

**Univerzita Karlova**

**2. lékařská fakulta**

Doktorský studijní program: Fyziologie a patofyziologie člověka



**Mgr. Klára Kučerová**

Funkce vestibulárního systému u pacientů s idiopatickou skoliózou

Functions of vestibular system in patients with idiopathic scoliosis

Disertační práce

Školitel: doc. PhDr. Ondřej Čákrť, Ph.D.

Praha, 2024

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem disertační práci zpracovala samostatně a že jsem řádně uvedla a citovala všechny použité prameny a literaturu. Současně prohlašuji, že práce nebyla využita k získání jiného nebo stejného titulu.

Souhlasím s trvalým uložením elektronické verze mé práce v databázi systému meziuniverzitního projektu Theses.cz za účelem soustavné kontroly podobnosti kvalifikačních prací.

V Praze, 1. 2. 2024

Mgr. Klára Kučerová

.....

## **Poděkování**

V první řadě bych ráda poděkovala svému školiteli doc. PhDr. Ondřeji Čákrtovi, Ph.D., za odborné vedení práce, četné konzultace, motivaci, pomoc a také lidský přístup během celého postgraduálního studia. Dále bych také ráda poděkovala doc. MUDr. Jaroslavu Jeřábkovi, CSc. který mi umožnil využití neurootologické laboratoře a poskytl cenné rady. Velké poděkování patří také všem autorům publikací, které slouží jako podklad pro tuto disertační práci, stejně tak pregraduálním studentům, kteří se na studiích podíleli v rámci studentských vědeckých aktivit. Poděkování také patří mé rodině za podporu a trpělivost.

# **Funkce vestibulárního systému u pacientů s idiopatickou skoliózou**

## **Abstrakt**

Disertační práce se zaměřuje na zhodnocení vestibulárních funkcí u pacientů s idiopatickou skoliózou (IS) jakožto na jeden z důležitých faktorů ovlivňujících etiologii tohoto onemocnění. Objasnění etiologických faktorů by mohlo vést k rychlejší a cílenější diagnostice a terapii. Hlavním cílem práce bylo komplexně zhodnotit vestibulární funkce u pacientů s IS a získaná data porovnat se zdravými jedinci a pacienty s definovanou vestibulární dysfunkcí, kterou můžeme sledovat u pacientů v časně fázi po kochleární implantaci (KI). U těchto skupin jsme vyšetřili percepci prostoru, konkrétně subjektivní vizuální vertikálu (SVV), vestibulární evokované myogenní potenciály (VEMP), posturální stabilitu prostřednictvím stabilometrického vyšetření a polohu hlavy v prostoru. U pacientů s IS byla zjištěna zhoršená percepce SVV, 38 % pacientů mělo abnormální odpovědi ve VEMP, pacienti s IS vykazovali horší posturální stabilitu oproti zdravým jedincům, která se projevila větší plochou výchylek v mediolaterálním směru. U pacientů s IS jsme zaznamenali také větší spontánní úklon hlavy ve frontální rovině, zároveň jsme zjistili korelaci mezi směrem úklonu hlavy a směrem odklonu SVV. Oproti tomu jsme zjistili, že zdraví probandí vnímají SVV při prolongovaném úklonu hlavy na opačnou stranu, než je strana úklonu hlavy. Jejich výsledky tedy byly odlišné od výsledků pacientů s IS. Při vyšetřování pacientů po KI jsme zjistili, že mají po operaci narušené vestibulární funkce, ale už po 14 dnech po operaci dochází postupně k jejich kompenzaci. Z výsledků vyplývá, že někteří pacienti s IS vykazují abnormální vestibulární funkce oproti zdravým probandům a pacientům po KI.

## **Klíčová slova**

posturální stabilita, vnímání vertikály, skolióza, vestibulární evokované myogenní potenciály, postavení hlavy, etiologie, vestibulární systém

# **Vestibular function in patients with idiopathic scoliosis**

## **Abstract**

The dissertation focuses on evaluating vestibular functions in patients with idiopathic scoliosis (IS) as one of the important factors influencing the etiology of this disease. Clarification of the influence of the altered function of the vestibular system in patients with IS could lead to easier and faster diagnosis and better targeting of treatment through rehabilitation. The main goal of the work was to comprehensively evaluate vestibular functions in patients with IS and to compare it with healthy individuals and patients with defined vestibular dysfunction, which can be monitored in the early phase after cochlear implantation (CI). In these groups, we examined the perception of space, specifically the perception of the subjective visual vertical (SVV), the function of the otolith system using vestibular evoked myogenic potentials (VEMP), postural stability through a stabilometric examination, and the position of the head in space. In patients with IS, we found impaired SVV perception, 38% of patients had abnormal VEMP responses. Patients with IS showed worse postural stability compared to healthy individuals, which was manifested by greater postural deviations in the mediolateral direction. Furthermore, in patients with IS, we noted greater head tilt in the frontal plane during spontaneous posture and found a correlation between the direction of head tilt and the direction of SVV deviation. In contrast, we found that healthy probands perceive SVV during prolonged head tilt to the side opposite to the head tilt side, a different behavior compared to IS patients. In patients after CI, we found that they have a disturbed perception of SVV after the operation, but 14 days after the operation, there is a gradual compensation and a return to physiological values. The results of the work show that many patients with IS show altered vestibular functions compared to healthy individuals and patients after CI.

## **Keywords**

postural stability, vertical perception, scoliosis, vestibular evoked myogenic potentials, head position, etiology, and vestibular system

## SEZNAM ZKRATEK

<b>AIS</b>	adolescentní idiopatická skolióza
<b>AP</b>	anterioposteriorní
<b>COP</b>	centrum tlaku (z angl. center of pressure)
<b>cVEMP</b>	cervikální vestibulární evokované myogenní potenciály
<b>EMG</b>	elektromyografie
<b>IQR</b>	interkvartilní rozmezí
<b>IS</b>	idiopatická skolióza
<b>KI</b>	kochleární implantace
<b>ML</b>	mediolaterální
<b>MRI</b>	magnetická rezonance (z angl. magnetic resonance imaging)
<b>RTG</b>	rentgen
<b>SA</b>	plocha výchylek COP (z angl. sway area)
<b>SD</b>	směrodatná odchylka
<b>SEP</b>	somatosenzorické evokované potenciály
<b>SP</b>	délka trajektorie COP (z angl. sway path)
<b>SVV</b>	subjektivní vizuální verikála
<b>UVL</b>	unilaterální vestibulární léze
<b>VEMP</b>	vestibulární evokované myogenní potenciály
<b>VOR</b>	vestibulookulární reflex

# OBSAH

<b>1. ÚVOD</b> .....	<b>7</b>
1.1. IDIOPATICKÁ SKOLIÓZA .....	7
1.1.1. Postavení hlavy u pacientů se skoliózou .....	8
1.1.2. Faktory ovlivňující progresi skoliotické křivky .....	9
1.1.3. Etiologie IS.....	10
1.2. VESTIBULÁRNÍ SYSTÉM .....	15
1.2.1. Unilaterální periferní vestibulární dysfunkce .....	16
1.2.2. Vestibulární kompenzace .....	17
1.2.3. Vyšetření vestibulárního systému .....	18
<b>2. CÍLE PRÁCE A HYPOTÉZY</b> .....	<b>25</b>
<b>3. METODIKA</b> .....	<b>27</b>
3.1. ZÁKLADNÍ POPIS METOD PRO VYŠETŘENÍ VESTIBULÁRNÍHO SYSTÉMU .....	27
3.1.1. Vyšetření subjektivní vizuální vertikály.....	27
3.1.2. Vyšetření vestibulárních evokovaných myogenních potenciálů .....	28
3.1.3. Vyšetření stabilometrie .....	29
3.1.4. Vyšetření polohy hlavy .....	30
3.2. STUDIE 1: VESTIBULÁRNÍ FUNKCE U PACIENTŮ S IDIOPATICKOU SKOLIÓZOU .....	31
3.2.1. Charakteristika souboru.....	31
3.2.2. Metody .....	32
3.2.3. Statistické zpracování dat.....	33
3.3. STUDIE 2: SUBJEKTIVNÍ VIZUÁLNÍ VERTIKÁLA A POLOHA HLAVY U PACIENTŮ S IDIOPATICKOU SKOLIÓZOU .....	34
3.3.1. Charakteristika souboru.....	34
3.3.2. Metody .....	35
3.3.3. Statistické zpracování dat.....	35
3.4. STUDIE 3: VLIV PROLONGOVANÉHO ÚKLONU HLAVY NA VNÍMÁNÍ VIZUÁLNÍ VERTIKÁLY U ZDRAVÝCH PROBANDŮ .....	36
3.4.1. Charakteristika souboru.....	36
3.4.2. Metody .....	36
3.4.3. Statistické zpracování dat.....	38
3.5. STUDIE 4: VESTIBULÁRNÍ FUNKCE U PACIENTŮ PO KOCHLEÁRNÍ IMPLANTACI .....	38
3.5.1. Charakteristika souboru.....	38
3.5.2. Metody .....	39
3.5.3. Statistické zpracování dat.....	39
<b>4. VÝSLEDKY</b> .....	<b>40</b>
4.1. STUDIE 1: VESTIBULÁRNÍ FUNKCE U PACIENTŮ S IDIOPATICKOU SKOLIÓZOU .....	40
4.2. STUDIE 2: SUBJEKTIVNÍ VIZUÁLNÍ VERTIKÁLA A POLOHA HLAVY U PACIENTŮ S IDIOPATICKOU SKOLIÓZOU .....	43
4.3. STUDIE 3: VLIV PROLONGOVANÉHO ÚKLONU HLAVY NA VNÍMÁNÍ VIZUÁLNÍ VERTIKÁLY U ZDRAVÝCH PROBANDŮ .....	45
4.4. STUDIE 4: VESTIBULÁRNÍ FUNKCE U PACIENTŮ PO KOCHLEÁRNÍ IMPLANTACI .....	46
<b>5. DISKUZE</b> .....	<b>49</b>
5.1. STUDIE 1: VESTIBULÁRNÍ FUNKCE U PACIENTŮ S IDIOPATICKOU SKOLIÓZOU .....	49
5.2. STUDIE 2: SUBJEKTIVNÍ VIZUÁLNÍ VERTIKÁLA A POLOHA HLAVY U PACIENTŮ S IDIOPATICKOU SKOLIÓZOU .....	51
5.3. STUDIE 3: VLIV PROLONGOVANÉHO ÚKLONU HLAVY NA VNÍMÁNÍ VIZUÁLNÍ VERTIKÁLY U ZDRAVÝCH PROBANDŮ .....	54
5.4. STUDIE 4: VESTIBULÁRNÍ FUNKCE U PACIENTŮ PO KOCHLEÁRNÍ IMPLANTACI .....	56
<b>6. ZÁVĚR</b> .....	<b>58</b>
<b>7. SOUHRN</b> .....	<b>60</b>
<b>8. SUMMARY</b> .....	<b>61</b>
<b>9. LITERATURA</b> .....	<b>62</b>

<b>10. SEZNAM PUBLIKACÍ.....</b>	<b>70</b>
10.1. PŮVODNÍ VĚDECKÉ PRÁCE, KTERÉ JSOU PODKLADEM DISERTAČNÍ PRÁCE .....	70
10.2. PŮVODNÍ VĚDECKÉ PRÁCE NEVZTAHUJÍCÍ SE PŘÍMO K TÉMATU DISERTAČNÍ PRÁCE .....	70
10.3. PŘEDNÁŠKY A PLAKÁTOVÁ SDĚLENÍ NA ODBORNÝCH KONFERENCÍCH .....	70
<b>11. PŘÍLOHY.....</b>	<b>72</b>



## 1. ÚVOD

### 1.1. Idiopatická skolióza

Idiopatická skolióza (IS) je řazena mezi ortopedické diagnózy. Je definovaná jako strukturální deformita páteře ve třech anatomických rovinách – sagitální, frontální a transverzální. Skolióza může vzniknout v důsledku kongenitální deformity obratle, při neurofibromatóze, při revmatických onemocněních nebo jako důsledek tumoru, v takových případech je jasná příčina vzniku deformity páteře.

Oproti tomu IS jasnou příčinu nemá a její etiologie je pravděpodobně multifaktoriální. Jde o nejčastější typ, který zahrnuje přibližně 80 % všech skolióz. IS se diagnostikuje na základě rentgenového (RTG) snímku páteře v anterioposteriorním směru, při kterém se měří tzv. Cobbův úhel, který určuje velikost zakřivení páteře ve frontální rovině. Podmínkou pro stanovení diagnózy IS je velikost Cobbova úhlu nad 10°.

IS můžeme klasifikovat podle různých kritérií, nejrozšířenější je v současné době klasifikace dle Lenkeho, která rozlišuje tři parametry: typ křivky, sagitální hrudní parametr a parametr bederní páteře. IS můžeme také rozdělit na skoliózu s jednou či více křivkami, podle lokalizace křivky v různých úrovních páteře nebo dle doby vzniku. Podle toho, kdy skoliotická křivka vznikla rozdělujeme typy na infantilní (před třetím rokem), juvenilní (od 4 do 10 let) a na adolescentní (od 10 let do ukončení kostní maturace) (Lenke et al. 2002). Přičemž nejčastějším typem je adolescentní idiopatická skolióza (AIS).

Prevalence AIS se pohybuje mezi 0.47 - 5.2 % dětí ve věku od 10 do 18 let. Častěji se vyskytuje u dívek než u chlapců v poměru 1.4:1, u křivek nad 30° se tento poměr zvětšuje až na 5:1 (Koniczny, Senyurt, Krauspe 2013). Podle meta-analýzy z roku 2010 se ukazuje, že počet pacientů s křivkami většími než 20° je přibližně 0.22 % (Fong et al. 2010). Strategie léčby se řídí velikostí křivky a její progresí.

Idiopatickou skoliózu nelze léčit kauzálně. Existuje však řada prostředků symptomatické léčby jako je cílená fyzioterapie, korzetoterapie případně operační léčba. Cílem terapie je především zabránění progresi skoliotické křivky a vzniku sekundárních změn.

### 1.1.1. Postavení hlavy u pacientů se skoliózou

U IS dochází ke strukturální změně křivek páteře ve třech rovinách. S touto změnou také dochází ke změně postavení pánve, horních a dolních končetin a hlavy. Ve studii Huggare a spol. se zabývali postavením hlavy u pacientů se skoliózou. Ve svém výzkumu zkoumali postavení hlavy a dentofaciální morfologii. Pacienti s IS vykazovali větší úklon hlavy ve frontální rovině, který byl spojený s postavením apikálního, vrcholového obratle křivky. Pokud se vrchol skoliotické křivky nacházel na pravé straně, pacienti měli hlavu ukloněnou na opačnou stranu. Pacienti s IS měli také zvýšený kraniocervikální úhel (úhel mezi pomyslnou přímkou spojující tragus ucha a sedmý krční obratel s linií spojující tragus ucha s očním koutkem), malokluzi a chybějící premoláry. U pacientů byly zjištěny také asymetrie v oblasti obličejového skeletu, ve frontální rovině byl větší náklon orbitální, maxilární a mandibulární roviny (Obr. 1) a atypická morfologie 1. a 2. krčního obratle (prodloužení dens axis) (Huggare, Pirttiniemi, Serlo 1991).

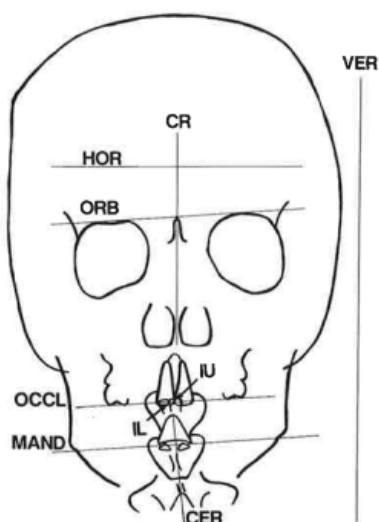


Fig. 2. Points and lines for analysis of the posteroanterior cephalogram.

- VER = True vertical indicated by a plumb line;
- CR = Cranial central line, drawn through the crista galli and anterior nasal spine;
- HOR = Cranial horizontal line, the line perpendicular to the cranial central line;
- CER = Cervical line, indicating the course of the cervical spine,
- ORB = Orbital plane, tangent to the extreme cranial point on the supraorbital margins;
- OCCL = Maxillary occlusal plane, tangent to the extreme inferior cusps of the molars of the maxilla;
- MAND = Mandibular plane, a line drawn through the highest points in the antegonial notches of the mandible;
- IU = Interincisal point of the maxilla, the contact point between the maxillary central incisors;
- IL = Interincisal point of the mandible, the contact point between the mandibular central incisors.

**Obr. 1** Antropometrické body a osy pro analýzu polohy hlavy ve frontální rovině (Huggare, Pirttiniemi, Serlo 1991)

Někteří autoři popisují abnormální postavení hlavy u pacientů s IS pouze při situacích, kdy je redukován senzoričtý vstup nebo prováděn souběžný úkol. Například při určování haptické vertikály (subjektivního vnímání směru gravitace pomocí haptického podnětu), vykazovali pacienti větší míru úklonu hlavy proti kontrolám. Úklon hlavy se zvětšil také při vyloučení zrakové kontroly (Antoniadou et al. 2018). Alterované postavení hlavy při senzoričtém konfliktu čili při situacích, ve kterých dochází ke konfliktu informací přicházejících z jednotlivých senzoričtých systémů, popsal také Eijgellar et al. Ve statických situacích bez senzoričtého konfliktu bylo postavení hlavy u obou skupin stejné. Pokud u pacientek s IS došlo k senzoričtému konfliktu, projevilo se neschopností udržet hlavu ve vzpřímeném postavení a alternací postavení hlavy ve srovnání se zdravými kontrolami, zejména ve věkové skupině 13-14 let (Eijgelaar et al. 2014). Zjištěné rozdíly mezi skupinami v různých věkových kategoriích naznačují možný odlišný proces vývoje senzoričtí integrace.

Otázkou zůstává, zda toto odlišné postavení hlavy představuje příčinu nebo následek skoliózy. Dlouhodobé držení hlavy mimo vzpřímené fyziologické postavení může vést ke vzniku nesouměrností v oblasti obličeje spojené s asymetrickým napětím svalů v oblasti krku a krční páteře a následně může přispět ke vzniku skoliózy. Hlava může být v úklonu, obličej rotován a brada vychýlená ze středního postavení. Toto kompenzační postavení hlavy nejčastěji souvisí s ortopedickou patologií nebo poruchou vizuálního, sluchového nebo neurologického původu (Muchova 2009).

Úklon hlavy ze středního postavení se často objevuje u pacientů s periferní vestibulární dysfunkcí. V případě, že otolitové orgány vestibulárního systému na jedné straně vykazují nižší aktivitu než na straně druhé, mozek může reagovat na tuto asymetrii nakláněním hlavy nebo kompenzačně ji naklonit tak, aby byla zachována symetrická aktivita obou vestibulárních systémů (Hawasli, Hullar, Dorward 2015)

### **1.1.2. Faktory ovlivňující progresi skoliotické křivky**

Skoliotická křivka může od svého vzniku progredovat a může docházet k jejímu zvětšení, což může vést k nárůstu bolesti, omezení pohyblivosti ale i ke snížení ventilace. Progrese křivek páteře u IS záleží na mnoha faktorech. Dříve se předpokládalo, že křivka může progredovat pouze do ukončení kostního vývoje. Novější studie ovšem uvádějí, že k progresi může docházet v průběhu celého života. Weinstein et al. ve své longitudinální studii sledoval 117 pacientů s IS po dobu 50 let. U pacientů s hrudní křivkou došlo ke

zvětšení Cobbova úhlu průměrně o 24° (u hrudně-bederní křivky průměrně o 46°, u bederní křivky o 14°). U skoliotických křivek v hrudní i v bederní páteři nebyla progresse tak velká, průměrně došlo ke zvětšení o 13-16°. Křivky tedy progredovaly i po ukončení růstu pacientů (Weinstein et al. 2003).

Vliv na zvětšení křivky má jednoznačně věk pacienta v době diagnostiky IS. Čím mladší jsou pacienti, tím větší je riziko progresse. Větší progresse je u pacientů, kteří jsou diagnostikováni do 11 let (Lenz et al. 2021). S věkem také souvisí kostní maturace, ohroženější jsou pacienti, kteří mají nižší Riesslerovo znamení, či dívky před začátkem menarché v době diagnostiky IS (Sanders et al. 2008). Nízká kostní denzita popřípadě osteopenie u adolescentů s IS se také ukazují jako predikující faktory pozdější progresse (Hung et al. 2005; Song et al. 2018).

Lokalizace křivky v různých segmentech páteře ovlivňuje další vývoj IS. Křivky pouze v hrudní páteři mají tendenci k progresi více než křivky v oblasti krční páteře, thorakolumbálního přechodu či bederní páteře (Weinstein et al. 2003; Wong, Cheung, Cheung 2022).

Důležitá je také velikost skoliotické křivky. U pacientů s křivkami většími než 25° dojde častěji k progresi než u křivek menších (Lam et al. 2013; Wong, Cheung, Cheung 2022). Přestože se diagnostika IS provádí pomocí hodnocení křivky páteře ve frontální rovině, důležitým faktorem progresse jsou i změny v sagitální či transverzální rovině. Míra rotace obratlů v hrudní páteři se odvíjí od jejího sagitálního zakřivení. Pokud je páteř v kyfotickém zakřivení, působí na obratle střížné síly, jejichž výsledný vektor působí ventrálně, což stabilizuje obratle proti rotaci. Pokud ale dojde ke snížení kyfózy, působí na obratle více dorzální střížné síly, které způsobují rotační instabilitu. Snížená kyfóza, popřípadě lordotizace hrudní části páteře umožňuje větší míru rotace a může tak vést k rozvoji progresse křivky (Castelein, Van Dieën, Smit 2005; Janssen, Kouwenhoven, Castelein 2010; Kouwenhoven et al. 2007).

### 1.1.3. Etiologie IS

Etiologie IS není známá a na její zkoumání se zaměřuje mnoho studií. Vzhledem k výskytu IS se ukazuje, že důležitý vliv zde mají genetické faktory. Podle Andersen et al, který sledoval dvojčata, se skolióza vyskytla u 73 % monozygotních dvojčat (Andersen, Thomsen, Kyvik 2007). Většina pacientů s IS má pozitivní familiární historii. Bylo také

identifikováno několik genů, které mohou být potenciálně spojené se vznikem IS (CHD7, SH2B1, ESR, CALM1, LBX1, MATN1, CHL1, FBN1 a FBN2). Vzhledem k nekonzistentnímu vzoru a rozdílné genové expresi je pravděpodobně dědičnost vázaná na více než jeden gen (Ogilvie et al. 2006; De Salvatore et al. 2022).

Protože jde o onemocnění, při kterém dochází ke strukturální deformitě páteře, nejčastější etiologické teorie předpokládají specifické poruchy v biomechanických vlastnostech páteře, paravertebrálních svalů a ligament. Byla zjištěna větší koncentrace kalmodulinu na konvexní straně křivky, stejně tak asymetrie paravertebrálních svalů s větším zastoupením svalových vláken typu I oproti vláknům typu II na konvexní straně a opačný poměr vláken na konkávní straně křivky (Stetkarova et al. 2016).

Diskutuje se problematika změn v metabolismu kostí, možný deficit melatoninu, kalmodulinu a vitamínu D. Nicméně výsledky těchto studií jsou často rozdílné (Peng et al. 2020; Kouwenhoven, Castelein 2008). V poslední době jsou zkoumány změny v oblasti CNS jako možná příčina IS, kterým se budeme věnovat v další kapitole.

### **1.1.3.1. Neurologické změny u pacientů s IS**

Etiopatogeneze IS může souviset s abnormalitami v oblasti centrálního nervového systému. Dosavadní studie se zaměřovaly na změny jak v morfologii, tak ve funkci mozkové kůry, mozkového kmene a mozečku.

U pacientů s IS byly zjištěny rozdíly při testování regionálního objemu vybraných struktur mozku. Rozdíl byl zjištěn celkem v 22 regionech CNS u pacientů s typickou pravostrannou hrudní křivkou oproti zdravým kontrolám. V deseti oblastech byl objem větší u pacientů s IS, konkrétně se jednalo o levé frontální gyry, bílou hmotu v levém frontálním laloku, parietální a temporální laloky, corpus callosum a mozkový kmen. Oproti tomu dvanáct oblastí CNS bylo objemově menších: pravostranné descendentní nukleus caudatus, levý hypocampus a amygdala, bilaterálně precuneus a levý okcipitální gyrus (Liu et al. 2008). Byly zjištěny také morfologické změny u pacientů s IS s levostrannou hrudní křivkou. U těchto pacientů byla rozdílná denzita bílé hmoty v corpus callosum a v levé capsula interna (Shi et al. 2009).

Asymetrie hemisfér byla také popsána při analýze topografické organizace kortikálních spojů. U pacientů s IS byla zachována organizace a architektura „malého světa“, nicméně byl popsán rozdíl v distribuci nervových propojení (angl. hubs). Vyšší

počet propojení se nacházel v oblasti temporálního a okcipitálního laloku, tedy v oblastech, které se podílejí na zpracování motorických a vestibulárních funkcích, naopak menší počet byl v oblasti limbického systému (Wang et al. 2013). S tím se shodují výsledky studie, která hodnotila magnetickou rezonanci (MRI) u 90 pacientů a zjistila rozdílnou tloušťku kortexu u pacientů s IS oproti zdravým kontrolám, tato asymetrie se projevovala nejvíce v oblasti reprezentující vestibulární a motorické funkce (Wang et al. 2012). V oblasti mozkového kmene byla popsána asymetrie ventrální části Varolova mostu a prodloužené míchy v místě tractus corticospinalis u 7/25 pacientů s IS oproti zdravým kontrolám (Geissele et al. 1991).

Přesto, že se jedná o ortopedickou diagnózu, tak byla podle výše zmíněných studií u pacientů s IS popsána morfologická asymetrie v kortexu, především v oblastech reprezentujících vestibulární a motorické funkce. Zatím není jednoznačné, zda se tyto strukturální změny vyskytují náhodně, protože nejsou přítomné u všech pacientů s IS nebo zda vznikají pouze u specifické podskupiny skoliotických pacientů. V těchto studiích také nebylo popsáno, zda morfologické změny v CNS korelují se změnou funkce nervového systému a případně zda jejich přítomnost souvisí s možnou progresí skoliotické křivky.

Změny v oblasti mozečku mohou mít tak vliv na motorické a posturální funkce. Morfologické změny mozečku u pacientů s IS ukázaly větší objem mozečku, oproti stejně starým zdravým jedincům. Tento rozdíl je vysvětlován jako kompenzační mechanismus zajišťující posturální kontrolu, která je horší u pacientů s IS z důvodu asymetrického zakřivení páteře. Autoři předpokládají že jde o nález sekundární (Shi et al. 2009).

Na korelaci mezi morfologickými změnami mozečku a změnami funkce CNS se zaměřily následující studie hodnotící incidenci cerebelární tonzilární ektopie s výsledky somatosenzorických evokovaných potenciálů (SEP). Cerebelární tonzilární ektopie neboli Arnold-Chiariho malformace je vrozená anomálie CNS. Jedná se o dystopii mozečku a prodloužené míchy do páteřního kanálu. U pacientů s IS koreloval nález abnormálních SEP s přítomností cerebelární tonzilární ektopie u 58 % pacientů (Chau et al. 2016). To potvrzuje i další studie, která zjistila incidenci cerebelární tonzilární ektopie u pacientů s abnormálním výsledkem SEP u 33.3 % pacientů, ale také u pacientů s fyziologickým nálezem SEP 2.9 % (Cheng et al. 1999). U pacientek s IS pouze s pravostrannou hrudní křivkou byla při vyšetření SEP signifikantní prolongace latence vlny P37 na pravé straně. Přičemž prolongace byla delší u pacientek s většími křivkami (Chau et al. 2016).

Tyto studie dokazují vliv strukturálních změn mozečku na změnu funkce v řízení posturální stability u pacientů s IS. Častější nálezy těchto abnormalit (cerebelární tonzilární ektopie či abnormální SEP) byly prokázány u pacientek s většími křivkami, u těchto pacientek byla také prokázána horší schopnost posturální kontroly. Pacienti s abnormálním nálezem SEP mohou mít horší posturální stabilitu zejména v situacích s vyloučením zrakové kontroly, kdy jsou kladeny větší nároky na somatosenzorický systém (Cheng et al. 1999; Chau et al. 2016; Guo et al. 2006).

Informace ze zrakového systému jsou důležité pro udržení hlavy a těla v prostoru. Určité abnormality byly pozorovány v oblasti okulomotoriky. U pacientů s IS s křivkami 15-25° byly popsány změny v sakadických očních pohybech. Konkrétně došlo ke zpomalení a prodloužení latence sakadických pohybů. Vyšetření plynulých sledovacích pohybů a vyšetření vestibulookulárního reflexu (VOR) neprokázalo žádné abnormality. Změna sakadických pohybů oka by mohla svědčit pro dysfunkci řízení sakadických pohybů v oblasti mozkového kmene mozečku či jader okohybných svalů (Lion et al. 2013).

### **1.1.3.2. Změny vestibulárního systému u pacientů s IS**

Některé studie předpokládají roli abnormální funkce vestibulárního systému v rozvoji IS. Existuje několik studií využívajících zvířecí modely ke zjištění souvislostí mezi IS a vestibulárními funkcemi. Tyto studie zkoumaly vliv experimentálně navozené unilaterální vestibulární léze (UVL) u dospělých zvířat. V případě, že tato léze byla provedena na laboratorních potkanech (*Rattus norvegicus*) nebo na morčatech domácích (*Cavia aperea porcellus*), tak se klinicky projevila úklonem a rotací hlavy ke straně léze. Podobný klinický obraz vidíme u pacientů s akutním vestibulárním syndromem (De Waele et al. 1989). Ve studii provedené na dospělých žabách (*Xenopus laevis*) došlo po UVL k rozvoji funkční skoliózy s úklonem hlavy a s typickým asymetrickým napětím svalů trupu a končetin. Tyto příznaky se upravily po dvou měsících v důsledku vestibulární kompenzace, po této době byla žába schopná udržet hlavu ve vertikálním postavení a došlo u ní ke znovuoobnovení symetrického napětí paravertebrálních svalů. Podobný klinický obraz vestibulární kompenzace můžeme vidět i na pacientech s periferní vestibulární lézí (Lambert, Straka 2012).

V případě, že unilaterální léze labyrintu byla provedena u žab v larválním stádiu vývoje, tak nedošlo ke kompenzaci jako u dospělých žab, ale naopak k vzniku strukturální

trojrozměrné skoliózy. Posturální syndrom, který vzniká po unilaterální lézi nebyl zkompenzovaný, protože pulci se nacházeli ve vodním prostředí, což vedlo k odlišné propioceptivní aferentaci. Přetrvávající asymetrická vestibulospinální aktivita vedla k perzistujícímu asymetrickému napětí svalů trupu, které ve stádiu vývoje obratlů, způsobilo skoliotickou křivku. Výše popsaná propiocepce ve vodních podmínkách může být podobná situaci, ke které dochází u plodu v době gestace in utero (Lambert et al. 2009; 2013; Gordy, Straka 2021).

Tyto výzkumy ukazují, že primární asymetrická funkce vestibulárního systému především tedy otolitového systému, který je zodpovědný za statické udržování hlavy a těla v prostoru, může vést k asymetrické aktivitě paravertebrálních svalů a ke vzniku deformity páteře.

Studie provedené na pacientech s IS sledovaly morfologické změny periferního vestibulárního systému jako možnou příčinu vzniku IS. Z těchto morfologických změn jsou vzhledem k velikosti a umístění labyrintu nejčastěji popisovány abnormality v polokruhových kanálcích. Pomocí vyšetření MRI byl zjištěn rozdíl v délce a šířce polokruhových kanálků v levém labyrintu. Pacienti s AIS s pravostrannou hrudní křivkou měli o 9 % delší obvod a o 2 % užší průsvit laterálního a zadního polokruhového kanálků na levé straně v porovnání se zdravými probandy (Zeng et al. 2010; Xin et al. 2011).

U pacientů s AIS s pravostrannou hrudní křivkou byla v levém labyrintu detekována odlišná poloha středu laterálního a zadního polokruhového kanálku ve vzdálenosti k vertexu oproti zdravým kontrolám (Shi et al. 2011).

Také postavení levého laterálního kanálku vzhledem k mediální rovině u pacientů s pravostrannou skoliotickou křivkou bylo odlišné oproti zdravým probandům. Výsledky zde jsou však nejednotné. Dle Hitier et al. je laterální kanálek u pacientů s AIS postaven více vertikálně, což zde vysoce korelovalo s posunem laterálního a zadního kanálku laterálním směrem (Hitier et al. 2015). Oproti tomu Carry et al. došel k závěru, že laterální kanálek je u pacientů s AIS postaven více horizontálně (Carry et al. 2020).

Tyto studie našly morfologické změny v laterálním a zadním polokruhovém kanálku v levém vestibulárním labyrintu. Popsané změny by mohly vysvětlit větší výskyt pravostranných skoliotických křivek páteře, ale nevysvětlují větší rozmanitost typů křivek. Výše uvedené změny byly u pacientů s pravostrannou hrudní křivkou. Čím výše na páteři se křivka nachází, tím je patrnější asymetrie v laterálním polokruhovém kanálku. U křivek



thorakolumbálních byla větší asymetrie v poloze laterálního kanálku oproti křivkám pouze v oblasti bederní páteře (Cortés-Pérez et al. 2022; Hitier et al. 2015)

Popsané morfologické změny v labyrintu vnitřního ucha nemusí nutně souviset se změnou jeho funkce. Při komplexním vyšetření 445 pacientů s vestibulárními příznaky, bylo odhaleno 95 pacientů se skoliózou. U těchto pacientů bylo zjištěno abnormální anatomické spojení mezi laterálním a zadním polokruhovým kanálkem. Toto abnormální spojení souviselo s odchylkami ve funkci VOR, postavení hlavy a s výskytem závratí (Rousie et al. 2009). V ostatních studiích byla popsána pouze změna morfologie, funkce vestibulárního systému nebyla předmětem zkoumání. Stejně tak změna morfologie ještě nutně nemusí znamenat i změnu funkce.

## 1.2. Vestibulární systém

Vestibulární systém má periferní část, do které patří labyrint a vestibulární nerv a centrální část, kterou tvoří vestibulární jádra a dráhy. Periferní část je tvořena receptory, které registrují úhlové zrychlení a lineární pohyb hlavy, tyto informace předávají do CNS, především do vestibulárních jader, mozečku a mozkové kůry, kde jsou informace zpracovány. Mezi funkce vestibulárního aparátu patří udržování rovnováhy, regulace svalového tonu a koordinace pohybů hlavy a očí (Ambler, Bednařík, Růžička 2008).

Periferní systém se skládá z kostěného labyrintu, který má část vestibulární a část sluchovou. Uvnitř se nachází membranózní labyrint, který je vyplněn endolymfou. Skládá se ze dvou váčků (utríkulu a sakulu) a třech polokruhových kanálků. Polokruhové kanálky odstupují z utríkulu a jsou orientovány přibližně v kolmé pozici vůči sobě. Začínají ampulami, kterými jsou spojeny s vestibulem. V této části se nachází kupula, želatinózní hmota, pod kterou jsou uloženy receptorové vláskové buňky, které detekují úhlové zrychlení. Při vychýlení kupuly způsobené pohybem endolymfy dochází k pohybu vláskových buněk. Na základě směru pohybu endolymfy dochází buďto k depolarizaci nebo hyperpolarizaci. Oproti tomu v sakulu a utríkulu se vláskové buňky nachází v makulách. Makulu pokrývá otolitová membrána na které jsou rozptýlené krystalky uhličitanu vápenatého zvané otokonie. Utrikulus je uložen v horizontální rovině a sakulus ve vertikální rovině a vláskové buňky vlivem pohybu otokoní registrují lineární zrychlení a náklon hlavy (Jones et al. 2009; Čada, Černý, Čakrt 2017; Ambler, Bednařík, Růžička 2008).

Většina informací z periferní části vestibulárního systému je přenášena prostřednictvím vestibulárního nervu, který má dvě části. Horní větev přenáší informace z předního a laterálního polokruhového kanálku a utrikulu. Dolní větev zásobuje zadní polokruhový kanálek a sakulus. Axony vestibulárního nervu vedou do vestibulárních jader v mozkovém kmeni. Ačkoliv jsou kanálky a otolitové orgány na periférii z velké části odděleny, ve vestibulárních jádrech dochází k mohutné konvergenci signálů. Tato propojenost umožňuje přesné určení orientace a pohybu hlavy. Při rotacích jsou excitovány vláskové buňky v ampulách polokruhových kanálků a při náklonu otolitové struktury (Khan, Chang 2013; Ambler, Bednařík, Růžička 2008).

Z vestibulárních jader vedou dráhy ascendentní i descendentní. Ascendentní dráhy vedou především do mozečku, do jader okohybných nervů, talamu a mozkové kůry. Descendentní pak vedou do oblasti míchy a k sympatickému systému. Vestibulární dráhy slouží k řízení a regulaci svalového tonu šíje, trupového svalstva, končetin a k řízení pohybů hlavy a očí v reakci na pohyb hlavou (Ambler, Bednařík, Růžička 2008; Čada, Černý, Čakrt 2017).

### 1.2.1. Unilaterální periferní vestibulární dysfunkce

Unilaterální periferní dysfunkce může mít vícero příčin. Dochází při ní k částečné nebo úplné trvalé jednostranné periferní dysfunkci a rozsah patologie se může velmi lišit. Příznaky jednostranné vestibulární deafferentace, které při lézi vznikají a vytváří klinický obraz pacienta, můžeme rozdělit na statické a dynamické.

Statické příznaky jsou přítomny, pokud se pacient nehýbe. Patří sem okulomotorické příznaky (spontánní vestibulární nystagmus, šikmá deviace očních bulbů), tonické posturální příznaky (tonické úchyly těla a končetin ke straně léze, porucha rovnováhy) a percepční příznaky (porucha percepce vertikality, závrať). Dynamické příznaky zahrnují dysfunkci VOR během pohybu hlavy a poruchu posturální kontroly při chůzi nebo při náročnějších pohybových aktivitách (Jones et al. 2009; Khan, Chang 2013; Ambler, Bednařík, Růžička 2008)

Základem většiny symptomů je nerovnováha v neurálním vstupu do komplexu vestibulárních jader v mozkovém kmeni. Tato nerovnováha může být způsobena jednostranným snížením impulzů z vestibulárního systému po UVL nebo naopak zvýšením impulzů na podkladě iritace.

Po chirurgické deaferentaci dochází k anatomickým změnám, ke ztrátě vestibulárních axonů a synapsí jdoucích do vestibulárních jader na postižené straně, ke snížení počtu buněčných organel odpovědných za syntézu proteinů (např. ribozomů a endoplazmatického retikula) a zvýšení počtu gliových buněk. Nicméně buněčné změny popsané po deaferentaci nemusí být shodné pro všechny případy periferní vestibulární dysfunkce (Gacek, Schoonmaker 1997).

### 1.2.2. Vestibulární kompenzace

Vestibulární systém má podobně jako ostatní sensorické systémy určitou míru plasticity. Při vzniku vestibulární patologie dochází postupně vlivem plasticity k vestibulární kompenzaci. Výsledky vyšetření vestibulárních funkcí tak mohou být ovlivněné tím, v jaké fázi kompenzačního procesu se pacient nachází (Čada, Černý, Čákr 2017). Pokud jsou u pacientů s IS změněné vestibulární funkce, tak není známo, v jaké době dochází k této změně a pro správnou interpretaci výsledků je důležité brát v úvahu možný vliv vestibulární kompenzace.

Vestibulární kompenzace představuje proces, ke kterému dochází při ztrátě nebo snížení aferentace z periferního vestibulárního systému. Tato ztráta či změna periferního vstupu může vzniknout jednostranně nebo oboustranně, může být úplná či částečná, může se objevit náhle (vestibulární neuritida) nebo postupně v průběhu života (vestibulární schwannom) a může být záchvatovitá (Meniérova choroba) či trvalá. Příkladem může být UVL při které dochází k deaferentaci vestibulárních jader. Manifestuje se statickými a dynamickými příznaky, které jsou výsledkem jednak ztráty reaktivity na ipsilaterální straně, tak nadměrnou excitací na kontralaterální straně, která je důsledkem ztráty inhibice (Čada, Černý, Čákr 2017; Ambler, Bednařík, Růžička 2008).

Statické příznaky se plně kompenzují od tří měsíců až do jednoho roku. Hlavním mechanismem této kompenzace je změna excitability na molekulární úrovni v komplexu vestibulárních jader. Zvýšená excitabilita ipsilaterálních buněk vestibulárních jader v kombinaci se sníženou senzitivitou vůči inhibičním neurotransmitterům obnovuje vyváženou aktivitu mezi oběma stranami. Tato kombinace buněčných mechanismů je odpovědná za obnovu statických funkcí (Lacour, Helmchen, Vidal 2016; Tighilet et al. 2019).

Dynamické příznaky (porucha VOR, instabilita při stoji a chůzi) se projevují delší dobu od vzniku onemocnění a jsou hůře kompenzovatelné. Důvodem, proč si však pacienti

po delší době nestěžují subjektivně na tyto obtíže, je jejich schopnost využít nové strategie v koordinaci senzorické aferentace. Tato kompenzace probíhá pomocí senzorické substituce. Zvýšená aktivita například zrakového systému může zlepšit stabilitu stoje a částečně nahradit vestibulární aferentaci. Ve studii francouzských autorů vyšetřovali pomocí stabilometrického vyšetření 50 pacientů s Meniérovou nemocí. Polovina z nich měla menší plochu posturálních výchylek při stoji s otevřenýma očima, druhá polovina měla naopak menší výchylky při stoji se zavřenýma očima. Druhá polovina pacientů tak pro udržení rovnováhy využívala odlišnou strategii, konkrétně se více spoléhali na informace ze somatosenzorického systému (Lacour et al. 1997). Druhým mechanismem je substituce, která zahrnuje změnu v mechanismech umožňujících fixaci při VOR, chybějící VOR je nahrazen korekčními očními sakádami. (Lopez et al. 2007; Baier et al. 2015).

Pokud se jedná o poškození periferní, nezasahující do struktur potřebných pro kompenzaci, tak trvá spontánní návrat SVV do fyziologických hodnot 2–4 týdny. (Dieterich, Brandt 2019). Návrat percepce dynamické SVV do normy může trvat delší dobu. U pacientů s unilaterální lézí nedošlo ke kompenzaci dynamické SVV ani rok po vzniku léze (Lopez et al. 2007). U pacientů, u kterých byla prokázána ischemizace mozečku dle MRI, trval návrat SVV do normy několik měsíců až několik let (Baier et al. 2015). Spontánní vestibulární kompenzace může být urychlena pomocí vestibulární rehabilitace a ovlivněna farmakologicky. Terapie musí být prováděna včas aktivně během neuroplastických procesů (Lacour, Helmchen, Vidal 2016).

### 1.2.3. Vyšetření vestibulárního systému

Existuje celá řada vyšetření, kterými lze zhodnotit funkci jednotlivých částí vestibulárního systému. Jednotlivé receptory vestibulárního systému však mají různý práh dráždivosti, a proto nelze vyšetřit funkci labyrintu vnitřního ucha jedním testem. Každé vyšetření hodnotí pouze jednu jeho část. Pomocí bitermální kalorizace hodnotíme funkci zejména laterálního polokruhového kanálku, video head impulse testem jsme schopni zhodnotit funkci všech polokruhových kanálků. Vestibulární evokované myogenní potenciály hodnotí funkci sakulu a utrikulu. Percepce SVV umožňuje hodnocení funkce otolitového systému. Stabilometrické vyšetření hodnotí schopnost udržování posturální stability. V rámci vestibulárního systému hodnotí funkci vestibulospinálního reflexu, ale vzhledem k množství senzorických systémů podílejících se na posturální kontrole, jím

nelze vyšetřovat pouze vestibulární labyrint. Výsledek všech těchto vyšetření ovlivňují také funkce vyšších oblastí CNS, které nelze při vyšetřování zcela oddělit. Druhým problémem je dostupnost přístrojových vyšetření vyžadující speciální laboratorní vybavení. V další části textu se budeme zabývat jednotlivými vyšetřovacími metodami.

### 1.2.3.1. Vyšetření subjektivní vizuální vertikály

Schopnost určení SVV vzniká jako důsledek interakce vestibulárního systému s informacemi ze somatosenzorického systému. Nejdůležitější roli zde hrají otolitové orgány. Vyšetření probíhá nejčastěji tak, že je před pacientem vyobrazena přímka, která je vychýlená z vertikální osy. Pacient má za úkol určit, kdy se přímka nachází vertikálně. Při tomto vyšetření je důležité vyloučení optické orientace pomocí okolí. Vyšetření SVV lze provádět také dynamicky při optokinetické stimulaci, kdy při určování vertikály dochází k pohybu na pozadí. Určování SVV je u zdravého člověka velmi přesné. Ve vzpřímeném držení hlavy se fyziologická norma udává  $\pm 2^\circ$  od skutečné geofyzikální vertikály. Při dynamickém vyšetření s optokinetickou stimulací je fyziologická norma  $\pm 4^\circ$  (Kheradmand, Winnick 2017; Dieterich, Brandt 1993).

Testování percepce SVV provádíme nejčastěji vsedě ve vzpřímeném postavení trupu a hlavy. U některých onemocnění, například u IS, se ale může objevit asymetrické postavení hlavy v úklonu či rotaci, které může ovlivnit schopnost percepce vertikály. Při úklonu hlavy se otolitové orgány dostávají do méně výhodné pozice pro vlastní funkci. Při úklonu hlavy menším než  $30^\circ$  dochází k odklonu SVV na opačnou stranu, než je strana úklonu hlavy, v literatuře popisováno jako E-efekt. Při úklonu větším než  $60^\circ$  dojde k podhodnocení a SVV je ukloněná na stejnou stranu jako hlava tzn. A-efekt (Kheradmand, Winnick 2017).

Existuje několik metod, pomocí kterých můžeme vyšetřit percepci SVV. Nejjednodušší je metoda s pomocí speciálně upraveného kyblíku (SVV bucket test), při které se pro vyšetření používá kyblík s neprůsvitným dnem, na němž je nakreslená linie. Na vnější straně kyblíku je úhloměr s olovnicí. Vyšetřující pak otáčí kyblíkem a pacient určuje, v jaké pozici se nachází osa uvnitř kyblíku vertikálně (Zwergal et al. 2009). Obdobně probíhá vyšetření v hemisférickém dómu. V současné době se začínají využívat pro testování SVV počítačové systémy a virtuální realita, jejichž výhodou je větší přesnost. Tyto přístroje využívají vizuální projekce osy pomocí digitálních brýlí či projekce osy na vzdálenější obrazovku. Při porovnání reliability vyšetření pomocí Bucket testu a

počítačového testování vyšlo, že odchylka od geofyzikální vertikály u počítačové testování byla  $\pm 2.17^\circ$  oproti  $\pm 4.23^\circ$  v případě Bucket testu. Počítačové testování tak vykazovalo menší odchylky od geofyzikální vertikály a menší rozptyl při opakovaném testování (Michelson et al. 2018). Vzhledem k vysokým pořizovacím nákladům, však není možné využívat počítačové testování ve všech ambulancích.

Studie, které vyšetřovaly SVV v různých věkových skupinách, nezaznamenaly statisticky významný rozdíl při statickém vyšetření. Při dynamickém vyšetření se schopnost percepce SVV zhoršovala s věkem. Schopnost určovat statickou SVV není ovlivněna pohlavím a věkem (Zakaria et al. 2019; Čakrt et al. 2016; Kobayashi et al. 2002).

### ***Patologické nálezy při vyšetření SVV***

Odchylky nad fyziologickou normu se projevují buď jako snížená přesnost, anebo celkově posunuté vnímání vertikály. V prvním případě pacient vnímá vertikálu více než  $2^\circ$  na obě dvě strany, zde pozorujeme větší rozptyl odchylek ve vnímání vertikály. V druhém případě pacient vnímá vertikálu posunutou nad normu konzistentně v jednom směru (Dieterich, Brandt 1993).

Náklon SVV je jeden z projevů asymetrické funkce vestibulárního systému. Podle úrovně léze je odlišný směr vnímání vertikály. Pokud je přítomná léze v oblasti periferního vestibulárního systému či v kaudální oblasti mozkového kmene (medulla oblongata), odklon jsou odchylky SVV v ipsilaterálním směru se stranou léze. Oproti tomu léze v oblasti mezencefala způsobí kontralaterální vychýlení vertikály. Unilaterální léze thalamu či kortexu se projevují menšími odchylkami, které ale mohou být jak kontralaterální, tak ipsilaterální. Léze mozečku zejména v oblasti vestibulo-cerebelárních drah také mohou způsobovat odchylku ve vnímání vertikály, velikost vychylek pak odpovídá spíše lézím v oblasti prodloužené míchy. Pokud dojde u pacientů k iritaci vestibulárního labyrintu například vlivem endolymfatického hydroopsu, pacient vnímá vertikálu odkloněnou na opačnou stranu (Dieterich, Brandt 2019).

Některé studie prokázaly abnormality v percepci SVV u pacientů s IS. Větší vychylky SVV byly popsány u mladších pacientů. U dětí ve věku šest až devět let byly větší odchylky v SVV než u dětí starší 10 let. Větší odchylky od vertikály byly také u pacientů, jejichž skoliotická křivka byla větší (Cheung et al. 2002). Výsledky studií jsou nejednotné, některé popisují větší vychylky u pacientů s IS oproti zdravým kontrolám, jiné

žádné změny neprokazují (Cheung et al. 2002; Čakrt et al. 2011; Catanzariti et al. 2015; Hawasli, Hullar, Dorward 2015; Yagci, Yakut, Simsek 2018).

### 1.2.3.2. Vestibulární evokované myogenní potenciály (VEMP)

Jedná se o elektrofyziologickou metodu, která aktivuje vestibulární receptory zvukem nebo vibrací. Vestibulární evokované myogenní potenciály jsou reflexy s krátkou latencí. Otolitové makuly stimulujeme nízkofrekvenčním zvukem nebo vibrací s vysokou intenzitou okolo 95–100 dB. Tento podnět vyvolá krátkodobou inhibici s následnou excitací, kterou můžeme registrovat pomocí povrchových elektromyografických (EMG) elektrod. Při vyšetření rozlišujeme tzv. cervikální a okulární VEMP.

Cervikální VEMP (cVEMP) je technika, která je založená na reziduální akustické senzitivitě sakulu, který sloužil jako sluchový orgán a stále tak funguje u primitivních živočichů. Touto metodou vyšetřujeme funkci sakulokolického reflexu, který je přenášen přes motoneurony na předních rozích míšních až na ipsilaterální m. sternocleidomastoideus. Jako typickou odpověď registrujeme pomocí EMG vlnu p13 a n23. Okulární VEMP registruje signály pomocí EMG z m. obliquus oculi inferior. Stimulace se provádí pomocí vibrace s frekvencí 500 Hz. Podráždění utrikulu se přenáší do vestibulárních neuronů a odtud přes fasciculus longitudinalis medialis do jádra n. oculomotorius. Tyto dráhy se kříží, tudíž odpověď zaznamenáváme kontralaterálně jako vlnu n10 (Welgampola, Colebatch 2005; Rosengren et al. 2019).

#### ***Patologické nálezy při vyšetření VEMP***

Unilaterální absence cVEMP prokazuje ztrátu funkce ipsilaterálního sakulu, absence okulárního VEMP ztrátu funkce kontralaterálního utrikulu. U parciálních vestibulárních lézí je přítomný pokles amplitudy se stranovou asymetrií, kterou považujeme za patologickou, pokud je větší než 30 %. Vysoká amplituda VEMP je charakteristická při dehiscenci horního polokruhového kanálku. V souvislosti s centrální vestibulopatií byly pozorovány na cervikálních VEMP prodloužené latence vlny p13 a n23 a snížené amplitudy těchto vln (Welgampola, Colebatch 2005).

Většina ze studií, které vyšetřovaly vestibulární funkce u IS se zabývala funkcí polokruhových kanálků. Pouze jedna studie vyšetřovala 29 pacientů s IS s křivkami  $49 \pm 21.6^\circ$  pomocí VEMP a porovnávala jejich výsledky se zdravými probandy. Pacienti s IS

měli delší latenci vlny n23, což korelovalo s věkem. Starší pacienti měli delší latenci. Dále byly signifikantně větší amplitudy bilaterálně více však na pravé straně. Abnormální výsledky VEMP nekorelovaly s velikostí křivky (Pollak et al. 2013).

### 1.2.3.3. Vyšetření stability

K objektivnímu zhodnocení posturální stability využíváme metodu stabilometrie. Nejde o specifické vyšetření vestibulárního systému, protože k udržování rovnováhy využíváme kromě vestibulárního také vizuální a somatosenzorický systém. Na zpracování těchto informací se podílí mozeček, mozkový kmen, bazální ganglia a mozková kůra. Pro udržení stability stoje je důležitá koordinace mezi jednotlivými systémy. Dysfunkce jakéhokoliv výše zmíněného systému se projeví jako zhoršení rovnováhy.

Každý ze sensorických systémů má vlastní úroveň aktivačního prahu. Mezi jedinci existují také interindividuální rozdíly v tom, kterou sensorickou aferentaci upřednostňují pro udržování stability. Zapojení jednotlivých sensorických systémů závisí na podmínkách prostředí. Při potlačení jednoho sensorického vstupu dochází ke kompenzačnímu zapojení jiných aferentních vstupů. Při statickém stoji je pro udržení rovnováhy důležitá propriocepce a informace ze zrakového systému. Vestibulární systém se naopak více zapojuje při pohybu nebo při změně polohy hlavy (Horak 1997).

Při stabilometrickém vyšetření pacient stojí na silové plošině, která měří reakční sílu, která na ní působí. Reakční síla je zaznamenána pomocí piezoelektrických nebo tenzometrických snímačů, které jsou umístěné v rozích plošiny. Senzory zaznamenávají jednotlivé složky tlakových sil a jejich momenty. Z těchto hodnot matematicky vypočítá polohu působíště výsledné tlakové síly Center Of Pressure (COP) v anterioposteriorním a mediolaterálním směru s definovanou vzorkovací frekvencí. Ze získaného signálu můžeme analyzovat různé parametry. Jedním z parametrů, které hodnotíme je trajektorie COP, na které můžeme měřit její amplitudu, frekvenci či rychlost. Nejčastěji se hodnotí délka trajektorie COP (body sway) a plocha, kterou vykoná COP svým pohybem během časové jednotky dále amplituda a rychlost. Stabilometrii můžeme rozdělit na statickou a dynamickou. Statická stabilometrie hodnotí posturální výchylky během klidového stoje pacienta na stabilní plošině. Při dynamickém vyšetření dochází navíc k pohybu plošiny, na které pacient stojí (Timmann-Braun 2012).



### ***Patologické nálezy u stabilometrického vyšetření***

Stabilometrie hodnotí poruchy stability stoje, ale není specifická pro stanovení diagnózy, můžeme zde však pozorovat typické nálezy. Prodloužení trajektorie a zvětšení plochy výchylek značí posturální nestabilitu. Asymetrické zatížení, omezené výchylky v mediolaterálním směru a posun COP ke straně léze můžeme pozorovat u pacientů s UVL nebo u pacientů po cévní mozkové příhodě. Frekvenční analýza signálu při stabilometrickém vyšetření umožňuje rozpoznat konkrétní onemocnění. Jedním z typických patologických nálezů je 3 Hz posturální třes při atrofii předního laloku mozečku nebo 16 Hz třes při ortostatickém tremoru (Černý Rudolf, Čákr Ondřej, Jeřábek Jaroslav 2017)

Studie poukazují na fakt, že u pacientů s IS je narušená stabilita. Dochází k větším výchylkám COP při stoji, které se zvětšují při ztížených sensorických podmínkách (Dufvenberg et al. 2018). Ukazuje se, že vliv na rovnováhu má lokalizace i tvar skoliotické křivky. Nejméně narušenou stabilitu mají pacienti s primární hrudní a kompenzační bederní křivkou, dále pacienti pouze s hrudní či thorakolumbální křivkou a nejhorší stabilitu měli pacienti s bederní křivkou (Gauchard et al. 2001). Lokalizace křivky tak měla vliv na schopnost udržení rovnováhy hlavně v mediolaterálním směru. Čím níže se křivka nacházela, tím horší stabilitu pacienti měli. Kromě lokalizace může mít vliv na rovnováhu také velikost křivky. Horší posturální stabilitu převážně v situacích se sensorickým konfliktem vykazují pacienti s křivkami většími než 14° dle Cobba, oproti pacientům s křivkami menšími (Haumont et al. 2011; Byl et al. 1997). Nošení korzetu u pacientů s IS může změnit jejich rovnováhu, krátkodobě po začátku léčby pomocí korzetu může dojít ke zhoršení stability. Dlouhodobě ale korzet u pacientů zlepšuje rovnováhu při statickém stoji. Při dynamickém vyšetření žádné zlepšení nebylo prokázáno (Veis Karami et al. 2020).

Obecně lze říci, že pacienti s IS mají horší rovnováhu oproti stejně zdravým probandům. Hůře jsou na tom pacienti s většími křivkami v sensoricky náročnějších situacích.

### ***Shrnutí teoretických poznatků***

Existuje řada studií, které detekovaly změny v morfologii či funkci vestibulárního systému u pacientů s IS. Pacienti s IS mají odlišnou morfologii vestibulárního systému a narušenou kontrolu posturální stability a percepce vertikality. Výsledky studií jsou velmi

---

heterogenní. Jednou z příčin může být malý vzorek probandů, který ukazuje změny pouze u určité skupiny pacientů s IS. Další příčinou může být fakt, že každá studie hodnotila vestibulární funkce pouze pomocí několika vybraných testů, nikoli komplexně. Nebyl nalezen jednoznačný vztah mezi velikostí křivky, její lokalizací a vyšetřovanými parametry. Výsledky uvedených studií však podporují hypotézu o souvislostech mezi IS a změnou morfologie či funkce vestibulárního systému. Doposud není objasněno, zda vestibulární dysfunkce není doprovodným jevem, který se u pacienta s IS objevuje spíše jako kompenzační mechanismus při změně zakřivení páteře. Tato disertační práce si klade za cíl vyšetřit vestibulární systém u pacientů s IS a komplexněji doplnit poznatky z předchozích publikovaných studií.

## 2. CÍLE PRÁCE A HYPOTÉZY

Práce zkoumá vestibulární funkce u pacientů s IS. Pro zhodnocení těchto funkcí jsme zvolili komplexní sadu vyšetření, které nám umožňují hlubší pochopení vzájemných souvislostí mezi IS a vestibulárním systémem a poskytují širší pohled na tuto problematiku.

Hlavním cílem práce bylo zhodnotit percepci SVV, vestibulární evokované myogenní potenciály, posturální stabilitu a spontánní polohu hlavy u pacientů s IS a porovnat je s nálezy u zdravých jedinců a pacientů s definovanou vestibulární poruchou.

Hlavní hypotézou je, že nalezneme statisticky významné rozdíly ve vestibulárních funkcích mezi sledovanými skupinami. Výzkum jsme rozdělili do čtyřech dílčích studií.

### **Studie č. 1: Vestibulární funkce u pacientů s idiopatickou skoliózou**

**Cíl:** Porovnat výsledky SVV, VEMP a stabilometrického vyšetření mezi dětmi s IS a zdravými jedinci.

**Hypotéza 1:** Pacienti s idiopatickou skoliózou budou vykazovat statisticky významné rozdíly v percepci SVV, VEMP a v posturální stabilitě oproti zdravým probandům.

### **Studie č. 2: Subjektivní vizuální vertikála a poloha hlavy u pacientů s idiopatickou skoliózou**

**Cíl:** Porovnat spontánní držení hlavy ve frontální rovině a jeho vliv na percepci SVV u dětí s IS oproti zdravým probandům. Dále zjistit, zda existuje korelace mezi stranou úklonu hlavy se stranou náklonu SVV.

**Hypotéza 2:** Pacienti s IS mají statisticky významný rozdíl mezi percepcí SVV a spontánním držením hlavy v úklonu oproti zdravým probandům.

### **Studie č. 3: Vliv prolongovaného úklonu hlavy na vnímání vizuální vertikály u zdravých probandů**

**Cíl:** Zhodnotit vliv úklonu hlavy na percepci SVV u zdravých jedinců. Zjistit, hodnotu úhlu potřebného ke změně vnímání SVV. Dále zjistit, jak ovlivní prolongovaný úklon hlavy percepci SVV.

---

**Hypotéza 3:** Při prolongovaném úklonu hlavy dojde u zdravých probandů ke statisticky významné změně ve vnímání SVV oproti vzpřímenému postavení hlavy.

#### **Studie č.4: Vestibulární funkce u pacientů po kochleární implantaci**

**Cíl:** Posouzení percepce SVV a posturální stability u pacientů po kochleární implantaci a jejich srovnání se zdravými probandy.

**Hypotéza 4:** Pacienti po kochleární implantaci budou mít statisticky významně odlišnou percepci SVV a posturální stabilitu oproti zdravým probandům.

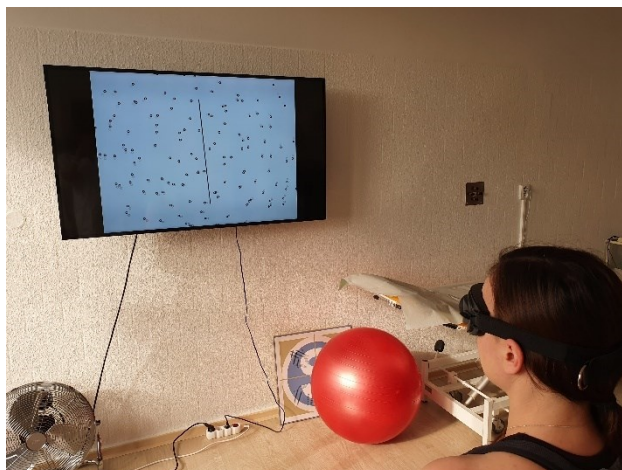
### 3. METODIKA

#### 3.1. Základní popis metod pro vyšetření vestibulárního systému

Pro vyšetření vestibulárního systému jsme využili v uvedených studiích metodu vyšetření percepce subjektivní vizuální vertikály, cervikální vestibulární evokované myogenní potenciály, stabilometrické vyšetření a vyšetření polohy hlavy. V této kapitole budou metody popsány obecně, konkrétní provedení metod bude uvedeno vždy u příslušné studie.

##### 3.1.1. Vyšetření subjektivní vizuální vertikály

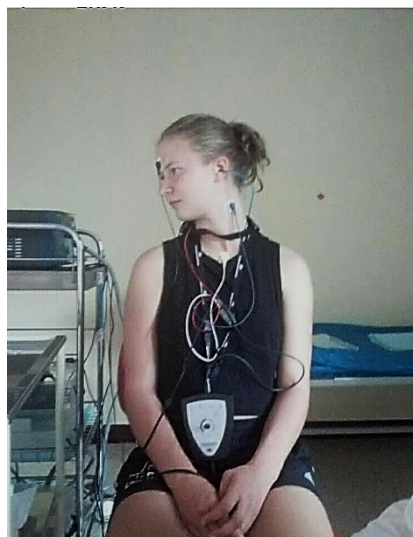
Percepci SVV jsme měřili staticky (bez pohybu pozadí) i dynamicky (s optokinetickou stimulací). Vyšetření probíhalo na přístroji Synapsys (Synapsys Subjective Vertical verze 1.3.2, Francie) nebo pomocí Bucket testu. Během vyšetření na přístroji Synapsys seděli probandi na židli dva metry od LCD obrazovky umístěné před nimi ve výši očí (Obr. 2). Měření bylo prováděno binokulárně. Během vyšetření byla vyloučena optická orientace z okolí pomocí speciálních brýlí a hlava vyšetřovaného nebyla fixována. Každý vyšetřovaný měl za úkol orientovat pomocí dálkového ovladače linii zobrazenou na obrazovce do svislé polohy. Jedním stisknutím tlačítka se linie otočila o jeden stupeň. Při dynamickém vyšetření SVV byl na pozadí tečkovaný vzor, který se otáčel ve směru nebo proti směru hodinových ručiček. Rychlost otáčení v dynamických testech byla 40°/s. Na začátku každého pokusu byla linie náhodně nakloněna v rozmezí  $\pm 20^\circ$ . Každý proband absolvoval šest pokusů pro statickou SVV a dvanáct pokusů pro dynamickou SVV. Odchylka SVV od skutečné prostorové vertikály byla pro každého probanda vypočítána jako průměr všech šesti měření pro statickou situace, šest pro dynamickou s rotací ve směru hodinových ručiček a šest pro dynamickou s rotací proti směru hodinových ručiček. Normy pro statickou SVV jsou  $\pm 2^\circ$  a pro dynamickou SVV  $\pm 4^\circ$ . Vyšetření pomocí Bucket testu je popsáno v kapitole 3.3.2.



**Obr. 2** Vyšetření vnímání dynamické vizuální vertikály pomocí přístroje Synapsys

### 3.1.2. Vyšetření vestibulárních evokovaných myogenních potenciálů

Vyšetřili jsme cervikální vestibulární evokované myogenní potenciály (cVEMP). Pomocí přístroje Interacoustics Eclipse, (VEMP v4.5.1, Dánsko) pomocí akustických stimulů o intenzitě 95 dB. Jako akustické podněty byly použity krátké tóny o frekvenci 500 Hz. Akční potenciály m. sternocleidomastoideus byly zaznamenávány povrchovými elektrodami umístěnými ve střední třetině svalu. Všichni probandi byli instruováni, aby během vyšetření seděli rovně na židli s hlavou otočenou kontralaterálně ke stimulovanému uchu (Obr. 3). Aktivace svalů byla během vyšetření sledována a byla udržována mezi 50-150  $\mu\text{V}$ . V každém pokusu byla impedance  $<5\text{k}\Omega$ . Výsledky celkem 200 podnětů byly zprůměrovány. Každé ucho jsme hodnotili dvakrát a výsledky zprůměrovali. K vyhodnocení výsledků jsme použili latenci (ms) a amplitudu ( $\mu\text{V}$ ) pozitivní vlnu p13 a negativní vlnu n23. Výsledek měření cVEMP jsme považovali za abnormální, pokud byly asymetrické (pokud byl poměr amplitudové asymetrie  $> 0,33$ ) nebo pokud nebyly výbavné na jedné straně (Rosengren et al. 2019).



**Obr. 3** Vyšetření cervikálních vestibulárních evokovaných myogenních potenciálů

### 3.1.3. Vyšetření stabilometrie

Posturální kontrolu jsme vyšetřovali na tenzometrické plošině (Kistler, typ 9286BA, Švýcarsko) se vzorkovací frekvencí 350 Hz. Probandi byli vyšetřeni testy v různých senzoričkových podmínkách, které byly specifické pro každou studii. U každého testu stáli probandi na stabilometrické plošině vzpřímeně bez obuvi. Jejich paty byly od sebe vzdáleny 10 cm a chodidla v úhlu 30°. Probandi byli instruováni, aby klidně stáli s rukama podél těla a dívali se přímo před sebe na modrou značku umístěnou 2 metry před nimi v úrovni očí (Obr. 4). Každý test trval 30 sekund. Pokud proband změnil polohu horních či dolních končetin z důvodu posturální korekce, test se opakoval, maximálně třikrát. Pokud vyšetřovaný neudržel svou pozici v žádném ze tří opakování, vyhodnotili jsme test jako neúspěšný. Během testů byly zaznamenávány parametry COP. Hodnocené parametry COP byly: celková délka trajektorie (délka v mm) v anterioposteriorním (AP) a mediolaterálním (ML) směru, celková plocha trajektorie (mm<sup>2</sup>), celková rychlost pohybu COP (mm/s) ve směru AP a ML a maximální amplituda (mm).

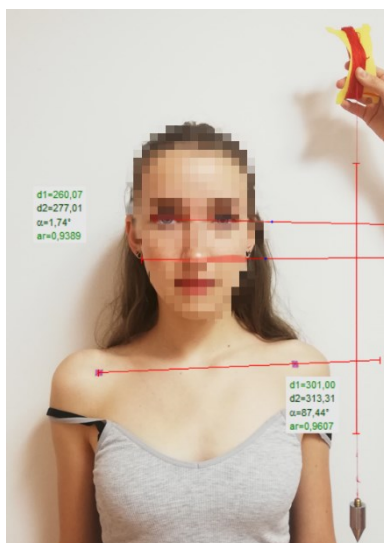


**Obr. 4** Stabilometrické vyšetření, stoj na měkké podložce s otevřenýma očima

#### 3.1.4. Vyšetření polohy hlavy

Vyšetření polohy hlavy jsme provedli u probandů ve stoje. Proband byl instruován, aby stál ve volném stoji s horními končetinami podél těla a díval se před sebe. Poté jsme pořídili tři snímky každého probanda. Ke zpracování digitálních fotografií byl použit počítačový program MB-Ruler Pro (MB-SoftwareSolutions, Německo, verze 5.2). Pro vyšetření polohy hlavy ve frontální rovině jsme vybrali tři bilaterální antropometrické body: dolní okraj lobulus auriculae, processus coracoideus a angulus oculi lateralis. Příslušné antropometrické body jsme spojili do úseček, kde antropometrické body představovaly jejich hrany a olovnice přesnou geofyzikální vertikálu (Obr. 5). Měřili jsme koronální úhel úklonu hlavy (Coronal head tilt nebo anterior head alignment) a koronální úhel ramene (Coronal shoulder angle nebo anterior shoulder alignment). Standardní hodnota obou úhlů by měla být rovna  $90^\circ$  (Singla, Veqar, Hussain 2017).





**Obr. 5** Měření polohy hlavy u pacientky s AIS

## 3.2. Studie 1: Vestibulární funkce u pacientů s idiopatickou skoliózou

### 3.2.1. Charakteristika souboru

Tato studie zahrnovala celkem 40 adolescentů ve věku 10–18 let, dvacet pacientů s IS ve věku  $14,7 \pm 1,6$  let a dvacet zdravých probandů ve věku  $14,5 \pm 2,7$  let. Podrobná charakteristika probandů je v tabulce 1. Do studie byli zařazení pacienti Kliniky rehabilitace a tělovýchovného lékařství 2. LF UK a FN Motol. Všichni pacienti byli vyšetřeni ortopedem a měli rentgenové vyšetření páteře, na základě kterého jim byla diagnostikována IS. Cobbův úhel v hlavní křivce byl  $28^\circ \pm 12,5^\circ$  (rozmezí 11–52°). Nikdo z pacientů nepodstoupil operační výkon na páteři. Do studie nebyli zařazení pacienti s jinými neurologickými, ortopedickými či sensorickými vadami v anamnéze.

Probandi z kontrolní skupiny byli vyšetřeni ortopedem a byla u nich vyloučena skolióza (Adamsův screeningový test). V kontrolní skupině nebyl nikdo s neurologickou, ortopedickou, muskuloskeletální, či sensorickou vadou. Mezi skupinami nebyly statisticky signifikantní rozdíly ve věku a v základních antropometrických parametrech.

**Tab. 1** Charakteristika probandů ve studii 1. Data jsou uvedena ve tvaru průměr ± SD

<b>Parametry</b>	<b>Pacienti</b>	<b>Kontroly</b>
Počet	20	20
Chlapci/dívky	4/16	7/13
Věk (roky)	14,7 ± 1,6	14,5 ± 2,1
Váha (kg)	52,6 ± 9,6	55,3 ± 11,6
Výška (m)	165,3 ± 7,9	166 ± 12,4
BMI (kg/m <sup>2</sup> )	19,1 ± 2,5	19,8 ± 2,1
Cobbův úhel (°)	28 ± 12,5	-
Hlavní hrudní křivka	15	-
Hlavní bederní křivka	5	-
Pravostranná/levostranná hlavní křivka	14/6	-

### 3.2.2. Metody

#### *Vyšetření SVV*

K vyšetření percepce SVV jsme využili přístroj Synapsys (Subjective Vertical verze 1.3.2, Francie). Vyšetření bylo provedeno za statických a dynamických podmínek, v každé vyšetřované situaci bylo provedeno 6 pokusů. Podrobný popis vyšetření je v kapitole 3.1.1.

#### *Vyšetření VEMP*

Vyšetření pomocí cVEMP bylo provedeno na přístroji Interacoustics Eclipse, (VEMP v4.5.1). Průběh vyšetření je detailně popsán v kapitole 3.1.2.

#### *Stabilometrické vyšetření*

Posturální výchylky byly kvantifikovány pomocí tenzometrické desky (Kistler, typ 9286BA, Švýcarsko). Průběh stabilometrického vyšetření je popsán v kapitole 3.1.3.

Vyšetření bylo provedeno v šesti senzorických podmínkách:

- 1) stoj na pevné podložce s otevřenými očima
- 2) stoj na pevné podložce se zavřenými očima
- 3) stoj na měkké podložce s otevřenými očima
- 4) stoj na měkké podložce se zavřenými očima
- 5) stoj na pevné podložce v tandemu s otevřenými očima (Obr. 6)
- 6) stoj na pevné podložce v tandemu se zavřenými očima



**Obr. 6** Stabilometrické vyšetření, stoj v tandemu s otevřenýma očima

V každém testu byli probandi instruováni, aby stáli klidně. Měření trvalo 30 s. Jejich paty byly vzdáleny 10 cm a chodidla svírala úhel  $30^\circ$ . Pouze v tandemovém postoji byly obě nohy za sebou, v řadě. Hodnocené parametry COP byly celková dráha výchylek (SP) v AP a ML směru, celková plocha výchylek (SA), celková rychlost výchylek (mm/s) ve směru AP a ML a maximální amplituda (mm) ve směru AP a ML.

### 3.2.3. Statistické zpracování dat

Statistická analýza byla provedena pomocí programu Statistica 13.3 (TIBCO Software Inc., USA). Popisné statistiky jsou uváděny jako průměr  $\pm$  směrodatná odchylka (SD). Mann-Whitneyův U test byl použit k porovnání rozdílů v SVV mezi pacienty a kontrolami a ke srovnání lokalizace primárního zakřivení u pacientů s IS a stabilometrickými parametry. Parametry stabilometrie byly před statistickou analýzou logaritmičsky transformovány. Srovnání mezi skupinami pro každý stabilometrický parametr a VEMP bylo provedeno pomocí t-testu pro nezávislé výběry. K porovnání asymetrie u VEMP byl použit Pearsonův chí-kvadrát test. K posouzení korelace mezi percepcí SVV, parametry stabilometrie a parametry VEMP u pacientů s IS byl použit Spearmanův korelační test. Hladina statistické významnosti byla stanovena na  $p < 0,05$ .

### 3.3. Studie 2: Subjektivní vizuální vertikála a poloha hlavy u pacientů s idiopatickou skoliózou

#### 3.3.1. Charakteristika souboru

Studie se zúčastnilo 37 pacientů s AIS ve věku  $14,8 \pm 2,9$  let a 37 zdravých probandů ve věku  $14,2 \pm 2,1$  let. Do studie byli zařazeni pacienti Kliniky rehabilitace a tělovýchovného lékařství 2. LF UK a FN Motol, všichni pacienti splnili diagnostická kritéria pro AIS, která vyhodnotil ortoped na základě RTG snímku páteře. Cobbův úhel v hlavní křivce byl  $26,5^\circ \pm 13,9$  (rozmezí 11–56°). Nejčastějším typem skoliotické křivky byla dvojitá křivka u 26 pacientů, 5 pacientů mělo trojitou křivku, 5 pacientů mělo pouze hrudní a 1 pouze bederní křivku. Do studie nebyli zařazeni pacienti s jinými neurologickými, ortopedickými či senzorickými vadami v anamnéze.

Kontrolní skupinu tvořili žáci základních škol, kteří byli klinicky vyšetřeni ortopedem a byla u nich vyloučená IS či vadné držení těla. Žádný z probandů neměl neurologické, ortopedické, muskuloskeletální, zrakové nebo sluchové poruchy. Mezi skupinami nebyly statisticky signifikantní rozdíly ve věku a v základních antropometrických parametrech. Charakteristika souboru je uvedena v tabulce 2.

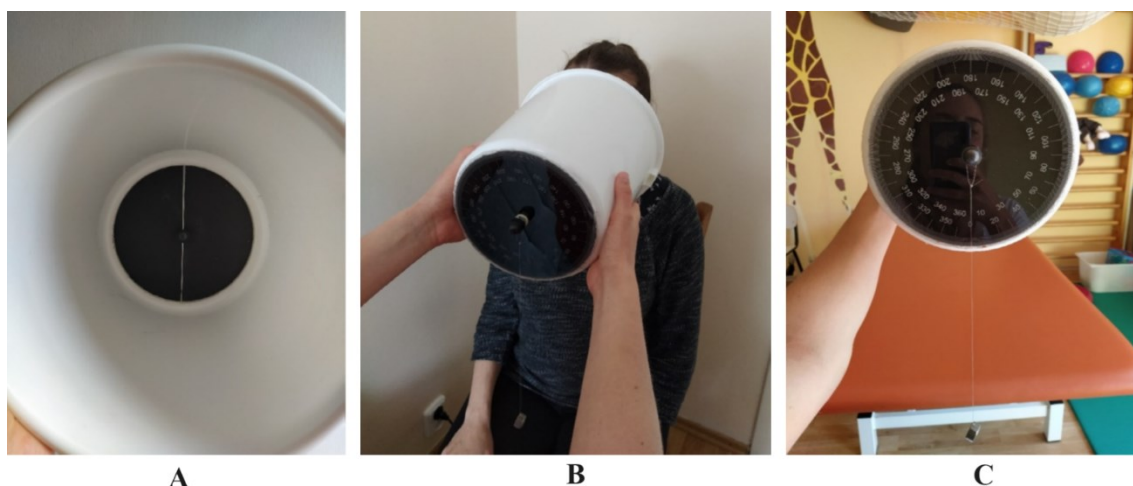
**Tab. 2** Charakteristika souboru studie 2

<b>Parametry</b>	<b>Pacienti</b>	<b>Kontroly</b>
Počet	37	37
Chlapci/dívky	8/29	8/29
Věk (roky)	$14,8 \pm 2,9$	$14,2 \pm 2,1$
Cobbův úhel (°)	$26,5 \pm 13,9$	-
Dvojitá křivka	26	-
Trojitá křivka	5	-
Hrudní křivka	5	-
Bederní křivka	1	-
Konvexita hlavní křivky (vpravo/vlevo)	35/2	-
Korzet (ano/ne)	20/17	-

### 3.3.2. Metody

#### *Wyšetřeni SVV*

SVV jsme vyšetřili pomocí Bucket testu (Zwergal et al. 2009). Během vyšetření probandi seděli vzpřímeně na židli bez opory zad a horní končetiny volně spočívaly na jejich stehnech. Jejich úkolem bylo dívat se na dno kbelíku, přičemž jejich periferní vidění bylo zakryto okrajem kbelíku. Na vnitřní straně dna kbelíku byla kontrastní linie. Na vnější straně dna kbelíku byl umístěn úhloměr, z jehož středu byla spuštěná olovnice (Obr. 7). Měření byla prováděna binokulárně. Vyšetřující držel a otáčel kbelíkem na jednu stranu a probandi dostali pokyn, aby řekli „STOP“ v okamžiku, kdy se ocitne linie ve vertikální poloze. Hodnota odchylky byla odečtena na úhloměru. Měření probíhalo celkem šestkrát. Odchylka SVV od geofyzikální vertikály byla vypočtena pro každého vyšetřovaného jako průměr všech šesti měření. Pro statistickou analýzu byly použity absolutní hodnoty SVV.



**Obr. 7** Měření percepce SVV pomocí Bucket metody. A – linie na dně kyblíku pomocí které pacient určuje vertikálu, B – ukázka vyšetření, C – úhloměr na zevní straně kyblíku s olovnicí

#### *Wyšetřeni polohy hlavy*

Vyšetření polohy hlavy bylo provedeno ve vzpřímeném stoji. Detailní popis průběhu vyšetření je popsán v kapitole 3.1.4.

### 3.3.3. Statistické zpracování dat

Výsledná data jsou prezentována jako průměr  $\pm$  SD nebo medián [interkvartilní rozmezí, IQR] podle distribuce testované Shapiro-Wilkovým testem normality. Normálně rozložené parametry byly testovány t-testem nebo Pearsonovým testem. Neparametricky

rozložené proměnné byly testovány Spearmanovým nebo Mann-Whitneyovým U testem. Pro hodnocení četnosti byl použit Pearsonův chí-kvadrát test. Pro statistickou analýzu byl použit program Statistica verze 10.0 (StatSoft Inc., Oklahoma, USA). Hladina statistické významnosti byla stanovena na  $p < 0,05$ .

### **3.4. Studie 3: Vliv prodlouženého úklonu hlavy na vnímání vizuální vertikály u zdravých probandů**

#### **3.4.1. Charakteristika souboru**

Do studie bylo zařazeno 103 zdravých probandů (ve věku 19–42 let). Do studie nebyli zařazeni probandi s bolestí či omezenou hybností páteře, s vizuální, neurologickou, vestibulární či kognitivní poruchou. Dále nebyli zařazeni jedinci po operaci v oblasti krční páteře nebo hlavy nebo úrazu v dané lokalitě s přetrvávajícími následky. V době testování žádný z probandů netrpěl akutní bolestí pohybového aparátu, která by mohla ovlivnit měření.

Sto tři probandů bylo náhodně rozděleno do dvou skupin. Skupinu A tvořilo 52 probandů (30 žen, 22 mužů) ve věku  $24,5 \pm 4,1$  let. Skupinu B tvořilo 51 probandů (29 žen, 22 mužů) ve věku  $26,1 \pm 4,6$  let. Skupiny se nelišily pohlavím ani věkem.

#### **3.4.2. Metody**

##### ***Vyšetření SVV***

Vyšetření statické SVV probíhalo ve vzpřímeném sedu na židli na přístroji Synapsys (Subjective Vertical verze 1.3.2, Francie), podle metodiky popsané v kapitole 3.1.1. V této studii jsme vyšetřovali pouze statickou SVV. Vyšetření SVV bylo provedeno ve čtyřech různých pozicích hlavy. V každé pozici bylo provedeno celkem šest pokusů.

##### **1. pozice**

První měření bylo provedeno, když probandí seděli s hlavou v přirozené a nekorigované poloze. Hodnoty odchylky SVV a poloha hlavy byly zaznamenávány s přesností  $0,5^\circ$ .

##### **2. pozice**

U probandů byla náhodně vybrána strana úklonu. Hlava byla následně ukloněná ve frontální rovině o  $5^\circ$  ve skupině A a o  $20^\circ$  ve skupině B. Tato pozice byla po celou dobu

kontrolována pomocí kamery. Měření SVV v této pozici proběhlo ihned po uvedení hlavy do úklonu.

### **3. pozice**

Třetí měření SVV bylo provedeno po prolongovaném úklonu po dobu 5 minut s hlavou stále v úklonu.

### **4. pozice**

Na závěr byli probandi požádáni, aby vrátili hlavu do vzpřímeného postavení hlavy ihned po navrácení hlavy do vzpřímeného postavení proběhlo měření SVV a zaznamenání polohy hlavy.

### ***Vyšetření polohy hlavy***

Pro měření polohy hlavy jsme použili zařízení na snímání polohy hlavy, který vyvinul prof. Ing. Jiří Matas, Ph.D. a Ing. Jan Čech, Ph.D. z Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze. Tento program využívá kameru k poskytování okamžité zpětné vazby na úhel úklonu hlavy s přesností jedné desetiny stupně. Zdrojem dat pro kameru byly dva QR kódy umístěné na čelence, kterou měl proband nasazenou na hlavě (Obr. 8). Přímka spojující středy QR kódů tvořila linii, která byla porovnána s vertikálou kamery. K měření byla použita kamera z přenosného počítače, která byla vyrovnána pomocí ruční vodováhy.

Vyšetřovaný seděl vzpřímeně s rukama volně podél těla a byl instruován, aby se díval rovně před sebe. Změřili jsme polohu hlavy ve frontální rovině na začátku (v 1. pozici) a na konci experimentu (ve 4. pozici), zatímco probandi seděli vzpřímeně, ale uvolněně s rukama podél těla a instruování, aby se dívali přímo před sebe v úrovni očí. Během experimentu jsme kontrolovali polohu hlavy tak, aby hlava při prodlouženém úklonu byla stále ve stejné poloze.



**Obr. 8** Vyšetření polohy hlavy s čelenkou s QR kódy

### 3.4.3. Statistické zpracování dat

Všechna data jsou prezentována jako průměr  $\pm$  SD nebo medián [IQR] podle distribuce testovaného souboru na normalitu Shapiro-Wilkovým testem. Normálně rozložené parametry byly testovány t-testem nebo Pearsonovým testem. Neparametricky rozdělené parametry byly testovány Mann-Whitneyovým U testem. Pro hodnocení četnosti byl použit Pearsonův chí-kvadrát test. Pro statistickou analýzu byla použita Statistica verze 10.0 (StatSoft Inc., Oklahoma, USA). Hladina statistické významnosti byla stanovena na  $p < 0,05$ .

## 3.5. Studie 4: Vestibulární funkce u pacientů po kochleární implantaci

### 3.5.1. Charakteristika souboru

Ve studii jsme vyšetřovali dvě skupiny, první tvořilo 39 pacientů (23 žen a 16 mužů) s unilaterální kochleární implantací (KI) ve věku  $44,7 \pm 13,6$  let (průměr  $\pm$  SD, rozmezí 18,7–72,3 let). Všichni pacienti podstoupili KI z důvodu těžké senzorineurální ztráty sluchu. Implantace byla provedena u 18 pacientů na pravé straně a u 21 pacientů na levé straně. Nikdo z pacientů neměl žádné vážné neurologické onemocnění. Klinické neurootologické vyšetření neodhalilo před operací vestibulární poruchu. Nikdo z pacientů netrpěl poruchou rovnováhy a závratěmi.

Kontrolní skupinu tvořilo 46 zdravých jedinců (29 žen a 17 mužů) ve věku  $44,0 \pm 12,3$  let (průměr  $\pm$  SD, rozmezí 19,4–69,7 let).



Vyšetření pacientů bylo provedeno jeden den před operací, 2. pooperační den a poté 14. pooperační den. Kontrolní skupina byla vyšetřena pouze jednou.

Nebyly zjištěny statisticky významné rozdíly ve věku a pohlaví u kontrol a u pacientů před operací.

### **3.5.2. Metody**

#### ***Vyšetření SVV***

Vyšetření SVV bylo provedeno pomocí systému Synapsys (Synapsys Subjective Vertical, Francie). Detailní popis vyšetření je v kapitole 3.1.1. U pacientů jsme testovali statickou i dynamickou SVV. Bylo provedeno celkem 6 pokusů při statickém vyšetření.

#### ***Stabilometrické vyšetření***

Posturální stabilita byla vyšetřena pomocí stabilometrické plošiny Kistler (typ 9286BA, software MARS, Švýcarsko), Detailně popsané v kapitole 3.1.3. Pro hodnocení stability stoje jsme použili parametry SA a SP. Každý test trval 30 s.

Vyšetření bylo provedeno ve čtyřech senzoricích podmínkách:

- 1) stoj na pevné podložce s otevřenýma očima
- 2) stoj na pevné podložce se zavřenýma očima
- 3) stoj na měkké podložce s otevřenýma očima
- 4) stoj na měkké podložce se zavřenýma očima

### **3.5.3. Statistické zpracování dat**

Statistická analýza byla provedena pomocí programu Statistica 13.3 (TIBCO Software Inc., USA). Popisné statistiky jsou uvedeny jako průměr  $\pm$  SD, pokud je normálně distribuce, jinak medián [IQR]. Normálnost byla testována pomocí Shapiro-Wilkova testu. Stabilometrické parametry (SA a SP) byly logaritmicky transformovány před statistickým zpracováním. Srovnání mezi skupinami bylo provedeno pomocí t-testu pro nezávislý výběr. Analýza více parametrů byla provedena pomocí ANOVA, Fisher post-hoc testu. Statistická významnost byla stanovena na  $p < 0,05$ .

## 4. VÝSLEDKY

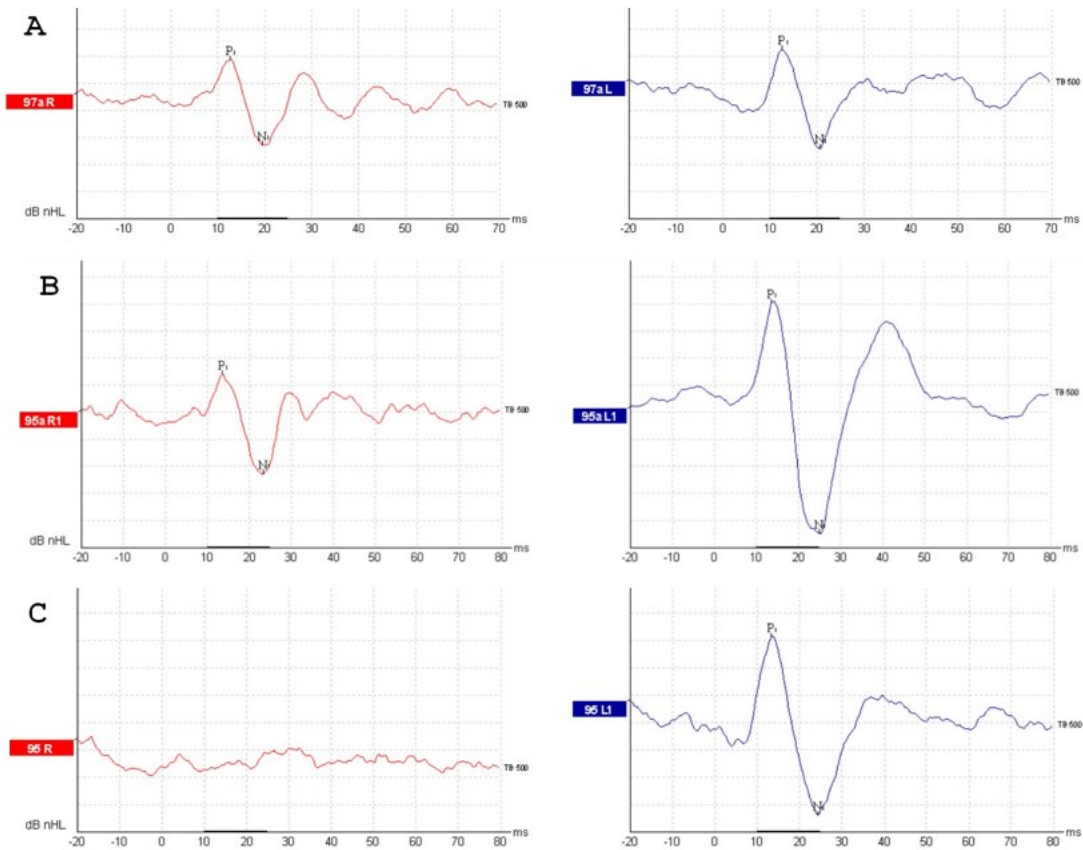
### 4.1. Studie 1: Vestibulární funkce u pacientů s idiopatickou skoliózou

#### 4.1.1. Vyšetření SVV

Vyšetření statické SVV neprokázalo statisticky významný rozdíl mezi skupinami ( $0,30 \pm 1,20^\circ$  vs.  $0,16 \pm 0,74^\circ$  pacienti vs. kontroly). V dynamických podmínkách jsme zaznamenali statisticky významný rozdíl mezi skupinami. Pacienti měli větší náklon SVV než kontrolní skupina ( $0,98 \pm 0,86^\circ$  vs.  $0,75 \pm 0,58^\circ$  pacienti vs. kontroly,  $p < 0,05$ ). Skupina pacientů měla také statisticky významně více pokusů, při kterých byly hodnoty SVV nad fyziologickou normou  $\pm 2$  resp.  $4^\circ$  oproti kontrolní skupině ( $p < 0,05$ ).

#### 4.1.2. Vyšetření VEMP

Vyšetření VEMP se zúčastnilo z důvodu technické závady zařízení pouze 13 pacientů. Analýza VEMP neprokázala statisticky významný rozdíl v latencích a amplitudách p13 a n23. Pacienti s IS vykazovali tři typy odpovědí (Obr. 9): 1) normální: bilaterální odpovědi VEMP s normálními parametry (8/13 pacientů), 2) asymetrické: bilaterální odpovědi VEMP odlišné na každé straně s abnormálním poměrem asymetrie (3/13 pacientů), 3) bez odpovědi: absence odpovědi na jedné straně (2/13 pacientů). Kontrolní skupina vykazovala pouze normální bilaterální odpovědi s normálními parametry. Mezi skupinami byl statisticky významný rozdíl v normální/abnormální odpovědi ( $p < 0,05$ ).



**Obr. 9** Záznam z vyšetření cervikálních vestibulárních evokovaných myogenních potenciálů s typickou vlnou p13 a N23. Červený graf znázorňuje odpověď VEMP z pravého labyrintu, modrý z levého. A – symetrická odpověď na obou stranách, B – Asymetrická odpověď, na levé straně s větší amplitudou, C – absence VEMP na pravé straně

#### 4.1.3. Stabilometrické vyšetření

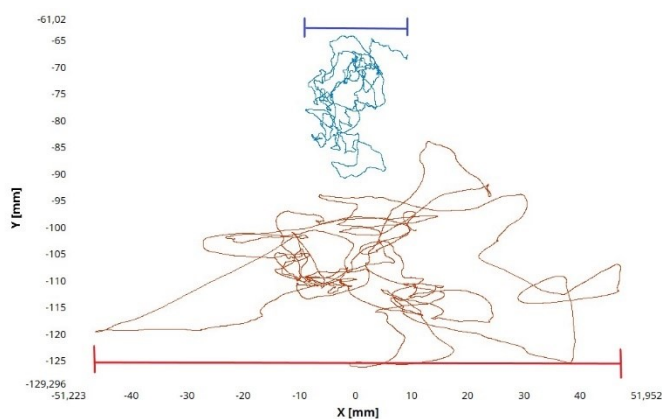
V podmínce 3 (stoj na pěnové podložce s otevřenými očima) měli pacienti s IS významně větší celkovou rychlost výchylek COP (logX průměr  $\pm$  SD;  $2,93 \pm 0,34$  vs.  $2,74 \pm 0,21$  pacientů vs. kontroly) a celkovou plochu výchylek COP ( $6,28 \pm 0,29$  vs  $6,12 \pm 0,17$  pacientů vs. kontroly) než kontrolní skupina (v obou případech  $p < 0,05$ ). V podmínkách 1, 2 a 4 (Tab. 3) nebyl zaznamenán mezi skupinami významný rozdíl v parametrech COP.

Pacienti s IS měli statisticky významně vyšší celkovou rychlost výchylek COP ( $2,41 \pm 0,37$  vs  $2,17 \pm 0,2$  pacientů vs kontrola), celkovou trajektorii COP ( $5,81 \pm 0,37$  vs  $5,57 \pm 0,22$  pacientů vs kontroly) a maximální amplitudu COP v ML směru ( $3,30 \pm 0,45$  vs.  $3,01 \pm 0,36$  pacientů vs. kontroly) (Obr. 10) oproti kontrolní skupině ( $p < 0,05$ ). Nenalezli jsme rozdíl v parametrech COP v AP směru. Nenalezli jsme korelaci mezi lokalizací primární křivky a stabilometrickými parametry.

**Tab. 3** Sensorické podmínky využité při měření stabilometrie

1	stoj na pevné podložce s otevřenými očima
2	stoj na pevné podložce se zavřenými očima
3	stoj na měkké podložce s otevřenými očima
4	stoj na měkké podložce se zavřenými očima
5	stoj v tandemu na pevné podložce s otevřenými očima
6	stoj v tandemu na pevné podložce se zavřenými očima

V podmínkách 5 a 6 nebyl mezi skupinami zaznamenán statisticky významný rozdíl v parametrech COP. Avšak všichni jedinci z kontrolní skupiny byli schopni podmínky dokončit bez pádu. Ve skupině pacientů 1 z 20 pacientů nebyl schopen dokončit test tandemového stoji s otevřenými očima a 3 z 20 pacientů nebyli schopni dokončit test tandemového stoji se zavřenými očima.



**Obr. 10** Stabilogram z vyšetření stoji na měkké podložce se otevřenými očima. Modrá čára znázorňuje pohyb COP u zdravého probanda, červená čára znázorňuje pacienta s IS. Úsečky označují maximální amplitudu výchylek v ML směru

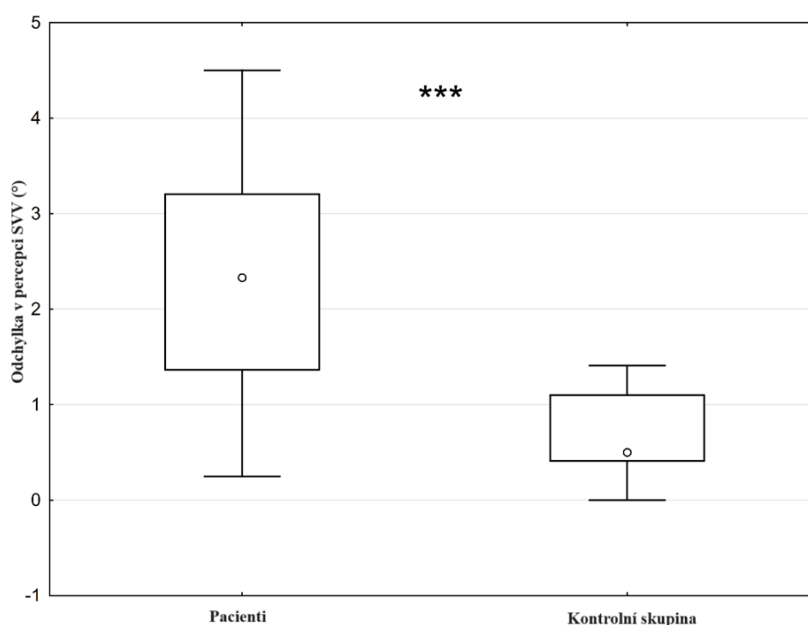
#### 4.1.4. Korelační analýza

Nezjistili jsme korelaci mezi vnímáním SVV, stabilometrickými parametry a VEMP.

## 4.2. Studie 2: Subjektivní vizuální vertikála a poloha hlavy u pacientů s idiopatickou skoliózou

### 4.2.1. Vyšetření SVV

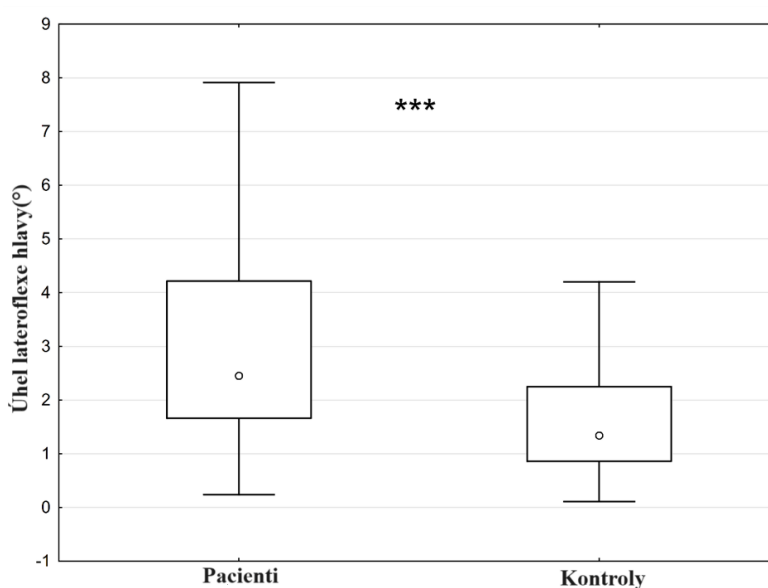
Mezi skupinami byl statisticky významný rozdíl v mediánu absolutních hodnot SVV ( $2,33^\circ$  [1,40-3,25] vs  $0,50^\circ$  [0,41-1,10],  $U=127,5$ ,  $p < 0,001$ ; pacienti vs kontroly) (Obr. 11). Nenašli jsme rozdíly mezi velikostí odchylky SVV u pacientů, kteří nosí nebo nenosí korzet ( $F=117,2$ ,  $p=0,99$ ). Dále nebyla nalezena korelace mezi velikostí odchylky SVV a délkou fyzioterapie ( $R=0,16$ ,  $p=0,34$ ), věkem v době diagnózy ( $R=0,22$ ,  $p=0,19$ ) ani velikostí hlavní křivky ( $R=-0,01$ ,  $p=0,97$ ). Mezi směrem odchylky SVV a stranou hlavní křivky také nebyl signifikantně významný rozdíl ( $\chi^2=0,0$ ,  $p=1,00$ ).



**Obr. 11** Porovnání SVV u pacientů s AIS a u zdravých kontrol.

#### 4.2.2. Vyšetření polohy hlavy

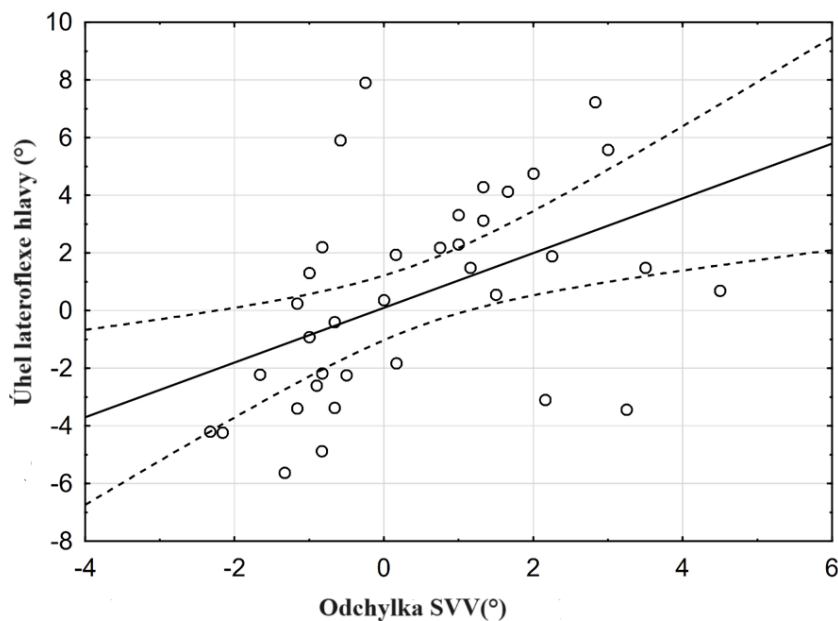
Při testování polohy hlavy jsme našli statisticky významnou korelaci mezi úhlem koronálního úklonu hlavy v úrovni očí a v úrovni uší u pacientů s IS ( $R=0,96$ ,  $p < 0,001$ ) i u kontrol ( $R=0,96$ ,  $p < 0,001$ ). Zjistili jsme také stranovou korelaci mezi úhlem koronálního úklonu hlavy a koronálním úhlem ramen, ale pouze u pacientů ( $R=0,55$ ,  $p < 0,001$ ), nikoli u kontrol ( $R=0,13$ ,  $p=0,43$ ). Úhel úklonu hlavy ve frontální rovině byl statisticky významně větší u pacientů než u kontrol ( $2,3^\circ$  [ $1,8-4,2$ ] vs  $1,3^\circ$  [ $0,9-2,3$ ]; pacienti vs. kontroly,  $U=385,0$ ,  $p < 0,001$ ) (Obr. 12). U pacientů s IS nebyla korelace mezi stranou úklonu hlavy a stranou hlavní skoliotické křivky ( $\chi^2=3,1$ ,  $p=0,08$ ).



**Obr. 12** Absolutní hodnota úhlu úklonu hlavy u pacientů s AIS a u zdravých probandů

#### 4.2.3. Korelace úklonu hlavy a SVV

Mezi stranou úklonu SVV a stranou úklonu hlavy jsme našli statisticky významnou korelaci u pacientů ( $\chi^2=5,6$ ,  $p < 0,05$ ) (Obr. 13), ale ne u kontrol ( $\chi^2=0,5$ ,  $p=0,83$ ).



**Obr. 13** Korelace odchylky SVV s úhlem lateroflexe hlavy u pacientů s AIS. Záporné hodnoty udávají odchylku doleva, kladné hodnoty udávají odchylku doprava

### 4.3. Studie 3: Vliv prolongovaného úklonu hlavy na vnímání vizuální vertikály u zdravých probandů

#### 4.3.1. Vyšetření SVV

Subjektivní vizuální vertikála v 1. poloze byla u všech probandů ve fyziologické normě  $\pm 2^\circ$ . Nalezli jsme statisticky významný rozdíl mezi 1. a 2. pozicí v mediánu absolutních hodnot SVV ( $p < 0,05$ ) a také mezi 1. a 3. pozicí ( $p < 0,05$ ). Nebyl zaznamenán signifikantní rozdíl mezi skupinami A a B.

#### 4.3.2. Vyšetření polohy hlavy

Průměrná poloha úklonu hlavy u všech probandů ve frontální rovině na začátku byla  $1,6^\circ \pm 1,2$ . Nalezli jsme statisticky významný rozdíl v poloze hlavy na konci experimentu ve 4. pozici ( $2,6^\circ \pm 2,1$ ) oproti 1. pozici hlavy na začátku experimentu ( $p < 0,001$ ). Rozdíl byl také mezi skupinami. Skupina B měla na konci experimentu významně větší úklon hlavy než skupina A ( $2,3 \pm 2,3$  vs  $1,4 \pm 0,7$ ;  $p < 0,001$ ). Směr úklonu hlavy po skončení experimentu byl shodný se stranou, na kterou ji měli probandi nakloněnou při prolongovaném úklonu hlavy ( $p < 0,001$ ).

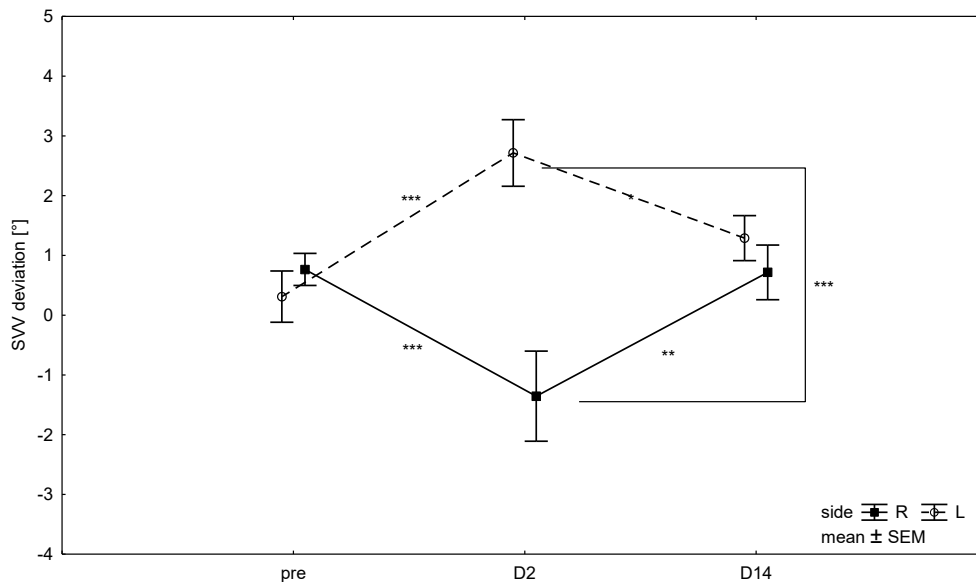
### 4.3.3. Korelace SVV a úklonu hlavy

Mezi stranou prodlouženého úklonu hlavy a stranou odchylky SVV byla statisticky významná negativní korelace ve 2. a 3. poloze ( $p < 0,01$ ). Ve 4. poloze byla pozitivní korelace mezi stranou odchylky SVV a stranou úklonu hlavy ( $p < 0,001$ ).

## 4.4. Studie 4: Vestibulární funkce u pacientů po kochleární implantaci

### 4.4.1. Vyšetření SVV

Percepce statické SVV se nelišila mezi pacienty před operací a kontrolní skupinou ( $0,49 \pm 1,50$ , respektive  $0,42 \pm 1,09$ ). Druhý den po operaci jsme našli statisticky významný rozdíl mezi pacienty. Nalezli jsme statisticky významný rozdíl v SVV mezi pacienty u kterých byla provedena kochleární implantace na pravé a na levé straně ( $p < 0,001$ ) (Obr. 14). Před operací se tyto dvě skupiny (pravostranných a levostranných implantací) nelišily ( $0,76 \pm 1,07$  a  $0,31 \pm 1,82$ ). Při druhém měření v časně fázi po operaci však byl mezi nimi signifikantní rozdíl ( $-1,36 \pm 3,02$  a  $2,71 \pm 2,36$ ). Při třetím měření mezi skupinami žádný rozdíl nebyl ( $0,72 \pm 1,83$  a  $1,29 \pm 1,60$ ).

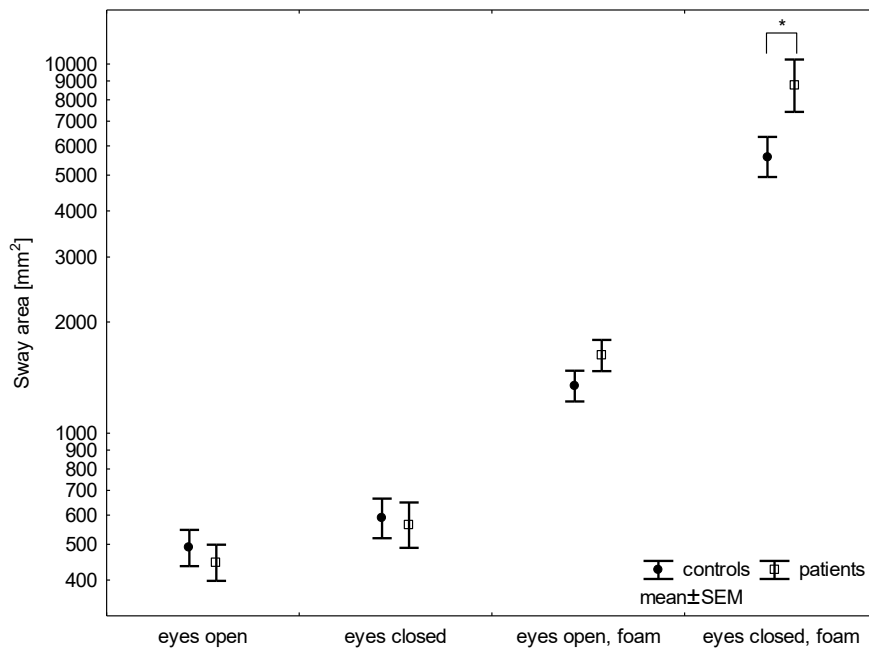


**Obr. 14** Vyšetření SVV u pacientů po KI. pre – SVV před operací, D2 – SVV druhý pooperační den, D14 – SVV 14 dní po KI. Záporné hodnoty udávají odchylku doleva, kladné hodnoty udávají odchylku doprava.

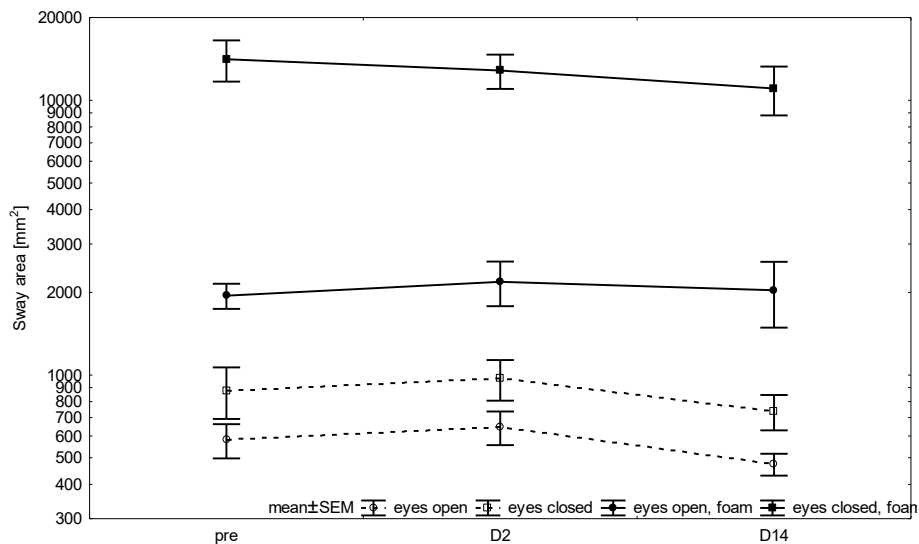


#### 4.4.2. Stabilometrické vyšetření

Stabilometrické parametry byly statisticky významně odlišné mezi pacienty a zdravými kontrolami pouze v testu stoje na měkké podložce se zavřenými očima ( $p < 0,05$ ). Zaznamenali jsme také statisticky významný rozdíl mezi podmínkami s otevřenými a se zavřenými očima a také mezi stojem na měkké a pevné podložce ( $p < 0,001$ ) (Obr. 15). V čase před operací, v časně fázi po operaci a 14 dní po operaci jsme nenalezli statistický významné rozdíly ve stabilometrických parametrech (Obr. 16).



**Obr. 15** Stabilometrické vyšetření. Plocha výchylek v různých senzoričských podmínkách při vyšetření stabilometrie u pacientů s KI a u kontrolní skupiny



**Obr. 16** Stabilometrické vyšetření. Plocha výchylek u pacientů s KI. pre – před KI, D2 – 2. den po KI, D14 – 14 dní po KI

## 5. DISKUZE

### 5.1. Studie 1: Vestibulární funkce u pacientů s idiopatickou skoliózou

IS je velmi časté onemocnění s prevalencí 0,5-6 % (Konieczny, Senyurt, Krauspe 2013). Přesto, že byla popsána již Hippokratem v 5. století před naším letopočtem, její etiologie zůstává stále nejasná. Jelikož se IS projevuje jako deformita skeletu, je považována za ortopedické onemocnění. Současné teorie se však zaměřují i na vyšetřování abnormalit v nervovém systému. U pacientů s IS byly popsány strukturální změny jako například větší objem mozečku nebo změna morfologie polokruhových kanálků (Shi et al. 2013; Carry et al. 2020; Rousie et al. 2009; Hitier et al. 2015). Experimentální studie na zvířatech ukázaly, že jednostranná léze labyrintu, která vznikla během vývoje, může způsobit abnormální aktivitu vestibulospinálního reflexu vedoucí k asymetrické aktivaci axiálních svalů trupu s následným rozvojem skoliózy (Gordy, Straka 2021). Takovou studii nemůžeme z etických důvodů opakovat na lidech, ve výzkumu vestibulárního systému se proto zaměřujeme na vyšetření dětí a dospělých s IS. nelze opakovat na lidech, ve výzkumu vestibulárních funkcí se proto musíme zaměřit na vyšetření dětí či dospělých. Studie, které vyšetřovaly vestibulární funkce u pacientů s IS detekovaly abnormality ve vnímání SVV, ve vyšetření VEMP, okulomotorických funkcích a kontrole posturální stability (Dufvenberg et al. 2018; Pollak et al. 2013; Čakrt et al. 2011; Lion et al. 2013). Každá z těchto metod hodnotí určitou část vestibulárního systému.

Předchozí studie, které vyšetřovaly vestibulární funkce se zaměřovaly vždy na vyšetření jednou vyšetřovací metodou, a především na zhodnocení funkce polokruhových kanálků (Hawasli, Hullar, Dorward 2015). Naše studie se snažila zhodnotit vestibulární funkce u pacientů s AIS komplexněji pomocí více vyšetřovacích metod, konkrétně pomocí SVV, cVEMP a stabilometrie.

Zjistili jsme, že adolescenti s IS mají narušenou percepci dynamické SVV, zhoršenou posturální stabilitu (konkrétně vyšší posturální výchylky COP v ML směru) a 38 % našich pacientů mělo abnormální výsledky při testování cVEMP.

Změna hodnot SVV je citlivým znakem abnormální funkce labyrintu. V naší studii jsme nenalezli rozdíl mezi pacienty s IS a kontrolní skupinou při statickém vyšetření. Rozdíl jsme našli při dynamickém vyšetření SVV. Pacienti s IS měli vyšší odchylku SVV proti zdravým probandům. Při vyšetření měli také více pokusů, ve kterých byla hodnota SVV nad fyziologickou normou ( $\pm 4^\circ$ ). Dynamické vyšetření percepce SVV má větší

senzitivitu než statické vyšetření, a proto může poukázat i na diskrétní dysfunkci vestibulárního systému (Goto et al. 2003). Naše výsledky ukazují, že adolescenti s IS mají odlišné vnímání vertikály v dynamických podmínkách.

U pacientů po UVL je percepce SVV abnormální v akutní fázi po vzniku onemocnění. Po několika měsících se vnímání statické SVV vrací do normálních hodnot, ale abnormální vnímání dynamické SVV může přetrvávat déle než jeden rok (Lopez et al. 2007). Předpokládáme, že to může být důvodem toho, že jsme našli rozdíly u pacientů s IS pouze v dynamických podmínkách. Pacienti mají IS diagnostikovanou delší dobu a nejedná se o akutně vzniklé onemocnění. Pokud by se na jeho vzniku podílely abnormální vestibulární funkce, tak změny SVV budou podobné změnám u chronických vestibulárních pacientů.

Druhou vyšetřovací metodou bylo vyšetření VEMP pro hodnocení funkce otolitového systému. Tohoto vyšetření se z důvodu poruchy přístroje nezúčastnili všichni pacienti. U pacientů s IS jsme nenašli abnormality v amplitudách nebo latencích ve vlnách p13 nebo n23, což je v kontrastu s výsledky Pollaka et al., kteří popsali, že adolescenti s IS mají delší latenci vlny n23 (Pollak et al. 2013). V naší studii měli někteří adolescenti s IS abnormální výsledky: dva pacienti měli jednostrannou absenci VEMP a tři pacienti měli asymetrické odpovědi na pravé a na levé straně. Abnormální nebo asymetrická odpověď VEMP může být způsobena dysfunkcí různých částí vestibulokokolického reflexu. Tato dráha začíná v sakulu, prochází skrz dolní vestibulární nerv do vestibulárních jader a poté do m. sternocleidomastoideus (Welgampola, Colebatch 2005).

Abnormality byly nalezeny také při stabilometrickém vyšetření. Pro udržování posturální stability jsou důležité informace ze zrakového, somatosenzorického a vestibulárního systému. Pro stabilometrické vyšetření jsme použili kombinaci senzorických podmínek, abychom změnili zapojení jednotlivých senzorických systémů. Nenašli jsme rozdíl mezi skupinami při stoji na pevné podložce. Předpokládáme, že tato podmínka je natolik jednoduchá, že pacienti s IS nevykazují odlišnosti od zdravých jedinců. Rozdíly mezi skupinami jsme našli v těžších podmínkách, konkrétně ve stoji na měkké podložce. Byly ale v těžších podmínkách, a to ve stoji na měkké podložce. Výchylky COP byly vyšší u pacientů s IS než u zdravých kontrol. Tento rozdíl byl však pouze při stoji s otevřenými očima. Toto zjištění je překvapivé, protože stoj na měkkém povrchu se zavřenými očima je považován za obtížnější test pro udržení rovnováhy. Předpokládáme, že naše výsledky by mohly souviset s vnímáním vertikály. Pokud pacienti

s IS vnímají vertikálu odlišně s otevřenými očima, mohlo by to mít za následek větší odchylky COP v testech s otevřenými očima.

Předchozí studie ukazují, že posturální kontrola je obecně u pacientů s IS horší než u zdravých probandů (Dufvenberg et al. 2018; Gruber et al. 2011). V této studii měli pacienti s IS významně vyšší hodnoty parametrů COP (trajektorie, maximální amplituda a rychlost výchylek) pouze v ML směru oproti kontrolní skupině. U pacientů s IS můžeme vidět rozdílné rozložení váhy mezi končetinami, které je dáno mírou kompenzace skoliotické křivky. U pacientů, kteří mají horší kompenzaci křivky, tak můžeme pravděpodobně zaznamenat také větší odchylky COP v ML směru.

Posturální stabilita může také záviset na umístění zakřivení. Pacienti s dvojitou křivkou a křivkou v oblasti hrudníku mají lepší stabilitu než pacienti s bederní křivkou (Gauchard et al. 2001). My jsme nenašli korelaci mezi parametry COP a lokalizací křivky. To může být způsobeno malým počtem pacientů (5) s primární bederní křivkou v naší studii.

Mezi limity této práce patří skutečnost, že VEMP byly vyšetřeny pouze u části probandů. Bohužel v průběhu testování došlo k závadě přístroje a nebylo tak možné všechny pacienty vyšetřit. Dalším limitem může být skutečnost, že u vyšetření SVV jsme u pacientů nefixovali hlavu. Pacienti ji tak mohli mít v abnormálním postavení, které mohlo ovlivnit jejich výsledky.

Naše studie zjistila odlišné vestibulární funkce u pacientů s IS. Vzhledem k tomu, že IS je považována za ortopedickou poruchu, léčba se zaměřuje na pohybový aparát. Naše studie odhalila, že adolescenti s IS vykazují abnormální vestibulární funkce. Vzhledem k těmto výsledkům by lékaři měli vzít v úvahu, že někteří pacienti s IS mohou mít změněné vestibulární funkce. V takovém případě, by bylo vhodné zařadit do terapie specializovanou fyzioterapii zaměřenou na zlepšení posturální stability, vnímání těla a prostoru.

## **5.2. Studie 2: Subjektivní vizuální vertikála a poloha hlavy u pacientů s idiopatickou skoliózou**

U řady onemocnění můžeme najít pozmeněné postavení hlavy, které může být důsledkem neurologických, vestibulárních, okulomotorických, ortopedických a jiných onemocnění. V klinické praxi se setkáváme s tím, že pacienti s IS často mají spontánní polohu hlavu v mírném úklonu, proto jsme se v této studii zaměřili pouze na hodnocení polohy hlavy ve frontální rovině. Postavení v sagitální či transverzální rovině jsme

nevyšetřovali. Zjistili jsme, že významně větší úklon hlavy mají děti s IS ve srovnání se zdravými dětmi.

Úklon hlavy a vyšší prevalence laterální malokluze a dalších dentofaciálních rozdílů byly dříve popsány u pacientů s IS (Huggare, Pirttiniemi, Serlo 1991). Abnormální poloha hlavy ve frontální rovině může být způsobena kompenzací skoliotické křivky. Může záviset na výšce apikálního obratle a velikosti skoliózy. Křivky v horní části krční páteře mohou ovlivnit postavení hlavy. U většiny studií zkoumajících skoliotickou křivku však není běžné vyšetřovat postavení hlavy. Pacienti s IS také mohou mít horší vnímání vlastního těla (Picelli et al. 2016; Carrasco, Ruiz 2014), které se může podílet na alterovaném postavení hlavy.

Mírný úklon hlavy však může být také důsledkem asymetrických signálů z periferních vestibulárních receptorů. U pacientů s unilaterální periferní lézí takové postavení můžeme klinicky pozorovat (Jones et al. 2009). Pokud by pacienti s IS měli porušenou funkci vestibulárního systému, mohl by být jejím projevem právě úklon hlavy.

Kromě postavení hlavy jsme se zaměřili také na testování odchylek v SVV, které by mohlo svědčit pro vestibulární dysfunkci. V této studii jsme testovali pouze statickou SVV pomocí Bucket testu. Naše výsledky ukazují, že pacienti s IS mají významně větší odchylky ve vnímání SVV než zdraví jedinci. Což potvrzují i další studie (Čakrt et al. 2011; Cheung et al. 2002), oproti předchozí studii zmíněné v této práci, která neprokázala změnu statické SVV (Studie 1). Nyní jsme vyšetřovali větší skupinu probandů, a proto je možné, že abnormální vnímání SVV se zde potvrdilo i v případě statické SVV. Abnormální vnímání SVV je citlivým znakem periferní vestibulární dysfunkce nebo vestibulárních drah přes vestibulární jádra, thalamus a parietoinsulární vestibulární kůru (Dieterich, Brandt 2019). Druh projevu abnormálního vnímání SVV závisí na lokalizaci postižení. Ipsilaterální deviace SVV se projevuje u periferní a pontomedulární léze, zatímco kontralaterální deviace se projevuje u ponto-mezencefalické léze (Dieterich, Brandt 2019; Glasauer, Dieterich, Brandt 2018; Yang et al. 2014). Menší odchylky v SVV vykazují léze v oblasti kortexu a thalamu (Dieterich, Brandt 2019). V naší studii byla odchylka SVV u pacientů v malém rozsahu s maximem 7,9°.

Vnímání SVV se může měnit s polohou hlavy. Ve vzpřímené poloze hlavy, kdy je horizontální, resp. vertikální postavení očních bulbů, hlavy a těla podobné geofyzikální vertikále, není pro mozek tak náročné udržet vzpřímené vnímání okolí. V případě, že je hlava v úklonu, může ji torze očních bulbů částečně kompenzovat. V takovém případě se neshoduje vertikální osa očí a hlavy s geofyzikální vertikálou. Obraz, který jde na sítnici je

nakloněný a pro CNS je náročnější jeho zpracování a vyhodnocení (Kheradmand, Winnick 2017; Dieterich, Brandt 1992). Proto pokud pacienti s IS mají větší úklon hlavy, tak může dojít i ke změně vnímání SVV.

Pacienti v naší studii měli IS diagnostikovanou delší dobu, proto úklon hlavy, který vykazují je pravděpodobně přítomen dlouhou dobu. Existují studie, které se zaměřily na vyšetření SVV v prolongovaném úklonu hlavy u zdravých probandů. Při dlouhodobém úklonu může dojít k odchylce SVV směrem ke straně úklonu hlavy nebo naopak na opačnou stranu. Během úklonu hlavy mozek nesprávně interpretuje informace z receptorů. Při dostatečně dlouhém úklonu hlavy mozek vyhodnotí tuto pozici jako vzpřímenou polohu hlavy, což následně vede k odchylce ve vnímání SVV (Otero-Millan, Kheradmand 2016; Wedtgrube, Bockisch, Tarnutzer 2020; Tarnutzer et al. 2013). Tyto studie ale testovaly pouze krátkodobý úklon trvající několik minut, takže jejich výsledky nelze srovnávat s našimi.

Není také pravidlem, že dlouhotrvající úklon hlavy vždy změní percepci SVV. U některých chronických onemocnění, při kterých dochází k úklonu hlavy, nemusí být SVV změněna. Například u pacientů s idiopatickou cervikální dystonií nedochází ke změně vnímání SVV (De Pauw et al. 2018).

Směr deviace SVV při držení hlavy v úklonu u zdravých probandů závisí na velikosti úhlu úklonu hlavy (Kheradmand et al. 2016; Dieterich, Brandt 1992). V naší studii jsme u pacientů s IS zjistili pozitivní korelaci mezi stranou úklonu hlavy a stranou deviace SVV. Při menších úklonech hlavy u zdravých probandů by odchylka SVV na opačnou stranu od úklonu hlavy (E-efekt) (Dieterich, Brandt 1992; Winnick et al. 2019), ale naše výsledky ukázaly přesný opak. Pouze 27 % pacientů mělo negativní korelaci mezi stranou SVV a stranou úklonu hlavy. Naše výsledky více korelují s výsledky pacientů s akutní unilaterální periferní vestibulární lézí, u kterých je odchylka SVV a úklonu hlavy ve stejném směru (Dieterich, Brandt 2019; Kim, Kim 2018).

Předchozí studie zaměřené na prolongovaný úklon hlavy u zdravých probandů obvykle testovaly větší velikost úklonu hlavy  $> 20^\circ$ . To může být důvodem našich odlišných výsledků, protože naši pacienti měli úklon hlavy  $< 10^\circ$ .

U zdravých probandů jsme nenalezli korelaci mezi úklonem hlavy a SVV. To může být způsobeno tím, že SVV nebyla u zdravých probandů abnormální a zároveň tito probandi vykazovali velmi malý až žádný úhel úklonu hlavy. Nenalezli jsme také korelaci mezi vnímáním SVV, polohou hlavy a tím, zda pacienti nosí či nenosí korzet. Korzet koriguje zakřivení páteře ve všech rovinách. Obvykle končí pod rameny a nezasahuje tak

přímo do polohy hlavy. Ačkoli kompenzuje primární křivku v naší studii nebyl rozdíl v poloze hlavy mezi pacienty, kteří korzet nosí a těmi, kteří ho nenosí. Veškerá vyšetření v rámci studie byla prováděna bez korzetu.

Nenalezli jsme korelaci mezi SVV, délkou terapie, nebo věkem ve kterém byla skolióza diagnostikována. Není tedy rozdíl ve výsledcích, ať už jsou pacienti od diagnózy půl roku nebo několik let. Nemáme však přesné údaje o terapii u všech pacientů. Někteří pacienti byli v terapii několik let a nepodařilo se nám zjistit podrobnosti o frekvenci fyzioterapie, domácích cvičení, frekvenci nošení korzetu nebo volbě fyzioterapeutických technik. Dá se předpokládat, že tyto faktory mohou ovlivnit výsledky. Také jsme nenalezli korelaci mezi stranou úklonu hlavy, stranou deviace SVV a stranou hlavní křivky. Domníváme se, že je to způsobeno převládající pravostrannou orientací hlavního křivky v naší skupině pacientů (35 pravostranná křivka oproti pouze 2 levostranným), navíc měli naši pacienti také různou výšku apikálního obratle a různou lokalizaci křivky.

### **5.3. Studie 3: Vliv prolongovaného úklonu hlavy na vnímání vizuální vertikály u zdravých probandů**

Percepce SVV je citlivý příznak vestibulární dysfunkce, zdravý člověk zvládne určovat SVV s velkou přesností, norma se uvádí  $\pm 2^\circ$  (Dieterich, Brandt 1993). To jsme potvrdili i v naší studii. Ve vzpřímeném postavení hlavy na začátku vyšetření měli všichni probandi odchylku SVV v mezích normy tzn.  $\pm 2^\circ$ . Standartně se vyšetření provádí ve vzpřímeném postavení hlavy.

V případě, že je hlava v úklonu  $< 60^\circ$  dochází k mírnému odklonu SVV na opačnou stranu, než je úklon hlavy tzv. Müllerův nebo E-efekt. Při úklonu  $> 60^\circ$  dochází k odklonu SVV na stejnou stranu jako je hlava ukloněná, jedná se o tzn. Aubertův nebo A-efekt (Kheradmand, Winnick 2017). Při malém úhlu úklonu hlavy u zdravých probandů tedy dochází k odklonu SVV směrem na opačnou stranu od směru úklonu hlavy a také ke kompenzačnímu cyklo rotačnímu pohybu očí, na opačnou stranu od strany úklonu hlavy. Stejná odpověď je při úklon na pravou i na levou stranu (Otero-Millan, Kheradmand 2016). Tato pravidla platí pro krátkodobý úklon hlavy.

Někteří autoři tvrdí, že E-efekt je způsobeným aktivací proprioceptorů v oblasti šíje. Pacienti po cévní mozkové příhodě vykazují ve vzpřímeném postavení odchylku SVV na opačnou stranu, než je strana léze a ztrátu E-efektu při úklonu hlavy, pouze ke straně léze (Yelnik et al. 2002). Přítomnost E-efektu pouze při úklonu hlavy na neparetickou



stranu tedy pravděpodobně nesvědčí pro hypotézu, která zdroj E-efektu připisuje informacím z proprioceptorů krku. Stejně výsledky byly u pacientů po UVL s chronickou unilaterální periferní hypofunkcí. Tito pacienti měli pouze při úklonu hlavy směrem ke straně UVL odchylku SVV ke straně léze (Müller, Bockisch, Tarnutzer 2016). Tyto výsledky podporují spíše dominantní úlohu otolitového systému ve vnímání SVV během úklonu hlavy.

Záleží také na tom, jak dlouho je hlava v úklonu, jaká je adaptace utrikulu na prolongovaný úklon a jakým způsobem to změní vnímání SVV. Čím je úklon hlavy delší, tím dochází ke zvětšování odchylky SVV, ale kompenzační cyklorotace očí zůstává stejná. Není tedy korelace mezi mírou odchylky SVV a torzí očí (Otero-Millan, Kheradmand 2016). Při úklonu 20° u zdravých probandů dochází na začátku ke kontralaterálnímu odklonu SVV od strany úklonu (E-efekt), ale při delším setrvání v úklonu se SVV odchyluje ipsilaterálně vzhledem ke straně úklonu hlavy (Winnick et al. 2019).

Předchozí studie se zaměřovaly na změny v SVV ve větším úklonu hlavy > 30°. Není publikováno mnoho informací o vnímání SVV při malých a prodloužených úklonech hlavy a o tom, jak velký úklon hlavy je potřeba, aby došlo ke změně vnímání SVV. Malý úklon hlavy můžeme v klinické praxi pozorovat u pacientů s idiopatickou skoliózou, cervikální dystonií, spasmickou torticollis a některými dalšími neuromuskulárními, očními, vestibulárními nebo ortopedickými poruchami. Tyto stavy mohou vést k abnormální poloze hlavy, která přetrvává v průběhu času, což může být spojeno s abnormálním vnímáním SVV.

V naší studii jsme zjišťovali, zda dochází ke stejným změnám SVV i při malých úklonech hlavy (5° a 20°). Při uvedení hlavy do úklonu zdraví probandi vnímali SVV odkloněnou na opačnou stranu, než byla strana úklonu. Tato odchylka se zvětšovala s časem, čím déle probandi drželi hlavu v úklonu, tím byla vyšší. Tyto výsledky jsou odlišné oproti výsledkům pacientů s IS (Studie 2) u kterých korelovala strana úklonu hlavy a odchylky v percepci SVV. Můžeme tedy říct, že pravděpodobně odchylka SVV u pacientů s IS není dána tím, že tyto pacienti mají hlavu dlouhodobě v úklonu a není tedy způsobená skoliotickou křivkou.

Při navrácení hlavy z úklonu do vzpřímeného postavení dochází k navrácení očí do svislého postavení, ale percepce SVV zůstává odkloněná ke straně, ke které byla hlava ukloněná. Tyto výsledky jsme potvrdili i v naší studii.

Výsledky této studie potvrzují naši hypotézu, že i malý úklon hlavy může vést k abnormálnímu vnímání SVV u zdravých probandů. Další zjištěním bylo také potvrzení negativní korelace mezi stranou úklonu hlavy a odchylkou SVV.

V naší studii jsme se zaměřovali pouze na zdravé probandy. Další výzkum by se měl zaměřit na pacienty s neurologickými či ortopedickými poruchami, abychom objasnili vliv těchto poruch na percepci SVV. Celkově lze říci, že naše studie přináší nové poznatky o vztahu mezi polohou hlavy a vestibulární funkcí při malém úklonu hlavy.

#### **5.4. Studie 4: Vestibulární funkce u pacientů po kochleární implantaci**

Tato studie se zabývala zhodnocením SVV a stabilometrických parametrů u pacientů indikovaných ke kochleární implantaci. Jedná se o operační metodu, která se standardně používá u sluchově postižených pacientů. V průběhu operace je pacientovi zaveden svazek elektrod do kochley za účelem stimulace vestibulokochleárního nervu. V České republice je provedeno ročně přes 100 KI (Gaylor et al. 2013; Gál et al. 2018) I když se jedná se o operaci v oblasti kochley, v její těsné blízkosti se nachází i vestibulární systém, který je součástí vestibulokochleárního aparátu. Vlivem operace může dojít také k ovlivnění nejen sluchových, ale také vestibulárních funkcí. Histopatologické studie, které byly provedeny na kostech pacientů po kochleární implantaci, prokázaly strukturální změny vestibulárního systému. Mezi nejčastější nálezy, které lze přičíst operaci, patří fibróza vestibula, v některých případech s kalcifikací a osifikací a distorze sakulární i utrikální membrány (Tien, Linthicum 2002; Handzel, Burgess, Nadol 2006). Kromě změn morfologie dochází u některých pacientů po kochleární implantaci také ke změně vestibulárních funkcí. Nejčastější příčina této změny je připisovaná mikrotraumatu, které může vzniknout při zavádění elektrodového svazku, serózní labyrintitidě, endolymfatickému hydropsu nebo přenosu signálů z elektrod na vestibulární receptory (O'Leary et al. 1991; Kubo et al. 2001).

Změny vestibulárních funkcí byli popisovány nejčastěji v časně fázi po operaci nebo při zapojení řečového procesoru se kterým pak pacienti rehabilitují sluch. V této studii jsme se zaměřili na vyšetřování stability a vnímání vertikály před operací a následně v časně pooperační fázi před zapojením řečového procesoru. Chtěli jsme zjistit, zda vlivem operace dojde k porušení vestibulárního systému, které se projeví změnou vestibulárních funkcí. A dále zjistit, zda narušení vestibulárních funkcí zůstává pacientům trvale nebo zda dojde k jeho kompenzaci.

V této studii před KI nebyly zjištěné statisticky významné rozdíly v SVV mezi pacienty a kontrolní skupinou. To naznačuje, že před operací nebyly zřejmé žádné výrazné odchylky ve vestibulární funkci mezi oběma skupinami. Zaznamenali jsme signifikantní rozdíl mezi pacienty před a bezprostředně po chirurgickém zákroku (2. pooperační den). U pacientů došlo ke zhoršení vnímání SVV, což se ale upravilo postupně 14 dní po operaci. Popsané změny vnímání SVV mohou být spojeny s adaptací vestibulárního systému po operaci. Zaznamenali jsme také rozdíly mezi pacienty, u kterých byla implantace provedena na levé, resp. pravé straně. Výchylka SVV byla vždy na opačnou stranu, než na které byla provedena KI. To naznačuje, že operační výkon způsobil pacientům iritaci labyrintu.

V předoperační fázi byly také identifikovány statisticky významné rozdíly ve stabilometrii mezi pacienty indikovanými ke KI a kontrolní skupinou. Tyto výsledky ukazují, že pacienti měli ovlivněnou rovnováhu ještě před operací. Mohlo to být z důvodu ztráty sluchu, která pacientům zhoršuje orientaci v prostoru a také může zhoršovat jejich posturální kontrolu. Nebyly zaznamenány rozdíly ve stabilometrických parametrech u pacientů mezi předoperačním obdobím, druhým dnem po operaci ani po dvou týdnech po operaci. Řízení posturální kontroly se účastní více systémů a pravděpodobně porucha vestibulárního systému vlivem operace mi nemůže způsobit poruchu rovnováhy. Pacienty jsme vyšetřovali ještě před zapojením řečového procesoru, tedy stále ve fázi, kdy pacienti neslyšeli. V dalších studiích by bylo zajímavé zaměřit se na změny u těchto pacientů při zapojení řečového procesoru.

Při kochleární implantaci dochází tedy pravděpodobně k dočasné iritaci vestibulárních funkcí. V porovnání s výsledky SVV a stabilometrie u pacientů s IS v předchozích studiích (Studie 1, 2) je patrné, že tyto horší funkce u pacientů s KI se velmi rychle kompenzují a dochází k jejich obnově. Pravděpodobně tedy u pacientů s IS nedochází v průběhu života ke zhoršení vestibulárních funkcí vlivem skoliózy, protože by u nich muselo také dojít ke kompenzaci.

## 6. ZÁVĚR

Prvním cílem bylo porovnat vestibulární funkce dětí s IS a zdravých probandů. K tomuto zhodnocení jsme zvolili vybrané testy: percepce SVV, vestibulární evokované myogenní potenciály a stabilometrické vyšetření. Zjistili jsme, že pacienti s IS oproti zdravým probandům mají narušenou posturální stabilitu, která se projevila zvětšením výchylek v ML směru, zhoršenou percepcí subjektivní vizuální vertikály během dynamického vyšetření a abnormální hodnoty VEMP. U některých pacientů s IS byly VEMP asymetrické nebo jsme zaznamenali jejich absenci. Na základě těchto skutečností potvrzujeme hypotézu č. 1.

V další studii jsme hodnotili pouze SVV a porovnali jsme tyto výsledky se spontánní polohou hlavy u pacientů s IS. Z klinické praxe vyplývá, že tito pacienti mají spontánní držení hlavy v úklonu. Cílem práce bylo zjistit, zda mají pacienti s IS hlavu v úklonu oproti zdravým probandům. Dále zjistit, zda existuje korelace mezi stranou odklonu SVV a stranou úklonu hlavy. Výsledky prokázali, že pacienti s IS mají hlavu v úklonu a abnormálně vnímají SVV oproti kontrolní skupině. U pacientů korelovala strana úklonu hlavy se stranou abnormálního vnímání vertikály. Pokud pacient měl hlavu v úklonu doprava, vnímal také SVV posunutou doprava. Naše výsledky potvrzují hypotézu č. 2.

Cílem třetí studie bylo zjistit, zda deviace SVV u pacientů s IS k jedné straně je důsledkem úklonu hlavy. Proto jsme se zaměřili na zhodnocení SVV v různých velikostech úklonu hlavy u zdravých probandů. Cílem bylo zjistit, zda u zdravého člověka dochází ke změně percepce SVV při mírném úklonu hlavy a zda se tato hodnota bude měnit v čase při prolongovaném úklonu. U zdravých probandů došlo při úklonu hlavy k jedné straně ke změně vnímání SVV, a to na opačnou stranu, než byla ukloněná hlava. Při setrvání v úklonu 5 minut došlo ke zvětšování odchylek v SVV. Nebyl zde rozdíl mezi probandy, kteří měli hlavu ukloněnou 5° oproti 20°. Na základě těchto výsledků potvrzujeme hypotézu č. 3.

U pacientů s IS v předchozí studii jsme ale zaznamenali rozdílný výsledek a to, že strana úklonu hlavy a percepce SVV byla shodná. Abnormální percepce SVV tedy u pacientů s IS není pravděpodobně důsledkem úklonu hlavy.

V poslední části práce jsme posuzovali percepci SVV a hodnotili posturální stabilitu u pacientů před a v časné fázi po kochleární implantaci a jejich srovnání se zdravými probandy. Podle literatury se ukazuje, že u pacientů dojde po KI ke zhoršení

vestibulárních funkcí. Pokud by u pacientů s IS došlo ke zhoršení vestibulárních funkcí během života, zajímalo nás, jakým způsobem bude probíhat kompenzace. U pacientů po KI jsme zaznamenali rozdíly v percepci SVV oproti zdravým probandům v časné fázi po operaci. Po 14 dnech došlo k úpravě hodnot SVV i parametrů stabilometrického vyšetření. Můžeme tedy říct, že u těchto pacientů došlo k dočasnému narušení vestibulárních funkcí, které se ale velmi dobře zkompenzovalo. Naše výsledky potvrzují hypotézu č. 4.

Hlavním cílem disertační práce bylo zhodnotit vestibulární funkce pomocí vyšetření percepcie SVV, vestibulárních evokovaných myogenních potenciálů, stabilometrie a klidové polohy hlavy u pacientů s IS v porovnání se zdravými probandy a v porovnání s pacienty s akutní iritací labyrintu po kochleární implantaci. Hlavní hypotéza byla, že tyto vestibulární funkce budou odlišné u pacientů s IS oproti ostatním zmíněným skupinám. Na základě předložených studií můžeme tuto hypotézu potvrdit. Pacienti s IS mohou mít abnormální vestibulární funkce. Vzhledem k tomu, že jsme zaznamenali odlišné výsledky při úklonu hlavy u zdravých probandů a u pacientů s IS, zároveň velmi rychlou kompenzaci vestibulárních funkcí po KI, můžeme říct, že abnormální vestibulární funkce u pacientů s IS pravděpodobně nevznikají sekundárně jako následek spinální deformity. Naopak je možné, že spinální deformita vzniká jako důsledek možné vestibulární patologie, která může vzniknout prenatálně. Sekundárně pak dochází k abnormální pozici hlavy a změně vnímání SVV. Větší variabilita našich výsledků může poukazovat na to, že pravděpodobně diagnóza IS obsahuje různé subtypy.

## 7. SOUHRN

Idiopatická skolióza je jednou z nejčastějších diagnóz v pediatricko-ortopedické praxi. Jde o trojrozměrnou deformitu páteře, vyskytující se u 1–5 % dětí, která nejčastěji vzniká v adolescentním věku. Etiologie idiopatické skoliózy je dosud neznámá. Jednou z hypotéz je dysfunkce vestibulárního systému, kterou prokázaly výsledky studií na zvířecích modelech. Také klinické studie poukázaly na abnormity ve funkci vestibulárního systému u pacientů s idiopatickou skoliózou, tyto studie však nemají jednoznačný výsledek. Znalost etiologie tohoto onemocnění by mohla pomoci včasné diagnostice, která je důležitá pro brzké zahájení cílené terapie. Cílem této práce bylo zhodnotit, zda existují abnormity ve funkci vestibulárního systému u pacientů s idiopatickou skoliózou a zda existuje souvislost mezi funkcí tohoto systému a parametry skoliotické křivky (stranová lokalizace, velikost křivky, progresse).

V rámci této práce jsme ve studii 1 komplexním vyšetřením zjistili odlišné vestibulární funkce u pacientů s IS oproti zdravým probandům. Nenalezli jsme korelaci mezi parametry skoliotické křivky a vestibulárními funkcemi.

Ve studii 2 jsme prokázali držení hlavy v úklonu a abnormální výsledky v SVV u pacientů s IS oproti zdravým probandům. Dále také korelaci mezi směrem úklonu hlavy a směrem vnímání SVV. Nezaznamenali jsme žádnou korelaci mezi stranou úklonu hlavy a parametry skoliotické křivky u pacientů s IS.

V rámci studie 3 jsme testovali zdravé probandy, abychom zjistili, zda malý úhel úklonu hlavy může způsobit abnormální odklon vertikály, stejně tak jako u pacientů s IS. Prokázali jsme, že mírný úklon vede ke změně vnímání SVV, ale na opačnou stranu, než je úklon hlavy. Tyto výsledky byly odlišné oproti výsledkům pacientů s IS z předchozí studie.

V poslední studii jsme testovali pacienty po KI, abychom zjistili, zda u nich může dojít k porušení vestibulárních funkcí po operačním výkonu. Výsledkem této práce bylo mírné zhoršení vestibulárních funkcí v časné fázi po operaci, které se ale velmi rychle zkompenzovalo.

Předpokládáme, že tyto výsledky přináší komplexnější pohled na danou problematiku.

## 8. SUMMARY

Idiopathic scoliosis is one of the most common diagnoses in pediatric-orthopedic practice. It is a three-dimensional deformity of the spine, occurring in 1-5% of children, which most often arises in adolescence. The etiology of idiopathic scoliosis is still unknown. One of the hypotheses is the dysfunction of the vestibular system, which was proven by the results of studies on animal models. Clinical studies have also pointed to abnormalities in the function of the vestibular system in patients with idiopathic scoliosis, but these studies do not have an unequivocal result. Knowledge of the etiology of this disease could help early diagnosis, which is important for the early initiation of targeted therapy. The aim of this work was to evaluate whether there are abnormalities in the function of the vestibular system in patients with idiopathic scoliosis and whether there is a connection between the function of this system and the parameters of the scoliotic curve (lateral localization, curve size, progression).

As part of this work, in study 1, we found different vestibular functions in patients with IS compared to healthy probands through a comprehensive examination. We did not find a correlation between scoliotic curve parameters and vestibular functions.

In study 2, we demonstrated bowed head posture and abnormal SVV results in IS patients versus healthy probands. Furthermore, the correlation between the direction of head tilt and the direction of SVV perception. We observed no correlation between the side of head tilt and scoliotic curve parameters in patients with IS.

In Study 3, we tested healthy probands to determine whether a small head tilt angle can cause abnormal vertical deflection, as in patients with IS. We have shown that a slight tilt leads to a change in SVV perception, but to the opposite side of head tilt. These results were different from those of IS patients from a previous study.

In the last study, we tested post-CI patients to determine whether vestibular function may be impaired after surgery. The result of this work was a slight deterioration of the vestibular functions in the early phase after the operation, which, however, compensated very quickly.

We assume that these results would provide a more comprehensive view of the issue.

## 9. LITERATURA

1. AMBLER, Zdeněk, BEDNAŘÍK, Josef and RŮŽIČKA, Evžen, 2008. *Klinická neurologie, část obecná*. ISBN 978-80-7387-157-4.
2. ANDERSEN, Mikkel O., THOMSEN, Karsten and KYVIK, Kirsten O., 2007. Adolescent idiopathic scoliosis in twins: A population-based survey. *Spine*. Vol. 32, no. 8, pp. 927–930. DOI 10.1097/01.brs.0000259865.08984.00.
3. ANTONIADOU, Nikoleta et al., 2018. Verticality perception reveals a vestibular deficit in adolescents with idiopathic scoliosis. *Experimental Brain Research*. Vol. 236, no. 6, pp. 1725–1734. DOI 10.1007/s00221-018-5256-9.
4. BAIER, B. et al., 2015. Vestibular compensation in cerebellar stroke patients. *European Journal of Neurology*. Vol. 22, no. 2, pp. 416–418. DOI 10.1111/ENE.12475.
5. BYL, Nancy N. et al., 1997. Postural imbalance and vibratory sensitivity in patients with idiopathic scoliosis: Implications for treatment. *Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy*. Vol. 26, no. 2, pp. 60–68. DOI 10.2519/jospt.1997.26.2.60.
6. ČADA, Zdeněk, ČERNÝ, Rudolf and ČAKRT, Ondřej, 2017. *Závratě*. ISBN 978-80-7311-165-6.
7. ČAKRT, Ondřej et al., 2011. Subjective visual vertical in patients with idiopathic scoliosis. *Journal of vestibular research : equilibrium & orientation*. Vol. 21, no. 3, pp. 161–5. DOI 10.3233/VES-2011-0414.
8. ČAKRT, Ondřej et al., 2016. Subjective visual and haptic vertical in young and elderly. *Journal of Vestibular Research*. Vol. 25, no. 5–6, pp. 195–199. DOI 10.3233/VES-150562.
9. CARRASCO, Maria Isabel Bonilla and RUIZ, Maria Carmen Solano, 2014. Perceived self-image in adolescent idiopathic scoliosis: an integrative review of the literature. *Revista da Escola de Enfermagem da U S P*. Vol. 48, no. 4, pp. 748–757. DOI 10.1590/S0080-623420140000400024.
10. CARRY, Patrick M. et al., 2020. Lateral semi-circular canal asymmetry in females with idiopathic scoliosis. *PloS one*. Vol. 15, no. 4. DOI 10.1371/JOURNAL.PONE.0232417.
11. CASTELEIN, René M., VAN DIEËN, Jaap H. and SMIT, Theo H., 2005. The role of dorsal shear forces in the pathogenesis of adolescent idiopathic scoliosis - A hypothesis. *Medical Hypotheses*. Vol. 65, no. 3, pp. 501–508. DOI 10.1016/j.mehy.2005.03.025.
12. CATANZARITI, J.-F. et al., 2015. Subjective Visual Vertical and Adolescent Idiopathic Scoliosis (AIS). *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*. Vol. 58, p. e111. DOI 10.1016/j.rehab.2015.07.270.
13. ČERNÝ RUDOLF, ČAKRT ONDŘEJ and JEŘÁBEK JAROSLAV, 2017. Laboratorní metody vyšetření vestibulárního aparátu. *Neurologie pro praxi* [online]. Vol. 18, no. 3, pp. 163–169. Retrieved from : [www.neurologiepropraxi.cz/Neurol.praxi2017;18](http://www.neurologiepropraxi.cz/Neurol.praxi2017;18) [accessed 20 November 2021].
14. CHAU, Wai Wang et al., 2016. Anatomical origin of abnormal somatosensory-evoked potential (SEP) in adolescent idiopathic scoliosis with different curve



- severity and correlation with cerebellar tonsillar level determined by MRI. *Spine*. Vol. 41, no. 10, pp. E598–E604. DOI 10.1097/BRS.0000000000001345.
15. CHENG, Jack C.Y. et al., 1999. Correlation between curve severity, somatosensory evoked potentials, and magnetic resonance imaging in adolescent idiopathic scoliosis. *Spine*. Vol. 24, no. 16, pp. 1679–1684. DOI 10.1097/00007632-199908150-00009.
  16. CHEUNG, John et al., 2002. Perception of vertical and horizontal orientation in children with scoliosis. *Journal of orthopaedic research : official publication of the Orthopaedic Research Society*. Vol. 20, no. 3, pp. 416–420. DOI 10.1016/S0736-0266(01)00129-2.
  17. CORTÉS-PÉREZ, Irene et al., 2022. Vestibular Morphological Alterations in Adolescent Idiopathic Scoliosis: A Systematic Review of Observational Studies. *Children*. Vol. 10, no. 1, p. 35. DOI 10.3390/children10010035.
  18. DE PAUW, Joke et al., 2018. Is perception of visual verticality intact in patients with idiopathic cervical dystonia? *Acta neurologica Belgica*. Vol. 118, no. 1, pp. 77–84. DOI 10.1007/s13760-017-0853-0.
  19. DE SALVATORE, Sergio et al., 2022. Exploring the association between specific genes and the onset of idiopathic scoliosis: a systematic review. *BMC Medical Genomics*. Vol. 15, no. 1, p. 115. DOI 10.1186/s12920-022-01272-2.
  20. DE WAELE, C. et al., 1989. A radiological analysis of the postural syndromes following hemilabyrinthectomy and selective canal and otolith lesions in the guinea pig. *Experimental Brain Research*. Vol. 77, no. 1, pp. 166–182. DOI 10.1007/BF00250579.
  21. DIETERICH, M. and BRANDT, T., 1992. Cyclorotation of the eyes and the subjective visual vertical. *Bailliere's clinical neurology* [online]. Vol. 1, no. 2, pp. 301–316. Retrieved from : <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov.ezproxy.is.cuni.cz/1344072/> [accessed 18 September 2022].
  22. DIETERICH, Marianne and BRANDT, Thomas, 1993. Ocular torsion and tilt of subjective visual vertical are sensitive brainstem signs. *Annals of neurology*. Vol. 33, no. 3, pp. 292–299. DOI 10.1002/ANA.410330311.
  23. DIETERICH, Marianne and BRANDT, Thomas, 2019. Perception of Verticality and Vestibular Disorders of Balance and Falls. *Frontiers in neurology*. Vol. 10, no. APR. DOI 10.3389/FNEUR.2019.00172.
  24. DUFVENBERG, Marlene et al., 2018. *Does postural stability differ between adolescents with idiopathic scoliosis and typically developed? A systematic literature review and meta-analysis*. BioMed Central Ltd. Scoliosis and Spinal Disorders 13. DOI 10.1186/s13013-018-0163-1.
  25. EIJGELAAR, P. N. et al., 2014. Altered head orientation patterns in children with idiopathic scoliosis in conditions with sensory conflict. *European spine journal : official publication of the European Spine Society, the European Spinal Deformity Society, and the European Section of the Cervical Spine Research Society*. Vol. 23, no. 12, pp. 2626–2634. DOI 10.1007/S00586-014-3508-3.
  26. FONG, Daniel Yee Tak et al., 2010. A meta-analysis of the clinical effectiveness of school scoliosis screening. *Spine*. Vol. 35, no. 10, pp. 1061–1071. DOI 10.1097/BRS.0b013e3181bcc835.

27. GACEK, Richard R. and SCHOONMAKER, Joanne E., 1997. Morphologic Changes in the Vestibular Nerves and Nuclei after Labyrinthectomy in the Cat: A Case for the Neurotrophin Hypothesis in Vestibular Compensation. *Acta Oto-Laryngologica*. Vol. 117, no. 2, pp. 244–249. DOI 10.3109/00016489709117780.
28. GÁL, Břetislav et al., 2018. The efficacy of cochlear implantation in adult patients with profound hearing loss. *Česká a slovenská neurologie a neurochirurgie*. Vol. 81/114, no. 6, pp. 664–668. DOI 10.14735/amcsnn2018664.
29. GAUCHARD, Gérome C. et al., 2001. Influence of different types of progressive idiopathic scoliosis on static and dynamic postural control. *Spine*. Vol. 26, no. 9, pp. 1052–1058. DOI 10.1097/00007632-200105010-00014.
30. GAYLOR, James M. et al., 2013. Cochlear Implantation in Adults. *JAMA Otolaryngology–Head & Neck Surgery*. Vol. 139, no. 3, p. 265. DOI 10.1001/jamaoto.2013.1744.
31. GEISSELE, Alfred E. et al., 1991. Magnetic resonance imaging of the brain stem in adolescent idiopathic scoliosis. *Spine*. Vol. 16, no. 7, pp. 761–763. DOI 10.1097/00007632-199107000-00013.
32. GLASAUER, S., DIETERICH, M. and BRANDT, T., 2018. Neuronal network-based mathematical modeling of perceived verticality in acute unilateral vestibular lesions: from nerve to thalamus and cortex. *Journal of Neurology*. Vol. 265, pp. 101–112. DOI 10.1007/S00415-018-8909-5.
33. GORDY, Clayton and STRAKA, Hans, 2021. Vestibular Influence on Vertebrate Skeletal Symmetry and Body Shape. *Frontiers in Systems Neuroscience*. Vol. 15, p. 108. DOI 10.3389/FNSYS.2021.753207/BIBTEX.
34. GOTO, Fumiuyuki et al., 2003. Compensatory changes in static and dynamic subjective visual vertical in patients following vestibular schwannoma surgery. *Auris Nasus Larynx*. Vol. 30, no. 1, pp. 29–33. DOI [https://doi.org/10.1016/S0385-8146\(02\)00110-4](https://doi.org/10.1016/S0385-8146(02)00110-4).
35. GRUBER, Allison H et al., 2011. Time-to-contact and multiscale entropy identify differences in postural control in adolescent idiopathic scoliosis. *Gait & Posture*. Vol. 34, no. 1, pp. 13–18. DOI <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2011.02.015>.
36. GUO, Xia et al., 2006. Balance control in adolescents with idiopathic scoliosis and disturbed somatosensory function. *Spine*. Vol. 31, no. 14. DOI 10.1097/01.brs.0000222048.47010.bf.
37. HANDZEL, Ophir, BURGESS, Barbara J and NADOL, Joseph B, 2006. Histopathology of the Peripheral Vestibular System after Cochlear Implantation in the Human. *Otology & Neurotology*. Vol. 27, no. 1, pp. 57–64. DOI 10.1097/01.mao.0000188658.36327.8f.
38. HAUMONT, Thierry et al., 2011. Postural instability in early-stage idiopathic scoliosis in adolescent girls. *Spine*. Vol. 36, no. 13. DOI 10.1097/BRS.0b013e3181ff5837.
39. HAWASLI, Ammar H, HULLAR, Timothy E and DORWARD, Ian G, 2015. Idiopathic scoliosis and the vestibular system. *European spine journal: official publication of the European Spine Society, the European Spinal Deformity Society, and the European Section of the Cervical Spine Research Society*. Vol. 24, no. 2, pp. 227–33. DOI 10.1007/s00586-014-3701-4.

40. HITIER, Martin et al., 2015. Lateral Semicircular Canal Asymmetry in Idiopathic Scoliosis: An Early Link between Biomechanical, Hormonal and Neurosensory Theories? *PLOS ONE*. Vol. 10, no. 7, p. e0131120. DOI 10.1371/journal.pone.0131120.
41. HORAK, Fay B., 1997. Clinical assessment of balance disorders. *Gait & Posture*. Vol. 6, no. 1, pp. 76–84. DOI 10.1016/S0966-6362(97)00018-0.
42. HUGGARE, J, PIRTTINIEMI, P and SERLO, W, 1991. Head posture and dentofacial morphology in subjects treated for scoliosis. *Proc Finn Dent Soc* [online]. Vol. 87, no. 1, pp. 151–8. Retrieved from : <https://europepmc.org/article/med/2057482> [accessed 18 September 2022].
43. HUNG, V. W.Y. et al., 2005. Osteopenia: A new prognostic factor of curve progression in adolescent idiopathic scoliosis. *Journal of Bone and Joint Surgery - Series A*. Vol. 87, no. 12 I, pp. 2709–2716. DOI 10.2106/JBJS.D.02782.
44. JANSSEN, Michiel M.A., KOUWENHOVEN, Jan Willem M. and CASTELEIN, René M., 2010. The role of posteriorly directed shear loads acting on a pre-rotated growing spine: A hypothesis on the pathogenesis of idiopathic scoliosis. In : *Studies in Health Technology and Informatics*, pp. 112–117. IOS Press. 2010. ISBN 9781607505723. DOI 10.3233/978-1-60750-573-0-112.
45. JONES, Sherri et al., 2009. Anatomical and Physiological Considerations in Vestibular Dysfunction and Compensation. *Seminars in Hearing*. Vol. 30, no. 04, pp. 231–241. DOI 10.1055/s-0029-1241124.
46. KHAN, Sarah and CHANG, Richard, 2013. Anatomy of the vestibular system: A review. *NeuroRehabilitation*. Vol. 32, no. 3, pp. 437–443. DOI 10.3233/NRE-130866.
47. KHERADMAND, Amir and WINNICK, Ariel, 2017. Perception of Upright: Multisensory Convergence and the Role of Temporo-Parietal Cortex. *Frontiers in neurology*. Vol. 8, no. OCT. DOI 10.3389/FNEUR.2017.00552.
48. KHERADMAND, Amir et al., 2016. Visual perception of upright: Head tilt, visual errors and viewing eye. *Journal of vestibular research : equilibrium & orientation*. Vol. 25, no. 5–6, pp. 201–209. DOI 10.3233/VES-160565.
49. KIM, Sung Hee and KIM, Ji Soo, 2018. Effects of head position on perception of gravity in vestibular neuritis and lateral medullary infarction. *Frontiers in Neurology*. Vol. 9, no. FEB, p. 60. DOI 10.3389/FNEUR.2018.00060/BIBTEX.
50. KOBAYASHI, Hironari et al., 2002. Dynamic and static subjective visual vertical with aging. *Auris Nasus Larynx*. Vol. 29, no. 4, pp. 325–328. DOI 10.1016/S0385-8146(02)00058-5.
51. KONIECZNY, Markus Rafael, SENYURT, Hüsseyin and KRAUSPE, Rüdiger, 2013. *Epidemiology of adolescent idiopathic scoliosis*. The British Editorial Society of Bone & Joint Surgery London . *Journal of Children's Orthopaedics* 7. DOI 10.1007/s11832-012-0457-4.
52. KOUWENHOVEN, Jan Willem M. and CASTELEIN, René M., 2008. *The pathogenesis of adolescent idiopathic scoliosis: review of the literature*. Spine (Phila Pa 1976). Spine 33. DOI 10.1097/BRS.0b013e3181891751.
53. KOUWENHOVEN, Jan Willem M. et al., 2007. Effects of dorsal versus ventral shear loads on the rotational stability of the thoracic spine: A biomechanical

- porcine and human cadaveric study. *Spine*. Vol. 32, no. 23, pp. 2545–2550. DOI 10.1097/BRS.0b013e318158cd86.
54. KUBO, T. et al., 2001. Different forms of dizziness occurring after cochlear implant. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*. Vol. 258, no. 1, pp. 9–12. DOI 10.1007/PL00007519.
55. LACOUR, M. et al., 1997. Sensory strategies in human postural control before and after unilateral vestibular neurotomy. *Experimental brain research*. Vol. 115, no. 2, pp. 300–310. DOI 10.1007/PL00005698.
56. LACOUR, Michel, HELMCHEN, Christoph and VIDAL, Pierre Paul, 2016. Vestibular compensation: the neuro-otologist's best friend. *Journal of Neurology*. Vol. 263, p. 54. DOI 10.1007/S00415-015-7903-4.
57. LAM, Tsz Ping et al., 2013. Quantitative Ultrasound for Predicting Curve Progression in Adolescent Idiopathic Scoliosis: A Prospective Cohort Study of 294 Cases Followed-Up Beyond Skeletal Maturity. *Ultrasound in Medicine and Biology*. Vol. 39, no. 3, pp. 381–387. DOI 10.1016/j.ultrasmedbio.2012.09.012.
58. LAMBERT, François M. and STRAKA, Hans, 2012. The Frog Vestibular System as a Model for Lesion-Induced Plasticity: Basic Neural Principles and Implications for Posture Control. *Frontiers in Neurology*. Vol. 3. DOI 10.3389/fneur.2012.00042.
59. LAMBERT, François M. et al., 2009. Vestibular asymmetry as the cause of idiopathic scoliosis: A possible answer from *Xenopus*. *Journal of Neuroscience*. Vol. 29, no. 40, pp. 12477–12483. DOI 10.1523/JNEUROSCI.2583-09.2009.
60. LAMBERT, François M. et al., 2013. Restricted Neural Plasticity in Vestibulospinal Pathways after Unilateral Labyrinthectomy as the Origin for Scoliotic Deformations. *The Journal of Neuroscience*. Vol. 33, no. 16, pp. 6845–6856. DOI 10.1523/JNEUROSCI.4842-12.2013.
61. LENKE, Lawrence G. et al., 2002. Curve Prevalence of a New Classification of Operative Adolescent Idiopathic Scoliosis. *Spine*. Vol. 27, no. 6, pp. 604–611. DOI 10.1097/00007632-200203150-00008.
62. LENZ, Maximilian et al., 2021. Scoliosis and Prognosis—a systematic review regarding patient-specific and radiological predictive factors for curve progression. *European Spine Journal*. Vol. 30, no. 7, pp. 1813–1822. DOI 10.1007/s00586-021-06817-0.
63. LION, Alexis et al., 2013. Visuo-oculomotor deficiency at early-stage idiopathic scoliosis in adolescent girls. *Spine*. Vol. 38, no. 3, pp. 238–244. DOI 10.1097/BRS.0b013e31826a3b05.
64. LIU, Tianming et al., 2008. MR analysis of regional brain volume in adolescent idiopathic scoliosis: Neurological manifestation of a systemic disease. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*. Vol. 27, no. 4, pp. 732–736. DOI 10.1002/jmri.21321.
65. LOPEZ, Christophe et al., 2007. Changes of visual vertical perception: A long-term sign of unilateral and bilateral vestibular loss. *Neuropsychologia*. Vol. 45, no. 9, pp. 2025–2037. DOI 10.1016/j.neuropsychologia.2007.02.004.
66. MICHELSON, Patricia L. et al., 2018. Assessment of subjective visual vertical (SVV) using the “bucket test” and the virtual SVV system. *American Journal of Audiology*. Vol. 27, no. 3, pp. 249–259. DOI 10.1044/2018\_AJA-17-0019.

67. MUCHOVA, Miroslava, 2009. Diferenciální diagnostika abnormálního držení hlavy v dětském věku. *Neurologie pro praxi*. Vol. 10, no. 1, pp. 39–43.
68. MÜLLER, Julia A., BOCKISCH, Christopher J. and TARNUTZER, Alexander A., 2016. Spatial orientation in patients with chronic unilateral vestibular hypofunction is ipsilesionally distorted. *Clinical Neurophysiology*. Vol. 127, no. 10, pp. 3243–3251. DOI 10.1016/j.clinph.2016.07.010.
69. OGILVIE, James W. et al., 2006. The search for idiopathic scoliosis genes. *Spine*. Vol. 31, no. 6, pp. 679–681. DOI 10.1097/01.brs.0000202527.25356.90.
70. O'LEARY, Michael J. et al., 1991. Electrode Insertion Trauma in Cochlear Implantation. *Annals of Otolaryngology, Rhinology & Laryngology*. Vol. 100, no. 9, pp. 695–699. DOI 10.1177/000348949110000901.
71. OTERO-MILLAN, Jorge and KHERADMAND, Amir, 2016. Upright Perception and Ocular Torsion Change Independently during Head Tilt. *Frontiers in human neuroscience*. Vol. 10, no. NOV2016. DOI 10.3389/FNHUM.2016.00573.
72. PENG, Yue et al., 2020. *Research progress on the etiology and pathogenesis of adolescent idiopathic scoliosis*. Lippincott Williams and Wilkins. Chinese Medical Journal 133. DOI 10.1097/CM9.0000000000000652.
73. PICELLI, Alessandro et al., 2016. Do adolescents with idiopathic scoliosis have body schema disorders? A cross-sectional study. *Journal of back and musculoskeletal rehabilitation*. Vol. 29, no. 1, pp. 89–96. DOI 10.3233/BMR-150602.
74. POLLAK, Lea et al., 2013. Otolith dysfunction as a possible cause for the development of idiopathic scoliosis. *Journal of pediatric orthopedics*. Vol. 33, no. 3, pp. 293–7. DOI 10.1097/BPO.0b013e31827c0643.
75. ROSENGREN, Sally M. et al., 2019. Vestibular evoked myogenic potentials in practice: Methods, pitfalls and clinical applications. *Clinical Neurophysiology Practice*. Vol. 4, pp. 47–68. DOI 10.1016/j.cnp.2019.01.005.
76. ROUSIE, Dominique Louise et al., 2009. Abnormal connection between lateral and posterior semicircular canal revealed by a new modeling process: Origin and physiological consequences. In : *Annals of the New York Academy of Sciences*, pp. 455–457. Blackwell Publishing Inc. 2009. ISBN 9781573317177. DOI 10.1111/j.1749-6632.2009.03857.x.
77. SANDERS, James O. et al., 2008. Predicting scoliosis progression from skeletal maturity: A simplified classification during adolescence. *Journal of Bone and Joint Surgery - Series A*. Vol. 90, no. 3, pp. 540–553. DOI 10.2106/JBJS.G.00004.
78. SHI, L. et al., 2009. Volume-based morphometry of brain MR images in adolescent idiopathic scoliosis and healthy control subjects. *American Journal of Neuroradiology*. Vol. 30, no. 7, pp. 1302–1307. DOI 10.3174/ajnr.A1577.
79. SHI, Lin et al., 2011. Automatic MRI segmentation and morphoanatomy analysis of the vestibular system in adolescent idiopathic scoliosis. *NeuroImage*. Vol. 54, no. SUPPL. 1. DOI 10.1016/j.neuroimage.2010.04.002.
80. SHI, Lin et al., 2013. Volumetric changes in cerebellar regions in adolescent idiopathic scoliosis compared with healthy controls. *Spine Journal*. Vol. 13, no. 12, pp. 1904–1911. DOI 10.1016/j.spinee.2013.06.045.

81. SINGLA, Deepika, VEQAR, Zubia and HUSSAIN, Mohammed Ejaz, 2017. Photogrammetric Assessment of Upper Body Posture Using Postural Angles: A Literature Review. *Journal of chiropractic medicine*. Vol. 16, no. 2, pp. 131–138. DOI 10.1016/J.JCM.2017.01.005.
82. SONG, Xiao Xing et al., 2018. Effects of Low Bone Mineral Status on Biomechanical Characteristics in Idiopathic Scoliotic Spinal Deformity. *World Neurosurgery*. Vol. 110, pp. e321–e329. DOI 10.1016/j.wneu.2017.10.177.
83. STETKAROVA, I. et al., 2016. Electrophysiological and histological changes of paraspinal muscles in adolescent idiopathic scoliosis. *European Spine Journal*. Vol. 25, no. 10, pp. 3146–3153. DOI 10.1007/s00586-016-4628-8.
84. TARNUTZER, Alexander A. et al., 2013. Modulation of internal estimates of gravity during and after prolonged roll-tilts. *PloS one*. Vol. 8, no. 10. DOI 10.1371/JOURNAL.PONE.0078079.
85. TIEN, Hui-Chi and LINTHICUM, Fred H., 2002. Histopathologic Changes in the Vestibule after Cochlear Implantation. *Otolaryngology–Head and Neck Surgery*. Vol. 127, no. 4, pp. 260–264. DOI 10.1067/mhn.2002.128555.
86. TIGHILET, B. et al., 2019. Peripheral vestibular plasticity vs central compensation: evidence and questions. *Journal of neurology*. Vol. 266, no. Suppl 1, pp. 27–32. DOI 10.1007/S00415-019-09388-9.
87. TIMMANN-BRAUN, Dagmar, 2012. Posturographie. *Das Neurophysiologie-Labor*. Vol. 34, no. 3, pp. 113–118. DOI 10.1016/j.neulab.2012.05.001.
88. VEIS KARAMI, Masomeh et al., 2020. The effect of orthotic interventions on balance performance in adolescent idiopathic scoliosis: A systematic literature review. *Assistive Technology*. Vol. 32, no. 5, pp. 260–267. DOI 10.1080/10400435.2018.1539419.
89. WANG, D et al., 2013. Altered Topological Organization of Cortical Network in Adolescent Girls with Idiopathic Scoliosis. *PLoS ONE*. Vol. 8, no. 12, p. 83767. DOI 10.1371/journal.pone.0083767.
90. WANG, Defeng et al., 2012. Abnormal cerebral cortical thinning pattern in adolescent girls with idiopathic scoliosis. *NeuroImage*. Vol. 59, no. 2, pp. 935–942. DOI 10.1016/j.neuroimage.2011.07.097.
91. WEDTGRUBE, A., BOCKISCH, C.J. and TARNUTZER, A.A., 2020. Effects of prolonged roll-tilt on the subjective visual and haptic vertical in healthy human subjects. *Journal of vestibular research : equilibrium & orientation*. Vol. 30, no. 1, pp. 1–16. DOI 10.3233/VES-200690.
92. WEINSTEIN, Stuart L. et al., 2003. Health and Function of Patients with Untreated Idiopathic Scoliosis: A 50-Year Natural History Study. *Journal of the American Medical Association*. Vol. 289, no. 5, pp. 559–567. DOI 10.1001/jama.289.5.559.
93. WELGAMPOLA, Miriam S. and COLEBATCH, James G., 2005. Characteristics and clinical applications of vestibular-evoked myogenic potentials. *Neurology*. Vol. 64, no. 10, pp. 1682–1688. DOI 10.1212/01.WNL.0000161876.20552.AA.
94. WINNICK, Ariel et al., 2019. No handedness effect on spatial orientation or ocular counter-roll during lateral head tilts. *Physiological Reports*. Vol. 7, no. 13. DOI 10.14814/PHY2.14160.

95. WONG, Lester P K, CHEUNG, Prudence W H and CHEUNG, Jason P Y, 2022. Curve type, flexibility, correction, and rotation are predictors of curve progression in patients with adolescent idiopathic scoliosis undergoing conservative treatment : a systematic review. *The bone & joint journal*. Vol. 104-B, no. 4, pp. 424–432. DOI 10.1302/0301-620X.104B4.BJJ-2021-1677.R1.
96. XIN, Shi-Qing et al., 2011. Euclidean Geodesic Loops on High-Genus Surfaces Applied to the Morphometry of Vestibular Systems. In : . DOI 10.1007/978-3-642-23629-7\_47.
97. YAGCI, Gozde, YAKUT, Yavuz and SIMSEK, Engin, 2018. The effects of exercise on perception of verticality in adolescent idiopathic scoliosis. *Physiotherapy theory and practice*. Vol. 34, no. 8, pp. 579–588. DOI 10.1080/09593985.2017.1423429.
98. YANG, Tae Ho et al., 2014. Topology of brainstem lesions associated with subjective visual vertical tilt. *Neurology*. Vol. 82, no. 22, pp. 1968–1975. DOI 10.1212/WNL.0000000000000480.
99. YELNIK, Alain P. et al., 2002. Perception of Verticality After Recent Cerebral Hemispheric Stroke. *Stroke*. Vol. 33, no. 9, pp. 2247–2253. DOI 10.1161/01.STR.0000027212.26686.48.
100. ZAKARIA, Mohd Normani et al., 2019. The influences of age, gender and geometric pattern of visual image on the verticality perception: A subjective visual vertical (SVV) study among Malaysian adults. *Clinical Otolaryngology*. Vol. 44, no. 2, pp. 166–171. DOI 10.1111/coa.13255.
101. ZENG, Wei et al., 2010. Shape Analysis of Vestibular Systems in Adolescent Idiopathic Scoliosis Using Geodesic Spectra. In : . DOI 10.1007/978-3-642-15711-0\_67.
102. ZWERGAL, A. et al., 2009. A bucket of static vestibular function. *Neurology*. Vol. 72, no. 19, pp. 1689–1692. DOI 10.1212/WNL.0B013E3181A55ECF.

## 10. SEZNAM PUBLIKACÍ

### 10.1. Původní vědecké práce, které jsou podkladem disertační práce

Čákrť, O., Slabý, K., Kučerová, K., Balatková, Z., Jeřábek, J., & Bouček, J. (2023). Subjective visual vertical and postural control in patients following cochlear implantation. *Journal of Vestibular Research: Equilibrium & Orientation*. <https://doi.org/10.3233/VES-220136>. [IF (2022): 2.3, Q2]

Kučerová, K., Bouček, J., Slabý, K., Jeřábek, J., & Čákrť, O. (2020). Funkce vestibulárního systému u pacientů po kochleární implantaci. *Česká a Slovenská Neurologie a Neurochirurgie*, 83/116(2), 198–201. <https://doi.org/10.14735/amcsnn2020198>. [IF (2020): 0.35, Q4]

Kučerová, K., Šafářová, M., Illinger, V., Koutná, S., Šonská, K., Levínská, K., & Čákrť, O. (2023). Subjective visual vertical and head position in patients with idiopathic scoliosis. *Journal of Vestibular Research*, 33(3), 187–193. <https://doi.org/10.3233/VES-230005>. [IF (2022): 2.3, Q2]

### 10.2. Původní vědecké práce nevztahující se přímo k tématu disertační práce

Balatková, Z., Bonaventurová, M., Černý, R., Lisý, J., Brennerová, S., Koucký, V., Bandúrová, V., Svobodová, V., Fík, Z., Komarc, M., Mrázková, E., Kučerová, K., Hermann, P., & Čada, Z. (2023). Does vestibular function correlate with objective MRI findings after vestibular schwannoma surgery? *Acta Otorhinolaryngologica Italica*, 43(3), 212–220. <https://doi.org/10.14639/0392-100X-N2367>. [IF (2022): 2.0, Q3]

### 10.3. Přednášky a plakátová sdělení na odborných konferencích

- **Connection between head position and perception of subjective visual vertical in patients with idiopathic scoliosis.** SOSORT International Congress, Spain – San Sebastian, 4. – 7. 5. 2022, ústní prezentace
- **Subjective visual vertical and head position in patients with idiopathic scoliosis.** The 9th International Posture Symposium, Slovakia – Smolenice, 10. - 13. 9. 2023, ústní prezentace
- **Vestibular functions of adolescents with idiopathic scoliosis - A comprehensive assessment and comparative study.** XXXI Bárány Society Meeting, Spain – Madrid, 9. – 11. 5. 2022, poster
- **Vestibular functions of adolescents with idiopathic scoliosis.** 2nd World Physical Therapy and Rehabilitation Medicine Congress, Dubaj, Prosinec 2021, ústní prezentace



- **Stabilita a vnímání prostoru u pacientů po kochleární implantaci.** Vědecká konference 2.LF UK, Praha, Říjen 2020, ústní prezentace, cena předsedy vědeckého výboru
- **Polohově vázaná závrat' – diagnostická problematika.** Konference Neurologie v klinické praxi, Plzeň, Leden 2020, prezentace kazuistiky

## **11. PŘÍLOHY**