zavřené oči a během různých pozic se snaží udržet elektrický signál ve středu stimulačního pole. Obtížnost cvičení se postupně zvyšuje změnou pohybových úkolů od jednoduchých pozic (stoj o široké bázi) k obtížnějším (stoj pata špička). Výsledky řady klinických studií ukazují, že takto vedený trénink, zlepšuje posturální stabilitu

u pacientů s oboustrannou ztrátou vestibulární funkce (81, 93). Zlepšení sledovaných parametrů byla prokázána u pacientů s poruchami rovnováhy centrální etiologie (96).

## **2.11 Vestibulární prehabituace**

Jedná se o nový postup rehabilitace pacientů s vestibulárním schwannomem, který umožní organismu vyrovnat se s vestibulární deaferentací již v době před vlastním chirurgickým výkonem. Většina pacientů s velkými nádory ztrácí vestibulární funkce již před operací a v době resekce schwannomu jsou již kompletně vestibulárně kompenzováni. U pacientů s menšími a mediálně uloženými tumory, kteří mají stále část vestibulárních funkcí zachovanou, představuje operace náhlou unilaterální vestibulární ztrátu. Právě tyto pacienti mohou profitovat z předoperační vestibulární ablace s použitím intratympanické aplikace gentamicinu. Tento postup umožní organismu vyrovnat se s vestibulární deaferentací nástupem kompenzace již v době před operací (97).

Tjernström et al. uvádějí, že resekce vestibulárního schwannomu představuje pro pacienta dvě traumata, jednostrannou vestibulární deaferentaci a samotný operační zákrok. Pokud probíhají současně, vedou k pomalejší kompenzaci. Separací těchto traumat v čase docílíme efektivnější adaptace na vestibulární ztrátu (98). Chemická ablace labyrintu má několik výhod oproti klasickému chirurgickému přístupu (labyrintektomie nebo sekce vestibulokochleárního nervu). Jedná se o metodu mnohem méně invazivní, která může být provedena ambulantně v lokální anestezii bez operační zátěže pacienta. Gentamicin je rovněž mnohem více vestibulotoxický než kochleotoxický, proto je možné dosáhnout zachování sluchu (99). Koncept vestibulární prehabituace, tzv. „PREHAB“, rozpracovali švédští autoři Magnusson et al.. Tato metoda redukuje symptomy spojené s jednostrannou vestibulární deaferentací a urychlí tak rekonvalescenci pacienta po operačním zákroku (100).

### 3 CÍLE

Cílem habilitační práce je shrnutí poznatků z publikovaných prací autora.

- Cílem první části práce, kterou tvoří čtyři studie, je hodnocení účinnosti rehabilitace u pacientů s onemocněním vestibulárního systému a mozečku. V první studii jsme zkoumali efekt rehabilitace s vizuální zpětnou vazbou v časném pooperačním období u pacientů po resekci vestibulárního schwannomu (jednostranná vestibulární neurektomie). Ve druhé a třetí studii jsme hodnotili efekt nové rehabilitační metody využívající biofeedback elektrotaktilní stimulací jazyka u skupiny pacientů s degenerativním onemocněním mozečku. Tato metoda dosud nebyla u pacientů s mozečkovým syndromem použita, předložené práce patří mezi první na světě, které se touto problematikou zabývají. Čtvrtá studie obsahuje pilotní výsledky nového rehabilitačního postupu „prehabituace“ u pacientů s vestibulárním schwannomem. U nemocných je již předoperačně provedena chemická destrukce labyrintu a započata intenzivní vestibulární rehabilitace.
- Cílem druhé části práce, kterou tvoří dvě studie, je poukázat na možnosti vyšetřování subjektivního vnímání vertikality. Studie dokumentují změny percepce vertikály u zdravých seniorů a osob s definovanou posturální deformitou – idiopatickou skoliózou.
- Cílem třetí, poslední části práce, je představení možností kvantifikace posturálních výchylek pomocí posturografických plošin a inerciálních měřících senzorů. Předkládáme tři práce využívající posturografie a inerciálních senzorů k objektivizaci posturálních výchylek pacientů s poruchou mozečku. Dále uvádíme studii hodnotící interindividuální variabilitu při provádění repositionálních manévrů používaných k léčbě benigního paroxysmálního polohového vertiga.

## **4 PŘEHLED METODIKY**

Jednotlivá vyšetření byla prováděna standardizovaným postupem. Hodnocení jednotlivých vyšetření bylo prováděno stejnou osobou. Všechny studie probíhaly v souladu s etickými standardy etické komise FN Motol a v souladu s Helsinskou deklarací Světové lékařské asociace přijatou v roce 1964 a novelizovanou v roce 2000. Pacienti podepsali informovaný souhlas.

### **4.1 Soubory pacientů**

#### **Práce hodnotící účinnost rehabilitace**

Do rehabilitačního programu s vizuální zpětnou vazbou u pacientů operovaných pro vestibulární schwannom na Klinice ORL a chirurgie hlavy a krku 1. LF UK a FN Motol bylo zařazeno sedmáct pacientů v období od ledna 2007 do června 2009.

Efekt rehabilitace s biologickou zpětnou vazbou pomocí elektrotaktilní stimulace jazyka jsme v období od října 2009 do července 2012 hodnotili u devíti pacientů Neurologické kliniky 2. LF UK a FN Motol. U všech pacientů byla dominantním příznakem ataxie stoje a chůze způsobená degenerativním onemocněním mozečku.

V letech 2014 a 2015 jsme hodnotili vliv předoperační aplikace gentamicinu a intenzivní rehabilitace na schopnost vestibulární kompenzace u dvaceti pacientů operovaných pro vestibulární schwannom na Klinice ORL a chirurgie hlavy a krku 1. LF UK a FN Motol.

#### **Práce hodnotící poruchy percepce vertikály**

Ve studii věnované problematice percepce vertikály jsme vyšetřili v období od dubna do prosince 2009 na Klinice rehabilitace a tělovýchovného lékařství 2. LF UK a FN Motol dvacet tři pacientů s idiopatickou skoliózou a stejný počet zdravých kontrol.

V práci zabývající se poruchami percepce vertikály u seniorů bylo vyšetřeno v období od října 2013 do dubna 2014 dvacet sedm zdravých mladých jedinců a třicet seniorů.

#### **Práce zabývající se využitím posturografie a inerciálních měřicích senzorů**

Posturografické vyšetření bylo provedeno u sedmácti pacientů se spinocerebelární ataxií typu 2 a sedmácti pacientů s Fridreichovou ataxií.

Inerciální senzory jsme použili pro kvantifikaci posturálních výchylek u deseti pacientů s degenerativním postižením mozečku a jedenácti zdravých kontrol v letech 2009 – 2012.

Interindividuální variabilita provádění Sémontova manévru byla testována mezi třemi terapeuty na deseti probandech v období říjen 2013 až únor 2014.

Detailní popis vyšetřených skupin pacientů je uveden in extenso v přílohách této práce.

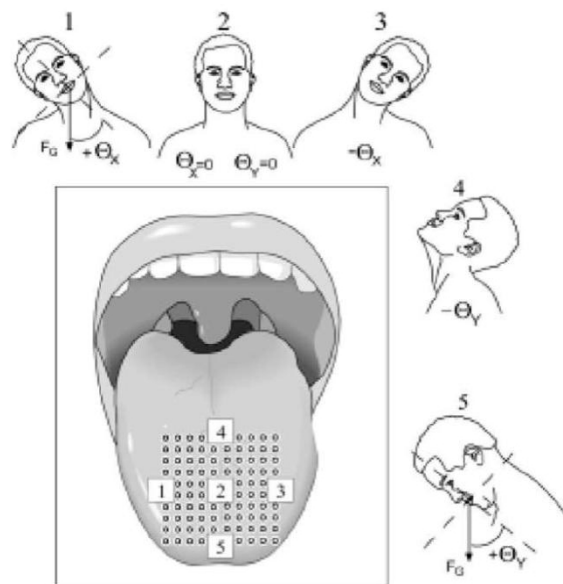
## **4.2 Rehabilitační programy**

Pro rehabilitaci s vizuální zpětnou vazbou jsme využili systém BalanceMaster<sup>®</sup> (NeuroCom, Inc., USA). Princip cvičení při využití tohoto systému spočívá v přesném umístění kurzoru vědomým pohybem těžiště těla na zvýrazněný cíl na monitoru PC. Pohyb těla pacienta je registrován pomocí posturografické plošiny.

Pro rehabilitaci pacientů s degenerativním postižením mozečku jsme použili systém BrainPort<sup>®</sup> (BP). BP se skládá z dvou hlavních částí: řídicí a intraorální jednotky (Obr. 1). Akcelerometr, který je v plastovém pouzdře intraorální jednotky, registruje pohyb hlavy v závislosti na odchýlení se od gravitační vertikály. Na spodní straně akcelerometru je pole 10×10 elektrod, které se dotýká dorza jazyka. Při změně pozice hlavy je signál z akcelerometru zpracován řídicí jednotkou a převeden do elektrického impulzu, který jedinec vnímá taktilními receptory jazyka. Směr vychýlení hlavy odpovídá směru vychýlení impulzu ze středu elektrodového pole (Obr. 2) (91).



Obr. 1: Přístroj BrainPort® (Wicab, Inc.) Circuitry = obvody; Electrode Array = elektrodové pole; Accelerometer = akcelerometr; IOD (intra-oral device) = intraorální jednotka; CPU (central processing unit) = řídicí jednotka.



Obr. 2: Vztah pozice hlavy a elektrického stimulu na jazyku.

### 4.3 Posturografické vyšetření a inerciální měřící senzory

V naší práci jsme použili posturografické systémy BalanceMaster (NeuroCom Inc., USA), Synapsis Posturography System (SPS, Francie) a FOOTSCAN (RSscan, Belgie).

Vzorkovací frekvence posturografických plošin je od 40 do 500 Hz. Získaná data byla zpracována ze souboru, který byl exportován pomocí originálního softwaru příslušného systému. Data byla načtena jako řetězec znaků a následně převedena do matice. Pro výpočet jednotlivých parametrů byl použit software MATLAB (The MathWorks, Inc., USA). Pro hodnocení posturálních výchylek jsme použili standardizované parametry CoP (101).

Ve studii hodnotící interindividuální variabilitu Sémontova manévru jsme použili inerciální senzory WMS (Princip a.s., ČR). Pro hodnocení stability pacientů s mozečkovým postižením byl použit systém MoCap Xbus kit (Xsens Technologies B.V., Holandsko). Vzorkovací frekvence senzorů je 50 Hz a 100 Hz.

Posturální výchyly během stoje byly hodnoceny při testu Clinical Test for Sensory Interaction of Balance (CTSIB). Při tomto testu jsou zaznamenávány posturální výchyly ve čtyřech sensorických situacích – stoj na pevné podložce otevřené/zavřené oči, stoj na pěnové podložce otevřené/zavřené oči (102).

#### **4.4 Vyšetření subjektivní vizuální a haptické vertikály**

K vyšetření subjektivní vizuální vertikály (SVV) byla použita standardizovaná metoda „The Bucket Method“ publikovaná autory z Neurologické kliniky Ludwig-Maximilians University v Mnichově (17). Pro vyšetření haptické vertikály jsme použili vlastní zařízení sestavené na Klinice rehabilitace a tělovýchovného lékařství 2. LF UK a FN Motol (103).

Pro hodnocení percepce vertikály jsme použili průměrnou pozici a rozptyl (nepřesnost) hodnot odchylek od skutečné geofyzikální vertikály.

#### **Statistická analýza**

Statistická významnost byla u studií tvořících tuto habilitační práci stanovena na hladině  $p \leq 0.05$ . K statistické analýze získaných dat byl použit software Statistica 10.0 (StatSoft, USA) a SPSS 19.0 (IBM, USA).

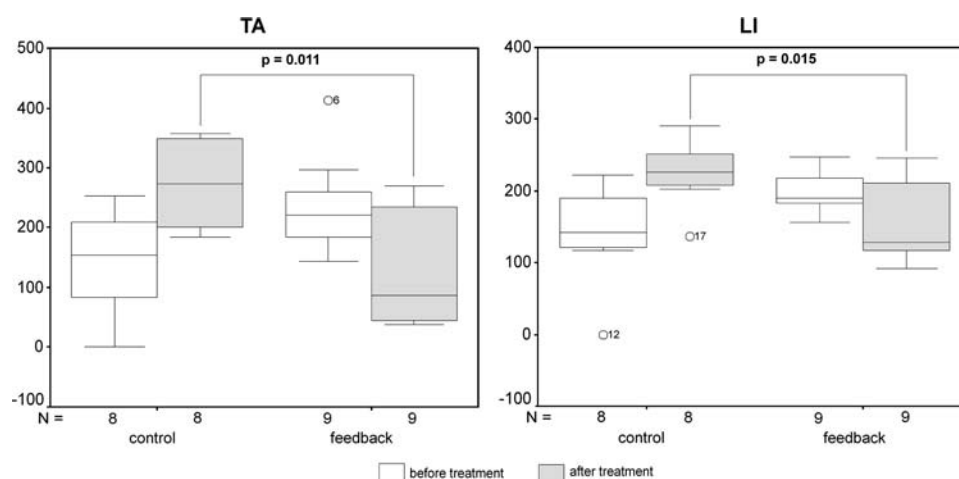
Detailní popis metodiky a statistických metod je uveden in extenso v přílohách této práce.

## 5 SOUHRN VÝSLEDKŮ

### 5.1 Práce hodnotící účinnost rehabilitace

V první studii věnující se rehabilitaci s vizuální zpětnou vazbou u pacientů po resekci vestibulárního schwannomu jsme při porovnání parametrů posturografického vyšetření po ukončení rehabilitace prokázali statisticky významné rozdíly ( $p \leq 0.05$ ) mezi skupinou pacientů která měla standardní rehabilitaci (bez použití zpětné vazby) a skupinou která rehabilitovala s vizuální zpětnou vazbou.

Významný rozdíl byl prokázán v parametrech: amplituda stabilogramu v bočním směru, index rychlosti stabilogramu v předozadním směru, délka křivky stabilogramu, střední kvadratická odchylka a plocha stabilogramu (Obr. 3).



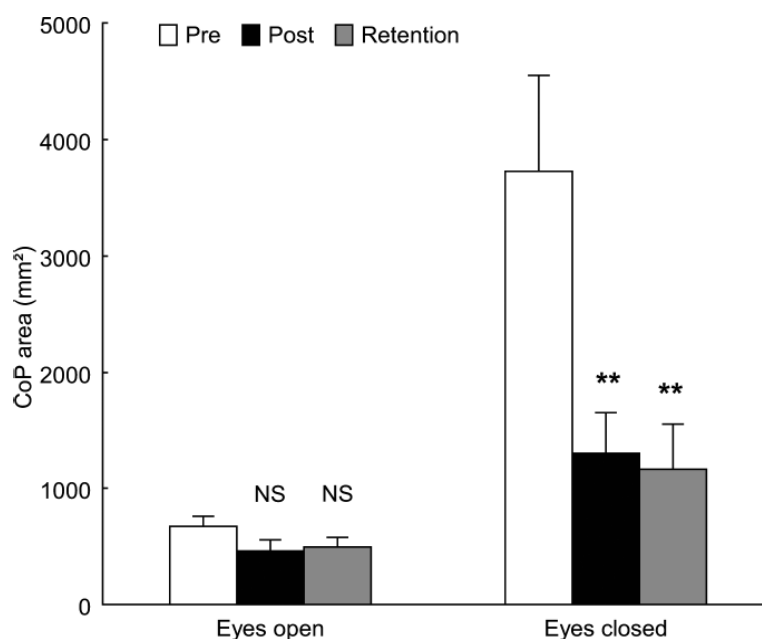
Obr. 3: Porovnání stabilometrických parametrů CoP u skupiny rehabilitované standardně (control) a pomocí zpětné vazby (feedback), TA – plocha stabilogramu, LI – délka křivky stabilogramu.

Výsledky studie ukazují, že včasná rehabilitace doplněná o vizuální zpětnou vazbu urychluje kompenzaci poruchy stability stoje u pacientů v časném stádiu po resekci vestibulárního schwannomu. Kontrolní klinické vyšetření pacientů s odstupem šesti měsíců a dále jednoho roku od operace ukázalo, že pacienti nemají omezení ve většině každodenních aktivit a po operaci se vrátili k pracovním a volnočasovým aktivitám, které vykonávali před operací.



Biofeedback pomocí elektrotaktilní stimulací jazyka jsme poprvé použili u 64 letého pacienta s paleocerebelárním syndromem vzniklým na podkladě ischemie ve vertebrobazilárním povodí. Z námi získaných pilotních výsledků je patrné, že u referovaného pacienta došlo po rehabilitaci ke klinicky významnému zlepšení objektivních parametrů posturální stability. Kazuistiku uvádíme z důvodu, že jde o první práci v literatuře, kde byla tato metoda použita u pacienta s mozečkovou poruchou.

Ve třetí studii podrobněji referujeme výsledky této rehabilitační metody na souboru devíti pacientů s degenerativním postižením mozečku, kteří absolvovali intenzivní dvoutýdenní rehabilitaci v rámci hospitalizace. Statistická analýza dat průměrné rychlosti a 95% plochy konfidenční elipsy CoP při vyšetření stoje prokázala statisticky významné zlepšení po ukončení rehabilitace. Tento efekt přetrval měsíc po ukončení rehabilitace (Obr. 4).



Obr. 4: Porovnání parametru 95% plochy konfidenční elipsy u skupiny rehabilitované elektrotaktilní zpětnou vazbou Pre – před rehabilitací, Post – po ukončení rehabilitace, Retention – po měsíci od ukončení rehabilitace, \*\*  $p \leq 0.01$ .

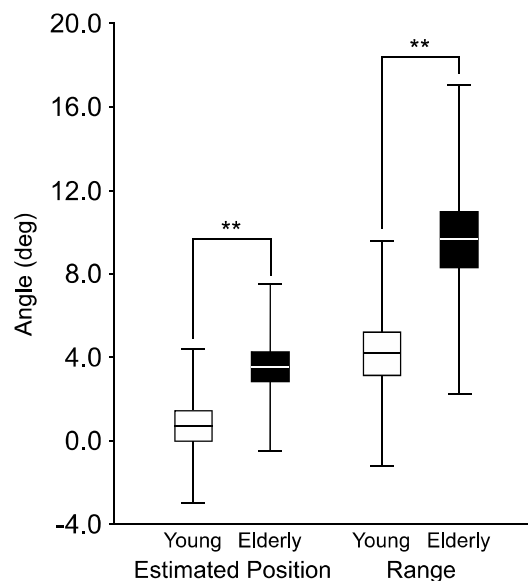
Hlavním výsledkem této klinické studie je, že pacienti s degenerativním onemocněním mozečku jsou schopni využít aditivní informaci o posturalních výchytkách zprostředkovanou přístrojem pro elektrotaktilní stimulaci jazyka ke zlepšení posturální kontroly stoje. Tento efekt přetrvává i jeden měsíc po ukončení terapie.

V práci hodnotící vliv aplikace gentamicinu a cílené rehabilitace v předoperačním období u pacientů s vestibulárním schwannomem jsme nenalezli statisticky významné rozdíly mezi skupinou prehabituovaných pacientů a pacientů léčených standardním postupem bez aplikace gentamicinu.

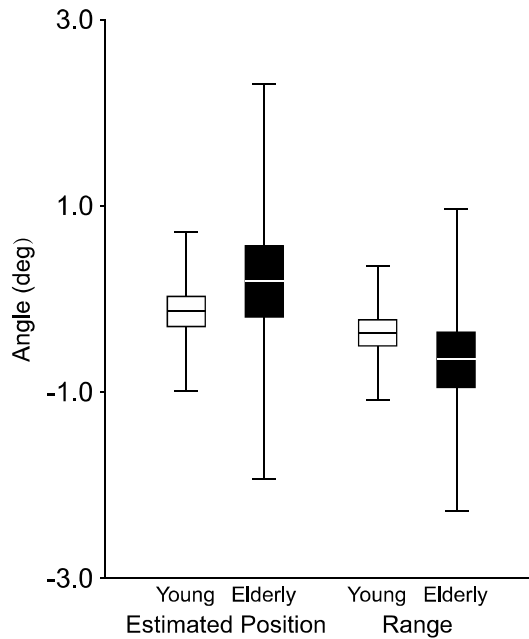
## 5.2 Práce hodnotící poruchy percepce vertikály

Ve studii věnující se percepci subjektivní vizuální vertikály jsme našli statisticky významné rozdíly v odchylce a v rozptylu (nepřesnosti) určení subjektivní vizuální vertikály mezi zdravými kontrolami a pacienty s idiopatickou skoliózou.

Studie hodnotící vliv stárnutí na percepci vertikály prokázala rozdíly mezi mladými jedinci a seniory. Statisticky významné rozdíly v odchylce a v rozptylu (nepřesnosti) určení vertikály jsme našli při vyšetření subjektivní haptické vertikály (Obr. 5). Vyšetření subjektivní vizuální vertikály naopak neprokázalo statisticky významné rozdíly mezi mladými jedinci a seniory (Obr. 6).



Obr. 5: Rozdíly v odchylce a v rozptylu (nepřesnosti) subjektivní haptické vertikály mezi mladými jedinci a seniory, \*\*  $p \leq 0.01$ .



Obr. 6: Rozdíly v odchylce a v rozptylu (nepřesnosti) subjektivní vizuální vertikály mezi mladými jedinci a seniory.

### 5.3 Práce zabývající se využitím posturografie a inerciálních měřících senzorů

Ve studiích hodnotících posturální výchylky těla u pacientů s onemocněním mozečku naše výsledky ukazují, že data z inerciálních senzorů je možné použít k identifikaci mozečkové patologie. Statistická analýza měřených parametrů ukazuje významné rozdíly v hodnocených parametrech při porovnání pacientů se zdravými kontrolami.

Ve studii hodnotící interindividuální variabilitu Sémontova repositionního manévru jsme ověřili, že existuje několik faktorů, které zásadně ovlivňují přesnost provedení repositione. Konkrétně se jedná o: výšku probanda, fáze pohybu, interakce mezi fází pohybu a výškou probanda a také fází pohybu a výškou terapeuta. Největší zaznamenaný rozsah od roviny zadního kanálku byl v rozmezí  $-37.17^\circ$  až  $31^\circ$ . Získaná data poukazují na překvapivě vysokou variabilitu v provádění Sémontova manévru.

Detailní popis výsledků je uveden in extenso v přílohách této práce.

## 6 DISKUZE

### 6.1 Práce hodnotící účinnost rehabilitace

V prvních čtyřech studiích jsme zkoumali účinnost rehabilitace se zpětnou vazbou u pacientů s poruchami stability na podkladě onemocnění vestibulárního labyrintu a mozečku. Výsledky předchozích klinických studií ukazují, že rehabilitace zlepšuje posturální stabilitu nemocných, a že změny navozené rehabilitací mohou přetrvávat i po jejím ukončení (93, 104, 105).

Tento efekt se obecně přisuzuje fenoménu neuroplasticity. Přesto, že doposud není zcela jasné, které konkrétní mechanismy jsou za neuroplasticitu zodpovědné, obecně chápeme tento pojem jako schopnost nervového systému reagovat na změny vnitřních a zevních podmínek a přizpůsobovat se jim. Neuroplastické změny vedou k funkční, popřípadě i strukturální, reorganizaci CNS. Tyto změny probíhají jak na úrovni synapsí (např. změna senzitivity receptoru), tak lokálních nervových okruhů (např. remodelace dendritického stromu), či dokonce na úrovni celého systému (106, 107).

U pacientů s jednostranným vestibulárním postižením můžeme tento efekt přisuzovat procesu vestibulární kompenzace, kterou výrazně ovlivňuje cílená rehabilitace (108, 109). Během vestibulární kompenzace je modulována neuronální aktivita na úrovni vestibulárních jader a mozečku (47, 110).

Základní hypotéza studie zabývající se hodnocením účinnosti rehabilitace u pacientů po resekci vestibulárního schwannomu byla, že terapie s vizuální zpětnou vazbou bude urychlovat kompenzaci vestibulospinalního reflexu (stabilita při stoji). Změnu posturografických parametrů jsme sledovali v relativně krátkém časovém intervalu dvou týdnů v průběhu hospitalizace pacienta. Fakt, že vestibulární rehabilitace podporuje kompenzaci, byl již v minulosti ověřen jak experimenty na zvířecím modelu, tak studii na pacientech (6, 77). V naší práci jsme hodnotili, zda bude mít vliv doplnění vizuální zpětné vazby na rychlost kompenzace poruchy stability.

Podrobná statistická analýza získaných dat potvrdila hypotézu, že pacienti rehabilitovaní s vizuální zpětnou vazbou vykazují v časném pooperačním období lepší stabilitu v porovnání se skupinou pacientů, kde nebyla zpětná vazba využita.

Porucha stability je dominantní obtíží především v časném pooperačním období. Postupem času dochází k její úpravě. Přestože u většiny pacientů dojde k úpravě stability, je z výsledků některých studií patrné, že existují pacienti, kteří si na posturální instabilitu stěžují i několik let po operaci. Tato skutečnost může výrazně ovlivňovat kvalitu života nemocných

(111). U těchto pacientů je třeba provádět rehabilitační cvičení i po ukončení hospitalizace. Jedním z řešení může být využití systémů pro rehabilitaci se zpětnou vazbou, které jsou výzavně levnější než námi použitý systém.

Během posledních několika let jsme vyvinuli rámci spolupráce Fakulty biomedicínského inženýrství ČVUT a 1. a 2. LF UK interaktivní rehabilitační systém Homebalance. Tento systém se skládá z plošiny Nintendo Wii a tabletu, jež jsou propojeny pomocí technologie bluetooth. (112). Kromě využití ve zdravotnických zařízeních je vhodným prostředkem pro domácí VRHB. Výhodou je nízká pořizovací cena a nízká hmotnost, která umožňuje snadný přenos. Nyní plánujeme využít tento systém také pro domácí terapii pacientů, u kterých je prodloužena doba vestibulární kompenzace.

Cílem studie věnující se využití elektrotaktilní stimulace jazyka u pacientů s degenerativním onemocněním mozečku bylo ověřit, zda je možné tuto metodu využít v rehabilitaci mozečkových ataxií a zda bude mít terapie vliv na změny stability stoje. Posturografické parametry jsme sledovali ve dvou časových intervalech. Hodnocen byl krátkodobý účinek terapie bezprostředně po ukončení rehabilitace a dlouhodobý účinek s odstupem jednoho měsíce.

Cílovou skupinou většiny prací, které se zabývaly vlivem terapie elektrotaktilní stimulací jazyka, byli pacienti s periferní vestibulární poruchou (93-95). Jako první jsme publikovali kazuistiku, ve které referujeme o možnosti využití této metody pro rehabilitaci pacienta s poruchou mozečku (113). Naše další studie je první publikací, která zkoumala účinek rehabilitace s elektrotaktilní stimulací jazyka u souboru pacientů s degenerativním mozečkovým onemocněním. Hlavním zjištěním je, že pacienti s degenerativním onemocněním mozečku jsou schopni využít aditivní informaci o poloze hlavy zprostředkovanou elektrotaktilní stimulací jazyka ke zlepšení stability stoje. Zlepšení posturální stability pacientů si vysvětlujeme neuroplastickými změnami v CNS, ke kterým došlo v důsledku pravidelné somatosenzorické aferentace. Naši hypotézu podporuje studie autorů Wildenberg et al., ve které byl zkoumán vliv pravidelné elektrotaktilní stimulace jazyka u jedinců s chronickou poruchou stability. Autoři došli k závěru, že taktilní stimulace jazyka vede ke změnám aktivity v oblasti mozkové kůry a mozečku. Neuroplastické změny jsou způsobeny pravidelnou aferentací vedenou z receptorů jazyka prostřednictvím nervus trigeminus, který díky spojům s vestibulárními jádry v mozkovém kmeni ovlivňuje aktivitu oblastí zodpovědných za kontrolu stability (114).

Ke zlepšení stability stoje našich pacientů mohla vést i facilitace reziduální cerebelární funkce prostřednictvím aferentních spojů s vestibulárními jádry nebo zapojení jiných oblastí CNS do senzomotorické integrace (115).

Přesto že se jedná v případě elektrotaktilní stimulace jazyka o velmi zajímavou metodu, jejíž účinek byl opakovaně prokázán, rutinní rehabilitační program pomocí této metody nebyl v Neurootologickém centru 1. a 2. lékařské fakulty UK a FN Motol zaveden. Důvodem je především vysoká pořizovací cena systému, která v budoucnu pravděpodobně neumožní rozšíření metody. Dalším důvodem je skutečnost že společnost Wicab BrainPort® Technologies nezískala pro systém certifikaci FDA (US Food & Drug Administration), nutnou ke komerčnímu prodeji přístroje v USA. Společnost se nyní přeorientovala na vývoj zařízení, které umožňuje přenos vizuálního vjemu pomocí elektrotaktilní stimulace jazyka u nevidomých (116).

Pilotní výsledky studie hodnotící vliv aplikace gentamicinu a cílené rehabilitace v předoperačním období u pacientů s vestibulárním schwannomem neprokázali statisticky významné rozdíly mezi skupinou prehabituovaných pacientů a pacientů léčených standardním postupem. Přestože mezi oběma skupinami pacientů nebyl nalezen signifikantní rozdíl ve výsledcích dotazníkového šetření, ze získaných dat je patrné, že pacienti kterým byl aplikován gentamicin, vykazovali nižší citlivost k optokinetické stimulaci. Proto, abychom se mohli vyjádřit k účinnosti tohoto postupu bude nutné analyzovat data z většího souboru pacientů a zhodnotit také výsledky jiných metod jako jsou např. posturografie a vnímání subjektivní vizuální vertikály.

Výsledky naší práce podporují empirickou zkušenost pozitivního vlivu vestibulární rehabilitace u pacientů s poruchami stability. Současný výzkum v oblasti rehabilitace se soustředí především na zavádění nových technologií, jako jsou biologická zpětná či virtuální realita. Některé studie však ukazují, že rozdíl mezi standardní rehabilitací a rehabilitací využívající moderních technologií není velký (117). Z klinického hlediska je větším problémem skutečnost, že mezi pacienty rehabilitovanými stejnou metodou se často vyskytují nápadné interindividuální rozdíly v rychlosti a kvalitě kompenzace. V budoucnu bychom se chtěli zaměřit na studium faktorů ovlivňujících tuto skutečnost, abychom byli schopni identifikovat pacienty, u kterých je zapotřebí intenzivnější rehabilitační intervence.

## **6.2 Práce hodnotící poruchy percepce vertikály**

Vnímání vektoru gravitační síly je u člověka velmi přesné. Umožňuje jej bezchybná multisenzorická aferentace z vestibulárních labyrintů, vizuálního systému a

somatosenzorického systému. V klinické praxi se často využívá vyšetření subjektivní vizuální vertikály k objektivizaci funkce otolitového systému. (14). Autoři Brandt a Dieterich uvádějí, že odchylka SVV je vůbec necitlivějším znakem tonické funkce labyrintu (15).

Vyšetřovat můžeme také haptickou vertikálu a posturální vertikálu. Subjektivní haptická vertikála je schopnost orientovat předmět vertikálně pomocí horní končetiny s vyloučením zraku. Subjektivní posturální vertikála je schopnost orientovat celé tělo bez využití zrakové informace do vertikální polohy.

Subjektivní vertikálu měříme jako odchylku od fyzikální vertikály ve stupních. Subjektivní vertikála představuje stupeň odchylky interní reprezentace prostoru od skutečné vertikály, tedy chybu souřadnicové soustavy, kterou mozek považuje za správnou a v jejímž rámci jsou kalkulovány všechny kompenzační reakce CNS – posturální, okulomotorické, percepční (14, 118).

Za narušení percepce subjektivní vizuální vertikály jsou nejčastěji zodpovědné poruchy otolitového systému a to jak jeho periferní, tak centrální části. Na percepci subjektivní haptické vertikály se podílejí zejména informace ze somatosenzorického systému (119).

Hlavním výsledkem naší studie věnující se problematice vlivu věku na vnímání vertikály je fakt, že existují statisticky významné rozdíly v odchylce a v rozptylu (nepřesnosti) určení subjektivní haptické vertikály mezi mladými a seniory. Vyšetření subjektivní vizuální vertikály naopak neprokázalo statisticky významné rozdíly mezi mladými jedinci a seniory.

Některé studie ukazují, že za tuto změnu může být zodpovědná porucha propriocepce, která je fyziologickým důsledkem stárnutí (120). Zajímavým zjištěním je fakt, že se skupina mladých a seniorů lišila v přesnost nastavení haptické vertikály při pohybu předloktí do supinace. Naopak při pohybu předloktí do pronace jsme nenalezli statisticky významný rozdíl mezi skupinami. Toto zjištění si vysvětlujeme zejména rozdílným napětím tkání obsahujících receptory somatosenzorického systému při supinačním a pronačním postavení ruky, které následně ovlivňuje přesnost pohybu (121).

Velmi zajímavým zjištěním je, že jedinci s idiopatickou skoliózou mají abnormální percepci subjektivní vizuální vertikály oproti stejně starým jedincům bez vertebrogenní patologie. Statisticky významný rozdíl jsme prokázali v odchylce subjektivní vizuální vertikály od geofyzikální vertikály a také v rozptylu (nepřesnosti) určení. Výsledky podporují hypotézu, že pacienti se skoliózou mohou mít asymetrii ve funkci otolitového systému. Závěry naší práce podporují poznatky jiných autorů, kteří tento předpoklad zkoumali na zvířecím modelu a nemocných s idiopatickou skoliózou (122, 123). Deformitu páteře, shodnou se zakřivením při skolióze, demonstrují autoři Waele et al. na zvířecím modelu, u

kterého byla experimentálně provedena léze v oblasti otolitového systému (124). Autoři Wiener-Valcher a Mazda studovali funkci otolitového systému dětí se skoliózou, z vyšetřené skupiny mělo 67 % dětí signifikantně rozdílné nálezy proti zdravým kontrolám (125).

To, že mají pacienti se skoliózou narušenou percepci vertikality však nevysvětluje, zda je tato porucha důsledkem skoliózy nebo její příčinou.

Problémem, se kterým se setkáváme při léčbě pacientů se skoliózou, je fakt, že neznáme všechny faktory mající vliv na progresi onemocnění. Mezi často zmiňované patří např. přítomnost lehké mozečkové symptomaticky nebo hypermobilita (126). Domníváme se, že také porucha percepcie vertikality může mít vliv na vývoj onemocnění. Tato skutečnost by mohla být v praxi využitelná, protože vyšetření subjektivní vizuální vertikály je časově a technicky nenáročné a umožňuje objektivizovat funkci nervového systému.

### **6.3 Práce zabývající se využitím posturografie a inerciálních měřících senzorů**

Ve studiích jsme zkoumali, zda je možné využít posturografické vyšetření nebo inerciální senzory pro identifikaci posturálních výchylek u pacientů s poruchami rovnováhy. Hlavním zjištěním těchto prací je, že v hodnocených parametrech jsme schopni nalézt rozdíly mezi zdravými jedinci a pacienty s poruchou mozečku (127-129).

V praxi posturografii a inerciální senzory užíváme zejména ke kvantifikaci a zaznamenání posturálních výchylek u pacientů s poruchami stability. Vyšetření je vzhledem k časové nenáročnosti a neinvazivnímu charakteru možné kdykoli opakovat a tím nám umožňuje sledování vývoje onemocnění v čase, nebo posouzení efektu léčby. Využití těchto metod s cílem stanovení topické diagnózy je předmětem řady odborných diskuzí a studií. Výsledky jsou často rozporuplné a jejich výtěžnost je také neuspokojivá. Přesto existují důkazy, které podporují zásadní význam těchto vyšetření. V určitých případech je i možné stabilometrii využít pro stanovení diagnózy (130).

Několik studií zjišťovalo, zda je možné pomocí stabilometrie rozlišit zdravé jedince a pacienty s poruchou mozečku, pokud budou porovnány pouze parametry CoP (33). Patologické výsledky byly nalezeny jen u 86% pacientů s poruchou mozečku. Naše výsledky ukazují, že analýza některých parametrů umožňuje odlišit pacienty s mozečkovým onemocněním od zdravých osob. Nevýhodou těchto vyšetření je nedostatek standardizovaných protokolů umožňujících srovnávání výsledků mezi jednotlivými laboratořemi a relativně vysoké pořizovací náklady a závislost na technických odborných znalostech při zpracování dat. Toto jsou hlavní důvody, které brání snadné implementaci těchto vyšetřovacích metod do běžné klinické praxe.



## 7 ZÁVĚRY

Konkrétně lze říci, že bylo dosaženo těchto závěrů.

- Cílenou rehabilitací doplněnou o vizuální zpětnou vazbu jsme schopni urychlit kompenzaci poruchy stability stoje u pacientů v časném pooperačním období po resekcii vestibulárního schwannomu.
- Rehabilitace pomocí elektrotaktilní stimulace jazyka je vhodnou symptomatickou léčbou pro pacienty s degenerativním postižením mozečku. Efekt léčby přetrvává i měsíc po ukončení rehabilitace.
- Pilotní výsledky hodnotící vliv předoperační aplikace gentamicinu a cílené rehabilitace u pacientů s vestibulárním schwannomem neprokazují zlepšení kompenzace v období po operaci v porovnání se standardním postupem.
- Věk má vliv na percepci vertikály, prokázali jsme rozdíly mezi mladými jedinci a seniory v odchylce a v rozptylu subjektivní haptické vertikály. Vyšetření subjektivní vizuální vertikály naopak neprokázalo rozdíly mezi mladými jedinci a seniory.
- Pacienti s idiopatickou skoliózou mají rozdílnou percepci subjektivní zrakové vertikály proti stejně starým jedincům bez vertebrogenní patologie.
- Studie hodnotící posturální výchylky těla u pacientů s onemocněním mozečku ukazují, že data z inerciálních senzorů a posturografických plošin je možné využít k odlišení mozečkové patologie.
- Inerciální senzory je možné použít také k identifikaci faktorů ovlivňujících interindividuální variabilitu Sémontova repositionálního manévru užívaného k léčbě pacientů s benigním paroxysmálním polohovým vertigemem.

## LITERATURA

1. Schlick C, Schniepp R, Loidl V, Wuehr M, Hesselbarth K, Jahn K. Falls and fear of falling in vertigo and balance disorders: A controlled cross-sectional study. *Journal of vestibular research : equilibrium & orientation*. 2016;25(5-6):241-51.
2. Murdin L, Schilder AG. Epidemiology of balance symptoms and disorders in the community: a systematic review. *Otology & neurotology : official publication of the American Otological Society, American Neurotology Society [and] European Academy of Otology and Neurotology*. 2015 Mar;36(3):387-92.
3. Agrawal Y, Carey JP, Della Santina CC, Schubert MC, Minor LB. Disorders of balance and vestibular function in US adults: data from the National Health and Nutrition Examination Survey, 2001-2004. *Archives of internal medicine*. 2009 May 25;169(10):938-44.
4. Neuhauser HK. Epidemiology of vertigo. *Current opinion in neurology*. 2007 Feb;20(1):40-6.
5. Cawthorne T. The physiological basis for head exercises. *Journal of the Chartered Society of Physiotherapy*. 1944;3:106-7.
6. Strupp M, Arbusow V, Maag KP, Gall C, Brandt T. Vestibular exercises improve central vestibulospinal compensation after vestibular neuritis. *Neurology*. 1998 Sep;51(3):838-44.
7. Jahn K, Strupp M, Krafczyk S, Schuler O, Glasauer S, Brandt T. Suppression of eye movements improves balance. *Brain : a journal of neurology*. 2002 Sep;125(Pt 9):2005-11.
8. Brandt T, Dichgans J, Koenig E. Differential effects of central versus peripheral vision on egocentric and exocentric motion perception. *Experimental brain research*. 1973 Mar 19;16(5):476-91.
9. Paulus WM, Straube A, Brandt T. Visual stabilization of posture. Physiological stimulus characteristics and clinical aspects. *Brain : a journal of neurology*. 1984 Dec;107 ( Pt 4):1143-63.
10. Allum JH, Honegger F, Acuna H. Differential control of leg and trunk muscle activity by vestibulo-spinal and proprioceptive signals during human balance corrections. *Acta otolaryngologica*. 1995 Mar;115(2):124-9.
11. Keshner EA, Allum JH, Pfaltz CR. Postural coactivation and adaptation in the sway stabilizing responses of normals and patients with bilateral vestibular deficit. *Experimental brain research*. 1987;69(1):77-92.
12. Magnusson M, Johansson R, Wiklund J. Galvanically induced body sway in the anterior-posterior plane. *Acta oto-laryngologica*. 1990 Jul-Aug;110(1-2):11-7.
13. Kingma H, van de Berg R. Anatomy, physiology, and physics of the peripheral vestibular system. *Handb Clin Neurol*. 2016;137:1-16.

14. Bronstein AM. The interaction of otolith and proprioceptive information in the perception of verticality. The effects of labyrinthine and CNS disease. *Annals of the New York Academy of Sciences*. 1999 May 28;871:324-33.
15. Dieterich M, Brandt T. Ocular torsion and tilt of subjective visual vertical are sensitive brainstem signs. *Ann Neurol*. 1993 Mar;33(3):292-9.
16. Baloh WR, Kerber AK. *Clinical neurophysiology of the vestibular system*. Gilman S, Herdman WJ, editors.: Oxford University Press; 2011.
17. Zwergal A, Rettinger N, Frenzel C, Dieterich M, Brandt T, Strupp M. A bucket of static vestibular function. *Neurology*. 2009 May 12;72(19):1689-92.
18. Bergmann J, Kreuzpointner MA, Krewer C, Bardins S, Schepermann A, Koenig E, et al. The subjective postural vertical in standing: reliability and normative data for healthy subjects. *Atten Percept Psychophys*. 2015 Apr;77(3):953-60.
19. Perennou DA, Mazibrada G, Chauvineau V, Greenwood R, Rothwell J, Gresty MA, et al. Lateropulsion, pushing and verticality perception in hemisphere stroke: a causal relationship? *Brain : a journal of neurology*. 2008 Sep;131(Pt 9):2401-13.
20. Flanagan JR, Bowman MC, Johansson RS. Control strategies in object manipulation tasks. *Curr Opin Neurobiol*. 2006 Dec;16(6):650-9.
21. Gentaz E, Baud-Bovy G, Luyat M. The haptic perception of spatial orientations. *Experimental brain research*. 2008 May;187(3):331-48.
22. Sarnat HB, Netsky MG. *Evolution of the nervous system*. New York: Oxford University Press; 1981.
23. Angelaki DE, Cullen KE. Vestibular system: the many facets of a multimodal sense. *Annu Rev Neurosci*. 2008;31:125-50.
24. Biondi A, Ricciardi GK, Faillot T, Capelle L, Van Effenterre R, Chiras J. Hemangioblastomas of the lower spinal region: report of four cases with preoperative embolization and review of the literature. *AJNR American journal of neuroradiology*. 2005 Apr;26(4):936-45.
25. Hallpike CS. On the case for repeal of Ewald's second Law. Some introductory remarks. *Acta oto-laryngologica Supplementum*. 1961;159:7-14.
26. Fetter M. Vestibulo-ocular reflex. *Dev Ophthalmol*. 2007;40:35-51.
27. Hain TC. Neurophysiology of vestibular rehabilitation. *NeuroRehabilitation*. 2011;29(2):127-41.
28. Schubert MC, Minor LB. Vestibulo-ocular physiology underlying vestibular hypofunction. *Phys Ther*. 2004 Apr;84(4):373-85.
29. Goldberg JM, Fernandez C. Physiology of peripheral neurons innervating semicircular canals of the squirrel monkey. 3. Variations among units in their discharge properties. *Journal of neurophysiology*. 1971 Jul;34(4):676-84.

30. Cullen KE. Physiology of central pathways. *Handb Clin Neurol*. 2016;137:17-40.
31. Barmack NH. Central vestibular system: vestibular nuclei and posterior cerebellum. *Brain Res Bull*. 2003 Jun 15;60(5-6):511-41.
32. Tyler DB, Bard P. Motion sickness. *Physiological reviews*. 1949 Oct;29(4):311-69.
33. Diener HC, Dichgans J, Bacher M, Gompf B. Quantification of postural sway in normals and patients with cerebellar diseases. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*. 1984 Feb;57(2):134-42.
34. Takakusaki K. Functional Neuroanatomy for Posture and Gait Control. *J Mov Disord*. 2017 Jan;10(1):1-17.
35. Bronstein AM. What the vestibulo-spinal system does and what it doesn't. *Suppl Clin Neurophysiol*. 2006;58:120-33.
36. Allum JH, Gresty M, Keshner E, Shupert C. The control of head movements during human balance corrections. *Journal of vestibular research : equilibrium & orientation*. 1997 Mar-Jun;7(2-3):189-218.
37. Hotson JR, Baloh RW. Acute vestibular syndrome. *N Engl J Med*. 1998 Sep 03;339(10):680-5.
38. Eggers SD, Zee DS. Evaluating the dizzy patient: bedside examination and laboratory assessment of the vestibular system. *Seminars in neurology*. 2003 Mar;23(1):47-58.
39. Fetter M, Dichgans J. Vestibular neuritis spares the inferior division of the vestibular nerve. *Brain : a journal of neurology*. 1996 Jun;119 ( Pt 3):755-63.
40. Kim JS, Zee DS. Clinical practice. Benign paroxysmal positional vertigo. *N Engl J Med*. 2014 Mar 20;370(12):1138-47.
41. Zverina E. [Acoustic neuroma--vestibular schwannoma--personal experience of up-to-date management]. *Casopis lekaru ceskych*. 2010;149(6):269-76.
42. Stucken EZ, Brown K, Selesnick SH. Clinical and diagnostic evaluation of acoustic neuromas. *Otolaryngologic clinics of North America*. 2012 Apr;45(2):269-84, vii.
43. Black FO. What can posturography tell us about vestibular function? *Annals of the New York Academy of Sciences*. 2001 Oct;942:446-64.
44. Wackym PA. Stereotactic radiosurgery, microsurgery, and expectant management of acoustic neuroma: basis for informed consent. *Otolaryngologic clinics of North America*. 2005 Aug;38(4):653-70.
45. Brandt T, Strupp M. General vestibular testing. *Clinical neurophysiology : official journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology*. 2005 Feb;116(2):406-26.
46. Brandt T, Strupp M, Benson J. You are better off running than walking with acute vestibulopathy. *Lancet*. 1999 Aug 28;354(9180):746.

47. Curthoys IS, Halmagyi GM. Behavioural and neural correlates of vestibular compensation. *Bailliere's clinical neurology*. 1992 Aug;1(2):345-72.
48. Paulson HL. The spinocerebellar ataxias. *J Neuroophthalmol*. 2009 Sep;29(3):227-37.
49. Schols L, Bauer P, Schmidt T, Schulte T, Riess O. Autosomal dominant cerebellar ataxias: clinical features, genetics, and pathogenesis. *Lancet Neurol*. 2004 May;3(5):291-304.
50. Klockgether T. Sporadic ataxia with adult onset: classification and diagnostic criteria. *Lancet Neurol*. 2010 Jan;9(1):94-104.
51. Horak FB, Diener HC. Cerebellar control of postural scaling and central set in stance. *Journal of neurophysiology*. 1994 Aug;72(2):479-93.
52. Baloh RW, Jacobson KM, Beykirch K, Honrubia V. Static and dynamic posturography in patients with vestibular and cerebellar lesions. *Archives of neurology*. 1998 May;55(5):649-54.
53. Morton SM, Bastian AJ. Cerebellar control of balance and locomotion. *The Neuroscientist : a review journal bringing neurobiology, neurology and psychiatry*. 2004 Jun;10(3):247-59.
54. Mauritz KH, Schmitt C, Dichgans J. Delayed and enhanced long latency reflexes as the possible cause of postural tremor in late cerebellar atrophy. *Brain : a journal of neurology*. 1981 Mar;104(Pt 1):97-116.
55. Krafczyk S, Tietze S, Swoboda W, Valkovic P, Brandt T. Artificial neural network: a new diagnostic posturographic tool for disorders of stance. *Clinical neurophysiology : official journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology*. 2006 Aug;117(8):1692-8.
56. Snapp HA, Schubert MC. Habilitation of auditory and vestibular dysfunction. *Otolaryngologic clinics of North America*. 2012 Apr;45(2):487-511, x-xi.
57. Brandt T. Bilateral vestibulopathy revisited. *European journal of medical research*. 1996 May 24;1(8):361-8.
58. Marioni G, Fermo S, Lionello M, Fasanaro E, Giacomelli L, Zanon S, et al. Vestibular rehabilitation in elderly patients with central vestibular dysfunction: a prospective, randomized pilot study. *Age*. 2013 Dec;35(6):2315-27.
59. Black FO, Pesznecker SC. Vestibular adaptation and rehabilitation. *Current opinion in otolaryngology & head and neck surgery*. 2003 Oct;11(5):355-60.
60. Norre ME, Beckers AM. Vestibular habituation training. Specificity of adequate exercise. *Archives of otolaryngology--head & neck surgery*. 1988 Aug;114(8):883-6.
61. Telian SA, Shepard NT. Update on vestibular rehabilitation therapy. *Otolaryngologic clinics of North America*. 1996 Apr;29(2):359-71.

62. Hall CD, Herdman SJ, Whitney SL, Cass SP, Clendaniel RA, Fife TD, et al. Vestibular Rehabilitation for Peripheral Vestibular Hypofunction: An Evidence-Based Clinical Practice Guideline: FROM THE AMERICAN PHYSICAL THERAPY ASSOCIATION NEUROLOGY SECTION. *Journal of neurologic physical therapy : JNPT*. 2016 Apr;40(2):124-55.
63. Norre ME, Beckers A. Rehabilitation treatment for vertigo. *International journal of rehabilitation research Internationale Zeitschrift fur Rehabilitationsforschung Revue internationale de recherches de readaptation*. 1988;11(2):117-23.
64. Nudo RJ. Adaptive plasticity in motor cortex: implications for rehabilitation after brain injury. *Journal of rehabilitation medicine*. 2003 May(41 Suppl):7-10.
65. Allum JH, Ledin T. Recovery of vestibulo-ocular reflex-function in subjects with an acute unilateral peripheral vestibular deficit. *Journal of vestibular research : equilibrium & orientation*. 1999;9(2):135-44.
66. Miles FA, Braitman DJ. Long-term adaptive changes in primate vestibuloocular reflex. II. Electrophysiological observations on semicircular canal primary afferents. *Journal of neurophysiology*. 1980 May;43(5):1426-36.
67. Mathog RH, Peppard SB. Exercise and recovery from vestibular injury. *American journal of otolaryngology*. 1982 Nov-Dec;3(6):397-407.
68. Allison LK, Kiemel T, Jeka JJ. Multisensory reweighting of vision and touch is intact in healthy and fall-prone older adults. *Experimental brain research*. 2006 Nov;175(2):342-52.
69. Jeka JJ, Lackner JR. Fingertip contact influences human postural control. *Experimental brain research*. 1994;100(3):495-502.
70. Mergner T, Maurer C, Peterka RJ. Sensory contributions to the control of stance: a posture control model. *Advances in experimental medicine and biology*. 2002;508:147-52.
71. Szturm T, Ireland DJ, Lessing-Turner M. Comparison of different exercise programs in the rehabilitation of patients with chronic peripheral vestibular dysfunction. *Journal of vestibular research : equilibrium & orientation*. 1994 Nov-Dec;4(6):461-79.
72. Johansson M, Akerlund D, Larsen HC, Andersson G. Randomized controlled trial of vestibular rehabilitation combined with cognitive-behavioral therapy for dizziness in older people. *Otolaryngology--head and neck surgery : official journal of American Academy of Otolaryngology-Head and Neck Surgery*. 2001 Sep;125(3):151-6.
73. Whitney SL, Sparto PJ. Principles of vestibular physical therapy rehabilitation. *NeuroRehabilitation*. 2011;29(2):157-66.
74. Eleftheriadou A, Skalidi N, Velegrakis GA. Vestibular rehabilitation strategies and factors that affect the outcome. *European archives of oto-rhino-laryngology : official journal of the European Federation of Oto-Rhino-Laryngological Societies*. 2012 Nov;269(11):2309-16.
75. Staab JP. Behavioral aspects of vestibular rehabilitation. *NeuroRehabilitation*. 2011;29(2):179-83.

76. Lacour M, Bernard-Demanze L. Interaction between Vestibular Compensation Mechanisms and Vestibular Rehabilitation Therapy: 10 Recommendations for Optimal Functional Recovery. *Frontiers in neurology*. 2014;5:285.
77. Igarashi M, Ishikawa K, Ishii M, Yamane H. Physical exercise and balance compensation after total ablation of vestibular organs. *Progress in brain research*. 1988;76:395-401.
78. Venosa AR, Bittar RS. Vestibular rehabilitation exercises in acute vertigo. *The Laryngoscope*. 2007 Aug;117(8):1482-7.
79. Suarez H, Arocena M, Suarez A, De Artagaveytia TA, Muse P, Gil J. Changes in postural control parameters after vestibular rehabilitation in patients with central vestibular disorders. *Acta oto-laryngologica*. 2003 Jan;123(2):143-7.
80. Cakrt O, Chovanec M, Funda T, Kalitova P, Betka J, Zverina E, et al. Exercise with visual feedback improves postural stability after vestibular schwannoma surgery. *European archives of oto-rhino-laryngology : official journal of the European Federation of Oto-Rhino-Laryngological Societies*. 2010 Sep;267(9):1355-60.
81. Danilov YP, Tyler ME, Skinner KL, Hogle RA, Bach-y-Rita P. Efficacy of electrotactile vestibular substitution in patients with peripheral and central vestibular loss. *Journal of vestibular research : equilibrium & orientation*. 2007;17(2-3):119-30.
82. Bittar RS, Barros Cde G. Vestibular rehabilitation with biofeedback in patients with central imbalance. *Brazilian journal of otorhinolaryngology*. 2011 Jun;77(3):356-61.
83. Zijlstra A, Mancini M, Chiari L, Zijlstra W. Biofeedback for training balance and mobility tasks in older populations: a systematic review. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*. 2010;7:58.
84. Bach-y-Rita P. Tactile sensory substitution studies. *Annals of the New York Academy of Sciences*. 2004 May;1013:83-91.
85. Bach-y-Rita P, S WK. Sensory substitution and the human-machine interface. *Trends in cognitive sciences*. 2003 Dec;7(12):541-6.
86. Barclay-Goddard R, Stevenson T, Poluha W, Moffatt ME, Taback SP. Force platform feedback for standing balance training after stroke. *The Cochrane database of systematic reviews*. 2004(4):CD004129.
87. Van Peppen RP, Kortsmit M, Lindeman E, Kwakkel G. Effects of visual feedback therapy on postural control in bilateral standing after stroke: a systematic review. *Journal of rehabilitation medicine*. 2006 Jan;38(1):3-9.
88. Meldrum D, Herdman S, Moloney R, Murray D, Duffy D, Malone K, et al. Effectiveness of conventional versus virtual reality based vestibular rehabilitation in the treatment of dizziness, gait and balance impairment in adults with unilateral peripheral vestibular loss: a randomised controlled trial. *BMC ear, nose, and throat disorders*. 2012;12:3.

89. Sparrer I, Duong Dinh TA, Ilgner J, Westhofen M. Vestibular rehabilitation using the Nintendo(R) Wii Balance Board -- a user-friendly alternative for central nervous compensation. *Acta oto-laryngologica*. 2013 Mar;133(3):239-45.
90. Bergeron M, Lortie CL, Guitton MJ. Use of Virtual Reality Tools for Vestibular Disorders Rehabilitation: A Comprehensive Analysis. *Advances in medicine*. 2015;2015:916735.
91. Danilov Y, Tyler M. Brainport: an alternative input to the brain. *J Integr Neurosci*. 2005 Dec;4(4):537-50.
92. Badke MB, Sherman J, Boyne P, Page S, Dunning K. Tongue-based biofeedback for balance in stroke: results of an 8-week pilot study. *Arch Phys Med Rehabil*. 2011 Sep;92(9):1364-70.
93. Barros CG, Bittar RS, Danilov Y. Effects of electrotactile vestibular substitution on rehabilitation of patients with bilateral vestibular loss. *Neurosci Lett*. 2010 Jun 07;476(3):123-6.
94. Uneri A, Polat S. Vestibular rehabilitation with electrotactile vestibular substitution: early effects. *European archives of oto-rhino-laryngology : official journal of the European Federation of Oto-Rhino-Laryngological Societies*. 2009 Aug;266(8):1199-203.
95. Tyler M, Danilov Y, Bach YRP. Closing an open-loop control system: vestibular substitution through the tongue. *J Integr Neurosci*. 2003 Dec;2(2):159-64.
96. Cakrt O, Vyhnaek M, Slaby K, Funda T, Vuillerme N, Kolar P, et al. Balance rehabilitation therapy by tongue electrotactile biofeedback in patients with degenerative cerebellar disease. *NeuroRehabilitation*. 2012;31(4):429-34.
97. Magnusson M, Karlberg M, Tjernstrom F. 'PREHAB': Vestibular prehabilitation to ameliorate the effect of a sudden vestibular loss. *NeuroRehabilitation*. 2011;29(2):153-6.
98. Tjernstrom F, Fransson PA, Kahlon B, Karlberg M, Lindberg S, Siesjo P, et al. Vestibular PREHAB and gentamicin before schwannoma surgery may improve long-term postural function. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*. 2009 Nov;80(11):1254-60.
99. Giannuzzi AL, Merkus P, Falcioni M. The use of intratympanic gentamicin in patients with vestibular schwannoma and disabling vertigo. *Otology & neurotology : official publication of the American Otological Society, American Neurotology Society [and] European Academy of Otology and Neurotology*. 2013 Aug;34(6):1096-8.
100. Magnusson M, Kahlon B, Karlberg M, Lindberg S, Siesjo P. Preoperative vestibular ablation with gentamicin and vestibular 'prehab' enhance postoperative recovery after surgery for pontine angle tumours--first report. *Acta oto-laryngologica*. 2007 Dec;127(12):1236-40.
101. Rocchi L, Chiari L, Cappello A. Feature selection of stabilometric parameters based on principal component analysis. *Med Biol Eng Comput*. 2004 Jan;42(1):71-9.
102. Shumway-Cook A, Horak FB. Assessing the influence of sensory interaction of balance. *Suggestion from the field. Phys Ther*. 1986 Oct;66(10):1548-50.



103. Cakrt O, Slaby K, Kmet J, Kolar P, Jerabek J. Subjective visual and haptic vertical in young and elderly. *Journal of vestibular research : equilibrium & orientation*. 2016;25(5-6):195-9.
104. Cheng PT, Wang CM, Chung CY, Chen CL. Effects of visual feedback rhythmic weight-shift training on hemiplegic stroke patients. *Clinical rehabilitation*. 2004 Nov;18(7):747-53.
105. Ma CZ, Wong DW, Lam WK, Wan AH, Lee WC. Balance Improvement Effects of Biofeedback Systems with State-of-the-Art Wearable Sensors: A Systematic Review. *Sensors (Basel)*. 2016 Mar 25;16(4):434.
106. Bach-y-Rita P. Theoretical basis for brain plasticity after a TBI. *Brain Inj*. 2003 Aug;17(8):643-51.
107. Wall PD. The presence of ineffective synapses and the circumstances which unmask them. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*. 1977 Apr 26;278(961):361-72.
108. Fetter M, Zee DS, Proctor LR. Effect of lack of vision and of occipital lobectomy upon recovery from unilateral labyrinthectomy in rhesus monkey. *Journal of neurophysiology*. 1988 Feb;59(2):394-407.
109. Igarashi M, Levy JK, T OU, Reschke MF. Further study of physical exercise and locomotor balance compensation after unilateral labyrinthectomy in squirrel monkeys. *Acta oto-laryngologica*. 1981 Jul-Aug;92(1-2):101-5.
110. Brandt T, Strupp M, Arbusow V, Dieringer N. Plasticity of the vestibular system: central compensation and sensory substitution for vestibular deficits. *Adv Neurol*. 1997;73:297-309.
111. Levo H, Blomstedt G, Pyykko I. Postural stability after vestibular schwannoma surgery. *Ann Otol Rhinol Laryngol*. 2004 Dec;113(12):994-9.
112. Goble DJ, Cone BL, Fling BW. Using the Wii Fit as a tool for balance assessment and neurorehabilitation: the first half decade of "Wii-search". *Journal of neuroengineering and rehabilitation*. 2014;11:12.
113. Cakrt O, Kolar P, Cerny R, Funda T, Jerabek J. Electrotactile Stimulation of the Tongue: a New Option in the Rehabilitation of Postural Stability - a Case Report. *Ceska a Slovenska Neurologie a Neurochirurgie*. [Article]. 2009;72(4):364-7.
114. Wildenberg JC, Tyler ME, Danilov YP, Kaczmarek KA, Meyerand ME. Sustained cortical and subcortical neuromodulation induced by electrical tongue stimulation. *Brain Imaging Behav*. 2010 Dec;4(3-4):199-211.
115. Morton SM, Bastian AJ. Can rehabilitation help ataxia? *Neurology*. 2009 Dec 1;73(22):1818-9.
116. Stronks HC, Mitchell EB, Nau AC, Barnes N. Visual task performance in the blind with the BrainPort V100 Vision Aid. *Expert Rev Med Devices*. 2016 Oct;13(10):919-31.

117. Meldrum D, Herdman S, Vance R, Murray D, Malone K, Duffy D, et al. Effectiveness of conventional versus virtual reality-based balance exercises in vestibular rehabilitation for unilateral peripheral vestibular loss: results of a randomized controlled trial. *Arch Phys Med Rehabil.* 2015 Jul;96(7):1319-28 e1.
118. Perennou D, Piscicelli C, Barbieri G, Jaeger M, Marquer A, Barra J. Measuring verticality perception after stroke: why and how? *Neurophysiol Clin.* 2014 Jan;44(1):25-32.
119. Bronstein AM, Yardley L, Moore AP, Cleeves L. Visually and posturally mediated tilt illusion in Parkinson's disease and in labyrinthine defective subjects. *Neurology.* 1996 Sep;47(3):651-6.
120. Adamo DE, Martin BJ, Brown SH. Age-related differences in upper limb proprioceptive acuity. *Percept Mot Skills.* 2007 Jun;104(3 Pt 2):1297-309.
121. Hogan N. The mechanics of multi-joint posture and movement control. *Biol Cybern.* 1985;52(5):315-31.
122. Barrios C, Arroategui JI. Experimental kyphoscoliosis induced in rats by selective brain stem damage. *Int Orthop.* 1992;16(2):146-51.
123. Lambert FM, Malinvaud D, Glaunes J, Bergot C, Straka H, Vidal PP. Vestibular asymmetry as the cause of idiopathic scoliosis: a possible answer from *Xenopus*. *J Neurosci.* 2009 Oct 7;29(40):12477-83.
124. De Waele C, Graf W, Josset P, Vidal PP. A radiological analysis of the postural syndromes following hemilabyrinthectomy and selective canal and otolith lesions in the guinea pig. *Exp Brain Res.* 1989;77(1):166-82.
125. Wiener-Vacher SR, Mazda K. Asymmetric otolith vestibulo-ocular responses in children with idiopathic scoliosis. *J Pediatr.* 1998 Jun;132(6):1028-32.
126. Loeters MJ, Maathuis CG, Hadders-Algra M. Risk factors for emergence and progression of scoliosis in children with severe cerebral palsy: a systematic review. *Dev Med Child Neurol.* 2010 Jul;52(7):605-11.
127. Kutilek P, Cakrt O, Socha V, Hana K. Volume of confidence ellipsoid: a technique for quantifying trunk sway during stance. *Biomed Tech (Berl).* 2015 Apr;60(2):171-6.
128. Kutilek P, Socha V, Cakrt O, Svoboda Z. Assessment of postural stability in patients with cerebellar disease using gyroscope data. *J Bodyw Mov Ther.* 2015 Jul;19(3):421-8.
129. Schwabova J, Zahalka F, Komarek V, Maly T, Hrasky P, Gryc T, et al. Uses of the postural stability test for differential diagnosis of hereditary ataxias. *J Neurol Sci.* 2012 May 15;316(1-2):79-85.
130. Visser JE, Carpenter MG, van der Kooij H, Bloem BR. The clinical utility of posturography. *Clinical neurophysiology : official journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology.* 2008 Nov;119(11):2424-36.

## **SOUBOR PUBLIKACÍ AUTORA SE VZTAHEM K HABILITAČNÍ PRÁCI**

1. Cakrt O, Chovanec M, Funda T, Kalitova P, Betka J, Zverina E, et al. Exercise with visual feedback improves postural stability after vestibular schwannoma surgery. *European archives of oto-rhino-laryngology: official journal of the European Federation of Oto-Rhino-Laryngological Societies*. 2010 Sep;267(9):1355-60.
2. Cakrt O, Kolar P, Cerny R, Funda T, Jerabek J. Electrotactile Stimulation of the Tongue: a New Option in the Rehabilitation of Postural Stability - a Case Report. *Cesk Slov Neurol Neurochir*. 2009;72(4):364-7.
3. Cakrt O, Vyhnaek M, Slaby K, Funda T, Vuillerme N, Kolar P, et al. Balance rehabilitation therapy by tongue electrotactile biofeedback in patients with degenerative cerebellar disease. *NeuroRehabilitation*. 2012;31(4):429-34.
4. Cada Z, Balatkova Z, Chovanec M, Cakrt O, Hrubá S, Jerabek J, et al. Vertigo Perception and Quality of Life in Patients after Surgical Treatment of Vestibular Schwannoma with Pretreatment Prehabilitation by Chemical Vestibular Ablation. *Biomed Res Int*. 2016;2016:6767216.
5. Cakrt O, Slaby K, Viktorinova L, Kolar P, Jerabek J. Subjective visual vertical in patients with idiopathic scoliosis. *J Vestib Res*. 2011;21(3):161-5.
6. Cakrt O, Slaby K, Kmet J, Kolar P, Jerabek J. Subjective visual and haptic vertical in young and elderly. *J Vestib Res*. 2016;25(5-6):195-9.
7. Schwabova J, Zahalka F, Komarek V, Maly T, Hrasky P, Gryc T, et al. Uses of the postural stability test for differential diagnosis of hereditary ataxias. *J Neurol Sci*. 2012 May 15;316(1-2):79-85.
8. Kutilek P, Cakrt O, Socha V, Hana K. Volume of convex hull: a technique for quantifying human postural stability. *J Mech Med Biol*. 2016 Mar;16(2):13.
9. Kutilek P, Socha V, Cakrt O, Svoboda Z. Assessment of postural stability in patients with cerebellar disease using gyroscope data. *J Bodyw Mov Ther*. 2015 Jul;19(3):421-8.
10. Stehlikova M, Cakrt O, Bodlak I, Cada Z, Cerny R, Jerabek J. Inter-individual Variability in Processing of the Semont Liberatory Manoeuvre. *Cesk Slov Neurol Neurochir*. 2015;78(1):38-43.

Obsah od strany 48 nebylo možné zveřejnit z důvodu autorského zákona.