

UNIVERZITA PALACKÉHO V OLMOUCI

PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA

KATEDRA BIOFYZIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vztahy mezi parametry kmitání hlasivek a intenzitou hlasu:

Studie zdravé ženy pomocí vysokorychlostní

videolaryngoskopie



Vypracovala: Zuzana Štanclová

Studijní obor: Biofyzika

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

Olomouc 2021

# Bibliografická identifikace

Jméno a příjmení autora: Zuzana Štanclová  
Název práce: Vztahy mezi parametry kmitání hlasivek a intenzitou hlasu: Studie zdravé ženy pomocí vysokorychlostní videolaryngoskopie  
Typ práce: Bakalářská  
Pracoviště: Katedra biofyziky a Katedra experimentální fyziky  
Vedoucí práce: doc. RNDr. Jan Švec, Ph.D. et Ph.D.  
Rok obhajoby práce: 2021

## Abstrakt:

Zvyšování intenzity hlasu souvisí se změnami kmitů hlasivek. Doposud o těchto změnách není k dispozici dostatečné množství informací. Z nevelkého počtu předehřlých prací vyplývá, že se s rostoucí intenzitou zvětšuje amplituda, uzávěr glottis se prodlužuje a je výraznější slizniční vlna. Cílem této práce bylo zjistit, jak se kvantitativně mění parametry kmitání hlasivek u ženského subjektu při pozvolné změně intenzity na konstantní výšce tónu (tzv. crescendo). Za tímto účelem byly zaznamenány fonace v rámci celého hlasového rozsahu pomocí vysokorychlostní laryngoskopie se synchronním záznamem hlasu pomocí kalibrovaného mikrofonu. Z vysokorychlostních záznamů byly vytvořeny videokymogramy kmitání hlasivek a z nich potom byly extrahovány parametry kmitání, kterými byly amplituda, kvocient otevření  $Q_o$ , kvocient otevírání  $Q_{og}$ , kvocient uzavírání  $Q_{cg}$ , kvocient rychlosti  $Q_s$ , kvocient normalizované amplitudy NAQ a vertikální fázový rozdíl VPD mezi spodním a horním okrajem hlasivky. Intenzita hlasu byla kvantifikována pomocí hladiny akustického tlaku (SPL). Získaná data ukazují tendenci nárůstu amplitudy, mírného nárůstu  $Q_s$  a VPD, a snižování  $Q_o$ ,  $Q_{og}$ ,  $Q_{cg}$  a NAQ s rostoucí SPL. Tyto tendence však nejsou zřejmé u všech fonací, což svědčí o komplexitě tvorby hlasu. Získaná data poskytují podrobnější vhled do kinematiky kmitání hlasivek.

Klíčová slova: Parametry kmitání hlasivek, hladina akustického tlaku, vysokorychlostní videolaryngoskopie, videokymografie.

Počet stran: 49

Počet příloh: 0

Jazyk: český

# Bibliographical identification

Autor's first name and surname	Zuzana Štanclová
Title	Relationships between the vocal fold vibration parameters and voice intensity: A laryngeal high speed videoscopic study of a healthy woman
Type of thesis	Bachelor
Department	Department of Biophysics and Department of Experimental Physics
Supervisor	doc. RNDr. Jan Švec, Ph.D. et Ph.D.
The year of presentation	2021

Abstract:

Increase of voice intensity is related to changes in vocal fold oscillations. Knowledge about these changes has been insufficient. Small amount of previous studies report the increase of vibration amplitude, prolongation of closed phase and more prominent mucosal waves with rising intensity. This study aimed at investigating the quantitative changes in vocal fold oscillations in a female subject when continuously changing the intensity of voice at a constant pitch (i.e., the crescendo phonation). For this purpose, we recorded the phonations through the whole pitch range of the subject by high-speed videolaryngoscopy synchronized with calibrated microphone signals. From the high-speed videos, we created videokymograms from which we extracted the parameters of vocal fold vibrations such as the vibration amplitude, open quotient  $Q_o$ , opening quotient  $Q_{og}$ , closing quotient  $Q_{cg}$ , speed quotient  $Q_s$ , normalized amplitude quotient NAQ, and vertical phase difference VPD between the lower and upper margin of the vocal folds. The voice intensity was monitored through the sound pressure level (SPL). With increasing SPL, the results show the tendency of increasing amplitude, slightly increasing  $Q_s$  and VPD, and decreasing  $Q_o$ ,  $Q_{og}$ ,  $Q_{cg}$ , and NAQ. These trends are not obvious in all the phonations, however, revealing on a complexity of human voice production. The acquired unique set of data offers deeper insights into the kinematics of vocal fold oscillations.

Keywords                      Vocal fold oscillation parameters, sound pressure level, high-speed videolaryngoscopy, videokymography.

Number of pages              49

Number of appendices      0

Language                      czech

Děkuji vedoucímu bakalářské práce za cenné rady při psaní práce a dále děkuji konzultantovi Hugo Lehouxovi, M.Sc. za ochotu a pomoc s analýzou dat.

Bakalářská práce souvisí s řešením projektu GAČR č. 19-04477S: "Modelování a měření strukturálně-akustických interakcí s prouděním v biomechanice tvorby hlasu člověka" a projektu TAČR č. TH04010422: "VKG 3.0".

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracovala samostatně, pod vedením doc. RNDr. Jana Švece, Ph.D. et Ph.D. a za použití literatury uvedené v závěru práce.

V Olomouci dne 5. 5. 2021

.....

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Přehled problematiky</b>	<b>2</b>
2.1	Základní poznatky o lidském hlase . . . . .	2
2.1.1	Stavba hlasového ústrojí . . . . .	2
2.1.2	Kmitání hlasivek . . . . .	4
2.1.3	Metody pozorování hlasivek . . . . .	5
2.2	Změna výšky, intenzity a kvality hlasu . . . . .	6
2.2.1	Změna frekvence . . . . .	8
2.2.2	Změna intenzity . . . . .	9
2.2.3	Změna kvality hlasu . . . . .	9
2.3	Parametrizace kmitů . . . . .	10
2.4	Změna parametrů při změně intenzity . . . . .	13
2.5	Hladina akustického tlaku SPL . . . . .	15
2.5.1	Časové a frekvenční vážení SPL . . . . .	15
<b>3</b>	<b>Cíl práce</b>	<b>16</b>
<b>4</b>	<b>Materiál a metody</b>	<b>17</b>
4.1	Průběh záznamu dat . . . . .	17
4.2	Analýza dat . . . . .	18
4.2.1	Zvuková analýza . . . . .	18
4.2.2	Obrazová analýza . . . . .	19
<b>5</b>	<b>Výsledky</b>	<b>22</b>
<b>6</b>	<b>Diskuse</b>	<b>36</b>

7 Závěr	46
8 Seznam literatury	48

## Seznam zkratek

CT	napínač hrtanu (z lat. <i>musculus cricothyroideus</i> )
$f_o$	základní frekvence oscilací
GAW	tvary vlny plochy glottis (z angl. glottal area waveform)
IA	lat. <i>musculus interarytenoideus</i> , <i>musculus transversus</i>
LCA	lat. <i>musculus cricoarytenoideus lateralis</i>
LRPD	levo-pravý fázový rozdíl (z angl. left-right phase difference)
NAQ	kvocient normalizované amplitudy (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 rychlosti, zkosení (z angl. speed quotient, skewing quotient)
SI	rychlostní index (z angl. speed index)
SIL	hladina akustické intenzity
SPL	hladina akustického tlaku
$T$	perioda kmitů
TA	párový sval hlasivkový (z lat. <i>musculus thyroarytenoideus</i> )
$T_c$	doba trvání fáze uzavření
$t_{cg}$	doba trvání fáze uzavírání
$T_o$	doba trvání fáze otevření
$t_{og}$	doba trvání fáze otevírání
VOC	lat. <i>musculus vocalis</i>
VPD	vertikální fázový rozdíl (z angl. vertical phase difference)

# Úvod

Lidský hlas je základním komunikačním nástrojem každého z nás. Jednotlivé kvality hlasu, jakými jsou barva, dyšnost nebo chraplavost, ale také jeho výška a síla nám pomáhají lépe vyjadřovat vlastní emoce a rozeznávat emoce ostatních lidí. Také nám umožňují odhadovat charakter a vlastnosti lidí, se kterými se setkáváme poprvé. Nakonec samozřejmě nelze přehlédnout jejich důležitost při zpěvu.

Hlas vzniká tím, že vzduchový proud vycházející z plic rozkmitává hlasivky umístěné v hrtanu. Tyto kmity mají vysokou frekvenci, a proto nejsme schopni jednotlivé kmity pozorovat pouze okem. Pro účely této bakalářské práce jsme tedy kmity hlasivek zaznamenávali pomocí vysokorychlostní kamery a později jsme je pozorovali ve zpomaleném záznamu. Z těchto záznamů jsme potom vytvořili tzv. kymogramy, které sledují pouze jeden řádek hlasivek a jeho vývoj v čase.

Při změně intenzity, tedy síly, hlasu dochází k fyziologickým změnám. Tyto změny je možné studovat subjektivně, ale pro praktické účely je přesnější a výhodnější kmity hodnotit objektivně pomocí parametrů. Daná práce si proto klade za cíl objektivní analýzu kmitů pomocí již zavedených parametrů, jakými jsou například kvocient otevření, kvocienty otevírání a uzavírání a kvocient rychlosti. Hlavním cílem bude určit, jak se dané parametry mění, pokud dochází k nárůstu intenzity, a to skrz celý hlasový rozsah autorky práce, na které bylo měření provedeno. Jednotlivé změny parametrů budou porovnány s vytvořenými kymogramy zobrazujícími děje, ke kterým při změnách intenzity docházelo, aby bylo možné ukázat, že objektivní analýza pomocí parametrů odráží skutečné fyziologické změny kmitání hlasivek.

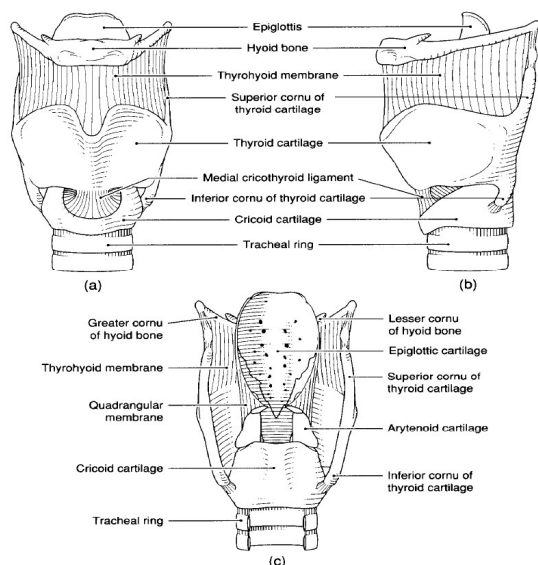


# Přehled problematiky

## 2.1 Základní poznatky o lidském hlase

### 2.1.1 Stavba hlasového ústrojí

#### Kostra hrtanu



Obrázek 2.1: Kostra hrtanu (Titze 2000)

Hlasivky se nacházejí v hrtanu, který je tvořen tvrdými a měkkými tkáněmi. Kostra hrtanu (Obrázek 2.1) je tvořena chrupavkami a jazylkou, na které je celý hrtan zavěšen (Titze 2000). Mezi hrtanové chrupavky řadíme chrupavku štítnou, prstencovou, chrupavku hlasivkové a hrtanovou příklopku (*epiglottis*).

Chrupavka štítná je složena ze dvou plochých destiček, které se vzájemně stýkají v přední části hrtanu, kde mohou vyčnívat, obzvláště u mužů, jako ohryzek.

V zadní části má chrupavka štítná horní a dolní rohy, přičemž k hornímu rohu se upíná jazylka a k dolnímu chrupavka prstencová. Chrupavka prstencová má tvar prstence, který navazuje na průdušnici. Z boku je k ní připojena chrupavka štítná pomocí cricothyroidního kloubu. Její zadní část je širší a vyšší a shora jsou na ni připojeny cricoarytenoidním kloubem chrupavky hlasivkové. Párové chrupavky hlasivkové mají pyramidový tvar a tři výběžky, v dolní části výběžek svalový a hlasivkový a nahoře horní výběžek, na kterých jsou uchyceny hlasivky.

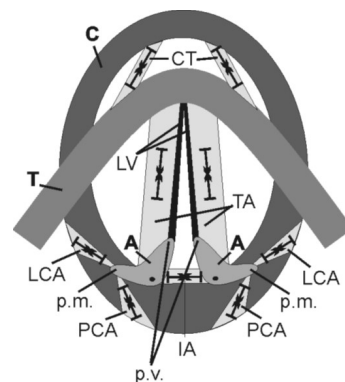
## Svaly hrtanu

Hrtanové svaly dělíme na svaly vnější a vnitřní (Švec 1996). Vnější hrtanové svaly zajišťují spojení hrtanu s okolními strukturami, jakými je například hrudní kost nebo jazyk, svaly vnitřní slouží ke spojení hrtanových chrupavek mezi sebou.

Mezi vnitřní hrtanové svaly patří párový sval hlasivkový (lat. *musculus thyroarytenoideus*, značen TA), který spojuje chrupavku štítnou s chrupavkami hlasivkovými a při jeho kontrakci dochází ke zkrácení a ztlustění hlasivky (Švec 1996). Dělíme ho do dvou svazků, *m. externus* neboli *m. thyromuscularis*, který zřejmě způsobuje rychlé zkrácení hlasivky, a *m. internus* neboli *m. vocalis* (značen VOC), který podle předpokladů zajišťuje následnou jemnou regulaci vláken.

Dalším svalem je vnější napínač hrtanu (lat. *musculus cricothyroideus*, značen CT), který způsobuje vzájemnou rotaci chrupavky štítné a prstencové, v důsledku čehož dochází ke změně délky hlasivek a jejich napětí (Švec 1996). Dvěma párovými svaly, které spojují chrupavku prstencovou s chrupavkami hlasivkovými, jsou *musculus cricoarytenoideus lateralis* (značen LCA) a *musculus cricoarytenoideus posterior* (značen PCA). Oba svaly zajišťují rotaci chrupavek hlasivkových, ačkoli pracují jako antagonisté a způsobují rotaci v opačném směru. Sval LCA působí tak, že jeho stah způsobí uzavření hlasivek (addukci), a aktivita PCA naopak způsobuje rozevření hlasivek (abdukci).

Konečně zmíníme *musculus transversus*, nazývaný také *musculus interarytenoideus* (značen IA), který je umístěn mezi chrupavkami hlasivkovými a svým stahem způsobuje addukci chrupavek hlasivkových a tedy i uzavření glottis. Rozložení jednotlivých vnitřních svalů hrtanu je znázorněno na Obrázku 2.2, který schématicky znázorňuje, jakým způsobem dochází ke kontrakci jednotlivých svalů a můžeme z něj vyčíst jejich funkci.



Obrázek 2.2: Vnitřní svaly hrtanu (Švec 1996)

## Struktura hlasivek

Hlasivky jsou složeny z jednotlivých vrstev, které se od sebe navzájem liší svými elastickými vlastnostmi (Švec 1996).

Povrch hlasivky je tvořen vrstevnatým šupinovým epitelem o tloušťce 0,05 - 0,1 mm (Hirano 1982). Pod povrchem se nachází nesvalová tkáň nazývaná *lamina propria*, která je složena ze tří vrstev: povrchové, střední a hloubkové. Povrchová vrstva je tvořena tkáňovou tekutinou, která obsahuje neorganizovaná poddajná elastinová vlákna, a má tloušťku asi 0,5 mm. Elastinová vlákna obsahuje i střední vrstva, ačkoli zde jsou uspořádána v anteriorně-posteriorním směru, a kromě toho se zde nacházejí i neuspořádaná tuhá vlákna kolagenní. Hloubkovou vrstvu tvoří anteriorně-posteriorně uspořádaná kolagenní vlákna a spolu se střední vrstvou mají tloušťku přibližně 1 - 2 mm (Hirano 1982). Pod laminou proprii se nachází TA sval o tloušťce 7 - 8 mm.

Jednotlivé vrstvy můžeme sloučit a vytvořit tak dvouvrstvé a třívrstvé schéma hlasivek. V případě dvouvrstvého schématu dělíme hlasivky na obal (epitel, povrchová a střední vrstva laminy proprii) a tělo (hloubková vrstva laminy proprii a TA sval), u třívrstvého modelu rozlišujeme sliznici (epitel povrchová vrstva laminy proprii), vaz (střední a hloubková vrstva laminy proprii) a sval.

### 2.1.2 Kmitání hlasivek

Jak už bylo řečeno v úvodu, hlas vzniká kmitáním hlasivek, díky kterému dochází k modulaci výdechového proudu vzduchu z plic a které způsobuje změny tlaku tvořící zvuk. Pohyby hlasivek lze přiblížit pomocí modelů, které vycházejí z principu pohybu pružiny. Nejjednodušší jednohmotnostní model využívá analogie k pohybu pístu ve viskózní kapalině, dvojhmotnostní model popisuje i slizniční vlnu. Obecně jsme schopni pomocí vícehmotnostních modelů lépe popisovat pohyb obalu poddajnějšího vůči zbylým vrstvám hlasivky (Titze 2000).

Ačkoli existuje několik teorií, které se kmity snaží vysvětlit, dnes je za nejpřesnější z nich považována teorie myoelasticko-aerodynamická, která říká, že způsob, jakým hlasivky kmitají, závisí hlavně na elasticitě tkání, kterou je možné ovlivnit aktivitou vnitřních hrtanových svalů, přičemž zdrojem energie kmitů je proud vzduchu z plic (Švec a kol. 2021). Na rozdíl od původní teorie formulované van den

Bergem (1958), která za nejdůležitější pro kmitání považuje tlak subglottický (tj. tlak pod hlasivkami), nové pojetí teorie jako zásadní pro kmitání hlasivek označuje tlak intraglottický, tedy tlak mezi hlasivkami. Aby hlasivky mohly kmitat, musí být intraglottický tlak vyšší při otevírání než při zavírání. Toho lze dosáhnout tak, že buď dochází ke zpoždění pohybu vzduchového sloupce vůči pohybu hlasivek v přítomnosti vokálního traktu, nebo musí glottis měnit tvar z konvergentního při otevírání na divergentní (nebo méně konvergentní) při zavírání. První podmínku je možné modelovat pomocí jednohmotnostního modelu a uplatňuje se, pokud je základní frekvence hlasu nižší než frekvence formantu vokálního traktu (tedy např. při řeči). Druhá podmínka, popsatelná pomocí dvojhmotnostního modelu, vysvětluje kmity o vyšších frekvencích a zároveň je schopná vysvětlit kmity hlasivek v nepřítomnosti vokálního traktu.

Samotné kmity můžeme vysvětlit tak, že v důsledku zúžení glottis při výdechu je subglottický tlak vyšší než tlak supraglottický, tj. tlak nad hlasivkami (Švec a kol. 2021). Tento rozdíl tlaků způsobí, že dojde k oddělení spodních okrajů hlasivek a hlasivky se začnou otevírat. Horní okraj hlasivky se pohybuje oproti spodnímu s fázovým zpožděním, které tvoří základ slizniční vlny. V tuto chvíli mají hlasivky konvergentní tvar a intraglottický tlak je ovlivněn především tlakem subglottickým. Pohyb hlasivek ke stranám je ovšem omezen elasticitou tkání, která způsobí, že se dolní okraje opět začnou přibližovat k sobě. Jelikož je horní okraj opět fázově opožděn, změní se tvar glottis na divergentní, a jelikož je intraglottický tlak teď více ovlivněn supraglottickým tlakem, dochází k jeho poklesu a hlasivky se začnou zavírat. V jisté fázi opět v důsledku elastických sil dojde ke změně pohybu dolního okraje od sebe a celý cyklus se opakuje.

### 2.1.3 Metody pozorování hlasivek

Hlasivky můžeme pozorovat buď pomocí metod laryngoskopických, které jsou založené na přímém pozorování hlasivkových kmitů, nebo metod nelaryngoskopických, při kterých pozorujeme změny parametrů jiných fyzikálních veličin v důsledku kmitání.

Jako první své hlasivky pozoroval v 2. polovině 19. století španělský zpěvák Manuel García pomocí laryngoskopického zrcátka (Švec 1996). V dnešní době se od použití laryngoskopického zrcátka ve výzkumné praxi upustilo a nahradily jej en-

doskopy (laryngoskopy). Jelikož je nemožné kmity hlasivek pozorovat holým okem vzhledem k jejich vysoké frekvenci, využívají se v praxi v podstatě 3 metody: strobolaryngoskopie, vysokorychlostní laryngoskopie a videokymografie.

Strobolaryngoskopie je založena na sledování hlasivek pod přerušovaným stroboskopickým světlem (Sovák 1945, Švec 1996). Frekvence záblesků je nastavena tak, aby byla o několik jednotek Hz nižší než frekvence kmitání hlasivek. Na místo jednotlivých kmitů tak pozorujeme kmity iluzorní s frekvencí  $f_{\text{iluzorni}} = f_{\text{hlasivek}} - f_{\text{stroboskop}}$ . Tato metoda je nejčastěji používanou metodou při lékařských vyšetřeních, jelikož zobrazuje kmitání hlasivek v reálném čase. Její omezení spočívá při nepravidelných kmitech, které mohou být kvůli iluzornímu zobrazení přehlédnuty nebo které mohou způsobit omezení synchronizace stroboskopického světla.

Metoda pozorování hlasivek pomocí vysokorychlostní laryngoskopie mohla vzniknout až s rozvojem vysokorychlostních kamer. Díky této metodě je možné sledovat reálné kmity hlasivek s frekvencí několika tisíc Hz. Tato metoda je ovšem velice nákladná a zpracování výsledků je časově velice náročné. Proto je videolaryngoskopie využívána nejvíce při výzkumné praxi.

Videokymografie umožňuje sledování rychlých kmitů hlasivek pomocí modifikované standardní kamery (Švec 2019). Princip původní konstrukce spočíval v tom, že místo sledování celých hlasivek ve standardním režimu snímala kamera pouze jeden horizontální řádek s vysokou frekvencí. Dnešní generace videokymografických kamer snímá standardní i kymografický obraz zároveň, přičemž vznikající kymografický obraz zobrazuje kmitání hlasivek v čase a nazýváme jej kymogram. Kromě generování kymogramů pomocí speciální kamery už dnes existují možnosti, jak kymogramy vytvořit i z vysokorychlostního záznamu.

## 2.2 Změna výšky, intenzity a kvality hlasu

Subjektivně lidský hlas můžeme posuzovat podle kvality, výšky nebo hlasitosti. Pro objektivní studium ovšem potřebujeme dané vlastnosti nějakým způsobem parametrizovat a za tímto účelem se snažíme subjektivní počítky vyjádřit například pomocí fyzikálních veličin.

Výška tónu úzce souvisí se základní frekvencí oscilací  $f_o$ , která je určena rych-

lostí kmitání hlasivek, přičemž můžeme zavést vztah:

$$f_o = \frac{1}{T},$$

kde  $T$  odpovídá periodě kmitů, neboli času, během kterého proběhne 1 vibrační cyklus (Titze 2000).

Pro potřeby přiblížení se k subjektivní veličině hlasitosti můžeme využívat několik objektivních fyzikálních veličin. Můžeme zavést akustický výkon jako množství vyzářené energie za časovou jednotku, můžeme používat intenzitu, tedy výkon normovaný na jednotku plochy. Jelikož ale hlas vnímáme lidským uchem, vznikly veličiny, které lépe subjektivní hlasitost vyjadřují. Jsou jimi hladina akustické intenzity SIL a hladina akustického tlaku SPL s jednotkou dB (decibel), pro něž platí vztahy:

$$\text{SIL} = 10 \log \frac{I}{I_0},$$

$$\text{SPL} = 20 \log \frac{p}{p_0}.$$

$I$  a  $p$  označují příslušnou intenzitu, resp. akustický tlak daného zvuku a hodnoty intenzity a tlaku  $I_0 = 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  a  $p_0 = 20 \text{ } \mu\text{Pa}$  odpovídají hodnotám pro práh slyšení. SPL i SIL závisí na vzdálenosti detekce, proto je třeba při jejich měření vždy tuto vzdálenost uvést.

Kvalita hlasu je dána jak kvalitou zvuku pocházejícího z hlasivek, tak následnou úpravou zdrojového tónu v rezonančních dutinách. V tomto případě nejčastěji hovoříme o tzv. hlasových rejstřících. Dále kvalitu hlasu ovlivňuje i to, jestli je hlas např. dyšný, skřípavý nebo chraplavý (Titze 2000). Dělení rejstříků se v různých zdrojích liší; Titze (2000) je nadále rozděluje podle toho, zda určujeme kvalitu řeči nebo zpěvu. Mezi řečové rejstříky řadí pulzní rejstřík, který je využíván při velmi nízkých frekvencích a vyznačuje se slyšitelně přerušovaným zvukem, modální rejstřík pro nižší a střední část rozsahu a falzetový rejstřík pro vysoké fonace. Pěvecké rejstříky pak dělí na hrudní, hlavový a falzetový. Švec (1996) ještě rozlišuje ženské pěvecké rejstříky na hrudní, střední a hlavový. V některých publikacích jsou rejstříky řazeny od lehkých po těžké, přičemž za nejlehčí rejstřík je považován rejstřík falzetový, těžšími rejstříky jsou pak hlavový a střední a nejtěžším je v takto nadefinované terminologii rejstřík hrudní (Hirano a kol. 1970).

## 2.2.1 Změna frekvence

V nejjednodušším přiblížení si můžeme hlasivky představit jako strunu. Pro jejich základní frekvenci pak bude platit Taylorův vztah

$$f_o = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}},$$

který vyjadřuje závislost frekvence  $f_o$  na délce hlasivek  $L$ , napětí  $\sigma$  a hustotě tkáně  $\rho$  (Švec 1996). Tento vztah vysvětluje, proč muži, kteří mají hlasivky asi  $1,6 \times$  delší než ženy, mají hlasy hlubší, s frekvencí řeči okolo 125 Hz, zatímco frekvence řeči žen se pohybuje kolem 200 Hz.

Vztahy mezi zvyšováním frekvence oscilací a svalovou aktivitou se věnovali Hirano a kol. (1969, 1970). V obou publikacích byly studovány svaly CT, LCA a VOC a bylo pozorováno, že vztah  $f_o$  a aktivity svalů je závislý na rejstříku, ve kterém je fonace produkována. V hrudním rejstříku v nižších polohách je se zvyšující se frekvencí zaznamenáno zvýšení aktivity všech tří svalů. Naopak v lehčích rejstřících (hlavový, falzetový) autoři pozorovali s rostoucí frekvencí nerostoucí trend aktivity CT svalu a menší zvýšení aktivity adduktorů LCA a VOC. Tyto výsledky pocházejí hlavně z pozorování při zpěvu, ale bylo zjištěno, že ke stejným jevům dochází i při produkci řeči (Hirano a kol. 1969). Hirano a kol. (1970) navíc zjistil, že při zvyšování frekvence má CT sval tendenci hlasivky abdukovat, a proto musí docházet ke zvýšení aktivity adduktorů, jako např. IA a LCA svalů, ve vyšších polohách. Autoři navíc podotýkají, že ve vyšších polohách má na regulaci frekvence větší vliv proud vzduchu z plic.

Při změně frekvence jsou pozorovatelné i změny kmitů hlasivek. Kmity hlasivek můžeme popisovat pomocí různých parametrů (viz dále). Fex a kol. (1991) pozorovali při zvýšení frekvence zvýšení kvocientu otevření (značeno  $Q_o$ ), který vyjadřuje poměr otevřené fáze k celkové periodě kmitů. To tedy znamená, že při zvyšování frekvence docházelo ke zkracování doby, po kterou je hlasivka uzavřená. Autoři také pozorovali, že s rostoucí frekvencí klesá maximální šířka glottis, kterou můžeme označit jako amplitudu kmitů. Původ této změny autoři hledali v tom, že rostoucí frekvence je dána zvýšeným napětím hlasivek, které omezuje rozkmit hlasivky. Pomocí stroboskopických měření došli k podobným závěrům i další autoři. Hirano (2009) také došel k závěru, že amplituda kmitů se vzrůstající frekvencí klesá a kvocient

otevření roste, zároveň však také zjistil, že je redukována i slizniční vlna. Co se týče amplitudy kmitů a slizniční vlny, došel ke stejným závěrům také Woo (1996). Navíc hlouběji zkoumal velikost slizniční vlny a zjistil, že u mužů velikost slizniční vlny klesá a u žen je při vysokých frekvencích téměř nerozlišitelná. Pozoroval také prodlužování hlasivky s rostoucí frekvencí, díky čemuž dochází k snižování tloušťky hlasivky. Tuto změnu délky a tloušťky vysvětluje Sulter (1996) tím, že objem hlasivky musí zůstat konstantní. Kromě stroboskopických metod byly změny způsobené rostoucí frekvencí studovány i pomocí kymografických záznamů, kde bylo taktéž zjištěno, že při zvýšené svalové aktivitě s rostoucí frekvencí dochází ke zvýšení podélného napětí a ke zmenšení amplitudy kmitů (Švec 2019), nebo měřením subglottického tlaku, který se vzrůstající frekvencí roste (Sundberg a kol. 1993).

### **2.2.2 Změna intenzity**

To, jak svalová aktivita souvisí se změnou intenzity, můžeme zjistit z publikací Hirana a kol. (1969, 1970). Výsledky těchto dvou studií ukazují, že závislost svalové aktivity a intenzity závisí na typu rejstříku i na fonační frekvenci. Aktivita CT svalu působí proti změně intenzity. Rozdíl je tím pozorovatelnější, čím lehčí je rejstřík a čím vyšší je frekvence, pravděpodobně proto, aby při zvyšování intenzity nedocházelo k současnému zvýšení frekvence. Svaly LCA a VOC jsou aktivní při zvyšování intenzity v hrudním rejstříku, ale jejich aktivita přestává růst s přechodem do lehčích rejstříků.

Pozorováním kymografických záznamů bylo zjištěno, že při zvyšování frekvence dochází ke zvýšené addukci u vyšších intenzit, k růstu amplitudy a ke zvýrazňování slizniční vlny a to pravděpodobně v důsledku zvýšení subglottického tlaku (Švec 2019).

### **2.2.3 Změna kvality hlasu**

Kromě změny frekvence a intenzity hlasu na svalovou aktivitu vniřních hrtanových svalů se Hirano a kol. (1970) zaměřili i na změnu rejstříku. Nejdříve subjekty produkovali stejné tóny v různých rejstřících. Aktivita svalu VOC byla výrazně vyšší u těžších (hrudní, střední) rejstříků; tendence zvýšené aktivity byla pozorovatelná i u svalů LCA a IA. Když při dalším měření docházelo ke změnám rejstříku při zpěvu, nejvýraznější souvislost s rejstříkem projevil právě VOC, jehož aktivita klesala při



přechodu z těžkého rejstříku na lehký a opačně, přičemž ostatní svalové aktivity se projeví jako nekonzistentní. Proto autoři považují sval VOC za zodpovědný za změnu rejstříku.

## 2.3 Parametrizace kmitů

Jak už bylo zmíněno dříve, tak aby bylo možné nějakým způsobem kvantifikovat průběh kmitání hlasivek, je třeba zavést určité parametry. Většinou je vztahujeme k trvání jedné periody  $T$ , kterou můžeme rozdělit na fázi otevření a fázi uzavření (Švec 1996). Díky informaci o dobách trvání fáze otevření  $T_o$  a trvání fáze uzavření  $T_c$  můžeme nadefinovat první dva parametry, jimiž jsou kvocient otevření  $Q_o$  (z angl. open quotient) a kvocient uzavření  $Q_c$  (z angl. closed quotient) jako

$$Q_o = \frac{T_o}{T}, \quad (2.1)$$

$$Q_c = \frac{T_c}{T}. \quad (2.2)$$

Je zřejmé, že jelikož  $T = T_o + T_c$ , jsou na sebe  $Q_o$  a  $Q_c$  navzájem převoditelné vztahem  $Q_o + Q_c = 1$ .

Jestliže dále rozdělíme fázi otevření na fázi otevírání a uzavírání s dobami trvání  $t_{og}$  a  $t_{cg}$ , můžeme nadefinovat kvocient zkosení, nazývaný také kvocient rychlosti  $Q_s$  (z angl. speed quotient) pomocí výrazu

$$Q_s = \frac{t_{og}}{t_{cg}} \quad (2.3)$$

a také rychlostní index  $SI$  (z angl. speed index)

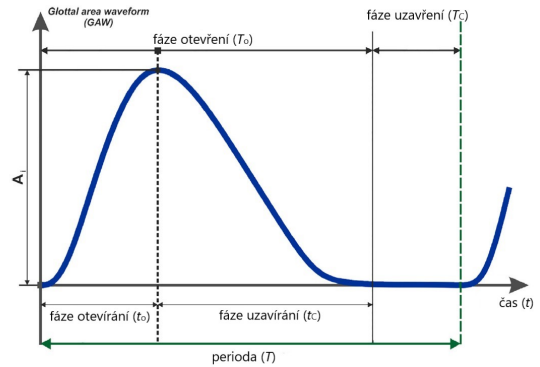
$$SI = \frac{t_{og} - t_{cg}}{t_{og} + t_{cg}}. \quad (2.4)$$

Je zřejmé, že parametrů vyjadřujících parametry kmitání je velké množství. To, jakým způsobem jsou na sebe tyto a další parametry navzájem převoditelné, ve své práci uvádí Schlegel a kol. (2019). Kromě parametrů vyjádřených výše, uvádí ještě

kvocient uzavírání  $Q_{cg}$  (z angl. closing quotient) pomocí vztahu

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

a dále frekvenční kvocient (z angl. rate quotient) a kvocient asymetrie. Výsledkem této práce je doporučení, aby jako hlavní parametry pro charakterizaci různých fází kmitání byly využívány  $Q_o$  a právě  $Q_{cg}$ , ze kterých jsme schopni ostatní kvocienty odvodit. Všechny parametry pro výpočet autor určuje z časového vývoje plochy glottis (GAW z angl. glottal area waveform), která byla získána buď z vysokorychlostního, nebo stroboskopičtého záznamu kmitů. Průběh časového vývoje plochy glottis při jednom cyklu je zobrazen na Obrázku 2.3.

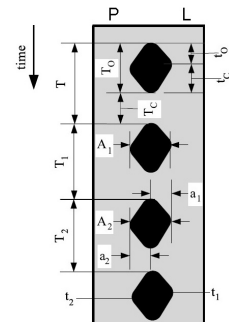


Obrázek 2.3: Vyjádření fází kmitání pomocí GAW (Schlegel a kol. 2018, upraveno)

Parametry kmitání můžeme ovšem podobným způsobem získat i z kymografických záznamů, kde je snímán pouze jeden řádek hlasivek (Qiu a kol. 2003). Způsob, jakým získáme z kymografického záznamu doby trvání jednotlivých fází, je zobrazen na Obrázku 2.4. Zároveň je možné z těchto záznamů určit i index časové periodicity kmitání, který počítáme pro dva za sebou jdoucí cykly jako podíl periody kratší z fází a periody delší fáze; index periodicity amplitudy kmitání, vyjadřující poměr nižší a vyšší amplitudy dvou po sobě jdoucích period, a indexy symetrie fáze a amplitudy. Ze stejného obrázku také můžeme získat levo-pravý fázový rozdíl LRPD (z angl. left-right phase difference):

$$LRPD = \frac{t_1 - t_2}{T} \cdot 360 [^\circ]. \quad (2.6)$$

U zdravého hlasu se ideálně LRPD pohybuje okolo  $0^\circ$ . Pokud jsou hodnoty odlišné a dochází k výraznému rozdílu mezi kmitáním levé a pravé hlasivky, může být hlas limitován.



Obrázek 2.4: Vyjádření fází kmitání z kymografického záznamu (Qiu a kol. 2003, upraveno)

Problém s tím, jak klasicky definujeme  $Q_o$ , nastává při fonaci na vyšších frekvencích nebo v lehčích rejstřících (Timcke a kol. 1958). Při těchto fonacích může docházet k tomu, že se hlasivky nezavírají úplně a  $Q_o = 1$ , ačkoli by teoreticky bylo možné určit alternativní hodnotu, kde bychom nepočítali s poklesem funkce GAW na 0, ale na jinou prahovou hodnotu. Stejný problém nastává i u přibližně 2/3 ženských hlasů, u kterých se vyskytuje mezera v zadní části glottis, která způsobuje, že se hlasivky nedovírají úplně (Woo 1996).

Na stejném principu, jako je nedefinován kvocient uzavírání  $Q_{cg}$ , můžeme nedefinovat i kvocient otevírání  $Q_{og}$ , který budeme také studovat v této práci:

$$Q_{og} = \frac{t_{og}}{T}. \quad (2.7)$$

Aby bylo možné popsat slizniční vlnu, je třeba pozorovat amplitudu, frekvenci a hlavně vertikální fázový rozdíl VPD (z angl. vertical phase difference) (Jiang a kol. 2008). Aby bylo možné VPD kvantifikovat, je třeba pozorovat pohyb spodního a horního okraje hlasivek (Titze a kol. 1993). Jestliže aproximujeme kmitání horního a spodního okraje hlasivky pomocí dvou harmonických funkcí, nazveme fázový rozdíl mezi těmito dvěma funkcemi právě vertikálním fázovým rozdílem VPD. Podrobný způsob, jakým můžeme tento rozdíl získat separátní analýzou fáze otevírání a uzavírání hlasivky z kymogramů je uveden v práci Jianga a kol. (2008). V principu se využívá předpokladu, že při laryngoskopickém pohledu zeshora otevírací (laterální) pohyb hlasivky odpovídá pohybu horního okraje hlasivky a uzavírací (mediální) pohyb hlasivky odpovídá pohybu spodního okraje hlasivky. VPD je potom možné získat pomocí metody nejmenších čtverců. Z kymogramů lze přibližně identifikovat velikost VPD vizuálně sledováním tvaru tzv. laterálního vrcholu kmitů hlasivek - čím ostřejší vrchol, tím větší je VPD (Švec 2019, Kumar a kol. 2020).

Pro popis fáze uzavírání můžeme kromě  $Q_{cg}$  využívat také kvocient normalizované amplitudy NAQ (Alku a kol. 2002). Definujeme jej jako podíl amplitudy rozkmitu hlasivky  $A$  a negativního maxima derivace uzavíracího pohybu hlasivky  $d_{peak}$ , který normujeme vydělením periodou kmitů  $T$ :

$$NAQ = \frac{A}{d_{peak} \cdot T}. \quad (2.8)$$

Pro trojúhelníkový tvar pulzu toku vzduchu dosahuje NAQ stejných hodnot jako

$Q_{cg}$ , ale pro reálné pulzy jsou tyto kvocienty odlišné. Bylo zjištěno, že NAQ je výhodné využívat k určování dyšné, normální, případně tlačené fonace a proto je dobré pozorovat jeho změny při změně intenzity. Alku a kol. (2002) zavedli NAQ původně pro inverzně filtrovaný mikrofonní signál. V naší práci tento kvocient aplikujeme přímo pro kvantifikaci kmitů hlasivek.

## 2.4 Změna parametrů při změně intenzity

Už Timcke a kol. (1958) pozoroval pomocí vysokorychlostní kamery, že při zvyšování intenzity v hrudním rejstříku docházelo k prodlužování fáze uzavření a tedy ke snižování  $Q_o$ . Dále studoval, jak se mění tvar křivky vyjadřující maximální šířku během jednoho cyklu, a zjistil, že při nižších intenzitách je fáze otevírání kratší než fáze zavírání a  $Q_s$  se pohybuje mezi 0,5 a 1. Při vyšších intenzitách se naopak zvyšuje  $Q_s$  nad 1, jelikož dochází k rychlejšímu zavírání hlasivek. Vysokorychlostní záznamy byly také použity při práci Yokonoshiho a kol. (2016). Ti se na základě materiálu získaného od několika pěvecky trénovaných mužů snažili určovat kvocienty v různých místech hlasivky a zjistili, že ve všech místech  $Q_o$  klesá s rostoucí intenzitou. K tomuto jevu ovšem pravděpodobně dochází výhradně v modálním rejstříku, protože ve falzetovém rejstříku žádně statisticky významné změny  $Q_o$  autoři nezaznamenali a intenzita je zde tedy nejspíš modulovaná subglotickým tlakem bez výraznější změny nastavení hlasivek.

Pomocí stroboskopického měření velkého vzorku mužů i žen sledoval Woo (1996), že při zvyšování intenzity hlasu dochází k poklesu  $Q_o$ , fáze otevírání je delší než fáze uzavírání a dochází ke zvýraznění fázového rozdílu mezi horním a dolním okrajem hlasivky, roste tedy slizniční vlna. Velice zajímavým poznatkem je, že při zvyšování intenzity autor sledoval zvýšení amplitudy horního okraje hlasivek, ale ke zvětšení celkové plochy glottis nedochází, jelikož je pohyb limitován tělem hlasivky. Pozorováním také zjistil, že vliv zvyšování intenzity má menší vliv na fázi otevírání než na fázi zavírání, která je značně zkracována. Jestliže se v přední či zadní části hlasivek vyskytuje mezera, dochází při zvyšování intenzity k jejímu zmenšení. Byly také pozorovány pohlavní rozdíly ve fázích otevírání a uzavírání, v oblasti hlasivek s největším rozkmitem a hlavně u slizniční vlny, která je mnohem výraznější u mužů a jen málo výrazná u hlasivek žen. Naopak pohlavní rozdíly autor nepozoroval u změn

SPL.

K závěru, že pohlaví nemá vliv na intenzitu a že případná mezera mezi hlasivkami, u žen nejběžněji v posteriorní části zatímco u mužů častěji anteriorně, se zmenšuje při zvyšování SPL, došel pomocí strobolaryngoskopických dat i Sulter (1996). Na skupině více než 200 osob zkoumal i rozdíly mezi trénovanými a netrénovanými jedinci a zjistil, že trénovaní jedinci dosahují vyšších SPL.

Dejonckere a kol. (2015) zkoumali parametry kmitání z videokymografického záznamu jednoho profesionálního zpěváka při tzv. messa di voce, tedy fonaci, při které subjekt na stále stejné frekvenci nejdříve zesílí a pak zeslabí. Účelem jejich studie bylo pomoci kvantifikovat kmitání pro potřebu zpěváků a pěveckých pedagogů. Vycházeli z předpokladu, že při nízkých intenzitách můžeme kmitání hlasivek přiblížit pomocí jednohmotnostního modelu, ale postupným zvyšováním intenzity dochází k tomu, že se kmity hlasivek stávají složitějšími a k jejich popisu je třeba využívat dvouhmotnostní model. Na základě toho zjistili, že při zvyšování SPL dochází ke zvýšení  $Q_o$ , které je způsobené aktivním ztlušťováním hlasivek, a stejně jako i u ostatních studií můžeme sledovat zvyšování  $Q_s$ . Autoři také sledovali, že změna SPL není lineární a liší se při zesilování a zeslabování.

Sundberg a kol. (1993) sledovali vztah mezi intenzitou a subglottickým tlakem. Zjistili, že lineární vztah je mezi SPL a logaritmem subglottického tlaku. Zároveň také zjistili, že intenzita hlasu není upravována pouze díky kmitům hlasivek, ale že ke zvyšování intenzity přispívají také rezonanční dutiny.

Při studiu změn NAQ při různých SPL bylo zjištěno, že změny NAQ jsou velice blízké změnám  $Q_{cg}$  (Vilkman a kol. 2002). Stejní autoři také došli k závěru, že hodnoty NAQ byly nejvyšší při fonaci na nízkých intenzitách a nejnižší u hlasité (u žen), případně normální fonace (u mužů). Podle autorů tyto změny mohou být způsobeny přechody mezi způsoby fonace z dyšné u slabších fonací k tlačené u fonací hlasitějších.

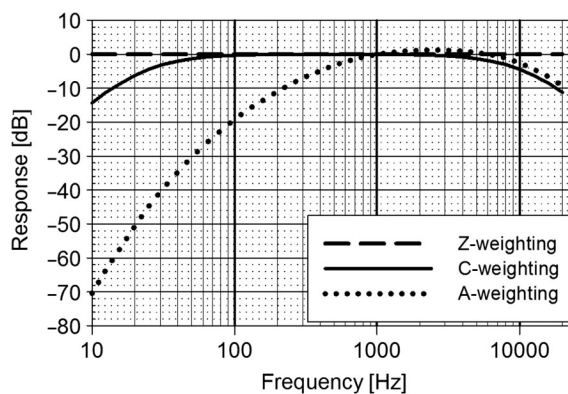
## 2.5 Hladina akustického tlaku SPL

### 2.5.1 Časové a frekvenční vážení SPL

Jak už bylo řečeno dříve, hlasitost je subjektivní veličina. Při určování SPL je tedy vždy třeba se rozhodnout, zda chceme, aby se výsledná hodnota blížila vjemu lidského ucha, které je citlivější na zvuky v rozmezí 1 - 5 kHz (Švec a Granqvist 2018). Za tímto účelem využíváme při analýze dat tzv. frekvenčního vážení.

Vážení, které nepotlačuje žádné frekvence, se nazývá Z-vážení (viz Obrázek 2.5.). Pro analýzu hlasu ovšem používáme praktičtější C-vážení, které má přibližně stejný efekt jako Z-vážení v oblasti frekvencí, ve kterých se pohybuje základní frekvence hlasu, a zároveň potlačuje nízké frekvence, které v detekovaném signálu tvoří okolní šum. Pomocí C-vážení můžeme přiblížit, jak lidské ucho vnímá hlasité zvuky. Způsobu, jakým lidské ucho vnímá slabší zvuky se nejlépe přiblížíme pomocí A-vážení, které zesiluje frekvence v rozsahu přibližně 1 - 5 kHz a ostatní frekvence naopak zeslabuje. Kvůli tomuto efektu ovšem může docházet k nežádoucím změnám spektrálních komponent a tedy i k celkovému zkreslení dat při měření SPL.

Dalším důležitým parametrem, se který je třeba pracovat, je tzv. časové vážení, které vyjadřuje rychlost odpovědi na změnu SPL (Švec a Granqvist 2018). Pokud předpokládáme, že SPL bude v průběhu měření stabilní, využíváme pomalé S-vážení (z angl. slow-weighting) s časovou konstantou  $\tau = 1$  s. Pokud naopak chceme zaznamenávat rychlé změny v čase, využijeme rychlé F-vážení (z angl. fast-weighting) s časovou konstantou  $\tau = 0,125$  s. Výhodou časového vážení je, že bere v úvahu kromě okamžitých hodnot SPL i jejich vývoj v minulosti. Pokud jsou změny SPL tak rychlé, že je potřeba je zaznamenávat rychleji než pomocí F-vážení, je možné použít speciální vážení s nižší časovou konstantou. Tento způsob ovšem využívá nestandardizovaných hodnot, takže výsledky mohou být hůře porovnatelné.



Obrázek 2.5: Standardní frekvenční vážení pro měření SPL (Švec a Granqvist 2018)

# Cíl práce

Z prací uvedených v přehledu problematiky vyplývá, že se změnou intenzity hlasu se mění povaha kmitů hlasivek. Tato bakalářská práce si dává za cíl parametrizovat kmity hlasivek, jejichž záznam bude získán pomocí vysokorychlostní laryngoskopie, určit, jak se při změně intenzity zavedené parametry kmitání mění u zdravé zpěvačky, a jakým způsobem tyto parametry odrážejí reálné fyziologické změny známé z literatury. Kromě pozorování změn parametrů v závislosti na čase a jejich souvislosti s fyziologickými změnami kmitů zobrazených pomocí kymogramů budeme také sledovat, jestli je vývoj změny parametrů s rostoucí intenzitou ovlivněn také frekvencí fonace.

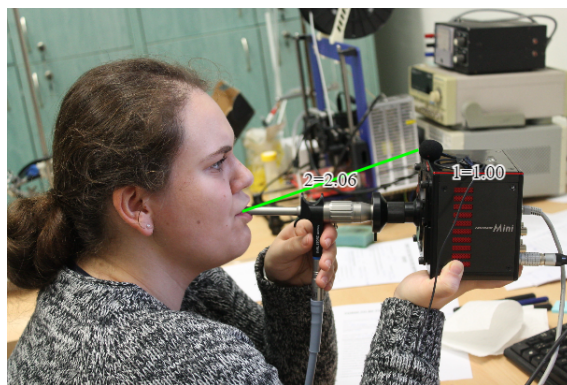
Za tímto účelem pomocí vysokorychlostní laryngoskopie sledujeme zdravý ženský hlas při pozvolné změně fonace na jednom tónu při tzv. crescendu, neboli zesílení z nejtíší na nejsilnější fonaci. Měření proběhne v rámci celého hlasového rozsahu, a proto je možné pozorovat, zda jsou tyto změny vázány na změnu základní frekvence případně na změnu způsobu fonace.

# Materiál a metody

## 4.1 Průběh záznamu dat

Pro získání dat byla zvolena metoda měření pomocí vysokorychlostní videolaryngoskopie, pro jejíž realizaci byla využita vysokorychlostní kamera FASTCAM Mini AX100 54, se 16GB pamětí, se snímkovací frekvencí 7200 fps a rozlišením  $384 \times 576$  pixelů a k ní připojený Lupen-laryngoskop, 8707 DA Karl STORZ, 10mm,  $90^\circ$ . Měření probíhalo na autorce práce (20 let) se zdravým hlasem a s pěveckou přípravou (od 10 do 19 let věku hodiny zpěvu na základní umělecké škole, 1 rok členka univerzitního sboru).

Kromě videolaryngoskopického záznamu byl souběžně snímán synchronizační signál z kamery a zvukový signál pomocí mikrofonu (ISOMAX 2 O, Countryman Associates), který byl připevněn na vysokorychlostní kameře ve vzdálenosti 192 mm od úst. Tato vzdálenost byla určena dodatečně z Obrázku 4.1 díky známé velikosti vysokorychlostní kamery (93 mm). Synchronizační signál z kamery poskytoval informaci o počátku a konci videozáznamu a sloužil k tomu, aby bylo možné sjednotit časovou osu signálu z mikrofonu a z vysokorychlostní kamery. Synchronizační signál byl spolu s mikrofonním signálem zaznamenán pomocí profesionální zvukové karty (Fireface 400, RME Germany) a software Audacity do počítače.



Obrázek 4.1: Fotografie průběhu měření

Pro potřeby práce bylo klíčové proměřit celý hlasový rozsah ve zvolených intervalech. Zvoleny byly fonace na tónech E3, Ab3, C4, E4, Ab4, C5, E5 o odpovídajících



frekvencích přibližně 165 Hz, 208 Hz, 262 Hz, 330 Hz, 415 Hz, 523 Hz a 659 Hz (Titzte 2000). Na každém tónu bylo provedeno zesílení od nejslabší fonace k nejsilnější, tzv. crescendo. Nejdříve byly zaznamenány fonace ve střední části hlasového rozsahu, později jsme postupovali k vysokým a nízkým fonacím. Pro video záznam byl využíván nejdelší možný časový interval, v daném případě 7,2 s, aby bylo možné opravdu postupně dosáhnout nejslabší i nejsilnější fonace. Při měření bylo třeba laryngoskop mírně zahřívát, aby na něm nedocházelo ke kondenzaci vlhkého vzduchu z ústní dutiny, která způsobovala zamlžení obrazu. K tomuto účelu jsme využívali běžný fén na vlasy s teplým vzduchem, kterým byl laryngoskop zahřát před jeho vložením do úst.

Aby bylo možné určit správnou SPL měřenou mikrofonom, bylo potřeba jej zkalibrovat. Pro tento účel byla použita stejná metoda, jaká byla publikována v článku Kumara a Švece (2018). Kalibrace probíhala pomocí stabilního zdroje zvuku se sinusoidním průběhem a frekvencí 1000 Hz, jehož SPL byla změřena pomocí zvukoměru, který byl umístěn v těsné blízkosti mikrofону. Zdroj zvuku byl umístěn do vzdálenosti 30 cm od mikrofону a do souboru byla spolu s kalibračním signálem zaznamenána i vyslovená změřená hodnota SPL.

## 4.2 Analýza dat

### 4.2.1 Zvuková analýza

Dříve, než bylo možné přikročit k samotné analýze zvukového signálu, bylo třeba zvukový signál ořezat tak, aby byl synchronizovaný s videozáznamem. K tomuto účelu byl využíván synchronizační signál zaznamenaný při měření. Tento signál prudce vzrostl se začátkem zaznamenávání videa a prudce poklesl se skončením záznamu. Díky této vlastnosti mohl být k ořezání signálu použitý skript `cut.m` využívající prostředí MATLAB, který vznikl v Hlasové laboratoři Katedry experimentální fyziky Univerzity Palackého v Olomouci. Správnost ořezu byla zkontrolována paralelním zobrazením synchronizačního signálu se zvukovým signálem. V případě, že ořez zvuku pomocí tohoto skriptu nebyl správný, byl signál ořezán manuálně v programu Audacity.

## Kalibrace SPL

Pro potřeby kalibrace hladiny akustického tlaku využíváme skripty CalibrateVoiceSPL, které vytvořil Granqvist a Švec (2018), využívající opět prostředí MATLAB. Při aplikaci kódu na stabilní sinusový signál s frekvencí 1000 Hz frekvenční a časové vážení nehraje výraznou roli, a proto bylo zvoleno C-vážení, které původní signál nemění, ale potlačuje nízkofrekvenční šum. Dále bylo zvoleno časové F-vážení. Oproti tomu při aplikaci skriptů na jednotlivé zvukové soubory za účelem získání výsledných hodnot SPL bylo aplikováno jak C-vážení, tak i A-vážení. Kvůli rychlosti odezvy bylo zvoleno speciální časové průměrování kvadrátu akustického tlaku pomocí dolnoproputního filtru s mezní frekvencí 50 Hz (Granqvist a Švec 2018).

U každé fonace jsme tedy získali data, která je možné dále využívat při určování závislosti vybraných parametrů na SPL. Zároveň jsme u každé fonace určili minimální a maximální SPL získanou A a C-vážením.

### Získání základní frekvence z analýzy zvukového signálu

Aby byly informace o jednotlivých fonacích kompletní, bylo třeba ještě určit informace o frekvenci hlasu. Za tímto účelem byl využíván skript `swipep.m` (Camacho a Harris 2008), díky kterému jsme u každé fonace určili průběh základní frekvence hlasu v čase a z jejích okamžitých hodnot jsme mohli vypočítat průměrnou základní frekvenci a její směrodatnou odchylku.

## 4.2.2 Obrazová analýza

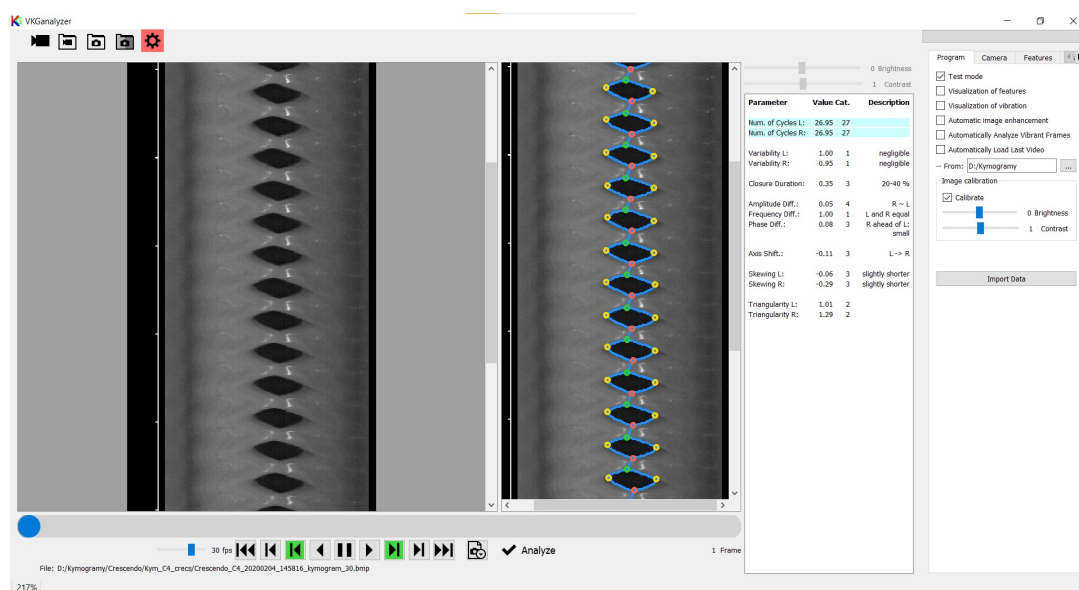
### Tvoření kymogramů

Jedna z možností, jak vyhodnocovat vysokorychlostní videozáznamy hlasivek, spočívá ve vytvoření kymogramů a jejich následné analýze. Za tímto účelem jsme využili zobrazení videa v programu ImageJ, kde byly kymogramy vytvořeny díky skriptu `CogBioCreateKymogram` (Herbst 2021). Aby bylo možné kymogram vytvořit, bylo potřeba pro sledování zvolit takový řádek, který byl umístěn přibližně uprostřed hlasivek, kolmo k ose glottis, a který zobrazoval celou šířku hlasivky. Ideálně jsme řádek volili tak, aby vyhovoval celé délce záznamu, ale v případě, že docházelo k pohybům hrtanu, tedy posunu hlasivek v rámci obrazu, bylo třeba obraz stabilizovat díky metodě vyvinuté autory Deliyski (2005) a Deliyski a kol. (2006). Tato

stabilizace byla nutná u fonací na tónech E4, C5 a E5. Výsledkem analýzy videozáznamů byla sada obrázků, ve které každý zobrazoval kymogram o délce trvání 100 ms.

## Analýza kymogramů

Kymogramy bylo následně možné zanalyzovat vizuálně, tedy subjektivně posoudit, k jakým změnám dochází, nebo dále analyzovat pomocí programu VKG analyzer, který umožňuje objektivní analýzu (Novozámský a kol. 2015). V daném případě dochází k detekci okrajů glottis, která je možná, jelikož glottis je v obraze tmavší než okolní tkáň. Přesnost detekce bylo možné ovlivnit pomocí změn jasnosti a kontrastu. Analýza ve VKG analyzeru je naznačena na Obrázku 4.2. Výsledkem analýzy je soubor dat, obsahující informace o pozici hran levé a pravé hlasivky pro vybraný řádek záznamu, který tvoří tzv. konturu.



Obrázek 4.2: Analýza VKG v programu VKG analyzer

Pomocí MATLAB skriptů vytvořených v Hlasové laboratoři Katedry experimentální fyziky Univerzity Palackého v Olomouci (Kumar a kol. 2021) bylo možné z výsledků analýzy kymogramů z programu VKG analyzer získat parametry kmitání hlasivek. Pro potřeby bakalářské práce jsme využívali velikost amplitudy, LRPD,  $Q_o$ ,  $Q_s$ , NAQ a VPD. Dále jsme pomocí dob trvání fáze otevírání  $t_{og}$ , fáze uzavírání  $t_{cg}$  a doby trvání periody  $T$  určovali kvocient uzavírání  $Q_{cg}$  podle vztahu 2.5 a také kvocient otevírání  $Q_{og}$  podle vztahu 2.7. Tyto kvocienty vždy odpovídají průměrným hodnotám pro daný kymogram, který zobrazuje kmitání hlasivek trvajících

100 ms.

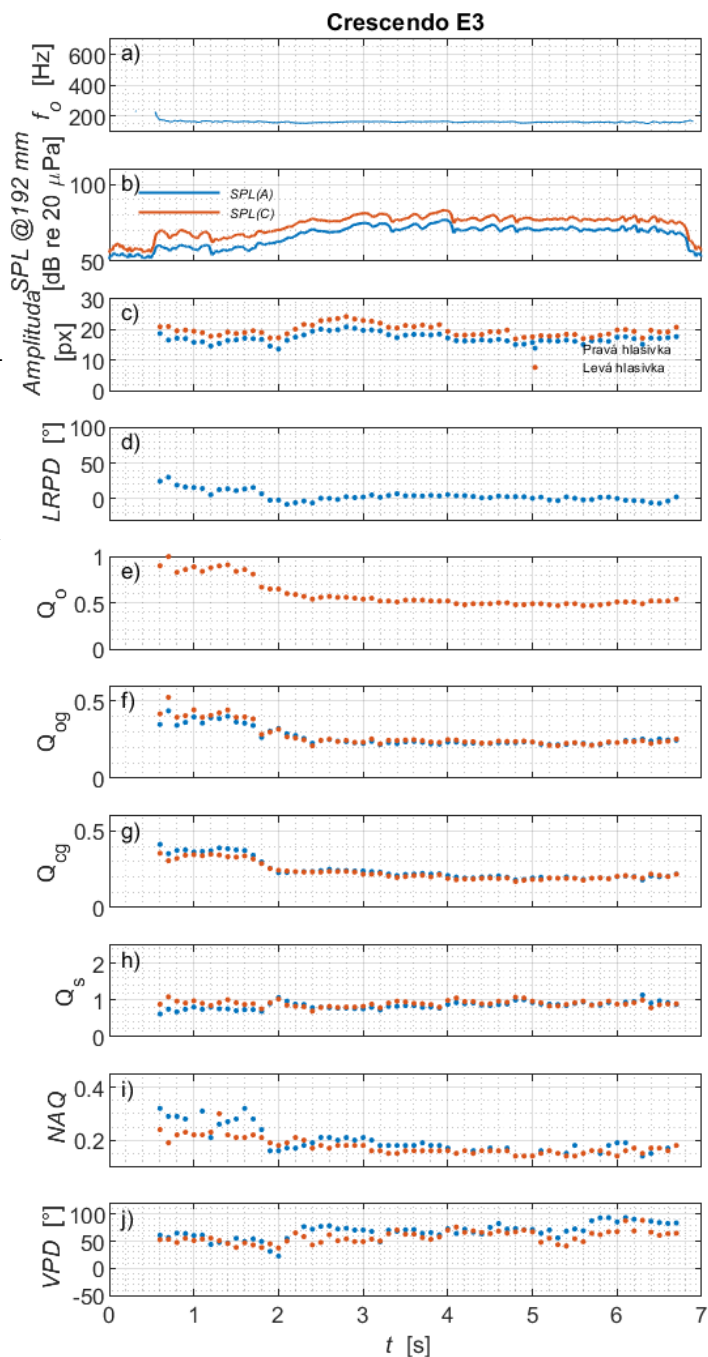
U jednotlivých fonací jsme sestavili grafy zobrazující závislost frekvence, intenzity a studovaných parametrů na čase, které jsme srovnávali s fyziologickými změnami při kmitání hlasivek znázorněnými na kymogramech. V těchto kymogramech jsou snímky natočeny tak, aby zobrazoval kymogramy v čase zleva doprava. Potom pravou hlasivku můžeme pozorovat dole a levou nahoře. Nakonec jsme sestavili i grafy, ve kterých byly jednotlivé parametry sestaveny v závislosti na SPL(C), a tyto grafy jsme mezi sebou porovnali. Pro tvorbu grafů byl využíván software MATLAB.

# Výsledky

## Crescendo E3

Fonace zesílení na tónu E3 proběhla celá, dle subjektivního percepčního hodnocení, v hrudním rejstříku s mírnými výkyvy frekvence na konci fonace způsobené vibrátem. Průměrná frekvence celé fonace byla  $f_o = (163 \pm 5)$  Hz.

Vývoj základní frekvence, SPL a sledovaných parametrů dané fonace v čase můžeme pozorovat na grafu v Obrázku 5.1. Z tohoto obrázku je patrné, že od začátku fonace do 1,2 s intenzita nejdříve klesala (Obrázek 5.1b) a způsobila mírný pokles amplitudy. Vzhledem k tomu, že však intenzita klesala pouze krátce, nestabilně



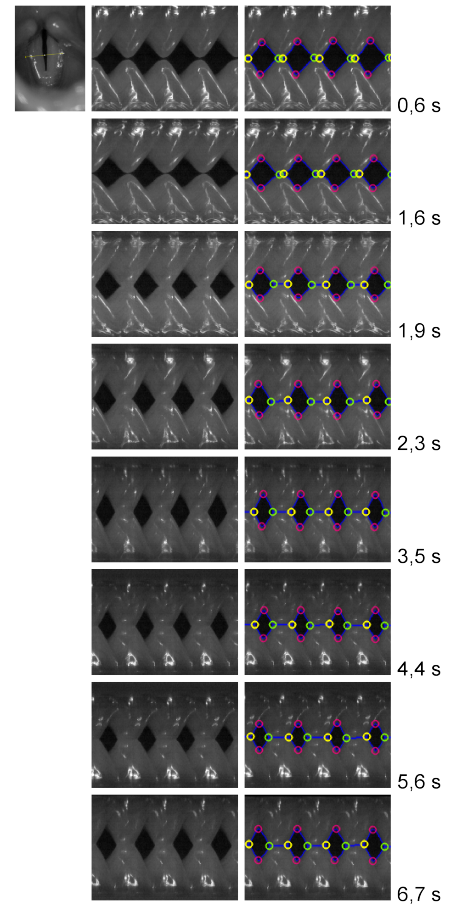
Obrázek 5.1: Crescendo E3: Grafy závislosti základní frekvence  $f_o$ , SPL, amplitudy kmitů, levo-pravého fázového rozdílu LRPD, kvocientu otevření  $Q_o$ , kvocientu otevírání  $Q_{og}$ , kvocientu uzavírání  $Q_{cg}$ , kvocientu rychlosti  $Q_s$ , normalizovaného kvocientu amplitudy NAQ a vertikálního fázového rozdílu VPD na čase.

a změna intenzity byla minimální, nepozorujeme u ostatních kvocientů výrazné změny.

Po počátečním poklesu docházelo k nárůstu SPL. V tomto případě docházelo pouze k mírnému nárůstu amplitudy, jak můžeme vidět na Obrázku 5.1c), naopak prudce poklesl  $Q_o$  a  $Q_{cg}$  (Obr. 5.1e, g), poklesl také  $Q_{og}$ , který vidíme na Obr. 5.1f. Kvocient  $Q_s$ , zobrazený na Obr. 5.1h, byl v tomto případě přibližně konstantní a pohyboval se kolem hodnoty 1, která značí, že fáze otevírání byla přibližně stejně dlouhá jako fáze zavírání. Mírný pokles vidíme také u NAQ na Obr. 5.1i. Slizniční vlnu popisující VPD mírně stoupal a jeho vzrůst můžeme pozorovat na Obr. 5.1j.

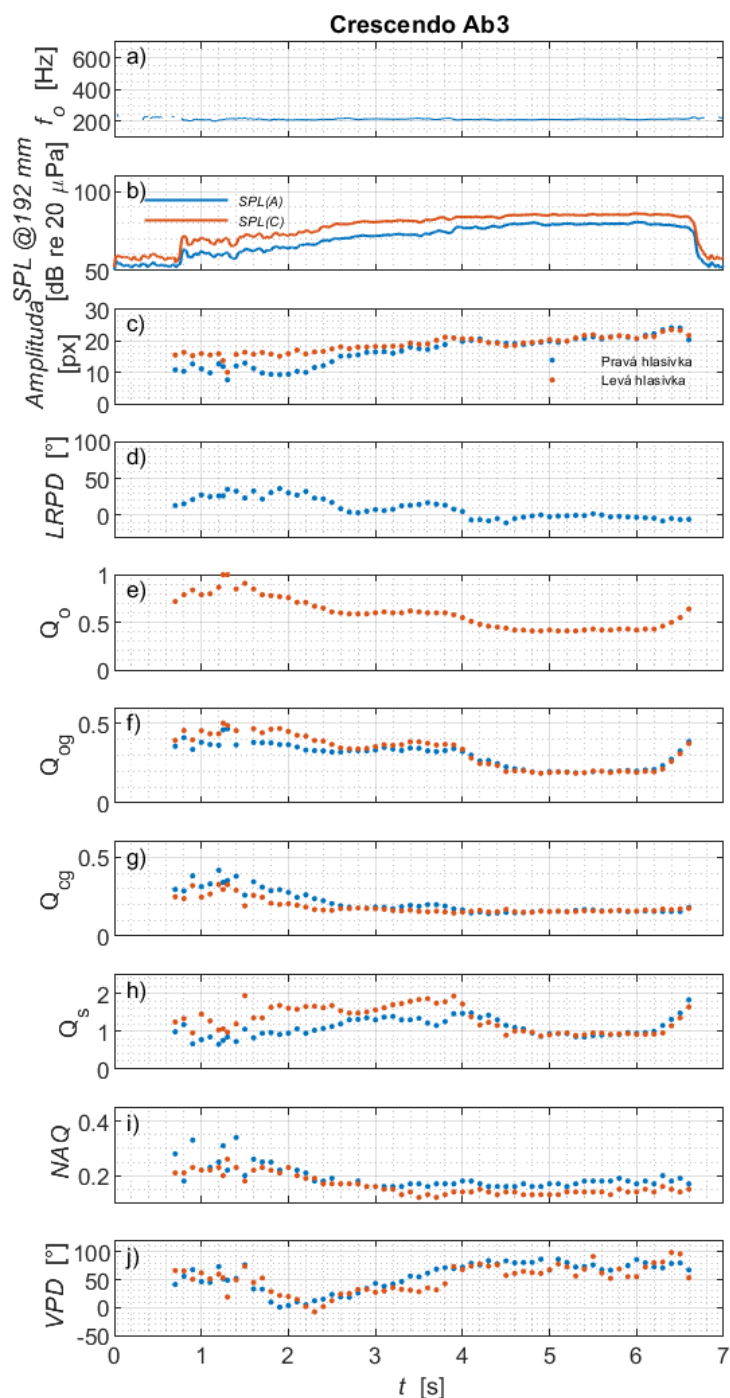
Od 4 s vidíme, že intenzita mírně poklesla a zůstala přibližně konstantní až do konce fonace. Vidíme, že jelikož dále nedocházelo ke změnám frekvence a intenzity, všechny kvocienty zůstaly přibližně konstantní, tedy až na VPD, který ke konci ještě mírně vzrostl. Tento nárůst je pravděpodobně způsoben vibrátem na konci fonace.

Porovnáme-li výsledky analýzy parametrů s reálným vzhledem hlasivek na kymogramech v Obrázku 5.2, vidíme, že s rostoucí intenzitou dochází k nárůstu amplitudy a k delší době uzavření hlasivky, ke změně tvaru hlasivky, která se zostřuje, přičemž doby otevírání a uzavírání jsou v průběhu času stále přibližně stejné. Na kymogramech je také možné pozorovat nárůst slizniční vlny.



Obrázek 5.2: Crescendo E3: Řádek, ze kterého jsou generovány kymogramy, kymogramy zobrazující kmity hlasivek v různých časech fonace a kymogramy s detekovanými hranami v programu VKG analyzer. Délka každého kymogramu je 24 ms.

## Crescendo Ab3



Obrázek 5.3: Crescendo Ab3: Grafy závislosti základní frekvence  $f_0$ , SPL, amplitudy kmitů, levo-pravého fázového rozdílu LRPD, kvocientu otevření  $Q_0$ , kvocientu otevírání  $Q_{og}$ , kvocientu uzavírání  $Q_{cg}$ , kvocientu rychlosti  $Q_s$ , normalizovného kvocientu amplitudy NAQ a vertikálního fázového rozdílu VPD na čase.

Fonace crescenda na frekvenci odpovídající tónu Ab3 probíhala celá, dle subjektivního porcepčního hodnocení, v hrudním rejstříku. Graf na Obrázku 5.3 znázorňuje vývoj základní frekvence fonace crescenda Ab3 v čase (Obr. 5.3a), dále vývoj SPL (Obr. 5.3b) a také studované parametry v čase. Základní frekvence fonace byla  $f_0 = (213 \pm 4)$  Hz.

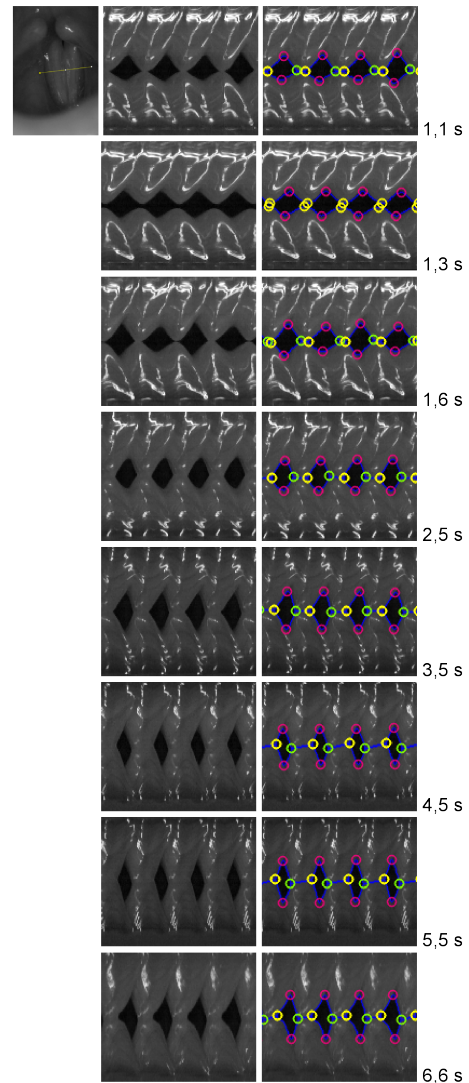
Na začátku fonace pozorujeme, že hodnoty parametrů pro pravou a levou hlasivku se mírně odlišují. Můžeme pozorovat, že tyto rozdíly jsou reflektovány i v LRPD na Obr. 5.3d, který nám říká, že levá hlasivka je mírně opožděná za hlasivkou pravou. Zároveň na začátku fonace pozorujeme výkyvy SPL, ze kterých pramení výkyvy všech sledovaných parametrů. Tyto výkyvy jsou dány

nestabilní intenzitou při snaze o nejtišší fonaci.

Po prvotních výkyvech intenzity na začátku fonace už od 1,5 s intenzita rovnoměrně vzrůstá. S růstem intenzity dochází k nárůstu amplitudy kmitů (Obr. 5.3c), k poklesu  $Q_o$  z hodnot blízkých 1 na hodnoty blízké 0,4. Dále na Obr. 5.3f pozorujeme mírný pokles  $Q_{og}$  a na Obr. 5.3g velmi prudký pokles  $Q_{cg}$ , ze kterého vyplývá, že s rostoucí SPL výrazně roste rychlost, se kterou se hlasivky zavírají, přičemž rychlost otevírání roste jen mírně. V souvislosti s  $Q_{og}$  a  $Q_{cg}$  pozorujeme na Obr. 5.3h i změny  $Q_s$ , který roste nejprudčeji, když dochází k prudkému poklesu  $Q_{cg}$ , a naopak mírně klesá, když  $Q_{cg}$  zůstává konstantní a  $Q_{og}$  mírně klesá.

Kvocient NAQ na Obr. 5.3i klesá a nakonec vidíme změny ve VPD na Obr. 5.3j. Ten se na začátku fonace pohybuje okolo  $50^\circ$  a nejdříve dochází k jeho poklesu až na  $0^\circ$ . Poté ale dochází k jeho opětovnému vrůstu až na hodnoty blízké  $80^\circ$ .

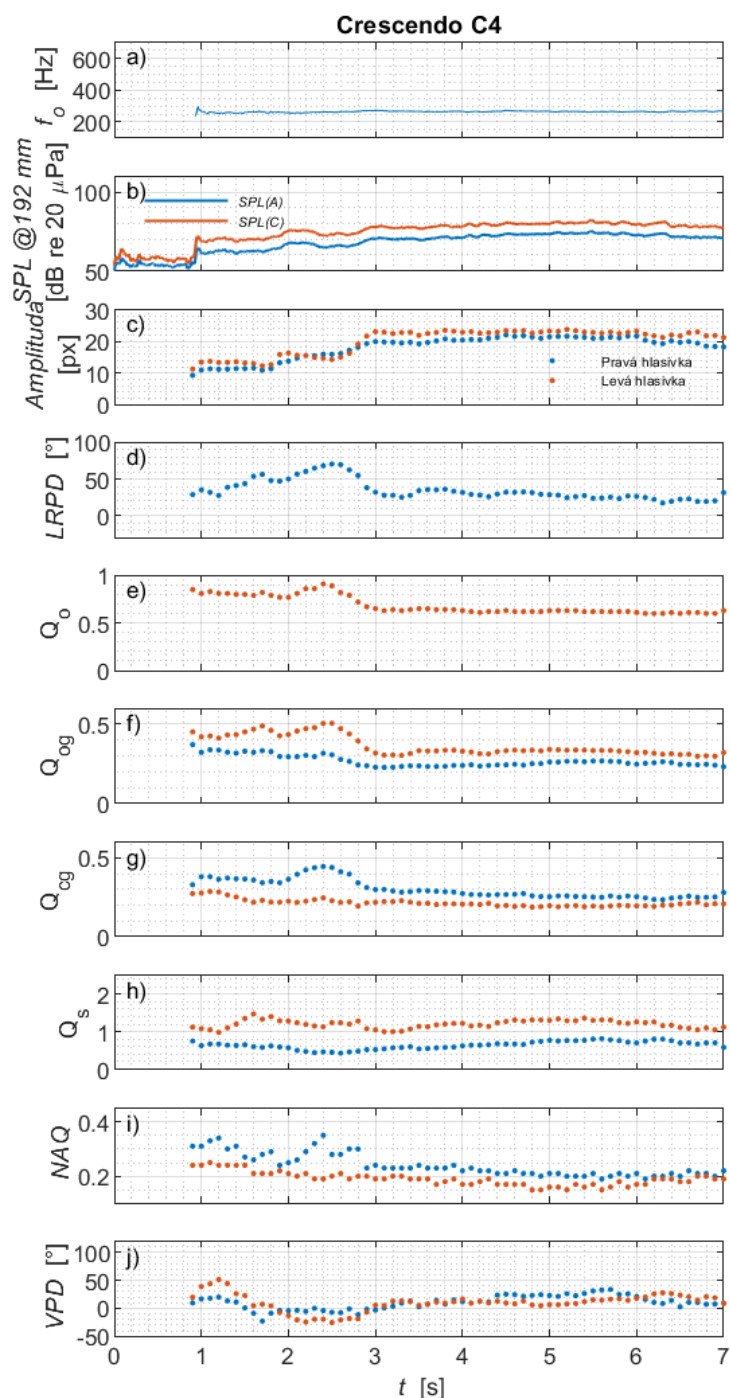
Chceme-li tedy dát výsledky sledovaných parametrů do souvislosti se zobrazenými kymogramy, které vidíme na Obrázku 5.4, je zřejmé, že lze pozorovat subharmonické kmity na začátku fonace, která se odráží v nekonzistenci parametrů. Subharmonické kmity jsou nejvíce patrné v čase kolem 1,6 s. Následně potom můžeme pozorovat, jak dochází k nárůstu amplitudy kmitů, zvyšování kontaktu hlasivek (viz  $Q_o$ ), viditelné jsou také změny tvaru hlasivek, který odráží kvocienty  $Q_{og}$ ,  $Q_{cg}$  a  $Q_s$ , a také můžeme sledovat slizniční vlnu, a to díky patrnému zostřování hran a dosahu slizniční vlny na horním okraji hlasivek.



Obrázek 5.4: Crescendo Ab3: Řádek, ze kterého jsou generovány kymogramy, kymogramy zobrazující kmity hlasivek v různých časech fonace a kymogramy s detekovanými hranami v programu VKG analyzer. Délka každého kymogramu je 20 ms.



## Crescendo C4



Obrázek 5.5: Crescendo C4: Grafy závislosti základní frekvence  $f_o$ , SPL, amplitudy kmitů, levo-právého fázového rozdílu LRPD, kvocientu otevření  $Q_o$ , kvocientu otevírání  $Q_{og}$ , kvocientu uzavírání  $Q_{cg}$ , kvocientu rychlosti  $Q_s$ , normalizovaného kvocientu amplitudy NAQ a vertikálního fázového rozdílu VPD na čase.

běh  $Q_s$  blízky 1, který popisuje, že doby zavírání a otevírání hlasivky jsou přibližně

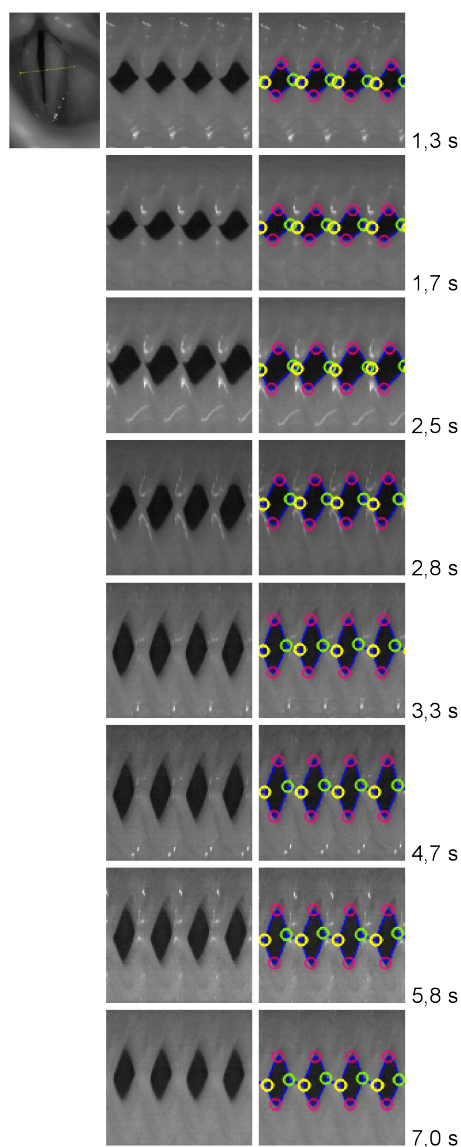
Zesílení na tónu C4 proběhlo, dle subjektivního percepčního hodnocení, kompletně v hrudním rejstříku, průměrná základní frekvence byla  $f_o = (264 \pm 5)$  Hz. Z grafů na Obrázku 5.5 je patrné, že s rostoucí intenzitou hlasu dochází opět k nárůstu amplitudy kmitů hlasivek (Obr. 5.5c),  $Q_o$  klesá, avšak jeho minimální hodnota  $Q_o \approx 0,6$  nedosahuje tak nízkých hodnot jako u předchozích fonací (viz Obr. 5.5e). Dále vidíme na Obr. 5.5f,g pokles  $Q_{og}$  a  $Q_{cg}$ , přičemž u  $Q_{cg}$  je jasně zřetelný rozdíl mezi pravou a levou hlasivkou, způsoben vysokou hodnotou LRPD. V důsledku poklesu obou  $Q_{og}$  i  $Q_{cg}$  vidíme na Obr. 5.5h přibližně konstantní prů-

stejně.

Kvocient NAQ klesá, jak je patrné z Obr. 5.5i, a na Obr. 5.5j můžeme také pozorovat, že VPD nejdříve klesá do záporných hodnot a následně mírně narůstá. Od 3 s už nedochází k dalšímu významnému růstu intenzity. Proto také pozorujeme, že i kvocienty charakterizující kmitání hlasivek se nemění a zůstávají konstantní.

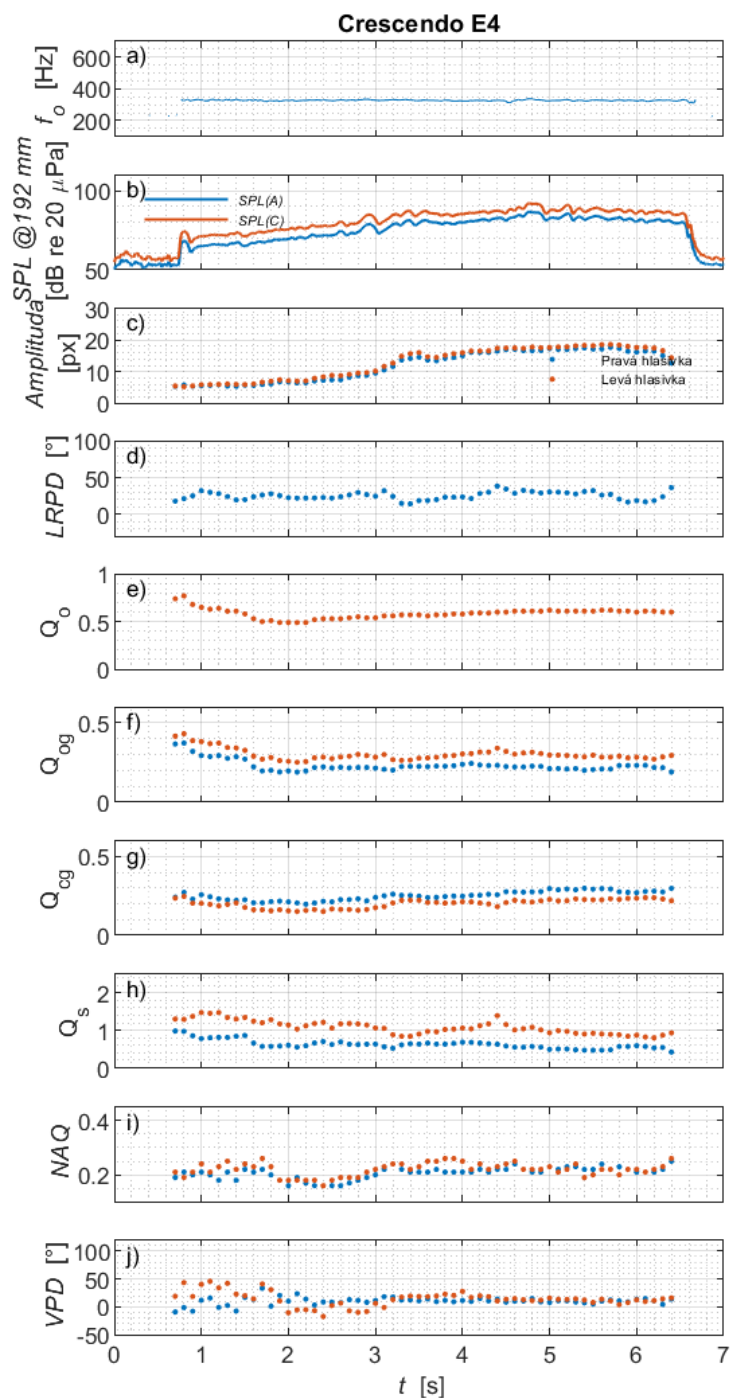
Jestliže opět porovnáme hodnoty parametrů se vzhledem hlasivky patrným z Obrázku 5.6, je jasně viditelné, jak se vzrůstající intenzitou roste amplituda a zkracuje se doba otevření hlasivky, ačkoli můžeme pozorovat, že oproti fonacím na nižších frekvencích jsou minimální hodnoty  $Q_o$  vyšší. Vidíme také, že tvar hlasivek odpovídá hodnotám  $Q_s$  a tedy otevírání je přibližně stejně dlouhé jako zavírání a vidíme, jak se s rostoucí SPL zvýrazňuje slizniční vlna, díky které můžeme pozorovat spodní okraj hlasivek, ale která je v porovnání s předchozími fonacemi méně výrazná.

Z Obrázku 5.5 je také patrný výrazný LRPD, který jsme mohli vidět i na Obr. 5.5d. Z kymogramů je vidět, že tento fázový rozdíl byl nejvýraznější v čase 2,5 s a potom došlo k jeho postupnému zmenšování.



Obrázek 5.6: Crescendo C4: Řádek, ze kterého jsou generovány kymogramy, kymogramy zobrazující kmitý hlasivek v různých časech fonace a kymogramy s detekovanými hranami v programu VKG analyzer. Délka každého kymogramu je 15 ms.

## Crescendo E4



Obrázek 5.7: Crescendo E4: Grafy závislosti základní frekvence  $f_o$ , SPL, amplitudy kmitů, levo-pravého fázového rozdílu LRPD, kvocientu otevření  $Q_o$ , kvocientu otevírání  $Q_{og}$ , kvocientu uzavírání  $Q_{cg}$ , kvocientu rychlosti  $Q_s$ , normalizovného kvocientu amplitudy NAQ a vertikálního fázového rozdílu VPD na čase.

k mírnému poklesu, jelikož poklesne i SPL.

Tvorba crescenda na tónu E4 probíhala, dle subjektivního percepčního hodnocení, již v hlavovém rejstříku. Na konci fonace je intenzita nepravidelná, jelikož hlavový rejstřík na relativně nízké frekvenci neumožňuje přílišné zesílení, aniž by nedošlo k přeskoku do hrudního rejstříku. Základní frekvence fonace byla relativně stálá, průměrně  $f_o = (327 \pm 4)$  Hz.

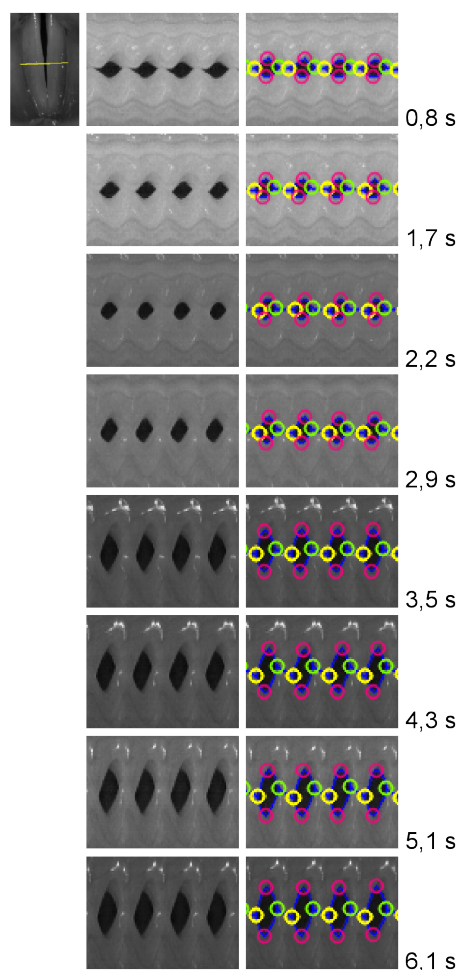
Zaměříme-li se na vývoj parametrů v čase na Obrázku 5.7, vidíme, že amplituda (Obr. 5.7c) s rostoucí intenzitou roste. Po 3 s, kdy dochází k výkyvům SPL amplituda nejdříve stoupne prudčeji a následně lehce poklesne, ale poté mírně narůstá téměř do konce fonace. Na konci dojde

Hodnota  $Q_o$ , zobrazena na Obr. 5.7e, je na začátku fonace, při nejnižší SPL, rovna  $Q_o \approx 0,8$ . Poté mírně klesá až na hodnotu  $Q_o \approx 0,5$ , ale ačkoli poté i nadále dochází k růstu SPL, vzroste kvocient na  $Q_o \approx 0,6$  a na této hodnotě kvocient zůstává až do konce fonace. Podobný vývoj můžeme sledovat také u  $Q_{og}$  na Obr. 5.7f, který nejdříve poklesne, ale od 2 s zůstává až do konce fonace konstantní. S počátečním vzrůstem SPL klesá také  $Q_{cg}$  (Obr. 5.7g). Po tom, co dojde k výkyvům intenzity však dojde k jeho mírnému nárůstu a až do konce fonace  $Q_{cg}$  mírně vzrůstá.

LRPD se v průběhu fonace pohybuje okolo  $30^\circ$ . Tato hodnota nejvíce ovlivňuje  $Q_s$ , což vidíme v důsledku odlišností hodnot pro pravou a levou hlasivku na Obr. 5.7h. Na začátku fonace je tento kvocient mírně vyšší než 1 pro levou hlasivku a přibližně 1 pro pravou hlasivku, se zvyšující intenzitou pak dochází k jeho poklesu. V čase 4,4 s se hodnoty pro levou hlasivku mírně zvýší, jelikož dochází k malému nárůstu doby otevírání (viz  $Q_{og}$ ) a mírnému poklesu doby uzavírání (viz  $Q_{cg}$ ). Na konci fonace jsou hodnoty  $Q_s$  pro pravou i levou hlasivku menší než 1.

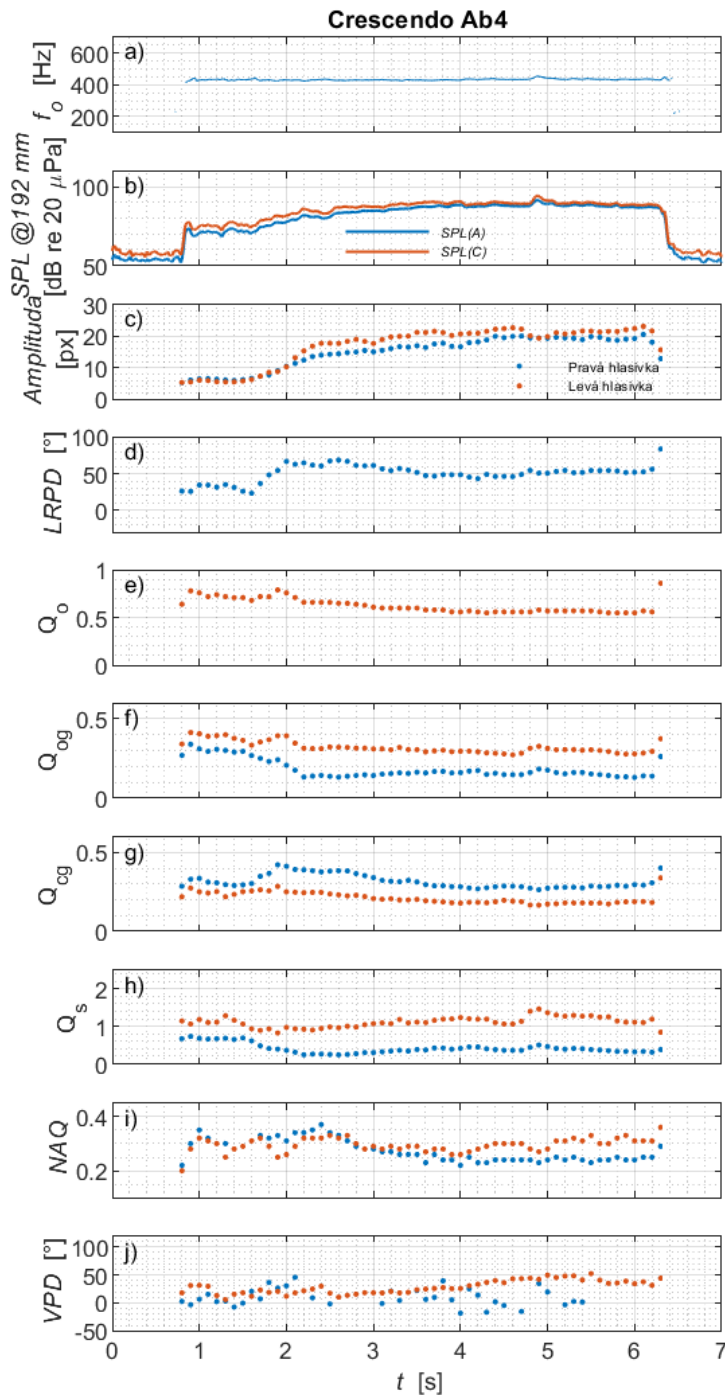
Jak je patrné z Obr. 5.7i, hodnoty  $NAQ$  nejdříve mírně narůstají. Potom, co přestává klesat  $Q_o$ , začíná  $NAQ$  mírně klesat. S výkyvy intenzity se  $NAQ$  vrátí na podobné hodnoty jako na začátku a na těchto hodnotách zůstává až do konce fonace. Hodnoty  $VPD$  (Obr. 5.7j) mají na začátku výrazný rozptyl. Mezi 2 s až 3 s se pohybují dokonce v záporných hodnotách. Od 3 s se ovšem  $VPD$  ustálil na hodnotách mírně nad  $0^\circ$ .

Při porovnání hodnot parametrů s kymogramy na Obrázku 5.8 je možné tvrdit, že s rostoucí SPL docházelo ke zvyšování rozkmitu hlasivek, a dále, že se hlasivky na daném řádku kompletně dovíraly a tento uzávěr se prodlužoval s rostoucí intenzitou,



Obrázek 5.8: Crescendo E4: Řádek, ze kterého jsou generovány kymogramy, kymogramy zobrazující kmity hlasivek v různých časech fonace a kymogramy s detekovanými hranami v programu VKG analyzer. Délka každého kymogramu je 13 ms.

ačkoli po určité době zůstal stálý. Tvar hlasivek se měnil, ačkoli doba otevírání byla po celou dobu přibližně stejně dlouhá jako doba zavírání. Z hodnot pro VPD je patrné, že slizniční vlna byla v průběhu fonace téměř nepatrná, mírně záporné hodnoty by naznačovaly, že je dolní okraj mírně fázově opožděn oproti okraji hornímu, tento trend však není na kymografických snímcích vizuálně patrný.



Obrázek 5.9: Crescendo Ab4: Grafy závislosti základní frekvence  $f_o$ , SPL, amplitudy kmitů, levo-právěho fázového rozdílu LRPD, kvocientu otevření  $Q_o$ , kvocientu otevírání  $Q_{og}$ , kvocientu uzavírání  $Q_{cg}$ , kvocientu rychlosti  $Q_s$ , normalizovaného kvocientu amplitudy NAQ a vertikálního fázového rozdílu VPD na čase.

## Crescendo Ab4

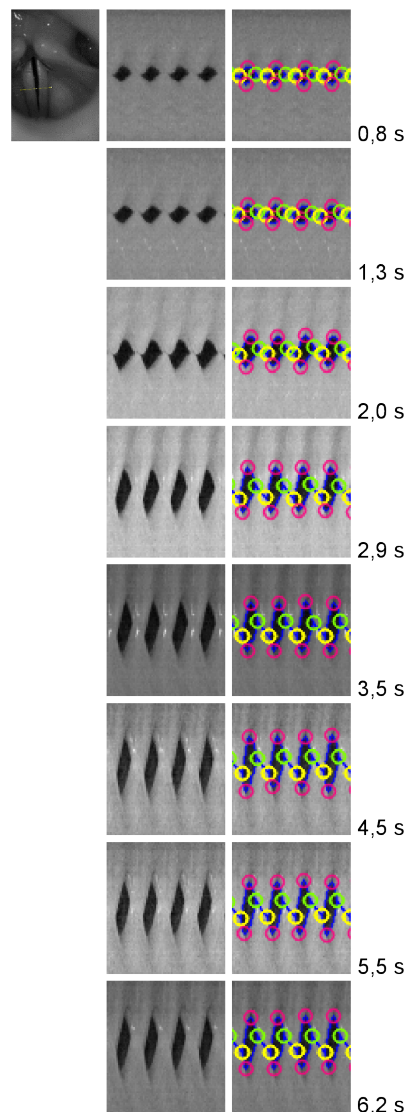
Dle subjektivního hodnocení zesílení na tónu Ab4 proběhlo kompletně v hlavovém rejstříku. Průměrná základní frekvence byla  $f_o = (433 \pm 5)$  Hz.

Na Obrázku 5.9b vidíme, že SPL fonace rovnoměrně roste. V důsledku toho pozorujeme velmi výrazný nárůst amplitudy (Obr. 5.9c).  $Q_o$  klesá, jak je vidět na Obr. 5.9e, a je vždy menší než 1. Jeho hodnoty se pohybují na začátku fonace okolo 0,8 a tedy vždy dochází k uzavření hlasivky. Na konci fonace je  $Q_o \approx 0,6$ , značí, že glottis je delší dobu otevřená než uzavřená.

Klesající je taktéž  $Q_{og}$  (Obr. 5.9f),  $Q_{cg}$  do 2 s mírně roste, ale poté už klesá až do konce fonace, jak můžeme vidět na Obr. 5.9g. Hodnoty  $Q_s$  mírně klesají (Obr. 5.9h), ačkoli pozorujeme výrazné rozdíly mezi hodnotami pro levou a pravou hlasivku. Hodnoty pro levou hlasivku se pohybují blízko nad hodnotou  $Q_s \approx 1$ , naopak pro pravou hlasivku je výraznější pokles hodnot z  $Q_s \approx 0,9$  na hodnoty  $Q_s \approx 0,3$ . Výrazné rozdíly mezi hodnotami pro jednotlivé hlasivky jsou způsobeny vysokou hodnotou LRPD, který je dobře patrný i na kymogramech v Obrázku 5.10.

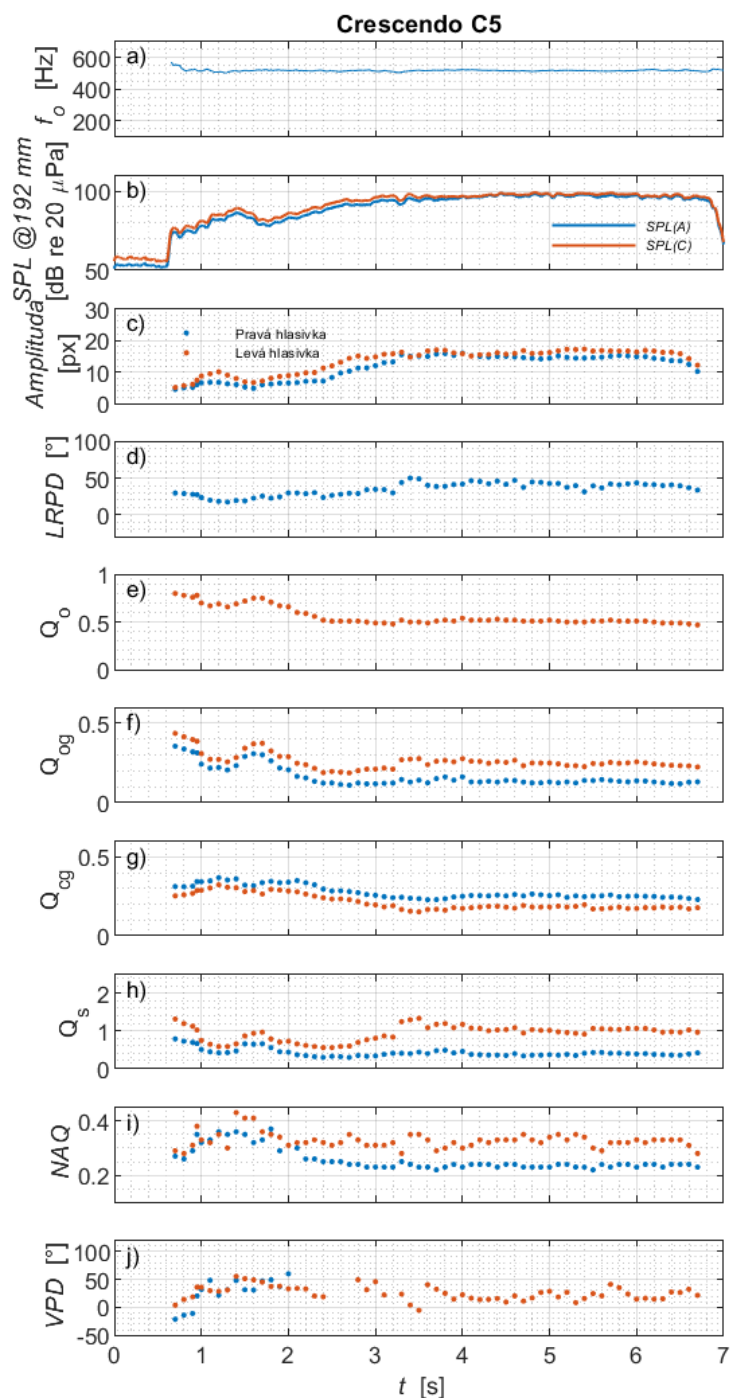
Hodnoty NAQ na Obr. 5.9i mají tendenci klesat a mají velký rozptyl. VPD na Obr. 5.9j roste, z hodnoty okolo  $20^\circ$  na začátku fonace dosahuje hodnot nepřesahujících  $50^\circ$  na konci fonace. Hodnoty VPD jsou patrné hlavně pro levou hlasivku, hodnoty pro hlasivku pravou byly hůře analyzovatelné.

Z kymogramů na Obrázku 5.10 je zřejmé, že amplituda kmitů hlasivek je v důsledku vyšší frekvence nižší než u předchozích fonací na nižších frekvencích. Viditelná je také levo-pravá asymetrie kmitů, nejvýraznější od 2 s do 3 s. Výrazně viditelné je hlavně zvýšení amplitudy kmitů s časem. Pro pravou hlasivku vidíme, že doba otevírání je o něco kratší než doba zavírání, čímž vysvětlujeme hodnoty  $Q_s$  menší než 1. Viditelná je také slizniční vlna charakterizovaná VPD, která je na začátku fonace téměř nezřetelná, tvar laterálního vrcholu kmitů hlasivek je oblý. Se zvyšující se intenzitou slizniční vlna mírně roste, což můžeme vidět díky jejímu dosahu na horním okraji hlasivek, způsobujícímu zostření laterálních vrcholů kmitů, ačkoli v porovnání s fonacemi na nižších frekvencích je méně výrazná.



Obrázek 5.10: Crescendo Ab4: Řádek, ze kterého jsou generovány kymogramy, kymogramy zobrazující kmity hlasivek v různých časech fonace a kymogramy s detekovanými hranami v programu VKG analyzer. Délka každého kymogramu je 10 ms.

## Crescendo C5



Obrázek 5.11: Crescendo C5: Grafy závislosti základní frekvence  $f_o$ , SPL, amplitudy kmitů, levo-pravého fázového rozdílu LRPD, kvocientu otevření  $Q_o$ , kvocientu otevírání  $Q_{og}$ , kvocientu uzavírání  $Q_{cg}$ , kvocientu rychlosti  $Q_s$ , normalizovného kvocientu amplitudy NAQ a vertikálního fázového rozdílu VPD na čase.

K zesílení na tónu C5 byla, dle subjektivního percepčního hodnocení, využívána fonace v hlavovém rejstříku. Průměrná frekvence fonace byla  $f_o = (518 \pm 6)$  Hz.

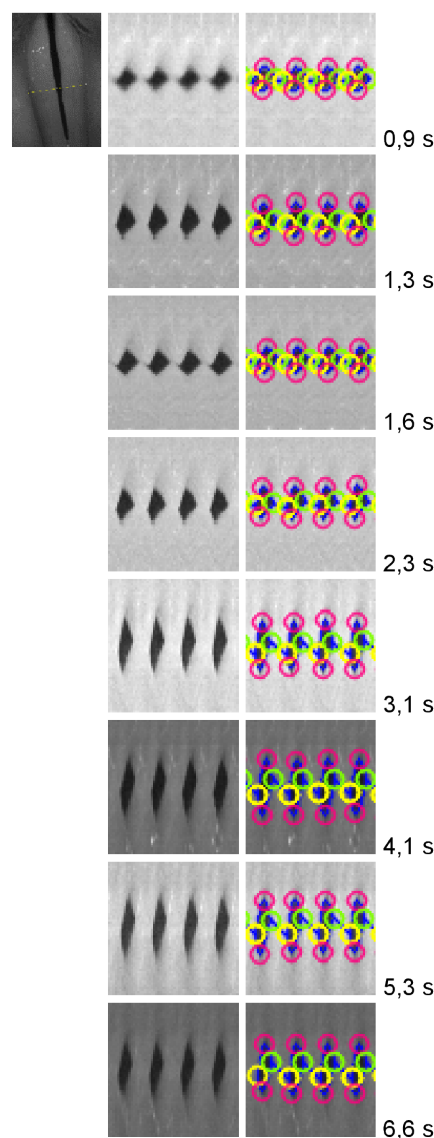
V grafu na Obrázku 5.11b můžeme pozorovat, že SPL nejdříve rostla, v čase 1,4 s došlo k mírnému poklesu a poté opět narůstala až do 4,5 s, kdy už intenzita pouze zůstávala konstantní, než na konci fonace mírně poklesla. S rostoucí SPL můžeme na Obr. 5.11c pozorovat vzrůstající amplitudu, u jejíhož průběhu vidíme i mírný pokles spojený s poklesem SPL. Kvocient  $Q_o$  je na začátku fonace roven 0,8 (Obr. 5.11e). Nejdříve rovnoměrně klesá s rostoucí intenzitou. Od určitého

okamžiku však ustává na hodnotě  $Q_o \approx 0,5$ , které je roven až do konce fonace.

V důsledku LRPD, který se v průběhu fonace mírně zvyšoval, jak vidíme na Obr. 5.11d, můžeme u některých kvocientů pozorovat rozdíly v hodnotách pro pravou a levou hlasivku.  $Q_{og}$  od začátku fonace klesal, ale přestal klesat, když se zastavil i pokles  $Q_o$ . Kvocient  $Q_{cg}$  na začátku fonace mírně narůstal, ale poté, co se růst intenzity ustálil, klesal rovnoměrně i  $Q_{cg}$  a narozdíl od  $Q_{og}$ , který už od 2,6 s zůstal konstantní, trval pokles  $Q_{cg}$  až do 3,5 s. Poté zůstal  $Q_{cg}$  až do konce fonace konstantní. Průběh  $Q_s$  byl na začátku fonace ovlivňován hlavně změnami doby otevírání a jeho hodnoty byly ovlivněny hodnotou LRPD. Zatímco hodnoty pro pravou hlasivku jsou vždy menší než 1,  $Q_s$  pro levou hlasivku se pohybuje okolo jedné.

Kvocient  $NAQ$  nejdříve s rostoucí SPL na začátku fonace roste, při dalším nárůstu od 1,5 s však jeho hodnoty klesají. Množství hodnot pro VPD je ovlivněn nízkým rozlišením snímků způsobeným vysokou frekvencí kmitů hlasivek. I tak však můžeme pozorovat jeho prvotní nárůst na začátku fonace až na hodnotu  $50^\circ$  a potom rozptýl hodnot kolem hodnoty  $30^\circ$ .

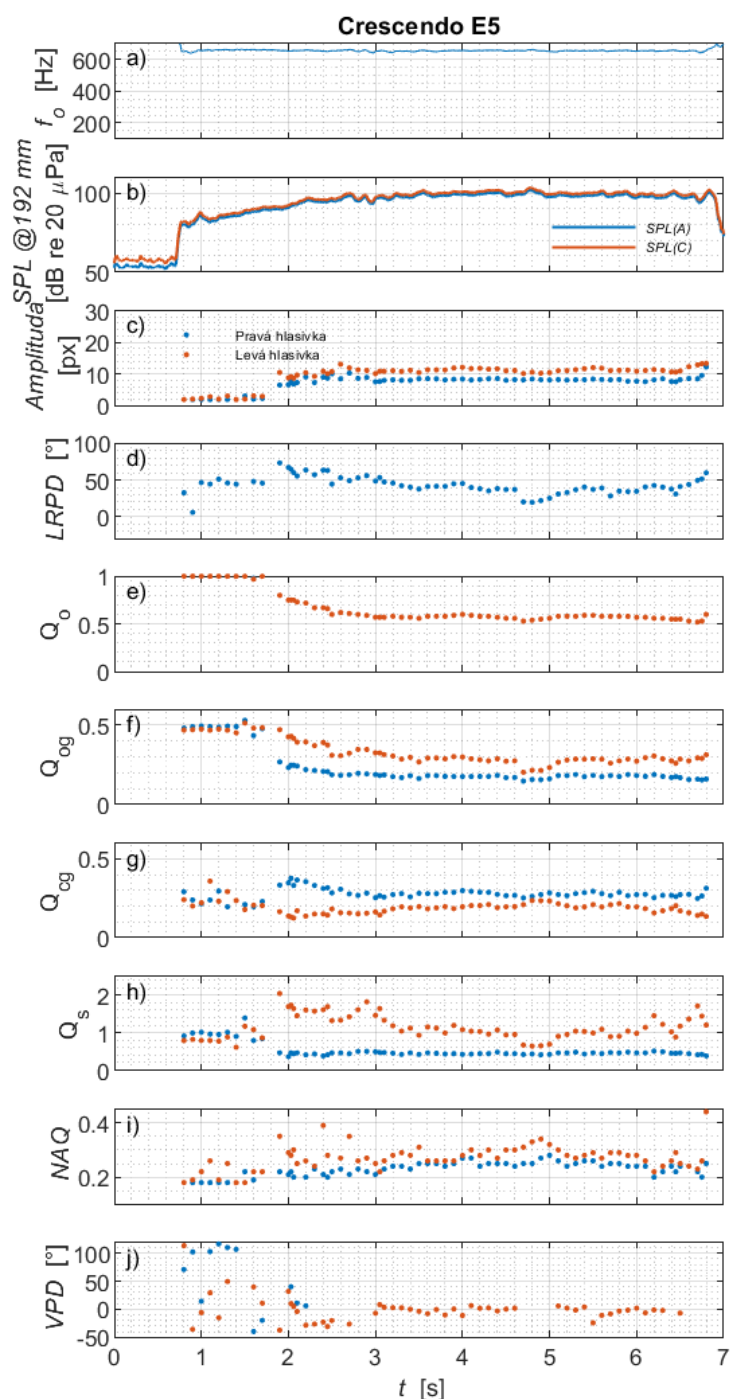
Z kymogramů na Obrázku 5.12 je viditelný nárůst amplitudy již na počátku fonace, následovaný jejím poklesem, když došlo ke snížení SPL. Dále je také možné pozorovat mírný LRPD. Vidíme, že doba uzavření hlasivky roste, nejvíce při přechodu ze slabé do středně silné fonace, jak můžeme vidět v kymogramu pro 3,1 s. Pro pravou hlasivku poté zůstává doba otevírání kratší než doba zavírání až do konce fonace, naopak můžeme pozorovat, že pro levou hlasivku jsou ke konci fonace doby otevírání a zavírání přibližně stejně dlouhé.



Obrázek 5.12: Crescendo C5: Řádky, ze kterého jsou generovány kymogramy, kymogramy zobrazující kmitu hlasivek v různých časech fonace a kymogramy s detekovanými hranami v programu VKG analyzer. Délka každého kymogramu je 8 ms.



## Crescendo E5



Obrázek 5.13: Crescendo E5: Grafy závislosti základní frekvence  $f_o$ , SPL, amplitudy kmitů, levo-pravého fázového rozdílu LRPD, kvocientu otevření  $Q_o$ , kvocientu otevírání  $Q_{og}$ , kvocientu uzavírání  $Q_{cg}$ , kvocientu rychlosti  $Q_s$ , normalizovaného kvocientu amplitudy NAQ a vertikálního fázového rozdílu VPD na čase.

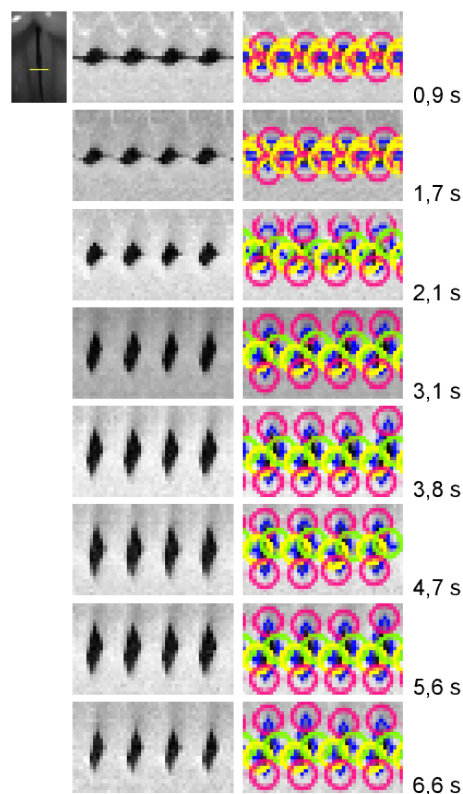
sažení extrémních hodnot ještě před dosažením maximální SPL.

Fonace zesílení na tónu E5 proběhla dle subjektivního hodnocení v hlavovém rejstříku s průměrnou frekvencí oscilací  $f_o = (656 \pm 7)$  Hz. Na Obrázku 5.13 můžeme pozorovat, jak se základní frekvence, SPL a parametry kmitání v průběhu fonace měnily. Na Obr. 5.13b vidíme, že růst intenzity byl relativně stabilní. I přes relativně stabilní nárůst SPL můžeme okolo 1,8 s pozorovat skokovou změnu amplitudy a  $Q_o$  (Obr. 5.13c, e). Po tomto skoku můžeme vidět, že amplituda ještě mírně narůstala s rostoucí SPL. Vidíme také pokles  $Q_o$  až na hodnoty okolo 0,6, ačkoli před skokovým poklesem byl  $Q_o = 1$  (tj. kmity bez uzavěru glottis). U amplitudy i  $Q_o$  dochází k do-

S rostoucí intenzitou klesal také  $Q_{og}$  (Obr. 5.13f). Rozdíly mezi pravou a levou hlasivkou u  $Q_{og}$  a především pak u dalších kvocientů jsou opět způsobeny LRPD, patrným z grafu na Obr. 5.13d. Proto vidíme, že hodnoty  $Q_{cg}$  na Obr. 5.13g náležící levé a pravé hlasivce mají odlišný průběh.  $Q_{cg}$  pro pravou hlasivku nejdříve mírně stoupá a pak klesá na konstantní hodnotu, naopak pro levou hlasivku vidíme před ustálením výrazný pokles na velmi nízké hodnoty a poté pozvolný nárůst. Nesystematické výsledky můžeme pozorovat i na Obr. 5.13h pro  $Q_s$ , pro který jsou hodnoty pravé hlasivky rovny na začátku fonace kolem 1 a poté náhle klesnou na hodnotu cca 0,4, zatímco hodnoty pro levou hlasivku, které taktéž začínají kolem 1, nejdříve rostou a poté klesají, přičemž mají velký rozptyl po celou dobu fonace.

U NAQ na Obr. 5.13i vidíme jen velmi mírný nárůst hodnot s velkým rozptylem. Množství dat pro VPD na Obr. 5.13j je opět ovlivněno nízkým rozlišením analyzovaných kymogramů způsobený velkou frekvencí a malým rozkmitem hlasivky. Na začátku jsou hodnoty VPD velmi rozptýlené, pravděpodobně z důvodu omezeného časového rozlišení a tedy malého počtu snímků během fáze otevírání a zavírání, které znemožňují kvalitní analýzu VPD. Později se hodnoty pro VPD pohybují okolo  $0^\circ$ .

Srovnáme-li výsledky analýzy parametrů s kymogramy na Obrázku 5.14 je jasně vidět, že výsledky byly ovlivněny omezeným rozlišením. Můžeme vidět postupný nárůst amplitudy, kmity bez uzavření na začátku fonace, vidíme také levo-pravou asymetrii. Vidíme také, že slizniční vlna je téměř nepozorovatelná, což souhlasí s výsledky VPD.



Obrázek 5.14: Crescendo E5: Řádek, ze kterého jsou generovány kymogramy, kymogramy zobrazující kmity hlasivek v různých časech fonace a kymogramy s detekovanými hranami v programu VKG analyzer. Délka každého kymogramu je 6,5 ms.

# Diskuse

Aby bylo možné výsledně analyzovat, jak se jednotlivé parametry kmitání hlasivek měnily s rostoucí intenzitou, bylo třeba sestavit grafy závislosti jednotlivých parametrů na SPL. Tyto grafy jsou zobrazeny na Obrázcích 6.1 až 6.7. Pokud výsledky daného parametru pro všechny fonace spojíme dohromady, můžeme také porovnávat, jakým způsobem je vývoj parametru ovlivněn samotnou změnou frekvence oscilací.

Z grafů je na první pohled patrné, že se vzrůstající frekvencí se dynamický rozsah posouval směrem k vyšším hodnotám, což je v souladu s výsledky publikovaných studií (Titze a Sundberg 1992, Plant a Younger 2000). Zároveň vidíme, že největší dynamický rozsah byl vyprodukován u fonací přibližně uprostřed hlasového rozsahu, naopak u okrajových fonací se dynamický rozsah zmenšoval.

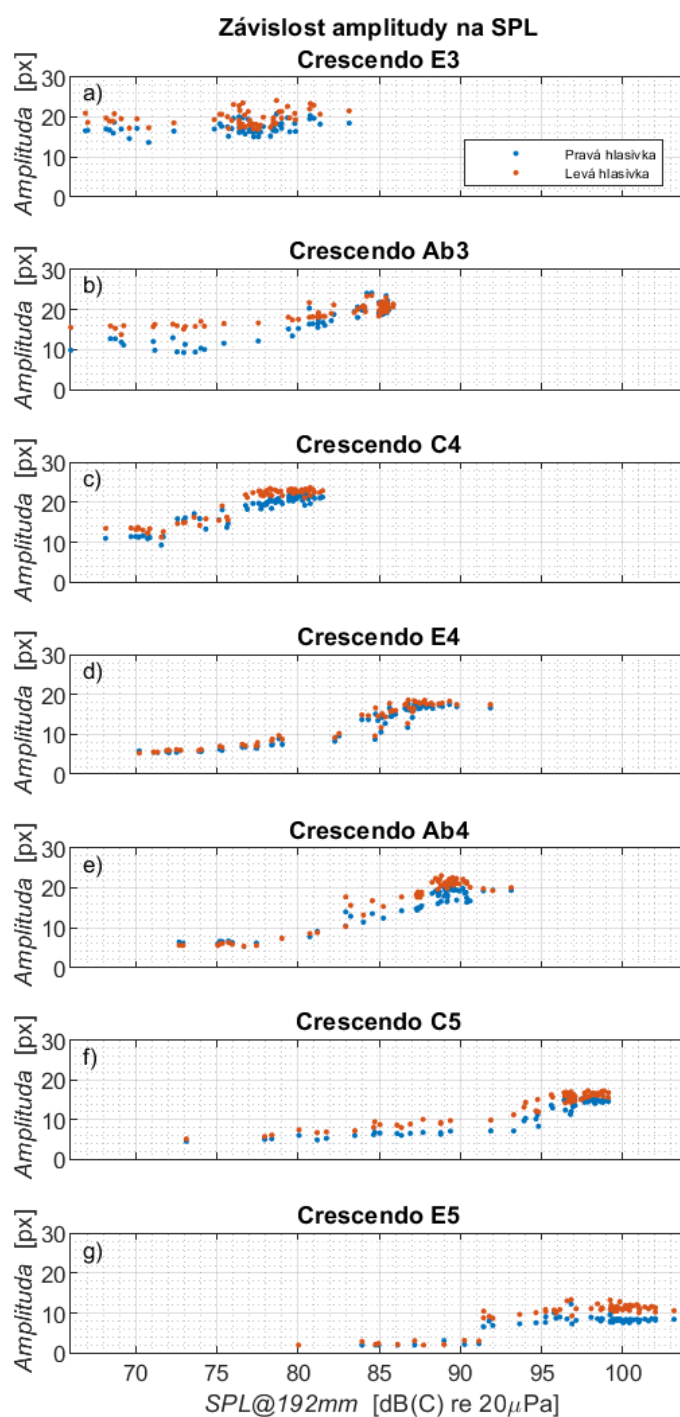
## Amplituda

Sestavíme-li grafy zobrazující závislost amplitudy na SPL, viz Obrázek 6.1, a porovnáme-li mezi sebou výsledky pro jednotlivé fonace, je možné pozorovat, že amplituda všech fonací s rostoucí intenzitou rostla, ačkoli pro fonaci na nejnižší frekvenci (tón E3), kterou vidíme na Obr. 6.1a, byl nárůst velmi malý. S rostoucí frekvencí fonace sledujeme, že minimální hodnota amplitudy klesá z hodnoty okolo 20 px u fonace E3 až na velmi nízké hodnoty 2 px u fonace E5 (viz Obr. 6.1g). Stejně tak docházelo i k systematickému snižování maximální hodnoty amplitudy s rostoucí  $f_o$  ze 25 px na 10 px. Tyto hodnoty však mohou být ovlivněny vzájemnou vzdáleností kamery od hlasivek.

Námi zjištěný vzrůst amplitudy s rostoucí intenzitou tak souhlasí se závěry, ke kterým došli ve svých pracích Woo (1996), Hirano (2009) a Švec (2019), na rozdíl od Fexe a kol. (1991), kteří žádný vztah mezi amplitudou a SPL nenalezli. Zároveň jsme stejně jako všichni uvedení autoři potvrdili, že amplituda klesá s rostoucí

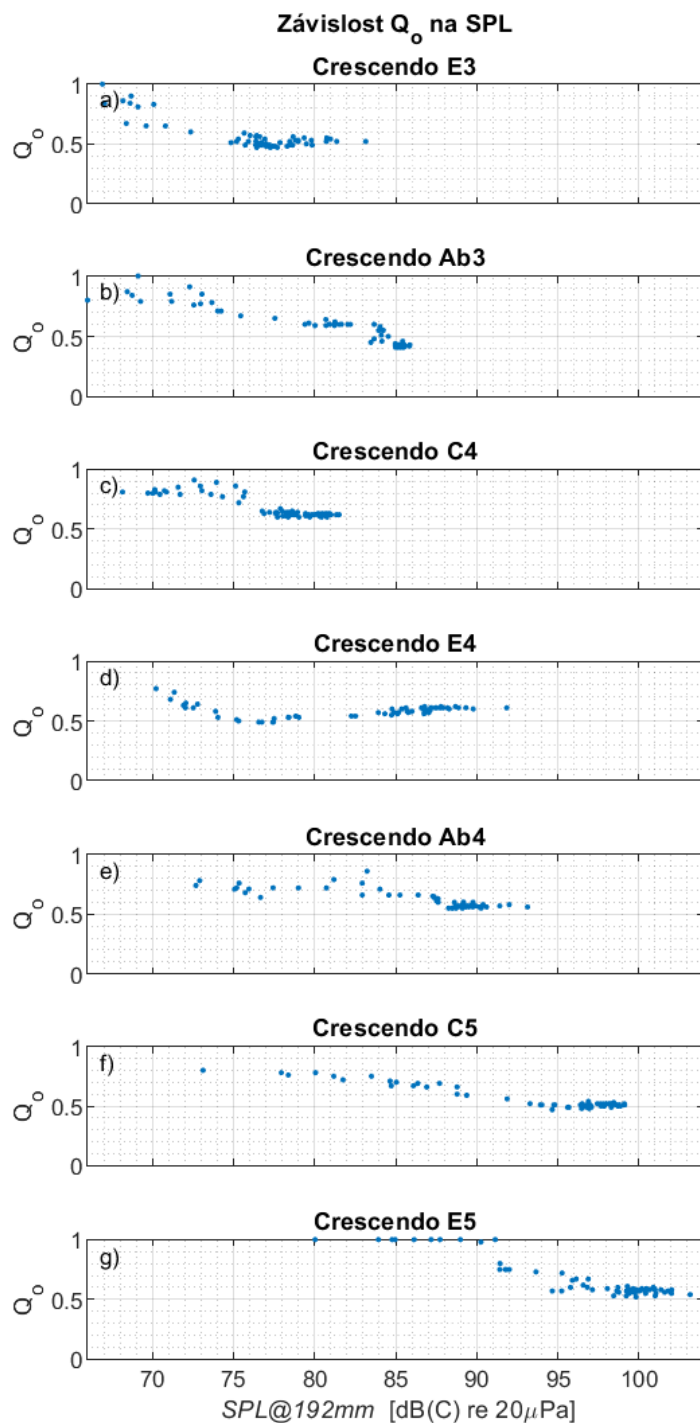
frekvencí oscilací. Hiranovy výsledky (2009) navíc naznačují, že při fonaci ve falzetovém (lehkém, hlavovém) rejstříku kmitají hlasivky s velmi malou amplitudou, ačkoli autor neuvedl, zda daná fonace probíhala na vysokých frekvencích, ani zda šlo o mužský či ženský hlas. Při našem měření byl lehký - hlavový rejstřík využíván už pro fonaci E4 a Ab4, kde jsou ovšem amplitudy kmitů stále relativně vysoké, a proto naše výsledky nesouhlasí s tímto předpokladem.

Snižování amplitudy s rostoucí frekvencí lze vysvětlit vyšším napětím hlasivky při jejím napínání, které zprostředkovává nárůst frekvence, stejně jako je tomu při kmitání strun (Švec 1996). Je známo, že zvýšení SPL souvisí se zvýšením subglottického tlaku, který dodává více energie pro větší rozkmit hlasivek (Titze a Sundberg 1992, Björklund a Sundberg 2015). Na druhou stranu ale větší fázový rozdíl má tendenci zmenšovat výslednou amplitudu kmitů glottis (Titze 2006).



Obrázek 6.1: Porovnání grafů závislosti amplitudy kmitů na SPL(C) pro všechny fonace

## Kvocient otevření $Q_o$



Obrázek 6.2: Porovnání grafů závislosti kvocientu otevření  $Q_o$  na SPL(C) pro všechny fonace

a Švec (2019). Timcke a kol. (1958) navíc uvedl, že při velmi tichých fonacích v hrudním rejstříku je  $Q_o = 1$ . Této hodnoty jsme my naším měřením u většiny fonací nedosáhli, ale to pravděpodobně z toho důvodu, že Timcke používal vysokorych-

Z grafů na Obrázku 6.2 je patrné že s rostoucí SPL docházelo spíše k poklesu  $Q_o$ . Výjimku tvoří fonace crescenda E4 (Obr. 6.2d), pro kterou  $Q_o$  nejdříve mírně klesl, ale od 70 dB mírně vzrůstal.

Podíváme-li se na to, jakým způsobem se měnily extrémní hodnoty  $Q_o$  s rostoucí  $f_o$ , nepozorujeme výrazné změny u minimálních ani maximálních hodnot. Pro všechny fonace je většina hodnot  $Q_o$  vyšší než 0,5 značící, že doba uzavření hlasivky byla kratší než doba otevření.

To, že  $Q_o$  klesá s intenzitou zjistili už Timcke a kol. (1958), Fex a kol. (1991), Woo (1996), Hirano (2009), Yokonoshi a kol. (2016)

lostní laryngoskopické snímky, na kterých jsou zobrazeny i anteriorní a posteriorní mezery, kdežto pro naši práci byly vytvořeny kymogramy, které snímají pouze střed hlasivky. Stejně jako Woo (1996) jsme zjistili, že u ženského hlasu se hodnoty  $Q_o$  pohybují většinou nad 0,5. Yokonoshi a kol. (2016) pak ve falzetovém rejstříku nezaznamenal žádné změny  $Q_o$  se změnou SPL. Z našich výsledků je patrné, že i při vyšších frekvencích (Ab4 a výše), k jejichž produkci byl využíván lehčí rejstřík,  $Q_o$  s rostoucí intenzitou rostl a tento růst se zastavil až u hodnot cca 5 dB pod maximem SPL.

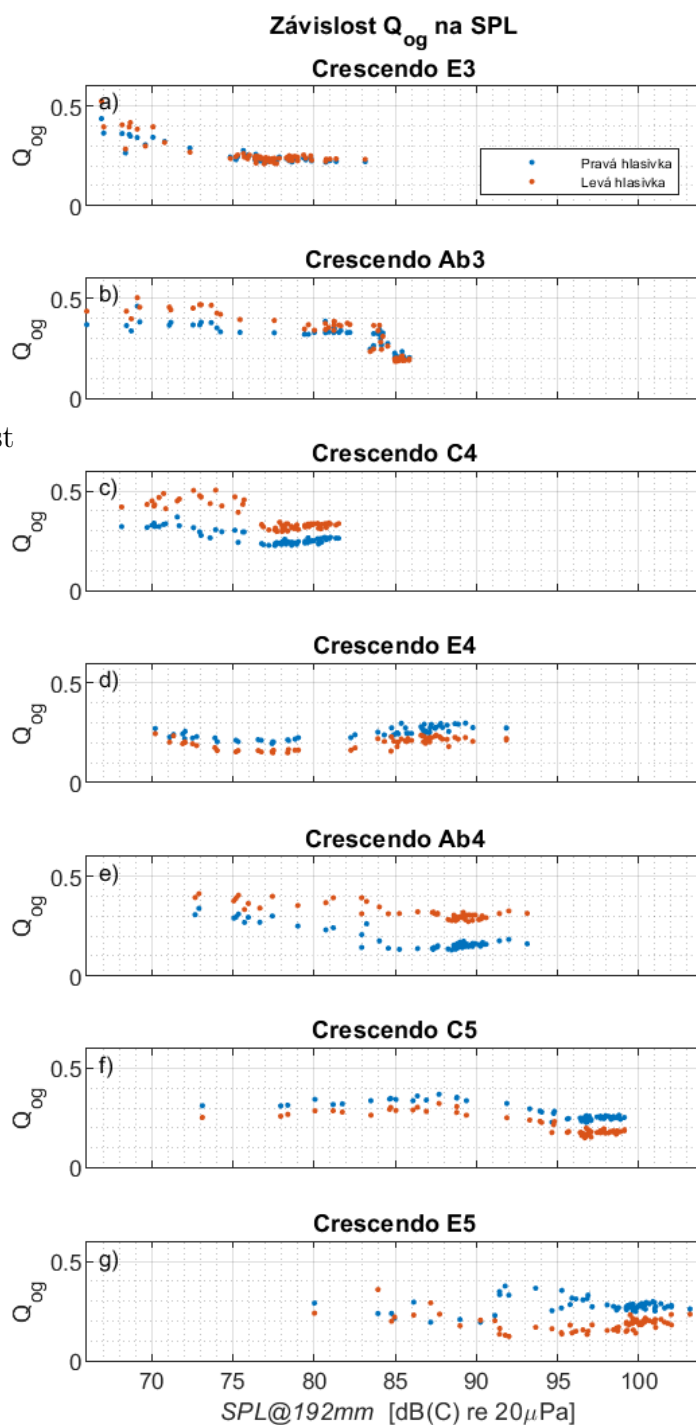
Stejně jako Timcke a kol. (1958) jsme zaznamenali pouze malý nárůst hodnot  $Q_o$  s rostoucí  $f_o$ . Ostatní autoři, uvedení v předchozím odstavci, zaznamenali výraznější vzrůst  $Q_o$  s rostoucí frekvencí.

Lze předpokládat, že zkracování fáze otevření s rostoucí intenzitou souvisí s větší aktivitou VOC svalu, který zvyšuje míru addukce glottis (Hirano a kol. 1969, 1970).

### Kvocient otevírání

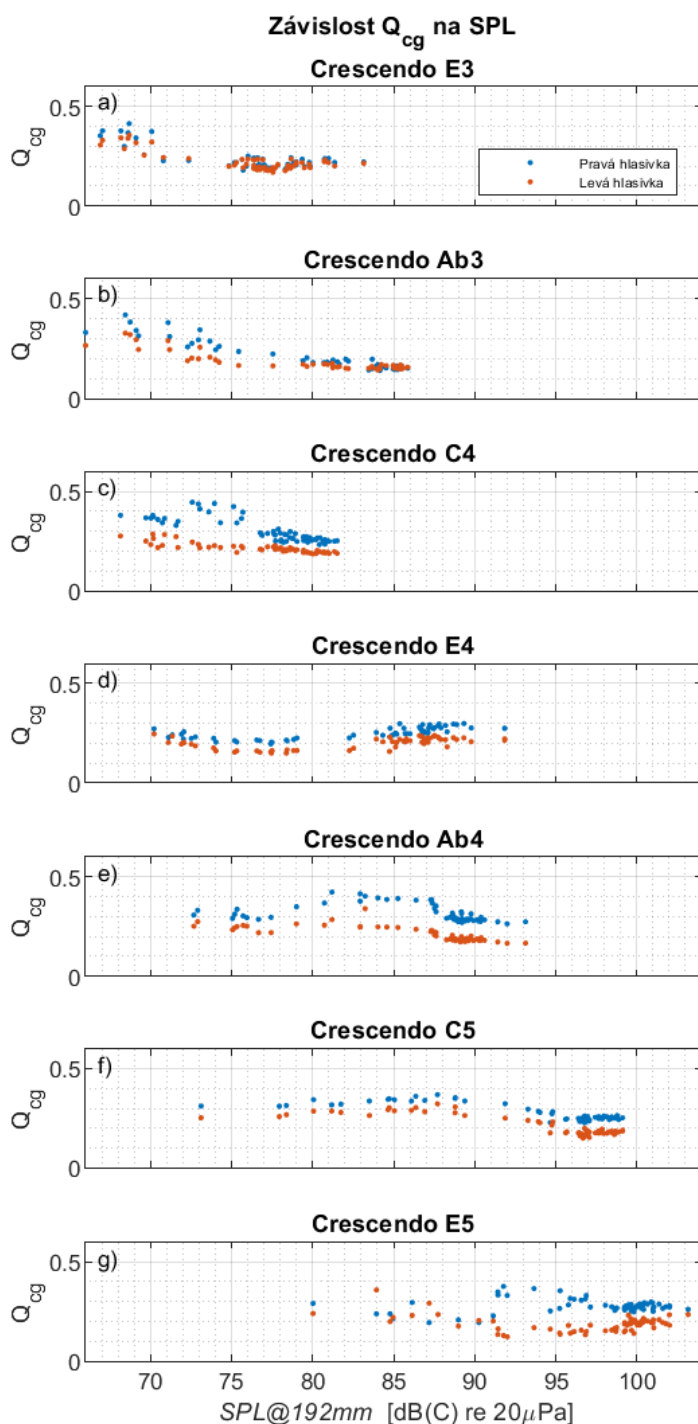
$Q_{og}$

Na Obrázku 6.3 je znázorněna závislost kvocientu  $Q_{og}$  na SPL. Se vzrůstající intenzitou pozorujeme, že až



Obrázek 6.3: Porovnání grafů závislosti kvocientu otevírání  $Q_{og}$  na SPL(C) pro všechny fonace

na výjimky má  $Q_{og}$  tendenci klesat. Při fonaci na tónu E3 (Obr. 6.3a) vidíme, že došlo nejdříve k poklesu  $Q_{og}$ , ale od 75 dB k dalšímu výraznému snižování už nedochází. U fonace C4 na Obr. 6.3c dochází nejdříve k poklesu hodnot a pak mírnému vzrůstu, u crescendo E4 kvocient s rostoucí intenzitou taktéž mírně roste (viz Obr. 6.3d).



Obrázek 6.4: Porovnání grafů závislosti kvocientu uzavírání  $Q_{cg}$  na  $SPL(C)$  pro všechny fonace

Hodnoty pro crescendo

E5 (Obr. 6.3g) mají výrazný rozptyl a konec fonace je ovlivněn levo-pravým fázovým rozdílem. U fonací Ab3, C4, Ab4 a C5 si také můžeme všimnout, že  $Q_{og}$  se nejdříve měnil jen mírně a klesat začal až od intenzity, která se nacházela přibližně ve středu dynamického rozsahu dané fonace. Extrémní hodnoty v rámci frekvenčního rozsahu jsou relativně rozptýlené, neprojevují závislost na  $f_o$ .

### Kvocient uzavírání

$Q_{cg}$

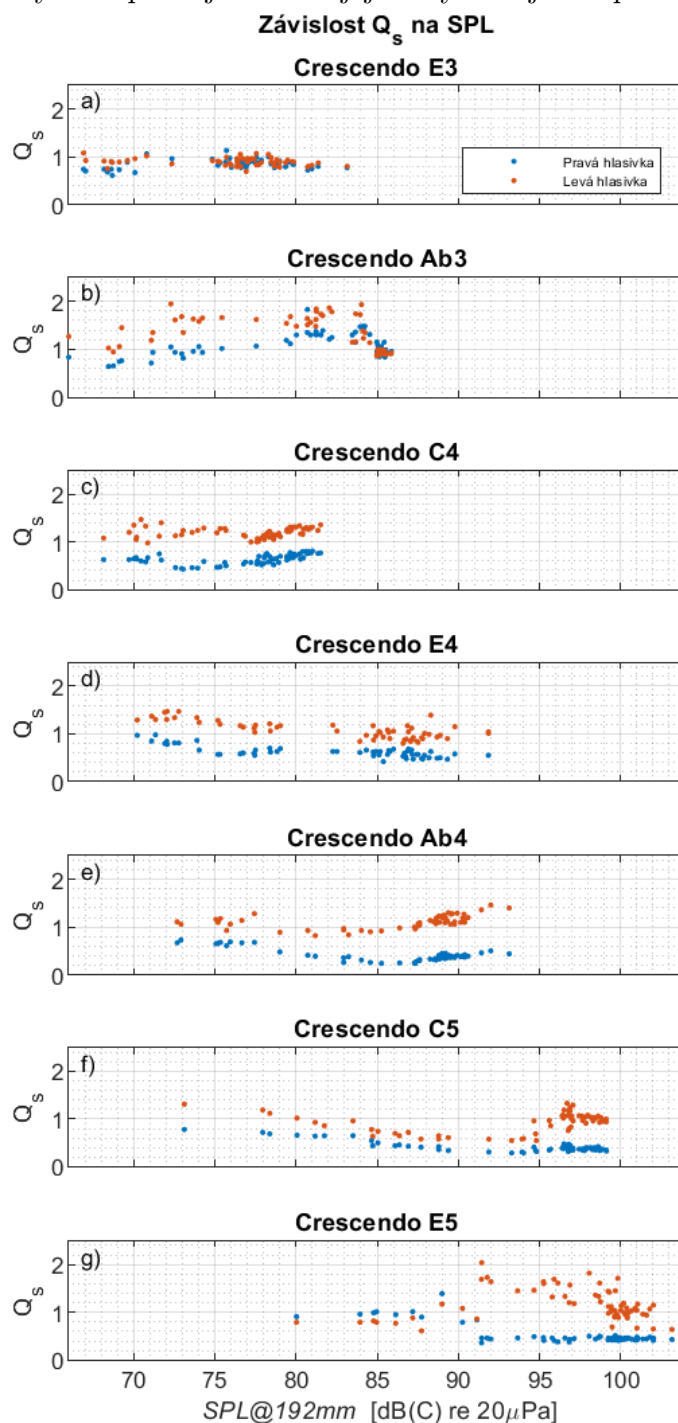
Závislost  $Q_{cg}$  na intenzitě pro analyzované fonace je znázorněna v grafech na Obrázku 6.4.

Pozorujeme, že kvocient  $Q_{cg}$  má se vzrůstem SPL tendenci klesat. Výjimku tvoří fonace crescendo E4 (Obr. 6.4d), pro kterou tento kvocient mírně vzrůstá. Stejně jako u  $Q_{og}$  můžeme pozorovat, že i  $Q_{cg}$  neklesal kontinuálně se změnou intenzity. I zde je nejdřív u některých fonacích zřetelné, že kvocient výrazně klesal až od poloviny dynamického rozsahu. Jak je patrné z Obr. 6.4e, f, hodnoty  $Q_{cg}$  pro fonace na tónech Ab4 a C5 nejdříve mírně rostly a až později došlo k jejich výraznějšímu poklesu.

S rostoucí frekvencí fonací mají minimální i maximální hodnoty  $Q_{cg}$  spíše tendenci vzrůstat, ale tento trend není nijak výrazný.

### Kvocient rychlosti $Q_s$

Závislost  $Q_s$  na SPL, zobrazená na grafech v Obrázku 6.5, se pro jednotlivé fonace výrazně liší. Zatímco pro E3 je konstantní a rovna  $Q_s \approx 1$ , pro Ab3 vidíme nejdříve vzrůst hodnot až na hodnoty vyšší než 1,5 a následný, velmi prudký, pokles na  $Q_s \approx 1$ . Pro crescendo C4 hodnoty  $Q_s$  postupně se vzrůstající SPL rostou, ale liší se pro pravou a



Obrázek 6.5: Porovnání grafů závislosti kvocientu otevření  $Q_s$  na SPL(C) pro všechny fonace



levou hlasivku. Pro E4 vidíme velmi mírný pokles hodnot pohybujících se okolo hodnoty 1. U crescenda Ab4 i C5 vidíme, že hodnoty nejdříve klesají a pak přibližně od poloviny dynamického rozsahu rostou na hodnoty blízké výchozím hodnotám  $Q_s$ . Pro crescendo E4 je  $Q_s$  výrazně rozptýlené.

Vzhledem k tomu, že se hodnoty i směr vývoje  $Q_s$  odlišují pro jednotlivé tóny, není zde patrný jasný trend závislosti  $Q_s$  na  $f_o$ .

Pokud se zaměříme na to, jak se měnily doby otevírání a zavírání ovlivňující  $Q_{og}$ ,  $Q_{cg}$  a  $Q_s$ , v předchozích pracích často zaznamenáváme, že autoři pozorovali, že s růstem intenzity se fáze uzavírání zkracovala, což ústilo v nárůst  $Q_s$  nad hodnotu 1 (Timcke a kol. 1958, Woo 1996, Dejonckere a kol. 2015). Woo (1996) dále uvádí, že změna intenzity měla v rámci jejich měření větší vliv na dobu uzavírání než na dobu otevírání. Z našeho měření je naopak patrné, že růst intenzity způsobuje zkracování jak doby otevírání, tak doby uzavírání. Vidíme také, že u většiny fonací dochází s rostoucí SPL k nárůstu  $Q_s$ , tento nárůst ovšem není tak výrazný, jaký zaznamenali předešle zmínění autoři.

## Kvocient normalizované amplitudy NAQ

Z grafů na Obrázku 6.6 vidíme, že NAQ s rostoucí intenzitou klesá pro fonace na tónech E3, Ab3, C4, Ab4 a C5, mírně pak narůstá pro fonaci E4 a výrazně roste pro crescendo E5. U fonace E4 můžeme pozorovat, že vykazuje chování odlišné od jiných tónů i u jiných parametrů (např.  $Q_o$ ,  $Q_{cg}$ ). Jedním z možných vysvětlení by mohla být skutečnost, že fonace probíhala v hlavovém rejstříku, ačkoli je frekvence tohoto tónu ještě relativně nízká.

I přes výkyvy hodnot můžeme říct, že s rostoucí  $f_o$  můžeme pozorovat trend vzrůstu hodnot NAQ při maximální SPL. Vidíme také, že u nižších frekvencí jsou hodnoty NAQ více stabilní, zatímco u vyšších frekvencí mají hodnoty výraznější rozptyl.

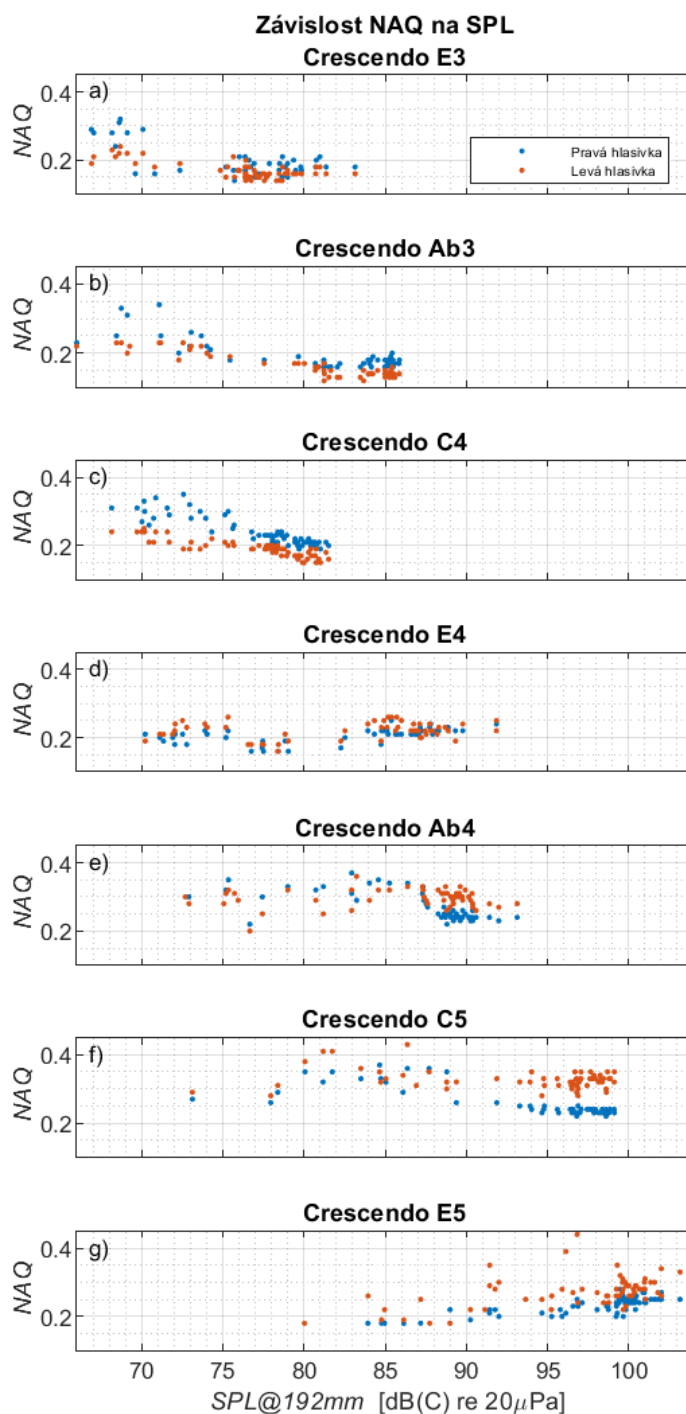
Jako už ve svých pracích naznačili Alku a kol. (2002) a Vilkman a kol. (2002), vidíme, že trend změn NAQ se vzrůstající intenzitou je většinou velmi podobný trendu  $Q_{cg}$ . Výrazný rozdíl je však patrný pro fonaci na tónu E5, pro který  $Q_{cg}$  pro levou hlasivku mírně klesá, zatímco NAQ roste. Rozptyl hodnot NAQ je také větší.

Z literatury vyplývá, že NAQ dosahuje nejvyšších hodnot při tichých fonacích a při hlasité fonaci u ženských hlasů dosahuje nejnižších hodnot (Vilkman 2002).

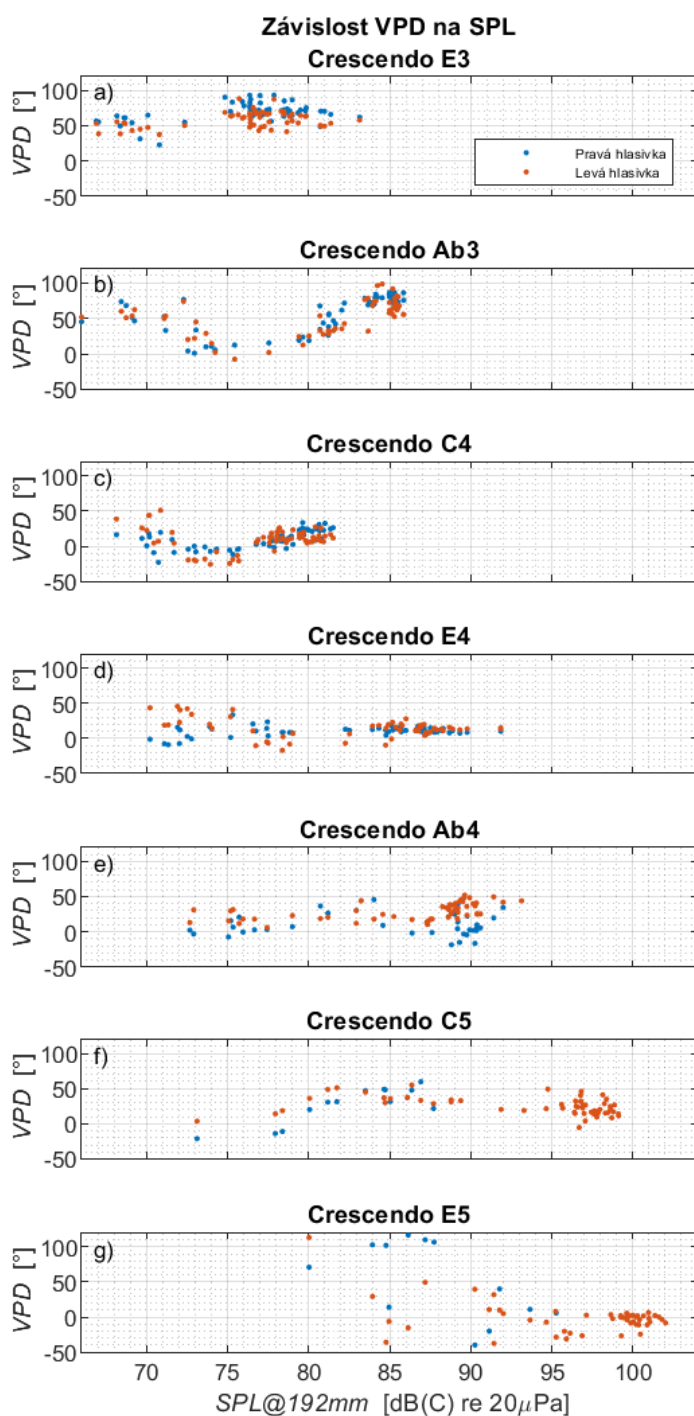
S tímto trendem naše výsledky souhlasí pro většinu fonací. Výjimku tvoří fonace na tónu E4, kdy NAQ mírně roste, pro tón Ab4 není nejslabší fonace spojena s maximem NAQ a docela opačný trend vykazuje fonace na tónu E5, pro kterou NAQ dosahuje nejnižších hodnot s minimální SPL a s vzrůstající SPL jeho hodnoty rostou.

### Vertikální fázový rozdíl VPD

V poslední části se podíváme na závislost VPD na SPL zobrazenou na Obrázku 6.7. Sledujeme, že závislost VPD na SPL má různé průběhy pro různé fonace. U fonace na tónu E3 (Obr. 6.7a) jeho hodnoty mírně rostou a jsou velmi vysoké, rovny až  $100^\circ$ , obzvlášť při vysoké intenzitě. U fonací na Ab3 a C4 na Obr. 6.7b, c vidíme, že VPD nejdříve klesal a až přibližně od poloviny dynamického rozsahu docházelo k jeho vzrůstu. Jak můžeme vidět na Obr. 6.7d, u fonace na tónu E4 byly hodnoty na začátku fonace výrazně rozptýlené, postupně se rozptyl zmenšoval, ale celkově nemůžeme konstatovat, že by docházelo



Obrázek 6.6: Porovnání grafů závislosti kvocientu normalizované amplitudy NAQ na SPL(C) pro všechny fonace



Obrázek 6.7: Porovnání grafů závislosti vertikálního fázového rozdílu VPD na SPL(C) pro všechny fonace

že u vysokých fonací VPD nepřesáhl  $50^\circ$ . Rozdíly při přechodu z fonací ve střední části frekvenčního rozsahu do vyšší by mohly být způsobeny skutečností, že fonace na tónu E4 a vyšší byly provedeny, dle subjektivního hodnocení, v hlavovém rejstříku.

Woo (1996), Hirano (2009) a Švec (2019) sledovali (vizuálním pozorováním, bez kvantitativní analýzy), že s rostoucí intenzitou VPD roste. V našem případě vidíme,

k systematickému nárůstu nebo poklesu VPD. U fonací na Ab4 a E5 má VPD tendenci růstu se zvyšující se SPL, naopak u fonace na E5 jsou hodnoty velice rozptýlené a mají spíše klesající tendenci.

U vyšších frekvencí také pozorujeme, že množství hodnot pro VPD se snižuje. Tento jev je způsoben omezeným rozlišením kymogramů, které omezuje možnosti analýzy při vysokých frekvencích oscilací. Z toho důvodu nebylo možné u některých kymogramů získat dostatečné množství bodů, ze kterých by byl VPD určen. Pokud zanedbáme hodnoty slabé fonace crescendo E5, které jsou značně chaotické, můžeme říct,

že pro některé fonace k tomuto vzrůstu dochází, ale pozorujeme taktéž fonace, u kterých k růstu dochází až v druhé polovině fonace (Ab3, C4), případně k růstu nedochází vůbec (E4, E5). Také sledujeme, že při zvyšování frekvence mezi tóny E3 až E4 VPD klesá, a to hlavně při přechodu z nízké do střední polohy frekvenčního rozsahu hlasu. Tyto výsledky odpovídají práci Hirana (2009) a Woo (1996), kteří pozorovali, že u ženských hlasů je obecně při modální fonaci slizniční vlna minimální a narůstá až se zvyšující se SPL. Naopak pro fonace na vysokých frekvencích (Ab4, C5, E5) docházelo v porovnání s fonací na tónu E4 k mírnému nárůstu VPD. Tyto hodnoty jsou ale již výrazně ovlivněné omezenými možnostmi analýzy při vysokých frekvencích.

Pokles VPD s rostoucí frekvencí můžeme opět vysvětlit zvýšeným napětím hlasivky, které způsobí menší poddajnost sliznice, jejíž pohyb vertikální fázový rozdíl způsobuje. Naopak jeho zvýšení s růstem intenzity nejspíše může souviset s aktivitou TA svalu, který má tendenci napětí sliznice spíše snižovat (Hirano 1974, Titze 2000).

Abychom mohli závislost jednotlivých parametrů na intenzitě více zobecnit, by bylo vhodné provést další měření u více osob. Díky tomu bychom mohli říct, zda některé změny souvisí například pouze s frekvencí nebo souvisí i s pohlavím, případně zda rozhoduje trénovanost hlasu, nebo rejstřík, ve kterém je fonace tvořena.

# Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo určit závislost studovaných parametrů kmitání hlasivek - amplitudy,  $Q_o$ ,  $Q_{og}$ ,  $Q_{cg}$ ,  $Q_s$ , NAQ a VPD na intenzitě hlasu u jedné zpěvačky. Za tímto účelem jsme měřili změny intenzity v rámci celého hlasového rozsahu autorky práce, na které bylo měření prováděno, a k měření jsme využívali metodu pozorování hlasivek pomocí vysokorychlostní videolaryngoskopie. Z vysokorychlostních záznamů byly dále vytvořeny videokymogramy, zobrazující jeden řádek hlasivek v čase, které bylo možno analyzovat a získat z nich požadované parametry.

Určili jsme, že se vzrůstající intenzitou roste amplituda kmitů, ačkoli její extrémní hodnoty klesají s rostoucí frekvencí. Dobu, po kterou je hlasivka otevřená, vyjadřuje  $Q_o$ . Tento kvocient téměř pro všechny fonace s rostoucí SPL klesal. Můžeme tedy říct, že s rostoucí intenzitou dochází k delšímu uzávěru hlasivky, přičemž tento jev je patrný i vizuálně ze samotných kymogramů. Dalšími kvocienty, které popisují tvar hlasivek při fázi otevření jsou  $Q_{og}$ , vyjadřující fázi otevírání,  $Q_{cg}$  popisující fázi uzavření a  $Q_s$ , který vyjadřuje, jak se od sebe tyto fáze liší. Zjistili jsme, že na rozdíl od prací ostatních autorů při našem měření s rostoucí intenzitou klesal přibližně stejně  $Q_{og}$  i  $Q_{cg}$ , k nárůstu  $Q_s$  docházelo pouze mírně a ne u všech fonací, přičemž vždy se pohyboval blízko 1. Zabývali jsme se také kvocientem NAQ, jehož hodnoty pro velkou část fonací s rostoucí intenzitou klesaly a při porovnání jednotlivých fonací jeho hodnoty při maximální SPL rostly se zvyšující se frekvencí. Nakonec jsme pozorovali také vývoj vertikálního fázového rozdílu, který popisuje slizniční vlnu na mediálním povrchu hlasivky. Z našich výsledků vyplývá, že vertikální fázový rozdíl s rostoucí intenzitou vzrůstal pro většinu fonací, ačkoli většinou tento vzrůst neprobíhal v rámci celého dynamického rozsahu. Hodnoty vertikálního fázového rozdílu klesaly se zvyšující se frekvencí při přechodu z nízkých fonací na fonace ve střední části frekvenčního rozsahu (t.j. mezi tóny E3 a E4). Pro vyšší frekvence došlo k opětovnému mírnému nárůstu hodnot, ačkoli tyto výsledky byly

výrazně ovlivněny omezenými technickými možnostmi analýzy tohoto parametru pro vysoké frekvence. Rozdíly mezi fonacemi ve střední a vyšší části frekvenčního rozsahu by mohly souviset s přechodem hlasu z hrudního do hlavového rejstříku.

Získaná data poskytují podrobný vhled do vlastností kmitání hlasivek během změn  $f_o$  a SPL hlasu, která mohou sloužit pro srovnávací a podrobnější studie v budoucnu.

# Seznam literatury

- Alku P., Bäckström T., Vilkmán E. (2002) Normalized amplitude quotient for parametrization of the glottal flow. *The Journal of the Acoustical Society of America* **112**, 701-710.
- Björklund S., Sundberg J. (2016) Relationship between Subglottal Pressure and Sound Pressure Level in Untrained Voices. *Journal of Voice* **30**, 15-20.
- 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.
- Dejonckere P.H., Lebacqz J., Bocchi L., Orlandi S., Manfredi C. (2015) Automated tracking of quantitative parameters from single line scanning of vocal folds: A case study of the 'messa di voce' exercise. *Logopedics Phoniatrics Vocology* **40**, 44-54.
- Deliyski D. (2005) Endoscope motion compensation for laryngeal high-speed videoendoscopy. *Journal of Voice* **19**, 485-496.
- Deliyski D., Cieciva S., Zielinski T. (2006). Fast and robust endoscopic motion estimation in high-speed laryngoscopy. In *Proceedings AQL 2006: Advances in Quantitative Laryngology, Voice and Speech Research, October 6-7, 2006, Groningen, the Netherlands [CD-ROM]*. (pp. 1-12). Groningen, the Netherlands: Groningen Voice Research Lab, University of Groningen.
- 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.
- 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* **26**, 89-94.
- Hirano M., Kakita Y., Ohmaru K., Kurita S. (1982) Structure and Mechanical Properties of the Vocal Fold. *Speech and Language* **7**, 271-297.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Plant R.L., Younger R.M. (2000) The interrelationship of subglottic air pressure, fundamental frequency, and vocal intensity during speech. *Journal of Voice* **14**, 170-177.
- Qiu Q., Schutte H. K., Gu L., Yu Q. (2003) An automatic method to quantify the vibration properties of human vocal folds via videokymography. *Folia Phoniatrica et Logopaedica* **55**, 128-136.
- Schlegel P., Stingl M., Kunduk M., Kniesburges S., Bohr C., Döllinger M. (2019) Dependencies and Ill-designed Parameters Within High-speed Videoendoscopy and Acoustic Signal Analysis. *Journal of Voice* **33**, 811.e1-811.e12.

- Sovák M. (1945) *Kmitání hlasivek ve světle laryngostroboskopie: fyziologická studie fonačního mechanismu*. 1. vydání. Česká akademie věd a umění, Praha, Česká republika, 89 stran.
- Sulter A.M. (1996) *Variation of voice quality features and aspects of voice training in males and females*. Dizertační práce, University of Groningen, Nizozemsko.
- Sundberg J., Titze I., Scherer R. (1993) Phonatory control in male singing: A study of the effects of subglottal pressure, fundamental frequency, and mode of phonation on the voice source. *Journal of Voice* **7**, 15-29.
- Švec J. (1996) *Studium mechanicko-akustických vlastností lidského hlasu*. Dizertační práce, UP Olomouc, Česká republika.
- 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, Early online) 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., Sundberg J. (1992) Vocal intensity in speakers and singers. *The Journal of the Acoustical Society of America* **91**, 2936-2946.
- Titze I., Jiang J., Hsiao T. (1993) Measurement of mucosal wave propagation and vertical phase difference in vocal fold vibration. *Annals of Otolaryngology & Rhinology* **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.
- Titze I. (2006) Theoretical Analysis of Maximum Flow Declination Rate Versus Maximum Area Declination Rate in Phonation. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research* **49**, 439-447.
- 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.

## 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.