

UNIVERZITA PALACKÉHO V OLMOUCI

PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA

KATEDRA BIOFYZIKY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Vliv rejstříku a dyšnosti hlasu na parametry kmitání  
hlasivek: Vysokorychlostní videokymografická studie**



Vypracovala: Zuzana Štanclová

Studijní obor: Biofyzika

Vedoucí bakalářské práce: doc. RNDr. Jan Švec, Ph.D. et Ph.D.

Olomouc 2023

# Bibliografická identifikace

Jméno a příjmení autora: Zuzana Štanclová

Název práce: Vliv rejstříku a dyšnosti hlasu na parametry kmitání hlasivek: Vysokorychlostní videokymografická studie

Typ práce: Diplomová

Pracoviště: Katedra biofyziky a Katedra experimentální fyziky

Vedoucí práce: doc. RNDr. Jan Švec, Ph.D. et Ph.D.

Konzultant: Hugo Lehoux, M.Sc.

Rok obhajoby práce: 2023

## Abstrakt:

Hlasové rejstříky, které vyjadřují různou kvalitu hlasu, jsou poměrně diskutované a málo pochopitelné téma. Jejich kvantitativnímu popisu se zatím věnovalo málo prací. Tato práce navazuje na výzkumy Herbsta a kol. (2009, 2011) a popisuje 4 typy fonací - abdukováný a addukováný falzet (FaB, FaD) a abdukováný a addukováný hrudní rejstřík (CaB, CaD). K popisu využívá parametry kmitání hlasivek: kvocient uzavření ( $Q_C$ ), amplitudu, kvocienty šikmosti ( $Q_S$ ), otevírání ( $Q_{og}$ ) a uzavírání ( $Q_{cg}$ ), normalizovaný kvocient amplitud (NAQ) a vertikální fázový rozdíl (VPD). Parametry byly určeny na základě analýzy videokymogramů získaných od 15 subjektů a hodnoty pro jednotlivé fonace byly porovnávány mezi sebou. Rozdíl mezi hrudním rejstříkem a falzetem nejlépe popisoval  $Q_C$ , rozdíly způsobené addukcí chrupavčité části dobře popisovaly  $Q_C$ ,  $Q_{cg}$  a NAQ. Parametr, který by jednoznačně odlišoval fonace produkované v různém rejstříku s odlišnou dyšností jsme nenalezli.

Klíčová slova: Parametry kmitání hlasivek, hlasové rejstříky, konfigurace glottis při zpěvu, videokymografie, vysokorychlostní laryngoskopie

Počet stran: 56

Počet příloh: 28

Jazyk: český

# Bibliographical identification

Autor's first name and surname: Zuzana Štanclová

Title: Influence of registers and breathiness of voice on vocal fold vibration parameters: A high-speed videokymographic study

Type of thesis: Master

Department: Department of Biophysics and Department of Experimental Physics

Supervisor: doc. RNDr. Jan Švec, Ph.D. et Ph.D.

Consultant: Hugo Lehoux, M.Sc.

The year of presentation: 2023

## Abstract:

Voice registers expressing different voice qualities present largely discussed, but not well understood topic. There are not many papers describing them quantitatively. This thesis follows the work of Herbst et al. (2009, 2011) and studies 4 phonation types - abducted and adducted falsetto (FaB, FaD) and abducted and adducted chest (CaB, CaD). It qualifies the following vocal fold oscillation parameters: closed quotient ( $Q_C$ ), amplitude, skewing quotient ( $Q_S$ ), opening quotient ( $Q_{og}$ ), closing quotient ( $Q_{cg}$ ), normalized amplitude quotient (NAQ) and vertical phase difference (VPD). The parameters were obtained from videokymographic analysis of 15 subjects and the values for phonations were compared among the 4 phonation types. The difference between chest register and falsetto was best described with  $Q_C$ , cartilaginous adduction was best differentiated with  $Q_C$ ,  $Q_{cg}$  and NAQ. We were not able to find a reliable parameter differentiating between phonations in different registers with different breathiness.

Keywords: Vocal fold oscillation parameters, voice registers, glottis configurations in singing, videokymography, high-speed videolaryngoscopy

Number of pages: 56

Number of appendices: 28

Language: czech

Děkuji vedoucímu práce doc. RNDr. Janu Švecovi, Ph.D. et Ph.D. za vedení práce a za cenné rady při jejím psaní. Poděkování patří taktéž konzultantovi Hugo Lehouxovi, M.Sc. za pomoc s kódy, s měřením a taktéž za ochotu provést fonace, které jsem v této práci analyzovala. Také děkuji Mgr. Ondřeji Vencálkovi, Ph.D. za pomoc se statistickým zpracováním dat.

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Přehled problematiky</b>	<b>2</b>
2.1	Anatomie hlasového ústrojí . . . . .	2
2.1.1	Kostra hrtanu . . . . .	2
2.1.2	Svalstvo hrtanu . . . . .	3
2.1.3	Morfologická struktura hlasivek . . . . .	4
2.1.4	Podélná struktura hlasivek . . . . .	5
2.2	Kmitání hlasivek a slizniční vlna . . . . .	6
2.3	Metody pozorování hlasivek . . . . .	8
2.4	Vlastnosti hlasu, hlasové rejstříky . . . . .	10
2.4.1	Vlastnosti hlasu . . . . .	10
2.4.2	Hlasové rejstříky . . . . .	11
2.4.3	Základní konfigurace glottis při zpěvu . . . . .	14
2.5	Parametry kmitání hlasivek . . . . .	15
2.6	Využití parametrů kmitání hlasivek v literatuře . . . . .	19
2.6.1	Parametrizace kmitů při studiu hlasových rejstříků . . . . .	19
2.6.2	Parametrizace kmitů při studiu intenzity hlasu . . . . .	20
<b>3</b>	<b>Cíl práce</b>	<b>22</b>
<b>4</b>	<b>Materiál a metody</b>	<b>23</b>
4.1	Data k analýze . . . . .	23
4.1.1	Původní experiment . . . . .	23
4.1.2	Doplnění datového souboru . . . . .	24
4.2	Výběr dat . . . . .	25

4.3	Analýza kymogramů . . . . .	26
4.4	Zpracování výsledků . . . . .	27
4.5	Analýza zvuku . . . . .	29
<b>5</b>	<b>Výsledky</b>	<b>31</b>
5.1	Analýza zvuku . . . . .	31
5.2	Analýza parametrů kmitání hlasivek . . . . .	33
5.2.1	Analýza jednotlivých subjektů . . . . .	33
5.2.2	Společná analýza subjektů - ordinální škála na základě pořadí	36
5.2.3	Společná analýza subjektů - separátní oddělení rejstříku a dyš- nosti . . . . .	43
<b>6</b>	<b>Diskuse</b>	<b>49</b>
<b>7</b>	<b>Závěr</b>	<b>52</b>
<b>8</b>	<b>Seznam literatury</b>	<b>54</b>
<b>9</b>	<b>Přílohy</b>	

## Seznam zkratek

CT	vnější napínač hlasivkový (lat. <i>musculus crycothyroideus</i> )
CaB	abdukovaný hrudní rejstřík
CaD	addukovaný hrudní rejstřík
EGG	elektroglottografie
EMG	elektromyografie
FaB	abdukovaný falzet
FaD	addukovaný falzet
$f_0$	základní frekvence
GAW	tvar vlny plochy glottis (z angl. glottal area waveform)
HSVL	vysokorychlostí videolaryngoskopie
IA	lat. <i>musculus arytenoideus transversus</i>
LCA	lat. <i>musculus cricoarytenoideus lateralis</i>
NAQ	normalizovaný kvocient amplitud (z angl. normalized amplitude quotient)
PCA	lat. <i>musculus cricoarytenoideus posterior</i>
$Q_C$	kvocient uzavření (z angl. closed quotient)
$Q_{cg}$	kvocient uzavírání (z angl. closing quotient)
$Q_O$	kvocient otevření (z angl. open quotient)
$Q_{og}$	kvocient otevírání (z angl. opening quotient)
$Q_S$	kvocient šikmosti (z angl. skewing quotient)
SPL	hladina akustického tlaku
TA	sval hlasivkový (lat. <i>musculus thyroarytenoideus</i> )
$T$	perioda

$T_C$	doba trvání fáze uzavření
$t_{cg}$	doba trvání fáze uzavírání
$T_O$	doba trvání fáze otevření
$t_{og}$	doba trvání fáze otevírání
VKG	videokymografie
VOC	lat. <i>musculus vocalis</i>
VPD	vertikální fázový rozdíl (z angl. vertical phase difference)



# Úvod

Problematika hlasových rejstříků je považována za téma velice komplikované a subjektivní. Existence různých hlasových kvalit, které můžeme při řeči a hlavně při zpěvu pozorovat, je nepopíratelná. I tak stále neexistuje jasná úmluva, jak tyto kvality popsat a pojmenovat. V nejjednodušším případě charakterizujeme rejstřík hrudní a hlavový (někdy nazývaný falzet), které se většinou odlišují použitím v různých frekvenčních oblastech hlasového rozsahu (Titze 2000). Toto označení vychází primárně ze subjektivního vnímání rezonance dané části těla při fonaci. V různých zdrojích ovšem velmi často autoři dělí hlasové rejstříky do více skupin, případně využívají různá označení, což jednak situaci komplikuje, jednak nenapomáhá snižovat subjektivitu problému.

Tato práce navazuje na studie Ch. Herbsta a kol. (2009, 2011), kteří se pokusili o objektivizaci problému hlasových rejstříků a nadefinovali čtyři hlasové kvality užívané při zpěvu (abdukovaný a addukovaný falzet, abdukovaný a addukovaný hrudní rejstřík), které se vzájemně odlišují konfigurací hlasivkové šterbiny. Kromě subjektivního vnímání zvukové kvality je tak tedy možné typ fonace ověřit i podle nastavení hlasivek. Studie byla provedena nejdříve na jednom subjektu, později byla doplněna o studium dalších subjektů a autoři v těchto pracích charakterizovali jednotlivé typy fonací kvalitativně na základě vizuálního posouzení hlasivek.

Tato práce se snaží ještě více zobjektivizovat výsledky použitím matematicky nadefinovaných parametrů kmitání hlasivek, které kvantitativně popisují fyziologické změny, ke kterým při různých typech fonací dochází.

# Přehled problematiky

## 2.1 Anatomie hlasového ústrojí

Jako hlas označujeme zvuk, který vzniká v důsledku přerušování proudu vzduchu kmitáním hlasivek umístěných v hrtanu. Hlasivky jsou tvořeny měkkou tkání a v oblasti ohryzku se upínají k hrtanovým chrupavkám. Při fonaci se díky hlasivkovým chrupavkám hlasivky přiblíží k sobě a v důsledku průchodu vzduchu přes hlasivkovou štěrbinu dochází k periodickému otevírání a zavírání hlasivek, které mění tlak vzduchu a vzniká zdrojový hlas, který je následně upravován v rezonančních dutinách.

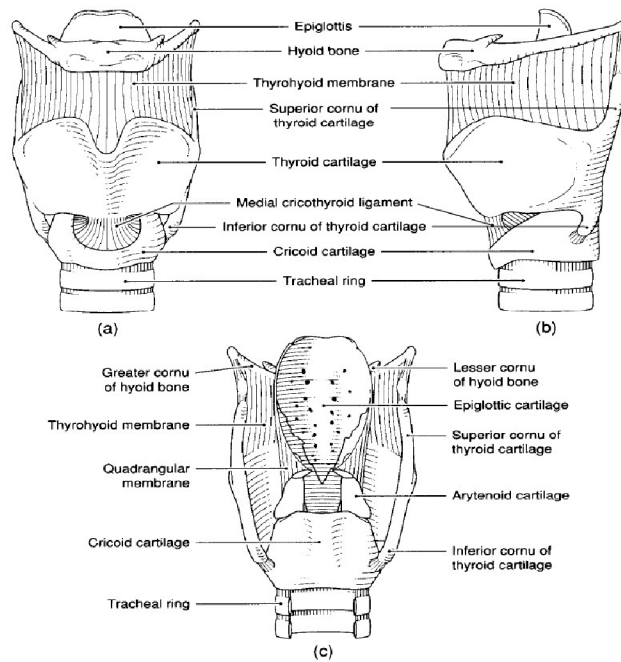
### 2.1.1 Kostra hrtanu

Kostra hrtanu je tvořena chrupavkou štítnou, prstencovou, párovými chrupavkami hlasivkovými, dále hrtanovou příklopkou a jako celek je hrtan zavěšen na jazylce (Titze 2000). Tyto struktury jsou zobrazeny v Obrázku 2.1.

Chrupavka štítná (lat. *cartilago thyroidea*), která vystupuje pod kůží jako ohryzek (výrazněji u mužů), se skládá ze dvou plochých destiček. Jejich zadní horní rohy se pak vazivově pojí na jazylku a dolní rohy jsou napojeny na chrupavku prstencovou.

Chrupavka prstencová (lat. *cartilago cricoidea*) je nazvaná podle svého charakteristického tvaru prstence, který je v zadní části vyšší než v části přední a kompletně obklopuje dýchací cesty. Jak už bylo uvedeno dříve, je spojena s chrupavkou štítnou a to pomocí kloubních plošek umístěných na stranách. Na další pár kloubních plošek v horní části se potom napojují chrupavky hlasivkové.

Pro tvorbu hlasu nezbytné jsou dvě chrupavky hlasivkové (lat. *cartilago arytenoidea*), na které jsou samotné hlasivky vzadu upevněny. Mají pyramidový tvar a

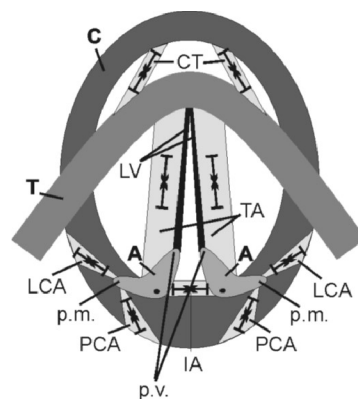


Obrázek 2.1: Kostra hrtanu (Titze 2000)

můžeme na nich popsat tři charakteristické výběžky - v dolní části výběžek svalový a hlasivkový, a na opačném konci horní výběžek. Právě na hlasivkový výběžek se váže hlasivkový vaz, který je důležitou součástí hlasivky.

## 2.1.2 Svalstvo hrtanu

Hrtanové svaly můžeme rozdělit na vnější, které hrtan spojují s okolními strukturami (hrudní kost, jazyk), a na vnitřní (Titze 2000). Svaly vnitřní (Obrázek 2.2) zajišťují abdukcii - odtažení a addukcii - přiblížení hlasivek a jsou tedy zásadní pro tvorbu hlasu (Švec 1996).



Obrázek 2.2: Svalstvo hrtanu (Švec 1996)

Součástí hlasivek je sval hlasivkový (lat. *musculus thyroarytenoideus*, značen TA). Je tvořen dvěma svazky - vnějším a vnitřním, který nazýváme *musculus vocalis* (značen VOC) a který sousedí s hlasivkovým vazem. TA sval je zodpovědný za zvyšování tuhosti hlasivek, čímž ovlivňuje základní frekvenci hlasu, intenzitu a taktéž tvorbu hlasových rejstříků (Švec 1996, Hirano a kol. 1969).

Pro regulaci základní frekvence velice důležitý je *musculus cricothyroideus* neboli vnější napínač hlasivkový (značen CT). Svou kontrakcí zajišťuje přibližování chrupavek štítné a prstencové, čímž způsobuje prodlužování a napínání hlasivek.

Vzájemnými antagonisty jsou párové svaly *musculus crycoarytenoideus lateralis* (značen LCA) a *musculus crycoarytenoideus posterior* (značen PCA). Ačkoli se oba upínají na svalový výběžek chrupavek hlasivkových, v důsledku úponu na chrupavku prstencovou v různých místech mají opačnou funkci. LCA, který se upíná k hornímu okraji chrupavky štítné pracuje jako adduktor hlasivkové štěrbiny (lat. *glottis*), zatímco PCA, upínající se k zadní stěně též chrupavky pracuje jako abduktor.

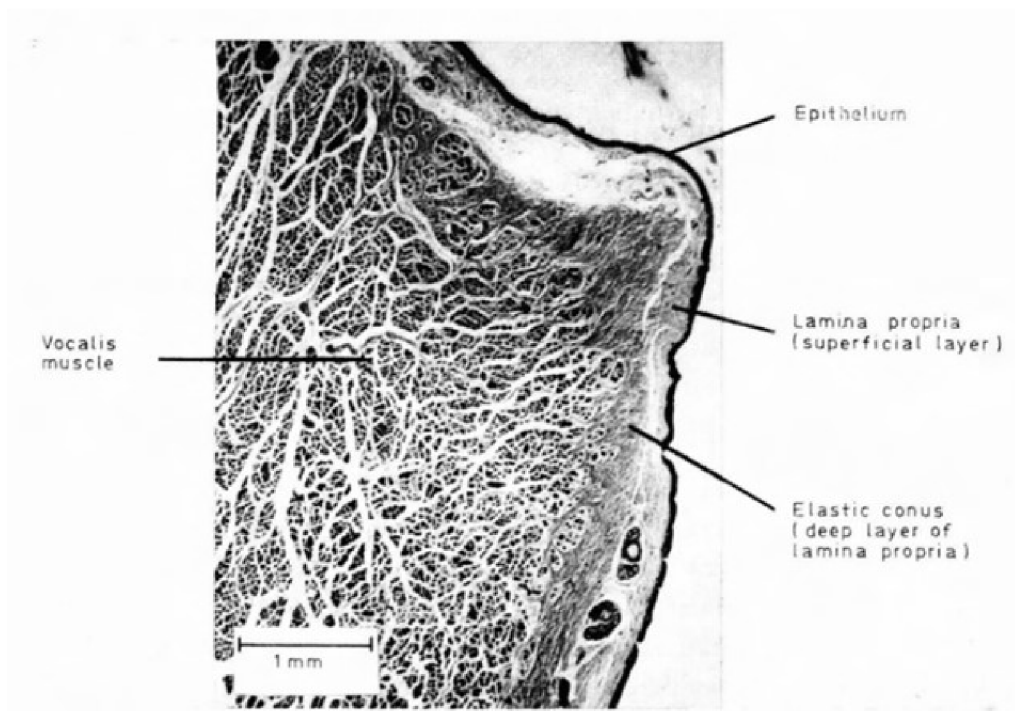
Konečně *musculus arytenoideus transversus* (značen IA), který spojuje hlasivkové výběžky obou hlasivkových chrupavek svou kontrakcí zajišťuje kompletní uzavření chrupavčité části hlasivkové štěrbiny a ovlivňuje také výslednou kvalitu hlasu (Hirano a kol. 1970, Herbst a kol. 2009, Herbst a kol. 2011, Herbst 2012, Herbst a Švec 2014).

### 2.1.3 Morfologická struktura hlasivek

Morfologická struktura hlasivek nám popisuje jejich vnitřní strukturu (řez je zobrazen v Obrázku 2.3). Povrch hlasivky kryje tenká vrstva vrstevnatého šupinového epitelu o tloušťce 0,05 - 0,1 mm (Hirano 1977).

Epitem krytá je nesvalová tkáň s názvem *lamina propria*. Ta je tvořena třemi vrstvami: povrchovou, střední a hloubkovou. Povrchová vrstva *laminy propria* o tloušťce přibližně 0,5 mm je vyplněna tkáňovou tekutinou obsahující neorganizovaná elastinová vlákna. Střední vrstva obsahuje taktéž vlákna elastinová, která jsou již ovšem uspořádána v anteriorně-posteriorním směru, ale zároveň taktéž neuspořádaná vlákna kolagenová. V hloubkové vrstvě jsou umístěna orientovaná kolagenní vlákna. Uváděná tloušťka střední s hloubkovou vrstvou je 1 - 2 mm (Hirano 1977).

Konečně nejhlubší částí hlasivek je VOC sval o šířce 7 - 8 mm (Hirano 1977).



Obrázek 2.3: Morfologická struktura hlasivek (Hirano 1974)

Pro zjednodušení byl zaveden třívrstevnatý a dvojrstevnatý model struktury hlasivek (Titze 2000). V třívrstevnatém modelu rozlišujeme sliznici, tvořenou epitelem a povrchovou vrstvou *laminy propriae*, vaz, jež tvoří zbylé dvě vrstvy *laminy propriae*, a sval. U dvojrstevnatého modelu rozdělujeme hlasivku na obal a tělo, přičemž tělo je tvořeno VOC svalem a hloubkovou vrstvou *laminy propriae* a obal tvoří epitel kryjící střední a povrchovou vrstvu *laminy propriae* (Hirano 1974).

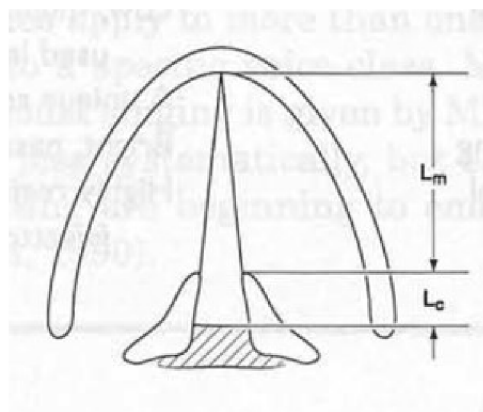
Uvedené tloušťky jsou pouze orientační a odlišují se jednak u různých subjektů, ale taktéž podél hlasivky. Vaz je tlustší na okrajích, kde zajišťuje ochranu hlasivky při napínání, naopak uprostřed hlasivky je větší tloušťka sliznice, jelikož zde dochází k největším nárazům (Hirano a kol. 1981).

Jak bude uvedeno dále, jednotlivé části morfologické struktury hlasivek se mohou pohybovat různě nezávisle na sobě v závislosti na různých mechanických vlastnostech jednotlivých částí.

#### 2.1.4 Podélná struktura hlasivek

Při pohledu na hlasivky shora můžeme pozorovat, že vzhled hlasivky se podobá schematickému znázornění na Obrázku 2.4. Jak je na tomto obrázku naznačeno, podélně lze hlasivky rozdělit na část blanitou (s délkou  $L_m$ ) a na část chrupavčitou

(délka  $L_c$ ). Blanitá část je prostorově omezena přední komisurou a hlasivkovým výběžkem a zajišťuje primárně kmitání hlasivek při fonaci. Oblast mezi hlasivkovým výběžkem a zadní komisurou poté označujeme jako část chrupavčitou. Její addukce se může lišit v závislosti na typu fonace, v důsledku čehož se může nebo nemusí účastnit kmitání (Titze 2000).



Obrázek 2.4: Blanitá a chrupavčitá část hlasivek (Titze 2000)

Délka hlasivek se liší pro muže a ženy. Zatímco celková délka hlasivek u mužů je přibližně o 40 % větší než u žen, délka blanité části, u mužských hlasivek přibližně 13 - 18 mm, je větší o 60 % a naopak rozdíl v délce chrupavčité části pro obě pohlaví je přibližně 20%.

Jelikož se na hlasivku ve zjednodušeném fyzikálním pohledu můžeme dívat jako na strunu, přispívá délka hlasivky k základní frekvenci, tedy výšce tónu (Titze 2000).

## 2.2 Kmitání hlasivek a slizniční vlna

Mechanismus kmitání hlasivek nejpřesněji popisuje myoelasticko-aerodynamická teorie, kterou jako první formuloval van den Berg (1958). Vzduch proudí z plic a rozkmitává hlasivky. Charakteristika vibrací je dána elasticitou jednotlivých tkání, kterou je možno ovlivnit svalovou aktivitou. V různých místech vokálního traktu můžeme měřit různé hodnoty tlaků: subglottický pod hlasivkami, intraglottický v prostoru hlasivkové štěrbiny a supraglottický v prostoru nad hlasivkami. Hlavní otázkou při výzkumu této teorie bylo, který tlak nebo která změna tlaku jsou zodpovědné za opakované otevírání a uzavírání glottis.

Při původních experimentech bylo zjištěno, že subglottický tlak je nejvyšší, když jsou hlasivky uzavřeny, a naopak má minimální hodnotu pro hlasivky otevřené (van

den Berg 1958). Nejnovější měření ovšem ukazují, že nejvyšší hodnota subglottického tlaku je dosažena v okamžiku, kdy dojde k uzavření glottis (Miller a Schutte 1985, Schutte a Miller 1988, Švec a kol. 2021). Během doby, kdy je glottis uzavřená, jeho hodnoty fluktuují ve formě tlumených oscilací. Tlakem zodpovědným za kmitání hlasivek je tedy podle nejnovějších teorií tlak intraglottický, který je ovlivněn jak tlakem subglottickým a supraglottickým, tak tlakem Bernoulliho, který závisí na geometrii glottis.

Pro vznik oscilací je zásadní, aby byla hodnota intraglottického tlaku vyšší při otevírání než při zavírání. Tohoto efektu je docíleno buď v případě, že pohyb vzduchového sloupce nad hlasivkami je zpožděný oproti pohybu samotných hlasivek, nebo pro tvar hlasivky konvergentní (zúžený směrem k vokálnímu traktu) při otevírání a divergentní (rozšířený směrem k vokálnímu traktu) při zavírání (Titze 1988, Švec a kol. 2021).

V prvním případě je pro vznik oscilací využita setrvačnost vzduchového sloupce, který nemůže náhle změnit směr, a způsobuje při otevírání pozitivní a při zavírání negativní supraglottický tlak. Při otevírání tedy dochází ke snížení Bernoulliho tlaku. Nutnou podmínkou pro oscilace způsobené tímto fenoménem je přítomnost vokálního traktu.

Ve druhém případě využíváme fázového zpoždění horního okraje hlasivky vůči dolnímu. K otevírání hlasivkové štěrbině dochází od spodního okraje, glottis má tedy tvar konvergentní a dominantní je tlak subglottický, který vyvolává další otevírání. V důsledku elasticity tkání však dochází k opětovnému zavírání hlasivek od spodního okraje a tvar hlasivky se změní na divergentní. V tomto případě je dominantní tlak supraglottický, který je nižší než subglottický, a dojde k postupnému uzavírání hlasivek. Opakováním celého procesu vznikají samobuzené oscilace.

Jak už bylo řečeno, tloušťka hlasivek je nezanedbatelná, pohyb dolního a horního okraje může být od sebe fázově opožděn. Tento jev tvoří základ tzv. slizniční vlny. V určitých případech se totiž může sliznice pohybovat nezávisle na těle hlasivky. Při oscilacích dochází k pohybu slizničního obalu od spodního k hornímu okraji hlasivky a tento pohyb poté pokračuje po horním povrchu hlasivek laterálně. Míra slizniční vlny je ovlivněna fyziologickými změnami poddajnosti sliznice (především v důsledku svalové aktivity), případně patologickými stavy (Kumar a Švec 2019).

## 2.3 Metody pozorování hlasivek

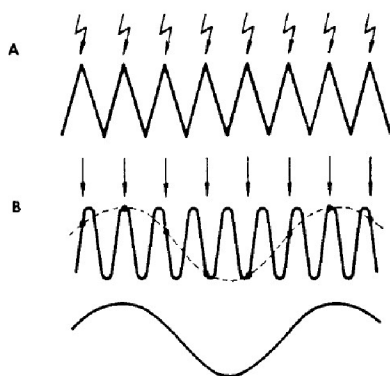
První dokázané pokusy o pozorování hlasivek můžeme datovat do druhé poloviny 19. století (Švec 1996). V literatuře se za průkopníka uvádí operní pěvec Manuel Garcia, který k tomuto pozorování vytvořil laryngoskopické zrcátko. To sice umožňuje pozorovat hlasivky, ale vzhledem k vysoké frekvenci oscilací není možné jej využít pro pozorování samotných kmitů.

V dnešní době se zrcátka používají jen orientačně, pro jednodušší pozorování se využívají endoskopy. Aby bylo možné pozorovat kmitání hlasivek, využíváme různé přístupy s různou technickou náročností.

K zobrazení iluzorních kmitů slouží strobolaryngoskopie (Sovák 1945, Hirano a Bless 1993, Švec 1996). Její princip je založen na využití nekontinuálního zdroje světla, který osvětluje hlasivky v záblescích s nastavitelnou frekvencí  $f_{\text{str}}$ . Je-li frekvence kmitání hlasivek  $f_{\text{km}}$ , frekvenci iluzorních kmitů  $f_{\text{il}}$  můžeme nadefinovat jako

$$f_{\text{il}} = f_{\text{km}} - f_{\text{str}}$$

Schématicky je princip stroboskopického osvětlení znázorněn na Obrázku 2.5. Pokud jsou kmity hlasivek stabilní, moduluje se frekvence stroboskopu podle frekvence kmitání hlasivek tak, aby iluzorní kmity měly frekvenci v rozmezí 1 - 2 Hz.



Obrázek 2.5: Princip využití stroboskopického osvětlení k pozorování kmitání hlasivek (Hirano a Bless 1993): A - Synchronizované záblesky stroboskopického světla, B - Osvětlení kmitů v různých fázích cyklu způsobuje iluzorní kmity s okem pozorovatelnou frekvencí

Metoda, která nám dává největší množství informací o kmitání hlasivek je vysokorychlostní videolaryngoskopie (Švec 1996). První vysokorychlostní kamery pro pozorování hlasivek vznikaly od 30. let minulého století a jejich vzorkovací frekvence se pohybovala okolo 1000 Hz (Farnsworth 1940). V dnešní době je díky rapidnímu

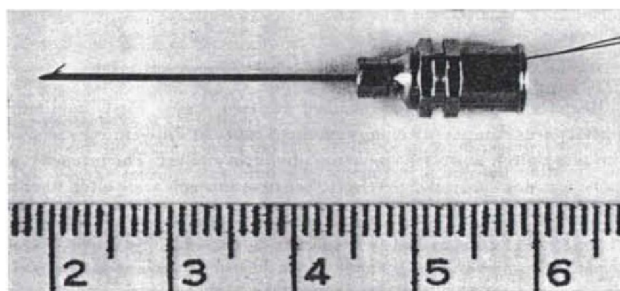


technickému vývoji umožněno konstruovat kamery s frekvencí několika tisíc snímků za vteřinu, proto tato metoda umožňuje velmi detailní studium kmitů hlasivek. Nevýhodou metody je vysoká cena kamery a taktéž výrazná časová náročnost zpracování dat.

Pro pozorování kmitů hlasivek s vysokou frekvencí, ale zároveň v reálném čase s nižšími náklady než u metody předchozí byla vyvinuta metoda videokymografie (VKG) (Švec a Schutte 1996). Princip metody spočívá ve sledování jednoho řádku hlasivky (kolmého k hlasivkové štěrbině) ve vysokorychlostním módu v čase. Původně metoda využívala speciálně upravenou kameru, která umožňovala pozorování celých hlasivek se standardní vzorkovací frekvencí (normální mód) a pozorování vybraného řádku s frekvencí téměř 8000 snímků za vteřinu (vysokorychlostní mód). Výhodou je, že získaná data jsou ve formě obrázku, který je jednodušší analyzovat. V dnešní době je taktéž možné kymografické snímky obdržet jak ze strobolaryngoskopického měření, tak i z vysokorychlostní laryngoskopie.

Hlasivky můžeme pozorovat i pomocí nelaryngoskopických metod (Švec 1996). Jako příklad můžeme uvést elektroglografii (EGG) (Fabre 1957). Při tomto vyšetření se na kůži na chrupavku štítnou přiloží dvě elektrody, které vytvářejí vysokofrekvenční pole s napětím přibližně 0,5 V. Jelikož hlasivky obsahují velké množství vody, jsou vodivé a můžeme tedy změnou elektrické impedance určit, kdy jsou hlasivky uzavřené či otevřené, případně jaká je v daném okamžiku kontaktní plocha.

Jak už bylo uvedeno, velký vliv na kmitání hlasivek má i aktivita vnitřních hrtanových svalů. Aby bylo možné sledovat tuto aktivitu při fonaci a tím i zjistit, které svaly jsou zodpovědné za různé typy fonací, využívá se metoda elektromyografie (EMG). Mezi první práce věnující se sledování aktivity svalů podílejících se na fonaci můžeme zařadit práce Hirana a kol. (1969, 1970), které se zaměřovaly, jak bude uvedeno dále, na aktivitu svalů při změně rejstříku, intenzity hlasu a základní frekvence. K získávání dat se využívaly bipolární drátkové elektrody (viz Obrázek 2.6, které byly zavedeny do studovaných svalů přes kůži na krku.



Obrázek 2.6: Bipolární drátková elektroda sloužící k elektromyografickému studiu vnitřních hrtanových svalů (Hirano a kol. 1970)

## 2.4 Vlastnosti hlasu, hlasové rejstříky

### 2.4.1 Vlastnosti hlasu

Při analýze akustických vlastností hlasu, můžeme rozlišovat různé zvukové parametry (Titze 2000). Základní frekvenci  $f_0$  subjektivně vnímáme jako výšku tónu, intenzitu zase jako hlasitost a dále můžeme nadefinovat kvalitu hlasu. Pod tento poměrně nejednoznačný pojem můžeme zahrnout vlastnosti související s charakteristikami jakými jsou dyšnost, hrubost, chraplavost apod., anebo právě hlasové rejstříky.

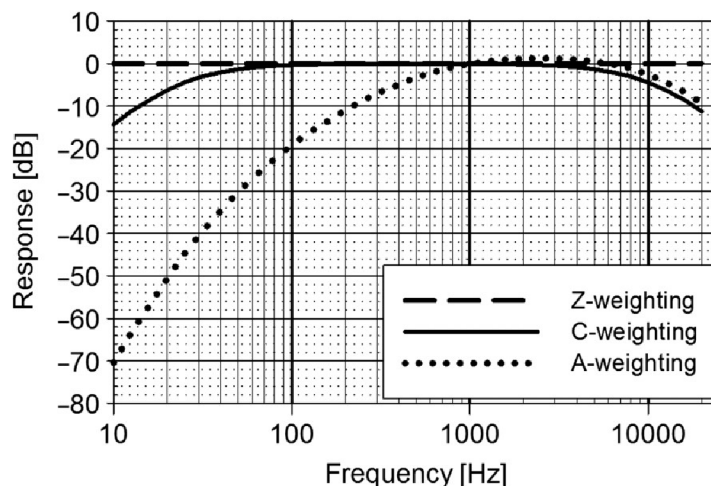
Fyzikální popis subjektivní hlasitosti pomocí intenzity (tedy výkonu zvuku na jednotkovou plochu) je poměrně nevýhodné pro porovnávání různých zvuků. Proto existují fyzikální veličiny, se kterými lze pracovat lépe, a to hladina akustické intenzity SIL a hladina akustického tlaku SPL. V této práci nám bude stačit nadefinování SPL podle vztahu:

$$\text{SPL} = 20 \log \frac{p}{p_0}, \quad (2.1)$$

kde  $p$  označuje akustický tlak změřeného zvuku a  $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$  je referenční hodnota akustického tlaku definovaná pro práh slyšení. Jednotkou SPL i SIL je decibel (dB). Jelikož hodnoty SPL závisí na vzdálenosti, ve které byly měřeny, je potřeba tento údaj uvádět spolu se změřenou hodnotou.

Jelikož hlasitost vnímáme primárně pomocí sluchu, je přirozeným detektorem lidské ucho, jehož výsledný vjem hlasitosti je frekvenčně závislý (Švec a Granqvist 2018). Pro měření SPL byly vyvinuty různé metody, jakým způsobem vážit zvuk detekovaný pomocí přístrojů. Existují tzv. frekvenční vážení, jejichž charakteristiku

vidíme na Obrázku 2.7, a která rozdělujeme na Z-vážení nepotlačující žádnou frekvenční oblast, C-vážení, které se chová podobně jako Z-vážení v oblastech základní frekvence hlasu (100 Hz - 4000 Hz), ale potlačuje velmi nízké (šumové) a velmi vysoké frekvence, a konečně A-vážení, které stejně jako lidské ucho mírně zesiluje frekvence v oblasti 1-5 kHz a naopak výrazně potlačuje nižší i vyšší frekvence.



Obrázek 2.7: Standardní frekvenční vážení pro měření SPL (Švec a Granqvist 2018)

Kromě vážení frekvenčního ještě existuje časové vážení. To určuje rychlost odpovědi na změnu SPL. Pro stabilní signály používáme pomalé S-vážení s časovou konstantou 1 s, zatímco pro signály, u nichž chceme zaznamenat změny v čase, využíváme časové F-vážení rychlé s časovou konstantou 0,125 s.

## 2.4.2 Hlasové rejstříky

Titze (2000) uvádí, že hlasové rejstříky lze charakterizovat jako soubor tónů stejné hlasové kvality, která je udržitelná při různých rozsazích výšky a hlasitosti. Již tato definice naznačuje, že jednotlivé hlasové rejstříky budou úzce vázané na frekvenční a intenzitní rozsahy, ačkoli jak už uvedl Hollien (1974), jde zejména o změny odehrávající se v hrtanu. Problematika hlasových rejstříků je velmi složitá a v různých zdrojích se pracuje s různými počty a různými názvy jednotlivých hlasových rejstříků. V nejjednodušším případě rozdělujeme mluvní rejstříky na pulzní, modální a falzet, u zpěvu používáme termíny hrudní, hlavový a falzet a u ženských hlasů se můžeme setkat s pojmy hrudní, střední a hlavový (Švec 1996).

Podle Holliena (1974) se 3 základní hlasové rejstříky odlišují akusticky, fyziologicky a na základě aerodynamických vlastností zvuku a zároveň je jsme schopni

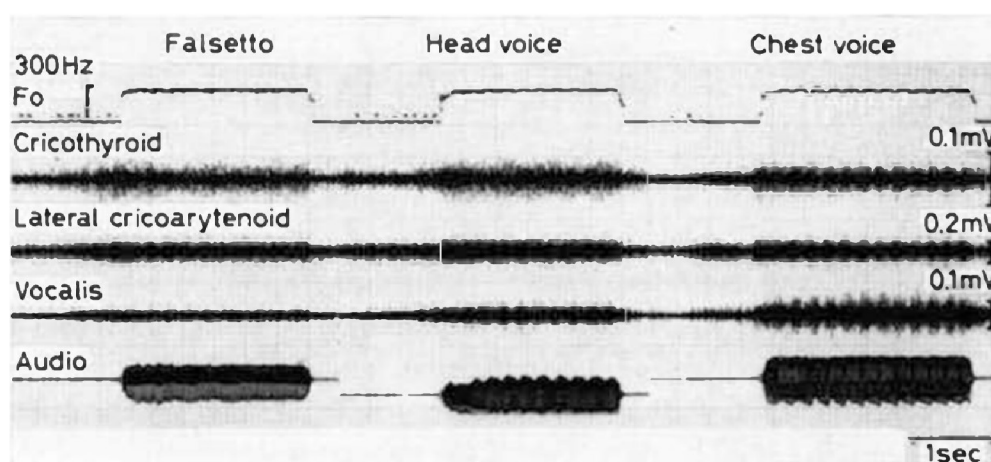
rozlišit subjektivně. Akustické rozdíly se váží na základní frekvenci, kde jsou jednotlivé rejstříky využívány: pulzní rejstřík pro oblast jednotek až desítek Herzů, modální v oblasti přirozené fonace a falzet u vysokých frekvencí. Dále se odlišují v intenzitě a to především v maximální intenzitě, která je zpravidla mnohem vyšší pro modální rejstřík než pro falzet (ačkoli si autor uvědomuje složitost problému vzhledem k frekvenční závislosti). Posledním akustickým rozdílem je přítomnost většího množství vyšších harmonických frekvencí u modálního rejstříku v porovnání s falzetem.

Mezi fyziologické korelace počítá změnu délky, tloušťky hlasivek a charakter vibrací odlišující se pro různé hlasové rejstříky (Hollien 1974). Ačkoli u modálního rejstříku závisí délka přímo úměrně a tloušťka nepřímo úměrně na frekvenci, u pulzního rejstříku a falzetu frekvenční závislost nepozorujeme. Hlasivky jsou v porovnání s modálním rejstříkem kratší a výrazně tlustší při produkci pulzního rejstříku, při kterém jsou s hlasivkami někdy v kontaktu navíc ještě ventrikulární řasy, naopak jsou delší a užší při falzetu. Při kmitání hlasivek v pulzním rejstříku dochází k rychlému otevírání a zavírání hlasivek a dlouhé době uzavření, u modálního potom dochází k rychlému otevření, pomalejšímu uzavírání a různě dlouhému uzavření hlasivek. Konečně u falzetu se redukuje plocha hlasivkové štěrbiny, amplituda je menší a nedochází ke kompletní addukci hlasivek. Co se týká aerodynamických rozdílů, autoři uvádějí, že nejvýrazněji se s frekvencí mění subglottický tlak, který je pravděpodobně nejvyšší pro pulzní rejstřík, postupně klesá a při falzetu zřejmě dosahuje nejnižších hodnot.

Přechody mezi jednotlivými hlasovými rejstříky mohou být volní nebo nechtěné a ve většině případů jsou tyto přechody doprovázeny prudkou fyziologickou nebo akustickou změnou (Titze 2000). V případě nechtěných rejstříkových přechodů, ke kterým dochází nejčastěji v pubertě (častěji u chlapců), jde o změny způsobené změnou aktivity TA svalu, způsobující změnu napětí, která vyústí právě v přeskok hlasu. Dále může k nechtěnému přechodu mezi rejstříky docházet i bez zjevné příčiny při spojitém zvyšování základní frekvence v důsledku tzv. bifurkací (Švec a kol. 1999). Důvodem přítomnosti těchto nelineárních jevů je skutečnost, že zdroj hlasu tvoří nelineární systém. Původní teorie předpokládaly, že na nechtěné změny rejstříku má vliv taktéž subglottální rezonance, ovšem např. práce Lehouxe a kol. (2023), kteří porovnávali rejstříkové přeskoky na hrtanech bez a se subglottální rezonancí, dokázala, že k přeskokům dochází i v případě, kdy je subglottální rezonance odstraněna.

Mezi faktory, které ovlivňují výsledný hlasový rejstřík, patří především nastavení hlasivek a charakter kmitů, které souvisí s uzavřením hlasivek, jejich tloušťkou, rozsahem slizniční vlny a napětím různých svalů (především TA a CT); ale dále také rezonance vokálního traktu a rezonance dutin (Švec 1996).

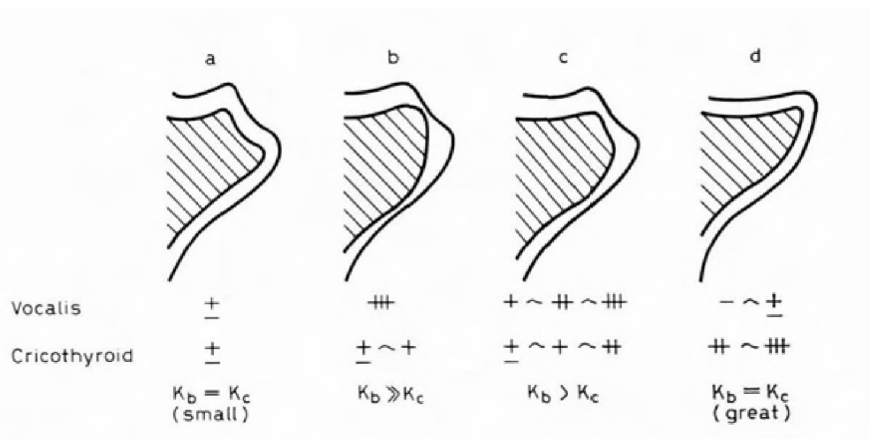
Svalovou aktivitu při produkci různých rejstříků (hrudního, středního a hlavového) studovali Hirano a kol. (1970) pomocí elektromyografie (viz Obrázek 2.8). Zjistili, že u produkce těžších rejstříků (hrudní, střední) výrazně vzrůstá aktivita VOC svalu a o něco méně roste aktivita LCA svalu. Naopak pro CT sval, který by měl v těchto případech fungovat jako antagonist a VOC svalu, nebyla změna aktivity při produkci různých rejstříků pozorována.



Obrázek 2.8: Aktivita vnějšího napínače hlasivkového (cricothyroid), cricoarytenoidního laterálního svalu a musculus vocalis pro různé rejstříky (Hirano 1970)

Při studiu morfologické struktury hlasivek bylo zjištěno, že během produkce modálního rejstříku a falzetu můžeme pozorovat různé fyziologické variace postavení těla vůči obalu hlasivky v závislosti na aktivitě VOC a CT svalu (Hirano 1974). Uspořádání a - c (viz Obrázek 2.9) jsou charakteristická pro modální rejstřík, uspořádání d je charakteristické pro hlasivku produkující falzetový rejstřík. Typ a je charakteristický pro tichou fonaci na nízkých frekvencích, při které zaznamenáváme minimální aktivitu obou svalů, napětí těla i obalu hlasivky jsou malé a hlasivka je tedy velmi flexibilní a může se lehce deformovat. V případě b dochází k zvýšení aktivity VOC, tuhost těla roste, avšak obal je stále velmi volný. Tato konfigurace je typická pro hlasité fonace ve středu hlasového rozsahu. Typ c se nachází mezi typem a a b, dochází tedy k deformaci těla i obalu. Při produkci falzetu má hlasivka morfologickou strukturu odpovídající konfiguraci d. V tomto případě je VOC neaktivní,

zato narůstá aktivita CT svalu, což způsobuje pasivní napětí těla i obalu hlasivky, které zapříčiňuje omezení slizniční vlny.



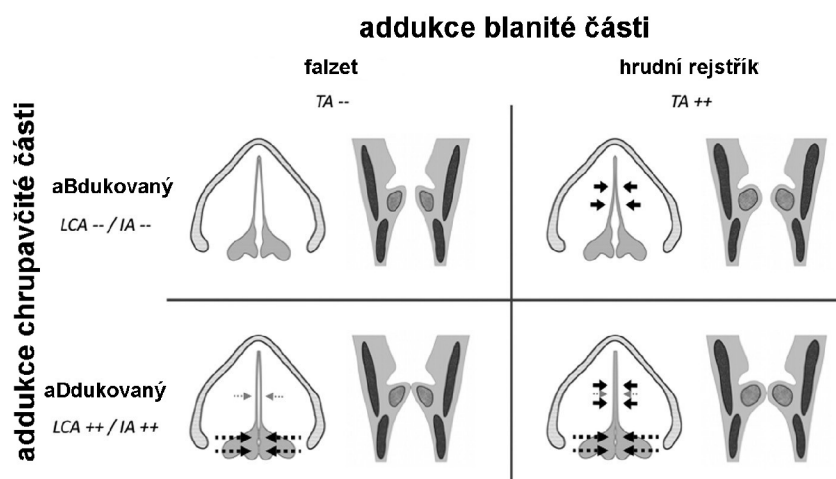
Obrázek 2.9: Typická uspořádání vnitřní morfologické struktury hlasivek při produkci modálního rejstříku a falzetu v závislosti na aktivitě VOC a CT svalů,  $K_b$  - elastická konstanta těla hlasivky,  $K_c$  - elastická konstanta obalu hlasivky (Hirano 1974)

Hiranův experiment se pokusili ověřit Vahabzadeh-Hagh a kol. (2018) *in vivo* pomocí psích preparátů hrtanu. Zjistili, že při produkci hlasu při konfiguraci původně ozn. a je tvar hlasivky konvergentní, v typech b a c dochází k addukci a u typu d je hlasivka mírně abdukovaná.

### 2.4.3 Základní konfigurace glottis při zpěvu

Ch. Herbst a kol. (2009, 2011) ve své práci určili, že při zpěvu jsou možné 4 jasně odlišitelné konfigurace glottis, které odpovídají různým hlasovým kvalitám. V rámci těchto konfigurací rozlišujeme, zda dochází k addukci blanité části glottis (rozdíl mezi hrudním rejstříkem a falzetem) nebo k addukci chrupavčité části (určuje, zda je hlas dyšný nebo ne). Tyto konfigurace označil FaB - naivní = abdukovaný falzet, FaD - kontratenorový = addukovaný falzet, CaB - lyrický, neboli abdukovaný hrudní rejstřík a CaD - plný = addukovaný hrudní rejstřík. Schéma představy o vzhledu hlasivek při jednotlivých fonacích je na Obrázku 2.10.

Autoři práce nejdříve studovali jednotlivé typy fonací pouze na jednom subjektu, v pozdější práci potom rozšířili analýzu o dalších 13 subjektů. Ověřili, že při přechodu z FaB na FaD dochází k addukci chrupavčité i blanité části, z FaB na CaB pouze k addukci blanité části a z FaB na CaD k nárůstu doby uzavření blanité i chrupavčité části. Při změně fonace z FaD na CaB uzavření chrupavčité části klesá (doba uzavření části blanité není rozhodující) a z FaD na CaD roste především doba



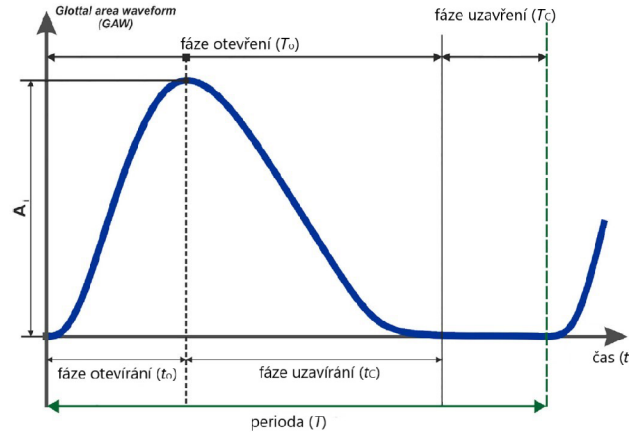
Obrázek 2.10: Schéma 4 konfigurací glottis, které vznikají různou addukcí membránové a chrupavčité části glottis (Herbst a kol. 2011, upraveno)

uzavření blanité části, protože plné addukce chrupavčité části je dosaženo v obou případech. Při přechodu z CaB na CaD roste taktéž doba uzavření chrupavčité i blanité části. S addukcí chrupavčité části souvisí i skutečnost, že v případě FaB a CaB je chrupavčitá část volná a může kmitat, zatímco v případě FaD a CaD je chrupavčitá část spíše uzavřena, což brání v jejím kmitání. Z experimentu obecně vyplývá, že doba uzávěru roste při přechodu z falzetu do hrudního rejstříku, v případě rozdílu této doby mezi FaD a CaB je tento rozdíl menší a u některých subjektů ani nebyl pozorován. Tento efekt je pravděpodobně způsoben zvýšením aktivity svalu VOC. Co se týče slizniční vlny, v první práci je naznačeno, že při falzetu je slizniční vlna málo výrazná, u CaB má střední rozsah a u CaD je výrazná. V druhé práci je její efekt vyjádřen pomocí vertikálního fázového rozdílu a ostrosti laterálních vrcholů, který naznačuje, že se hrany zostřují při přechodu z falzetu do hrudního rejstříku.

## 2.5 Parametry kmitání hlasivek

Pokud chceme kmitání hlasivek objektivně zparametrizovat, je třeba si nejdříve rozdělit jednu periodu kmitání na jednotlivé fáze. Schéma jednoho cyklu je na Obrázku 2.11 (Schlegel a kol. 2018). Hlasivka se nejdříve otevírá a tato fáze otevírání má dobu trvání  $T_{og}$ , poté, co hlasivka dosáhne maximální amplitudy, se začne zavírat, doba uzavírání je  $T_{cg}$  (Švec 1996, Štanclová 2021). Dobu, kdy je hlasivka otevřená a která zahrnuje fázi otevírání a zavírání, nazýváme fází otevření s dobou trvání  $T_O$ .

Ve zbytku cyklu je hlasivka uzavřená, trvání fáze uzavření označíme  $T_C$ . Celková doba trvání jednoho cyklu, perioda, je označena  $T$ .



Obrázek 2.11: Perioda kmitání hlasivek rozdělená na jednotlivé fáze pro odvození parametrů kmitání hlasivek (Schlegel a kol. 2018, upraveno)

Z takto nadefinovaných časů můžeme určit různé parametry kmitání hlasivek, jako například kvocient otevření (z angl. open quotient)  $Q_O$ , případně kvocient uzavření (z angl. closed quotient)  $Q_C$  podle následujících vztahů:

$$Q_O = \frac{T_O}{T}, \quad (2.2)$$

$$Q_C = \frac{T_C}{T}. \quad (2.3)$$

Tyto dva kvocienty jsou na sobě logicky vzájemně převoditelné, jelikož  $T_O + T_C = T$ , a tedy  $Q_O + Q_C = 1$ .

Obdobným způsobem můžeme nadefinovat kvocient otevírání (z angl. opening quotient)  $Q_{og}$  a uzavírání (z angl. closing quotient)  $Q_{cg}$  podle vztahů

$$Q_{og} = \frac{T_{og}}{T}, \quad (2.4)$$

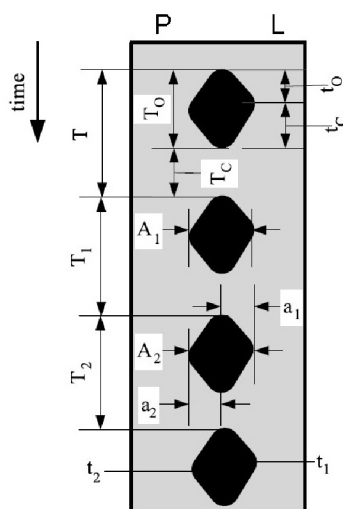
$$Q_{cg} = \frac{T_{cg}}{T}. \quad (2.5)$$



Vzájemný vztah  $T_{og}$  a  $T_{cg}$  vyjadřuje kvocient zkosení, nazývaný taktéž kvocient rychlosti (z angl. speed, příp. skewing quotient)  $Q_S$ :

$$Q_S = \frac{T_{og}}{T_{cg}}. \quad (2.6)$$

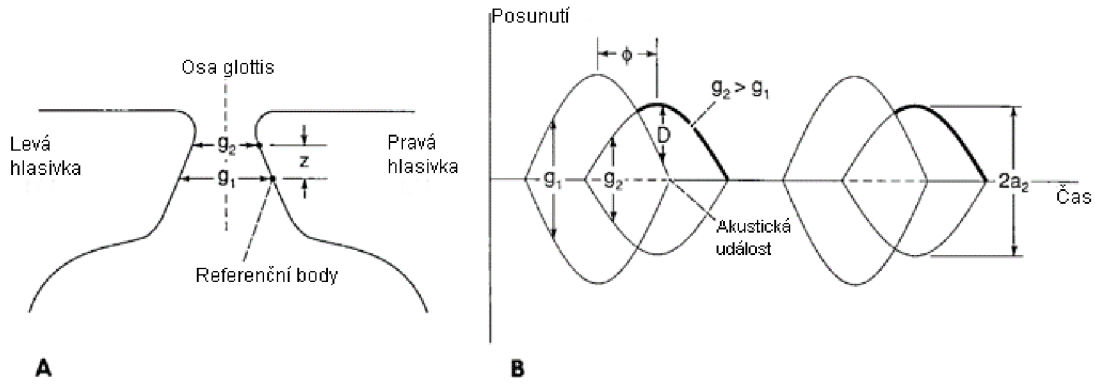
Dobu trvání jednotlivých fází není nutné počítat pouze ze záznamu celé hlasivky, jak je ukázáno na Obrázku 2.12, velmi snadno je lze i získat i z kymografických snímků (Qiu a kol. 2003). V tomto případě je pouze nutné, aby porovnávané hodnoty pocházely ze stejné oblasti hlasivek (např. zestrědu blanité části), jak ukázal např. Yokonoshi a kol. (2016).



Obrázek 2.12: Určení doby trvání jednotlivých fází kmitání hlasivek z kymografického snímku (Qiu a kol. 2003, upraveno)

Jak už bylo řečeno dříve, horní a dolní okraje hlasivky jsou vůči sobě fázově posunuty a tvoří základ slizniční vlny. Parametr, který s ní souvisí a částečně ji popisuje je vertikální fázový rozdíl VPD (z angl. vertical phase difference) (Titze a kol. 1993). Pro jeho definici si umístíme bod  $g_1$  na spodní okraj hlasivky a bod  $g_2$  na okraj horní (viz Obrázek 2.13). Popis každého z těchto dvou bodů se dá aproximovat harmonickými funkcemi, které budou vůči sobě fázově posunuté. Fázový rozdíl bude odpovídat právě VPD.

VPD lze získat při laryngoskopickém pozorování kmitů hlasivek následujícím způsobem (Jiang a kol. 2008). Jelikož z myoelasticko-aerodynamické teorie vyplývá, že k otevírání dochází od dolního okraje k hornímu, při pohybu laterálním (otevíracím) pozorujeme pohyb horního okraje (spodní okraj je při otevírání v zákrytu),



Obrázek 2.13: Definice vertikálního fázového rozdílu (Titze a kol. 1993, upraveno)

naopak při uzavírání (mediální pohyb) pozorujeme pohyb okraje dolního. V případě kymografických záznamů určíme VPD přibližně sledováním ostrosti laterálního okraje hlasivek, která je VPD přímo úměrná (Švec 2019, Kumar a kol. 2020).

Při práci s kvocienty uzavření a uzavírání se často můžeme setkat s tím, že dochází k nepřesnému určení momentu uzavření hlasivky (Alku a kol. 2002). Tento problém byl obejit nadefinováním normalizovaného kvocientu amplitud NAQ (z angl. normalized amplitude quotient), který zahrnuje ve výpočtech amplitudu pulzu průtočného množství vzduchu během periody kmitů  $f_{ac}$  a negativní amplitudu derivace průtočného množství vzduchu  $d_{peak}$  a také periodu kmitání  $T$ :

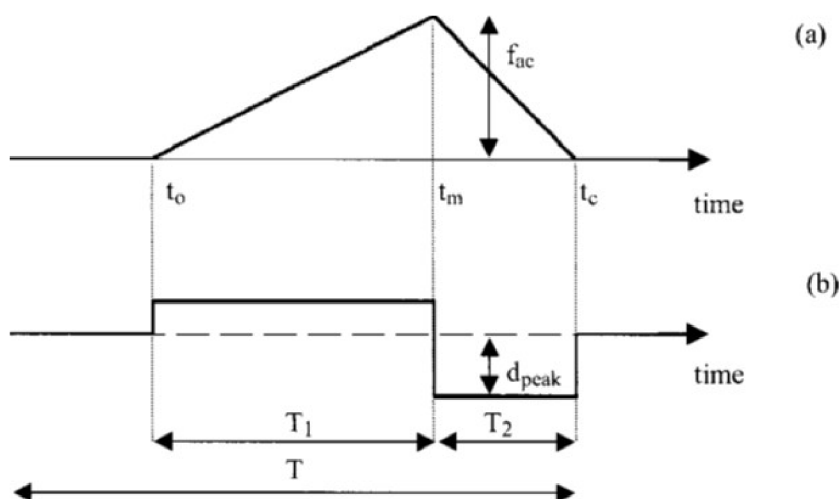
$$NAQ = \frac{f_{ac}}{d_{peak} \cdot T}. \quad (2.7)$$

K definici NAQ byl použit trojúhelníkový signál pulzu (viz Obrázek 2.14), pro který je jeho hodnota stejná jako pro  $Q_{cg}$ . Pro reálné tvary pulzů už se jejich hodnoty odlišují a kromě toho, že NAQ lépe charakterizuje signály, u kterých je přítomen vysoký šum, jeho výhoda spočívá také v uvažování periody signálu.

Pokud chceme získat NAQ z obrazových dat, můžeme využívat k výpočtu vztah upravený do podoby (Lehoux a kol 2022, Schlegel a kol. 2019)

$$NAQ = \frac{\text{amplituda}}{(\text{rychlost uzavírání}) \cdot T}, \quad (2.8)$$

kde rychlost uzavírání je určena první derivací průběhu uzavírání hlasivky. Amplitudu lze získat z kymogramu, nebo jako v případě Lehoux a kol. (2022) z GAW (z angl. glottal area waveform), tedy z tvaru vlny plochy glottis, kde amplitudu můžeme vyjádřit jako rozdíl jejího maxima a minima.



Obrázek 2.14: Definice normalizovaného kvocientu amplitud na signálu s trojúhelníkovým průběhem (Alku a kol. 2002)

## 2.6 Využití parametrů kmitání hlasivek v literatuře

### 2.6.1 Parametrizace kmitů při studiu hlasových rejstříků

Ve většině prací se autoři snaží popisovat kmitání hlasivek při změně rejstříků pouze pomocí kvalitativních charakteristik na základě vzhledu, případně využívají jiných než laryngoskopických metod a tedy nedochází k pozorování samotných kmitů.

Parametrizací rozdílů se zabývali Alku a Vilkmán (1996), kteří studovali mimo jiné i to, jak se liší parametry  $Q_O$ ,  $Q_S$  a  $Q_{cg}$  (v jejich práci označovaných jinak) při fonaci dyšné, normální a tlačené. Autoři zvláště vyšetřovali ženské a mužské subjekty a zjistili, že ačkoli hodnoty změn se v závislosti na pohlaví odlišovaly, trend vývoje parametrů byl obdobný. Výsledek jejich práce naznačuje, že při přechodu z dyšné fonace na normální a z normální na tlačnou dochází k růstu jak  $Q_O$ , tak  $Q_{cg}$ , velký pokles  $Q_S$  nastává při přechodu z dyšné fonace na normální, ale při přechodu z normální fonace na fonaci tlačnou už je tento pokles minimální. Nejlepším parametrem hodnotícím změnu fonace je podle nich právě  $Q_{cg}$ .

Porovnáváním hrudního a hlavového rejstříku pomocí parametrů kmitání hlasivek se taktéž zabýval Lehoux a kol. (2022). Studie byla založena na analýze hlasu profesionální zpěvačky Lisy Popeil, která je schopná fonovat v hrudním i hlavovém rejstříku v rámci celého svého hlasového rozsahu tří oktáv. Vizuálně bylo určeno, že při fonaci v hlavovém rejstříku u nižších frekvencí využívá autorka výraznější addukce ventrikulárních řas, zároveň je doba i plocha uzávěru v hlavovém rejstříku

menší. Taktéž byl pozorován různý vibrační vzor, kdy při fonaci v hrudním rejstříku se hlasivky uzavíraly v celku (obdélníkový tvar), zatímco v hlavovém rejstříku se hlasivky uzavíraly převážně ve střední části (tvar přesípacích hodin) a u některých frekvencí se při kmitání vyskytovala trvalá posteriorní i anteriorní štěrbin.

Co se týče kvantitativních parametrů, využívali autoři  $Q_C$ ,  $Q_{cg}$ ,  $Q_S$ , NAQ i VPD. Rozdíly těchto kvocientů pro fonaci v hrudním a hlavovém rejstříku se odlišovaly především v závislosti na frekvenci hlasu. Nejméně jasné rozdíly byly pozorovány ve středu hlasového rozsahu, kde se nachází přirozený rejstříkový přechod. V této oblasti byly dva typy fonace jasně odlišeny pouze na základě parametrů NAQ a  $Q_{cg}$ , pro ostatní parametry byly hodnoty v oblasti středu hlasového rozsahu velmi podobné pro oba typy fonace. Mimo tuto oblast autoři pozorovali pro fonaci v hrudním rejstříku vyšší  $Q_C$ , nižší NAQ a  $Q_{cg}$  a vyšší VPD. Hodnoty  $Q_S$  byly odlišné pro pravou a levou hlasivku, hodnoty byly taktéž výrazně závislé na základní frekvenci oscilací. Zajímavým pozorovaným fenoménem byl fakt, že při fonaci na frekvencích před přechodem do střední oblasti došlo ke změně addukce chrupavky - v hrudním rejstříku byla chrupavčitá část abdukována a v hlavovém addukována. Tento mechanismus byl pravděpodobně aplikován zpěvačkou proto, aby došlo k vyrovnání hlasové kvality.

## 2.6.2 Parametrizace kmitů při studiu intenzity hlasu

Problematikou využití parametrů pro popis kmitání hlasivek se zabývala autorka této diplomové práce už ve své bakalářské práci (Štanclová 2021). Tato práce studovala, jak se jednotlivé parametry mění s rostoucí SPL hlasu v závislosti na základní frekvenci. Už tam bylo potřeba se zamyslet, zdali hodnoty některých parametrů nezávisely na hlasovém rejstříku, jelikož fonace na nižších frekvencích byly provedeny v rejstříku hrudním a fonace na vyšších frekvencích vyžadovaly zapojení rejstříku hlavového.

Bylo změřeno, že s rostoucí intenzitou hlasu dochází ke zvyšování amplitudy, což souhlasilo s pracemi Woo (1996), Hirana (2009) a Švece (2019), a hodnoty byly závislé na  $f_o$ . Kvocient otevření  $Q_O$ , stejně jako u dalších autorů (Timcke a kol. 1958, Fex a kol. 1991, Woo 1996, Hirano 2009, Yokonoshi a kol. 2016, Švec 2019) pro většinu fonací klesal, tyto hodnoty ovšem nebyly frekvenčně závislé, tedy v daném případě nebyla pozorována výrazná závislost na rejstříku. Co se týče kvocientů

souvisejících s rychlostí otevírání a uzavírání hlasivek, bylo pozorováno, že kvocient otevírání i uzavírání spíše klesal,  $Q_{og}$  bez frekvenční závislosti,  $Q_{cg}$  mírně vzrůstal s rostoucí frekvencí fonace. V důsledku podobných trendů  $Q_{og}$  a  $Q_{cg}$  nebyla během měření zjištěna výrazná závislost  $Q_S$  na intenzitě hlasu. Pokles s rostoucí intenzitou byl pozorován i u NAQ, což souhlasilo s předpokladem, že chování NAQ a  $Q_{cg}$  je obdobné, stejně jako to naznačili i Alku a kol. (2002) a Vilkman a kol. (2002). S rostoucí frekvencí hodnoty maxima NAQ vzrůstaly. Konečně daná práce studovala i VPD. Pro tento kvocient nebyl pozorován žádný jednoznačný trend. Naopak v pracích jiných autorů (Woo 1996, Hirano 2009, Švec 2019) byl pozorován nárůst VPD s rostoucí intenzitou, ale jak bylo uvedeno, důvodem mohlo být vysoké napětí hlasivky při vyšších fonacích, které způsobuje výrazné zúžení hlasivky.

V této práci byla pozorována zajímavá fonace na frekvenci okolo 330 Hz. Jak bylo uvedeno, fonace probíhala i přes relativně nízkou frekvenci již v hlavovém rejstříku. Právě tato skutečnost by mohla způsobit, že pro danou fonaci byl pozorován opačný trend závislosti  $Q_O$ ,  $Q_{og}$ ,  $Q_{cg}$  a NAQ v závislosti na SPL než u ostatních fonací.

# Cíl práce

Jako cíl práce jsme si vytyčili navázat na studie Herbsta a kol. (2009, 2011), kteří nedefinovali čtyři konfigurace glottis (abdukovaný falzet, addukovaný falzet, abdukovaný hrudní rejstřík a addukovaný hrudní rejstřík) charakteristické pro čtyři hlasové kvality při zpěvu a snažil se je primárně kvalitativně popsat. Naším úkolem bude popsat tyto typy především kvantitativně pomocí různých parametrů kmitání hlasivek a pokusíme se nalézt parametry, které budou odrážet právě změny mezi konfiguracemi glottis.

K analýze budou využita data subjektů, které zaznamenali autoři původních studií pomocí videokymografické kamery druhé generace. Zároveň stejné hlasové úkoly zaznamenáme na dalších subjektech pomocí vysokorychlostní videolaryngoskopie a kymografické snímky, sloužící k následné analýze, z nich získáme.

# Materiál a metody

## 4.1 Data k analýze

### 4.1.1 Původní experiment

Jelikož práce navazuje na předchozí výzkum Herbst a kol. (2009, 2011), data použitá k analýze pocházela právě z jejich experimentů.

Subjekty, které se výzkumu zúčastnily, musely vyprodukovat fonace, které vyhovovaly kritériím 4 fonačních typů: typ A - abdukovaný falzet (FaB), typ B - addukovaný falzet (FaD), typ C - abdukovaný hrudní rejstřík (CaB) a typ D - addukovaný hrudní rejstřík (CaD) (viz 2 Přehled problematiky).

Původního experimentu se zúčastnilo 6 ženských a 7 mužských subjektů s různými pěveckými zkušenostmi, kteří se pokusili napodobit kvalitu jednotlivých typů fonace pod dohledem autora experimentu. Informace o jednotlivých subjektech jsou zaznamenány v Tabulce 4.1. Frekvence fonace byla určena na základě oblasti rejstříkového přechodu každého subjektu tak, aby tato frekvence byla přibližně stejná pro všechny fonační typy. Jelikož se rejstříky silně vážou k frekvenci fonace, došlo v případě potřeby k tvorbě určitého typu fonace v pohodlnější poloze a dosažení kýžené frekvence jejím postupným zvyšováním (pro hrudní rejstříky) či snižováním (pro falzet).

Během jednotlivých měření byl pořízen audio záznam, videokymogram, a dále videolaryngoskopický a videostrobolaryngoskopický záznam. Zároveň byla zaznamenávána relativní kontaktní plocha hlasivek během kmitů pomocí elektroglografie (EGG). Zvuk byl nahráván pomocí mikrofону připevněného k hlavě přibližně ve vzdálenosti 7 cm od úst subjektu (Herbst a kol. 2011). Pro získání videosnímků hlasivek byl využíván rigidní 90° laryngoskop a pro videokymografická (VKG) data

Tabulka 4.1: Informace o subjektech účastnících se experimentu. VKG - videokymografie, HSVL - vysokorychlostní laryngoskopie

Subjekt č.	Iniciály	Věk	Pohlaví	Typ zpěvního hlasu (roky)	Hlasová průprava	Metoda pozorování
1	DM	73	m	bas	45	VKG
2	HL	32	m	tenor	6	HSV L
3	HM	35	ž	mezzosoprán	0	VKG
4	HS	63	m	tenor	1	VKG
5	CH	35	m	baryton	10	VKG
6	JS	39	m	baryton	0	VKG
7	KP	26	ž	-	0	VKG
8	MD	25	m	baryton	7	VKG
9	ME	58	ž	mezzosoprán	8	VKG
10	MK	25	m	baryton	0	VKG
11	MM	56	ž	alt	24	VKG
12	QQ	32	m	-	0	VKG
13	RW	33	ž	soprán	15	VKG
14	WB	53	ž	mezzosoprán	15	VKG
15	ZS	23	ž	soprán	10	HSV L

byla využita VKG kamera druhé generace, která vytvářela snímky zobrazující 40 ms kmitání (Qiu a Schutte 2006, 2007).

#### 4.1.2 Doplnění datového souboru

Pro doplnění a zároveň pro lepší pochopení experimentu proběhlo ještě měření na dalších dvou subjektech: na autorce této práce a na subjektu HL. Po nalezení zóny rejstříkového přechodu byly provedeny postupně všechny fonace potřebné k analýze. Pro fonační typy FaB a FaD fonace začínala na vyšší frekvenci a frekvence rejstříkového přechodu bylo dosaženo postupným snižováním, naopak pro dosažení fonačních typů CaB a CaD byla využívána fonace vzestupná. U všech fonací byla snaha, aby jejich intenzita nebyla výrazně odlišná, tedy aby případné změny charakteru kmitání byly dány pouze změnou konfigurace glottis a ne změnou intenzity.

K měření byl využíván 90° rigidní Lupen-laryngoskop (8707 DA KARL STORZ, 10 mm) a záznam probíhal pomocí vysokorychlostní kamery (FASTCAM Mini AX100 54 s paměti 16 GB, snímkovací frekvencí 7200 fps a rozlišením 384×576 px). Záro-



veň s obrazem byl snímán i zvuk pomocí mikrofonu (ISOMAX 2 O, Countryman Associates) umístěného na kameře, jež byl ve vzdálenosti 19 cm od úst subjektu ZS a 18 cm od úst subjektu HL. Tyto vzdálenosti byly určeny z fotek (viz Obrázek 4.1). Jelikož víme, že mikrofon je od laryngoskopu vertikálně vzdálen 6,6 cm, tato vzdálenost sloužila jako kalibrační a vzdálenost mikrofonu od úst byla určena pomocí poměrů délek úseček díky <https://eleif.net/photomeasure>. Pro zajímavost jsme také ověřili, že vzdálenost kamery od konce endoskopu horizontálně byla 28,4 cm, v obrázku tedy můžeme vidět, jak hluboko byla přibližně kamera zasunuta. Konečně jsme také měřili EGG signál.



Obrázek 4.1: Určení vzdálenosti mikrofonu od úst z známých vzdáleností.

Všechny signály byly zaznamenávány současně a aby bylo možné určit na signálu z mikrofonu a EGG počátek zaznamenané fonace, vysílala vysokorychlostní kamera synchronizační signál. K záznamu zvuku, EGG a synchronizačního signálu došlo pomocí profesionální zvukové karty (Fireface 400, RME Germany) a softwaru Audacity.

## 4.2 Výběr dat

Aby bylo dosaženo co nejpřesnějších výsledků, probíhalo měření jednotlivých fonačních typů pro daný subjekt vždy několikrát. Pro samotnou analýzu bylo poté třeba vybrat, která fonace byla nejlépe vyhovující. Velkou výhodou byla ta skutečnost, že autoři původní studie (Herbst a kol. 2011) již pro většinu fonací výběr provedli (kritéria výběru lze nalézt v původní práci). Jedině pro fonační typy CaB

a CaD subjektu JS nebyl výběr proveden a proto bylo třeba jej provést. Fonace k analýze byly nakonec vybrány podle nejstabilnější frekvence a intenzity tak, aby právě tyto parametry neovlivnily výsledky analýzy.

U dat zaznamenaných dodatečně probíhal výběr na základě kvality pořízeného videa, podle kvality produkované fonace (částečně už hodnocení probíhalo během měření), případně podle množství nežádoucího hlenu na hlasivkách, který může výrazně ovlivnit analýzu kmitů.

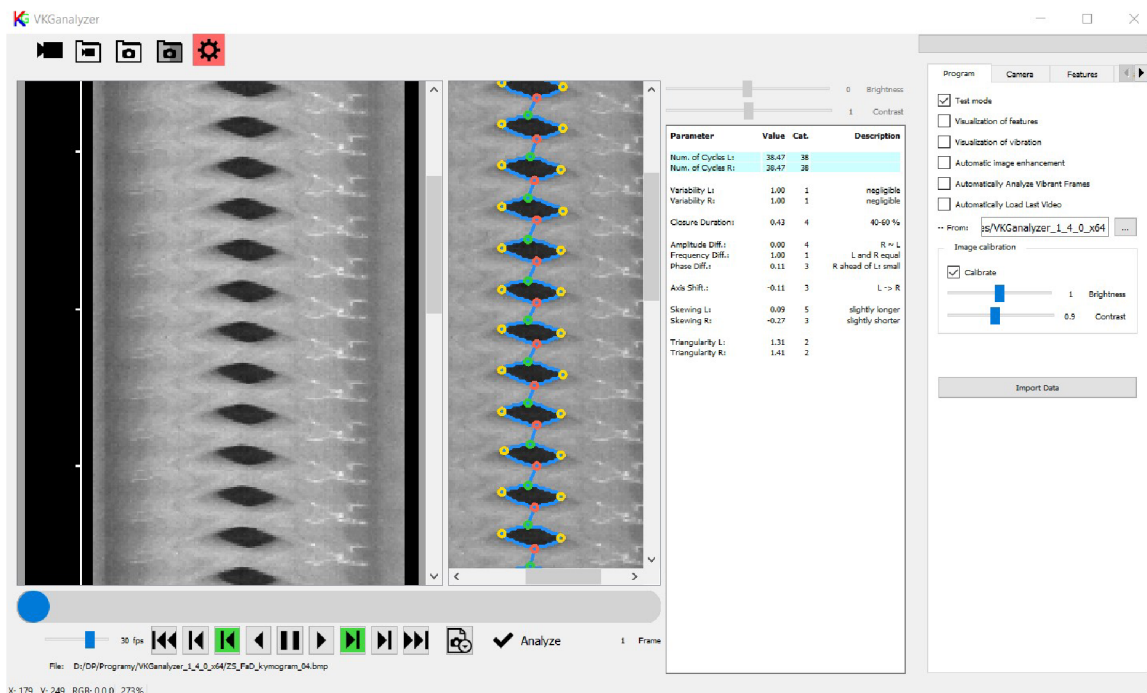
Z videí pořízených vysokofrekvenční kamerou bylo potřeba vygenerovat kymogramy. K tomu byl využit software ImageJ a skript Ch. Herbsta CogBioCreate-Kymogram (2021). Řádek, ze kterého se kymogram vytvářel, byl volen přibližně v polovině blanité části glottis tak, aby k ní byl kolmý a aby byla zahrnuta celá šířka hlasivek. Výsledné kymogramy měly dobu trvání 100 ms.

U celého souboru dat byly pro každý typ fonace pro daný subjekt dále vybrány 3 reprezentativní kymografické snímky k analýze. Požadavky pro tyto kymogramy byly především a) základní frekvence odpovídající rejstříkovému přechodu, b) stabilní SPL v rámci reprezentativního intervalu a c) pozice kymografického řádku co nejbližší středu blanité části hlasivky, který musel být ideálně kolmý k hlasivkové šterbině (glottis), aby nedošlo k výraznému zkreslení výsledků v důsledku případně vzniklé pravolevé asymetrie.

### 4.3 Analýza kymogramů

Analýza vybraných kymogramů proběhla v programu VKG analyzer (Novozámský a kol. 2015, Zita a kol. 2022) a to v jeho dvou verzích z května a října 2017 (starší verze byla použita pro kymogramy, které nebylo možné zanalyzovat pomocí verze novější). Tento program automaticky detekuje kontury hlasivek, tedy okraje glottis, která je výrazně tmavší než okolní hlasivková tkáň. Správnou detekci kontur uživatel zpřesňuje případnou úpravou jasu a kontrastu (viz Obrázek 4.2). Výstupem z VKG analyzoru je datový soubor zaznamenávající pozici okraje pravé a levé hlasivky pro každý řádek kymografického snímku.

Cílové parametry kmitání hlasivek byly poté získány následnou analýzou hlasivkových kontur pomocí MATLAB skriptů, které vznikly v Hlasové laboratoři Katedry Experimentální fyziky Univerzity Palackého v Olomouci (Kumar a kol. 2021).



Obrázek 4.2: Analýza kymogramů v programu VKG analyzer

Tento skript slouží k získání průměrných hodnot parametrů a směrodatných odchylek pro celý kymogram. Jelikož jsme ovšem chtěli kombinovat výsledky každé fonace ze 3 kymogramů, bylo třeba původní skript upravit tak, abychom dostali parametry kmitání pro každý jednotlivý cyklus a až z těchto výsledků jsme počítali průměr a směrodatnou odchylku a medián. K analýze fonací jsme využívali parametry kmitání hlasivek: kvocient uzavření  $Q_C$ , amplitudu, kvocient rychlosti  $Q_S$ , kvocienty otevírání  $Q_{og}$  a uzavírání  $Q_{cg}$ , normalizovaný kvocient amplitud NAQ a vertikální fázový rozdíl VPD.

## 4.4 Zpracování výsledků

Aby bylo možné vzájemně porovnat výsledky jednotlivých subjektů mezi sebou, bylo třeba najít způsob, jakým jednotlivé hodnoty parametrů pro dané typy fonací seřadit. Pro každý parametr jednoho subjektu jsme seřadili hodnoty mediánu pro naše čtyři typy fonací a sestavili jsme ordinální škálu s hodnotami 1-4, v rámci které jsme přiřadili hodnotu 1 fonaci s nejnižší hodnotou mediánu a hodnotu 4 pro fonaci s nejvyšším mediánem.

Poté jsme mohli pro každý parametr vytvořit pro dané typy fonací medián přes všechny subjekty, znázornit grafy a porovnat, jak daný parametr roste a klesá

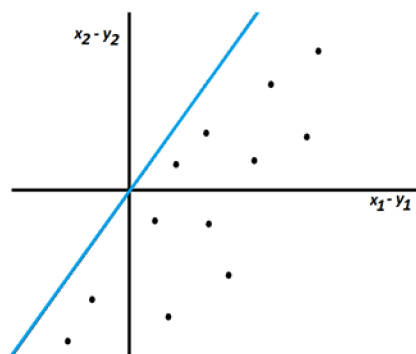
v závislosti na typu fonace. Pro lepší interpretaci výsledků jsme do grafů taktéž znázornili minimální a maximální hodnoty dané škály a horní a dolní kvartily pro jednotlivé fonace.

Abychom našli parametr, který nám odděluje jednotlivé typy fonací, použili jsme ještě jeden statistický přístup. Pro každého jedince jsme opět vzali medián pro každý parametr pro každou fonaci. Abychom nemuseli odlišovat zvlášť hodnoty pro pravou a levou hlasivku, vytvořili jsme vždy z mediánů pro pravou a levou hlasivku příslušného subjektu, typu fonace a parametru průměr. Pro každý subjekt jsme tedy obdrželi čtyři uspořádané sedmice čísel (hodnoty pro sedm parametrů). Tyto hodnoty jsme centrovali a škálovali tak, že pro každý parametr byl vypočten průměr a směrodatná odchylka přes všechny subjekty. Následně byl tento průměr od všech hodnot odečten a výsledek vydělen směrodatnou odchylkou. Takto jsme obdrželi  $15 \times 4 = 60$  charakteristik pro každý parametr, se kterými jsme dále pracovali.

Snažili se nalézt takový parametr nebo kombinaci parametrů, které by nám umožnily rozlišit fonaci v hrudním a hlavovém rejstříku, dále fonace dyšné (nedochází k addukci chrupavčité části) od tlačných (addukce chrupavčité části) a případně také fonaci FaB od CaD a FaD od CaB.

V prvním případě jsme se snažili rozlišit fonace podle rejstříku, addukce chrupavčité části byla zanedbána. Pro každého jedince byly vypočteny rozdíly škálovaných parametrů při stejné dyšnosti (v Obrázku 4.3 ozn. jako  $x_1 - y_1$ ), které se odlišovaly rejstříkem. Na základě pořadí při odčítání a znaménka rozdílu jsme poté rozhodovali, pro kterou fonaci byl daný parametr vyšší nebo nižší. Podle počtu kladných a záporných hodnot parametrů bylo poté možné určit chybovost při pozorování určeného parametru. V případě tvorby dvojic parametrů, jsme postupovali následně: hledali jsme takovou přímku procházející počátkem, která by v prostoru, ve kterém jsou zobrazeny uspořádané dvojice rozdílů posuzovaných parametrů (v Obrázku 4.3 jsou to rozdíly  $x_1 - y_1$  a  $x_2 - y_2$ ), oddělovala dvě poloroviny, z nichž jedna by obsahovala všechny uspořádané dvojice a druhá žádnou (viz Obrázek 4.3). Obdobným způsobem lze postupovat i v případě kombinace 3 parametrů, kde již ovšem nepracujeme s oddělující přímkou ale s rovinou.

Stejný postup hledání oddělujících parametrů a jejich dvojic a trojic byl aplikován i při rozlišování fonací s abdukci a addukci chrupavčité části. Opět byl nejdříve



Obrázek 4.3: Přímka oddělující dvě poloroviny, z nichž jedna obsahuje všechny uspořádané dvojice vybraných parametrů pro změřená data a druhá polovina žádnou. Rozdíl  $x_1 - y_1$  označuje rozdíl hodnot jednoho parametru pro fonace v různém rejstříku při stejné dyšnosti, rozdíl  $x_2 - y_2$  označuje stejným způsobem rozdíl druhého parametru.

vypočten pro každý subjekt rozdíl hodnot parametru odlišujících se dyšností při zachování rejstříku. Další postup už je pak totožný s postupem pro odlišení rejstříku.

Nakonec jsme se pokusili oddělit fonaci FaB od CaD a FaD od CaB. Zde se pracovalo pouze s polovičním množstvím hodnot, postup byl ovšem stejný jako v předchozích případech.

## 4.5 Analýza zvuku

Pro porovnání fonací mezi sebou jsme nejprve určili základní frekvenci fonace  $f_0$  a hladinu akustického tlaku (SPL) každé fonace. K určení základní frekvence byl využit MATLAB skript `swipep.m` (Camacho a Harris 2008).

Pro analýzu SPL jsme využívali MATLAB skriptů `CalibrateVoiceSPL` Švece a Granqvista (2018), která sloužila mimo jiné i ke kalibraci intenzity zvuku. Kalibrace dat z původního experimentu probíhala na základě kalibračních souborů obsahujících pro každý subjekt stabilní fonaci /a:/ na změřené intenzitě, které obsahovaly informaci o změřené SPL ve vzdálenosti 30 cm od úst subjektu. Pro subjekty DM a WB nebyly kalibrační soubory změřeny, kalibrace signálu z mikrofonu tedy proběhla na základě kalibračního souboru subjektu CH. Pro subjekty HL a ZS probíhala kalibrace s využitím stabilního sinusoidního signálu o frekvenci 1000 Hz, jejíž SPL byla změřena. Nakonec byly hodnoty SPL přepočítány podle Švece a Granqvista (2018) tak, aby odpovídaly hodnotám v případě, že by byl mikrofon umístěn ve 30 cm od

úst. K tomu byl využit vztah:

$$L_{p@d2} = L_{p@d1} - 20 \cdot \log_{10} \frac{d_2}{d_1}, \quad (4.1)$$

ve kterém  $L_{p@d2}$  vyjadřuje SPL ve vzdálenosti  $d_2$  (v našem případě 30 cm) a  $L_{p@d1}$  SPL ve vzdálenosti  $d_1$ , tedy vzdálenosti mikrofonu od úst. Využito bylo A frekvenční a rychlé časové vážení.

# Výsledky

## 5.1 Analýza zvuku

### Základní frekvence

Nejdříve jsme analyzovali zvukové nahrávky jednotlivých fonací, abychom ověřili, že fonace probíhaly na podobných frekvencích. Hodnoty základní frekvence fonací odpovídajícím analyzovaným kymogramům pro každou fonaci jednotlivých subjektů jsou zaznamenány v Tabulce 5.1.

Tabulka 5.1: Tabulka základní frekvence  $f_o$  pro jednotlivé subjekty při fonacích v konfiguracích glottis FaB (abdukovaný falzet), FaD (addukovaný falzet), CaB (abdukovaný hrudní rejstřík), CaD (addukovaný hrudní rejstřík). Hodnoty  $f_o$  odpovídají vybraným kymogramům.

Subjekt č.	Iniciály	$f_o$ [Hz]			
		FaB	FaD	CaB	CaD
1	DM	280 ± 6	279 ± 6	279 ± 3	278 ± 2
2	HL	356 ± 2	351 ± 2	354 ± 2	349 ± 2
3	HM	358 ± 1	347 ± 5	290 ± 2	297 ± 1
4	HS	319 ± 8	299 ± 2	294 ± 2	317 ± 2
5	CH	298 ± 4	301 ± 1	289 ± 2	286 ± 2
6	JS	346 ± 7	349 ± 2	335 ± 2	327 ± 2
7	KP	322 ± 2	362 ± 3	282 ± 1	314 ± 7
8	MD	293 ± 2	298 ± 2	294 ± 2	295 ± 3
9	ME	306 ± 5	313 ± 5	302 ± 8	298 ± 3
10	MK	327 ± 5	329 ± 3	328 ± 6	325 ± 3
11	MM	307 ± 3	300 ± 2	310 ± 4	306 ± 6
12	QQ	322 ± 3	319 ± 5	260 ± 5	320 ± 40
13	RW	309 ± 5	311 ± 7	298 ± 4	305 ± 4
14	WB	302 ± 3	305 ± 2	289 ± 9	250 ± 10
15	ZS	375 ± 1	383 ± 2	379 ± 2	376 ± 1

Jak je z Tabulky 5.1 patrné, pro některé subjekty jsou základní frekvence při různých fonacích mírně odlišné. U subjektu HM vidíme, že  $f_o$  fonací produkovaných v hrudním rejstříku je nižší než pro fonace v rejstříku falzetové. Tento rozdíl je již dostatečně výrazný na to, abychom jednotlivé tóny rozlišili (největší rozdíl odpovídá přibližně jednomu a půl tónu hudební abecedy), ale předpokládáme, že na hodnoty jednotlivých parametrů nemá vliv. Odlišné hodnoty základní frekvence pro různé fonace pozorujeme také u subjektů KP, QQ a WB. Zde většinou zaznamenáváme odlišnou hodnotu  $f_o$  pouze pro jeden typ fonace, pro zbylé tři jsou hodnoty podobné. Odlišná hodnota je v rámci dané fonace stabilní.

Co se ovšem týká subjektu QQ a fonace v addukovaném hrudním rejstříku, vidíme velmi vysokou hodnotu směrodatné odchylky. V tomto případě došlo k tomu, že frekvence v rámci fonace nebyla příliš stabilní a byly vybrány kymogramy v okamžicích, kdy frekvence mírně fluktovala. Zde předpokládáme, že tyto jevy nemají významný vliv na střední hodnoty parametrů kmitání hlasivek.

## Hladina akustického tlaku

Stejně tak jako v případě  $f_o$  bylo potřeba zanalyzovat i hodnoty SPL. Pro všechny subjekty bylo nejdříve potřeba tyto hodnoty zkalibrovat a přepočítat tak, aby odpovídaly hodnotám změřeným v případě, že by byl mikrofon umístěn ve vzdálenosti 30 cm od úst. V Tabulce 5.2 jsou tyto hodnoty uvedeny. V případě, že by byly rozdíly SPL subjektu výrazně odlišné pro různý typ fonací, mohlo by dojít ke zkreslení výsledků parametrů kmitání hlasivek.

Jak je z tabulky patrné, většina subjektů zvládla všechny typy fonací provést tak, aby rozdíly v SPL výrazně nepřesáhly 10 dB. Je však možné pozorovat, že pro většinu addukovaných fonací (a především pro fonaci v hrudním rejstříku) jsou hodnoty vyšší než pro fonaci bez addukce chrupavčité části glottis.

Významnější rozdíly ve výsledné SPL pro jednotlivé fonace můžeme pozorovat u subjektů DM, JS, KP, MD a RW. Téměř ve všech případech je nejméně intenzivní fonace při FaB (výjimku tvoří subjekt MD, pro který je nejtišší fonace produkována v FaD) a nejvyšší hodnotu SPL mají u všech těchto subjektů fonace v CaD. Nejvýraznější rozdíl pozorujeme u subjektu DM.

Hvězdičkou jsou označeny subjekty DM a WB. U nich nedošlo ke pořízení kalibrační nahrávky, proto byl ke kalibraci využitý kalibrační signál subjektu CH, s tím,



Tabulka 5.2: Tabulka hladiny akustického tlaku SPL @30 cm pro jednotlivé subjekty při fonacích v konfiguracích glottis FaB (abdukovaný falzet), FaD (addukovaný falzet), CaB (abdukovaný hrudní rejstřík), CaD (addukovaný hrudní rejstřík). Hodnoty SPL odpovídají vybraným kymogramům a jsou přepočteny tak, aby odpovídaly měření s mikrofonom umístěným ve vzdálenosti 30 cm od úst. Hvězdičkou jsou označeny subjekty, u kterých nebyl k dispozici kalibrační signál a SPL hodnoty nejsou vztaženy ke standardizované hodnotě akustického tlaku  $2 \cdot 10^{-5}$  Pa.

Subjekt č.	Iniciály	SPL(A) @30 cm [dB]			
		FaB	FaD	CaB	CaD
1	DM*	36 ± 3	60 ± 4	67 ± 4	60 ± 5
2	HL	86 ± 3	94 ± 3	89 ± 3	90 ± 3
3	HM	76 ± 4	80 ± 4	75 ± 5	82 ± 4
4	HS	84 ± 3	80 ± 4	81 ± 4	89 ± 3
5	CH	78 ± 3	89 ± 4	84 ± 4	84 ± 4
6	JS	78 ± 4	86 ± 4	84 ± 4	92 ± 4
7	KP	77 ± 4	88 ± 4	83 ± 4	96 ± 4
8	MD	76 ± 4	67 ± 4	85 ± 4	93 ± 4
9	ME	83 ± 3	89 ± 4	80 ± 5	90 ± 4
10	MK	85 ± 4	87 ± 3	85 ± 4	89 ± 4
11	MM	80 ± 4	84 ± 4	79 ± 4	84 ± 4
12	QQ	83 ± 4	85 ± 4	84 ± 4	86 ± 4
13	RW	70 ± 4	81 ± 5	82 ± 4	88 ± 5
14	WB*	60 ± 4	67 ± 3	69 ± 4	66 ± 4
15	ZS	83 ± 3	88 ± 3	82 ± 3	93 ± 3

že jsme předpokládali stejné nastavení záznamového zařízení u těchto subjektů. Jak je ale vidět z nízkých hodnot v Tabulce 5.2, je možné, že došlo ke změně zesílení záznamu u těchto subjektů a nelze tedy v těchto případech vztáhnout hodnoty SPL k referenční hodnotě  $2 \cdot 10^{-5}$  Pa. Nicméně, stále je možné porovnat SPL hodnoty mezi danými fonacemi u těchto subjektů.

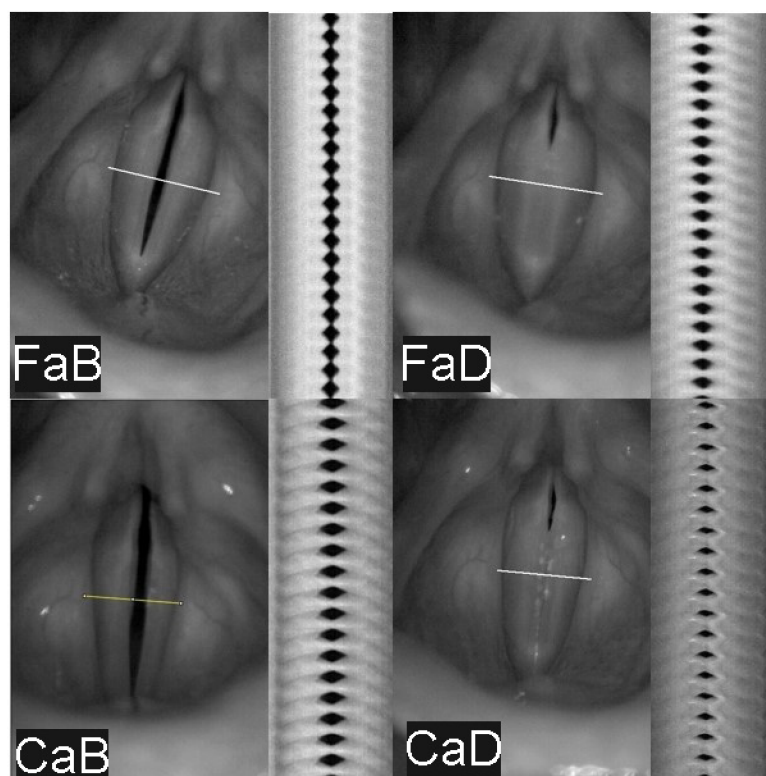
## 5.2 Analýza parametrů kmitání hlasivek

### 5.2.1 Analýza jednotlivých subjektů

Nejdříve bylo třeba podívat se na data pro každý subjekt zvlášť. Na Obrázku 5.1 můžeme pozorovat hlasivky a příslušné kymogramy subjektu HL pro 4 typy fonací. U kymogramů vytvořených z fonace v FaB je vidět, že nedochází k úplnému uzavření

glottis, u typu FaD vidíme, že uzavření hlasivek je mnohem delší než v předchozím případě. Na rozdíl od CaB je doba otevírání a uzavírání podobná, pro CaB můžeme pozorovat, že hlasivky se déle uzavírají než otevírají. Konečně pro fonační typ CaD lze pozorovat velmi dlouhou dobu uzavření hlasivky (s porovnáním doby otevření).

Stejně zobrazené kymogramy s laryngoskopickým pohledem na hlasivky pro všechny zbylé subjekty jsou zobrazeny v Příloze 1 - 14.

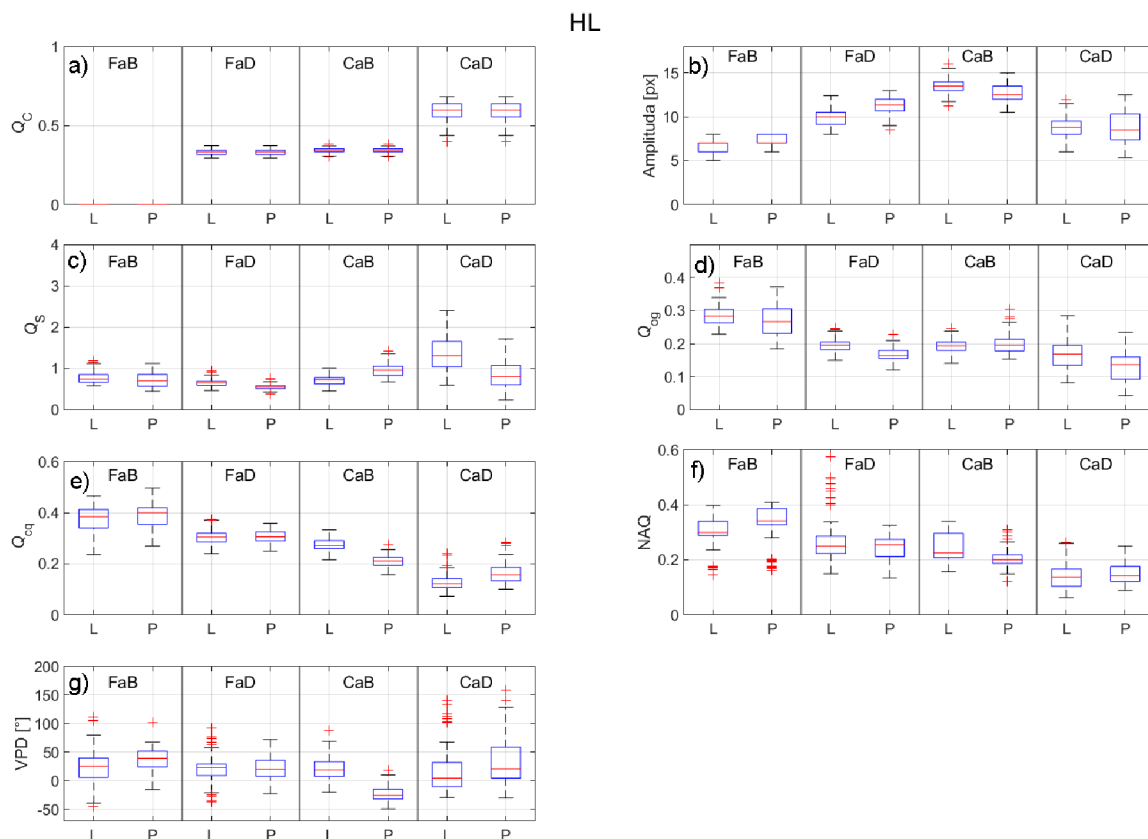


Obrázek 5.1: Hlasivky a příslušné kymogramy subjektu HL při fonacích FaB (abdukovaný falzet), FaD (addukovaný falzet), CaB (abdukovaný hrudní rejstřík), CaD (addukovaný hrudní rejstřík)

Dále jsme pro každý subjekt sestavili grafy, ve kterých jsme zobrazili závislost kvocientů na jednotlivých fonačních typech. Jeden z těchto grafů, opět pro subjekt HL, vidíme na Obrázku 5.2.

Kvociet uzavření  $Q_C$  (Obrázek 5.2a) byl u subjektu HL pro fonační typ FaB rovný nule, jak už vyplývá z kymogramů, ze kterých je zřejmé, že hlasivky se v daném místě neuzavíraly. Pro fonační typy FaD a CaD je hodnota  $Q_C$  podobná, vyšší než pro FaB, ale jelikož je nižší než 0,5, znamená to, že hlasivka byla delší dobu otevřená než uzavřená. Naopak hodnoty  $Q_C$  nad 0,5 pro CaD určují, že hlasivka byla déle zavřená než otevřená. Jelikož hodnota kvocientu rostla při přechodu z FaB na CaB i při přechodu z FaD na CaD, můžeme předpokládat, že při přechodu z falzetu do

hrudního rejstříku při zachované abdukci (addukci) hlasivek dochází k nárůstu  $Q_C$  a tedy i relativní doby uzavření hlasivek.



Obrázek 5.2: Grafy závislosti kvocientu uzavření  $Q_C$  (a), amplitudy (b), kvocientů šikmosti  $Q_S$  (c), otevírání  $Q_{og}$  (d), uzavírání  $Q_{cg}$  (e), normalizovaného kvocientu amplitud (NAQ) (f) a vertikálního fázového rozdílu VPD (g) na typu fonace FaB (abdukovaný falzet), FaD (addukovaný falzet), CaB (abdukovaný hrudní rejstřík), CaD (addukovaný hrudní rejstřík) pro pravou a levou hlasivku subjektu HL. Boxplot znázorňuje červenou čarou medián, modře jsou ohraničeny horní a dolní kvartil, linie vycházející ze střední části omezuje maximum a minimum po vyčlenění odlehlých hodnot, které jsou vyznačeny červenými body.

Pro amplitudu (Obrázek 5.2b) vidíme, že se hodnoty mírně odlišovaly pro levou a pravou hlasivku. I tak je ale patrné, že nejnižší hodnoty měla amplituda při FaB, u FaD a CaB se hodnoty zvýšily, pro CaB byly nejvyšší. Hodnoty pro CaD mají výrazný rozptyl, i tak je však viditelný pokles v porovnání s fonačními typy FaD a CaB.

Hodnoty  $Q_S$  (Obrázek 5.2c) se opět odlišují pro pravou a levou hlasivku. Pro sledovaný subjekt vidíme, že došlo k mírnému poklesu hodnot mezi FaB a FaD, hodnoty pro CaB i CaD jsou výrazně odlišné pro pravou a levou hlasivku, a u fonačního typu CaD opět pozorujeme výrazný rozptyl hodnot. Můžeme také pozorovat, že kromě hodnoty pro levou hlasivku při CaD jsou všechny hodnoty  $Q_S$  menší než 1, tedy doba otevírání vychází kratší než doba uzavírání.

Kvocient  $Q_{og}$  (Obrázek 5.2d) je nejvyšší pro fonační typ FaB a nejnižší pro CaD, ačkoli i v tomto případě je rozptyl hodnot výrazný. Hodnoty pro FaD a CaB jsou podobné, graf naznačuje, že jsou mírně vyšší pro fonační typ CaB.

Maximum pro FaB a minimum pro CaD mají také kvocienty  $Q_{cg}$  (Obrázek 5.2e) a NAQ (Obrázek 5.2f). Data poměrně dobře odpovídají předpokladu, že se tyto dva kvocienty chovají podobně. Můžeme ovšem vidět, že pro NAQ mají data mnoho odlehlých hodnot a s výjimkou fonačního typu FaB i větší rozptyl. Při přechodu z FaD na CaB kvocienty mírně klesají, pro  $Q_{cg}$  je tento pokles o něco výraznější.

Jak vidíme, tak pro fonace FaB, FaD a CaB je  $Q_{og}$  nižší než  $Q_{cg}$ . Proto jsou hodnoty  $Q_S$  pro tyto fonace menší než 1. Rozdíl  $Q_{og}$  od  $Q_{cg}$  je největší při fonaci FaB, nejmenší naopak pro CaD.

Hodnoty VPD (Obrázek 5.2g) pro všechny fonační typy mají velmi výrazný rozptyl a zároveň velké množství odlehlých hodnot. Zároveň také můžeme pozorovat výrazné rozdíly v hodnotách pro pravou a levou hlasivku, který je nejvíc zřetelný pro fonační typ CaB. Vzhledem k těmto skutečnostem a také k malému rozdílu dat nelze usuzovat, jakým způsobem se VPD mění v závislosti změně konfigurace glottis.

Obrázky s grafy pro ostatní analyzované subjekty jsou uvedeny v Příloze 15 - 28.

## 5.2.2 Společná analýza subjektů - ordinální škála na základě pořadí

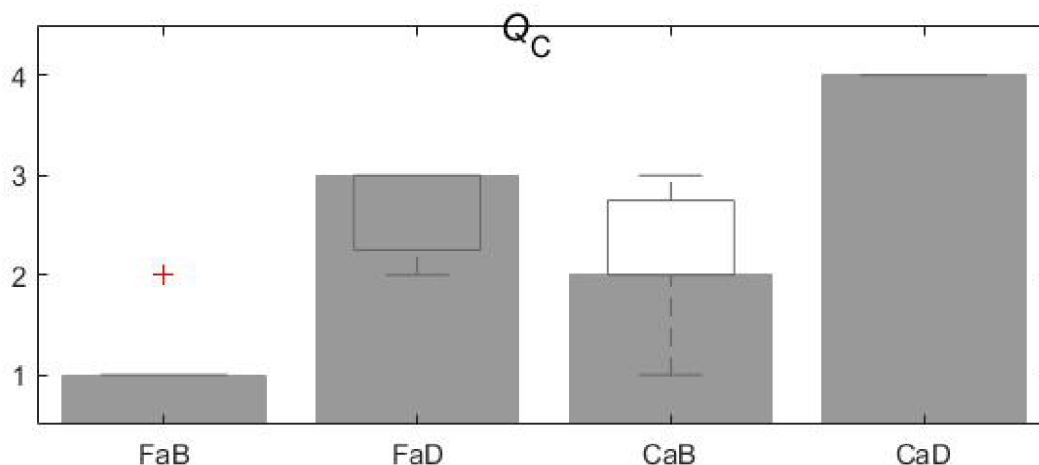
Potom, co jsme pro každý subjekt sestavili grafy závislosti kvocientů na jednotlivých fonačních typech, bylo třeba hodnoty vzájemně porovnat. Jelikož se pro jednotlivé subjekty hodnoty daných kvocientů odlišovaly, bylo potřeba najít způsob, jakým hodnoty kvocientů normalizovat, abychom mohli závislost kvocientů na typu fonace hodnotit společně. Jak už bylo uvedeno v předešlé kapitole, ohodnotili jsme pro každý subjekt mediány kvocientů pro daný typ fonace podle ordinální škály 1-4 a z výsledků všech subjektů jsme určili mediány, horní a dolní kvartil a minimum s maximem.

## Kvocient uzavření

Na grafu v Obrázku 5.3 vidíme hodnocení kvocientu uzavření  $Q_C$ . Z tohoto grafu je patrné, že pro většinu subjektů byla hodnota tohoto kvocientu nejnižší při fonaci v FaB a rostla při změně fonace na CaB (tedy při změně rejstříku na hrudní při zachované abdukci chrupavčité části). Pro většinu subjektů je v porovnání s CaB  $Q_C$  vyšší pro FaD a pro všechny subjekty je  $Q_C$  nejvyšší pro CaD.

Můžeme tedy konstatovat, že  $Q_C$  roste s addukcí, a to jak blanitou, tak chrupavčitou, přičemž pokles kvocientu při změně z FaD na CaB by mohl naznačovat, že k uzavření hlasivky více přispívá addukce chrupavčitá než addukce blanitá.

Je ovšem důležité si povšimnout, že ačkoli hodnoty mediánu pro FaD jsou vyšší než pro CaB, kvantily se překrývají a proto není možné zobecnit pokles  $Q_C$  vždy při přechodu z FaD na CaB.

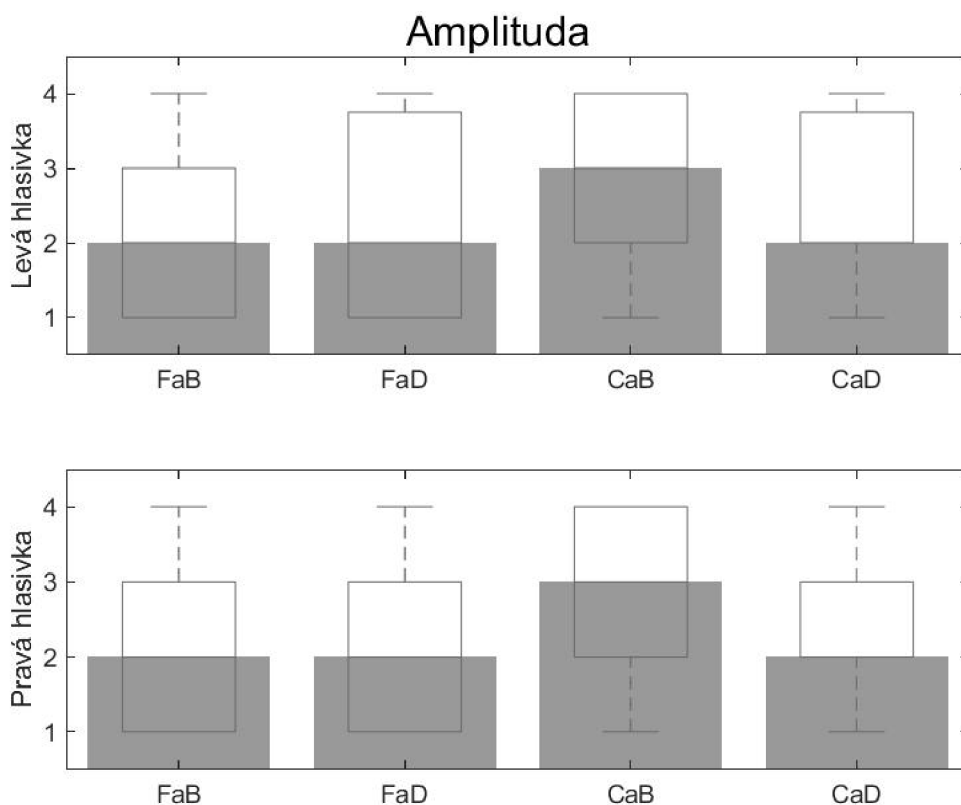


Obrázek 5.3: Výsledky pro kvocient uzavření  $Q_C$  pro všechny subjekty. Graf mediánů, horního a dolního kvartilu a extrémů (úsečkou vyznačeny maximum a minimum při vyloučení odlehlých hodnot, které jsou vyznačeny křížkem) pro jednotlivé fonační typy FaB (abdukovaný falzet), FaD (addukovaný falzet), CaB (abdukovaný hrudní rejstřík), CaD (addukovaný hrudní rejstřík) sestavené na základě hodnot ordinální škály 1-4 pro hodnoty mediánů (1 - nejnižší hodnota, 4 - nejvyšší hodnota).

## Amplituda

Abychom se podívali, jak se liší hodnoty amplitudy v závislosti na našich fonačních typech, studujeme graf v Obrázku 5.4. Vidíme, že hodnoty rozptýlů se mírně odlišují pro levou a pravou hlasivku, pro obě hlasivky je však rozpětí hodnot výrazné pro všechny dané typy fonací. Můžeme si povšimnout, že u každého fonačního typu (pro pravou i levou hlasivku), byly na hodnotící ordinální škále zaznamenány jak

maximální, tak minimální hodnota. I v důsledku toho pozorujeme výrazné rozpětí hodnot. Na základě samotných mediánů bychom mohli říct, že nejvyšší hodnota amplitudy byla pozorována při fonaci CaB, ovšem rozpětí hodnot jsou tak vysoká, že není možné na základě amplitudy jednoznačně říci, který typ fonace kmitá s nejmenší, či největší amplitudou hlasivek.

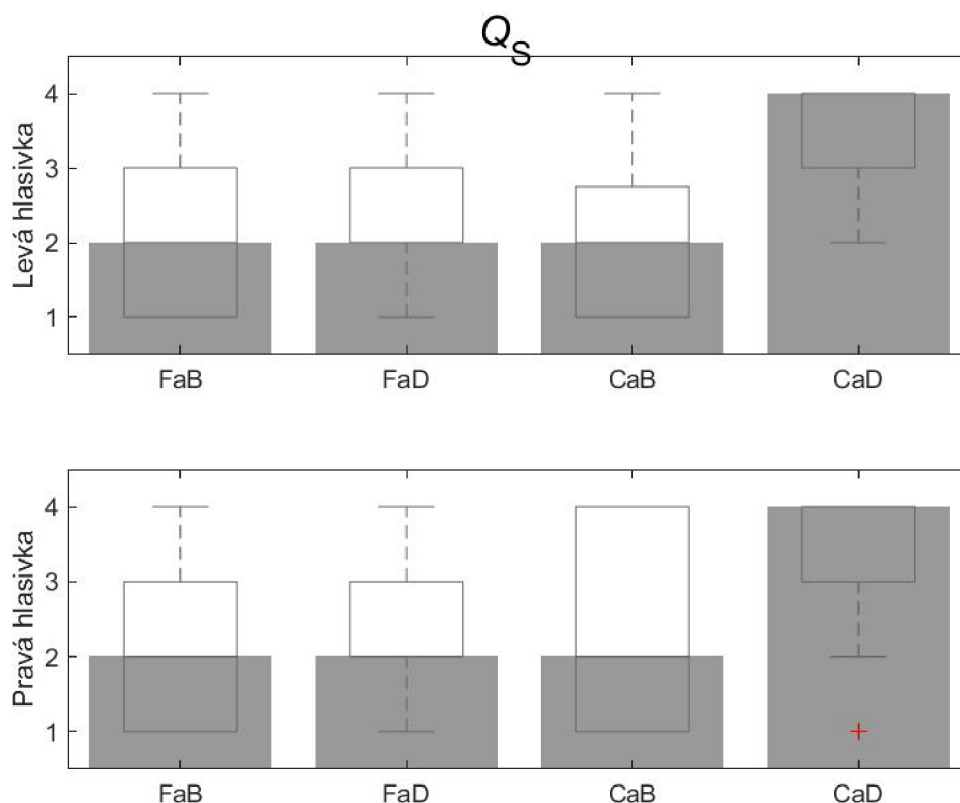


Obrázek 5.4: Výsledky pro amplitudu pro všechny subjekty. Uspořádání grafu je stejné jako v Obrázku 5.3.

### Kvocient rychlosti

Výsledky hodnocení kvocientu rychlosti  $Q_S$  jsou zobrazeny v grafu na Obrázku 5.5. Stejně jako v případě amplitudy vidíme mírné rozdíly v hodnotách pro pravou a levou hlasivku. Také lze pozorovat, že pro fonace FaB, FaD a CaB byly v rámci subjektů zaznamenány jak nejvyšší tak nejnížší hodnoty, hodnoty pro CaD nebyly nikdy nejnížší (hodnota 1 nenastala), ale na ordinální škále dosahovaly hodnot 2 - 4. I v tomto případě pozorujeme velké rozpětí hodnot a malé vzájemné rozdíly, které nám znemožňují jednoznačně určit změnu tohoto kvocientu při změně fonace. Výsledky naznačují, že nejvyšší hodnoty  $Q_S$  mají tendenci nastávat při nejvíce addukované

blanitě i chrupavčité části hlasivek, tedy při fonaci CaD, ovšem vzhledem k velkému rozpětí hodnot to není možné tvrdit s jistotou obecně.



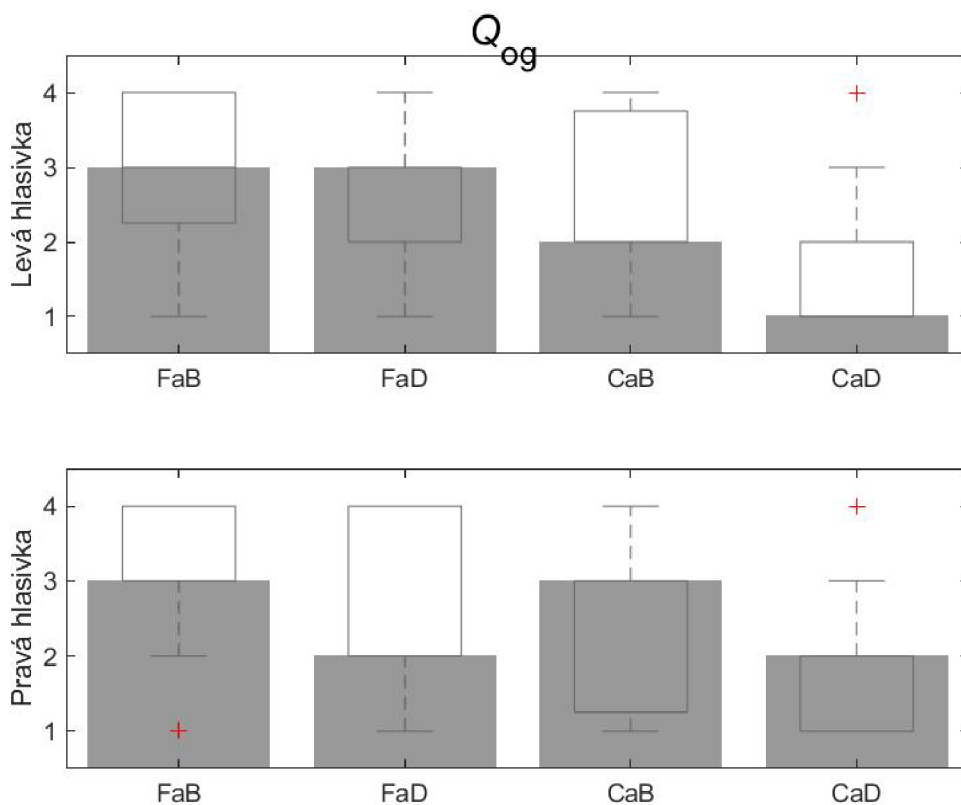
Obrázek 5.5: Výsledky pro kvocient rychlosti  $Q_S$  pro všechny subjekty. Uspořádání grafu je stejné jako v Obrázku 5.3.

### Kvocient otevírání

Z grafu na Obrázku 5.6 je patrné, že rozdíly hodnot  $Q_{og}$  pro pravou a levou hlasivku jsou výrazné. Zatímco pro levou hlasivku vidíme, že mediány jsou shodné pro FaB a FaD, mají tendenci klesat při přechodu z fonace FaD na CaB a z CaB na CaD, pro pravou hlasivku jsou shodné mediány FaB a CaB a také FaD a CaD. Na základě těchto hodnot, v důsledku velkého rozpětí hodnot, malých rozdílů mezi hodnotami a také kvůli výskytu absolutního maxima i minima pro všechny typy fonací není možné na základě  $Q_{og}$  rozlišit jednotlivé typy fonací.

### Kvocient uzavírání

V grafu na Obrázku 5.7 jsou zobrazeny výsledky hodnocení kvocientu uzavírání  $Q_{cg}$ . Ačkoli opět vidíme, že hodnoty nebyly stejné pro všechny subjekty, na rozdíl



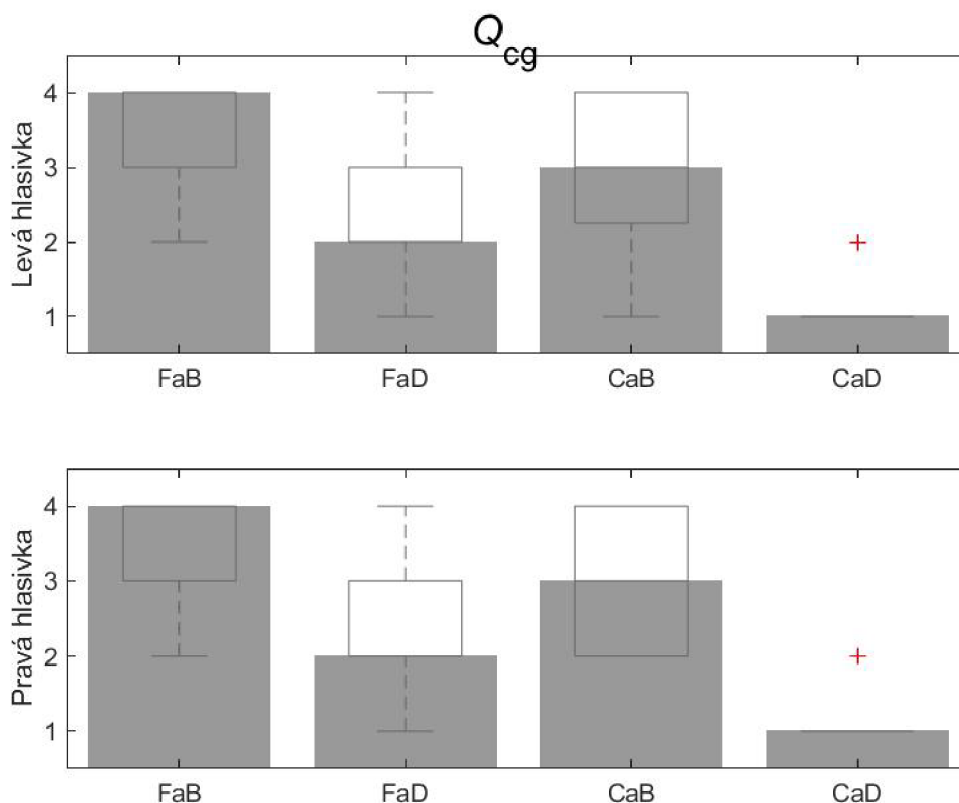
Obrázek 5.6: Výsledky pro kvocient otevírání  $Q_{og}$  pro všechny subjekty. Uspořádání grafu je stejné jako v Obrázku 5.3.

od předchozích koeficientů jsou tyto výsledky o něco jednoznačnější. Rozdíly hodnot pro pravou a levou hlasivku jsou minimální.

Pozorujeme, že hodnoty byly pro většinu subjektů nejvyšší při fonaci FaB, nejnižší při CaD, tedy v případě nejvíce addukované blanité i chrupavčité části. Je tedy zřejmé, že pokud dochází k addukci (ať už chrupavčité či blanité části),  $Q_{cg}$  se snižuje, tedy uzavírání hlasivek je rychlejší.

Poměrně výraznější rozdíl pozorujeme při přechodu z fonace FaB na FaD a z CaB na CaD. Z toho můžeme usuzovat, že pokud dochází k addukci chrupavčité části glottis, bude se uzavírání hlasivek zrychlovat. Podobně vidíme i pokles hodnot při blanité addukci přechodu z fonace FaD na CaD a z FaB na CaB, zde ovšem dochází k výraznějšímu překryvu daných kvantilů. Data tedy naznačují, že by ke snižování  $Q_{cg}$  mohlo docházet i při addukci blanité části glottis, výsledek však není možné zobecnit. Při studiu rozdílů mezi fonacemi FaD na CaB vidíme vyšší hodnoty pro CaB, opět ovšem pozorujeme výrazný překryv kvantilů.



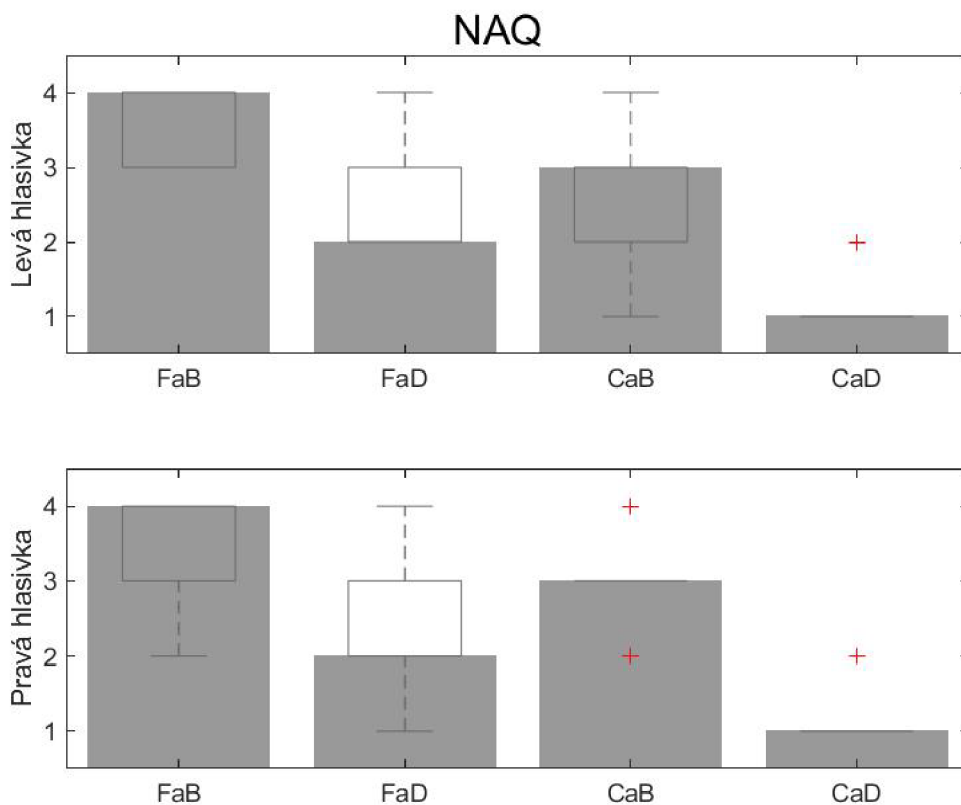


Obrázek 5.7: Výsledky pro kvocient uzavírání  $Q_{cg}$  pro všechny subjekty. Uspořádání grafu je stejné jako v Obrázku 5.3.

### Normalizovaný kvocient amplitud

Hodnoty pro normalizovaný kvocient amplitud NAQ jsou znázorněny v grafu na Obrázku 5.8. Hodnoty pro pravou a levou hlasivku jsou mírně odlišné, hodnoty mediánů jsou ovšem stejné. Stejně jako v případě  $Q_{cg}$  vidíme, že nejvyšší hodnoty kvocientu jsou pro hlasivky při fonaci v FaB a nejnižší hodnoty pro CaD. Stejně tak je možné pozorovat, že obdobně jako pro  $Q_{cg}$  dosahovaly hodnoty pro CaD na ordinální škále buď 1 nebo 2, při fonaci FaB dosahovaly hodnoty NAQ na rozdíl od  $Q_{cg}$ , které pro FaB dosahovaly hodnot od 2 do 4, pouze hodnot 3 nebo 4.

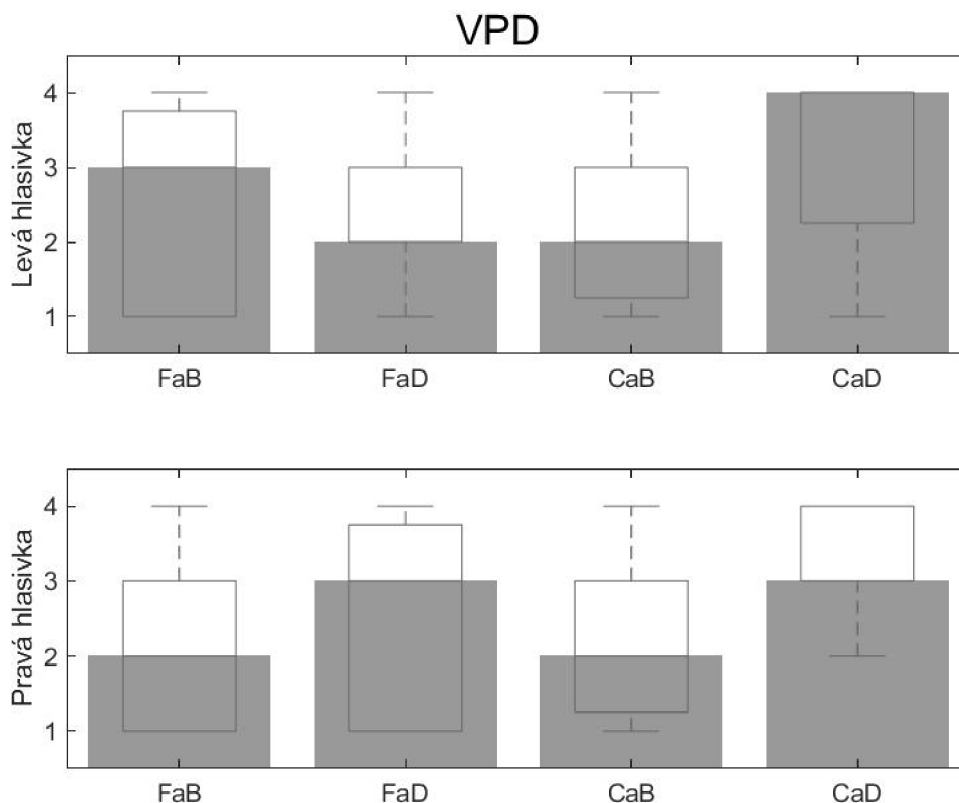
Stejně jako v předchozím případě vidíme pokles hodnot s chrupavčitou (z FaB na FaD a z CaB na CaD) i blanitou addukcí (z FaB na CaB a z CaD na CaB). Mediány při přechodu z FaB na CaB klesají, opět ovšem vidíme výrazný překryv kvantilů. Opět ale vidíme, že rozpětí hodnot je velmi výrazné a výsledky tedy nejsou jednoznačné. Podle předpokladů však můžeme potvrdit, že se NAQ chová podobným způsobem jako  $Q_{cg}$ .



Obrázek 5.8: Výsledky pro normalizovaný kvocient amplitud NAQ pro všechny subjekty. Uspořádání grafu je stejné jako v Obrázku 5.3.

### Vertikální fázový rozdíl

Na Obrázku 5.9 je znázorněn graf pro hodnoty vertikálního fázového rozdílu VPD. Vidíme rozdíly pro hodnoty pro pravou a levou hlasivku, pro všechny fonace je možné pozorovat extrémní rozptyl hodnot. Pro všechny typy fonací bylo maximum hodnot na ordinální škále rovno 4 a minimum 1. Ani rozdíly mezi mediány hodnot pro jednotlivé fonace nejsou jednoznačné, pro levou hlasivku je VPD nejvyšší pro CaD, hodnoty mediánu pro FaD a CaB jsou shodné, pro pravou hlasivku jsou pak shodné mediány pro FaB a CaB a taktéž pro FaD a CaD. Jak je možné pozorovat z výrazného rozpětí hodnot, ani jeden typ fonace se svými hodnotami zásadně neodlišuje od ostatních. Na základě zobrazeného grafu je tedy třeba usuzovat, že pro změřená data nelze námi vypočtenou VPD využít k rozlišení fonací s jednotlivými typy konfigurace glottis.



Obrázek 5.9: Výsledky pro vertikální fázový rozdíl VPD pro všechny subjekty. Uspořádání grafu je stejné jako v Obrázku 5.3.

### 5.2.3 Společná analýza subjektů - separátní oddělení rejstříku a dyšnosti

#### Rozpoznání rejstříku při podobné dyšnosti

Jak bylo zmíněno v metodice, pro každý subjekt byly vycentrovány a seškálovány hodnoty všech sedmi parametrů pro každou ze čtyř fonací. Poté jsme pro každý subjekt odečetli hodnoty každého parametru při falzetu od hodnot v hrudním rejstříku. Odpovídající počet subjektů s kladnými a zápornými rozdíly spolu s chybovostí klasifikace při použití daného parametru vidíme v Tabulce 5.3. Parametry jsou seřazené podle vhodnosti pro klasifikaci.

Z Tabulky 5.3 je patrné, že pro rozlišení falzetu od hrudního rejstříku nejlépe slouží  $Q_C$ , ve kterém se v testovací sadě nacházely pouze dvě situace, při které byly jeho hodnoty vyšší pro falzet než pro hrudní rejstřík. Pro většinu fonací měl tento koeficient vyšší hodnoty při fonaci v hrudním rejstříku. Chybovost pod 25 % měly taktéž parametry  $NAQ$ ,  $Q_{cg}$  a  $Q_{og}$ . Pro všechny tyto parametry jsou jejich

Tabulka 5.3: Klasifikace rejstříku na základě jednoho parametru - tabulka počtu kladných a záporných rozdílů při odčítání hodnot pro fonaci ve falzetu od hodnot při fonaci v hrudním rejstříku; chybovost určení rejstříku na základě daného parametru

Parametr	Kladné rozdíly	Záporné rozdíly	Chybovost [%]
$Q_C$	28	2	6,7
NAQ	6	24	20,0
$Q_{cg}$	7	23	23,3
$Q_{og}$	7	23	23,3
VPD	20	10	33,3
$Q_S$	20	10	33,3
Amplituda	18	12	40,0

hodnoty při fonaci v hrudním rejstříku většinou nižší než při fonaci ve falzetu. Parametry VPD,  $Q_S$  a amplituda měly již vysokou chybovost a proto nejsou pro odlišení rejstříku vhodné.

Pokud bychom hledali kombinace více parametrů tak, aby rejstřík oddělovaly bezchybně, bylo potřeba vzít parametry tři. Jejich kombinace jsou zobrazeny v Tabulce 5.4.

Tabulka 5.4: Kombinace parametrů bezchybně oddělující fonaci v hrudním rejstříku od fonace ve falzetu

	Parametr 1	Parametr 2	Parametr 3
1	amplituda	NAQ	$Q_C$
2	amplituda	NAQ	$Q_{og}$
3	NAQ	$Q_C$	$Q_{og}$
4	NAQ	$Q_{cg}$	$Q_{og}$
5	NAQ	$Q_{og}$	$Q_S$
6	$Q_C$	$Q_{cg}$	$Q_S$

Jak je z tabulky patrné, ve většině kombinací figuruje NAQ a  $Q_{og}$ , naopak v žádné kombinaci nevidíme parametr VPD.

### Rozpoznání dyšnosti (addukce chrupavčité části) při stejném rejstříku

Stejně jako v předchozím případě se teď pokoušíme oddělit fonaci dyšnou, při které nedochází k addukci chrupavčité části, od fonace tlačené, při které addukce probíhá. Opět jsme odečítali vycentrované škálované hodnoty, tentokrát při zachovaném rejstříku a odečítali jsme hodnoty tlačené fonace od dyšné v rámci jednotlivých

subjektů. Opět můžeme porovnat počet kladných a záporných rozdílů jednotlivých koeficientů a jejich chybovost (viz Tabulka 5.5).

Tabulka 5.5: Klasifikace rejstříku na základě jednoho parametru - tabulka počtu kladných a záporných rozdílů při odčítání hodnot pro fonaci s addukcí chrupavčité části od hodnot při fonaci bez addukce chrupavčité části; chybovost určení rejstříku na základě daného parametru

Parametr	Kladné rozdíly	Záporné rozdíly	Chybovost [%]
$Q_C$	0	30	0.0
$Q_{cg}$	29	1	3.3
NAQ	27	3	10.0
$Q_{og}$	23	7	23.3
$Q_S$	7	23	23.3
VPD	10	20	33.3
Amplituda	17	13	43.3

Z Tabulky 5.5 je patrné, že parametr  $Q_C$  nám jednoznačně fonace odděluje, pro všechny subjekty je tedy  $Q_C$  nižší při dyšné fonaci. Velmi dobré výsledky také dostáváme pro  $Q_{cg}$ , kde byla pouze jedna hodnota vyšší pro addukovanou fonaci, a pro NAQ, kde takové hodnoty existovaly 3. Relativně dobré výsledky s chybovostí pod 25 % měly taktéž parametry  $Q_{og}$  a  $Q_S$ . Naopak nevhodné jsou, stejně jako u klasifikace rejstříků, parametry VPD a amplituda.

Ačkoli jsme našli jeden parametr  $Q_C$ , který nám bezchybně klasifikoval dva typy fonací, můžeme i tak hledat kombinace parametrů, které bezchybně oddělují dyšnou a tlačnou fonaci. Kromě dvojic obsahujících  $Q_C$  mohou ke klasifikaci fonací sloužit dvojice uvedené v Tabulce 5.6.

Tabulka 5.6: Kombinace parametrů bezchybně oddělující fonaci s addukcí a bez addukce chrupavčité části

	Parametr 1	Parametr 2
1	amplituda	$Q_{cg}$
2	NAQ	$Q_{cg}$
3	$Q_{cg}$	$Q_{og}$
4	$Q_{cg}$	$Q_S$

Vidíme, že ve všech případech je jedním z dvojice parametrů  $Q_{cg}$ , parametr VPD opět použitý nebyl.

## Rozpoznání fonací v různém rejstříku s různou dyšností

Posledním úkolem bylo oddělit fonace CaB od FaD a CaD od FaB. V těchto případech už není možné pracovat se všemi daty - pro analýzu rozdílů vždy používáme jen polovinu dat a tedy máme pouze 15 rozdílů. V prvním případě byl analyzován rozdíl hodnot při fonaci FaD od hodnot v CaB. Počet kladných a záporných rozdílů spolu s chybovostí při použití daného parametru je zaznamenán v Tabulce 5.7.

Tabulka 5.7: Klasifikace rejstříku na základě jednoho parametru - tabulka počtu kladných a záporných rozdílů při odčítání hodnot pro fonaci FaD od hodnot při fonaci CaB; chybovost určení rejstříku na základě daného parametru

Parametr	Kladné rozdílly	Záporné rozdílly	Chybovost [%]
$Q_C$	3	12	20.0
NAQ	11	4	26.7
$Q_{cg}$	11	4	26.7
$Q_{og}$	10	5	33.3
Amplituda	9	6	40.0
$Q_S$	6	9	40.0
VPD	7	8	46.7

Jak je z Tabulky 5.7 patrné, nejlepší výsledek, kterého můžeme při práci s našimi daty dosáhnout, dostáváme pro klasifikace na základě  $Q_C$ , pro který byly chybně klasifikovány 3 hodnoty z 15, chybovost tedy odpovídala 20 %. Pro všechny ostatní parametry byla chybovost větší než 25 % a proto by ke klasifikaci nebyly vhodné.

I v tomto případě můžeme hledat kombinace více parametrů. V případě použití dvou i tří parametrů jsme však nebyli schopni najít takovou kombinaci, která by fonace oddělovala bezchybně. Uvedeme proto alespoň tabulku s chybovostí kombinace dvou parametrů (viz Tabulka 5.8).

Je zřejmé, že ani použití kombinace dvou parametrů nám situaci velmi nezlepší. Při kombinaci  $Q_C$  s amplitudou nebo VPD dostáváme výsledek 2 chybně určených bodů z 15, tedy stále 13,3% chybu. Jelikož chybovost samotného  $Q_C$  byla 3 chyby z 15, není výhodné používat více parametrů. Obdobně k výraznému zlepšení nedochází ani v případě dalších parametrů.

Tabulka 5.8: Klasifikace rejstříku na základě kombinace dvou parametrů - tabulka počtu chybných rozdílů při odčítání hodnot pro fonaci FaD od hodnot při fonaci CaB

Parametr 1	Parametr 2	Počet chyb
Amplituda	$Q_C$	2
VPD	$Q_C$	2
NAQ	$Q_C$	3
VPD	$Q_{cg}$	3
$Q_C$	$Q_{cg}$	3
$Q_C$	$Q_{og}$	3
$Q_C$	$Q_S$	3
$Q_{cg}$	$Q_{og}$	3
$Q_{cg}$	$Q_S$	3
Amplituda	NAQ	4
Amplituda	VPD	4
Amplituda	$Q_{cg}$	4
Amplituda	$Q_{og}$	4
Amplituda	$Q_S$	4
NAQ	VPD	4
NAQ	$Q_{cg}$	4
NAQ	$Q_{og}$	4
NAQ	$Q_S$	4
VPD	$Q_{og}$	5
VPD	$Q_S$	5
$Q_{og}$	$Q_S$	5

Pro úplnost je třeba ještě doplnit, jakým způsobem nám parametry oddělují fonace v FaB od CaD. V tomto případě pracujeme s rozdílem hodnot při odčítání CaD od FaB. Výsledky jsou zaznamenány v Tabulce 5.9.

V tomto případě vidíme, že bezchybně rozlišují fonace parametry NAQ,  $Q_C$  a  $Q_{cg}$ , pouze jednu chybně zařazenou hodnotu obdržíme pro koeficient  $Q_S$ . Velmi nevhodné pro analýzu by bylo použití amplitudy, pro kterou jsou rozdíly v poměru 7:8.

Jelikož jsme schopni rozpoznat fonace FaB od CaD již na základě 3 samostatných parametrů, není v tomto případě nutné tvořit jejich kombinace.

Tabulka 5.9: Klasifikace rejstříku na základě jednoho parametru - tabulka počtu kladných a záporných rozdílů při odčítání hodnot pro fonaci CaD od hodnot při fonaci FaB; chybovost určení rejstříku na základě daného parametru

Parametr	Kladné rozdíly	Záporné rozdíly	Chybovost [%]
NAQ	15	0	0.00
$Q_C$	0	15	0.00
$Q_{cg}$	15	0	0.00
$Q_S$	1	14	6.70
VPD	4	11	26.70
$Q_{og}$	11	4	26.70
Amplituda	7	8	46.70



# Diskuse

V rámci výsledků měření jsme se nejdříve věnovali analýze zvuku pro jednotlivé subjekty a typy fonací. Snahou bylo produkovat všechny typy fonace na stejné výšce tónu (tedy na stejné frekvenci) a přibližně stejnou hlasitostí (tedy s podobnou hodnotou A-vážené SPL). Tento požadavek byl relativně dobře splněn pro výšku tónu, kde byly rozdíly pro většinu subjektů pod 10 % (výjimku tvořily 4 subjekty s rozdílem menším než 30 %, tedy rozdílem asi 4 půltónů), ukázal se však hůře splnitelný pro hlasitost, kde v rámci jednoho subjektu byly pozorovány rozdíly až 31 dB. Tyto rozdíly jsou důsledkem různé povahy kmitání hlasivek u rozdílných rejstříků a dyšností a nelze je zcela eliminovat. Hodnoty SPL byly většinou nejvyšší pro CaD. Tento jev může být dán tím, že tato konfigurace glottis bývá nejčastěji při zpěvu využívána právě pro dosažení vysoké intenzity a proto pro některé subjekty mohlo být přirozené tuto fonaci provést s vyšší intenzitou. Naopak nejnižší hodnoty byly zpravidla pro FaB, které je naopak typické pro fonace tišší (Hollien 1974).

Na základě literatury předpokládáme, že hlasivky jsou méně napjaté při fonaci v FaB, zatímco při ostatních fonacích lze pozorovat výraznější napětí. To je pravděpodobně způsobené aktivitou CT a VOC svalu. CT sval napíná hlasivku v podélném směru a uplatňuje se při zvyšování frekvence v hlavovém rejstříku (Hirano 1969, 1970). Naopak kombinace CT a VOC svalu by měla být uplatňována při fonaci v hrudním rejstříku. Zároveň pro addukci chrupavčité části je taktéž potřebná aktivita PCA a IA svalů, které taktéž mohou ovlivňovat napětí hlasivky.

S addukcí chrupavčité části glottis také souvisí skutečnost, že posteriorní šterbina je výraznější pro dyšné fonace FaB a CaB. Tento jev je opět ovlivněn neaktivitou či nízkou aktivitou PCA a IA svalu. U FaB velmi často taktéž pozorujeme, že hlasivky se plně neuzavírají ani ve středu blanité části (viz kymogramy). Důvodem bude opět pravděpodobně malá aktivita VOC svalu.

Jak z analýzy pomocí ordinální škály, tak na základě oddělených klasifikací dyšnosti a rejstříku můžeme pozorovat, že kvocient  $Q_C$  dosahuje nejvyšších hodnot při CaD a nejnižších při FaB. Zároveň jsme také určili, že  $Q_C$  také poměrně dobře odděluje hrudní rejstřík od falzetu a pro námi změřené subjekty bezchybně odděluje fonace s abdukcí a addukcí chrupavčité části glottis. Tato data potvrzují vizuální poznatky o pozorovaných fonacích. Zároveň jsou v souladu s publikacemi Alku a Vilkmána (1996) a s prací Lehouxe a kol. (2022). Alku a Vilkmán (1996) na místo  $Q_C$  uvažovali  $Q_O$ , který měl opačný průběh než námi analyzovaný  $Q_C$ , což je v souladu s definicí těchto kvocientů.

Pro odlišení hrudního rejstříku od falzetu a dyšné fonace od nedyšné nám relativně dobře sloužily parametry NAQ a  $Q_{cg}$ . Jak při přechodu z falzetu do hrudního rejstříku, tak při přechodu z dyšné do tlačené fonace měly oba kvocienty tendenci klesat pro většinu subjektů. Fyzicky tedy dochází k tomu, že hlasivky při těchto přechodech zvyšují svou rychlost uzavírání. Tento jev bude souviset opět zvýšenou svalovou aktivitou a napětím hlasivek. Změnu  $Q_{cg}$  při přechodu mezi rejstříky studoval i Alku a Vilkmán (1996), kteří došli k podobným výsledkům. Lehoux a kol. (2022) taktéž porovnával NAQ a  $Q_{cg}$  ve dvou rejstřících a jeho závěry jsou taktéž srovnatelné s našimi. Při analýze, která zvláště hledala parametry rozpoznávající rejstřík a dyšnost, jsme pozorovali, že při tvorbě trojic parametrů umožňujících rozpoznání rejstříku figuroval ve většině z nich NAQ. Naopak ve všech dvojicích parametrů, které oddělovaly fonaci dyšnou od tlačené, se vyskytoval kvocient  $Q_{cg}$ . Tyto výsledky mohou naznačovat, že NAQ by mohl být vhodnější při analýze rejstříku, kdežto  $Q_{cg}$  při analýze dyšnosti.

Co se týče kvocientu  $Q_{og}$ , výsledky naznačují, že při přechodu z falzetu do hrudního rejstříku a se zmenšující se dyšností kvocient spíše klesá, a tedy relativní doba otevírání hlasivek se zkracuje. V tomto případě jsou výsledky ovšem méně jednoznačné.

Parametry  $Q_S$ , amplituda a VPD jsou pro rozlišení typů fonace pro naše subjekty nejméně vhodné. Nejednoznačné výsledky pro amplitudu by mohly být dány různou vzdáleností laryngoskopu od hlasivek při různých typech fonací - tento parametr pracuje pouze s počtem pixelů v daném rozlišení a není zde nadefinovaná žádná kalibrační vzdálenost, ke které by byly hodnoty vztaženy.

Lehoux a kol. (2022) zjistili, že VPD je vyšší pro hrudní rejstřík. Problém s měřením vertikálního fázového rozdílu spočívá v omezení laryngoskopických metod, které pozorují hlasivky seshora. V určitých případech u některých subjektů došlo k tomu, že spodní okraj hlasivky byl velmi špatně vidět, nebo nebyl vidět vůbec. Jelikož VPD je nadefinován jako fázový rozdíl horního a spodního okraje, v případě, že spodní okraj vidíme nedostatečně, je získávání hodnot VPD velmi přibližné. Tento problém bychom mohli obejít využitím jiné metody určování VPD, např. pomocí EGG (Herbst 2019) nebo ultrasonografie (Jing a kol. 2018), to však nebylo možné v rámci této práce uskutečnit.

Veškeré předchozí výsledky popisují rozdíly buď mezi hrudním rejstříkem a falzetem v rámci podobné dyšnosti, nebo mezi fonací dyšnou a nedyšnou v rámci stejného rejstříku. Cílem této práce bylo ovšem taktéž najít takový parametr nebo kombinaci parametrů, které by nám odlišily i fonace odlišující se zároveň rejstříkem i dyšností.

Rozdíl v hodnotách parametrů pro rozlišení FaB od CaD byl velmi zřetelný. Bezchybně fonace rozlišíme při použití NAQ,  $Q_C$  nebo  $Q_{cg}$ . Tento výsledek není překvapivý, jelikož při přechodu z FaB do CaD dochází jak k addukci chrupavčité části zejména pomocí svalů LCA a IA, tak ke zvýšení addukce části blanité, která je způsobena zvýšenou aktivitou VOC svalu.

Pro rozlišení parametru FaD a CaB jsme nenašli žádný parametr ani jejich kombinaci, která by nám fonace odlišovala bezchybně. V případě dvojic jsme našli 2 takové dvojice, které by nám oddělily data s dvěma chybami na 15 hodnot, konkrétně  $Q_C$  v kombinaci s amplitudou a VPD. Jak už ovšem bylo uvedeno, hodnoty pro amplitudu a VPD mohou být zatížené chybou související se způsobem záznamu dat.

Důvod toho, proč je komplikované fonace FaD a CaB oddělit, pravděpodobně souvisí se skutečností, že při tvoření kymogramů jsme se soustředili především na parametry charakteristické pro střed blanité části glottis. Jelikož hlavní fyziologický rozdíl fonací spočívá v addukci chrupavčité části, bylo by vhodné v budoucnu provést výpočet parametrů např. pro celou plochu glottis. Tento přístup volil pro výpočty některých parametrů Lehoux a kol. (2022), nese s sebou ovšem velké množství komplikací např. v přítomnosti hlasové šterbiny u některých fonací. Další možností by mohlo být použití EGG, které opět zaznamenává data vztahující se k celé ploše hlasivek.

# Závěr

Tato práce navazovala na výzkum Ch. Herbsta a kol. (2009, 2011), kteří jako první nadefinovali čtyři základní konfigurace glottis při zpěvu - abdukovaný falzet (FaB), addukovaný falzet (FaD), abdukovaný hrudní rejstřík (CaB) a addukovaný hrudní rejstřík (CaD). V rámci této diplomové práce byla zanalyzována obrazová data pocházející z původního výzkumu Herbsta a kol. (2011) pomocí nadefinovaných parametrů - kvocientu uzavření ( $Q_C$ ), amplitudy, kvocientů šikmosti ( $Q_S$ ), otevírání ( $Q_{og}$ ) a uzavírání ( $Q_{cg}$ ), normalizovaného kvocientu amplitud (NAQ) a vertikálního fázového rozdílu (VPD). Analýza probíhala na 15 subjektech, z nichž u 13 subjektů původního experimentu byla data zaznamenávána pomocí videokymografie, u 2 dalších poté pomocí vysokorychlostní videolaryngoskopie a videokymogramy sloužící k následné analýze byly vygenerovány digitálně. Cílem parametrizace kmitů bylo nalezení takového parametru nebo jejich kombinace, která by nám umožnila rozlišit jednotlivé typy fonací.

Pro nalezení kýžených parametrů jsme využívali dvou metod. Nejdříve jsme seřadili na základě pořadí mediánů parametrů pro každý subjekt fonace podle ordinální škály, která nám umožnila porovnávat hodnoty parametrů mezi subjekty navzájem. Na základě této metody jsme pozorovali, že koeficient  $Q_C$  dobře odděluje jednotlivé rejstříky a také nám umožňuje rozpoznat, došlo-li k addukci chrupavčité části glottis. Hodnoty analýzy pro amplitudu,  $Q_S$  a VPD měly velmi výrazný rozptyl, proto usuzujeme, že v rámci změřených dat nejsou vhodné pro odlišení jednotlivých fonací. Hodnoty  $Q_{og}$  měly opět výrazný rozptyl, avšak naznačují, že s rostoucí addukcí blanité nebo chrupavčité části glottis dochází k růstu rychlosti otevírání hlasivky. Kvocienty  $Q_{cg}$  a NAQ měly podle předpokladů podobný průběh. Ačkoli i zde bylo rozpětí hodnot výrazné, usuzujeme, že jak při přechodu z falzetu do hrudního rejstříku, tak s addukcí chrupavčité části dochází k poklesu hodnot a tedy k rychlejšímu uzavírání hlasivek.

Na základě druhé metody jsme se snažili pomocí rozdílů hodnot klasifikovat fonace podle jednoho parametru nebo kombinace parametrů. Nejdříve jsme separátně hodnotili, které parametry odlišují rejstříky s podobnou dyšností. Nejvíce vhodný byl podle analýzy  $Q_C$ , což pouze potvrdilo výsledky první metody. Chybovost do 25 % měly taktéž hodnoty NAQ,  $Q_{og}$  a  $Q_{cg}$ . V případě kombinace parametrů jsme se zaměřovali pouze na ty kombinace, které nám fonace rozdělily bezchybně. V těchto kombinacích se nejčastěji vyskytovaly NAQ a  $Q_{og}$ , v žádné kombinaci nebyl využit VPD. Stejným postupem jsme klasifikovali fonace na základě dyšnosti při stejném rejstříku. V tomto případě bezchybně data odděloval  $Q_C$ , velmi vysokou citlivost měl taktéž  $Q_{cg}$ , příp. NAQ. Pro analýzu byly nevhodné parametry VPD a amplituda. I zde jsme hledali kombinace parametrů bezchybně odlišující typy fonací a vyjma všech zřejmých kombinací s  $Q_C$  jsme určili, že vhodné jsou taktéž kombinace s parametrem  $Q_{cg}$ .

Při porovnávání fonací v různém rejstříku s odlišnou dyšností se nám nepodařilo nalézt parametr ani kombinaci parametrů, které by nám bezchybně oddělovaly fonace FaD a CaB. Nejlepší výsledek jsme obdrželi pro  $Q_C$  s chybovostí 20 % a pro kombinace chybovost neklesla pod 13 %. Naopak fonace FaB a CaD velmi dobře rozlišovaly podle očekávání na základě svých hodnot parametry NAQ,  $Q_C$  a  $Q_{cg}$ .

# Seznam literatury

- Alku P., Vilkman E. (1996) A Comparison of Glottal Voice Source Quantification Parameters in Breathy, Normal and Pressed Phonation of Female and Male Speakers. *Folia Phoniatrica et Logopaedica* **48**, 240-254.
- Alku P., Bäckström T., Vilkman E. (2002) Normalized amplitude quotient for parametrization of the glottal flow. *The Journal of the Acoustical Society of America* **112**, 701-710.
- Camacho A., Harris J. (2008) A sawtooth waveform inspired pitch estimator for speech and music. *The Journal of the Acoustical Society of America* **124**, 1638-1652.
- Fabre P. (1957) Un procédé électrique percutané d'inscription de l'accolement glottique au cours de la phonation: glottographie de haute fréquence; premiers résultats. *Bulletin de l'Académie Nationale de Médecine* **141**, 66-69.
- Farnsworth D.W. (1940) High-speed motion pictures of the human vocal cords. *Bell Laboratories Record* **18**, 203-208.
- Fex S., Löfqvist A., Schalén L. (1991) Videostroboscopic evaluation of glottal open quotient, related to some acoustic parameters. In: *Vocal fold physiology: acoustic, perceptual, and physiological aspects of voice mechanisms*. (Gauffin J., Hammarberg B., eds.), Singular Publishing Group, San Diego, California, 273-278.
- Herbst C.T., Ternström S., Švec J.G. (2009) Investigation of four distinct glottal configurations in classical singing — A pilot study. *The Journal of the Acoustical Society of America* **125**, EL104-EL109.
- Herbst C.T., Qiu Q., Schutte H.K., Švec J.G. (2011) Membranous and cartilaginous vocal fold adduction in singing. *The Journal of the Acoustical Society of America* **129**, 2253-2262.
- Herbst C.T. (2012) *Investigations of glottal configurations in singing*. Dizertační práce, UP Olomouc, Česká republika.
- Herbst C.T., Švec J.G. (2014) Adjustment of glottal configurations in singing. *Journal of Singing* **70**, 301-308.
- Herbst C.T. (2019) Electroglottography – an update. *Journal of Voice* **34**, 503-526.
- Hirano M., Ohala J., Vennard W. (1969) The function of laryngeal muscles in regulating fundamental frequency and intensity of phonation. *Journal of Speech and Hearing Research* **12**, 616-628.
- Hirano M., Vennard W., Ohala J. (1970) Regulation of register, pitch and intensity of voice. *Folia Phoniatrica et Logopaedica* **22**, 1-20.
- Hirano M. (1974) Morphological Structure of the Vocal Cord as a Vibrator and its Variations. *Folia Phoniatrica et Logopaedica* **26**, 89-94.
- Hirano M. (1977) Structure and vibratory behavior of the vocal folds. In: *Dynamic aspects of speech production*. (Sawashima M., Fanklin S.C.), University of Tokyo Press, Tokyo, Japonsko, 13-30.
- Hirano M., Kurita S., Nakashima T. (1981) The structure of the vocal folds. In: *Vocal fold physiology*. (Stevens K.N., Hirano M.), University of Tokyo Press, Tokyo, Japonsko, 33-41.
- Hirano M., Bless D.M. (1993) *Videostroboscopic examination of the larynx*. Singular Publishing Group, San Diego, U.S.A, 249 stran.
- Hirano M. (2009) Stroboscopic Examination of the Normal Larynx. In: *Neurologic Disorders of the Larynx*. 2nd edition. (Blitzer A., Brin M.F., Ramig L.O.), Thieme Medical Publishers, Inc., New York, U.S.A, 85-88.
- Hollien H. (1974) On vocal registers. *Journal of Phonetics* **2**, 125-143.
- Jiang J., Zhang Y., Kelly M.P., Bieging E.T., Hoffman M.R. (2008) An automatic method to quantify mucosal waves via videokymography. *Laryngoscope* **118**, 1504-1510.

- Jing B., Ge Z., Wu L., Wang S., Wana M. (2018) Visualizing the mechanical wave of vocal fold tissue during phonation using electroglottogram-triggered ultrasonography. *Journal of the Acoustical Society of America* **143**, EL425-EL429.
- Kumar S.P., Švec J.G. (2019) Kinematic model for simulating mucosal wave phenomena on vocal folds. *Biomedical Signal Processing and Control* **49**, 328-337.
- Kumar S.P., Phadke K.V., Vydrová J., Novozámský A., Zita A., Zitová B., Švec J.G. (2020) Visual and automatic evaluation of vocal fold mucosal waves through sharpness of lateral peaks in high-speed videokymographic images. *Journal of Voice* **34**, 170-178.
- Kumar S.P., Phadke K.V., Vydrová J., Novozámský A., Zita A., Zitová B., Švec J.G. (2020) Visual and automatic evaluation of vocal fold mucosal waves through sharpness of lateral peaks in high-speed videokymographic images. *Journal of Voice* **34**, 170-178.
- Lehoux H., Popeil.L., Švec J.G. (2022) Laryngeal and Acoustic Analysis of Chest and Head Registers Extended Across a Three-Octave Range: A Case Study. *Journal of Voice*.
- Lehoux H., Herbst C.T., Dobiáš M., Švec J.G. (2023) Frequency jumps in excised larynges in anechoic conditions: A pilot study. *Journal of Sound and Vibration*. **551**.
- Miller D.G., Schutte H.K. (1985) Characteristic patterns of sub- and supraglottal pressure variations within the glottal cycle. In: *Transcripts of the XIIIth symposium: Care of the professional voice, New York, 1984*. (Van Lawrence L.), The Voice Foundation, New York, U.S.A, 70-75.
- Novozámský A., Sedlář J., Zita A., Šroubek F., Flusser J., Švec J.G., Vydrová J., Zitová B. (2015) Image analysis of videokymographic data. *2015 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, 78-82.
- Qiu Q., Schutte H.K. (2006) A new generation videokymography for routine clinical vocal-fold examination. *Laryngoscope* **116**, 1824-1828.
- Qiu Q., Schutte H.K. (2007) Real-time kymographic imaging for visualizing human vocal-fold vibratory function. *Review of Scientific Instruments* **78**.
- Schlegel P., Stingl M., Kunduk M., Kniesburges S., Bohr Ch., Döllinger M. (2019) Dependencies and Ill-designed Parameters Within High-speed Videoendoscopy and Acoustic Signal Analysis. *Journal of Voice* **33**, 811.e1-811.e12.
- Schutte H.K., Miller D.G. (1988) Resonanzspiele der Gesangsstimme in ihren Beziehungen zu supra- und subglottalen Druckverläufen: Konsequenzen für die Stimmbildungstheorie. [Play of Resonances in the Singing Voice in the Supra- and Subglottal Pressure Changes: Consequences for the Theory of Voice Production]. *Folia Phoniatria* **40**, 65-73.
- Sovák M. (1945) *Kmitání hlasivek ve světle laryngostroboskopie: fyziologická studie fonačního mechanismu*. 1. vydání. Česká akademie věd a umění, Praha, Česká republika, 89 stran.
- Štanclová Z. (2021) *Vztahy mezi parametry kmitání hlasivek a intenzitou hlasu: Studie zdravé ženy pomocí vysokorychlostní videolaryngoskopie*. Bakalářská práce, UP v Olomouci, Česká republika.
- Švec J. (1996) *Studium mechanicko-akustických vlastností lidského hlasu*. Dizertační práce, UP Olomouc, Česká republika.
- Švec J.G., Schutte H.K. (1996) Videokymography: High-speed line scanning of vocal fold vibration. *Journal of Voice* **10**, 201-205.
- Švec J.G., Miller D.G. (1999) On pitch jumps between chest and falsetto registers in voice: data from living and excised human larynges. *Journal of the Acoustical Society of America* **106**, 1523-1531.
- Švec J., Granqvist S. (2018) Tutorial and guidelines on measurement of sound pressure level in voice and speech. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research* **61**, 441-461.
- Švec J. (2019) *Základní a aplikovaný výzkum tvorby lidského hlasu*. Habilitační práce, UP Olomouc, Česká republika.
- Švec J.G., Schutte H.K., Chen C.J., Titze I.R. (2021) Integrative Insights into the Myoelastic-Aerodynamic Theory and Acoustics of Phonation. Scientific Tribute to Donald G. Miller. *Journal of Voice*.
- Timcke R., Von Leden H., Moore P. (1958) Laryngeal Vibrations: Measurements of the Glottic Wave: Part I. Physiologic Variations. *Archives of Otolaryngology - Head and Neck Surgery* **68**, 1-19.
- Titze I.R. (1988) The physics of small-amplitude oscillation of the vocal folds. *The Journal of the Acoustical Society of America* **83**, 1536-1552.
- Titze I., Jiang J., Hsiao T. (1993) Measurement of mucosal wave propagation and vertical phase difference in vocal fold vibration. *Annals of Otology, Rhinology & Laryngology* **102**, 58-63.
- Titze I.R. (2000) *Principles of Voice Production*. 2nd printing, National Center for Voice and Speech, Iowa City, U.S.A, 407 stran.

- van den Berg J. (1958) Myoelastic-aerodynamic theory of voice production. *Journal of speech and hearing research* **1**, 227-244.
- Vilkman E., Alku P., Vintturi J. (2002) Dynamic extremes of voice in the light of time domain parameters extracted from the amplitude features of glottal flow and its derivative. *Folia Phoniatrica et Logopaedica* **54**, 144-157.
- Woo P. (1996) Quantification of Videostrobolaryngoscopic Findings-Measurements of the Normal Glottal Cycle. *The Laryngoscope* **106**, 1-27.
- Yokonishi H., Imagawa H., Sakakibara K.I., Yamauchi A., Nito T., Yamasoba T., Tayama N. (2016) Relationship of Various Open Quotients with Acoustic Property, Phonation Types, Fundamental Frequency, and Intensity. *Journal of Voice* **30**, 145-157.
- Zita A., Novozámský A., Zitová B., Šorel M., Herbst C.T., Vydrová J., Švec J.G. (2022) Videokymogram Analyzer Tool: Human-computer comparison. *Biomedical Signal Processing and Control* **78**, 103801-103812.

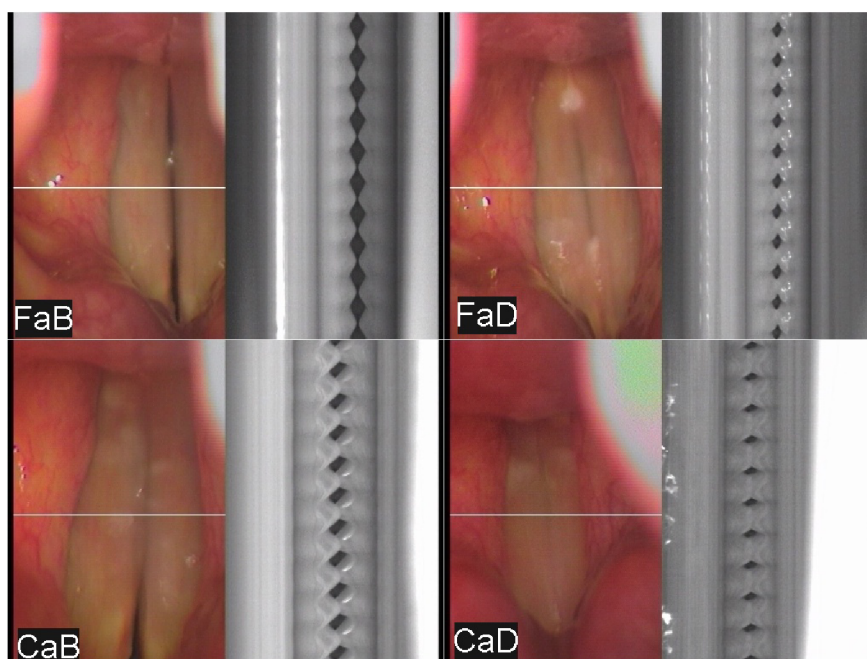
## Další zdroje

- Audacity. [online]. [cit. 01.05.2021]. Dostupné z: <https://www.audacityteam.org/>.
- Herbst C.T. CogBioCreateKymogram (computer software). Převzato z <http://www.christian-herbst.org/index.php?page=fiji> (duben 2021).
- ImageJ. [online]. [cit. 01.5.2021]. Dostupné z: <https://imagej.net/Welcome>
- Kumar S. P., Lehoux H., Sandhanakrishnan R., Švec J. G. (2021). Matlab scripts for analysis of kymographic vocal fold contours. Department of Experimental Physics. Palacký University, Faculty of Science. Czechia.
- Photo measure. [online]. [cit. 02.5.2023]. Dostupné z: <https://eleif.net/photomeasure>.

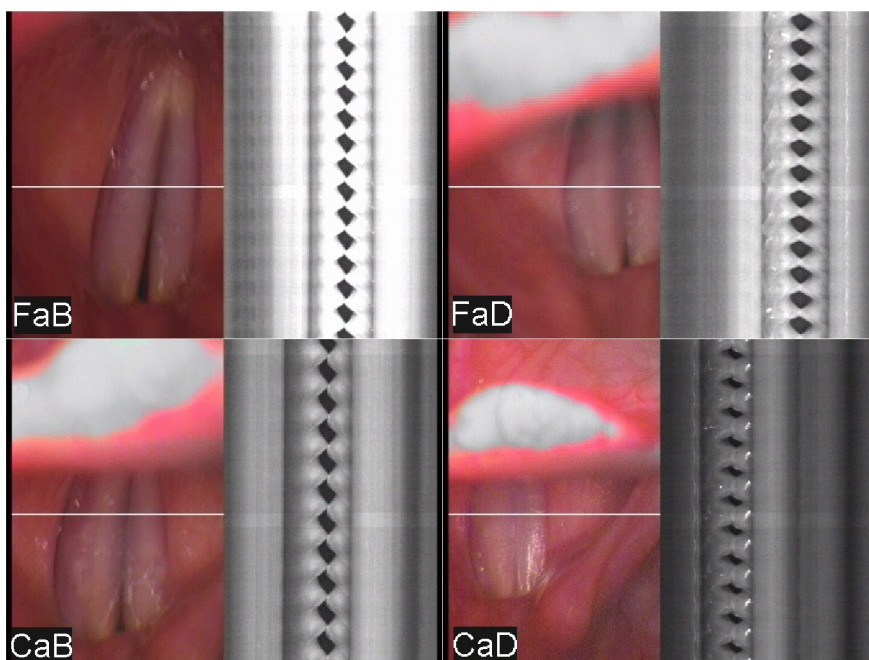


# Přílohy

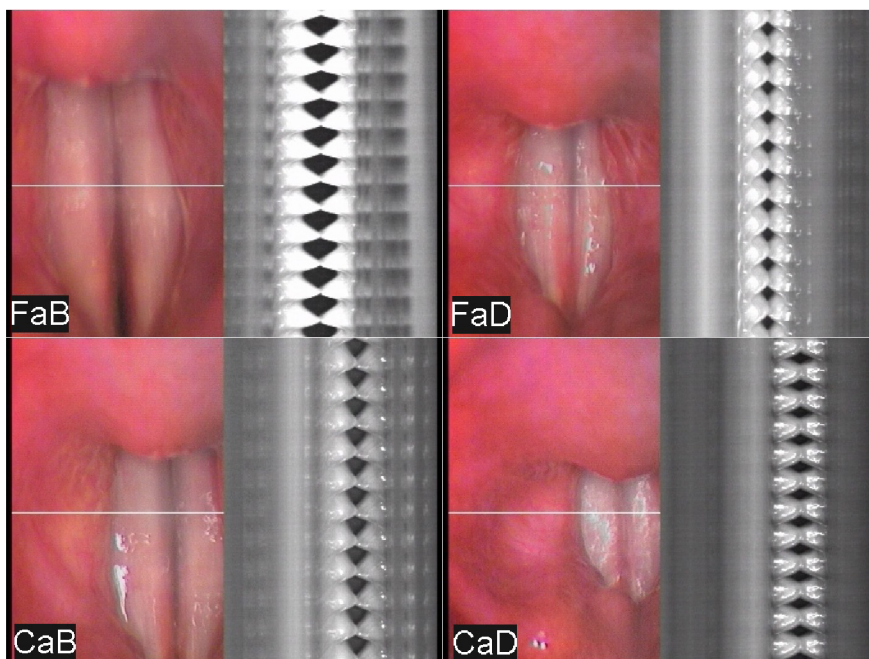
Příloha 1: Záznamy pro subjekt č.1 (muž, DM) z videokymografické kamery: Hlasivky a příslušné kymogramy: Hlasivky a příslušné kymogramy při fonacích FaB (abdukovaný falzet), FaD (addukovaný falzet), CaB (abdukovaný hrudní rejstřík), CaD (addukovaný hrudní rejstřík)



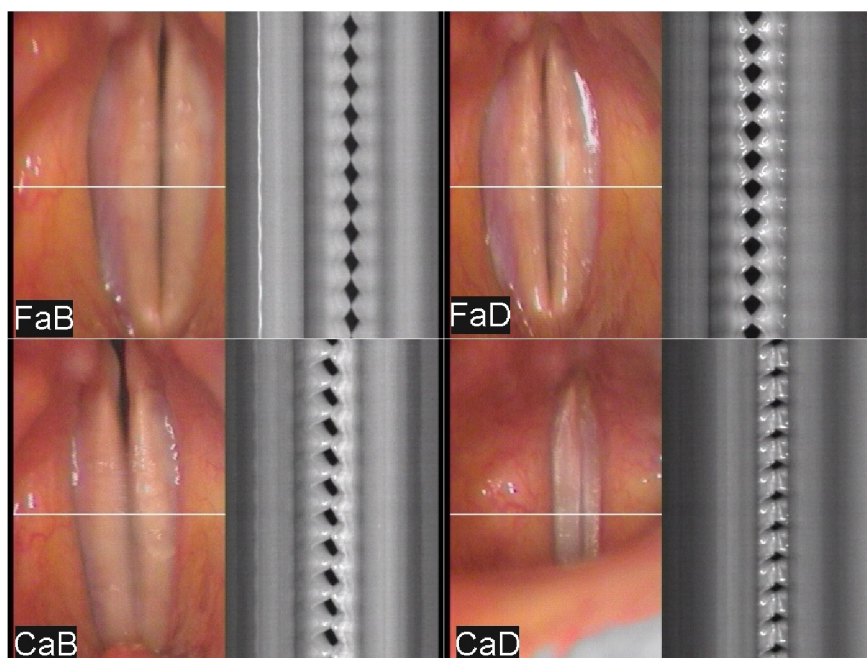
Příloha 2: Záznamy pro subjekt č.3 (žena, HM) z videokymografické kamery: Hlasivky a příslušné kymogramy: Hlasivky a příslušné kymogramy při fonacích FaB (abdukovaný falzet), FaD (addukovaný falzet), CaB (abdukovaný hrudní rejstřík), CaD (addukovaný hrudní rejstřík)



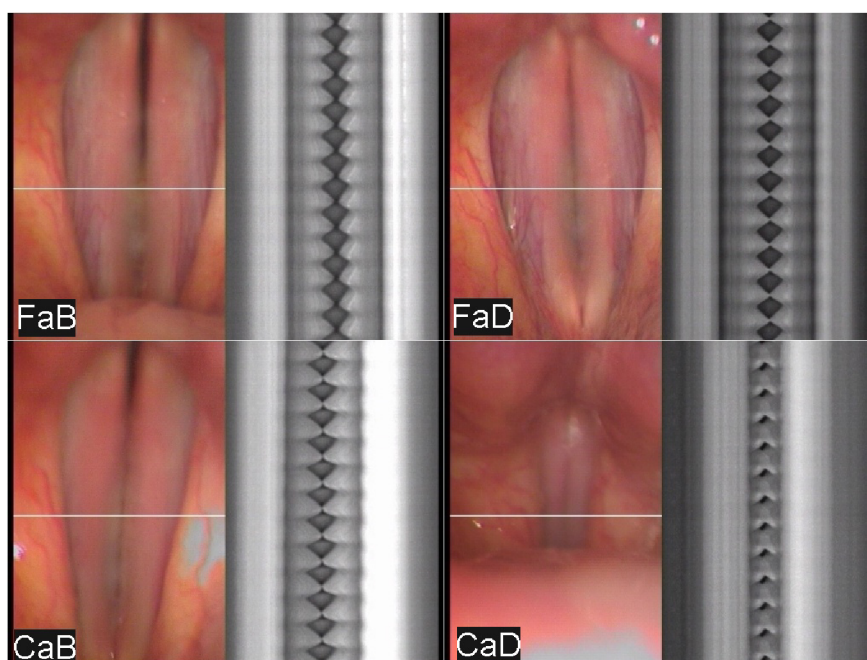
Příloha 3: Záznamy pro subjekt č.4 (muž, HS) z videokymografické kamery: Hlasivky a příslušné kymogramy: Hlasivky a příslušné kymogramy při fonacích FaB (abdukovaný falzet), FaD (addukovaný falzet), CaB (abdukovaný hrudní rejstřík), CaD (addukovaný hrudní rejstřík)



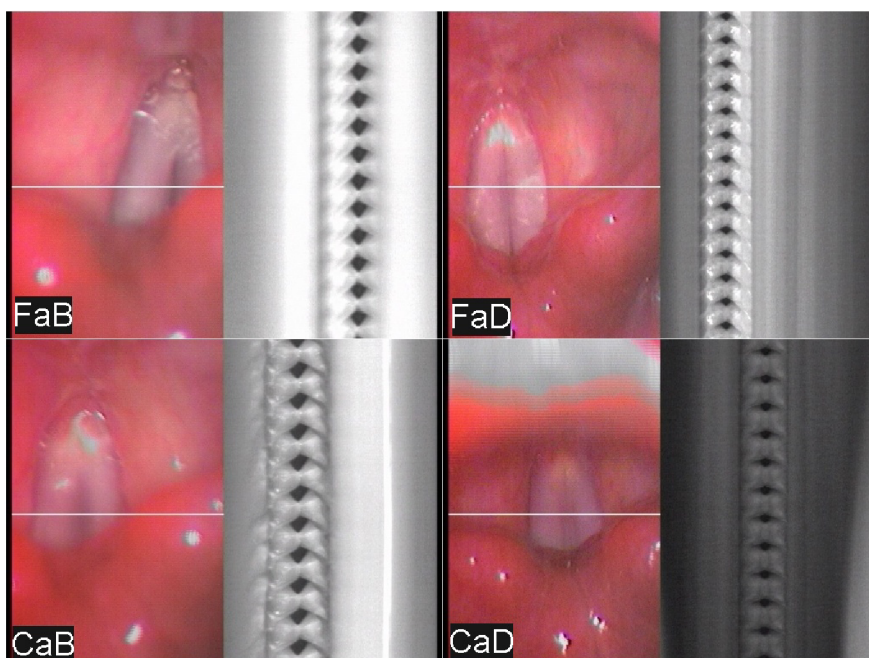
Příloha 4: Záznamy pro subjekt č.5 (muž, CH) z videokymografické kamery: Hlasivky a příslušné kymogramy: Hlasivky a příslušné kymogramy při fonacích FaB (abdukovaný falzet), FaD (addukovaný falzet), CaB (abdukovaný hrudní rejstřík), CaD (addukovaný hrudní rejstřík)



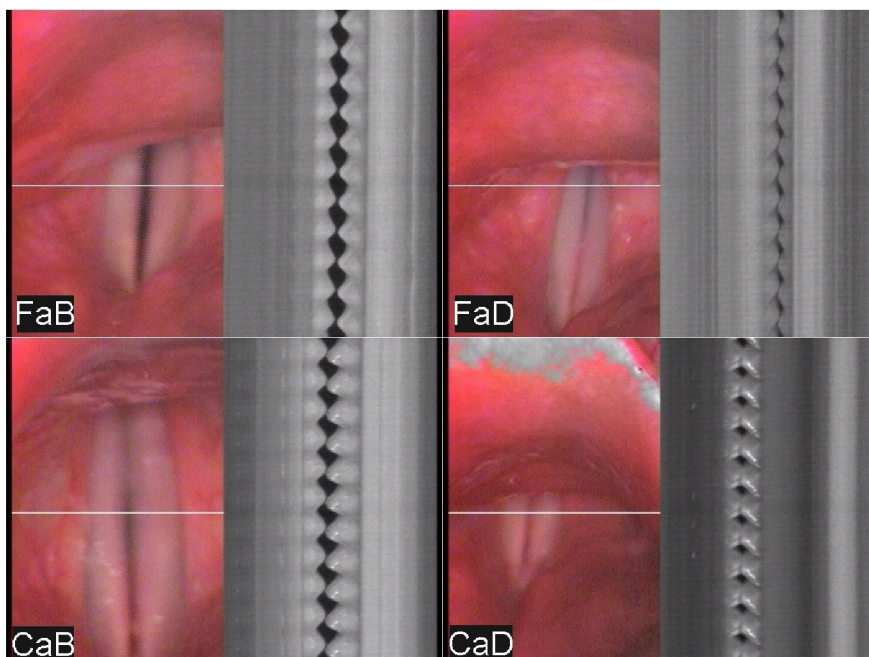
Příloha 5: Záznamy pro subjekt č.6 (muž, JS) z videokymografické kamery: Hlasivky a příslušné kymogramy: Hlasivky a příslušné kymogramy při fonacích FaB (abdukovaný falzet), FaD (addukovaný falzet), CaB (abdukovaný hrudní rejstřík), CaD (addukovaný hrudní rejstřík)



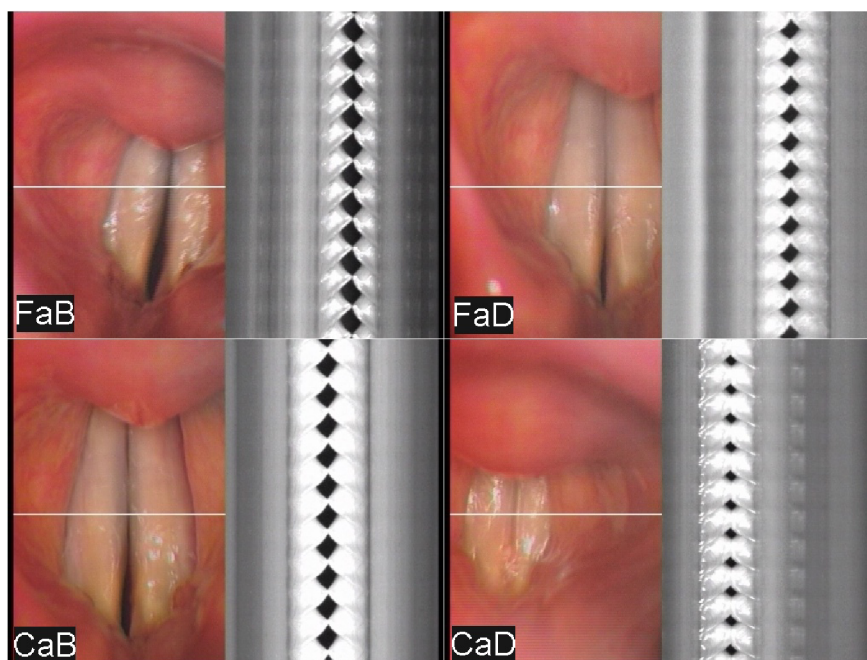
Příloha 6: Záznamy pro subjekt č.7 (žena, KP) z videokymografické kamery: Hlasivky a příslušné kymogramy: Hlasivky a příslušné kymogramy při fonacích FaB (abdukovaný falzet), FaD (addukovaný falzet), CaB (abdukovaný hrudní rejstřík), CaD (addukovaný hrudní rejstřík)



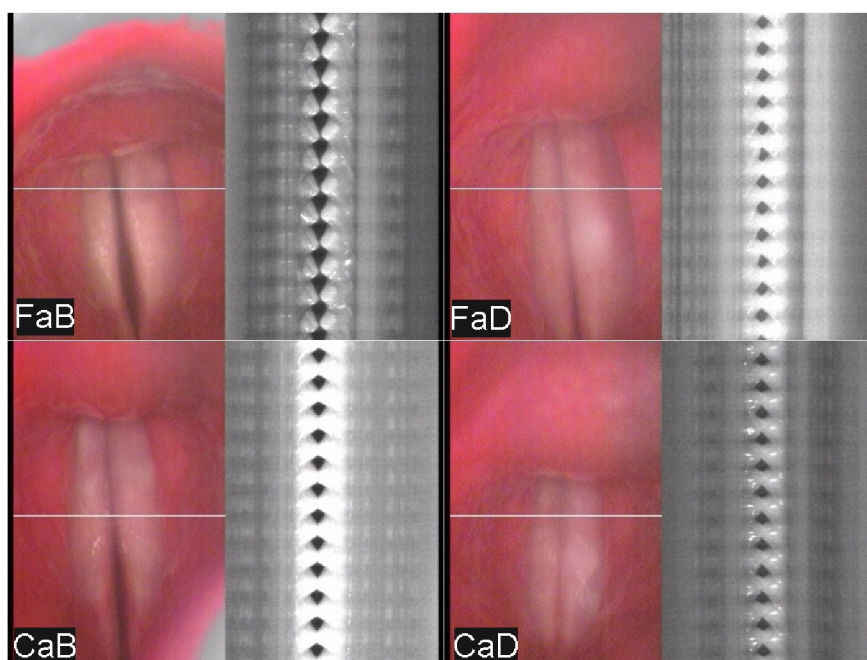
Příloha 7: Záznamy pro subjekt č.8 (muž, MD) z videokymografické kamery: Hlasivky a příslušné kymogramy: Hlasivky a příslušné kymogramy při fonacích FaB (abdukovaný falzet), FaD (addukovaný falzet), CaB (abdukovaný hrudní rejstřík), CaD (addukovaný hrudní rejstřík)



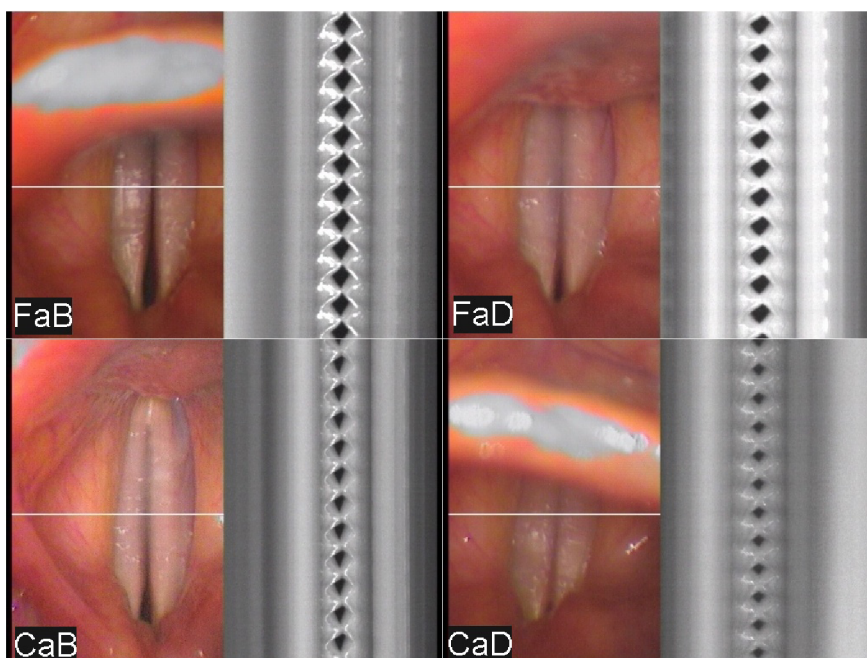
Příloha 8: Záznamy pro subjekt č.9 (žena, ME) z videokymografické kamery: Hlasivky a příslušné kymogramy: Hlasivky a příslušné kymogramy při fonacích FaB (abdukovaný falzet), FaD (addukovaný falzet), CaB (abdukovaný hrudní rejstřík), CaD (addukovaný hrudní rejstřík)



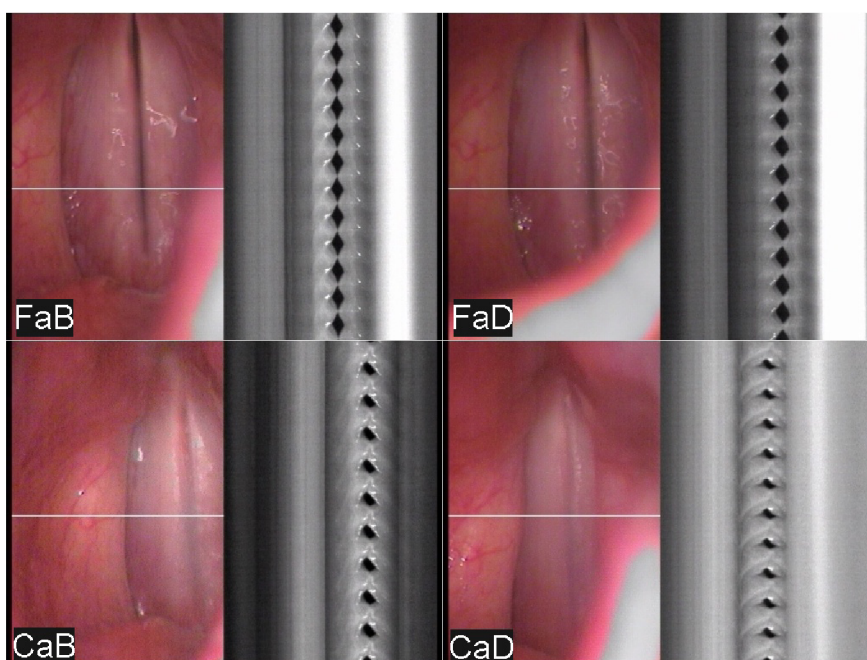
Příloha 9: Záznamy pro subjekt č.10 (muž, MK) z videokymografické kamery: Hlasivky a příslušné kymogramy: Hlasivky a příslušné kymogramy při fonacích FaB (abdukovaný falzet), FaD (addukovaný falzet), CaB (abdukovaný hrudní rejstřík), CaD (addukovaný hrudní rejstřík)



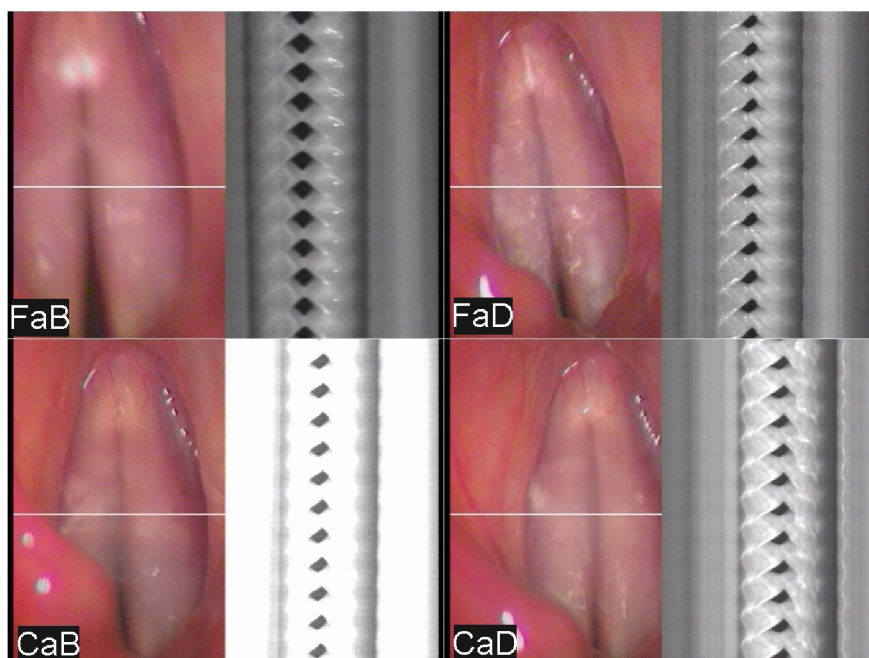
Příloha 10: Záznamy pro subjekt č.11 (žena, MM) z videokymografické kamery: Hlasivky a příslušné kymogramy: Hlasivky a příslušné kymogramy při fonacích FaB (abdukovaný falzet), FaD (addukovaný falzet), CaB (abdukovaný hrudní rejstřík), CaD (addukovaný hrudní rejstřík)



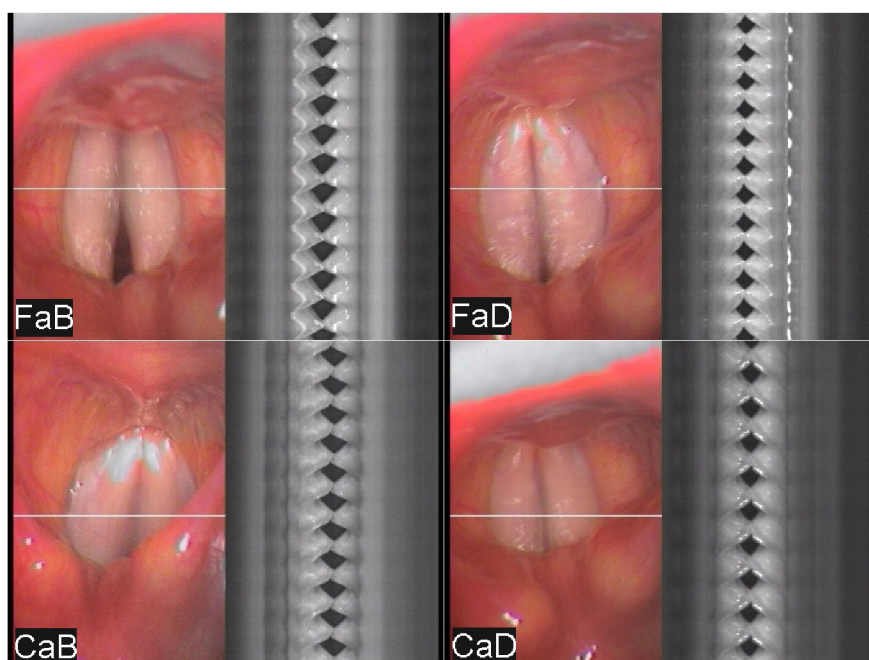
Příloha 11: Záznamy pro subjekt č.12 (muž, QQ) z videokymografické kamery: Hlasivky a příslušné kymogramy: Hlasivky a příslušné kymogramy při fonacích FaB (abdukovaný falzet), FaD (addukovaný falzet), CaB (abdukovaný hrudní rejstřík), CaD (addukovaný hrudní rejstřík)



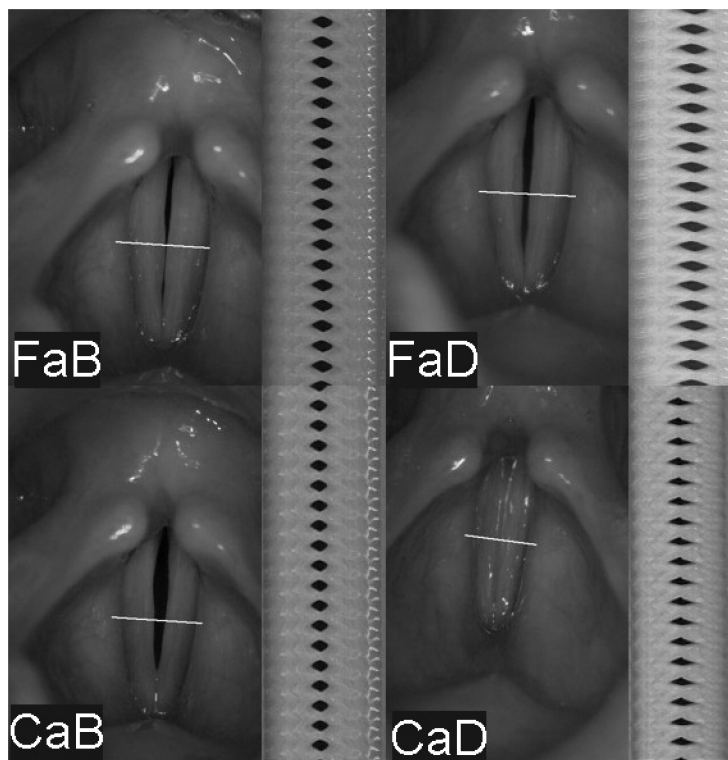
Příloha 12: Záznamy pro subjekt č.13 (žena, RW) z videokymografické kamery: Hlasivky a příslušné kymogramy: Hlasivky a příslušné kymogramy při fonacích FaB (abdukovaný falzet), FaD (addukovaný falzet), CaB (abdukovaný hrudní rejstřík), CaD (addukovaný hrudní rejstřík)



Příloha 13: Záznamy pro subjekt č.14 (žena, WB) z videokymografické kamery: Hlasivky a příslušné kymogramy: Hlasivky a příslušné kymogramy při fonacích FaB (abdukovaný falzet), FaD (addukovaný falzet), CaB (abdukovaný hrudní rejstřík), CaD (addukovaný hrudní rejstřík)

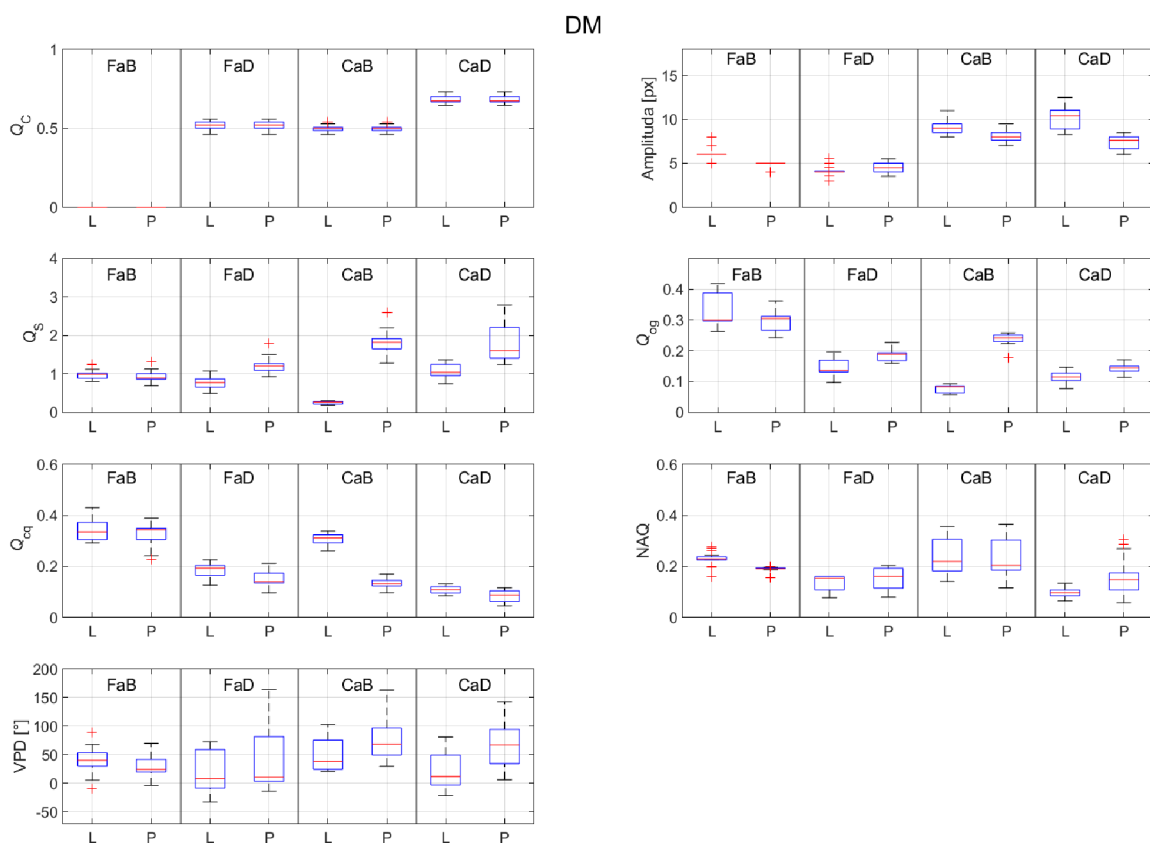


Příloha 14: Záznamy pro subjekt č.15 (žena, ZS) z videokymografické kamery: Hlasivky a příslušné kymogramy: Hlasivky a příslušné kymogramy při fonacích FaB (abdukovaný falzet), FaD (addukovaný falzet), CaB (abdukovaný hrudní rejstřík), CaD (addukovaný hrudní rejstřík)

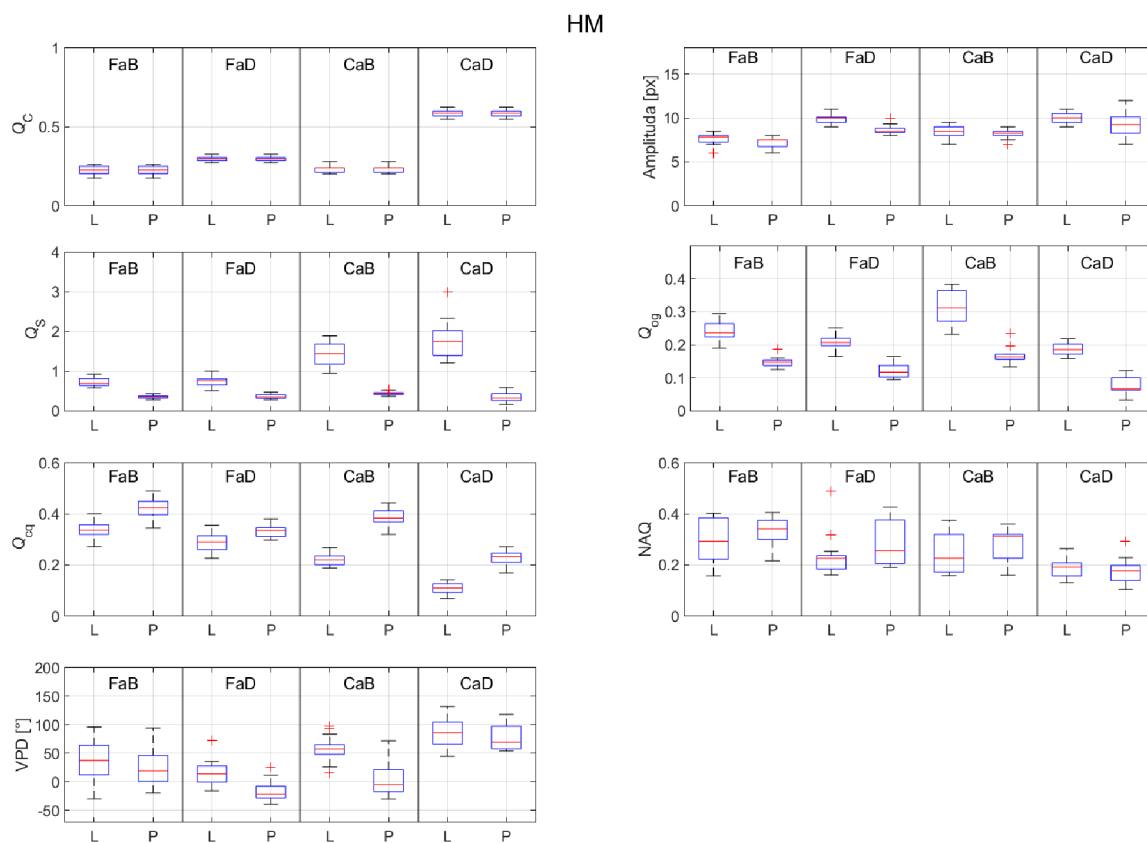




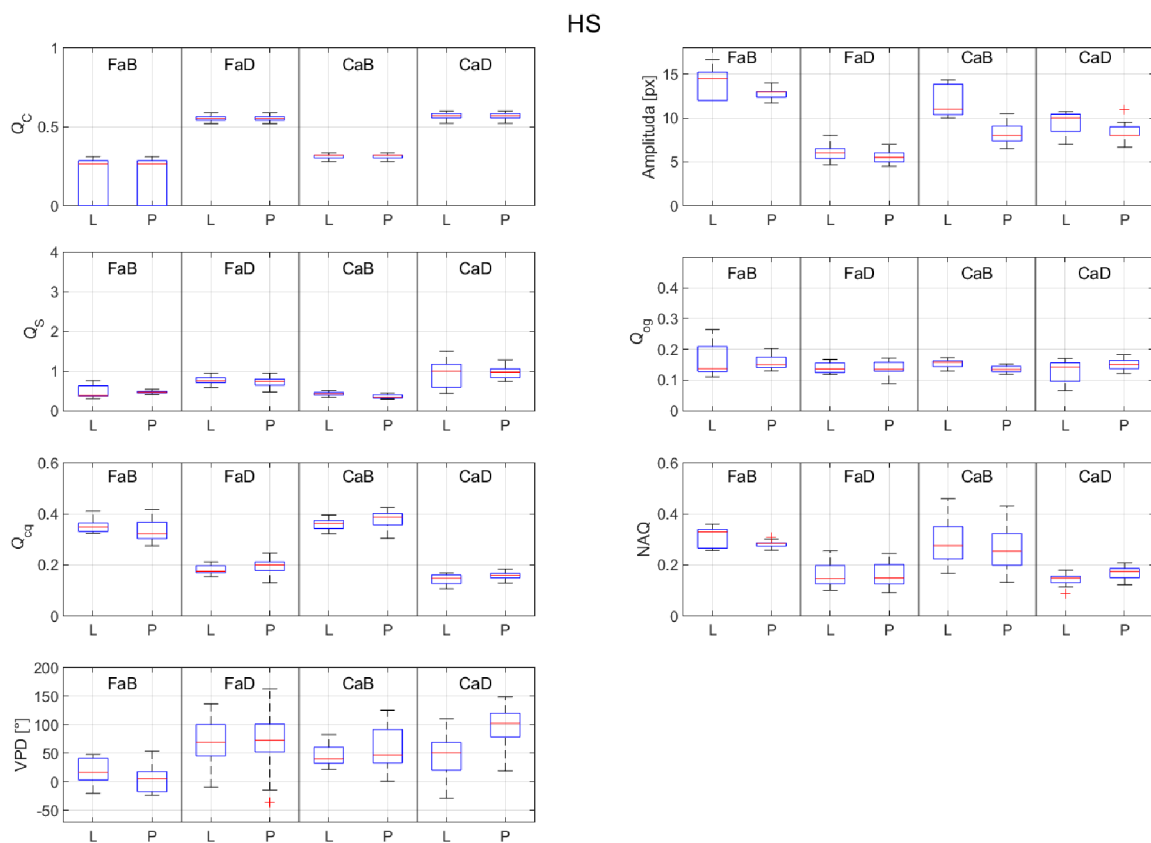
Příloha 15: Výsledky pro subjekt č.1 (muž, DM): Grafy závislosti kvocientu uzavření  $Q_C$ , amplitudy, kvocientů šikmosti  $Q_S$ , otevírání  $Q_{og}$ , uzavírání  $Q_{cg}$ , normalizovaného kvocientu amplitud (NAQ) a vertikálního fázového rozdílu VPD na typu fonace FaB (abdukovaný falzet), FaD (addukovaný falzet), CaB (abdukovaný hrudní rejstřík), CaD (addukovaný hrudní rejstřík) pro pravou (P) a levou (L) hlasivku.



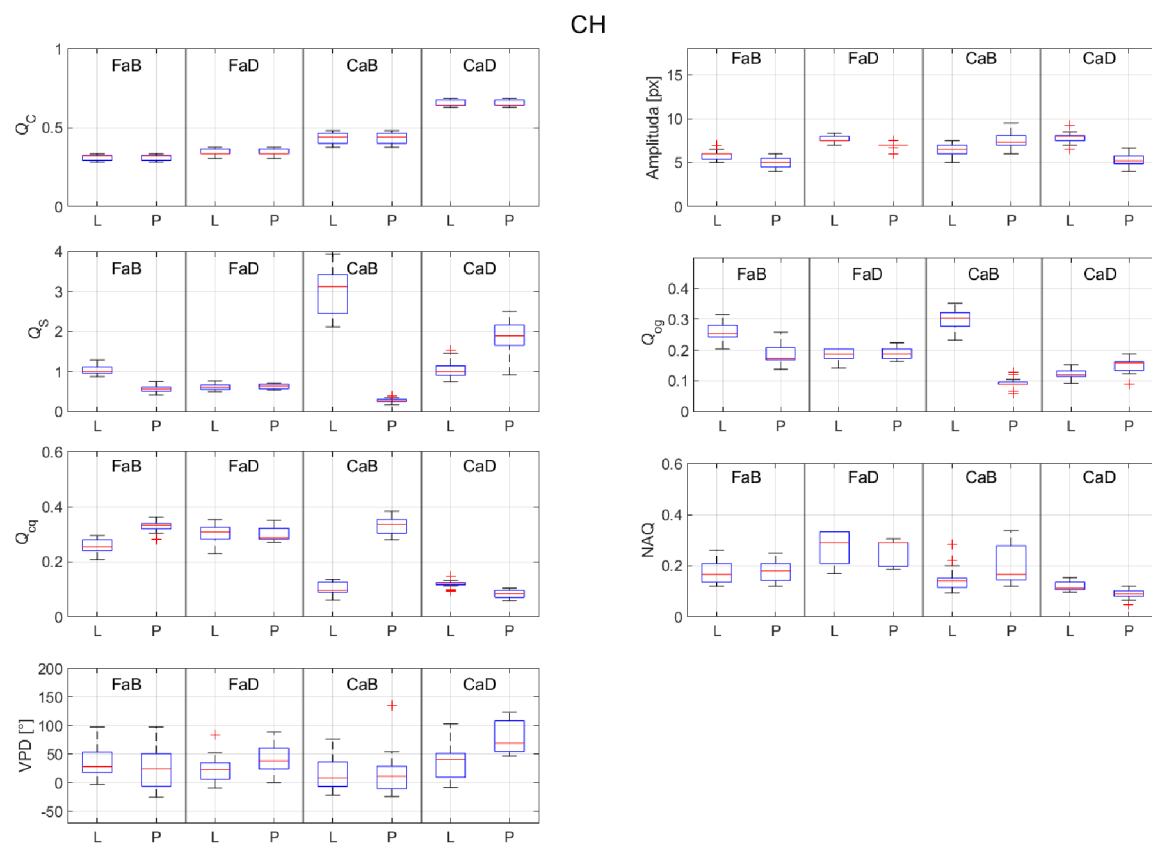
Příloha 16: Výsledky pro subjekt č.3 (žena, HM): Grafy závislosti kvocientu uzavření  $Q_C$ , amplitudy, kvocientů šikmosti  $Q_S$ , otevírání  $Q_{og}$ , uzavírání  $Q_{cg}$ , normalizovaného kvocientu amplitud (NAQ) a vertikálního fázového rozdílu VPD na typu fonace FaB (abdukovaný falzet), FaD (addukovaný falzet), CaB (abdukovaný hrudní rejstřík), CaD (addukovaný hrudní rejstřík) pro pravou (P) a levou (L) hlasivku.



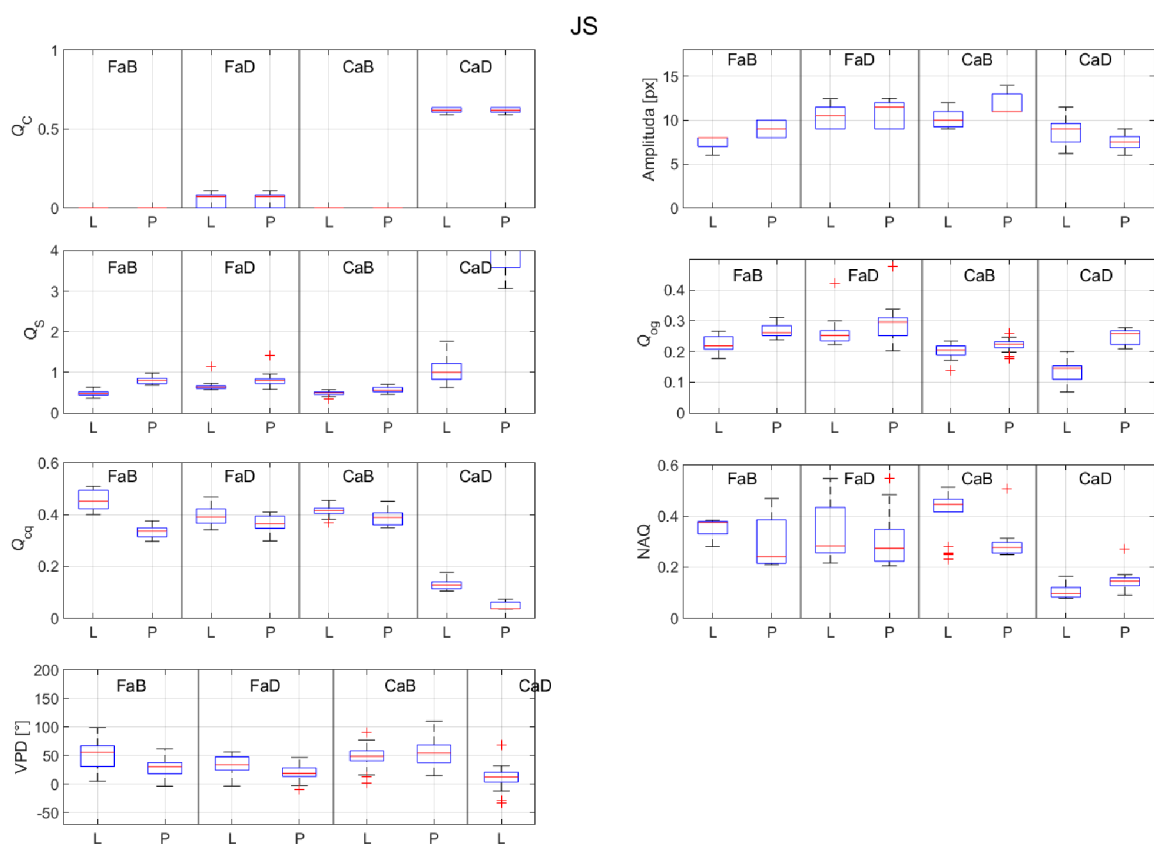
Příloha 17: Výsledky pro subjekt č.4 (muž, HS): Grafy závislosti kvocientu uzavření  $Q_C$ , amplitudy, kvocientů šikmosti  $Q_S$ , otevirání  $Q_{og}$ , uzavírání  $Q_{cg}$ , normalizovaného kvocientu amplitud (NAQ) a vertikálního fázového rozdílu VPD na typu fonace FaB (abdukovaný falzet), FaD (addukovaný falzet), CaB (abdukovaný hrudní rejstřík), CaD (addukovaný hrudní rejstřík) pro pravou (P) a levou (L) hlasivku.



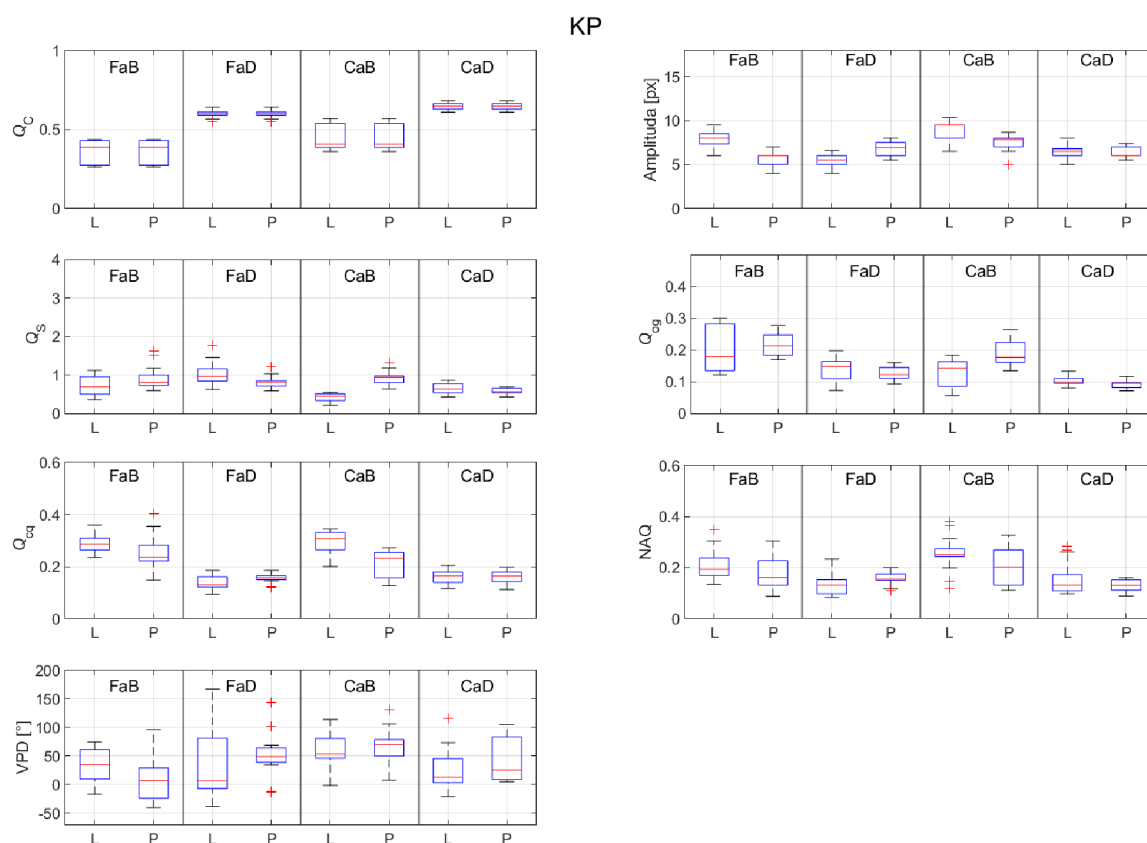
Příloha 18: Výsledky pro subjekt č.5 (muž, CH): Grafy závislosti kvocientu uzavření  $Q_C$ , amplitudy, kvocientů šikmosti  $Q_S$ , otevírání  $Q_{og}$ , uzavírání  $Q_{cg}$ , normalizovaného kvocientu amplitud (NAQ) a vertikálního fázového rozdílu VPD na typu fonace FaB (abdukovaný falzet), FaD (addukovaný falzet), CaB (abdukovaný hrudní rejstřík), CaD (addukovaný hrudní rejstřík) pro pravou (P) a levou (L) hlasivku.



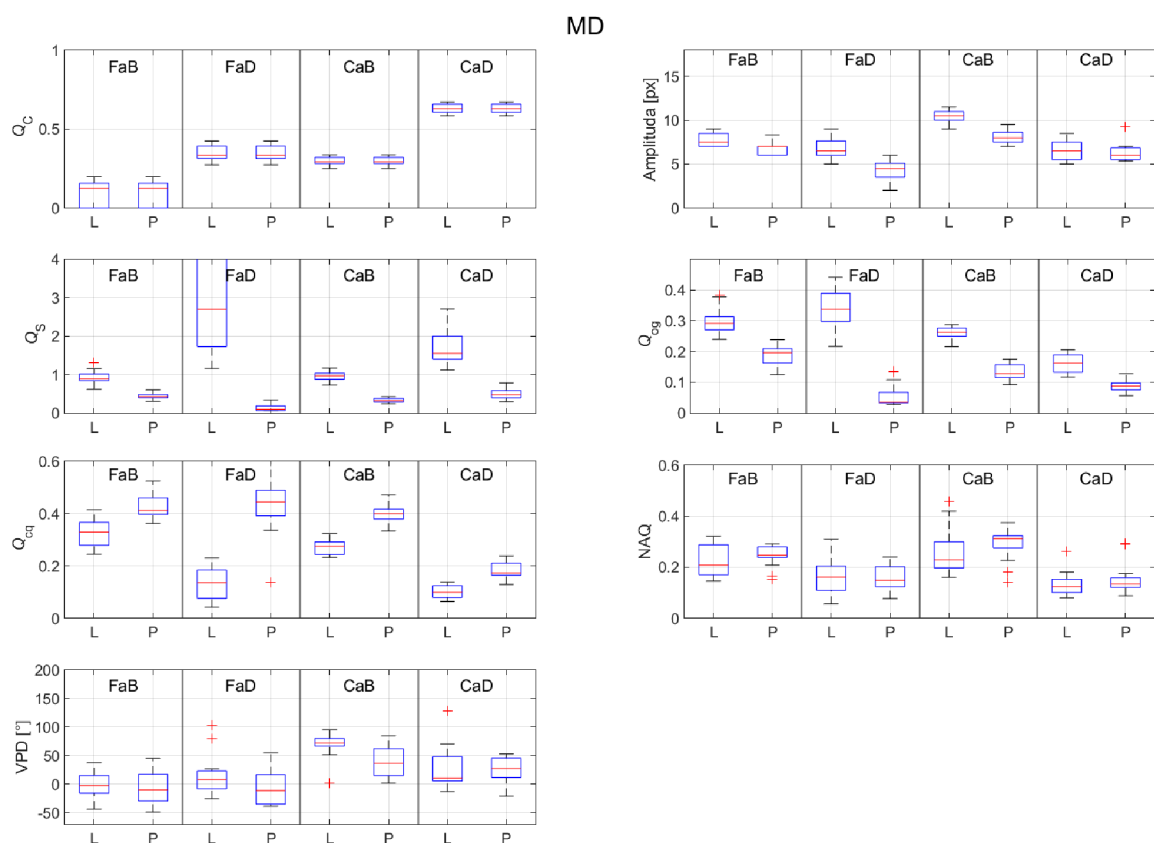
Příloha 19: Výsledky pro subjekt č.6 (muž, JS): Grafy závislosti kvocientu uzavření  $Q_C$ , amplitudy, kvocientu šikmosti  $Q_S$ , otevírání  $Q_{og}$ , uzavírání  $Q_{cg}$ , normalizovaného kvocientu amplitud (NAQ) a vertikálního fázového rozdílu VPD na typu fonace FaB (abdukovaný falzet), FaD (addukovaný falzet), CaB (abdukovaný hrudní rejstřík), CaD (addukovaný hrudní rejstřík) pro pravou (P) a levou (L) hlasivku.



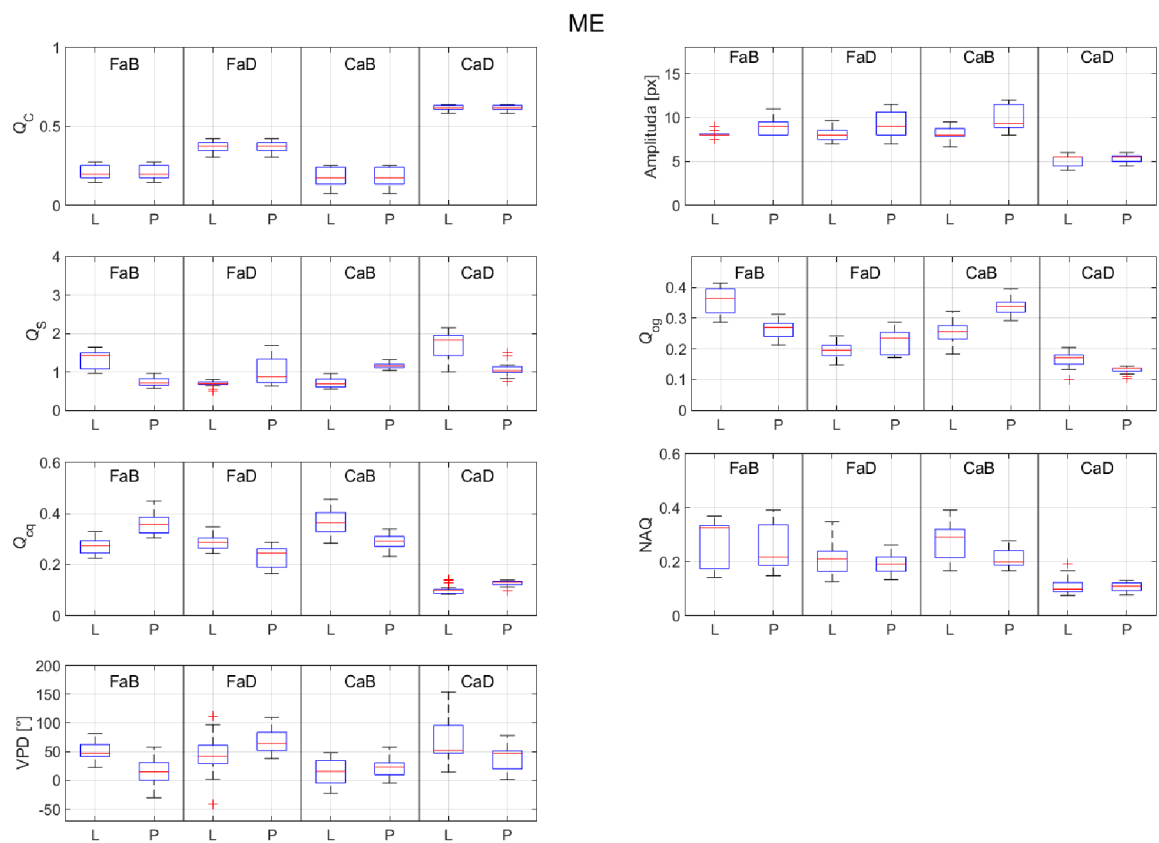
Příloha 20: Výsledky pro subjekt č.7 (žena, KP): Grafy závislosti kvocientu uzavření  $Q_C$ , amplitudy, kvocientů šikmosti  $Q_S$ , otevírání  $Q_{og}$ , uzavírání  $Q_{cg}$ , normalizovaného kvocientu amplitud (NAQ) a vertikálního fázového rozdílu VPD na typu fonace FaB (abdukovaný falzet), FaD (addukovaný falzet), CaB (abdukovaný hrudní rejstřík), CaD (addukovaný hrudní rejstřík) pro pravou (P) a levou (L) hlasivku.



Příloha 21: Výsledky pro subjekt č.8 (muž, MD): Grafy závislosti kvocientu uzavření  $Q_C$ , amplitudy, kvocientů šikmosti  $Q_S$ , otevírání  $Q_{og}$ , uzavírání  $Q_{cg}$ , normalizovaného kvocientu amplitud (NAQ) a vertikálního fázového rozdílu VPD na typu fonace FaB (abdukovaný falzet), FaD (addukovaný falzet), CaB (abdukovaný hrudní rejstřík), CaD (addukovaný hrudní rejstřík) pro pravou (P) a levou (L) hlasivku.

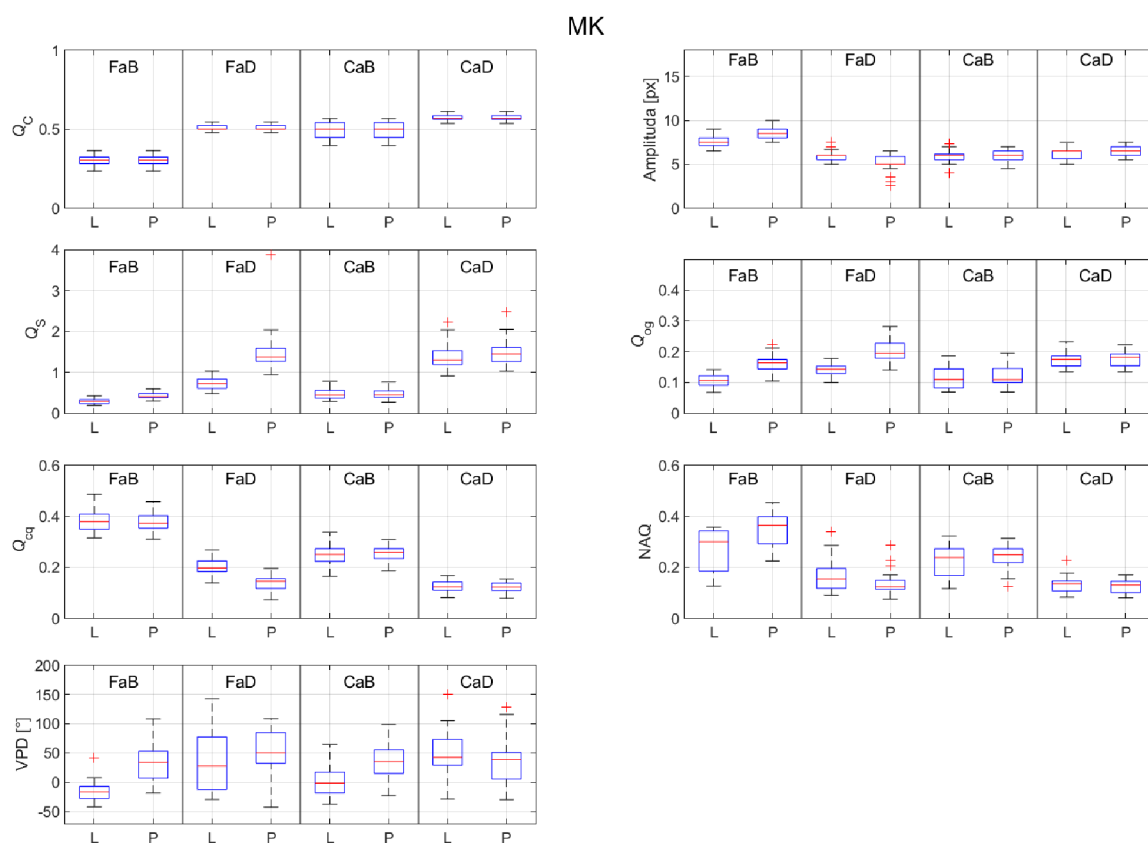


Příloha 22: Výsledky pro subjekt č.9 (žena, ME): Grafy závislosti kvocientu uzavření  $Q_C$ , amplitudy, kvocientů šikmosti  $Q_S$ , otevírání  $Q_{og}$ , uzavírání  $Q_{cg}$ , normalizovaného kvocientu amplitud (NAQ) a vertikálního fázového rozdílu VPD na typu fonace FaB (abdukovaný falzet), FaD (addukovaný falzet), CaB (abdukovaný hrudní rejstřík), CaD (addukovaný hrudní rejstřík) pro pravou (P) a levou (L) hlasivku.

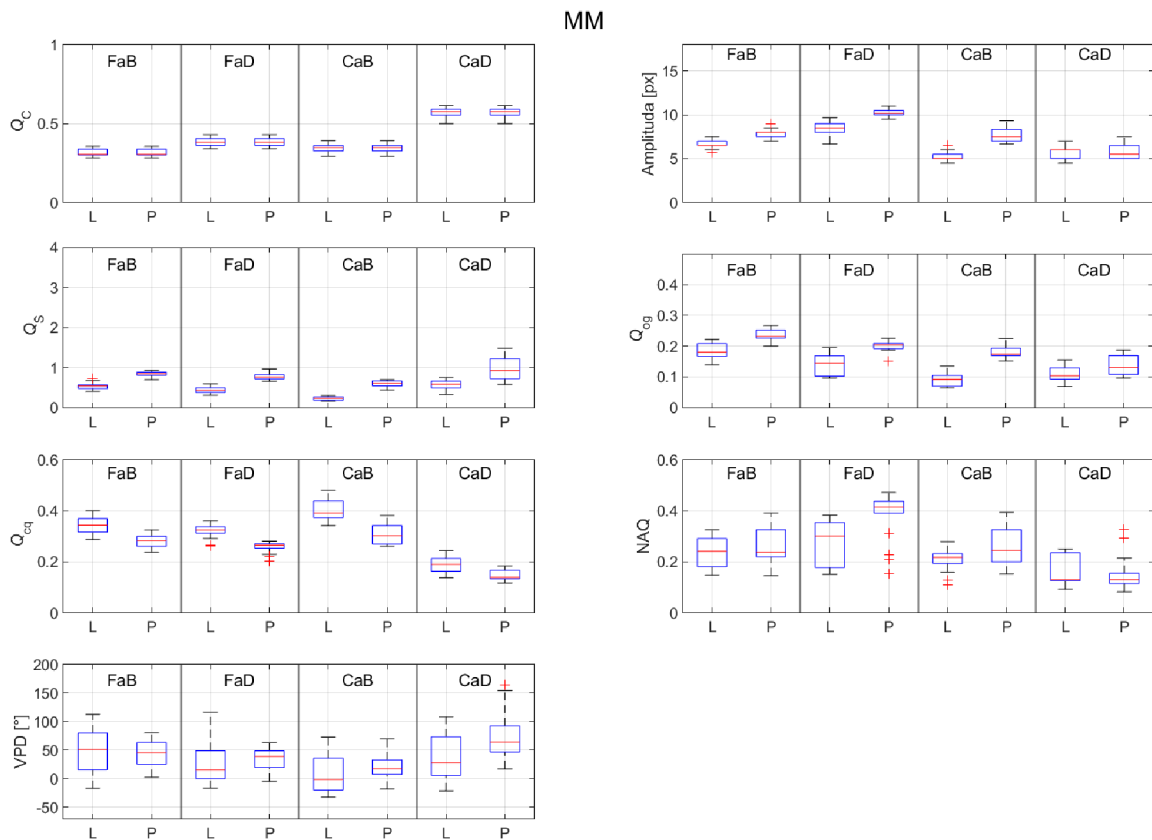




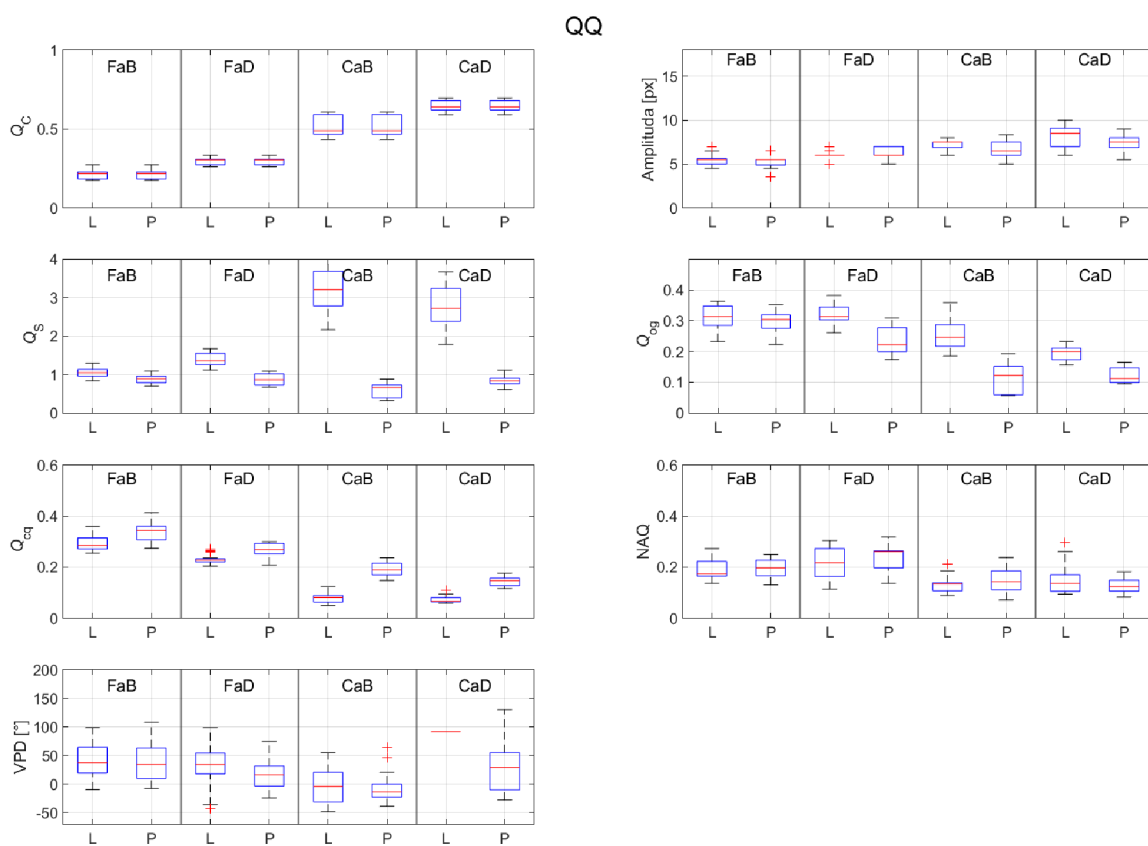
Příloha 23: Výsledky pro subjekt č.10 (muž, MK): Grafy závislosti kvocientu uzavření  $Q_C$ , amplitudy, kvocientu šikmosti  $Q_S$ , otevírání  $Q_{og}$ , uzavírání  $Q_{cg}$ , normalizovaného kvocientu amplitud (NAQ) a vertikálního fázového rozdílu VPD na typu fonace FaB (abdukovaný falzet), FaD (addukovaný falzet), CaB (abdukovaný hrudní rejstřík), CaD (addukovaný hrudní rejstřík) pro pravou (P) a levou (L) hlasivku.



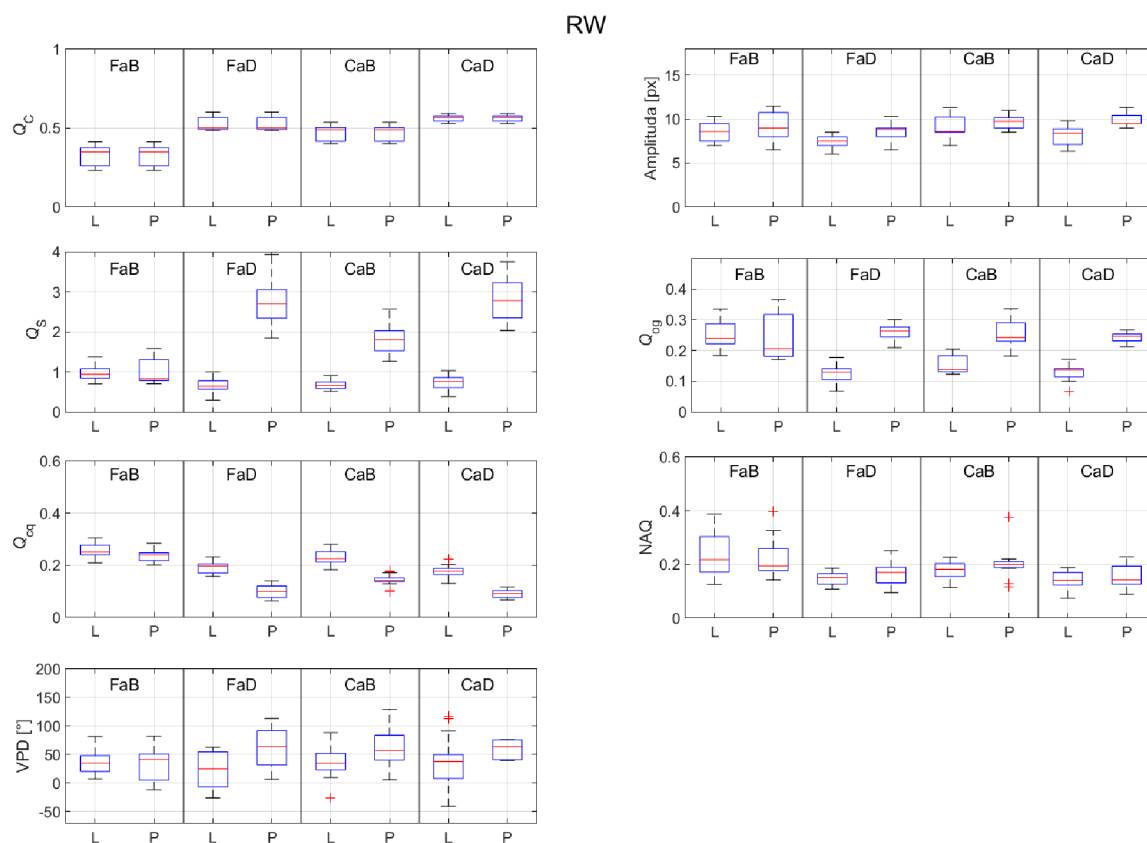
Příloha 24: Výsledky pro subjekt č.11 (žena, MM): Grafy závislosti kvocientu uzavření  $Q_C$ , amplitudy, kvocientů šikmosti  $Q_S$ , otevírání  $Q_{og}$ , uzavírání  $Q_{cg}$ , normalizovaného kvocientu amplitud (NAQ) a vertikálního fázového rozdílu VPD na typu fonace FaB (abdukovaný falzet), FaD (addukovaný falzet), CaB (abdukovaný hrudní rejstřík), CaD (addukovaný hrudní rejstřík) pro pravou (P) a levou (L) hlasivku.



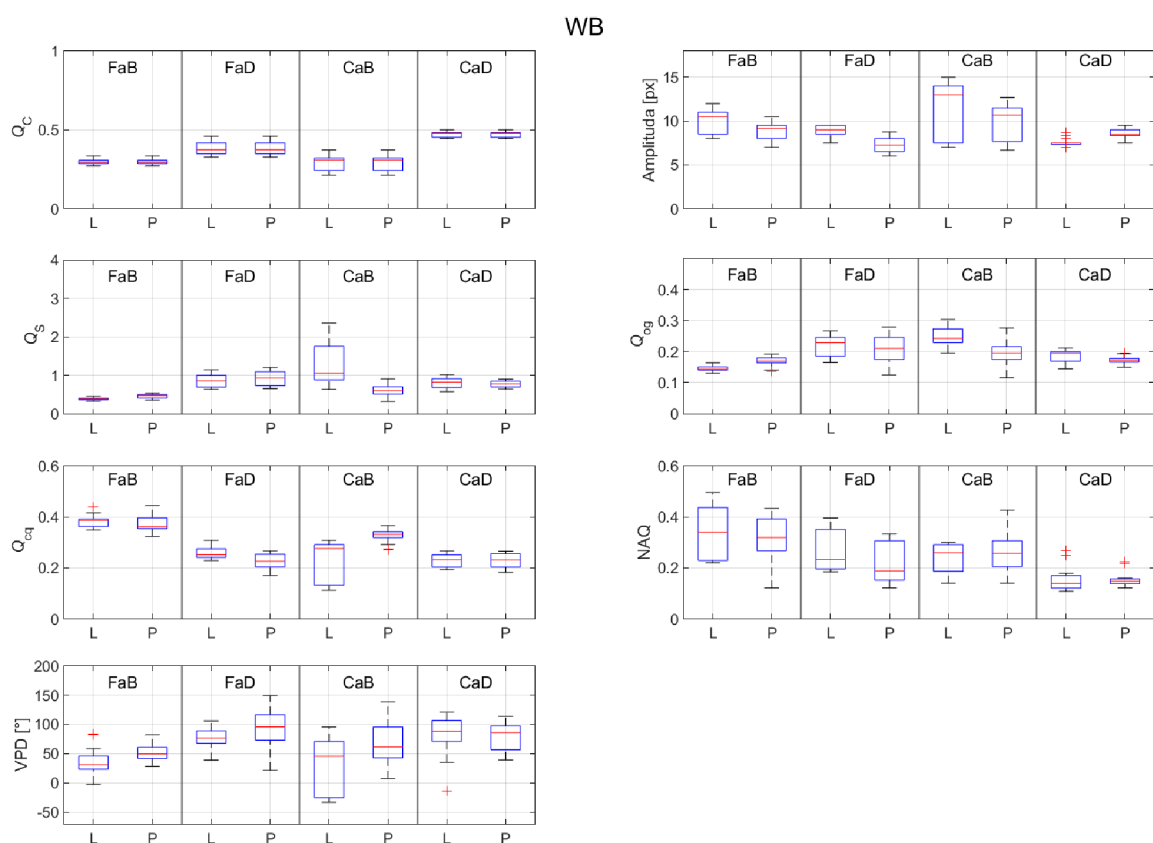
Příloha 25: Výsledky pro subjekt č.12 (muž, QQ): Grafy závislosti kvocientu uzavření  $Q_C$ , amplitudy, kvocientů šikmosti  $Q_S$ , otevírání  $Q_{og}$ , uzavírání  $Q_{cg}$ , normalizovaného kvocientu amplitud (NAQ) a vertikálního fázového rozdílu VPD na typu fonace FaB (abdukovaný falzet), FaD (addukovaný falzet), CaB (abdukovaný hrudní rejstřík), CaD (addukovaný hrudní rejstřík) pro pravou (P) a levou (L) hlasivku.



Příloha 26: Výsledky pro subjekt č.13 (žena, RW): Grafy závislosti kvocientu uzavření  $Q_C$ , amplitudy, kvocientů šikmosti  $Q_S$ , otevírání  $Q_{og}$ , uzavírání  $Q_{cg}$ , normalizovaného kvocientu amplitud (NAQ) a vertikálního fázového rozdílu VPD na typu fonace FaB (abdukovaný falzet), FaD (addukovaný falzet), CaB (abdukovaný hrudní rejstřík), CaD (addukovaný hrudní rejstřík) pro pravou (P) a levou (L) hlasivku.



Příloha 27: Výsledky pro subjekt č.14 (žena, WB): Grafy závislosti kvocientu uzavření  $Q_C$ , amplitudy, kvocientu šikmosti  $Q_S$ , otevírání  $Q_{og}$ , uzavírání  $Q_{cg}$ , normalizovaného kvocientu amplitud (NAQ) a vertikálního fázového rozdílu VPD na typu fonace FaB (abdukovaný falzet), FaD (addukovaný falzet), CaB (abdukovaný hrudní rejstřík), CaD (addukovaný hrudní rejstřík) pro pravou (P) a levou (L) hlasivku.



Příloha 28: Výsledky pro subjekt č.15 (žena, ZS): Grafy závislosti kvocientu uzavření  $Q_C$ , amplitudy, kvocientů šikmosti  $Q_S$ , otevírání  $Q_{og}$ , uzavírání  $Q_{cg}$ , normalizovaného kvocientu amplitud (NAQ) a vertikálního fázového rozdílu VPD na typu fonace FaB (abdukovaný falzet), FaD (addukovaný falzet), CaB (abdukovaný hrudní rejstřík), CaD (addukovaný hrudní rejstřík) pro pravou (P) a levou (L) hlasivku.

ZS

