

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta biomedicínského inženýrství

Disertační práce

březen 2023

Ing. Kristýna Koldová

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta biomedicínského inženýrství
Katedra biomedicínské techniky

**MOŽNOSTI MONITORACE PLIC
POMOCÍ ELEKTRICKÉ
IMPEDANČNÍ TOMOGRAFIE
PŘI KAPNOPERITONEU**

Disertační práce

Ing. Kristýna Koldová

Kladno, březen 2023

Doktorský studijní program: Biomedicínská a klinická technika
Studijní obor: Biomedicínská a klinická technika

Školitel: prof. Ing. Karel Roubík, Ph.D.
Školitel specialista: MUDr. Tomáš Tyll, Ph.D.

Prohlašuji, že jsem disertační práci s názvem *Možnosti monitorace plic pomocí elektrické impedanční tomografie při kapnoperitoneu* vypracovala samostatně a použila k tomu úplný výčet citací použitých pramenů, které uvádím v seznamu přiloženém k disertační práci.

V Kladně 20. března 2023

.....

Ing. Kristýna Koldová

Poděkování

Ráda bych poděkovala svému školiteli, profesoru Karlu Roubíkovi, za vedení a pomoc při řešení tématu disertační práce i za podnětné rady. Ráda bych také poděkovala kolegům z Nekonvenčního ventilačního týmu, zejména pak Ing. Václavu Ortovi, za spolupráci, pomoc a příjemné pracovní prostředí. Dále bych ráda poděkovala týmu pracovníků Kliniky anestezie a resuscitační medicíny Ústřední vojenské nemocnice v Praze pod vedením MUDr. Tomáše Tylla, Ph.D., konkrétně pak MUDr. Aleši Rárovi, Ph.D. a MUDr. Martinu Müllerovi, Ph.D., za organizaci a pomoc při klinických experimentech a za rady a informace cenné pro řešení práce. Rovněž děkuji všem anesteziologům, chirurgům a veškerému personálu zajišťujícímu nejen hladký průběh klinických měření, ale zároveň také velmi milé pracovní prostředí. V neposlední řadě děkuji rodině, zejména otci, za celoživotní inspiraci a za lásku ke studiu a ke vědě, kterou ve mně inicioval, a manželovi, za významnou podporu a toleranci, která mi umožnila skloubit práci na disertaci s péčí o dvě malé děti.

Práce byla podpořena granty Studentské grantové soutěže ČVUT v Praze SGS16/258/OHK4/3T/17 *Metody zpracování a analýzy dat v urgentní medicíně*, SGS19/203/OHK4/3T/17 *Rozšíření možností využití elektrické impedanční tomografie v klinické praxi* a SGS23/198/OHK4/3T/17 *Zvýšení bezpečnosti a diagnostických možností přístrojové techniky v respirační péči a související neodkladné péči*.

Abstrakt

Při laparoskopických operacích dutiny břišní je k zajištění optimálních operačních podmínek peritoneální dutina vyplněna oxidem uhličitým a je tak vytvořeno tzv. kapnoperitoneum. Využití laparoskopických technik přináší nespornou řadu výhod, ale zároveň zvyšuje riziko vzniku plicních patologií. Proto je žádoucí zavést do klinické praxe metodu, která by umožňovala sledování provzdušnění plicní tkáně během těchto operačních výkonů. Přestože v současné době není standardně monitorace plic během laparoskopických operací dutiny břišní prováděna, narůstá mezi výzkumníky snaha využívat během těchto výkonů systém elektrické impedanční tomografie (EIT), který se vzhledem ke svým vlastnostem jako je neinvazivnost či absence ionizujícího záření jeví jako vhodný. Vystává však řada otázek zpochybňujících zejména vhodnost umístění elektrodového pásu do standardní, výrobcem doporučené roviny 4. až 6. mezižebří. Cílem této práce je analyzovat, v jaké míře obsahují záznamy EIT pořízené během laparoskopických operací s kapnoperitoneem standardně umístěným elektrodovým pásem informaci o provzdušnění plic a zda by nebylo pro tuto aplikaci vhodnější kranialnější umístění elektrodového pásu.

Nejprve byla realizována studie na 20 pacientech podstoupivších laparoskopický výkon s kapnoperitoneem, ve které byla pomocí ultrazvuku potvrzena přítomnost bránice v oblasti podílející se na tvorbě EIT záznamu v 95 % případů. V navazující studii jsme pořizovali EIT záznam u 18 pacientů při laparoskopických výkonech s kapnoperitoneem dvěma elektrodovými pásy umístěných ve dvou rovinách: ve standardní rovině 4. až 6. mezižebří a v kranialnější rovině v úrovni axily. Hlavním zjištěním studie je, že monitorování plic při laparoskopických operacích s kapnoperitoneem pomocí systému EIT PulmoVista 500 (Dräger Medical, Německo) s elektrodovým pásem umístěným ve standardně používané tomografické rovině nepřináší požadované informace o distribuci ventilace v plicích. Kranialní posun plicní tkáně při kapnoperitoneu způsobuje, že na záznamu EIT ze standardní roviny dochází k výraznému potlačení až vymizení impedančních změn způsobených dechovými exkurzemi a místo dechové aktivity je detekována aktivita srdeční. Objevují se tzv. out-of-phase oblasti, což je způsobeno přítomností kapnoperitonea s výrazně jinou impedancí než plicní tkáň.

Na základě provedených analýz lze tvrdit, že EIT záznam ze standardní roviny nezobrazuje impedanční změny způsobené ventilací a nelze tak z těchto údajů jakkoliv hodnotit stav plic a regionální ventilaci. Při umístění elektrodového pásu do kranialnější polohy poskytuje EIT relevantnější informace o distribuci ventilace pacienta, přestože záznam může být také částečně ovlivněn zvýšeným intraabdominálním tlakem způsobeným kapnoperitoneem.

Klíčová slova

Elektrická impedanční tomografie, elektrodový pás, laparoskopie, kapnoperitoneum.

Abstract

During laparoscopic operations of the abdominal cavity, to ensure optimal operating conditions, the peritoneal cavity is filled with carbon dioxide, creating a so-called capnoperitoneum. The use of laparoscopic techniques brings an indisputable number of advantages, but at the same time increases the risk of developing lung pathologies. Therefore, it is desirable to introduce into clinical practice a method that would allow the monitoring of distribution of ventilation during surgical procedures. Although lung monitoring is not currently performed as a standard during laparoscopic operations of the abdominal cavity, there is an increasing effort among researchers to use the electrical impedance tomography (EIT) system during these procedures, which appears to be suitable due to its properties such as non-invasiveness and the absence of ionizing radiation. However, several questions arise, particularly questioning the appropriateness of placing the electrode belt in the standard, manufacturer-recommended plane of the 4th to 6th intercostal space. The aim of this work is to analyse to what extent the EIT signal obtained during laparoscopic operations with capnoperitoneum with a standardly placed electrode belt contain information about regional ventilation and whether a more cranial position of the electrode belt would be more suitable for this application.

First, a study was carried out on 20 patients undergoing laparoscopic surgery with capnoperitoneum, in which the presence of the diaphragm in the EIT sensitivity region was confirmed by ultrasound in 95% of cases. In a follow-up study, we used EIT in 18 patients during laparoscopic procedures with capnoperitoneum with two electrode belts placed in two planes: in the standard plane of the 4th to 6th intercostal space and in a more cranial plane at the level of the axilla. The main finding of the study is that lung monitoring during laparoscopic operations with capnoperitoneum using the EIT system PulmoVista 500 (Dräger Medical, Germany) with an electrode belt placed in the standard position does not provide the required information about the distribution of ventilation. The cranial shift of the lung tissue during capnoperitoneum causes significant suppression or disappearance of ventilation-induced impedance changes in the EIT signal obtained from the standard plane, and cardiac activity is detected instead of respiratory activity. So-called out-of-phase areas appear, which is caused by the presence of capnoperitoneum with a significantly different impedance than lung tissue.

Based on the performed analyses, it can be claimed that the EIT signal from the standard plane does not show impedance changes caused by ventilation, and thus it is not possible to evaluate lung condition and regional ventilation from these data in any way. By placing the electrode belt in a more cranial position, EIT provides more relevant information about the patient's ventilation distribution, although the signal may also be partially affected by increased intra-abdominal pressure caused by capnoperitoneum.

Keywords

Electrical impedance tomography, electrode belt, laparoscopy, capnoperitoneum.

Obsah

Seznam symbolů a zkratk	8
1 Úvod	11
1.1 Přehled současného stavu	13
1.2 Cíle práce	15
2 Vliv kapnoperitonea a polohy na životní funkce	16
3 Elektrická impedanční tomografie	17
3.1 Princip EIT	18
4 Organizace klinického měření, plán studie	21
5 Měření výšky bránice pomocí ultrazvuku	22
5.1 Metody	22
5.2 Výsledky	24
5.3 Diskuse	26
5.4 Závěr dílčí studie	27
6 Monitorace plic při kapnoperitoneu ve dvou rovinách	28
6.1 Metody	28
6.2 Měření FRC	30
6.3 Zpracování dat, statistika	33
6.4 Výsledky	34
6.4.1 Frekvenční analýza a změna amplitudy	35
6.4.2 Tidal variation a analýza ROI	37
6.4.3 Vliv filtrace	40
6.4.4 Vliv baseline	43
6.4.5 Index TV/VT	47
6.4.6 Out-of-phase analýza	48
6.4.7 Měření FRC	51
6.5 Diskuse	53
6.4 Limitace studie	56
6.5 Závěr dílčí studie	57
7 Limitace použití elektrické impedanční tomografie	58
7.1 Kontraindikace uváděné výrobcem	58
7.2 Nízké prostorové rozlišení EIT	59
7.3 Elektromagnetická kompatibilita	60
7.4 Metodická rizika	60
8 Přínos pro biomedicínské inženýrství	61

9	Závěr	62
	Literatura	63
	Přílohy.....	68

Seznam symbolů a zkratek

Symbol	Jednotka	Význam
BMI	kg/m^2	index tělesné hmotnosti (<i>body mass index</i>)
CO	L/min	srdeční výdej (<i>cardiac output</i>)
CVP	mmHg	centrální žilní tlak (<i>central venous pressure</i>)
D_a	cm	vzdálenost bránice od horní hrany sternu
D_5	cm	vzdálenost mezi pátým mezižebřím a horní hranou sternu
$etCO_2$	mmHg	koncentrace oxidu uhličitého na konci výdechu (<i>end-tidal CO₂</i>)
f_{B0}	dechy/min, Hz	fundamentální složka dechové frekvence
f_{B1-fB3}	dechy/min, Hz	nižší harmonické složky dechové frekvence
f_{H0}	tepy/min, Hz	fundamentální složka srdeční frekvence
$FEV1$	L, mL	usilovně vydechnutý objem za první sekundu (<i>forced expiratory volume</i>)
FiO_2	%	koncentrace kyslíku ve vdechovaném vzduchu (<i>fraction of inspired oxygen</i>)
FRC	L, mL	funkční reziduální kapacita (<i>functional residual capacity</i>)
FRC_{insp}	L, mL	inspirační reziduální kapacita plic
FRC_{exp}	L, mL	expirační reziduální kapacita plic
FVC	L, mL	usilovná vitální kapacita (<i>forced vital capacity</i>)
f_0	min^{-1}	mezní frekvence
HR	bpm	srdeční frekvence (<i>heart rate</i>)
MAP	mmHg	střední arteriální tlak (<i>mean arterial pressure</i>)
PaO_2	mmHg	parciální tlak kyslíku v arteriální krvi
$PEEP$	cmH_2O	přetlak v dýchacích cestách na konci výdechu (<i>positive end-expiratory pressure</i>)
pCO_2	mmHg	parciální tlak oxidu uhličitého

Symbol	Jednotka	Význam
<i>RR</i>	Počet dechů / min	dechová frekvence (<i>respiratory rate</i>)
<i>SpO₂</i>	%	saturace periferní krve kyslíkem
<i>SVR</i>	mmHg·min/L	systémová vaskulární rezistance
<i>TV</i>	AU	impedanční změny, dechové exkurze (<i>tidal variation</i>)
ρ	$\Omega \cdot m$	rezistivita, měrný elektrický odpor
σ	S/m	konduktivita, měrná elektrická vodivost

Zkratka	Význam
ARDS	syndrom akutní dechové tísně (<i>acute respiratory distress syndrome</i>)
bpm	počet srdečních stahů za minutu (<i>beats per minute</i>)
BTK	bezpečnostně technická kontrola
CT	výpočetní tomografie (<i>computed tomography</i>)
EIT	elektrická impedanční tomografie
ESU	elektrochirurgická jednotka (<i>electrosurgical unit</i>)
FFT	rychlá Furierova transformace (<i>fast Furier transform</i>)
KARIM	klinika anesteziologie, resuscitace a intenzivní medicíny
L	oblast zájmu vrstva (<i>ROI layer</i>)
MRI	zobrazování magnetickou rezonancí (<i>magnetic resonance imaging</i>)
Q	oblast zájmu kvadrant (<i>ROI quadrant</i>)
ROI	oblast zájmu (<i>region of interest</i>)
UPV	umělá plicní ventilace
ÚVN	Ústřední vojenská nemocnice
ÚZIS	Ústav zdravotnických informací a statistiky
VCV	objemově řízená ventilace (<i>volume-controlled ventilation</i>)
VZP	Všeobecná zdravotní pojišťovna
α	hladina statistické významnosti

1 Úvod

Laparoskopie je minimálně invazivní metoda břišní chirurgie, kdy se pomocí endoskopických nástrojů a kamery provádějí operace pánve a orgánů břišní dutiny bez nutnosti jejího širšího otevření. Od původně několika diagnostických výkonů se laparoskopie během posledních desetiletí mohutně rozvinula a nyní je moderní laparoskopie využívána k operacím téměř všech orgánů dutiny břišní v oblastech chirurgie, gynekologie i urologie. Mezi nejčastější laparoskopické výkony v současnosti patří hysterektomie (odstranění dělohy), prostatektomie (odstranění prostaty), cholecystektomie (odstranění žlučníku), hernioplastika (operace kýly) či apendektomie (odstranění appendixu). Ve vyspělých státech se jedná o rutinně prováděné zdravotnické výkony. Příklady počtu provedených vybraných laparoskopických výkonů v České republice v letech 2016–2021 dle analýzy Ústavu zdravotnických informací a statistiky (ÚZIS) jsou uvedeny v tabulce 1.

Tabulka 1: Počty provedených konkrétních laparoskopických výkonů s označením kódu dle číselníku VZP v České republice v letech 2016–2021. [Zdroj dat: ÚZIS]

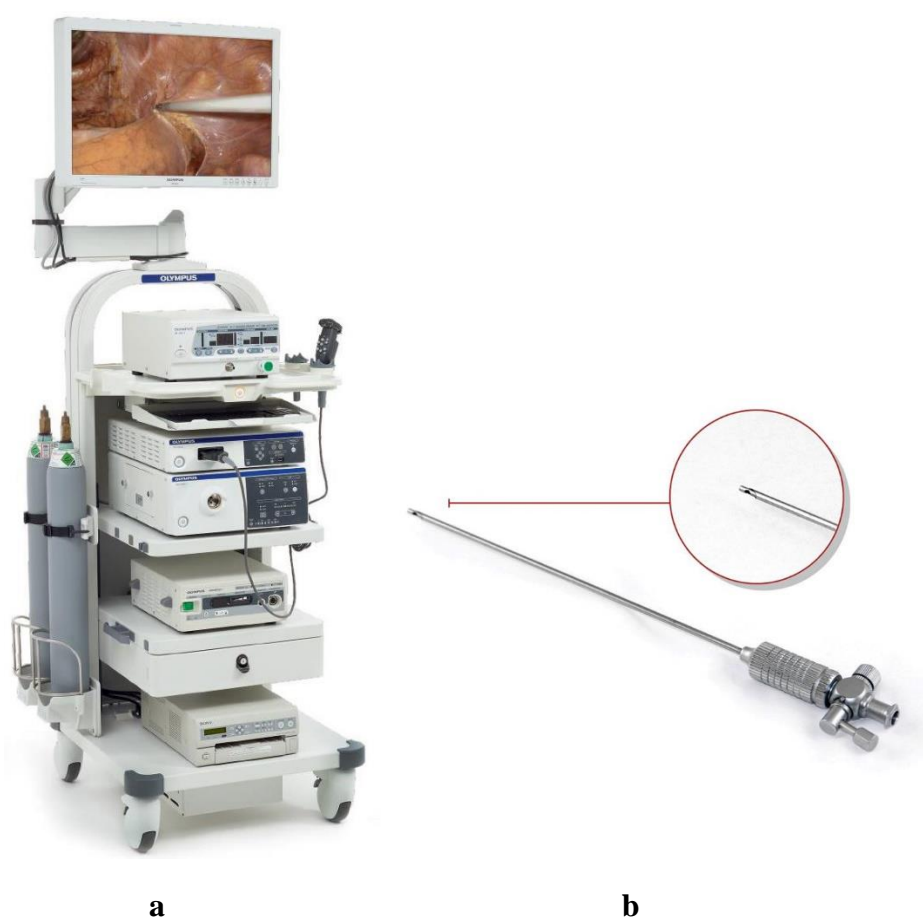
Název výkonu	Kód dle VZP	Počet provedených výkonů za rok					
		2016	2017	2018	2019	2020	2021
Prostá cholecystektomie	10406	1297	1248	1219	1391	1216	1605
Hernioplastika jednostranná primární	10407	1065	1073	1135	1281	1126	1440
Roboticky asistovaná radikální prostatektomie	76705	0	0	183	306	327	1862
Resekce ovaria laparoskopicky	90804	1516	1533	1355	1358	974	1075
Laparoskopicky asistovaná vaginální hysterektomie	90831 + 90845	10684	10037	10102	9805	7652	7804
Totální laparoskopická hysterektomie	90859	807	976	1205	1676	1780	2098

Laparoskopie přináší mnoho výhod, jako např. snížený perioperační stres a menší traumatizaci tkání, menší krevní ztráty během výkonu, rychlejší rekonvalescenci, kosmetické výhody v podobě menších jizev a v neposlední řadě také snížení ekonomických nákladů díky zkrácení celkové délky trvání hospitalizace spojené s operačním výkonem. Využití laparoskopických technik však přináší prodloužení celkového času výkonu, a tedy i času, který pacient stráví v celkové anestezii. S rozšířením spektra a indikací laparoskopických výkonů tak vznikly nové podmínky, kterým bylo potřeba přizpůsobit anesteziologické postupy i monitoraci pacienta během výkonu a v následném pooperačním období. [1]

K zajištění optimálních podmínek v dutině břišní při laparoskopické operaci je nutné založit tzv. pneumoperitoneum, kdy dochází pomocí intraperitoneální insuflace k elevaci břišní stěny a posunu vnitřních orgánů. V dutině břišní je tak vytvořen větší pracovní prostor

umožňující lepší přístup k operované tkáni a snazší práci s operačními nástroji. Jelikož je standardně pro insulaci peritonea využíván oxid uhličitý, bývá pneumoperitoneum označováno jako kapnoperitoneum. Přestože je oxid uhličitý z hlediska svých fyzikálně-chemických vlastností prakticky ideálním insulačním plynem, má kapnoperitoneum řadu vedlejších účinků, které jsou blíže popsány v kapitole 2.

Během laparoskopických výkonů je používána řada zdravotnických přístrojů, které jsou umístěny do tzv. laparoskopické věže. Příklad laparoskopické věže a pro břišní laparoskopii typické Veressovy jehly, která se používá pro insulaci plynu za účelem vytvoření kapnoperitonea, je na obrázku 1.1.



Obr. 1.1. Příklad laparoskopické věže (a) standardně obsahující monitor, digitální kamerový systém, zdroj světla, insulátor, proplachovou jednotku a elektrochirurgickou jednotku, a Veressovy jehly (b) používané k vytvoření pneumoperitonea. Převzato z [2] a [3].

Při laparoskopických výkonech je využíváno také polohování pacienta, kdy je podle typu výkonu volena tzv. Trendelenburgova poloha, při níž leží pacient na zádech s hlavou pod úrovní pánve, nebo obrácená Trendelenburgova poloha, kdy je naopak vyvýšená horní polovina těla, jak ilustruje obrázek 1.2. Polohování pacienta má také vliv na jeho základní životní funkce. [4] [5] [6] [7]



Obr. 1.2. Trendelenburgova poloha (vlevo) a reverzní Trendelenburgova poloha (vpravo). Úhel náklonu je přizpůsoben typu operačního výkonu, požadavkům operátora i stavu pacienta. Převzato z [8].

1.1 Přehled současného stavu

Přestože v současné době není standardně monitorace plic během laparoskopických operací dutiny břišní prováděna, narůstá mezi výzkumníky snaha využívat během těchto výkonů systém elektrické impedanční tomografie (EIT) k monitoraci plic a minimalizaci některých vedlejších účinků kapnoperitonea. Vzhledem ke svým vlastnostem jako je neinvazivnost či absence ionizujícího záření se elektrická impedanční tomografie jeví jako vhodná metoda. Bylo publikováno několik studií, které se možnostmi monitorace distribuce ventilace v plicích pomocí EIT zabývají, či tuto metodu již přímo využívají ke zlepšení ventilace pacienta při kapnoperitoneu. T. Meier et al. ve studii [9] analyzují vhodnost využití EIT (Evaluation Kit, Dräger Medical, GoeMF II, Německo) u prasat podstupujících laparoskopické operace s kapnoperitoneem. Na základě srovnání EIT snímků se snímky výpočetní tomografie (CT) považuje metodu v kombinaci s měřením SpO_2 a $etCO_2$ za vhodnou pro kontinuální monitoring regionální ventilace během laparoskopie. J. Karsten et al. [10] porovnávali pomocí EIT (Evaluation Kit, Dräger Medical, GoeMF II, Německo) dvě skupiny pacientů při kapnoperitoneu s různou hodnotou přetlaku v dýchacích cestách na konci výdechu (PEEP). Studie demonstruje, že vlivy PEEP lze během laparoskopických operací s kapnoperitoneem pomocí EIT monitorovat. Cílem studie [11] X. He et al. bylo využití EIT (PulmoVista 500, Dräger Medical, Německo) k zajištění optimální hodnoty PEEP a zamezení vysokých hodnot FiO_2 pacientů podstupujících laparoskopický zákrok. Přestože se ve studii zcela nedopařilo

prokázat pozitivní vliv PEEP o hodnotě 10 cmH₂O na účinky kapnoperitonea, spatřují ve využití EIT pro monitoring ventilace při laparoskopii značný potenciál. V jiné studii [12] M. Stankiewicz-Rudnicki et al. analyzuje, zda je možné detekovat změny regionální distribuce ventilace při laparoskopii u morbidně obézních pacientů pomocí EIT (PulmoVista 500, Dräger Medical, Německo) s elektrodovým pásem umístěným kraniálně (3. mezižebří) od standardní roviny (4.–6. mezižebří). Objevuje výrazná úskalí této metody, která spočívají zejména v obtížnosti nalezení optimální roviny umístění elektrodového pásu tak, aby byla zachycena místa těsně nad bránicí, která jsou nejčastěji postižena atelektázami a jsou tak z patologického hlediska nejvýznamnější. Při pásu umístěném do třetího mezižebří však po zavedení kapnoperitonea nejsou detekovány změny v záznamu EIT, které by jednoznačně odpovídaly respiračním změnám.

Přestože většina uvedených studií považuje EIT za vhodnou metodu pro monitoraci plic během laparoskopických břišních operací, není metodika této metody zcela upřesněna. Existuje řada možných limitací, jako například určení roviny umístění elektrod či elektrodového pásu, které je potřeba specifikovat. Dle výsledků našich pilotních měření na dvou pacientech během laparoskopické operace dutiny břišní s kapnoperitoneem je zřejmé, že EIT snímky získané z konvenční tomografické roviny hrudníku nemusí vždy obsahovat správné, diagnosticky vyhodnotitelné informace.

Řada studií se zabývala analýzou plicních parametrů po provedených laparoskopických operacích dutiny břišní. K. G. Torrington et al. ve své studii [13] zjistili snížení usilovné vitální kapacity (FVC) o 23 % a usilovně vydechnutého objemu za první sekundu (FEV1) o 16 % u pacientů 24 hod po laparoskopické cholecystektomii. U části pacientů došlo k rozvoji atelektáz a pleurálního výpotku (7/20). S. Hasukic et al. ve své studii [14] rovněž potvrzují statisticky významné změny v hodnotách FEV1 a FVC před a po laparoskopické cholecystektomii. U části operovaných pacientů (9/30) také potvrdili vznik mikroatelektáz. L. E. Anderson et al. v publikované studii [15] monitorovali vznik atelektáz přímo během kapnoperitonea u 7 pacientů pomocí spinálního CT a detekovali zvýšení průměrného objemu atelektáz v dependentních oblastech plic o 66 %. Ve studii rovněž potvrzují kraniální posun bránice při kapnoperitoneu v průměru o 1,9 cm.

Studie uvedené výše potvrzují vliv kapnoperitonea na některé plicní parametry (např. FVC, FEV1) a potvrzují rovněž zvýšené riziko vzniku plicních patologií, jako jsou např. atelektázy. Tato zjištění jsou také motivací k uvedení metody vhodné pro monitoring plic během laparoskopických operací do klinické praxe.

1.2 Cíle práce

Vzhledem k patologiím, které při laparoskopických operacích s kapnoperitoneem vznikají, je žádoucí vyvinout metodu či standardizovat příslušné postupy pro monitoring plic během tohoto nefyziologického stavu. Polohu plic a distribuci ventilace lze určit pomocí hrudního rentgenu nebo CT, což však není možné rutinně a kontinuálně provádět. Vzhledem ke svým vlastnostem se tak elektrická impedanční tomografie jeví jako vhodný nástroj pro monitoring distribuce ventilace během laparoskopických výkonů v oblasti dutiny břišní. Záznamy z EIT by mohly jednak poskytnout lékařům užitečné informace o aktuálním provzdušení plic a také vést k optimalizaci nastavení parametrů umělé plicní ventilace a tím přispět k minimalizaci nepříznivého vlivu kapnoperitonea na základní životní funkce, zejména ventilaci.

Hlavním cílem této práce je analyzovat, v jaké míře obsahují záznamy EIT během laparoskopických operací s kapnoperitoneem pořízené standardně umístěným elektrodovým pásem v úrovni 4.–6. mezižebří informaci o provzdušnění plic a zda by nebylo pro tuto aplikaci vhodnější kranialnější umístění elektrodového pásu do úrovně axilly.

Mezi další cíle pak patří:

- Realizovat klinickou studii s cílem upřesnit polohu bránice při kapnoperitoneu pomocí ultrazvukové sondy a vyhodnotit, do jaké míry zasahuje bránice do oblasti podílející se na vzniku EIT snímku při standardně i kranialně umístěném elektrodovém pásu.
- Realizovat navazující klinickou studii v rámci které budou analyzovány změny způsobené kapnoperitoneem v EIT záznamu pořízeném ze dvou tomografických rovin a naměřené hodnoty funkční reziduální kapacity plic.
- Ověřit technické možnosti a případné limitace použití EIT při laparoskopických výkonech s kapnoperitoneem.

2 Vliv kapnoperitonea a polohy na životní funkce

K optimálním podmínkám pro laparoskopické výkony je standardně potřeba vytvořit pomocí oxidu uhličitého nitrobřišní tlak o hodnotě 12–15 mmHg. [1] [16] [17] Uvažujeme-li objem peritoneální dutiny cca 3 L¹, spotřeba oxidu uhličitého pro zachování zmíněného tlaku je minimálně 60 L/hod. [18] Přestože je oxid uhličitý při zachování fyziologických hodnot (tj. koncentrace oxidu uhličitého na konci výdechu etCO₂ 35–40 mmHg) zcela netoxický, je známa řada vedlejších účinků kapnoperitonea.

Kapnoperitoneum způsobuje mnoho hemodynamických změn, jako je zvýšení srdeční frekvence (HR), arteriálního tlaku (MAP) a systémové vaskulární rezistance (SVR), snížení preloadu a zvýšení afterloadu, snížení srdečního výdeje (CO) a snížení perfuze většiny nitrobřišních orgánů (s výjimkou nadledvin). Celková anestezie jako taková vede ke zhoršení ventilace zvýšením rigidity hrudní stěny a nepoměrem ventilace a perfuze. Kapnoperitoneum vede k posunu bránice kraniálním směrem, což spolu se zvýšenou minutovou ventilací zvyšuje tlak v dýchacích cestách. Kapnoperitoneum dále snižuje poddajnost plic a vede ke zvýšení plató a špičkového tlaku v dýchacích cestách (peak and plateau airway pressure), což spolu se snížením funkční reziduální kapacity (FRC) plic může vést k prohloubení nepoměru mezi ventilací a perfuzí, omezení výměny plynů a hypoxémii i ke zvýšení rizika barotraumatů. Oxid uhličitý se velmi dobře rozpouští v krvi a navyšuje tak parciální tlak pCO₂, což je potřeba kompenzovat zvýšenou dechovou frekvencí (RR), resp. zvýšením minutového objemu o cca 30 %. Dochází ke snížení exkurzí bránice, k omezení rozpětí plic a zhoršené distribuci ventilace, což může vést až k nevzdušnosti plicní tkáně (kolapsu plic či atelaktázám) zejména v bazálních částech plic. [1] [16] [17]

Kapnoperitoneum může mít vliv také na funkci ledvin. Zvýšený nitrobřišní tlak vede k přímé kompresi renální vaskulatury a močovodů a může tak vést ke snížení průtoku krve ledvinami, rychlosti glomerulární filtrace a vylučování sníženého množství moči, tzv. oligurii. [16] [17]

Polohování pacienta při laparoskopických operacích může rovněž vést k nezanedbatelným vedlejším účinkům. Trendelenburgova poloha, kdy pacient leží v supinační poloze (tj. na zádech) s hlavou a trupem skloněným oproti pánvi a horním končetinám až o 30 ° zesiluje zejména negativní účinky na ventilaci pacienta, ovšem na hemodynamiku má naopak příznivější vliv než reverzní Trendelenburgova poloha. Při Trendelenburgově poloze dochází ke zvýšení žilního návratu a centrálního žilního tlaku (CVP), zvýšení minutového srdečního výdeje, snížení systémové vaskulární rezistance a zvýšení rizika vzniku plynové embolie. [1] Míra změn působených operační polohou závisí na úhlu sklonu pacienta a také na stavu pacienta. U obézních pacientů a u pacientů s plicním onemocněním jsou tyto změny klinicky významnější. [19]

¹ Pro označení litru je záměrně použit symbol „L“ používaný v anglosaské literatuře a preferovaný v zahraniční literatuře z oblasti respirační péče, protože symbol „l“ (malé písmeno L) lze snadno zaměnit za 1 (číslici jedna), což snižuje čitelnost textu a hrozí i nebezpečí nechtěné záměny.

3 Elektrická impedanční tomografie

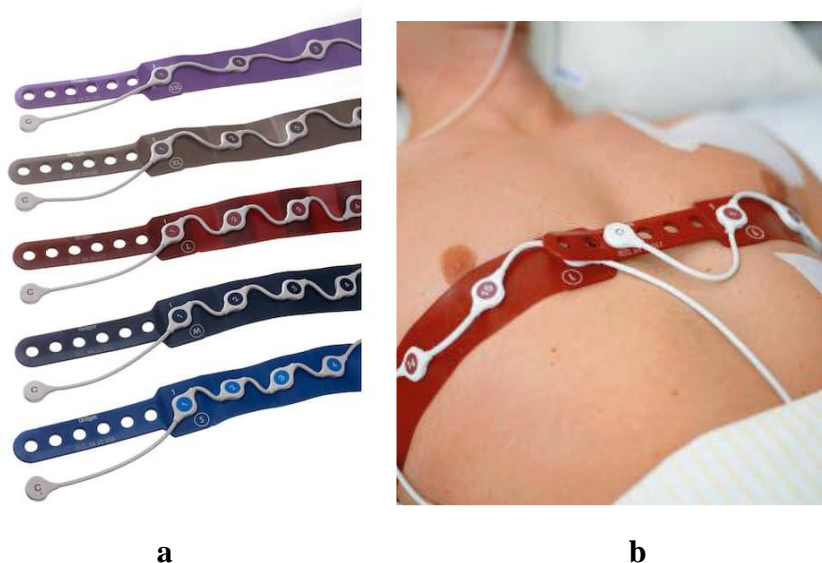
Elektrická impedanční tomografie (EIT) je neinvazivní diagnostická metoda, která zobrazuje řez v požadované tomografické rovině na základě nehomogenních elektrických vlastností jednotlivých tkání. Ve srovnání s konvenčně používanými zobrazovacími systémy jako je výpočetní tomografie (CT) nebo magnetická rezonance (MRI), má EIT výhodu jednoduché konstrukce, relativně nízké pořizovací ceny a rychlého sběru dat. Tato metoda rovněž nezatěžuje pacienta ionizujícím zářením ani jinými nežádoucími účinky. Díky svým vlastnostem tak může být EIT používána jak na ambulantní vyšetření, tak na kontinuální, tzv. bed-side monitoring přímo u lůžka pacienta. EIT je v současnosti jedinou známou neinvazivní metodou, která poskytuje informace o distribuci ventilace v plicích. [20] [21] I přesto, že v posledních letech narůstá množství výzkumníků zabývajících se využitím této metody, EIT stále není ve zdravotnictví rutinním diagnostickým či monitorovacím nástrojem.

Přestože se o EIT často hovoří jako o zobrazovací metodě, nelze kvalitu a rozlišení získaného snímku srovnávat s metodami jako je CT nebo MRI. S ohledem na princip EIT není možné získat pomocí EIT přesné anatomické zobrazení struktur lidského těla, ale získáváme pomocí EIT tzv. funkční zobrazení.

EIT systém PulmoVista 500 (Dräger Medical, Německo) je navržen jako funkční monitor plic pro použití v klinické praxi, který kontinuálně generuje snímky plic v daném tomografickém řezu. Pro získání dat k rekonstrukci obrazu plic používá gumový pás, na kterém je ekvidistantně rozmístěno 16 elektrod. Tento pás je umístěn okolo hrudníku pacienta v úrovni 4.–6. mezižebří a určuje tak zobrazovanou rovinu řezu hrudníku. [22] Ilustrační obrázky systému EIT a elektrodových pásů včetně jeho aplikace jsou na obrázcích 3.1 a 3.2.



Obr. 3.1. Systém EIT PulmoVista 500 (Dräger Medical, Německo). Převzato z [23].



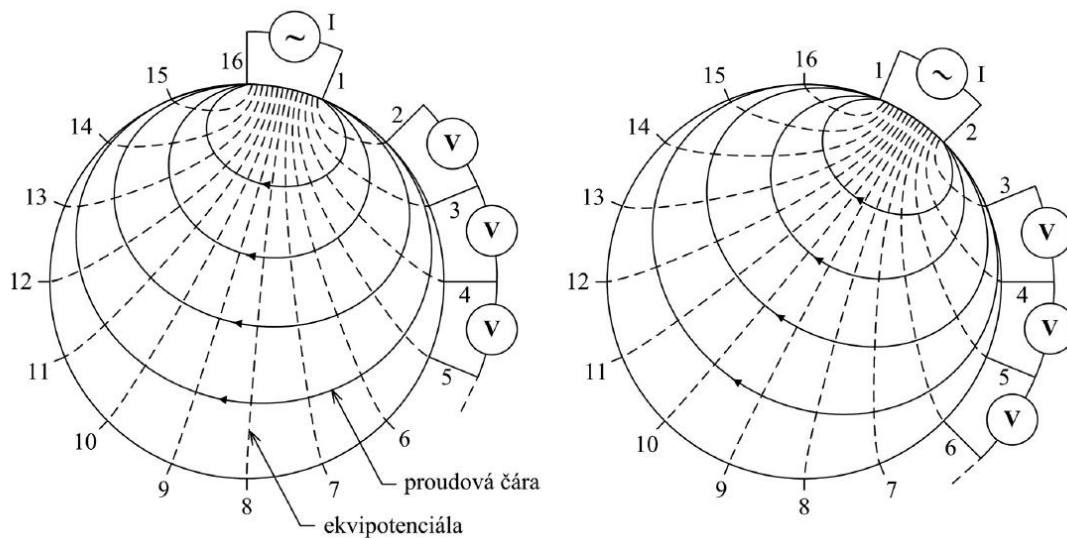
Obr. 3.2. Elektrodové pásy používané systémem EIT PulmoVista 500 (Dräger Medical, Německo). Barevně odlišené velikosti elektrodových pásů S až XXL lze umístit na hrudník o obvodu 70 cm až 150 cm (a). Ukázka aplikace elektrodového pásu na pacienta ve standardní rovině 4.–6. mezižebří (b). Převzato z [22] a [24].

3.1 Princip EIT

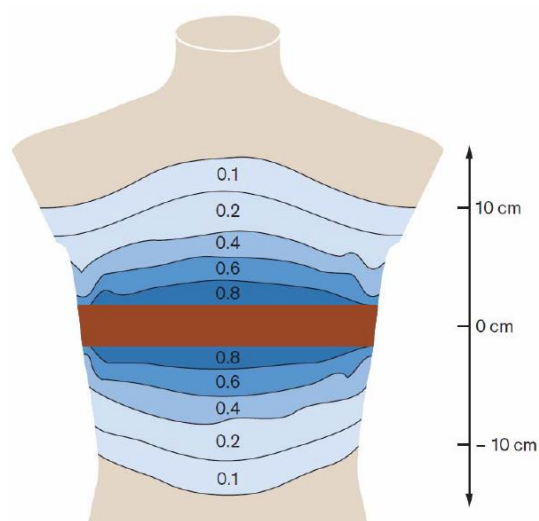
Elektrická impedanční tomografie je založena na rovinném zobrazení měrné elektrické vodivosti (tzv. konduktivity σ) prostředí, tj. schopnosti tkáně vést elektrický proud. Konduktivita je převrácenou hodnotou rezistivity ρ . Přestože metoda zobrazuje rozložení konduktivity, ujal se označení elektrická impedanční tomografie. Při EIT jsou používány střídavé proudy s harmonickou frekvencí v řádech kilohertzů a nízkých amplitudách v řádech jednotek miliampérů. Nutnost použití střídavých proudů místo stejnosměrných je dána strukturou buňky lidského těla, kdy se její stěna tvořená dvojvrstvou fosfolipidů chová jako dielektrikum, které má kapacitní charakter. Z toho důvodu dochází k fázovému posunu napětí a proudu a musíme tedy hovořit o zdánlivé vodivosti prostředí. Přes buňku snáze procházejí elektrické proudy o vyšších frekvencích, zatímco proudy stejnosměrné a nižší frekvence procházejí spíše extracelulárním prostorem. Buňku tak lze přirovnat k elektrickému filtru typu horní propust. [22] [25]

Konduktivita tkáně je měřena soustavou povrchových argentchloridových elektrod, které se umísťují kolem vyšetřované části těla v požadované tomografické rovině. EIT systém PulmoVista 500 (Dräger Medical, Německo), který byl využíván v této práci, používá 16 měřících elektrod integrovaných do gumového pásu, který se standardně umísťují na hrudník do úrovně 4.–6. mezižebří v medioklavikulární čáře, a jednu referenční elektrodu umístěnou v oblasti břicha. Jako referenční elektroda se nejčastěji používá jednorázová povrchová argentchloridové elektroda. Elektrody fungují jako zdrojové i měřicí. Nejprve je jedna dvojice sousedících elektrod zdrojem proudového impulsu a následně jsou vždy dvojice sousedících

elektrod využity jako elektrody měřicí, které detekují hodnotu napětí poté, co proudový impuls projde tělem jakožto nehomogenním objemovým vodičem. Následně se zdrojovými elektrodami stávají další elektrody a zbylé páry elektrod slouží jako měřicí. Tato metoda (obrázek 3.3) získání hodnot napětí a následné rekonstrukce obrazu se nazývá Neighboring a je využívána právě systémem EIT PulmoVista 500. Další metody jsou např. metoda Cross, metoda Adaptive nebo metoda Opposite. Vzhledem k tomu, že trajektorie proudu není přímá, podílí se na tvorbě snímku plic oblast zasahující až 10 cm od roviny umístění elektrodového pásu, jak je znázorněno na obrázku 3.4.

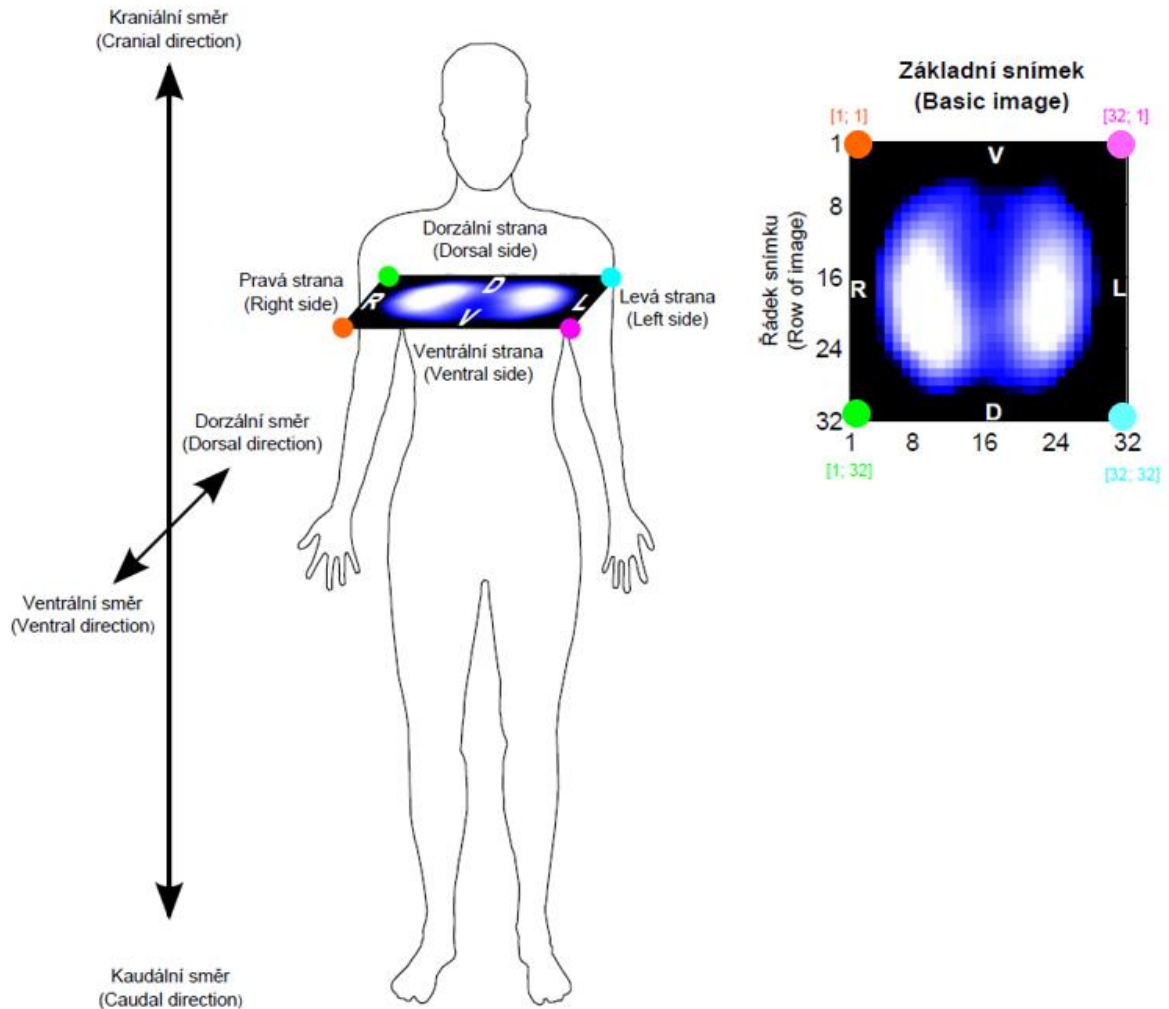


Obr. 3.3. Získání hodnot napětí pro rekonstrukci obrazu metodou Neighboring pro šestnáctielektrodový systém. Převzato z [25].



Obr. 3.4. Příspěvek okolních tkání k zobrazované impedanci v rovině umístění elektrodového pásu. Převzato z [22].

Snímek získaný systémem EIT je potřeba správně zasadit do kontextu anatomických rovin a směrů v lidském těle. Legenda k snímku je na obrázku 3.5. Při standardně zobrazeném snímku jsou záda pacienta umístěna dole (D), břicho nahore (V), pravá strana pacienta je na snímku vlevo (R) a levá strana pacienta vpravo (L), jedná se tedy o pohled na pacienta směrem od jeho dolních končetin.



Obr. 3.5. Legenda snímku EIT ze systému PulmoVista 500 (Dräger Medical). Záda pacienta jsou umístěna na obrázku dole (D), břicho nahore (V), pravá strana pacienta je na snímku vlevo (R) a levá strana pacienta vpravo (L). Upraveno dle [26].

4 Organizace klinického měření, plán studie

Tato práce je prospektivní intervenční studií. Všechna měření probíhala na klinice anestezie, resuscitace a intenzivní medicíny (KARIM) Ústřední vojenské nemocnice v Praze po předchozím schválení místní etické komise a po písemném souhlasu všech pacientů s účastí ve výzkumu před nastoupením k operačnímu výkonu. Zároveň byla schválena výpůjčka přístrojové techniky potřebné k měření oddělením zdravotnické techniky nemocnice, konkrétně se jednalo o systém elektrické impedanční tomografie PulmoVista 500 (Dräger Medical, Německo) s příslušenstvím a ventilátor Engström Carestation (Datex-Ohmeda, GE Healthcare, Finsko), který nahradil standardně používaný nemocniční ventilátor z důvodu umožnění měření funkční reziduální kapacity (FRC) metodou vymývání kyslíkem (O_2 washout). Příslušné dokumenty o zápůjčce přístrojů jsou v přílohách této práce. Veškerá přístrojová technika používaná během měření má označení CE, byla schválena pro používání v humánní medicíně v klinické praxi a měla platnou bezpečnostně technickou kontrolu (BTK). Studie byla rovněž zaregistrována v mezinárodní databázi klinických studií na webu ClinicalTrials.gov s identifikačním číslem NCT03038061. Protokol z databáze je rovněž v příloze této práce.

V rámci této disertační práce probíhaly dvě oddělené studie. První studie se zabývala detekcí bránice pomocí ultrazvuku během laparoskopických operací s kapnoperitoneem a analyzuje, zda během kapnoperitonea zasahuje bránice do oblasti podílející se na tvorbě EIT snímku hrudníku, která je vyznačená na obrázku 3.4 výše. Tato dílčí studie je popsána v následující kapitole 5. Druhá studie částečně navazuje na výsledky první studie a je popsána v kapitole 6. V rámci této studie jsme monitorovali distribuci ventilace v plicích během laparoskopických operací s kapnoperitoneem pomocí elektrické impedanční tomografie, a to s použitím dvou elektrodových pásů umístěných v různých tomografických rovinách, standardně v oblasti 4.–6. mezižebří a kraniálně, v oblasti axily.

5 Měření výšky bránice pomocí ultrazvuku

Při monitoraci ventilace EIT systémem PulmoVista 500 (Dräger Medical, Německo) je používán 16elektrodový pás, který se umísťuje kolem hrudníku pacienta. Výrobce je doporučováno elektrodový pás umístit do úrovně 4.–6. mezižebří v rovině parasternální medioklavikulární čáry [22]. Dle literatury [27] zasahují kraniální části bránice až do úrovně 4. mezižebřího prostoru. Aby byly v EIT záznamu minimalizovány nežádoucí vlivy pohybu bránice, výrobce nedoporučuje umísťovat pás níže než do úrovně 5. mezižebří u pacientů, kteří mohou mít bránici přirozeně ve zvýšené poloze [22]. Existuje však mnoho studií, které poukazují na nedostatek údajů o optimální pozici elektrodového pásu [28]. Jak uvádí studie J. Karstena [28] a několik dalších [21] [29] [30], umístění elektrodového pásu do oblastí blízko bránice může vést k nepřesnému zobrazení distribuce ventilace.

Kapnoperitoneum, které je během břišních laparoskopických operací vytvořeno a přetrvává po celou dobu výkonu, vede ke změně v uspořádání thorakoabdominálních poměrů a zejména pak posouvá bránici i plíce kraniálním směrem, což prokazují jak preklinické [31], tak i klinické studie [6] [10]. Pozice bránice, ke které při kapnoperitoneu dochází, však nebyla dle dosud dostupných zdrojů jasně analyzována. To nastiňuje otázku, zdali není nutné poměry v dutině břišní při kapnoperitoneu blíže analyzovat, aby bylo možné nové metody k monitoraci plic, jako např. EIT, při laparoskopii používat. Jelikož EIT záznam závisí na vnitřním thorakoabdominálním uspořádání, je zcela zásadní blíže určit polohu bránice při kapnoperitoneu a analyzovat tak případný vliv posuvu bránice na EIT snímky hrudníku.

Cílem této dílčí studie je analyzovat změnu pozice bránice při kapnoperitoneu pomocí ultrazvuku a stanovit, zda je bránice přítomná v rovině zasahující do oblasti monitorované elektrickou impedanční tomografií.

5.1 Metody

Celkem 20 pacientů (10 žen, 10 mužů), kteří se zúčastnili studie, podstoupili laparoskopický zákrok v dutině břišní s kapnoperitoneem (jednotlivé typy operačních výkonů jsou upřesněny v tabulce 2). Jejich průměrný věk byl $55,8 \pm 15,0$ let, BMI $25,8 \pm 3,9$ kg/m². Vylučujícím kritériem byla extrémní obezita (BMI > 40 kg/m²) a standardní vylučující kritéria pro monitoring EIT, které udává výrobce EIT systému (např. přítomnost elektricky aktivních implantátů v těle pacienta nebo poškozená kůže v oblasti umístění elektrodového pásu).

Pozice bránice byla určována v poloze vleže na zádech ve třech fázích: (1) během spontánního dýchání, (2) během umělé plicní ventilace při celkové anestezii s relaxovanými svaly a (3) během umělé plicní ventilace při celkové anestezii s relaxovanými svaly při kapnoperitoneu. Konkrétní poloha pacienta závisela na dané diagnóze; 11 pacientů bylo měřeno v Trendelenburgově pozici, 9 pacientů v poloze anti-Trendelenburg. Celková anestezie byla vedena jako kombinovaná doplňovaná (indukce byla provedena propofolem, sevofluran/isofluran plus bolusově sufentanil). Během výkonu byla zajištěna svalová relaxace nedepolarizujícími myorelaxancii (rocuronium nebo cisatracurium). Dýchací cesty byly

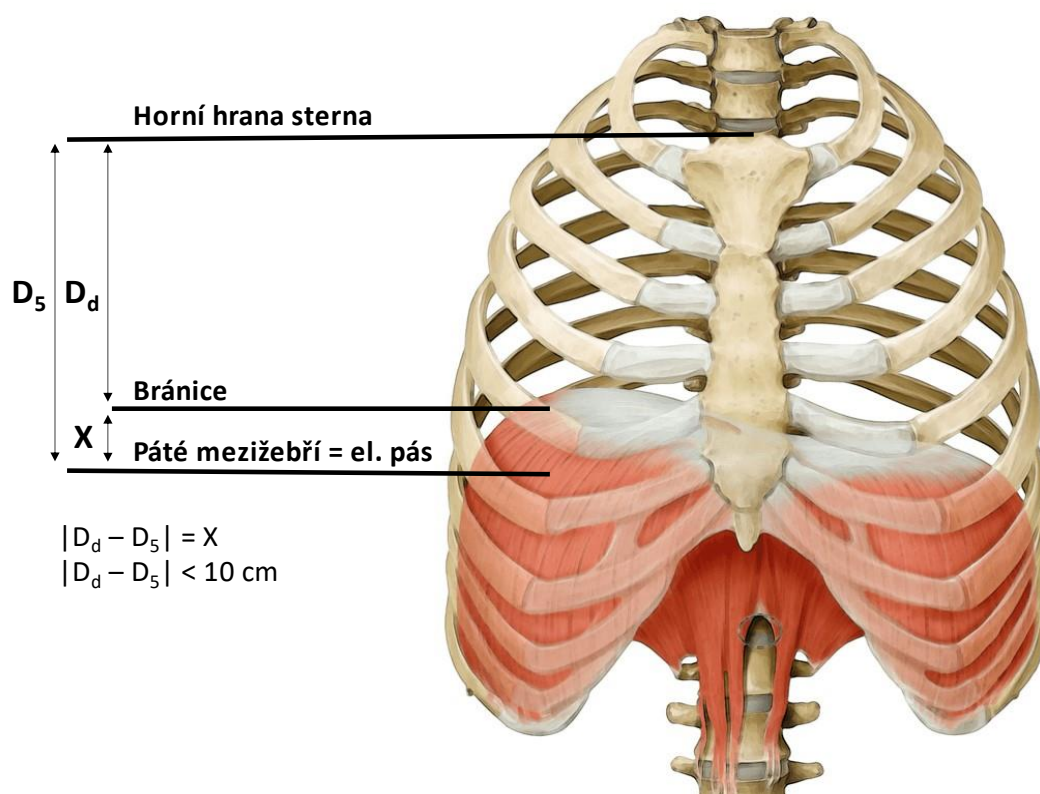
zajištěny orotracheální intubací, umělá plicní ventilace byla prováděna v objemově řízeném režimu VCV s dechovým objemem 6–8 mL/kg ideální váhy, PEEP 5 cmH₂O, dechová frekvence byla řízena dle aktuálních hodnot kapnografie (etCO₂), frakce kyslíku ve vdechovaném plynu FiO₂ byla 50 %. Průměrný intraabdominální tlak při kapnoperitoneu byl 12–15 mmHg, což odpovídá také tlaku insuflačního plynu. K udržování kapnoperitonea byly použity insuflátory Olympus UHI-3 a UHI-4 (Olympus Surgical Technologies, Německo).

Tabulka 2: Typy provedených operací, poloha pacienta a počet pacientů s danou operací.

Typ operace	Poloha	Počet pacientů
Laparoskopická cholecystektomie	Reverzní Trendelenburg	8
Laparoskopická hernioplastika a fundoplikace		1
Robotická prostatektomie	Trendelenburg	5
Laparoskopicky asistovaná vaginální hysterektomie		2
Laparoskopická eliminace endometriózy		2
Laparoskopie pro extrauterinní graviditu		1
Laparoskopická resekce rekta		1

Sonograficky, pomocí ultrazvuku Ultrasonix Sonix Touch (Ultrasonix Medical Corporation, Kanada), byla zjišťována přítomnost bránice či jaterní tkáně během dechového cyklu ve dvou definovaných rovinách: v trasnverzální rovině v přední axilární čáře na úrovni pátého mezižebří a v polovině sternu. K detekci byla použita konvexní sonda umístěná kolmo na hrudní stěnu. Detekci bránice ultrazvukem prováděl zkušený sonografista a anesteziolog MUDr. Aleš Rára, Ph.D., zaměstnanec KARIM ÚVN v Praze.

Ke stanovení přítomnosti bránice v oblasti snímané EIT byla měřena vzdálenost mezi pátým mezižebřím a horní hranou sternu (D_5) a vzdálenost bránice od horní hrany sternu (D_d). Oblast podílející se na tvorbě EIT snímku hrudníku je výrobcem EIT systému PulmoVista 500 udávána v rozsahu +/-10 cm od roviny elektrodového pásu, jak je znázorněno výše na obr. 3.4. Přítomnost bránice byla považována za prokázanou, pokud platilo $|D_d - D_5| < 10$ cm. Vzdálenosti využívané pro tento výpočet jsou zobrazeny na obr. 5.



Obr. 5. Znázornění výpočtu pro stanovení přítomnosti bránice v rovině snímané elektrodoým pásem z měření ultrazvukem. Upraveno dle [32].

5.2 Výsledky

V tabulce 3 jsou zaneseny počty pozitivních detekcí bránice na úrovni 5. mezižebří a v polovině sternu pro spontánně dýchající pacienty, v celkové anestezii se svalovou relaxací při umělé plicní ventilaci (UPV) a v celkové anestezii se svalovou relaxací při umělé plicní ventilaci během kapnoperitonea pro celou měřenou skupinu a jednotlivé pozice. Míra detekce bránice vzrostla o 10 % při kapnoperitoneu v úrovni 5. mezižebří, z 55 % u pacientů s UPV na 65 % u pacientů s UPV a kapnoperitoneem. 10% nárůst počtu detekcí bránice (0 % UPV, 10 % UPV a kapnoperitoneum) byl také zjištěn pro pozici v polovině sternu.

Přítomnost bránice v oblasti monitorované EIT (± 10 cm od roviny elektrodoého pásu) pro spontánně dýchající pacienty, pro pacienty v celkové anestezii se svalovou relaxací (UPV) a pro pacienty v celkové anestezii se svalovou relaxací při umělé plicní ventilaci a v celkové anestezii se svalovou relaxací při umělé plicní ventilaci během kapnoperitonea (UPV + Kapno) je shrnuta v tabulce 4. Je zřejmé, že ve všech případech kromě jednoho během kapnoperitonea (100 %, 100 % a 95 %) byla bránice v oblasti standardně monitorované EIT detekována. Průměrná vzdálenost bránice a 5. mezižebří vzrostla z -0,1 cm u spontánně dýchajících pacientů na -1,7 cm u pacientů na UPV s kapnoperitoneem. Největší vzdálenost (-2,7 cm) byla naměřena při pozici Trendelenburg s kapnoperitoneem. V několika případech byla bránice posunuta kraniálním směrem za hranice možností detekce ultrazvukem; v těchto případech byla místo bránice detekována jaterní tkáň, která je uložena kaudálně pod bránicí.

Tabulka 3: Pozitivní detekce bránice v úrovni 5. mezižebří a poloviny sternu pro spontánně dýchající pacienty (Spontánní), pro pacienty v celkové anestezii se svalovou relaxací (UPV) a pro pacienty v celkové anestezii se svalovou relaxací při umělé plicní ventilaci a v celkové anestezii se svalovou relaxací při umělé plicní ventilaci během kapnoperitonea (UPV + Kapno). Pacienti jsou také rozděleni podle polohy, ve které zákrok probíhal (Kapno, Trendelenburg a Kapno, reverzní Trendelenburg).

	Spontánní	UPV	UPV + Kapno	Kapno, Trendelenburg	Kapno, reverzní Trendelenburg
Počet pacientů	20	20	20	11	9
5. mezižebří					
Počet detekcí	12	11	13	8	5
Míra detekcí (%)	60,0	55,0	65,0	72,7	55,5
Polovina sternu					
Počet detekcí	0	0	2	2	0
Míra detekcí (%)	0	0	10,0	18,2	0

Tabulka 4: Přítomnost bránice v oblasti monitorované EIT (± 10 cm od roviny elektrodového pásu) pro spontánně dýchající pacienty (Spontánní), pro pacienty v celkové anestezii se svalovou relaxací (UPV) a pro pacienty v celkové anestezii se svalovou relaxací při umělé plicní ventilaci a v celkové anestezii se svalovou relaxací při umělé plicní ventilaci během kapnoperitonea (UPV + Kapno). Pacienti jsou také rozděleni podle polohy, ve které zákrok probíhal (Kapno, Trendelenburg a Kapno, reverzní Trendelenburg).

	Spontánní	UPV	UPV + Kapno	Kapno, Trendelenburg	Kapno, reverzní Trendelenburg
Počet pacientů	20	20	20	11	9
Počet detekcí	20	20	19	10	9
Míra detekcí (%)	100,0	100,0	95,0	91,0	100,0
Průměrná vzdálenost mezi bránicí a 5. mezižebřím (cm)	- 0,1	0,3	- 1,6	- 2,7	- 0,1

5.3 Diskuse

Hlavním výsledkem této studie je zjištění, že bránice je téměř vždy přítomná v oblasti, která se podílí na tvorbě EIT snímku. Pro spontánně dýchající pacienty byla bránice detekována ve 100 % případů, pro pacienty v celkové anestezii se svalovou relaxací také ve 100 % případů a pro pacienty v celkové anestezii se svalovou relaxací při umělé plicní ventilaci a v celkové anestezii se svalovou relaxací při umělé plicní ventilaci během kapnoperitonea v 95 % případů. Dalším důležitým zjištěním bylo kraniální posunutí bránice během kapnoperitonea. V několika případech (10 %) byla bránice detekována dokonce na úrovni poloviny sternu. Z výsledků je také evidentní, že bránice je posunuta kraniálním směrem zejména u pacientů s UPV při kapnoperitoneu (jak naznačuje záporná vzdálenost v tabulce 3), zatímco u pacientů pouze s UPV se bránice posouvá kaudálně (naznačeno kladnou vzdáleností v tabulce 3), což je v souladu s našimi předpoklady vycházejícími ze základních znalostí anatomie a fyziologie a poměrů při umělé plicní ventilaci.

Tato studie má několik limitací. Každý pacient je anatomicky odlišný, tudíž rovina 5. mezižebří nemusí přesně korespondovat s totožnou úrovní plic u každého pacienta. Měření ultrazvukem se může obecně zdát jako nedostatečně přesné, avšak pro naše účely byla přesnost měření pomocí ultrazvuku považována za dostatečnou. Případné nepřesnosti mohly vzniknout v měřených hodnotách vzdálenosti mezi horní hranou sternu a 5. mezižebřím a vzdálenosti mezi horní hranou sternu a bránicí, což by však nemělo mít zásadnější vliv na hodnocení. Zároveň je poměrně obtížné udržet přesnou pozici a úhel ultrazvukové sondy na těle pacienta pokrytém chirurgickými rouškami. Z tohoto důvodu není možné považovat zjištěnou pozici bránice za zcela přesnou, avšak s ohledem na rozlišení EIT považujeme potenciální vzniklé odchylky za akceptovatelné. Bránici nebylo vždy možné pomocí ultrazvuku detekovat; proto byla detekce jater rovněž považována za pozitivní nález prokazující kraniální posun bránice.

Pokud bude postupováno podle standardní metodiky pro monitoraci plic pomocí EIT, předpokládáme, že kapnoperitoneum bude mít na záznam EIT zásadní vliv. Rozložení orgánů v dutině břišní a hrudní výrazně ovlivňuje výsledný záznam EIT. Není tedy zřejmé, jakým způsobem bude záznam EIT ovlivněn, pokud se v peritoneu objeví vyšší tlak CO₂. Přestože bylo prokázáno, že je bránice přítomná v oblasti monitorované EIT i za zcela běžných podmínek při umělé plicní ventilaci bez kapnoperitonea, a dokonce i při spontánní ventilaci, v případě přítomnosti kapnoperitonea by mohlo docházet k výraznějšímu vlivu na EIT záznam, jelikož se impedance dutiny břišní zásadně mění v důsledku přítomnosti insuflovaného plynu. Je tak třeba provést další studii, která se bude zabývat vlivem kapnoperitonea na záznam EIT.

Je také zřejmé, že pro monitoraci EIT během kapnoperitonea nemusí být vhodné umístit elektrodový pás do standardní, výrobcem doporučené úrovně. Na základě našich výsledků lze předpokládat, že v této oblasti nebude záznam EIT k vyhodnocování distribuce ventilace vhodný. Je tak žádoucí, aby navazující studie analyzovala záznam EIT i pro případ kraniálnějšího umístění elektrodového pásu.

5.4 Závěr dílčí studie

Tato studie prokazuje, že během laparoskopické operace při přítomnosti kapnoperitonea dochází ke kraniálnímu posuvu bránice. Bránice nebo jaterní tkáň byla při kapnoperitoneu přítomna na úrovni 5. mezižebří v 65 % případů. V 95 % případů byla přítomnost bránice nebo jaterní tkáň potvrzena v oblasti, která se podílí na tvorbě snímku EIT při monitoraci plic systémem PulmoVista 500. Hlavním zjištěním této studie je, že, vezmeme-li v úvahu kraniální posun bránice způsobený zvýšeným intraabdominálním tlakem, impedanční změny dutiny břišní a princip EIT, domníváme se, že bude mít kapnoperitoneum na EIT hrudníku zásadní vliv. Při kapnoperitoneu tak nelze považovat doporučení výrobce o umístění elektrodového pásu za akceptovatelné.

6 Monitorace plic při kapnoperitoneu ve dvou rovinách

V další prospektivní intervenční studii se zabýváme monitorací plic při laparoskopických operacích s kapnoperitoneem systémem EIT PulmoVista 500 (Dräger Medical, Německo). Na základě předchozích výsledků, které potvrzují přítomnost bránice v oblasti podílející se na tvorbě EIT snímku, je zřejmé, že by mohla monitorace distribuce ventilace při kapnoperitoneu při umístění elektrodového pásu ve výrobcem doporučené rovině 4.–6. mezižebří (o této rovině hovoříme též jako o standardní nebo konvenční) narážet na mnoho problémů a být jimi i zcela znemožněna. Cílem této studie je zjistit, zda EIT záznam pořízený během laparoskopických operací s kapnoperitoneem standardně umístěným pásem poskytuje dostatečné informace o ventilaci pacienta, či zda nebude vhodnější pro tuto aplikaci využít elektrodový pás umístěný kraniálně.

6.1 Metody

Celkem 18 pacientů (12 žen, 6 mužů) včetně dvou pacientů z pilotních měření se po předchozím podpisu informovaného souhlasu zúčastnilo studie. Všichni pacienti měli indikovanou laparoskopickou operaci dutiny břišní, byli v supinační poloze s případným polohováním dle typu výkonu. Charakteristika pacientů je shrnuta v tabulce 5. Celkem 10 pacientů podstoupilo cholecystektomii (odstranění žlučníku), pět pacientek gynekologické zákroky a tři pacienti hernioplastiku (operaci kýly). Z důvodu zlepšení přehlednosti operačního pole jsou při gynekologických výkonech a operacích kýly pacienti polohováni do mírného náklonu s hlavou pod úroveň pánve, tj. do tzv. Trendelenburgovy pozice. Během cholecystektomie je naopak pacient polohován do mírného náklonu s hlavou nad úroveň pánve, tj. do reverzní Trendelenburgovy pozice. Vylučovací kritéria pro nezahrnutí či vyřazení pacienta ze studie byla prokázaná přítomnost plicního onemocnění a standardní kritéria uváděná výrobcem EIT, jako např. extrémní obezita s BMI > 50 kg/m², poranění v oblasti hrudníku nebo přítomnost aktivního implantátu.

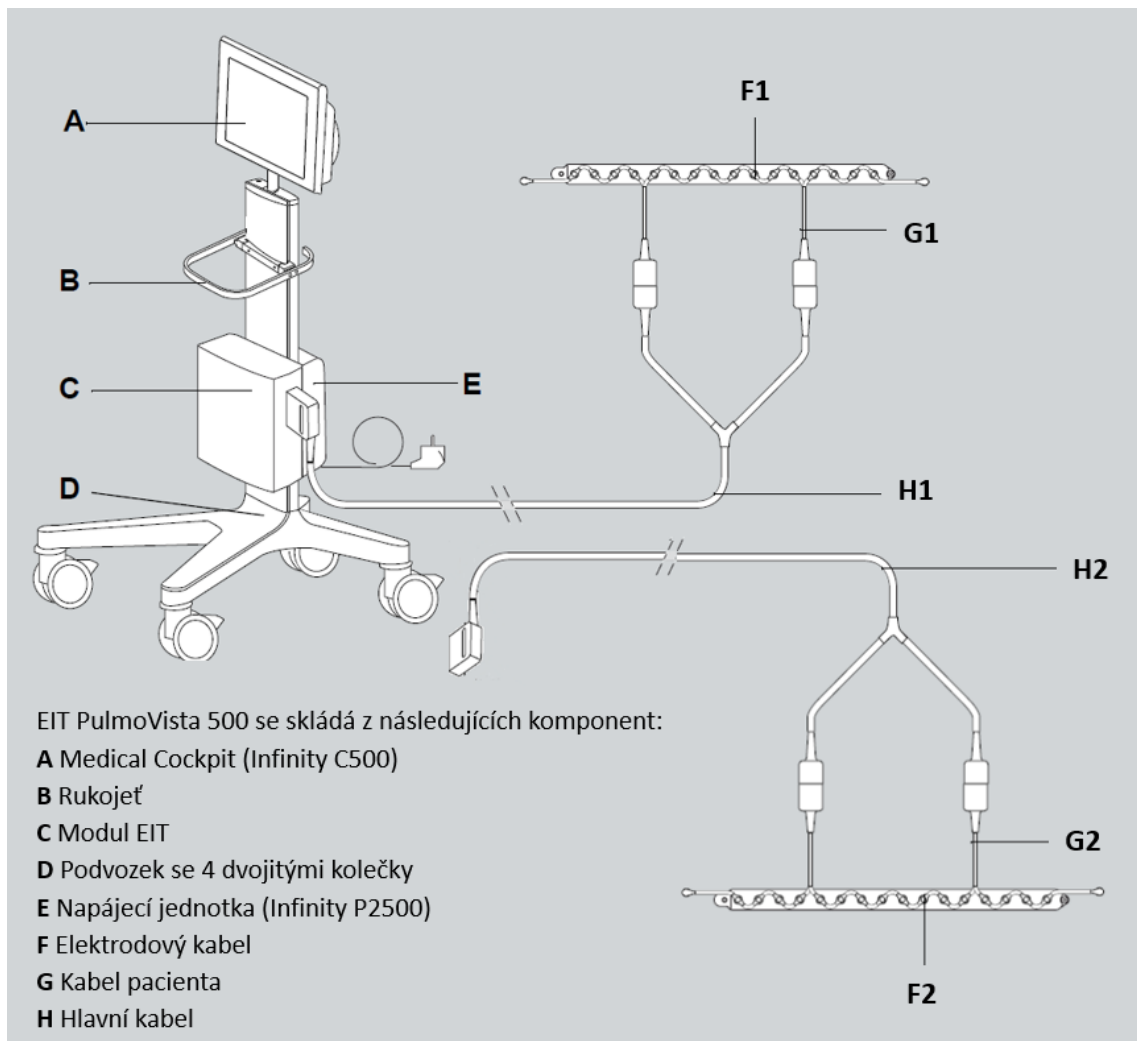
Tabulka 5: Základní charakteristika měřených pacientů.

Parametr	Hodnota
Počet pacientů (muži/ženy)	18 (6/12)
Věk (roky)	48 ± 15
Váha (kg)	80 ± 15
Výška (cm)	172 ± 8
BMI (kg/m ²)	27 ± 5
Dechový objem při VCV (mL)	507 ± 84

Pozn.: Hodnoty jsou vyjádřeny jako průměr ± směrodatná odchylka.

Celková anestezie byla vedena jako doplňovaná. Indukce byla provedena propofolem, vedení inhalačním anestetikem/analgetikem sevofluranem a isofluranem, analgezie byla zajištěna bolusovým podáním sufentanilu. Během výkonu byla zajištěna svalová relaxace nedepolarizujícími myorelaxancii (rocuronium nebo cisatracurium). Dýchací cesty byly zajištěny orotracheální intubací, umělá plicní ventilace byla prováděna v režimu VCV s dechovým objemem 6–8 mL/kg, PEEP 5–8 cmH₂O dle vývoje SpO₂ a posouzení anesteziologa. Dechová frekvence byla řízena dle kapnografie (etCO₂ ve fyziologické normě 35–45 mmHg), FiO₂ byla 50 %. Pro uvedení do celkové anestezie byl použit anesteziologický přístroj Primus (Dräger Medical, Německo). Po ustálení ventilace pacienta byl přepojen na ventilátor Engström Carestation (Datex-Ohmeda, GE Healthcare, Finsko), který umožňuje měření funkční reziduální kapacity. K udržování kapnoperitonea byly používány insuflátory Olympus UHI-3 a UHI-4 (Olympus Surgical Technologies, Německo). Průměrný intraabdominální tlak při kapnoperitoneu je standardně 12–15 mmHg a byl upravován chirurgem dle jeho potřeb.

K měření byl použit systém EIT Pulmovista 500 (Dräger Medical, Německo) a plicní ventilátor Engström Carestation (Datex-Ohmeda, GE Healthcare, Finsko). Kromě standardně umístěného elektrodového pásu v úrovni 4.–6. mezižebřího prostoru medioklavikulární linie byl na pacienty umístěn ještě druhý pás stejné velikosti, a to do úrovně podpaží, tak aby byl v co nejvíce možné kraniální poloze a zabíral tak oblast, kam je plicní tkáň s bránicí posunuta jako důsledek tlaku kapnoperitonea. Pro oba pásy byly vhodně umístěny referenční jednorázové argentchloridové elektrody do oblasti břicha a pod klíční kost. Zároveň byla pozice obou pásů i referenčních elektrod zkontrolována s chirurgy, aby nezasahovala do operačního pole či jinak neovlivňovala operační výkon a neomezovala práci lékařského personálu. Elektrodový pás ve standardní rovině jsme umísťovali na pacienta s cílem polohy v 5. mezižebří, proto dále často hovoříme o této rovině jako o rovině 5. mezižebří, nikoliv 4.–6. mezižebří, což je rozmezí, které výrobce označuje za vhodné. Nicméně, při umístění do úrovně 6. mezižebří výrobce upozorňuje na možné vlivy bránice na záznam EIT. Po správném umístění obou pásů byla postupně zkontrolována kvalita signálu, případně zajištěn optimální kontakt elektrod s pokožkou pacienta pomocí elektrodového gelu. Vzájemné elektromagnetické rušení neumožňuje simultánní pořizování záznamu elektrodovými pásy z obou tomografických rovin, bylo proto potřeba mezi jednotlivými pásy přepínat pomocí přepojování hlavního kabelu a pořizovat EIT záznam každým pásem zvlášť. Nejprve byly jedním pásem zaznamenány cca 2 minuty spontánní ventilace, poté bylo nahrávání záznamu pozastaveno a EIT bylo přepojeno ke kabelu s druhým elektrodovým pásem. Elektrodový pás zůstal zapojen a byl zaznamenán úvod do anestezie a začátek umělé plicní ventilace (UPV) a po dalších cca 2 minutách záznamu ustálené objemově řízené plicní ventilace došlo opět k pozastavení záznamu a přepojení kabelu s pásem, aby byl získán záznam UPV rovněž pro druhou tomografickou rovinu. Obdobně byly pořizovány záznamy EIT při insuflaci kapnoperitonea a během kapnoperitonea, příp. i během polohování pacienta vždy tak, aby byly všechny nastalé situace postupně zaznamenány oběma pásy, tj. v obou určených tomografických rovinách. Na obrázku 6.1 níže je zobrazen EIT systém PulmoVista 500 (Dräger Medical, Německo) včetně příslušenství, které bylo pro naši studii použito ve dvou setech. Aby byly pořizovány postupně záznamy z obou tomografických rovin, byl přepínán hlavní kabel na obrázku označen jako H1 a H2.



Obr. 6.1. Jednotlivé komponenty, ze kterých se skládá EIT systém PulmoVista 500 (Dräger Medical, Německo). Pro naše účely byly použity dva sady obsahující elektrodotový pás (F1 a F2), kabel pacienta (G1 a G2) a hlavní kabel (H1 a H2), který byl přepojován dle potřeby přepínání mezi jednotlivými rovinami. Upraveno autorem dle [23].

Po desuflaci kapnoperitonea a ukončení chirurgického výkonu byl proveden tzv. recruitment neboli PEEP manévr, kdy byla navýšena hodnota end-expiračního tlaku (PEEP) z 5 cmH₂O na 10 cmH₂O a následně opět snížena na 5 cmH₂O. Během zvýšené hodnoty PEEP došlo opět k přepojení patientských kabelů s elektrodotovými pásy. Po ukončení PEEP manévru bylo zaznamenáno vyvedení pacienta z anestezie a začátek spontánní ventilace. Pořadí elektrodotových pásů při měření, resp. určení, zda bude první záznam EIT z kraniálního nebo standardně umístěného pásu, bylo určeno náhodně pro každého pacienta.

6.2 Měření FRC

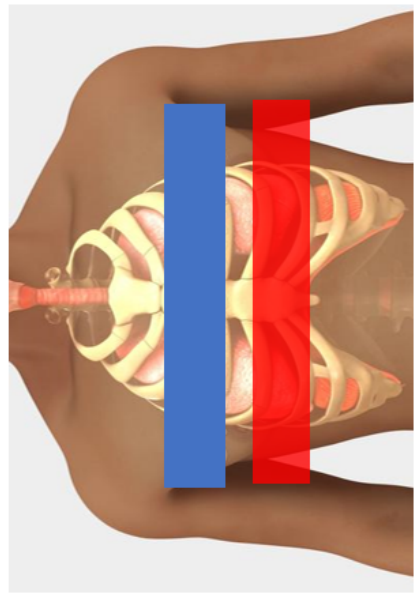
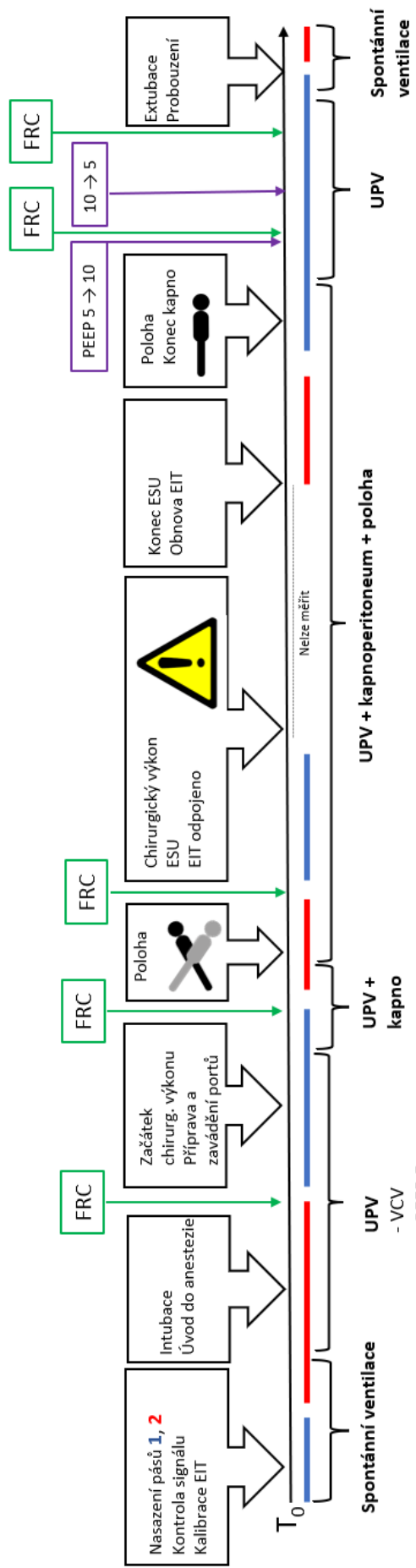
Funkční reziduální kapacita (FRC) plic je objem vzduchu, který zůstává v plicích po ukončeném klidovém výdechu. Je to součet expiračního rezervního objemu a reziduálního objemu plic. Normální hodnota pro dospělé osobu je poměrně individuální, standardně se pohybuje v rozmezí 2–4 L. Tento objem vzduchu je v plicích přítomný díky rovnováze vnitřních sil, tj. elasticity plic, dýchacího svalstva a povrchového napětí alveolů, a vnějších sil,

tj. rigiditou hrudní stěny. FRC zajišťuje dostatečnou výměnu plynů a oxygenaci organismu během výdechu nebo při krátkodobém apnoe (zástavě dýchání). Hodnoty FRC narůstají s věkem vlivem postupného snižování elasticity plic. Nižší hodnoty FRC mají ženy a obézní jedinci. Ke snížení hodnot FRC dochází také při snížené poddajnosti plic, v poloze na zádech. Vlivem celkové anestezie a hluboké analgosedace dochází ke snížení FRC až o 20 % [33]. K této redukci dochází zřejmě vlivem poklesu svalového tonu a pasivní rolí inspiračních svalů, kraniálního posunu bránice a nárůstu nitrohruďního objemu krve. Aby bylo toto snížení hodnot FRC během anestezie alespoň částečně kompenzováno, dochází k zařazení pozitivního přetlaku na konci výdechu (PEEP). Některé patologické stavy, jako např. ARDS nebo pulmonální edém, mají také za následek snížení hodnoty FRC. [34] [35]

U spontánně ventilujících pacientů lze měřit FRC pomocí spirometrie s dilucí inertních plynů (nejčastěji helium) a celotělové pletysmografie. Za přítomnosti pozitivního end-expiračního tlaku PEEP, tj. během umělé plicní ventilace, lze stanovit hodnotu FRC pomocí CT nebo metodou vymývání dusíku z plic při krokové změně frakce kyslíku ve vdechovaném plynu (FiO_2), tzv. wash-in/wash-out metodou. Tuto metodu provádí pomocí modulu pro analýzu ventilačních plynů např. plicní ventilátor Engström Carestation (Datex-Ohmeda, GE Healthcare, Finsko). Přístroj nejprve zaznamená hodnotu koncentrace dusíku a poté dojde ke skokovému nárůstu koncentrace kyslíku. Zhruba po 20 dechových cyklech se zobrazí první naměřená hodnota inspirační FRC (FRC_{insp}). Koncentrace kyslíku v inspirovaném plynu se vrátí na původní hodnotu a je zaznamenána koncentrace dusíku. Po dalších 20 deších je známá druhá hodnota, tzv. expirační FRC (FRC_{exp}). Pokud se tyto naměřené hodnoty neliší o více než 10 %, je jako výsledná hodnota FRC uveden jejich aritmetický průměr. Pokud nejsou podmínky pro měření, jako např. stálé ventilační parametry a dechový vzor po dobu alespoň 20 dechů, dodrženy, přístroj měření nedokončí. [36] [37]

Během našeho experimentu byla opakovaně měřena také hodnota FRC, která sloužila jako možná referenční hodnota při vyhodnocování a analýze dat z EIT. FRC byla měřena během UPV před zahájením operačního výkonu, během výkonu při UPV a ustáleném kapnoperitoneu, po desuflaci kapnoperitonea a následně při zvýšené hodnotě PEEP. FRC byla měřena také po skončení recruitment manévru při snížené hodnotě PEEP. Podmínkou validních měření FRC je konstantní úroveň sedace a relaxace; při nestálých podmínkách naměřené hodnoty FRC velmi kolísají, jak dokazuje studie [38]. Zvýšení hodnoty PEEP navíc pacienty při mělké sedaci dráždí a vede k interferenci s UPV. Po skončení PEEP manévru docházelo k postupnému vyvádění pacienta z anestezie a uskutečněná měření FRC tak nelze validně vyhodnotit. U několika pacientů dokonce došlo k probuzení z anestezie před dokončením měření FRC. K validnímu měření FRC po skončení recruitment manévru by musel být výrazně prodloužen čas pacienta v anestezii, což nebylo z etických důvodů možné.

Podrobné schéma experimentu včetně přepojování elektrodových pásů, PEEP manévru a měření hodnot FRC je znázorněno na obr. 6.3.

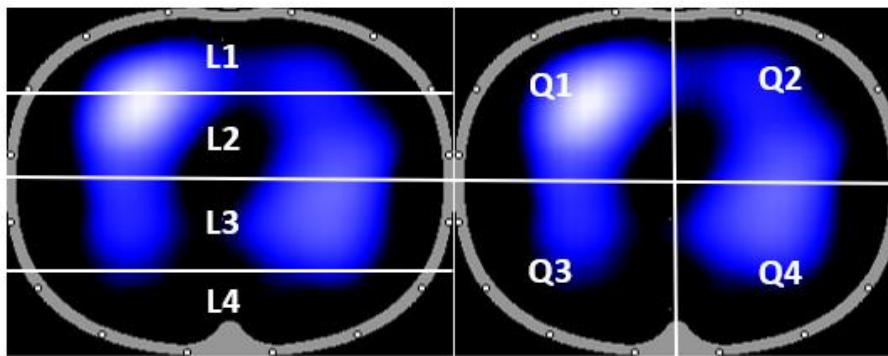


Spuštěný EIT záznam z pásu v poloze:
 — kraniální (blue line)
 — konvenční (red line)

Obr. 6.3. Schéma měření experimentu s dvěma elektrodovými pásy a jednou EIT.

6.3 Zpracování dat, statistika

Základní analýza dat byla provedena off-line pomocí softwarů Dräger EIT Data Analysis Tool 6.1 (Dräger Medical, Německo), MATLAB R2022a (MathWorks, Inc., USA) a Microsoft Excel 365 (Microsoft, USA). Pro každého pacienta byl nejprve zobrazen průběh relativní impedance pro celý experiment pro obě tomografické roviny. Pro každého pacienta byly hodnoceny velikosti dechových exkurzí (tidal variation, TV), jejich změny při kapnoperitoneu, distribuce ventilace v jednotlivých oblastech zájmu ROI vrstvách a kvadrantech, byla provedena frekvenční analýza záznamů umělé plicní ventilace a kapnoperitonea pomocí rychlé Fourierovy transformace (FFT). Byla analyzována distribuce ventilace v plicích pro jednotlivé oblasti zájmu, tzv. ROI. Byly zvoleny ROI vrstvy a kvadranty (anglicky *layers* a *quadrants*, dále označováno jako L a Q), které jsou v Dräger EIT Analysis Tool v základním nastavení a standardně se pro analýzu distribuce ventilace v plicích pomocí EIT používají. Příklad těchto ROI je na obrázku 6.4.



Obr. 6.4. Standardní rozdělení EIT snímku hrudníku na oblasti zájmu (ROI) vrstvy (vlevo) a kvadranty (vpravo). Vlastní zpracování.

Rovněž byla provedena analýza záznamů EIT při nastavení různých referenčních tzv. baseline snímků. Baseline snímek představuje nejmenší hodnotu relativní globální impedance v daném záznamu a definuje výchozí úroveň pro zobrazení dat. Pokud nejsou data filtrována, globální impedance baseline snímku odpovídá nule. Zároveň lze baseline snímek zvolit z jiného datového EIT souboru, je tedy možné pracovat s jednou referenční úrovní pro řadu EIT záznamů. V tomto případě však musí být zajištěny neměnné podmínky zisku dat, tj. stálá poloha pacienta, elektrod apod.

Záznamy byly analyzovány bez filtrace i s filtrace filtrem typu dolní propust s mezní frekvencí 40 min^{-1} , aby mohl být vyhodnocen vliv srdeční aktivity na dechový signál v obou tomografických rovinách. Dále byl stanoven TV/VT index, což je poměr průměrné hodnoty tidal variation a dechového objemu pacienta v mL. Tento index byl vytvořen s cílem umožnit porovnávání hodnot z obou monitorovaných tomografických rovin, které nemohou být pouze na základě hodnot relativní impedance v poměrových jednotkách AU relevantně srovnávány. Srovnání indexů pro obě roviny tak umožní hodnocení posunu ventilace v důsledku kapnoperitonea v kaudálním či kraniálním směru.

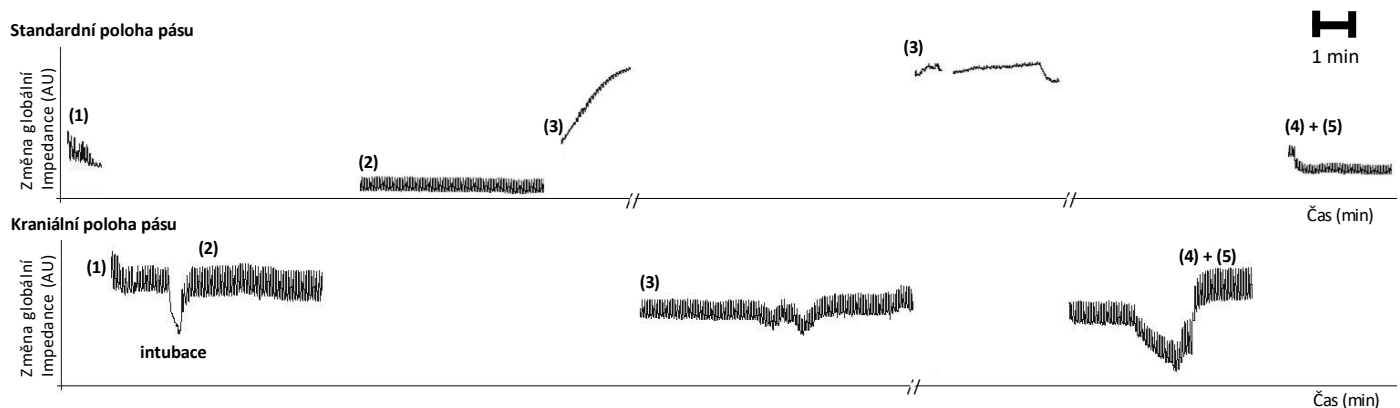
Byl analyzován průběh impedance jednotlivých pixelů a detekován fenomén tzv. out-of-phase pixelů [39], kdy dochází k převrácení fáze průběhu impedance u několika pixelů při insuflaci kapnoperitonea oproti průběhu impedance při umělé plicní ventilaci.

V závěru výsledků je vyhodnocena také funkční reziduální kapacita (FRC) a srovnání změny FRC při umělé plicní ventilaci, kapnoperitoneu a při zvýšené hodnotě PEEP.

Výsledky byly hodnoceny pomocí parametrického párového Studentova t-testu, normalita dat byla ověřena použitím Shapirova-Wilksova testu. Hladiny statistické významnosti byly stanoveny následovně: $\alpha_1 = 0,05$, $\alpha_2 = 0,01$ a $\alpha_3 = 0,001$. Statisticky signifikantní rozdíl v datech $p < 0,05$ je ve výsledcích značen symbolem jedné hvězdičky (*), statisticky signifikantní rozdíl v datech $p < 0,01$ je ve výsledcích značen symbolem dvou hvězdiček (**) a statisticky signifikantní rozdíl $p < 0,001$ je ve výsledcích značen symbolem tří hvězdiček (***)).

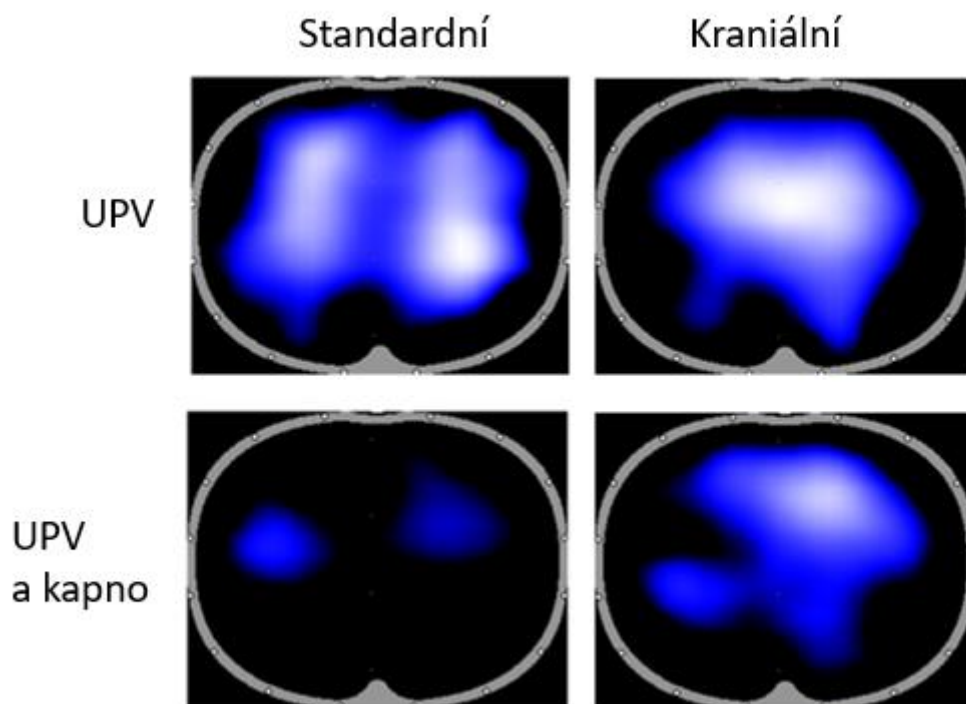
6.4 Výsledky

Na obrázku. 6.5 je uveden příklad průběhu relativní impedance po celé trvání experimentu s označením záznamů pořízených postupně v obou tomografických rovinách při spontánní ventilaci, umělé plicní ventilaci (UPV), při zahájení (insuflaci) a během kapnoperitonea a při UPV a PEEP manévru po ukončení kapnoperitonea (desuflaci). Baseline snímek byl zvolen automaticky v místě s nejnižší impedancí, tj. během intubace a byl použit pro vykreslení průběhu impedance všech pořízených záznamů v tomto obrázku.



Obr. 6.5. Příklad průběhu záznamu EIT pro celý experiment pro jednoho z pacientů. Na obrázku nahoře je záznam ze standardní polohy elektrodového pásu, níže z kraniální polohy elektrodového pásu. Jednotlivé fáze měření jsou označeny následovně: (1) spontánní ventilace, (2) UPV před zahájením operačního výkonu, (3) UPV během insuflace a při kapnoperitoneu, (4) UPV po ukončení operačního výkonu a (5) UPV během provádění PEEP manévru tj. navýšení a následné snížení hodnoty PEEP o 5 cmH₂O. V pravém horním rohu obrázku je zobrazeno časové měřítko.

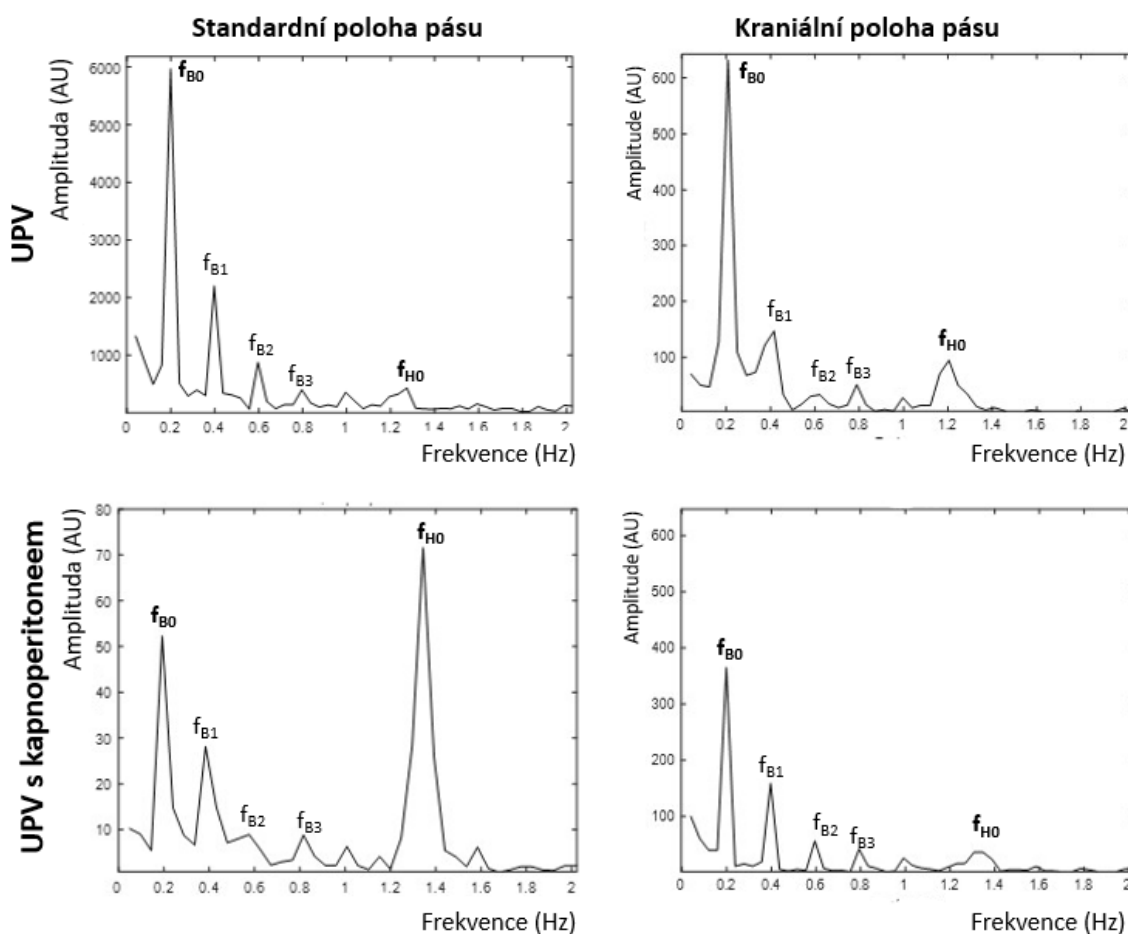
Na obrázku 6.6 jsou pro ilustraci zobrazeny snímky plic rekonstruované softwarem Dräger EIT Data Analysis Tool pro jednoho z pacientů. Snímek odpovídá okamžiku maxima v inspiriu. Pro daný snímek je použita baseline vždy z daného záznamu (tj. pro UPV je baseline zvolená ze záznamu s UPV, pro UPV s kapnoperitoneem je baseline zvolená během kapnoperitonea). Parametry ventilace pacienta nebyly během UPV a UPV s kapnoperitoneem měněny, nastavení ventilátoru bylo následující: objemově řízený ventilační režim VCV, VT = 525 mL, RR = 11/min, PEEP = 5 cmH₂O, I:E = 1,7 s a F_iO₂ = 55 %.



Obr. 6.6. Snímky z Dräger EIT Analysis Tool pro jednoho z pacientů. Zachycený okamžik odpovídá maximu v inspiriu během UPV (nahore) a UPV s kapnoperitoneem (dole) ve standardní (vlevo) i kraniální (vpravo) tomografické rovině.

6.4.1 Frekvenční analýza a změna amplitudy

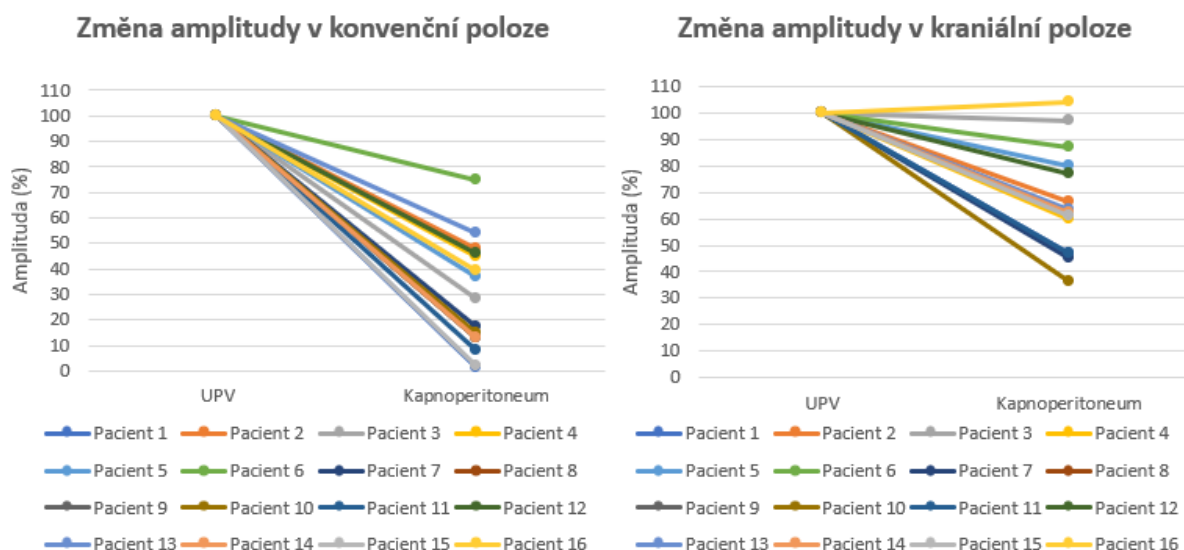
Na dalším obrázku 6.7 je zobrazen příklad změn frekvenčního spektra při UPV a UPV s kapnoperitoneem pro obě tomografické roviny. Frekvenční spektrum bylo získáno pomocí rychlé Fourierovy transformace (FFT) z 20s okna záznamu impedance. Dechová aktivita 12 dechů za minutu (RR) odpovídá frekvenci 0,2 Hz, srdeční aktivita (HR) pohybující se kolem 70–80 bpm odpovídá frekvenci 1,2–1,4 Hz. Při UPV je dominantní dechová frekvence pro obě měřené roviny. Ve standardní rovině je při kapnoperitoneu amplituda na dechové frekvenci potlačena a dominantní se stává signál o frekvenci cca 1,4 Hz, tj. frekvence shodující se se srdeční aktivitou. V kraniální rovině dochází při kapnoperitoneu rovněž ke snížení amplitudy pro dechovou frekvenci, zůstává však stále dominantní. Velké změny v hodnotách amplitudy pro standardní rovinu pásu jsou také zdůrazněny řádově rozdílným měřítkem na osách y.



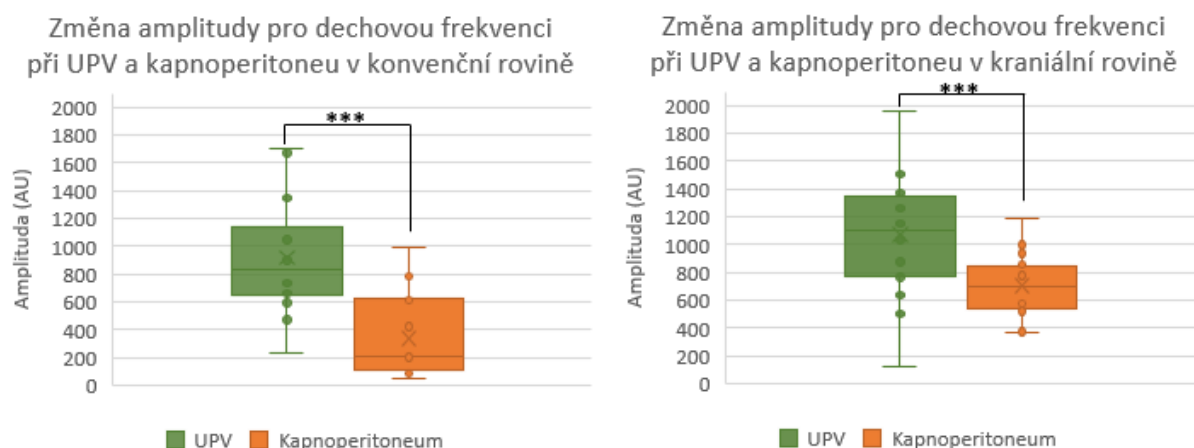
Obr. 6.7. Frekvenční spektrum záznamu EIT pro standardní rovinu (vlevo) a kraniální (vpravo) pro záznam z umělé plicní ventilace (UPV) (nahore) a během UPV s kapnoperitoneem (dole). Dechová aktivita odpovídá frekvenci 0,2 Hz a je označena jako fundamentální frekvence f_{B0} . Vyšší harmonické složky tohoto signálu jsou označeny jako f_{B1} – f_{B3} . Další detekovaná fundamentální frekvence odpovídá srdeční aktivitě o frekvenci 1,2–1,4 Hz a je označena jako f_{H0} . Pro konvenční rovinu se liší jednotky v grafech osy y, a to z důvodu řádově rozdílných hodnot amplitud.

Změna amplitudy pro dechovou frekvenci pro všechny pacienty je shrnuta na obrázku 6.8. Tyto grafy znázorňují na kolik procent se snížila (u pacienta 16 při kraniální poloze dokonce zvýšila) amplituda při UPV s kapnoperitoneem. Hodnota amplitudy při UPV představovala vždy 100 %. Obdobná data jsou analyzována i na dalším obrázku 6.9, kde jsou tzv. krabicové grafy zobrazující změnu amplitudy relativní impedance (v poměrových jednotkách AU) při UPV a UPV s kapnoperitoneem pro obě tomografické roviny. Rozdíly amplitud byly vyhodnoceny párovým t-testem a jsou pro obě monitorované roviny statisticky významné ($p < 0,001$). Pro tuto analýzu ve standardní (konvenční) rovině byly vyřazeny dvě dvojice odlehlých hodnot, tzv. outliers,

Průměrný pokles amplitudy relativní impedance při UPV s kapnoperitoneem oproti UPV bez kapnoperitonea je pro konvenční pás 71 ± 22 %, pro kraniální pás pak 33 ± 19 % (průměr \pm směrodatná odchylka).



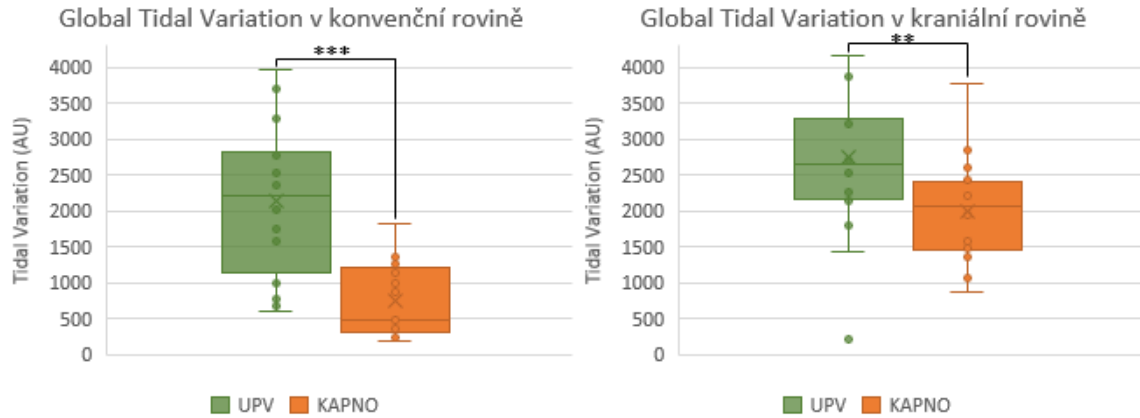
Obr. 6.8. Změna amplitudy pro dechovou frekvenci při UPV a UPV s kapnoperitoneem pro konvenční rovinu (vlevo) a kraniální rovinu (vpravo). Hodnota amplitudy při UPV představuje 100 %.



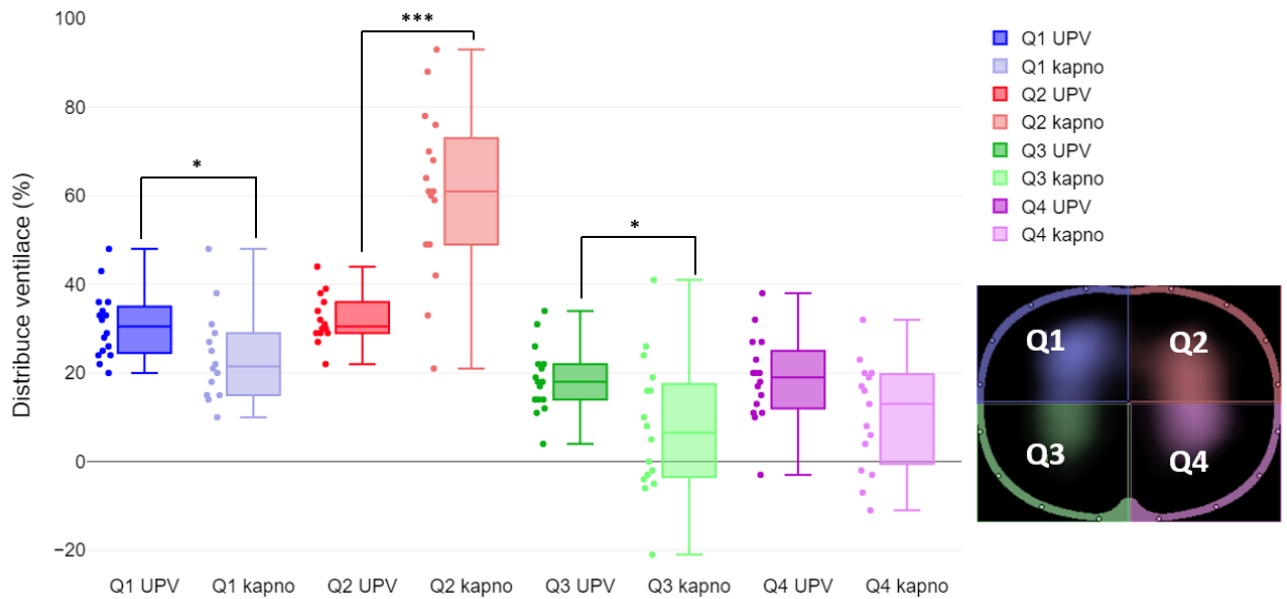
Obr. 6.9. Změna amplitudy pro dechovou frekvenci při UPV a UPV s kapnoperitoneem pro konvenční rovinu (vlevo) a kraniální rovinu (vpravo) s označením statistické významnosti *** $p < 0,001$ (párový t-test).

6.4.2 Tidal variation a analýza ROI

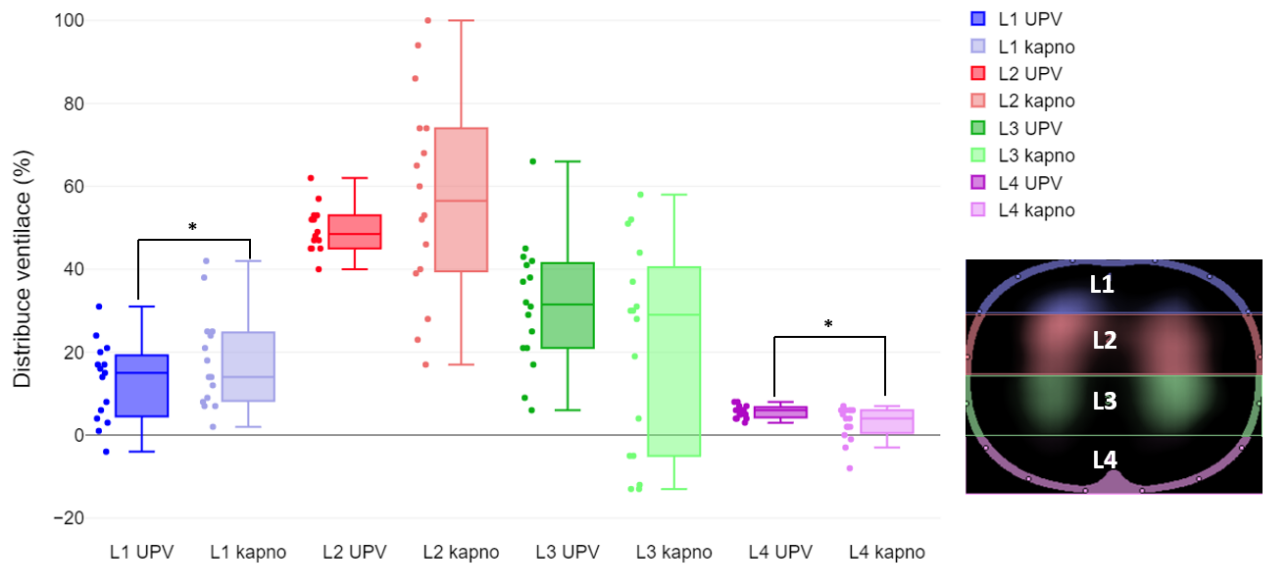
Bylo provedeno vyhodnocení parametrů globální tidal variation a lokální tidal variation, tedy změny impedance v průběhu dechového cyklu a distribuce ventilace v jednotlivých oblastech zájmu (ROI) vrstvy a kvadranty. Na obrázku 6.10 níže je zobrazený rozdíl v globální relativní impedanci, tzv. tidal variation pro konvenční i kraniální rovinu. Data byla zpracována se standardně zvolenou baseline v daném záznamu, tj. pro záznam UPV byla baseline z UPV a pro záznam s kapnoperitoneem byla zvolena z totožného záznamu s kapnoperitoneem. Na obrázcích 6.11 až 6.14 je zobrazeno srovnání distribuce ventilace pro konvenční a kraniální rovinu při UPV a kapnoperitoneu. Srovnání se záznamy s odlišně zvolenou baseline je v kapitole 6.2.5 níže. Zobrazená data jsou bez filtrace. Vliv filtrace na záznam je zobrazen v kapitole 6.2.4.



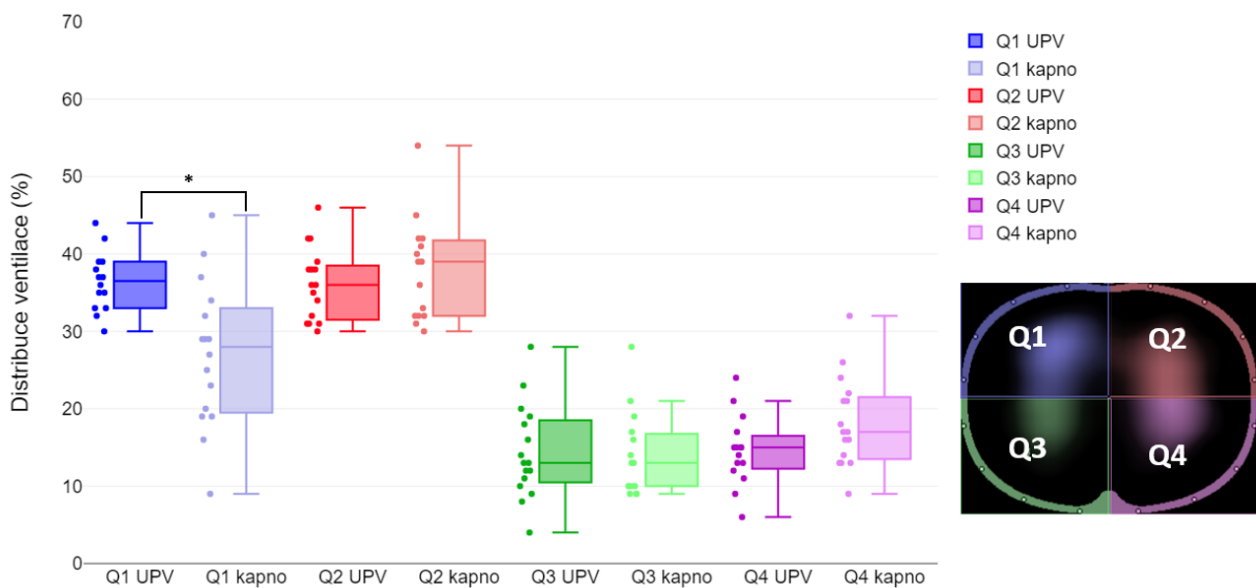
Obr. 6.10. Změna celkové relativní impedance (global tidal variation) při UPV a kapnoperitoneu pro konvenční rovinu (vlevo) a kraniální rovinu (vpravo) s označení statistické významnosti *** $p < 0,001$ a ** $p < 0,01$ (párový t-test).



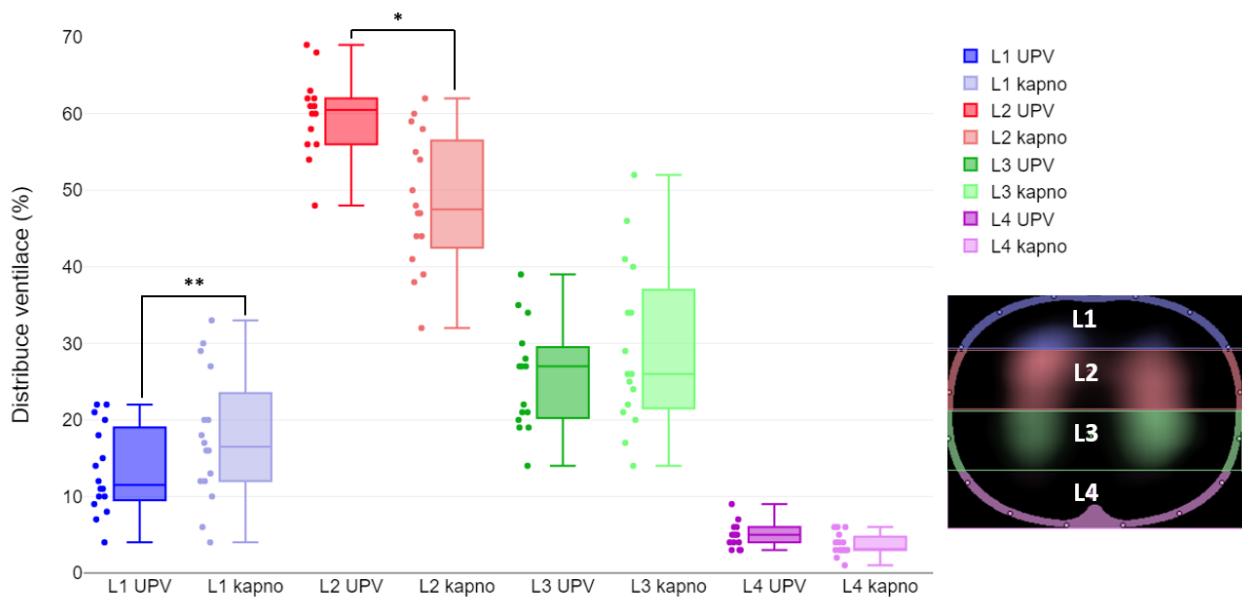
Obr. 6.11. Změna lokální relativní impedance (local tidal variation), tj. distribuce ventilace v plicích při rozdělení do ROI kvadrantů při UPV a kapnoperitoneu pro konvenční rovinu s označením statistické významnosti *** $p < 0,001$ a * $p < 0,05$ (párový t-test).



Obr. 6.12. Změna lokální relativní impedance (local tidal variation), tj. distribuce ventilace v plicích při rozdělení do ROI vrstev při UPV a kapno peritoneu pro konvenční rovinu s označením statistické významnosti * $p < 0,05$ (párový t-test).



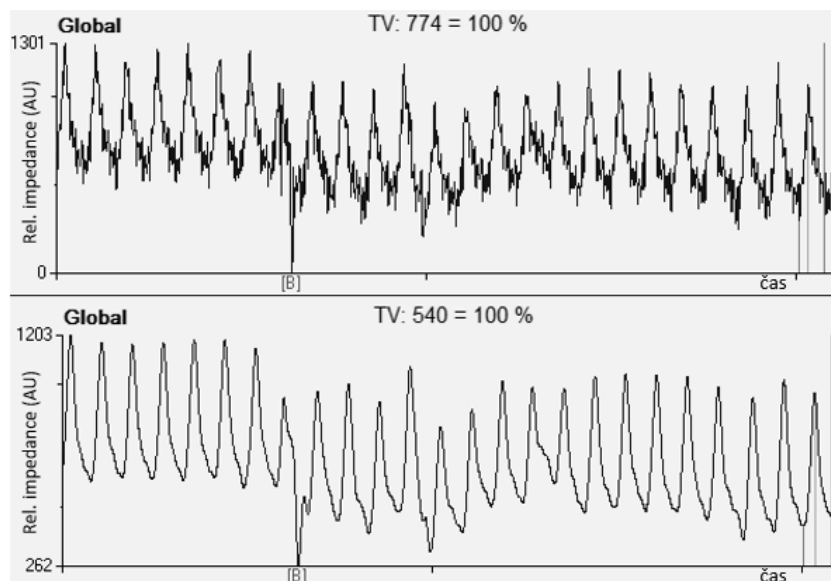
Obr. 6.13. Změna lokální relativní impedance (local tidal variation), tj. distribuce ventilace v plicích při rozdělení do ROI kvadrantů při UPV a kapno peritoneu pro kraniální rovinu s označením statistické významnosti * $p < 0,05$ (párový t-test).



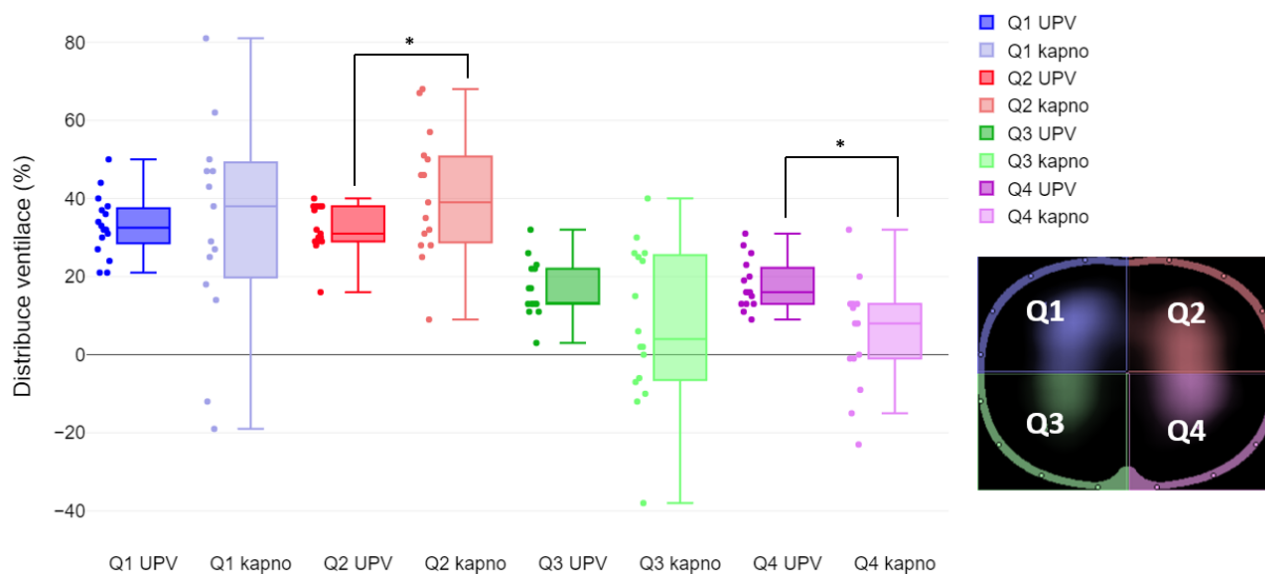
Obr. 6.14. Změna lokální relativní impedance (local tidal variation), tj. distribuce ventilace v plicích při rozdělení do ROI kvadrantů při UPV a kapnoperitoneu pro kraniální rovinu s označením statistické významnosti ** $p < 0,01$ a * $p < 0,05$ (párový t-test).

6.4.3 Vliv filtrace

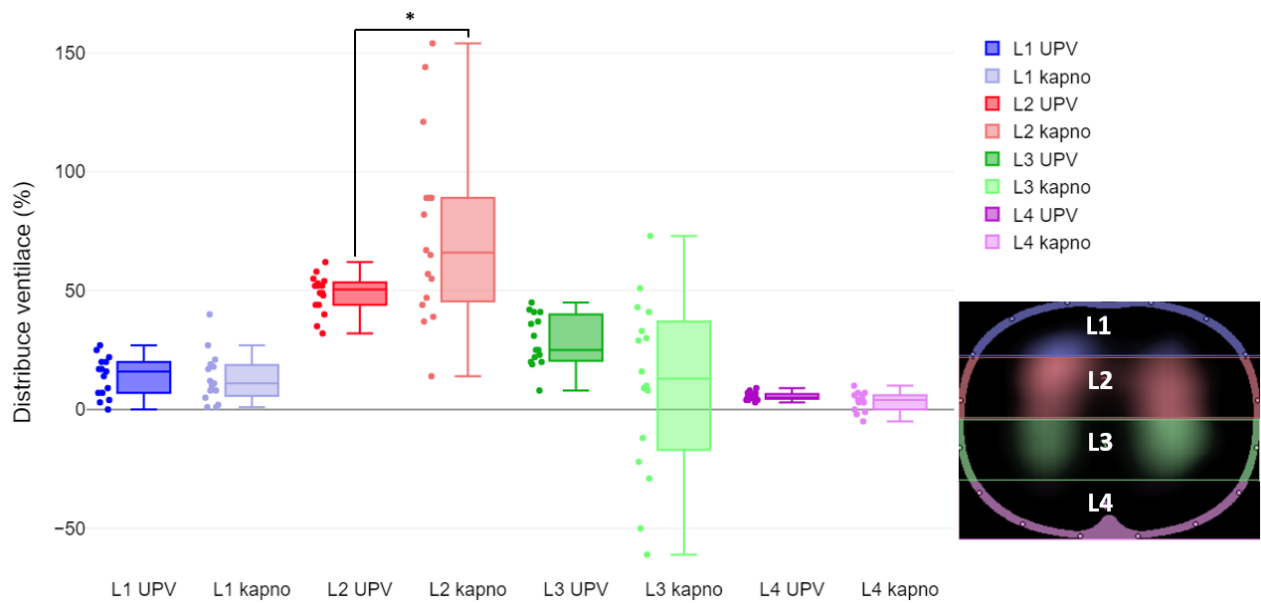
Na obrázku 6.15 je příklad konkrétního záznamu EIT pořízeného při umělé plicní ventilaci (UPV) z konvenční roviny před filtrací a po filtraci filtrem typu dolní propust s mezní frekvencí $f_0 = 40 \text{ min}^{-1}$. Záznam zobrazuje průběh globální relativní impedance v čase, tzv. global tidal variation. Na obrázcích 6.16 až 6.19 je zobrazeno srovnání distribuce ventilace pro konvenční a kraniální rovinu při UPV a kapnoperitoneu pro filtrované záznamy. Také pro tento případ byla data zpracována se standardně zvolenou baseline v daném záznamu, tj. pro záznam UPV byla baseline z UPV a pro záznam s kapnoperitoneem byla zvolena z totožného záznamu s kapnoperitoneem.



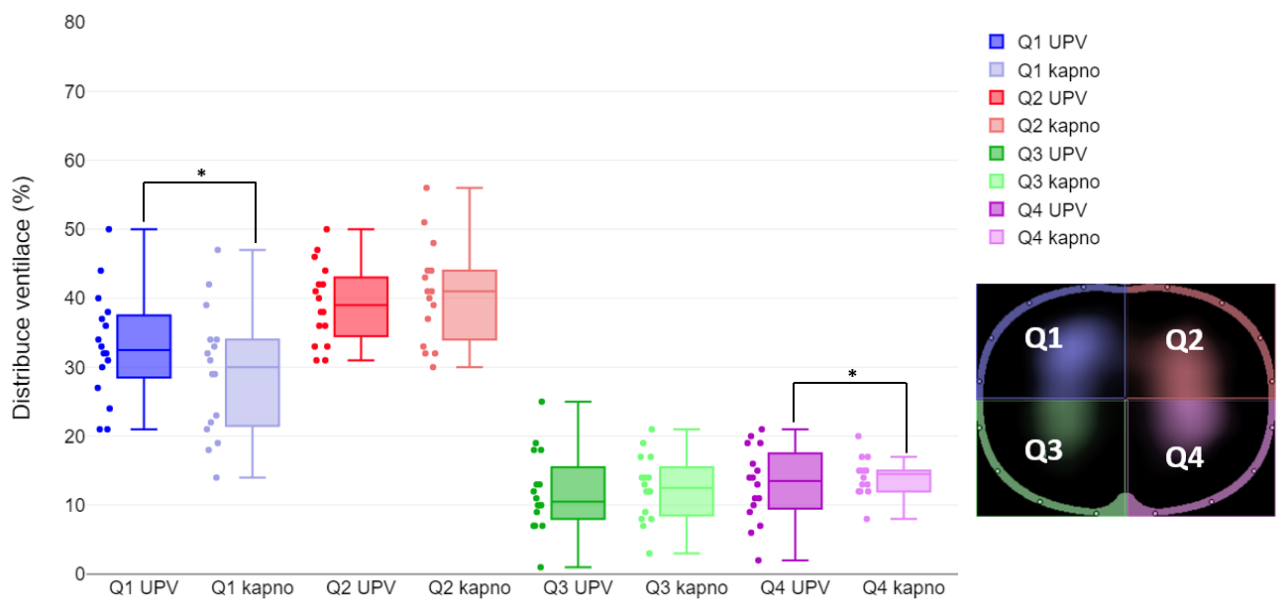
Obr. 6.15. Záznam EIT před filtrací (nahore) a po filtraci (dole) dolní propustí s mezní frekvencí $f_0 = 40 \text{ min}^{-1}$. Záznam byl pořízený při umělé plicní ventilaci pásem v konvenční rovině. Značka [B] označuje tzv. baseline snímek.



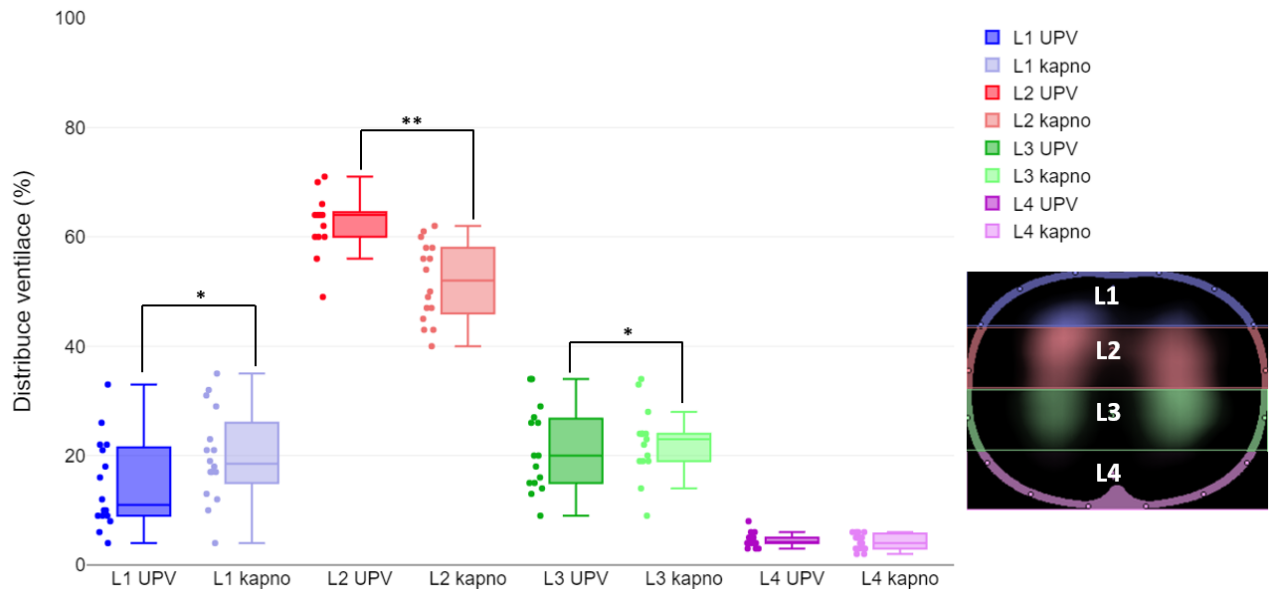
Obr. 6.16. Změna lokální relativní impedance (local tidal variation), tj. distribuce ventilace v plicích při rozdělení do ROI kvadrantů při UPV a kapnoperitoneu pro konvenční rovinu s označením statistické významnosti * $p < 0,05$ (párový t-test). Filtrované záznamy s $f_0 = 40 \text{ min}^{-1}$.



Obr. 6.17. Změna lokální relativní impedance (local tidal variation), tj. distribuce ventilace v plicích při rozdělení do ROI vrstev při UPV a kapno peritoneu pro konvenční rovinu s označením statistické významnosti * $p < 0,05$ (párový t-test). Filtrované záznamy s $f_0 = 40 \text{ min}^{-1}$.



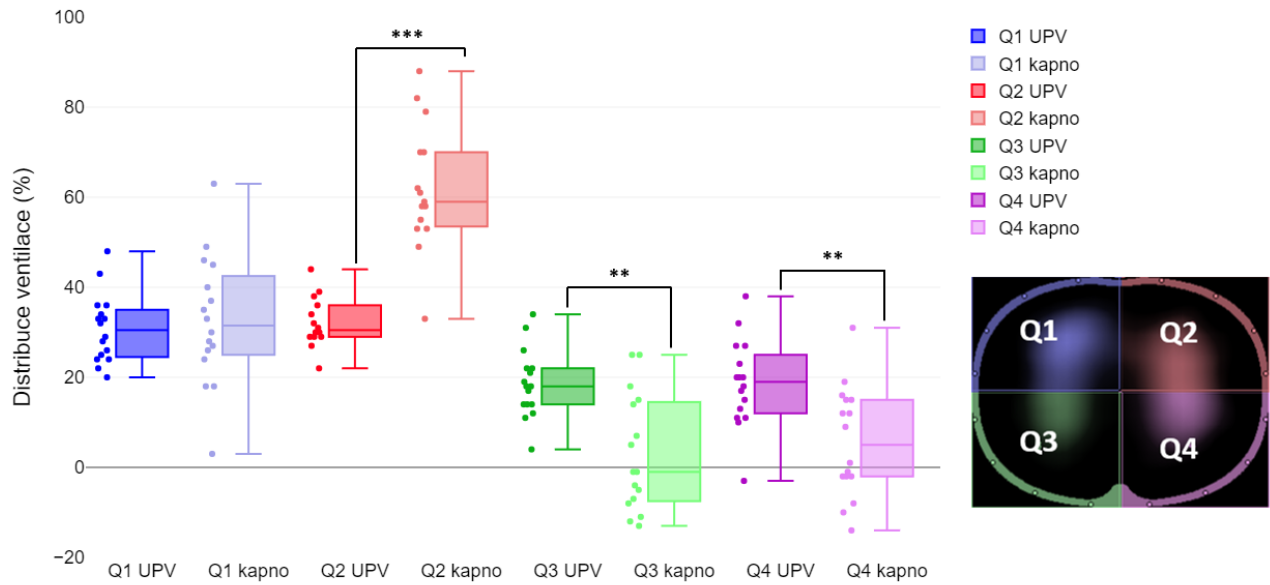
Obr. 6.18. Změna lokální relativní impedance (local tidal variation), tj. distribuce ventilace v plicích při rozdělení do ROI kvadrantů při UPV a kapno peritoneu pro kraniální rovinu s označením statistické významnosti * $p < 0,05$ (párový t-test). Filtrované záznamy s $f_0 = 40 \text{ min}^{-1}$.



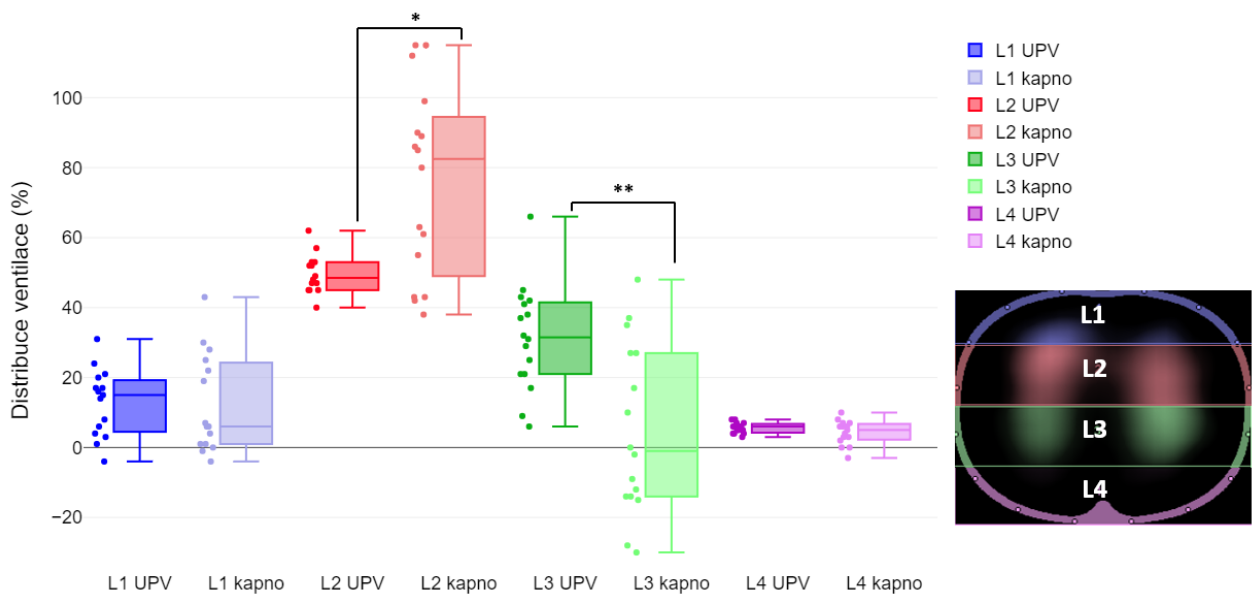
Obr. 6.19. Změna lokální relativní impedance (local tidal variation), tj. distribuce ventilace v plicích při rozdělení do ROI kvadrantů při UPV a kapnoperitoneu pro kraniální rovinu s označením statistické významnosti ** $p < 0,01$ a * $p < 0,05$ (párový t-test). Filtrované záznamy s $f_0 = 40 \text{ min}^{-1}$.

6.4.4 Vliv baseline

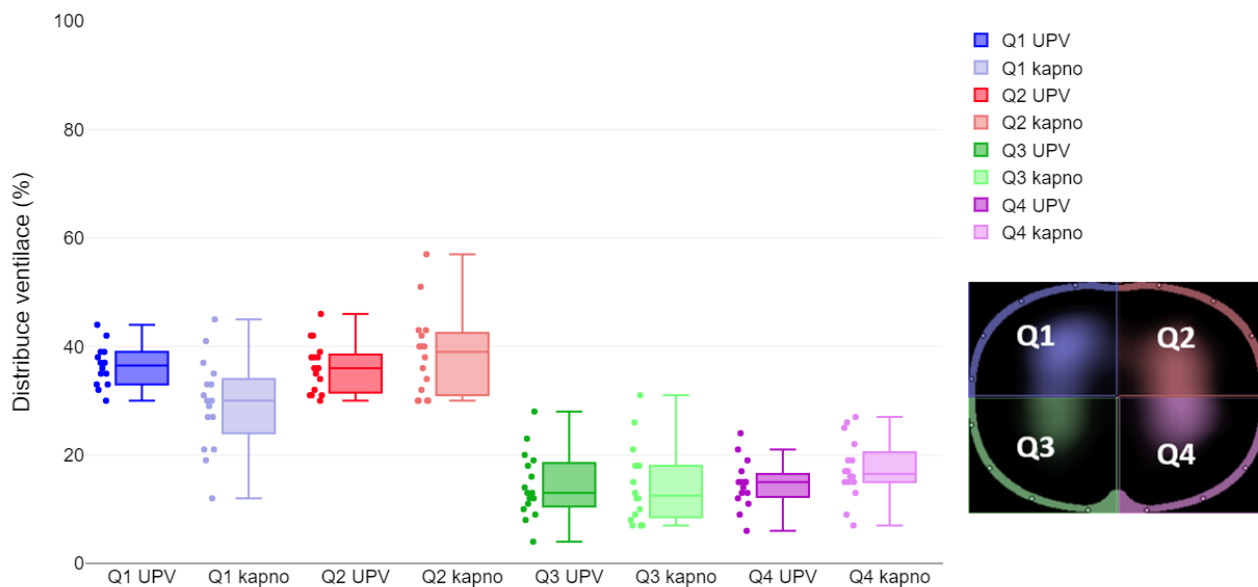
Na obrázcích 6.20 až 6.23 níže jsou zobrazeny změny distribuce ventilace (tidal variation) pro jednotlivé ROI obdobně jako v kapitole 6.2.2, avšak s baseline volenou vždy ze záznamu z UPV, a to i pro záznamy pořízené během kapnoperitonea. Pro záznam pořízený konvenčním pásem během kapnoperitonea byla volena referenční baseline ze záznamu s UPV v konvenční rovině a pro záznam pořízený kraniálním pásem během kapnoperitonea byla volena referenční baseline ze záznamu UPV v kraniální rovině.



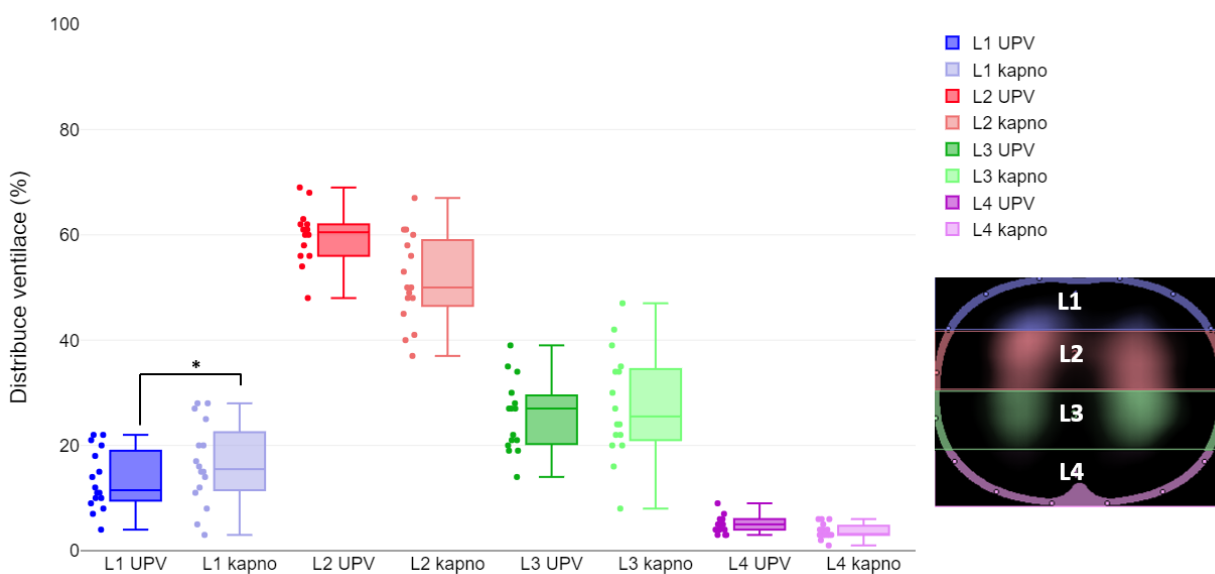
Obr. 6.20. Změna lokální relativní impedance (local tidal variation), tj. distribuce ventilace v plicích při rozdělení do ROI kvadrantů při UPV a kapnooperitoneu pro konvenční rovinu s označením statistické významnosti *** $p < 0,001$ a ** $p < 0,01$ (párový t-test). Baseline snímek z UPV záznamu.



Obr. 6.21. Změna lokální relativní impedance (local tidal variation), tj. distribuce ventilace v plicích při rozdělení do ROI vrstev při UPV a kapnooperitoneu pro konvenční rovinu s označením statistické významnosti ** $p < 0,01$ a * $p < 0,05$ (párový t-test). Baseline snímek z UPV záznamu.



Obr. 6.22. Změna lokální relativní impedance (local tidal variation), tj. distribuce ventilace v plicích při rozdělení do ROI kvadrantů při UPV a kapnoperitoneu pro kraniální rovinu. Párový t-test nezjistil žádnou statistickou významnost v tomto souboru dat. Baseline snímek z UPV záznamu.



Obr. 6.23. Změna lokální relativní impedance (local tidal variation), tj. distribuce ventilace v plicích při rozdělení do ROI vrstev při UPV a kapnoperitoneu pro kraniální rovinu s označením statistické významnosti * $p < 0,05$ (párový t-test). Baseline snímek z UPV záznamu.

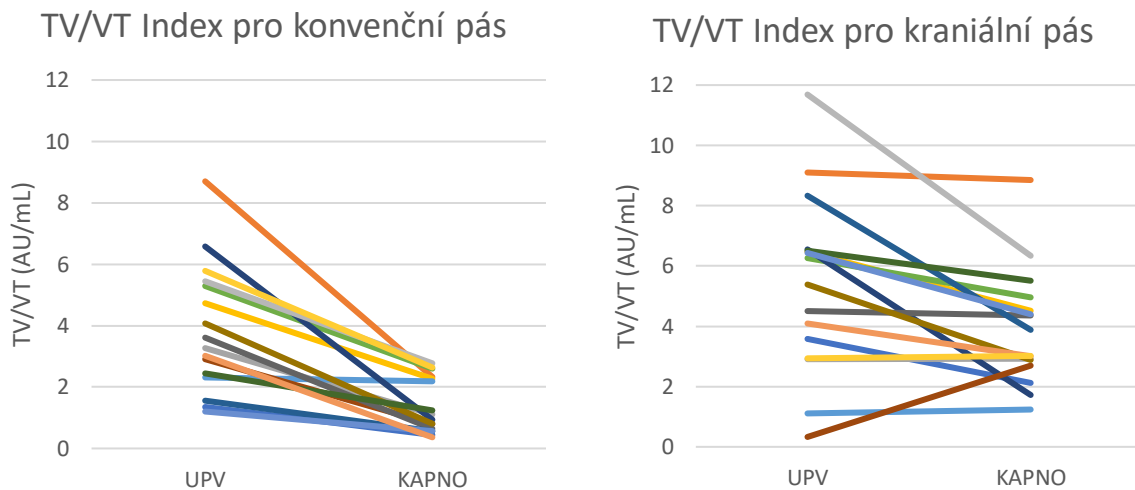
V tabulce níže je souhrn výsledných hodnot t-testu srovnávající distribuci ventilace pro jednotlivé oblasti zájmu během UPV i kapnoperitonea pro obě analyzované roviny. Pro záznamy UPV byl hodnocen rozdíl mezi záznamy nefiltrovanými a filtrovanými dolní propustí s mezní frekvencí $f_0 = 40 \text{ min}^{-1}$. Pro záznamy kapnoperitonea byl hodnocen vliv filtrace a vliv baseline, tj. byly porovnány záznamy s filtrací a bez filtrace s baseline v kapnoperitoneu, a záznamy bez filtrace s baseline v kapnoperitoneu a s baseline ze záznamu UPV z totožné roviny.

Tabulka 6: Přehled statistické významnosti změn v distribuci ventilace v každé ROI při porovnání hodnot získaných během UPV a UPV s kapnoperitoneem pro obě tomografické roviny. Uvedené p hodnoty byly získány párovým t-testem a hodnotí vliv filtrace záznamů a volby baseline na distribuci ventilace v kvadrantech (Q) a vrstvách (L) EIT záznamu hrudníku. Statistická významnost je označena následovně: *** $p < 0,001$, ** $p < 0,01$, * $p < 0,05$ a NS pro případy neprokázání žádné statisticky významné difference ($p > 0,05$).

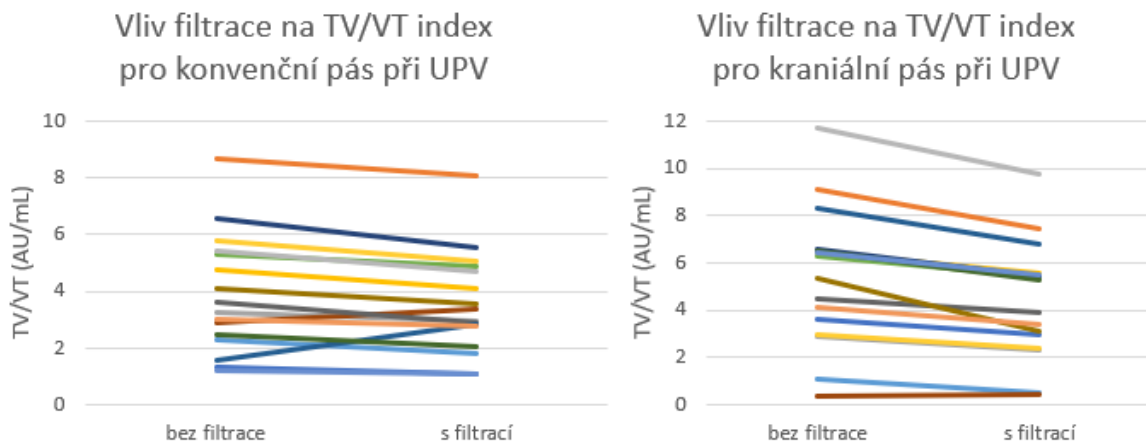
ROI	Bez filtru, původní baseline		Filtr dolní propust, původní baseline		Bez filtru, baseline z UPV		Filtr dolní propust, baseline z UPV	
	Standardní	Kraniální	Standardní	Kraniální	Standardní	Kraniální	Standardní	Kraniální
Q1	*	*	NS	*	NS	NS	*	*
Q2	***	NS	*	NS	***	NS	**	*
Q3	*	NS	NS	NS	**	NS	NS	NS
Q4	NS	NS	*	*	**	NS	NS	*
L1	*	**	NS	*	NS	*	**	NS
L2	NS	*	*	**	*	NS	*	NS
L3	NS	NS	NS	*	**	NS	NS	*
L4	*	NS	NS	NS	NS	NS	*	NS

6.4.5 Index TV/VT

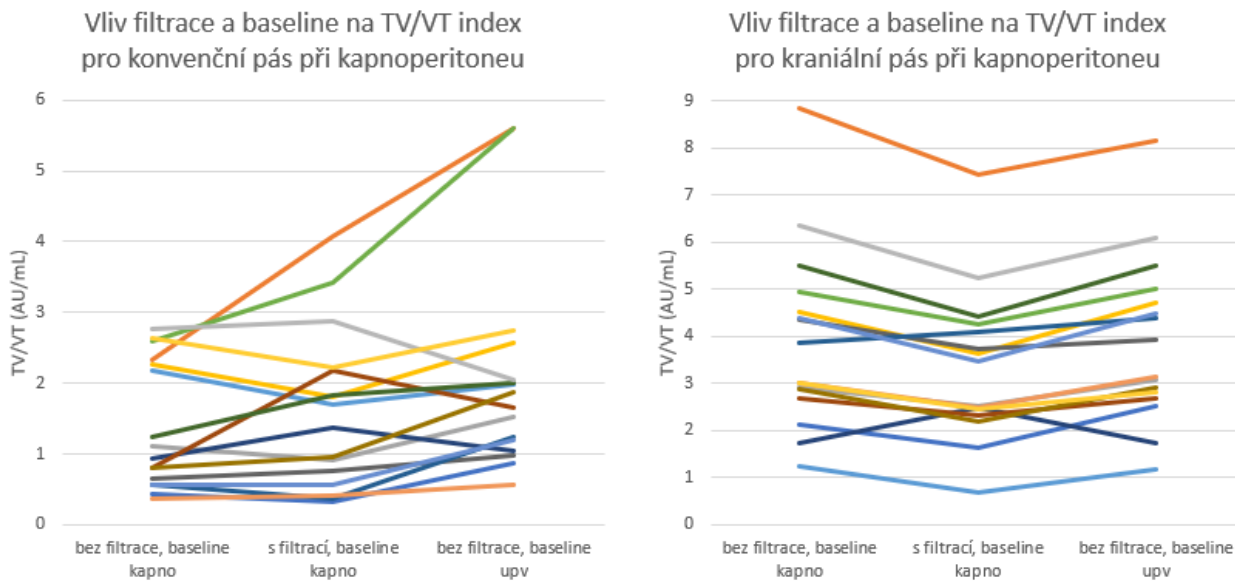
Pro umožnění srovnávání hodnot relativní impedance byl stanoven index TV/VT (AU/mL), dávající do poměru hodnotu tidal variation a dechového objemu. Změna indexu pro jednotlivé pacienty pro obě roviny při UPV a kapnoperitoneu je zobrazena na obrázku 6.22. Na dalších obrázcích je pak zobrazen vliv filtrace a volby baseline na TV/VT index na záznamy s UPV a kapnoperitoneem v obou monitorovaných rovinách.



Obr. 6.22. Změna TV/VT indexu při UPV a kapnoperitoneu pro konvenční rovinu (vlevo) a kraniální rovinu (vpravo) pro jednotlivé pacienty.



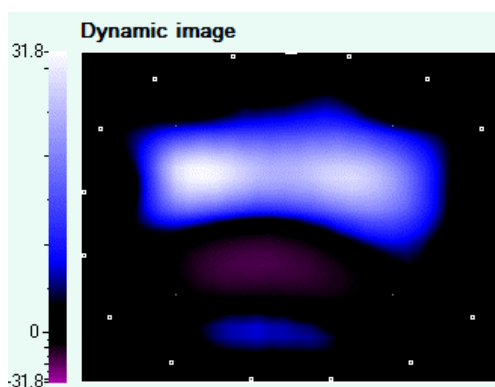
Obr. 6.23. Vliv filtrace dolní propustí s $f_0 = 40 \text{ min}^{-1}$ na TV/VT index ze záznamu UPV pro konvenční rovinu (vlevo) a kraniální rovinu (vpravo) pro jednotlivé pacienty.



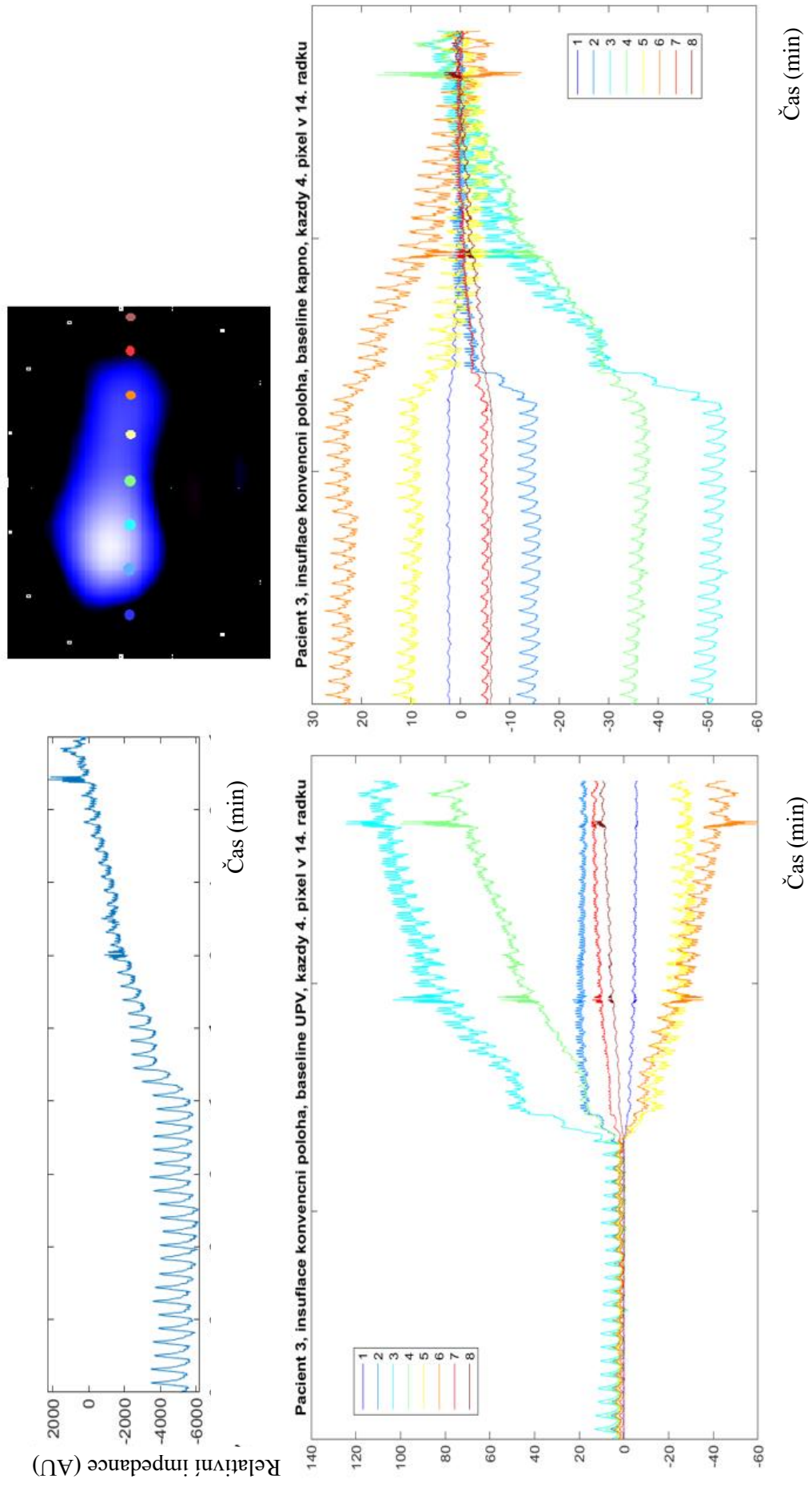
Obr. 6.24. Vliv filtrace dolní propustí s $f_0 = 40 \text{ min}^{-1}$ a změny baseline na TV/VT index ze záznamu s UPV a kapnoperitonea pro konvenční rovinu (vlevo) a kraniální rovinu (vpravo).

6.4.6 Out-of-phase analýza

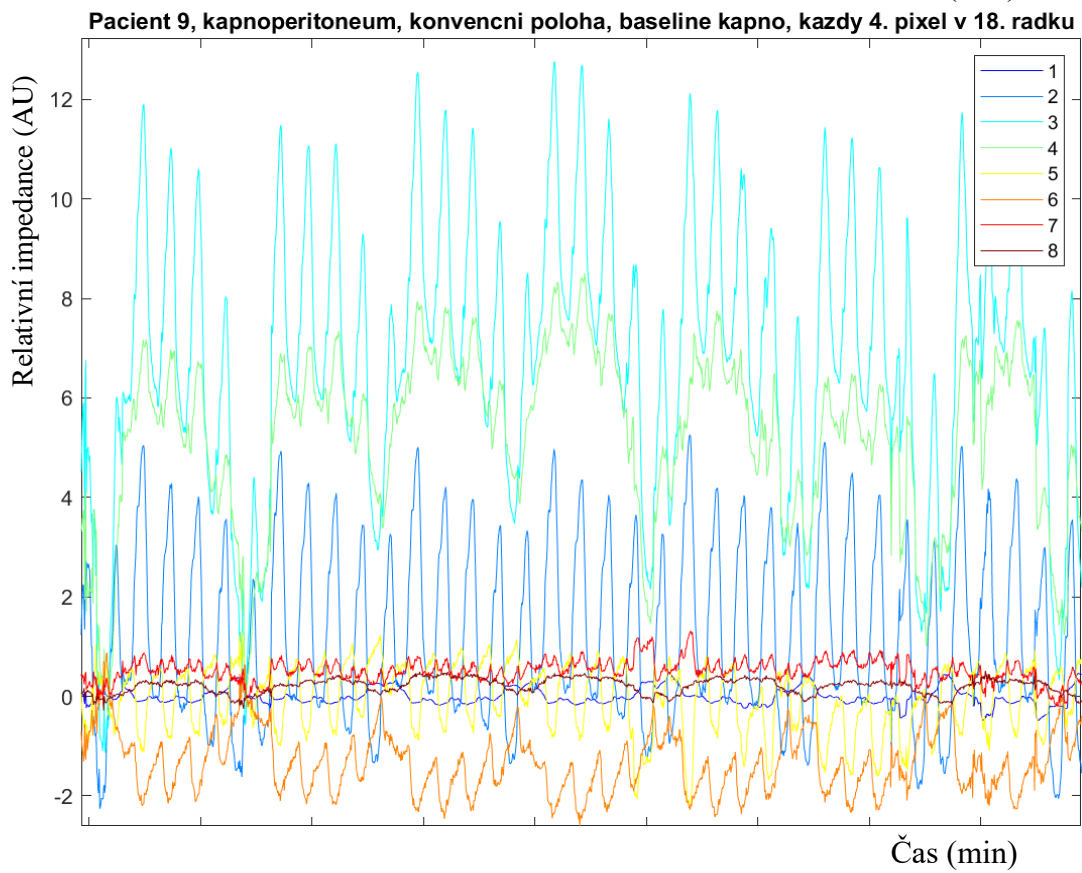
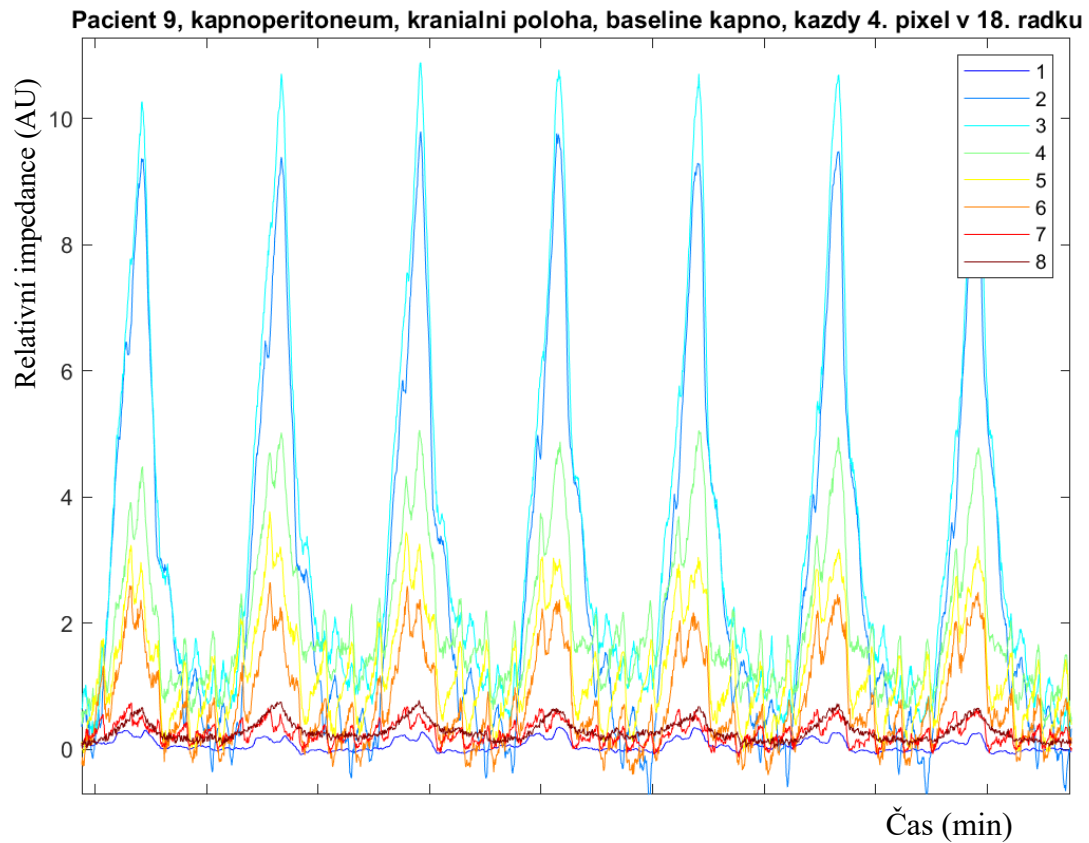
Při vyhodnocování EIT záznamů jsme detekovali oblasti, kde vlivem kapnoperitonea dochází k fázovému otočení průběhu impedanční křivky. Na obrázku 6.25 níže je příklad snímku plic z konvenční roviny jednoho z pacientů při kapnoperitoneu, kde lze pozorovat oblast v tzv. protifázi, která je detekovatelná po celou dobu záznamu EIT s kapnoperitoneem. Dále jsou v této části výsledků uvedeny příklady průběhu impedance jednotlivých pixelů (obrázky 6.26 a 6.27). Byl detekován fenomén tzv. out-of-phase pixelů, kdy dochází k převrácení průběhu impedance u několika pixelů při insuflaci kapnoperitonea oproti průběhu impedance při umělé plicní ventilaci.



Obr. 6.25. Snímek plic při kapnoperitoneu z konvenční roviny. Fialová barva označuje oblast, ve které se nacházejí pixely s opačným průběhem impedanční křivky než při umělé plicní ventilaci. Umístění oblasti odpovídá druhé a třetí vrstvě ROI (L2 a L3).



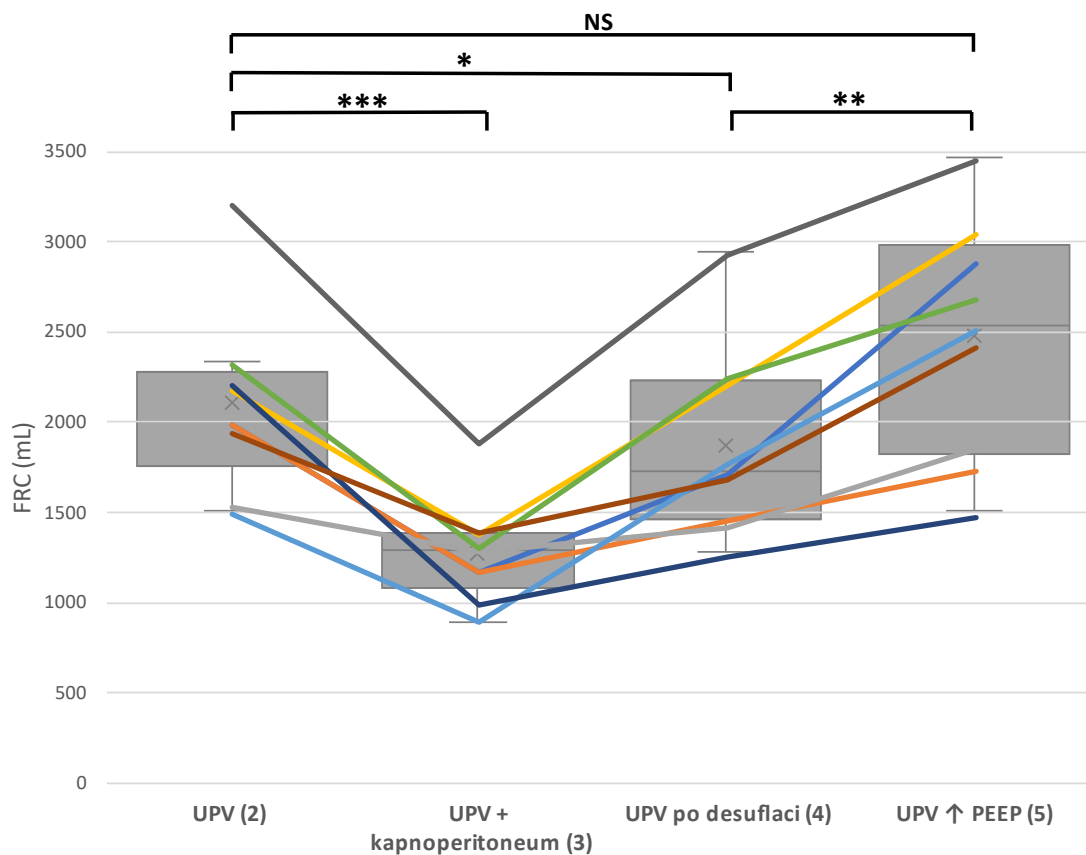
Obr. 6.26. Zobrazení průběhu impedance 8 pixelů v 14. řádku snímku při insuflaci kapnoperitonea v konvenční rovině s baseline z UPV (dole vlevo) a baseline z kapnoperitonea (dole vpravo). V protifázi jsou při kapnoperitoneu v tomto případě pixely č. 2, 3, 4, 7 a 8. Obrázek vlevo nahoře zobrazuje průběh globální impedance při insuflaci. Vpravo nahoře je znázorněna lokalizace analyzovaných pixelů.



Obr. 6.27. Srovnání průběhu impedance u konkrétních pixelů záznamu EIT při kapnoperitoneu pro konvenční (nahore) a kranialní (dole) rovinu.

6.4.7 Měření FRC

Na obrázku 6.28 jsou zobrazeny naměřené hodnoty funkční reziduální kapacity plic (FRC) pro jednotlivé pacienty během následujících fází: (2) při umělé plicní ventilaci po uvedení do anestezie, (3) UPV po založení kapnoperitonea, (4) UPV po ukončení kapnoperitonea před PEEP manévrem a (5) UPV během PEEP manévru, při zvýšené hodnotě PEEP o 5 cmH₂O. Měření FRC při UPV při nižším PEEP je označeno jako PEEP 5, avšak pro některé pacienty byla hodnota PEEP upravena dle potřeby, pohybovala se tak v rozmezí 5–8 cmH₂O.



Obr. 6.28. Změny naměřených hodnot funkční reziduální kapacity (FRC) během celého experimentu pro konkrétní pacienty. FRC byla měřena v následujících fázích: (2) při umělé plicní ventilaci po uvedení do anestezie, (3) UPV po založení kapnoperitonea, (4) UPV po ukončení kapnoperitonea před PEEP manévrem a (5) UPV během PEEP manévru při zvýšené hodnotě PEEP o 5 cmH₂O. Statistická významnost je v grafu označena následovně: *** $p < 0,001$, ** $p < 0,01$, * $p < 0,05$ a NS pro případy neprokázání žádné statisticky významné diference ($p > 0,05$).

V tabulce 7 jsou shrnuty naměřené hodnoty FRC pro všechny pacienty při UPV při hodnotě PEEP 5 cmH₂O a při UPV s kapnoperitoneem se shodnou hodnotou PEEP. Pokles, ke kterému vlivem kapnoperitonea dochází, vyhodnotil t-test jako statisticky velmi významný (***) p < 0,001).

Tabulka 7: Naměřené hodnoty FRC pro PEEP = 5 cmH₂O při UPV a při kapnoperitoneu a vypočtený pokles (průměr ± směrodatná odchylka) pro jednotlivé pacienty. Statistická analýza: Shapirův-Wilkův test normality a párový t-test.

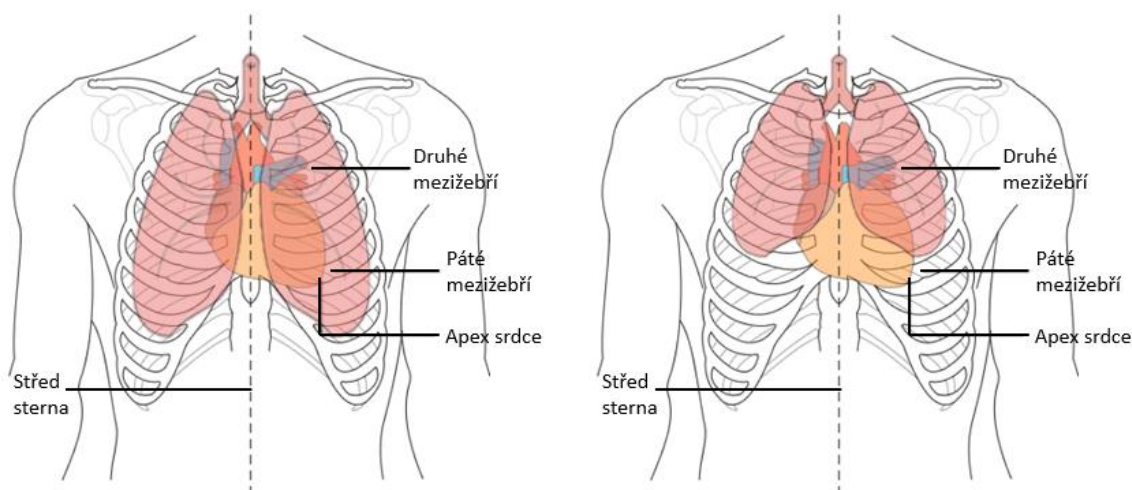
FRC (mL)	UPV PEEP 5	Kapnoperitoneum	Δ (%)
Pacient 1	1374	1093	20
Pacient 2	1988	1167	41
Pacient 3	2617	1434	45
Pacient 4	1983	1169	41
Pacient 5	1529	1283	16
Pacient 6	2180	1379	37
Pacient 7	1487	887	40
Pacient 8	2317	1301	44
Pacient 9	3813	2195	42
Pacient 10	2205	989	55
Pacient 11	1404	883	37
Pacient 12	1521	1131	26
Pacient 13	1218	859	29
Pacient 14	1936	1383	29
Pacient 15	1888	1199	36
Pacient 16	3200	1880	41
průměr ± STD			36 ± 10
t-test	0,00000133 (***) p < 0,001)		

6.5 Diskuse

Z výsledků je zřejmé, že kapnoperitoneum má statisticky významný vliv na záznam EIT hrudníku. Z celkového záznamu impedance, jak je zobrazen na obr. 6.3, lze pozorovat změny impedanční křivky při střídání standardní a kraniální polohy elektrodového pásu. Při insulaci dutiny břišní a zakládání kapnoperitonea dochází k postupnému vymizení dechových exkurzí z roviny snímané pásem ve standardní poloze a hodnoty celkové globální impedance (global tidal variations) se snižují. V části záznamu při UPV s kapnoperitoneem ve standardní rovině již nejsou dechové exkurze patrné. Oproti tomu v kraniální rovině zůstávají dechové exkurze vizuálně jasně detekovatelné i při UPV s kapnoperitoneem, i když se sníženou amplitudou oproti záznamu snímající pouze UPV. Čím mohou být způsobeny tyto rozdíly v záznamu impedance bude diskutováno níže. Rozdíl je zřejmý také v rekonstruovaných snímcích plic v maximu inspiria pro obě tomografické roviny během UPV a kapnoperitonea na obr. 6.4. Plocha plic znázorněná na obrázku ve standardní rovině při kapnoperitoneu je v porovnání s plochou plic při UPV signifikantně menší. Je tak nabíledni se domnívat, že kraniální posun plic, ke kterému dochází při kapnoperitoneu, je zásadní.

Amplituda relativní impedance vlivem kapnoperitonea poklesne v porovnání se záznamem z UPV jak ve standardní, tak v kraniální poloze. Významnější pokles amplitudy byl zaznamenán pro standardní polohu elektrodového pásu ($71 \pm 22 \%$). Pro kraniální pás došlo k mírnějšímu poklesu amplitudy ($33 \pm 19 \%$), u jednoho pacienta dokonce amplituda při kapnoperitoneu vzrostla o 4 %. Tento celkový trend poklesu pro standardní rovinu je potvrzen také frekvenční analýzou na obr. 6.5. Na frekvenci 0,2 Hz, což odpovídá dechové aktivitě 12 dechů/min, je detekován výrazný pokles amplitudy opět zejména pro standardní rovinu. Na frekvenčním spektru pro standardně umístěný pás při kapnoperitoneu pak dominuje frekvence cca 1,3 Hz, což odpovídá srdeční aktivitě při tepové frekvenci 78 tepů/min. Je tak možné, že při kapnoperitoneu ovlivňuje velkou měrou srdeční aktivita impedanční záznam a záznam EIT nezobrazuje pouze distribuci ventilace v plicích, nýbrž také srdeční činnost, která se ve standardní rovině projevuje většími impedančními změnami a dechové exkurze přestávají být patrné či dominantní.

Na obr. 6.3 níže je zjednodušující ilustrace dutiny hrudní, kde je znázorněna pozice plic bez kapnoperitonea a pozice plic při kapnoperitoneu. Cílem tohoto nákresu je představení měnících se poměrů v dutině hrudní, kdy vlivem kapnoperitonea dochází ke kompresi plicní tkáně a posuvu plic spolu s bránicí kraniálně a srdeční sval je tak více exponován. Ten svými impedančními změnami způsobenými měnícím se objemem krve ovlivňuje v rovině 5. mezižebří záznam EIT podstatně více než ve standardní situaci bez kapnoperitonea, kdy jsou v této rovině detekovány zejména impedanční změny způsobené dechovou aktivitou. Na obr. 6.7 je pak další graf znázorňující pokles amplitudy relativní impedance dechové frekvence při kapnoperitoneu. Přestože větší rozdíl je patrný pro standardní rovinu, párový t-test potvrdil statisticky velmi významný rozdíl poklesu amplitudy při UPV s kapnoperitoneem ve srovnání s UPV bez kapnoperitonea pro obě tomografické roviny.



Obr. 6.3. Zjednodušené zobrazení změn poměrů v dutině hrudní vlivem kapnoperitonea. Ilustrační znázornění posunu plic kraniálním směrem a „expozice“ srdce při kapnoperitoneu (vpravo) oproti fyziologické pozici plic bez kapnoperitonea (vlevo). Upraveno dle [40] a [41].

Statisticky významné rozdíly byly také detekovány při analýze změn distribuce ventilace v jednotlivých oblastech zájmu (ROI kvadranty a vrstvy) při UPV a kapnoperitoneu. Pro standardní rovinu byly signifikantní rozdíly zjištěny pro ROI L1, L4, Q1 a Q3, pro Q2 dokonce vysoce signifikantní rozdíl. Pro kraniální rovinu byly detekovány statisticky významné rozdíly pro ROI Q1, L1 a L2 (obr. 6.11 a 6.12).

Jak naznačují výsledky frekvenční analýzy, je zřejmé, že k zobrazení impedančních změn způsobených změnou ventilace bude vhodné použít filtr odstraňující vlivy aktivit s vyšší frekvencí, jako např. srdeční činnosti. V další analýze byl proto použit filtr typu dolní propust s mezní frekvencí 40 min^{-1} (0,7 Hz). Pokud srovnáme filtrované záznamy získané při UPV a UPV s kapnoperitoneem, stále získáváme statisticky signifikantní rozdíly v distribuci ventilace, a to konkrétně pro ROI Q2, Q4 a L2 pro standardní rovinu a Q1, Q4, L1, L2 a L3 pro kraniální rovinu. V tomto případě jsme získali signifikantnější rozdíly pro kraniální polohu pásu, což je zřejmě způsobeno převahou srdeční aktivity v záznamu UPV bez kapnoperitonea, kde tato frekvence dominuje (viz frekvenční analýza na obr. 6.5). Oproti tomu při kapnoperitoneu přebírá dominanci dechová frekvence. Proto může mít filtrace při srovnávání záznamů v kraniální rovině významnější vliv.

Dalším faktorem, který může hrát roli při vyhodnocování rozdílů mezi záznamy, je volba baseline. Software zpracovávající záznam EIT automaticky volí jako baseline snímek s nejnižší hodnotou relativní impedance a přiřadí mu hodnotu 0. Tento snímek je pak používán jako reference pro zobrazení ostatních snímků. Záleží tedy, v jakých podmínkách je záznam nahráván a je možné změnit snímek použitý jako baseline manuálně. V další analýze jsou proto srovnávány rozdíly záznamů EIT a EIT s kapnoperitoneem, pokud je ponechána pro zobrazení impedančních změn baseline ze záznamu z UPV v dané tomografické rovině, a záznamů s baseline snímkem z kapnoperitonea. Přestože některé studie [42] považují vliv baseline snímků na distribuci ventilace v ROI pouze za minoritní, prokázalo se, že pro náš případ může hrát volba baseline velmi důležitou roli při srovnávání distribuce ventilace v záznamech z UPV

a UPV při kapnoperitoneu. Pro standardní rovinu byly prokázány signifikantní změny v ROI Q2, Q3, Q4, L2 a L3 a pro kraniální rovinu pouze v ROI L1. Významné rozdíly jsou v tomto případě zjištěny zejména ve standardní rovině, kde dochází k výraznějšímu posunu hladiny, ve které se změna impedance pohybuje, jak je též evidentní z celkového záznamu impedance na obr. 6.3.

Je potřeba však zmínit, že správnost a vypovídací schopnost výsledků v Tabulce 6 i hodnocení distribuce ventilace může být značně diskutabilní, protože změny impedance detekované EIT systémem s elektrodovým pásem ve standardní rovině zřejmě neodpovídají dechové aktivitě a impedančním změnám ventilačního původu. Nicméně používaný software Dräger EIT Analysis Tool 6.1 (Dräger Medical, Německo) poskytuje hodnoty distribuce ventilace nejen pro ventilační signál, ale pro jakákoliv nahraná EIT data s prakticky libovolným průběhem. Proto v případech, kdy nejsou na EIT záznamu patrné dechové exkurze, nemá smysl analyzovat distribuci ventilace v jednotlivých ROI, či je potřeba k dalším analýzám signálu přistupovat velmi obezřetně. Nedostatečná kontrola průběhu detekovaného signálu před jeho další analýzou tak může přispět k dalším nepřesnostem ve vyhodnocování dat a následně i zdravotního stavu pacienta.

Zajímavým fenoménem, který byl při kapnoperitoneu detekován, je přítomnost tzv. out-of-phase pixelů v záznamu EIT. Při insulaci kapnoperitonea dochází ke změně, resp. otočení fáze impedanční křivky, jak ilustrují grafy pro jednotlivé pixely na obrázcích 6.26 a 6.27. Pro přehlednost byl zobrazen průběh impedance každého 4. pixelu pro jeden řádek. Na grafech je vidět, že při insulaci dochází téměř okamžitě k otočení průběhu impedance pro většinu ze zobrazených pixelů v konvenční rovině. V kraniální rovině k tomuto jevu prakticky nedochází. Autoři ve studii [39] pozorovali out-of-phase pixely v místech v těsné blízkosti oblasti s vysokými změnami impedance způsobené ventilací (tj. plíce) s oblastmi s malými změnami impedance (např. srdce či pleurální výpotek). Pro náš případ by mohla detekce out-of-phase pixelů potvrzovat přítomnost impedančně stabilní oblasti bránice a kapnoperitonea v těsné blízkosti plic a její vliv na EIT záznam plic, a to zejména v standardní rovině umístění elektrodového pásu.

V původním plánu studie byla také analýza vlivu polohy na záznam EIT v obou tomografických rovinách. Jelikož se však nepodařilo u všech pacientů přesně zaznamenat EIT záznam při provedených polohách (Trendelenburg či reverzní Trendelenburg), úhel náklonu nebyl během výkonu konstantní a nebylo jej možné přesně měřit, rozhodli jsme se věnovat se primárně analýze záznamu EIT ve vodorovné poloze pacienta. Operační poloha, resp. úhel náklonu není při daných výkonech nijak definován a určuje si jej sám operátor během operačního výkonu. V průběhu výkonu se tak náklon pacienta mění podle potřeb personálu a v několika případech docházelo dokonce k úpravě bočního náklonu pacienta. Vzhledem k tomu, že náklon pacientů (a ani jejich BMI, které vliv polohy zesiluje) nebyl při těchto výkonech nijak extrémní, nepovažujeme vliv tohoto faktoru v naší studii za zásadní. Obecně však lze s ohledem na gravitační působení říci, že poloha Trendelenburg, tedy pánev nad úroveň hlavy pacienta, má negativní vliv na ventilaci, a ještě tak zesiluje působení kapnoperitonea. Oproti tomu reverzní Trendelenburg, tj. poloha s hlavou nad úroveň pánve, může negativní vliv kapnoperitonea částečně kompenzovat. Např. Min Kyo Suh et al. ve studii [43] potvrdili, že

u pacientů s normálním BMI má Trendelenburgova poloha na plicní funkce ve srovnání s kapnoperitoneem vliv minimální.

Hodnoty, resp. změny funkční reziduální kapacity plic (FRC) se pohybují podle předpokladů. Vlivem zvýšeného intraabdominálního tlaku způsobeného kapnoperitoneem dochází k velmi signifikantnímu ($p < 0,001$) snížení hodnoty FRC, a to v průměru o 36 ± 10 % ve srovnání s hodnotou FRC při UPV bez kapnoperitonea. K obdobnému závěru došli ve svých studiích např. S. Midgey [44] nebo A. Matsunaga et al. [45], kde potvrzují nejen významný pokles FRC způsobený pneumoperitoneem, ale také pokles hodnot PaO_2 . Zvýšení hodnot PEEP o 5 cmH_2O vedlo k očekávanému zvýšení FRC měřeného během probíhajícího recruitment manévru. Cílem bylo také vyhodnotit účinnost tohoto manévru pomocí měření FRC po opětovném snížení hodnoty PEEP na původní hodnotu. Jak bylo však pozorováno ve studii [36], podmínkou validních měření FRC (příp. EELV) byla konstantní úroveň sedace a relaxace pacienta, jinak měřené hodnoty kolísaly oběma směry. Navýšení PEEP pacienty při mělké sedaci dráždí a vede k interferenci s umělou plicní ventilací. Z těchto důvodů nelze naměřené hodnoty FRC využít k hodnocení efektu recruitment manévru. Aby bylo možné FRC adekvátně změřit a vyhodnotit, bylo by potřeba prodloužit čas pacienta v anestezii, což nebylo z etických důvodů možné. Zároveň bychom nebyli schopni analyzovat, zda naměřená hodnota FRC odpovídá dočasnému nebo dlouhodobému zvýšení kapacity .

Dalším důležitým zjištěním této studie byla skutečnost, že systém EIT je při operačních výkonech výrazně rušen elektrochirurgickou jednotkou (ESU), která se používá během výkonu téměř nepřetržitě. Tyto dva přístroje nejsou elektromagneticky kompatibilní a je tak velmi obtížné získat EIT data během probíhajícího výkonu, jelikož dochází k automatickému přepnutí systému EIT PulmoVista 500 do bezpečnostního režimu a přestane pořizovat záznam. Je proto potřeba velmi úzké spolupráce a komunikace s chirurgy, kteří museli často práci s elektrochirurgickou jednotkou pozdržet, aby mohl být alespoň krátký záznam během jednotlivých fází experimentu pořízen. Některé studie [12] [46] [47] [48] [49] toto závažné technické omezení zmiňují, ale není zcela jasné, jak se s tímto problémem vypořádali jiní výzkumníci.

Systém EIT PulmoVista 500 (Dräger Medical, Německo) umožňuje především funkční zobrazení plic, nejedná se o exaktní zobrazovací metodu, jak je blíže popsáno v kapitole 7 o limitacích EIT. Na snímky plic zobrazené v této práci je proto potřeba nahlížet spíše jako na doplňující výsledky.

6.4 Limitace studie

Provedená studie má několik omezení. První limitací je nízký vzorek pacientů s poměrně variabilním BMI, kdy se navíc nepodařilo validně realizovat a vyhodnotit všechna naplánovaná měření, jako je např. pořízení EIT záznamu při polohování pacienta nebo měření FRC po ukončení recruitment manévru. Hlavní analyzovaný jev, tj. vliv kapnoperitonea na monitoraci plic ve standardní rovině, je ale velmi dobře popsán se statisticky významnými výsledky.

Za další limitaci této studie by mohla být považována absence vizualizace pozice bránice během jednotlivých fází experimentu pro jednotlivé pacienty. Nelze tedy s jistotou určit, zda je vymizení impedančních změn způsobených ventilací při standardní poloze elektrodového pásu způsobeno vstupem kapnoperitonea do monitorované oblasti, nebo v důsledku redistribuce ventilace kraniálně.

V průběhu studie také nebyl sledován nitrobřišní tlak, který by také mohl souviset s amplitudou impedančních změn způsobených ventilací. Intraabdominální i intraperitoneální tlak nepochybně také ovlivňují hodnotu FRC.

6.5 Závěr dílčí studie

Kraniální posun plicní tkáně při kapnoperitoneu způsobuje, že na záznamu EIT ze standardní roviny v úrovni 4.–6. mezižebří dochází k výraznému potlačení až vymizení impedančních změn způsobených dechovými exkurzemi a místo dechové aktivity je detekována aktivita srdeční. Objevují se tzv. out-of-phase oblasti, což je způsobeno přítomností kapnoperitonea s výrazně jinou impedancí než plicní tkáň. Záznam EIT ze standardně používané a výrobcem doporučené tomografické roviny neobsahuje prakticky žádné informace o provzdušení plic a vyhodnocováním takovýchto záznamů bychom se dopouštěli velkých nepřesností a potenciálních chyb v hodnocení pacientova zdravotního stavu s rizikem nevhodně zvolených navazujících terapeutických postupů.

Záznam EIT z kraniální tomografické roviny, tj. s elektrodovým pásem umístěným do oblasti axilly, zaznamenává při kapnoperitoneu impedanční změny způsobené dechovými exkurzemi podstatně lépe, než k standardně umístěný pás. Srdeční aktivita je v této rovině také detekována, avšak neovlivňuje záznam EIT tak zásadně, jako při standardním umístění pásu. Oblasti s out-of-phase pixely se v této rovině mohou také objevit, jelikož bránice a kapnoperitoneum může dosáhnout až úrovně detekovatelné pásem v podpaží, což také potvrdila předchozí studie, kde jsme detekovali polohu bránice pomocí ultrazvuku. Je tedy potřeba vyhodnocovat získaná data vždy s ohledem na interindividuální charakteristiky konkrétního pacienta.

Pokud by se zpřesnila metodika použití systému EIT, bylo by možné kraniální pás využívat pro hodnocení distribuce ventilace při kapnoperitoneu, avšak s ohledem na poměrně zásadní limitace metody EIT jako takové, které jsou blíže popsány v následující kapitole.

7 Limitace použití elektrické impedanční tomografie

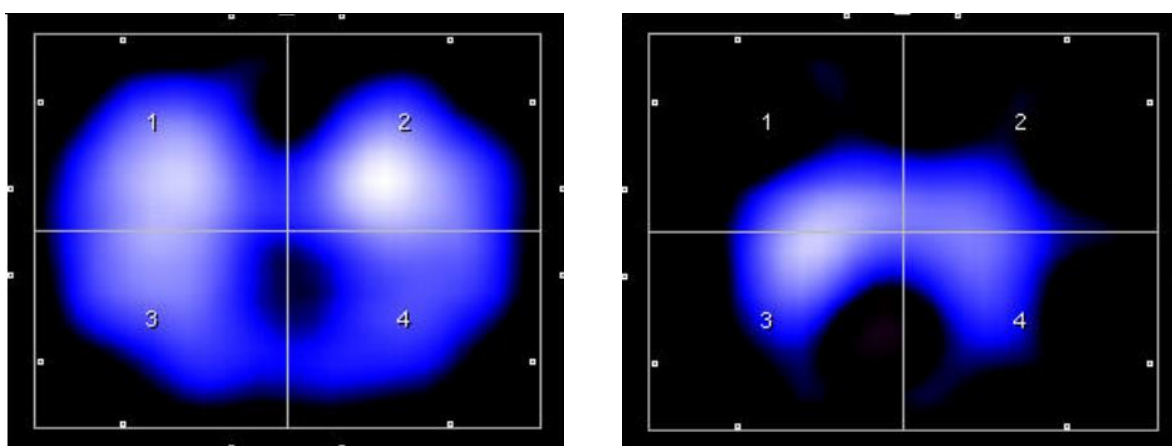
Přestože má monitorace plic pomocí elektrické impedanční tomografie v klinické praxi jistě své místo, stále narážíme na mnoho limitací této metody. Některé limitace popsané níže mohou být však natolik zásadní, že by mohly značně zkomplikovat či dokonce odradit od využití EIT pro danou aplikaci.

7.1 Kontraindikace uváděné výrobcem

Systém EIT je velmi citlivý na jakýkoliv pohyb měřeného pacienta. Při monitoraci plic pomocí systému EIT je velmi důležité minimalizovat pohyby pacienta. Jakýkoliv posun oblasti kůže, na které jsou umístěny elektrody elektrodového pásu, může způsobit zásadní změny v zobrazované impedanci. Změna polohy elektrod vůči plicní tkáni vyvolá změny impedance, které jsou mnohem větší než změny související s ventilací a může tak dojít k chybnému vyhodnocení stavu pacienta na základě zobrazované impedance.

U pacientů s poraněním páteře a hrudníku nebo u pacientů s otevřenými ranami či jakýmkoliv krytím znemožňujícím správné umístění elektrodového pásu a dostatečnou kvalitu signálu nelze systém EIT použít.

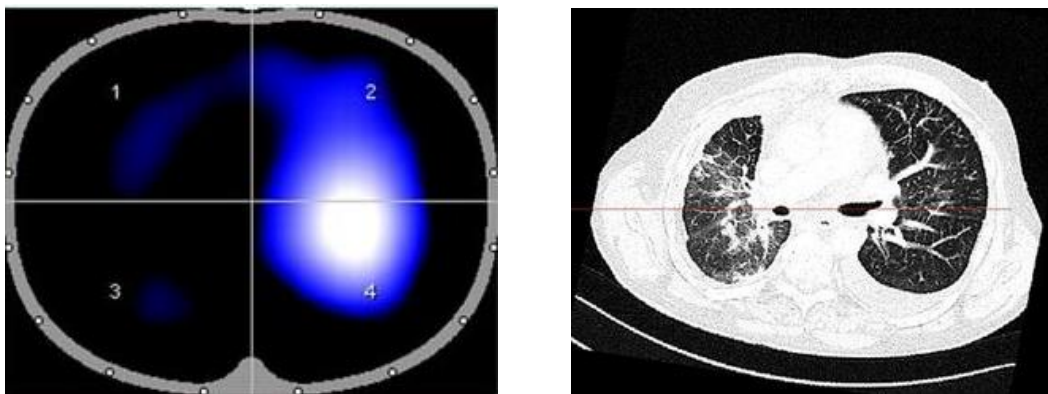
EIT PulmoVista 500 by se neměl používat u pacientů s BMI vyšším než 50 kg/m^2 . U obézních pacientů s nižším BMI by měla být pečlivě sledována kvalita signálu. V rovině elektrodového pásu u obézních pacientů dochází ke snížení poměru mezi plicní tkání a tukovou tkání obklopující hrudní koš. Z tohoto důvodu se pak ventilované oblasti plic na snímcích EIT mohou zdát výrazně menší. Srovnání snímku plic zdravého dospělého člověka s normální vahou a snímku plic obézního, avšak jinak zdravého člověka je na obrázku 7.1. [22] [23]



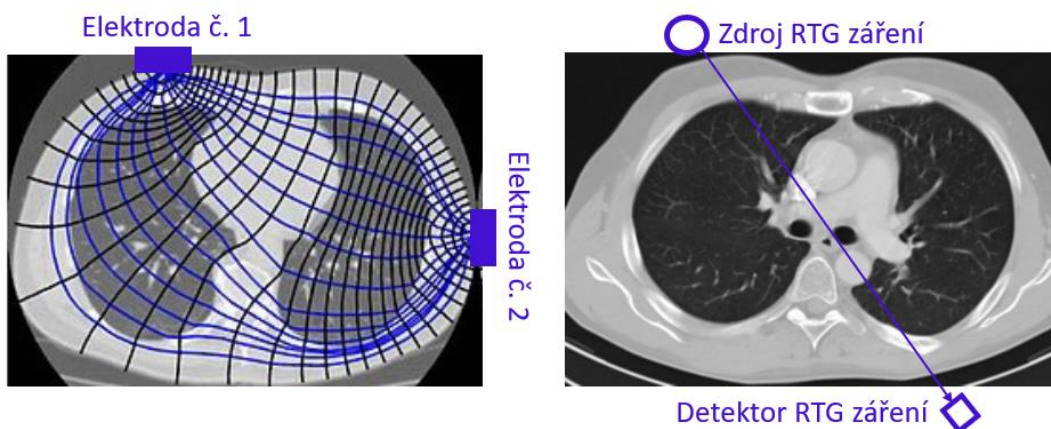
Obr. 7.1. Snímek EIT hrudníku zdravého dospělého jedince s normální hmotností (vlevo) a zdravého dospělého jedince s obezitou (vpravo). Převzato z [23].

7.2 Nízké prostorové rozlišení EIT

Z principu EIT je nabíledni, že prostorové rozlišení této metody zdaleka nedosahuje kvalit rozlišení ostatních zobrazovacích metod, zejm. pak rentgenu, CT či magnetické rezonance. EIT PulmoVista500 využívá k získání dat elektrodový pás s integrovanými 16 elektrodami. Jedna elektroda slouží vždy jako zdrojová, zbylé elektrodové páry detekují celkem 13 hodnot napětí. Každý snímek je tak zrekonstruován ze 13 x 16, tj. 208 hodnot, které jsou zobrazeny jako matice 32 x 32 pixelů. EIT využívá k získání hodnot střídavý elektrický proud, který neprochází tkání s rovnou trajektorií, ale upravuje svou dráhu tak, aby procházel místy s nejnižším elektrickým odporem, jak je znázorněno na obrázku 7.2. Z toho důvodu není možné získat opticky ostrý obrázek plic s větším rozlišením, a to ani navýšením počtu elektrod. Je proto vhodnější hovořit o elektrické impedanční tomografii nikoliv jako o zobrazovací metodě, nýbrž o metodě funkční, vhodné především k monitoringu plic. K získání užitečných informací o distribuci ventilace je potřeba další zpracování dat, hodnocení plic na základě EIT snímku je pouze velmi orientační. EIT zároveň neslouží jako zobrazovací systém poskytující informaci v daném čase, ale pro kontinuální monitoring, kde je vhodné sledovat zejména trendy a změny konkrétních parametrů, místo absolutních hodnot. Nízké prostorové rozlišení EIT tedy nelze skutečně považovat za limitaci této metody, ale je třeba k tomu přihlídnout při volbě aplikace EIT a řádně zpracovat získaná data.



Obr. 7.2a. Srovnání snímku plic získaného pomocí EIT (vlevo) a CT (vpravo). Převzato z [50]



Obr. 7.2b. Srovnání trajektorie proudu pro získání snímku pomocí EIT (vlevo) a γ -záření pro získání snímku pomocí CT (vpravo). Upraveno podle [51].

7.3 Elektromagnetická kompatibilita

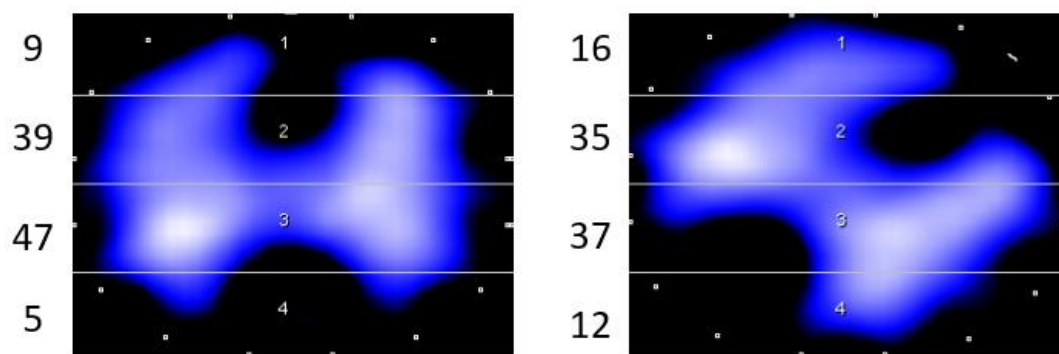
Přestože v řadě studií (odkazy) byla EIT, i konkrétně systém PulmoVista 500, používána pro monitoraci plic během laparoskopických operací, žádná z nich nezmiňuje potíže s elektromagnetickou kompatibilitou používaných elektrických zařízení a přidružené limitace jejich používání. Dle našich zkušeností přítomnost a používání přístrojové techniky, zejména pak elektrochirurgické jednotky (ESU), zcela znemožňuje použití EIT. Zapnutí ESU chirurgem, ať už v režimu řezání nebo koagulace, aktivuje systému PulmoVista 500 tzv. bezpečnostní funkci, pořizování záznamu je přerušeno a je třeba celý systém restartovat a znovu zkalibrovat. Vzhledem k tomu, že ESU je využíváno v průběhu celého laparoskopického výkonu, jsou tím možnosti využití EIT značně minimalizovány. V našem případě jsme řešili tento problém domluvou s chirurgy a desynchronizací přístrojů, která nám umožnila získat potřebná data z konkrétních situací. Je však zřejmé, že tato nekompatibilita značně limituje používání EIT nejen při laparoskopických výkonech, ale prakticky u jakýchkoliv operačních výkonů využívajících ESU. Je s podivem, že nebyly nalezeny žádné studie, které by se kompatibilitou EIT a elektrokauterizací, vzhledem k rozsahu jejího používání, podrobněji zabývaly. Vzhledem k potenciálu využití systému EIT při nejen laparoskopických operacích je žádoucí tuto limitaci minimalizovat.

Další limitací této metody je skutečnost, že nelze pořizovat EIT záznam dvěma pásy simultánně. Vzhledem k šířce oblasti podílející se na vzniku EIT snímku je však pochopitelné, že umožnění monitoringu plic ve dvou tomografických rovinách současně, ač by mělo velký potenciál klinického využití, by bylo technicky velmi obtížné.

7.4 Metodická rizika

Jak prokázala řada dílčích studií [52] [53] [26], EIT je poměrně citlivá na správné, a především neměnné umístění elektrod na pacienta. Pokud je cílem monitoringu pomocí EIT sledovat pacienta a utvářet závěry o jeho zdravotním stavu a jeho změnách, je potřeba velmi dbát na přesné umístění elektrod, resp. elektrodového pásu a být schopni toto přesné umístění reprodukovat v případě pozdějšího měření totožného pacienta nebo při dočasném sundání pásu z důvodu pořizování např. CT snímků, přemístování pacienta, jeho hygieně, provádění jiných zdravotních úkonů atd. Faktorů, které mohou výrazně ovlivnit získaný záznam EIT, je řada, prakticky všechny jsou založeny na důležitosti zachování stejných pozic elektrod vůči sobě navzájem i vůči pacientovi. Níže je souhrn faktorů, které mohou ovlivnit získaný záznam:

- velikost elektrodového pásu dle obvodu hrudníku pacienta a jeho utažení,
- výběr tomografické roviny, resp. mezižebří pro umístění pásu na pacienta,
- aplikace elektrodového gelu pro zajištění dostatečné kvality signálu,
- rotace elektrodového pásu (příklad vlivu rotace pásu na výsledný snímek je na obr. 7.4).



Obr. 7.4. Srovnání regionální ventilace (%) pro oblasti zájmu (ROI) vrstvy pro standardní snímek plic (vlevo) a totožný snímek pootočený o úhel 45 °. Převzato z [51].

8 Přínos pro biomedicínské inženýrství

EIT je neinvazivní monitorovací metoda, která má velký potenciál využití v klinické praxi, zejména pak pro monitoraci plic. Přestože je EIT již delší dobou populárním předmětem výzkumu, stále není rutinním nástrojem v klinické praxi. Používání EIT naráží jednak na řadu metodických nejasností, ale také na potřebu pokročilejších analýz ke komplexnímu hodnocení EIT záznamu. Ukazuje se, že pro klinické využití není dostačující pouze vyhodnocení snímku poskytnutého EIT systémem. Je potřeba vyvinout metody umožňující jednoduché a rychlé interpretace EIT záznamů, jelikož je častěji přínosnější analyzovat získaný jednorozměrný signál zobrazující impedanční změny v čase než snímek plic. Ve výzkumu často využívané nástroje, jako je například spektrální analýza nebo další výpočty často prováděné např. v programovém prostředí MATLAB (MathWorks, Inc., USA) jsou pro klinickou praxi zcela nevhodné.

Výsledky této disertační práce jsou tak přínosné nejen v oblasti monitorace plic při laparoskopických operacích s kapnoperitoneem, ale také poskytují výrobci EIT systému PulmoVista 500 (Dräger Medical, Německo) zpětnou vazbu ohledně úskalí využívání EIT během operací i náročnosti analýzy EIT záznamů. Tato disertační práce posunula EIT jakožto nástroj pro monitoraci plic blíže k její implementaci do klinické praxe.

9 Závěr

V rámci této práce byla nejprve lokalizována poloha bránice při laparoskopických operacích s kapnoperitoneem, kde měření pomocí ultrazvuku potvrdilo významný kraniální posun bránice a přítomnost bránice v oblasti, která ovlivňuje EIT záznam při standardně umístěném elektrodovém pásu v úrovni 4. až 6. mezižebří.

Byl analyzován záznam EIT pořízený při kapnoperitoneu ve dvou tomografických rovinách, ve standardní poloze a v kraniálnější poloze v úrovni axilly. Hlavním zjištěním studie je, že monitorování plic při laparoskopických operacích s kapnoperitoneem pomocí systému EIT PulmoVista 500 (Dräger Medical) s elektrodovým pásem umístěným ve standardně používané a výrobcem doporučené tomografické rovině 4. až 6. mezižebří nepřináší požadované informace o distribuci ventilace v plicích. Na základě provedených analýz lze tvrdit, že EIT záznam ze standardní roviny nezobrazuje impedanční změny způsobené ventilací a nelze tak z těchto údajů jakkoliv hodnotit stav plic a regionální ventilaci. Při umístění elektrodového pásu do kraniálnější polohy poskytuje EIT relevantnější informace o distribuci ventilace pacienta, přestože záznam může být také částečně ovlivněn zvýšeným intraabdominálním tlakem způsobeným kapnoperitoneem. Na záznamech v obou rovinách jsou detekovatelné impedanční změny, které přisuzujeme srdeční aktivitě. Nicméně zatímco v kraniální rovině je tento signál minoritní, v záznamu ze standardní roviny dominuje a zcela zastiňuje impedanční změny odpovídající dechové aktivitě.

Dalším zjištěním této práce je pro praxi neméně důležitý fakt, že práce se systémem EIT je v podmínkách probíhajících operačních výkonů velmi problematická a naráží na řadu technických limitací. Jako nejzávažnější problém hodnotím elektromagnetickou nekompatibilitu EIT a elektrochirurgické jednotky (ESU), která svým rušením prakticky znemožňuje pořizování kontinuálního záznamu EIT během operačních výkonů. Je diskutabilní, jakým způsobem se systémem EIT pracovali výzkumníci zabývající se obdobnou tematikou pořizování záznamů EIT během laparoskopických, ale i jiných operací, jelikož prakticky žádné studie řešící či alespoň zmiňující tuto zásadní limitaci nebyly publikovány.

Literatura

- [1] Z. Holub a D. Kužel, *Minimálně invazivní operace v gynekologii*, Praha: Grada Publishing, 2005. ISBN 80-247-0834-5.
- [2] J. M. - t. mluvčí, „Nemocnice Třebíč,“ 2023. [Online]. Available: <https://www.nem-tr.cz/tiskove-zpravy/nadace-cez-financne-podporila-nemocnici-trebic/>. [Přístup získán 20 březem 2023].
- [3] „Justdial,“ [Online]. Available: https://www.justdial.com/jdmart/Adoni/Veress-Needle/pid-2011248624/079PXX79-XX79-170125201530-X2L4?jdtracker=internaljd_b2bplistingcarousel_11832181. [Přístup získán 20. březem 2023].
- [4] F. Valenza, G. Chevillard, T. Fossali, V. Salice, M. Pizzocri a L. Gattioni, „Management of mechanical ventilation during laparoscopic surgery,“ *Best Pract Res Clin Anaesthesiol*, pp. 24(2):227-41. doi: 10.1016/j.bpa.2010.02.002, 2010.
- [5] A. Staehr-Rye, L. Rasmussen, J. Rosenberg, C. Steen-Hansen, T. Nielsen, C. Rosenstock, H. Clausen, M. Sørensen, J. von H. Regeur a M. Gätke, „Minimal impairment in pulmonary function following laparoscopic surgery,“ *Acta Anesthesiologica Scandinavica*, pp. 58(2):198-205. doi: 10.1111/aas.12254, 2014.
- [6] L. Andersson, M. Bååth, A. Thörne, P. Aspelin a S. Odeberg-Wernerman, „Effect of carbon dioxide pneumoperitoneum on development of atelectasis during anesthesia, examined by spiral computed tomography,“ pp. 102(2):263-9. doi: 10.1097/0000542-200502000-00009, 2005.
- [7] G. Gautham, A. Chetan, S. Manoj Karthik a R. Pajanivel, „Effects of capnoperitoneum for laparoscopy on liver, renal and pulmonary functions: a prospective observational study,“ pp. 4(6):1903-1907. doi: 10.18203/2349-2902.isj20172018, 2017.
- [8] Zhangjiagang Medi Medical Equipment Co.,ltd., „medic-medical,“ 29 4 2021. [Online]. Available: <https://www.medik-medical.com/blog/trendelenburg-position-in-surgery.html>. [Přístup získán 3. říjen 2022].
- [9] T. Meier, T. Leibecke, C. Eckmann, U. W. Gosch, M. Grossherr, H. P. Bruch, H. Gehring a S. Leonhardt, „Electrical impedance tomography: changes in distribution of pulmonary ventilation during laparoscopic surgery in a porcine model,“ *Langbeck's Archives of Surgery*, pp. 391(4), 383-9, doi: 10.1007/s00423-006-0034-8, 2006.
- [10] J. Karsten, H. Luepschen, M. Grossherr, H. P. Bruch a S. Leonhardt, „Effect of PEEP on regional ventilation during laparoscopic surgery monitored by electrical impedance tomography,“ *Acta Anesthesiologica Scandinavica*, pp. 4(5), 160-3, doi: 10.1111/j.1399-6576.2011.02467.x, 2011.
- [11] X. He, J. Jiang, Y. Liu, H. Xu, S. Zhou, S. Yang, X. Shi a H. Yuan, „Electrical impedance tomography-guided PEEP titration in patients undergoing laparoscopic abdominal surgery,“ *Medicine (Baltimore)*, pp. 95(14): e3306, doi: 10.1097/MD.0000000000003306, 2016.
- [12] M. Stankiewicz-Rudnicki, W. Gaszynski a T. Gaszynski, „Assesment of ventilation distribution during laparoscopic bariatric surgery: An electrical impedance tomography study,“ *BioMed Research International*, pp. Dec.12, 7423162, doi: 10.1155/2016/7423162, 2016.

- [13] K. G. Torrington, J. F. Bilello, T. K. Hopkins a E. A. Hall Jr., „Postoperative pulmonary changes after laparoscopic cholecystectomy,“ *Southern Medical Journal*, pp. 89(7):675-678. DOI: 10.1097/00007611-199607000-00005, Jul 1996.
- [14] S. Hasukic a D. Mesic, „Postoperative pulmonary changes after laparoscopic cholecystectomy,“ *Med. Arh.*, pp. 55(2):91-3, 2001.
- [15] L. E. Andersson, M. Maath, A. Thorne, P. Aspelin a S. Odeberg-Wernerman, „Effect of Carbon Dioxide Pneumoperitoneum on Development of Atelectasis during Anesthesia, Examined by Spiral Computed Tomography,“ *Anesthesiology*, sv. 102, č. 2, pp. 293-9. DOI: 10.1097/00000542-200502000-00009, 2005.
- [16] D. M. D. Özdemir-van Brunschot, K. C. J. H. M. van Laarhoven, G.-J. Scheffer, S. Pouwels, K. E. Wever a M. C. Warlé, „What is the evidence for the use of low-pressure pneumoperitoneum? A systematic review,“ *Surgical Endoscopy*, pp. (30) 2049–2065, doi: 10.1007/s00464-015-4454-9, 2016.
- [17] T. M. Atkinson, G. D. Giraud, B. M. Togioka, D. B. Jones a J. E. Cigarroa, „Cardiovascular and Ventilatory Consequences of Laparoscopic Surgery,“ pp. 700-710, doi: 10.1161/CIRCULATIONAHA.116.023262, 2017.
- [18] D. E. Ott, „The peritoneum and the pneumoperitoneum: a review to improve clinical outcome,“ *Gynecol Surg*, pp. 101-106. DOI: 10.1007/s10397-004-0019-y, 2004.
- [19] B. G. Fahy, G. M. Barnas, S. E. Nagle, J. L. Flowers, M. J. Njoku a M. Agarwal, „Effects of trendelenburg and reverse trendelenburg postures on lung and chest wall mechanics,“ pp. 236-244, doi: 10.1016/0952-8180(96)00017-7, 1996.
- [20] L. B. Leonhardt S, „Electrical impedance tomography: the holy grail of ventilation and perfusion monitoring?,“ *Intensive Care Medicine*, pp. 38(12), 1917-29. doi: 10.1007/s00134-012-2684-z, 2012.
- [21] F. Reifferscheid, G. Elke, S. Pulletz, B. L. Gawelczyk, I. Lautenschläger, M. Steinfath, N. Weiler a I. Frerichs, „Regional ventilation distribution determined by electrical impedance tomography: reproducibility and effects of posture and chest plane.,“ *Respirology*, pp. 523-31. doi: 10.1111/j.1440-1843.2011.01929.x, 2011.
- [22] E. Teschner, M. Imhoff a S. Leonhardt, The realization of regional ventilation monitoring, Dräger Medical GmbH, 2011.
- [23] *Instructions for Use PulmoVista 500, Drägerwerk AG & Co. KGaA. Edition: 1 - 2020-04.*
- [24] Dräger Medical, „Dräger PulmoVista® 500 SW 1.30,“ © Drägerwerk AG & Co. KGaA, 2023, [Online]. Available: https://www.draeger.com/cs_cz/Products/PulmoVista-500. [Přístup získán 22. únor 2023].
- [25] R. Grünes a K. Roubík, „Elektrická impedanční tomografie a její využití v respirační péči,“ *Lékař a technika*, pp. 38(1): 42-47, 2008.
- [26] M. Masopustová, *Vliv tomografické roviny na výsledek vyšetření elektrickou impedanční tomografií u mužů a žen, diplomová práce*, Kladno: ČVUT, FBMI, studijní program Biomedicínská a klinická technika, 2014.

- [27] C. E. Scott-Conner a D. L. Dawson, *Operative Anatomy Third Edition*, Lippincott Williams & Wilkins, 2009.
- [28] J. Karsten, T. Stueber, N. Voigt, E. Teschner a H. Heinze, „Influence of different electrode belt positions on electrical impedance tomography imaging of regional ventilation: a prospective observational study,“ *Critical Care*, pp. doi: 10.1186/s13054-015-1161-9, 8 Jan 2016.
- [29] I. Bikker, C. Preis, M. Egal, J. Bakker a D. Gommers, „Electrical impedance tomography measured at two thoracic levels can visualize the ventilation distribution changes at the bedside during a decremental positive end-expiratory lung pressure trial,“ *Critical Care*, pp. 15(4): R193, doi: 10.1186/cc10354, 11 Aug 2011.
- [30] J. Newell, D. Isaacson, M. Cheney, G. Saulnier, D. Gisser, J. Boble, R. Cook, P. Edic a C. Newton, „In Vivo impedance images using sinusoidal current patterns.,“ v *Clinical and Physiological Applications of Electrical Impedance Tomography, chapter Five*, 1993.
- [31] J. Vlot, R. Wijnen, R. J. Stolker a K. N. Bax, „Optimizing working space in laparoscopy: CT measurement of the effect of pre-stretching of the abdominal wall in a porcine model,“ *Surgical Endoscopy*, pp. 28(3):841-6. doi: 10.1007/s00464-013-3229-4, 10 Oct 2013.
- [32] Y. Anatomy, „<https://www.yoganatomy.com/>,“ 2002-2021. [Online]. Available: https://www.yoganatomy.com/wp-content/uploads/2013/06/diaphragm_yoga_anatomy.png. [Přístup získán 10. leden 2023].
- [33] P. Dostál, V. Černý a M. Matějovič, *Základy umělé plicní ventilace*, Maxdorf, 2018.
- [34] J. Fontana, J. Trnka, P. Maďa, P. Ivák, P. Lavříková, L. Nováková, M. Pavelka a M. Šajdíková, „Funkce buněk a lidského těla - Multimediální skriptum,“ 3. lékařská fakulta Univerzity Karlovy, [Online]. Available: <http://fbt.cz/skripta/vi-dychaci-soustava/2-mechanika-dychani/>. [Přístup získán 24. únor 2023].
- [35] M. A. Gropper, D. Sidebotham a I. J. Le Grice, „Functional Residual Capacity,“ ScienceDirect - Elsevier B.V., [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/topics/neuroscience/functional-residual-capacity>. [Přístup získán 24. Únor 2023].
- [36] A. Rára, *Příspěvek elektrické impedanční tomografie ke zhodnocení významu evakuace pleurálního výpotku*, Kladno: FBMI, ČVUT v Praze, 2022.
- [37] *Engström Carestation: Uživatelská referenční příručka. Verze softwaru 6.X*, Datex-Ohmeda, GE Healthcare, Finsko, 2015.
- [38] A. Rára, K. Roubík a T. Tyll, „Effects of pleural effusion drainage in the mechanically ventilated patients as monitored by electrical impedance tomography and end-expiratory lung volume: A pilot study,“ *Journal of Critical Care*, pp. 76-80. Doi: 10.1016/j.jcrc.2020.06.001, 2020.
- [39] T. Becher, M. Bussmeyer, I. Lautenschläger, D. Schädler, N. Weiler a I. Frerichs, „Characteristic pattern of pleural effusion in electrical impedance tomography images of critically ill patients,“ *British Journal of Anaesthesia*, pp. 120 (6): 1219-1228, doi: 10.1016/j.bja.2018.02.030, 2018.
- [40] L. Baltieri a E. M. Pazzianto-Forti, „Letters to the editor - Pulmonary function alteration in laparoscopic surgery with pneumoperitoneum and abdominal wall elevation,“ *Revista Brasileira de Anestesiologia*, Mar-Apr 2018, 68(2).

- [41] The University of Nottingham, „Practice Learning Resources, Cardiology Teaching Package,“ [Online]. Available: https://www.nottingham.ac.uk/nursing/practice/resources/cardiology/function/chest_leads.php. [Přístup získán 18 únor 2023].
- [42] K. Roubík, V. Sobota a M. Laviola, „Selection of the Baseline Frame for Evaluation of Electrical Impedance Tomography of the Lungs,“ v *Second International Conference on Mathematics and Computers in Sciences and in Industry*, 2015.
- [43] M. K. Suh, K. W. Seong, S. H. Jung a S. S. Kim, „The effect of pneumoperitoneum and Trendelenburg position on respiratory mechanics during laparoscopic surgery,“ *Korean J Anesthesiol*, pp. 329-334. DOI: 10.4097/kjae.2010.59.5.329, November 59(5) 2010.
- [44] S. Midgley a D. A. Tolley, „Anaesthesia for Laparoscopic Surgery in Urology,“ *EAU-EBU Update Series*, pp. 241-245. doi: 10.1093/bja/ae274, 2006, Volume 44.
- [45] A. Matsunaga, K. Ohse, Y. Kakihana, M. Masuda a K. Ikoma, „Effect of pneumoperitoneum on functional residual capacity,“ *Advances in Experimental Medicine and Biology*, sv. vol. 737, pp. 239-243. DOI: 10.1007/978-1-4614-1566-4_35, 2012.
- [46] M. S. Schaefer, V. Wania, B. Bastin, U. Schmalz, P. Kienbaum, M. Beiderlinden a T. A. Treschan, „Electrical impedance tomography during major open upper abdominal surgery: a pilot study,“ *BMC Anesthesiol*, 2014, 14, 51. doi: 10.1186/1471-2253-14-51..
- [47] K. Erlandsson, H. Odenstedt, S. Lundin a O. Stenqvist, „Positive end-expiratory pressure optimization using electric impedance tomography in morbidly obese patients during laparoscopic gastric bypass surgery,“ *Acta Anesthesiol Scand*, pp. 833-839. doi: 10.1111/j..1399-6576.2006, 2006, 50.
- [48] J. Bordes, C. Mazzeo, P. Gourtober, P. J. Cungi, F. Antonini, S. Bourgoin a E. Kaiser, „Impact of Extraperitoneal Dioxide Carbon Insufflation on Respiratory Function in Anesthetized Adults: A Preliminary Study Using Electrical Impedance Tomography and Wash-out/Wash-in Technique,“ *Anesth Pain Med*, 2015, 5, e22845. doi: 10.5812/aapm.22845.
- [49] K. Jung, S. Kim, B. J. Kim a M. Park, „Comparison of Positive End-Expiratory Pressure versus Tidal Volume-Induced Ventilator-Driven Alveolar Recruitment Maneuver in Robotic Prostatectomy: A Randomized Controlled Study,“ *J Clin Med*, 2021, 10, 3921. doi: 10.3390/jcm10173921.
- [50] O. Radke, T. Schneider, A. Braune, R. Pirracchio, F. Fischer a T. Koch, „Comparison of distribution of lung aeration measured with EIT and CT in spontaneously breathing, awake patients,“ pp. vol. 27, no.4, pp. 315-325, 2016.
- [51] K. Roubík a V. Sobota, „Electrical Impedance Tomography for lung recruitment monitoring - Technical aspects of clinical usage and interpretation,“ High-Frequency Ventilation of Infants, Children, and Adults Conference, Snowbird Resort, Utah, USA..
- [52] K. Buzkova a K. Roubík, „The Effect of Electrode Belt Size Selection upon Evaluation of the Distribution of Ventilation Using Electrical Impedance Tomography,“ v *In: 4th IEEE International Conference on e-Health and Bioengineering EHB 2013. Iasi: Gr. T. Popa University of Medicine and Pharmacy*, 2013. ISBN 978-1-4799-2373-1..

- [53] K. Buzkova a D. Albrechtova, „Effect of electrode gel application between patient’s skin and electrode belt on electrical impedance tomography of the thorax,“ v *In: World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering 2018 (Vol. 1). Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2019. p. 81-85. IFMBE Proceedings. vol. 68/1. ISSN 1680-0737. ISBN 978-981-10-9034-9.*
- [54] R. Grünes a K. Roubík, „Elektrická impedanční tomografie a její využití v respirační péči,“ *Lékař a technika - Physician and technology*, pp. 42-47, 2008.

Přílohy

- A. Seznam publikací autora k tématu disertační práce
- B. Souhlas etické komise
- C. Protokol Clinicaltrials.gov
- D. Smlouva o výpůjčce ventilátoru Engström
- E. Informovaný souhlas
- F. Protokol experimentu měření EIT
- G. Seznam publikací autora k tématu disertační práce

Příloha A – Seznam publikací autora k tématu disertační práce²

K. Koldova, D. Slajfercik. *The effect of frame rate and calibration on lung monitoring with electrical impedance tomography*. Lékař a technika – Clinician and Technology. 2020, 49(4), pp. 107-111, ISSN 2336-5552.

K. Buzkova, A. Rara, M. Muller, K. Roubik, T. Tyll. *Ultrasound detection of diaphragm position in the region for lung monitoring by electrical impedance tomography during laparoscopy*. Biomedical Papers, 2018, 162.1: 43-46, doi: 10.5507/bp.2018.005.

K. Buzkova, D. Albrechtova. *Effect of Electrode Gel Application Between Patient's Skin and Electrode Belt on Electrical Impedance Tomography of the Thorax*. In: Lhotska, L., Sukupova, L., Lacković, I., Ibbott, G. (eds) World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering 2018. IFMBE Proceedings, vol 68/1. Springer, Singapore. doi: 10.1007/978-981-10-9035-6_15.

K. Buzkova, M. Skopek. *The Effect of fluid accumulation in stomach on electrical impedance tomography image of lungs*. Lékař a technika – Clinician and Technology. 2017, 47(1), pp. 11-14, ISSN 2336-5552.

K. Buzkova, K. Roubik. *The effect of electrode belt size selection upon evaluation of the distribution of ventilation using electrical impedance tomography*. In: 2015 E-Health and Bioengineering Conference (EHB). IEEE, 2015. p. 1-4, doi: 10.1109/EHB.2015.7391453.

K. Buzkova, J. Suchomel. *Use of electrical impedance tomography for quantitative evaluation of disability level of bronchopulmonary dysplasia*, 2013 E-Health and Bioengineering Conference (EHB), 2013, pp. 1-4, doi: 10.1109/EHB.2013.6707307.

K. Buzkova, J. Suchomel. *Measuring of Lung Resistivity of Extremely Pre-term Neonates with Bronchopulmonary Dysplasia Using Electrical Impedance Tomography*. 17th International Student Conference on Electrical Engineering POSTER 2013, May 16, 2013, Faculty of Electrical Engineering, CTU Prague.

K. Koldova, A. Rara, M. Muller, T. Tyll, K. Roubik. *Cranial electrode belt position improves diagnostic possibilities of electrical impedance tomography during laparoscopic surgery with capnoperitoneum*. Odesláni do Sensors MDPI během března 2023.

² Před rokem 2019 jsem publikovala pod dívčím jménem Buzková.

Příloha B – Souhlas etické komise



ETICKÁ KOMISE ÚSTŘEDNÍ VOJENSKÉ NEMOCNICE – VOJENSKÉ FAKULTNÍ NEMOCNICE PRAHA
Ethics Committee of the Central Military Hospital Prague
EU vojenské nemocnice 1200, 169 02 Praha 6 ☎ 973 203 550 ☎ 973 208386 ✉ eticka.komise@uvn.cz
www.uvn.cz

STANOVISKO ETICKÉ KOMISE K PROJEKTU VVI

OPINION OF THE ETHICS COMMITTEE ON RESEARCH PROJECT

Název projektu a stručně cíl projektu / Full Title of the Project and short message:

Monitorace plic pomocí impedanční tomografie (EIT) při laparoskopických operacích za použití kapnoperitonea

Řešitel (Příjmení, Jméno, Titul, Adresa instituce) / Applicant (Surname, Name, Title, Address of Institution):

MUDr. Martin Müller, Karim 1. LF UK a UVN, Ústřední vojenská nemocnice-vojenská fakultní nemocnice Praha, U Vojenské nemocnice 1200, Praha 6, 169 02

Uchazeč (Název, Adresa) / Sponsor (Name, Address):

Ústřední vojenská nemocnice – Vojenská fakultní nemocnice Praha

Projekt má charakter klinického hodnocení léku - nutno doložit žádost na SUKL, pojištění studie
Project has the characteristics of clinical trial on human medicinal product-regulatory body approval and insurance required

Projekt má charakter experimentu na zvířeti - je nutno požádat o stanovisko veterinární etické komise
Project has the characteristics of animal trial - opinion of EC for animal trials required

Jedná se o klinickou intervenční studii (vyšetření navíc, odběr navíc, randomizace, užití placeba apod.)
The characteristics of the trial is interventional (extra samples, diagnostics procedure, randomisation or use of placebo)

Jedná se o běžný, neintervenční postup - observační studie / The study is non-interventional (observative)

Seznam hodnocených dokumentů: název, verze, datum / List of all submitted documents: Document title, version, date

Seznam hodnocených dokumentů: název, verze, datum List of all submitted documents: Document title, version, date	Schváleno Approved		Na vědomí Due notice	
	Ano Yes	Ne No	Ano Yes	Ne No
Žádost o vyjádření Etické komise k plánované studii ze dne 9. 11. 2015	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Prohlášení o shodě PulmoVista 500 včetně dodatků	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Životopisy hlavního zkušejícího – MUDr. Martin Müller Životopisy spoluzkušejících – Ing. Kristýna Buzková	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sylabus výzkumného projektu	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Informovaný souhlas / Informace pro pacienta	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Dotazník Etické komise k předkládaným dokumentům ze dne 2. 11. 2015	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Protokoly experimentu: kontrolní skupina bez kapnoperitonea kontrolní skupina s kapnoperitonea	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

EK vydává / EC issues souhlasné stanovisko / favourable opinion

nesouhlasné stanovisko / not favourable

Zdůvodnění stanoviska EK / reasons for EC opinion:

Datum přijetí / Date of Submission: 10.11.2015

Jednací číslo / Reference Number: 108/8 – 104/2015-ÚVN

Datum jednání EK / Date of EC Session: 23.11.2015

Etická komise prohlašuje, že byla ustavena a pracuje podle jednacího řádu v souladu se správnou klinickou praxí (GCP) a platnými předpisy / The Ethics committee hereby declares that it was established and operates in accordance with its Rules of Procedure in compliance with Good Clinical Practice (GCP) and valid legal regulations.

23.11.2015
Datum / Date

Ústřední vojenská nemocnice
Vojenská lékařská nemocnice Praha
Etická komise
Předseda EK / Chairman of the EC
- 3 -


Podpis předsedy EK / Signature of Chairman the EC

Seznam členů Etické komise / List of the IEC members

Jméno a příjmení Name and Surname	Muž / Žena Male / Female	Odbornost Occupation	Závislost Liability	Hlasoval Voted
prof. MUDr. Přemysl Frič, DrSc.	M	Gastroenterologie	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
JUDr. Pavel Adam	M	Právo a právní věda	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
MUDr. Petr Hrabal	M	Patologická anatomie	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
MUDr. Zdeněk Štupárek	M	Soudní lékařství	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
MUDr. Jakub Černý	M	Anesteziologie a resuscitace	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
MUDr. Svatopluk Solaf	M	Diabetologie	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
MUDr. Libor Kameník, Ph.D.	M	Kardiologie	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
mjr. Mgr. Jan Blažek	M	Teologie	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
PhDr. Hana Pessrová, CSc.	F	Filozofie	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
plk. PhDr. Jiří Kloze, Ph.D.	M	Klinická psychologie	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
prof. MUDr. Mojmír Kasalický, CSc.	M	Chirurgie	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
MUDr. Filip Kramář	M	Neurologie	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
MUDr. Petr Výborný, CSc. FEBO	M	Oftalmologie	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
doc. MUDr. Bohumil Seifert, Ph.D.	M	Všeobecné praktické lékařství	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
MUDr. Tomáš Hnátek	M	Kardiologie	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

23.11.2015

Datum / Date

Ústřední vojenská nemocnice -
Vojenská lékařská nemocnice Praha
Etická komise
Předseda EK / Chairman of the EC

- 3 -



Podpis předsedy EK / Signature of Chairman the EC

Příloha C – Protokol ClinicalTrials.gov

ClinicalTrials.gov PRS
Protocol Registration and Results System

ClinicalTrials.gov Protocol Registration and Results System (PRS) Receipt

Release Date: February 24, 2021

ClinicalTrials.gov ID: NCT03038061

Study Identification

Unique Protocol ID: NVT108-8/104-2015/ÚVN
Brief Title: Ultrasound Detection of Position of Diaphragm During Laparoscopic Surgery (UDLaS)
Official Title: Ultrasound Detection of Presence of Diaphragm in the Region of Lung Monitoring Using Electrical Impedance Tomography During Laparoscopic Surgery
Secondary IDs:

Study Status

Record Verification: February 2021
Overall Status: Completed
Study Start: December 1, 2015 [Actual]
Primary Completion: February 24, 2021 [Actual]
Study Completion: February 24, 2021 [Actual]

Sponsor/Collaborators

Sponsor: Czech Technical University in Prague
Responsible Party: Sponsor
Collaborators: Military University Hospital, Prague

Oversight

U.S. FDA-regulated Drug: No
U.S. FDA-regulated Device: No
U.S. FDA IND/IDE: No
Human Subjects Review: Board Status: Approved
Approval Number: 108/8-104/2015-ÚVN
Board Name: Ethical Committee of the Military University Hospital in Prague
Board Affiliation: Military University Hospital in Prague
Phone: +420 973 203 760
Email: nina.vesela@uvn.cz
Address:

Ústřední vojenská nemocnice - Vojenská fakultní nemocnice Praha
K rukám Mgr. Niny Veselé

U Vojenské nemocnice 1200
169 02 Praha 6 - Břevnov

Data Monitoring: No

FDA Regulated Intervention: No

Study Description

Brief Summary: Position of diaphragm in the region of electrical impedance tomography measurement is to be determined by ultrasound in approx. 20 patients undergoing laparoscopic surgery. Data are to be obtained at three phases at supine horizontal position (during spontaneous breathing, at mechanically ventilated patient under general anesthesia with muscle relaxation and at mechanically ventilated patient under general anesthesia with muscle relaxation during insufflation of carbon dioxide into the peritoneal cavity to achieve exposure during laparoscopic surgery).

Detailed Description: During laparoscopic surgery, insufflation of carbon dioxide into the peritoneal cavity is conducted in order to optimize working space for surgeons. As a side effect, the abdominal pressure alters physiological thoraco-abdominal configuration and pushes the diaphragm and lungs cranially. Since lung image acquired by electrical impedance tomography (EIT) depends on the conditions within the thorax and abdomen, it is crucial to know the diaphragm position to analyze the effect of cranial shift of diaphragm on EIT images of the thorax. Presence of diaphragm in the region of EIT measurement is to be determined by ultrasound in approx. 20 patients undergoing laparoscopic surgery. Data are to be obtained at three phases at supine horizontal position (during spontaneous breathing, at mechanically ventilated patient under general anesthesia with muscle relaxation and at mechanically ventilated patient under general anesthesia with muscle relaxation during insufflation of carbon dioxide into the peritoneal cavity to achieve exposure during laparoscopic surgery). The results of this study will serve during design of a subsequent study dealing with optimization of EIT electrode belt position during laparoscopic surgery.

Conditions

Conditions: Laparoscopy

Keywords: Diaphragm
EIT
Laparoscopy

Study Design

Study Type: Interventional

Primary Purpose: Supportive Care

Study Phase: N/A

Interventional Study Model: Single Group Assignment
Single group assignment. Approx. 20 patients during laparoscopic surgery with capnoperitoneum.

Number of Arms: 1

Masking: None (Open Label)

Allocation: N/A

Enrollment: 20 [Actual]

Arms and Interventions

Arms	Assigned Interventions
Experimental: Experimental group Patients undergoing Laparoscopic Surgery	Patients undergoing Laparoscopic Surgery Data are to be obtained at three phases at supine horizontal position (during spontaneous breathing, at mechanically ventilated patient under general anesthesia with muscle relaxation and at mechanically ventilated patient under general anesthesia with muscle relaxation during insufflation of carbon dioxide into the peritoneal cavity to achieve exposure during laparoscopic surgery).

Outcome Measures

Primary Outcome Measure:

1. Position of Diaphragm Detected by Ultrasound Measurement in midclavicular line

[Time Frame: Within one laparoscopic surgery (1-3 hours)]

Eligibility

Minimum Age: 18 Years

Maximum Age:

Sex: All

Gender Based: No

Accepts Healthy Volunteers: No

Criteria: Inclusion Criteria:

- patients undergoing abdominal laparoscopic surgery

Exclusion Criteria:

- morbid obesity
- standard exclusion criteria for electrical impedance tomography according to the manufacturer

Contacts/Locations

Central Contact Person: Kristyna Buzkova, Ing.
Telephone: +420728848785
Email: kristynabuzkova@yahoo.com

Central Contact Backup: Karel Roubik, Prof. Ph.D.
Telephone: +420603479901
Email: roubik@fbmi.cvut.cz

Study Officials: Karel Roubik, Prof. Ph.D.
Study Director
Czech Technical University in Prague

Martin Müller

Study Principal Investigator
Czech Technical University in Prague / Military University Hospital, Prague

Locations: **Czechia**
Military University Hospital
Prague, Czechia, 16902
Contact: Kristyna Buzkova, Ing. +420728848785
Contact: Martin Muller, MUDr. mullemar@uvm.cz
Principal Investigator: Ales Rara, MUDr.

IPDSharing

Plan to Share IPD: No

References

Citations: Valenza F, Chevillard G, Fossali T, Salice V, Pizzocri M, Gattinoni L.
Management of mechanical ventilation during laparoscopic surgery. *Best Pract Res Clin Anaesthesiol.* 2010 Jun;24(2):227-41. Review. PubMed 20608559

Staehr-Rye AK, Rasmussen LS, Rosenberg J, Steen-Hansen C, Nielsen TF, Rosenstock CV, Clausen HV, Sørensen MK, VON H Regeur J, Gätke MR.
Minimal impairment in pulmonary function following laparoscopic surgery. *Acta Anaesthesiol Scand.* 2014 Feb;58(2):198-205. doi: 10.1111/aas.12254. Epub 2014 Jan 2. PubMed 24383568

Links:

Available IPD/Information: Type: Informed Consent Form
URL: <http://ventilation.fbmi.cvut.cz/wp-content/uploads/2017/01/Informed-Consent-Form.pdf>
Informed Consent

Příloha D - Smlouva o výpůjčce ventilátoru Engström Carestation

Strana : 1

Smlouva o výpůjčce

Smluvní strany:

České vysoké učení technické v Praze

se sídlem: Zikova 4, 166 36 Praha 6

jednající: prof. MUDr. Jozef Rosina, Ph.D., děkan Fakulty biomedicínského inženýrství,

se sídlem Nám. Sítná 3105, 272 01 Kladno

IČ: 68407700

DIČ: CZ68407700

bank. spojení: 43-7934810287/0100

dále jen „**půjčitel**“

a

Ústřední vojenská nemocnice – Vojenská fakultní nemocnice Praha

příspěvková organizace zřízená Ministerstvem obrany ČR

se sídlem: U Vojenské nemocnice 1200, 169 02 Praha 6

IČ: 61383082

DIČ: CZ61383082

bank. spojení: 32123881/0710, ČNB Praha 1

zastoupená: prof. MUDr. Miroslavem Zavoralem, Ph.D., ředitelem

dále jen „**vypůjčitel**“

uzavírají dle zákona č. 89/2012 Sb., občanský zákoník, ve znění pozdějších předpisů a za podmínek níže stanovených, tuto smlouvu o výpůjčce:

I.

Půjčitel je výlučným vlastníkem věci: Engström Carestation, v pořizovací hodnotě 817 990

Kč bez DPH. Specifikace věci: výrobce Datex-Ohmeda, Inc., Madison, USA, vyr.č.

CBCQ00996.

dále jen „**přístroj**“

II.

1. Půjčitel touto smlouvou přenechává bezplatně přístroj uvedený v čl. I do užívání vypůjčitel, který jej přijímá do výpůjčky.
2. Půjčitel prohlašuje, že přístroj je nový a nepoužitý. V případě, že jde o použitý přístroj je půjčitel povinen dodat vypůjčitelu Protokol o platné bezpečnostně technické kontrole.
3. Přístroj bude umístěn v sídle vypůjčitele na KARIM, ÚVN.
4. O předání přístroje bude proveden zápis.
5. Odpovědnými osobami za předání a převzetí přístroje jsou: Za předání: Ing. Kristýna Buzková, za převzetí: MUDr. Martin Müller.
6. Půjčitel se zavazuje, že o plánovaném termínu předání a převzetí přístroje bude kontaktovat Oddělení zdravotnické techniky (dále jen OZT) nejméně 2 dny předem.

III.

1. Půjčitel se zavazuje přístroj předat vypůjčitelu, a umístit jej na pracovišti vypůjčitele, o čemž obě smluvní strany sepíší zápis.
2. Spolu s přístrojem, který je zdravotnickou technikou ve smyslu zákona č. 268/2000 Sb., o zdravotnických prostředcích a o změně některých zákonů ve znění pozdějších předpisů, bude předáno též prohlášení o shodě a návod k použití v českém jazyce v listinné a elektronické podobě.
3. Půjčitel je povinen předat vypůjčitelu přístroj ve stavu způsobilém k řádnému užívání. Půjčitel se zavazuje provést na své náklady zaškolení odpovědných zaměstnanců vypůjčitele, o čemž bude vystaven písemný doklad tj. protokol o zaškolení.
4. Vypůjčitel je povinen užívat přístroj řádně a v souladu s účelem, ke kterému je přístroj určen. Vypůjčitel prohlašuje, že byl seznámen s obsluhou přístroje. Vypůjčitel je povinen chránit přístroj před jakýmkoli poškozením, ztrátou nebo zničením.
5. Vypůjčitel nese odpovědnost pouze za škody na přístroji způsobené užíváním, které není v souladu s účelem, ke kterému je přístroj určen. Půjčitel je oprávněn smlouvou okamžitě vypovědět, jestliže vypůjčitel věc užívá v rozporu s touto smlouvou.
6. Půjčitel se zavazuje, že po dobu zapůjčení přístroje zajistí bezplatný servis, opravy a validaci (bezpečnostně technickou kontrolu) přístroje včetně veškerého potřebného spotřebního materiálu (vyměňovaného při opravách – ne provozního spotřebního materiálu), a to vždy ve lhůtě 48 hodin od nahlášení potřeby opravy vypůjčitelem. Pokud však závadu na přístroji způsobil vypůjčitel porušením svých povinností stanovených touto smlouvou, hradí veškeré náklady spojené s opravou přístroje vypůjčitel.
7. Půjčitel se zavazuje, že veškerou dokumentaci o provedených činnostech na přístrojích jež jsou předmětem výpůjčky (např. protokoly BTK a servisní výkazy) provedených v době trvání zápůjčky předá neprodleně na OZT.
8. Půjčitel se dále zavazuje provádět upgrade softwaru přístroje.
9. Půjčitel se zavazuje pojistit na dobu zapůjčení přístroje na vlastní náklady.
10. Vypůjčitel nesmí přenechat přístroje k užívání třetí osobě.

IV.


1. Výpůjčka se sjednává na dobu pěti let s měsíční výpovědní lhůtou pro obě smluvní strany. Písemná výpověď musí být doručena druhé smluvní straně jinak je neplatná. Výpovědní lhůta začíná běžet dnem následujícím po dni doručení výpovědi druhé smluvní straně.
2. Vypůjčitel je povinen vrátit přístroj půjčitelu, jakmile jej přestane potřebovat, nejpozději však do konce doby výpůjčky. Půjčitel se zavazuje, že v takovém případě převezme na výzvu vypůjčitele přístroj v sídle vypůjčitele, a to do 5 dnů od vyzvání vypůjčitelem. Půjčitel si přístroj odveze na své náklady.

V.

1. Tato smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem podpisu oběma účastníky.
2. Tuto smlouvu lze měnit a doplňovat jen písemnými dodatky číslovanými vzestupnou, nepřerušovanou číselnou řadou.
3. Tato smlouva je vyhotovena ve čtyřech stejnopisech a každá ze smluvních stran obdrží po dvou.

V Praze dne 6. 11. 2015

za půjčitele


.....
prof. MUDr. Jozef Rosina, Ph.D.

děkan

Vysoká škola zdravotnická v Praze
Pakurská 13, 130 06 Praha 3
tel. 224 311 111
www.vsz.cz

V Praze dne

za vypůjčitele

.....
prof. MUDr. Miroslav Zavoral, Ph.D.

ředitel

Příloha E – Informovaný souhlas

Informovaný souhlas

a informace pro pacienta

Název projektu: Monitorace plic pomocí EIT při kapnoperitoneu

Hlavní řešitel, spoluřešitelé a jejich pracoviště: MUDr. Martin Müller, ÚVN Praha; prof. Ing. Karel Roubík, Ph.D., Ing. Kristýna Buzková, ČVUT v Praze, FBMI.

Vážená paní, vážený pane,

výzkumný projekt „*Monitorace plic pomocí elektrické impedanční tomografie (EIT) při kapnoperitoneu*“, prováděný v Ústřední vojenské nemocnici – Vojenské fakultní nemocnici Praha ve spolupráci s ČVUT v Praze, Fakultou biomedicínského inženýrství, se zabývá studiem distribuce ventilace při laparoskopických operacích prováděných pomocí kapnoperitonea. Elektrická impedanční tomografie (EIT) je zcela bezpečná neinvazivní monitorovací technika plicní ventilace, která je použitelná u lůžka pacienta 24 hodin denně. Pomocí EIT je u operačních výkonů prováděných za použití kapnoperitonea možné detekovat změny v distribuci ventilace a sledovat vliv kapnoperitonea na provzdušnění vybraných částí plic.

Cílem výzkumného projektu je zjistit, zda je možné pomocí EIT optimalizovat ventilaci během kapnoperitonea a zamezit vzniku patologií, jako např. kolaps alveolů. Jelikož současná literatura neuvádí zcela jednotné výsledky, je stanovený výzkumný cíl důležitý pro další výzkum v této oblasti i pro možné využití v praxi.

Průběh měření:

Experiment bude prováděn na pacientech podstupujících laparoskopickou operaci pomocí kapnoperitonea. Pacienti podstoupí standardní zákrok, před kterým, v jeho průběhu a po něm bude monitorována ventilace EIT systémem PulmoVista 500 od německé firmy Dräger Medical. Monitoring probíhá pomocí elektrodového pásu, který je připojen k samotnému EIT přístroji. Pásem prochází velmi slabý elektrický proud (v souladu s IEC 60601-1), na jehož základě je měřena elektrická rezistivita. Elektrodový pás bude umístěn na hrudník do úrovně podpaží a bude zaznamenán signál odpovídající klidné ustálené spontánní ventilaci (cca 30 s). Měření bude zahájeno při spontánním dýchání, tj. za vědomí pacienta, a potrvá dále během uvedení do anestezie a připojení na ventilátor až do ukončení zákroku. Následně bude cca na jednu minutu pacientovi navýšen end-expirační tlak s cílem možné kompenzace kolapsu alveolů. Získaná data budou dále zpracovávána.

Vylučovací kritéria a zdravotní rizika:

Přístroj PulmoVista 500 se nesmí používat u pacientů s kardiostimulátorem, s implantovaným kardioverterem/defibrilátorem (ICD) a u pacientů s jinými elektricky aktivními implantáty. Dále se nesmí používat u pacientů, jejichž pokožka je v oblasti umístění elektrodového pásu jakkoliv poškozená nebo překrytá obvazovým materiálem. Přístroj PulmoVista 500 by neměl být používán u pacientů s nekontrolovanými pohyby těla a u pacientů s BMI větším než 50 kg/m². Pacient podpisem tohoto informovaného podpisu stvrzuje, že těmto vylučujícím kritériím porozuměl a že tato vylučovací kritéria nenaplnuje.

Účast pacienta v tomto výzkumném projektu může být kromě přítomnosti výše popsaných vylučovacích kritérií ukončena v případě prokázání onemocnění respirační soustavy (CHOPN, astma a další).

Diskomfortem pro pacienty je čas, který je v důsledku monitorace EIT systémem navýšen oproti standardnímu průběhu zákroku maximálně o deset minut. Kromě uvedených vylučujících kritérií je metoda EIT zcela bezpečná a nejsou známy žádné vedlejší účinky ani rizika. Z naměřených dat nebudou vyvozovány jakékoli závěry o zdravotním stavu pacienta.

Účast na experimentu je zcela dobrovolná, bez nároku na jakoukoliv odměnu. Zároveň se nepředpokládají žádné finanční výdaje pacienta v souvislosti s touto studií.

Podepsáním tohoto písemného informovaného souhlasu souhlasíte s tím, že hlavní řešitelé a etická komise budou mít umožněn přímý přístup k původní klinické dokumentaci za účelem ověření průběhu studie anebo údajů, aniž dojde k porušení důvěrnosti informací o Vaší osobě, v míře povolené právními předpisy. Záznamy, podle nichž lze pacienta identifikovat, budou uschovány jako důvěrné a nebudou, v míře zaručené právními předpisy, veřejně zpřístupněny. Budou-li výsledky studie publikovány, totožnost pacienta nebude zveřejněna.

Vyskytne-li se informace, která by mohla mít vliv na rozhodnutí pacienta, zda pokračovat v účasti ve studii nebo ne, bude pacient o této skutečnosti včas informován.

Další informace týkající se této studie a práv pacientů lze získat u výše zmíněných řešitelů. V případě poškození zdraví v souvislosti se studií kontaktujte hlavního řešitele projektu.

Studie se zúčastní přibližně 40 pacientů.

Vaše účast ve studii je dobrovolná, můžete ji odmítnout nebo můžete od účasti ve studii kdykoliv odstoupit, a to bez udání důvodu a bez jakýchkoliv finančních, právních či jiných následků.

Prohlašuji a svým podpisem stvrzuji, že jsem se seznámil a porozuměl všemu výše uvedenému a souhlasím s účastí ve studii. Prohlašuji, že nesplňuji žádné vylučovací kritérium výše uvedené, které by znemožňovalo moji účast ve výzkumném projektu.

Jméno pacienta:

Datum narození:

Podpis pacienta:

Datum:

Odpovědný řešitel:

Podpis odpovědného řešitele:

Datum:

:

Příloha F: Protokol experimentu

Protokol experimentu

Monitorace plic pomocí elektrické impedanční tomografie u pacientů při operačním výkonu s kapnoperitoneem

Datum měření:	Štítek pacienta
Diagnóza:	
Operační výkon:	

Napojení a kalibrace EIT přístroje

- Zapojit EIT PulmoVista 500 na dostatečně dlouhý kabel a spustit jej.
- Provést kontrolu přístroje (Device Check) s EIT kabelem zapojeným do přístroje.
- Nasadit EIT pás č. 1 adekvátní velikosti na pacienta. Kabel označit štítkem 1.
- Nasadit EIT pás č. 2 adekvátní velikosti na pacienta. Kabel označit štítkem 2.
- Pás č. ____ v kraniální poloze – v úrovni axilly. Sternum musí být mezi elektrodami 1 a 16.
- Pás č. ____ v konvenční poloze – v úrovni 4. – 6. mezižebří. Sternum musí být mezi elektrodami 1 a 16.
- Umístit referenční elektrodu pásu č. 1 nad elektrodový pás do oblasti klíční kosti.
- Umístit referenční elektrodu pásu č. 2 co nejbliže k břichu, nesmí však zasahovat do chirurgického pole.

Jsou-li pásy pootočené, není možné experiment řádně vyhodnotit.

- Postupně zkontrolovat kontakt elektrod na obou pásech. V případě potřeby použít EKG gel.
- Zaznamenat frekvenci impulsů EIT systému č. 1 (automatické nastavení 110 kHz):

Frekvence EIT impulsů (kHz):

- Zaznamenat frekvenci impulsů EIT systému č. 2 (automatické nastavení 110 kHz):

Frekvence EIT impulsů (kHz):

Prostor pro poznámky

- Synchronizovat čas na EIT s ventilátorem Engström a s anesteziologickým záznamem. Nelze-li časy synchronizovat, zaznamenat odpovídající časy:

Čas EIT – řídicí čas (hh:mm):
Čas Engström (hh:mm):
Čas v anesteziologickém záznamu (hh:mm):

Měření před úvodem do celkové anestezie

- Spustit záznam EIT pás č. 1 – SPONT:

Začátek záznamu, čas EIT pás č. 1 (hh:mm):
Název souboru:

- Nechat pacienta v klidu 2 minuty spontánně dýchat, aby byla zaznamenána počáteční hodnota baseline. Pokud střední hodnota impedance v čase stále klesá, vyčkat, dokud se neustálí:

Čas začátku sekvence klidného dýchání (hh:mm):
--

- Spustit záznam EIT pás č. 2 – SPONT:

Začátek záznamu, čas EIT pás č. 2 (hh:mm):
Název souboru:

- Nechat pacienta v klidu 2 minuty spontánně dýchat, aby byla zaznamenána počáteční hodnota baseline. Pokud střední hodnota impedance v čase stále klesá, vyčkat, dokud se neustálí:

Čas začátku sekvence klidného dýchání (hh:mm):
--

Úvod do celkové anestezie

- Úvod do celkové anestezie.

Čas úvodu do celkové anestezie (hh:mm):

- Napojení pacienta na ventilátor Engström Carestation. Ventilací režim VCV, V_t 7 ml/kg IBW, F_{mand} dle $ETCO_2$, cíl normokapnie, I:E 1:2, PEEP 5 cmH₂O.

- Zaznamenat ventilační parametry:

V_t :	RR:
PEEP:	FiO_2 :
I:E:	Čas (Engström):

Prostor pro poznámky

Celkovou anestezii vést jako TIVA v kombinaci Propofol + Sufenta (Sufenta může být bolusově i kontinuálně), svalová relaxace nedepolarizujícími relaxancií.

Provést úvodní měření EELV

na ventilátoru Engström Carestation menu Spirometry → FRC INview, nastavit FRC O₂ na 10 % a použít volbu Start Single.

zaznamenat změřené hodnoty EELV:

FRC 1:	FRC 2:
Průměr FRC:	Čas měření (Engström):

Měření během UPV v celkové anestezii před zavedením kapnoperitonea

Zaznamenat 2minutové sekvenci klidné UPV bez manipulací.

Spustit záznam EIT pás č. 1 - UPV:

Začátek záznamu, čas EIT pás č. 1 (hh:mm):
Název souboru:

Spustit záznam EIT pás č. 2 – UPV:

Začátek záznamu, čas EIT pás č. 2 (hh:mm):
Název souboru:

Začátek chirurgického výkonu:

Čas začátku chirurgického výkonu (hh:mm):

Zaznamenat čas začátku kapnoperitonea:

Čas začátku kapnoperitonea (hh:mm):

Měření při zakládání kapnoperitonea

Spustit záznam EIT pás č. 2 – insuflace KAPNO:

Začátek záznamu, čas EIT pás č. 2 (hh:mm):
Název souboru:

Prostor pro poznámky

Měření po založení kapnooperitonea

- Spustit měřicí proceduru EELV po zavedení portů po založení kapnooperitonea
 - na ventilátoru Engström Carestation menu **Spirometry** → **FRC INview**, použít volbu **Start Single**.
 - zaznamenat změřené hodnoty EELV:

FRC 1:	FRC 2:
Průměr FRC:	Čas měření (Engström):

- Zaznamenat EIT postupně z obou systémů při kapnooperitoneu až do momentu před zahájením elektrokaterizace (domluvit se s chirurgem, aby použití elektrokauteru nahlásil a počkal na náš souhlas).
- Spustit záznam EIT pás č. 1 - KAPNO:

Začátek záznamu, čas EIT pás č. 1 (hh:mm):
Název souboru:

- Odpojit oba EIT kabely, aby se zabránilo spuštění bezpečnostního procesu na EIT přístrojích (po odpojení EIT kabelů nahlásit chirurgovi, že může začít používat elektrokauterizaci).
- Zaznamenat změnu polohy pacienta

Čas:	Výsledná poloha:
------	------------------

Měření EELV během probíhajícího operačního výkonu

- V rozmezí cca od 20. do 40. min po zahájení vlastního operačního výkonu provést měření EELV
 - na ventilátoru Engström Carestation menu **Spirometry** → **FRC INview**, použít volbu **Start Single**.
 - zaznamenat změřené hodnoty EELV:

FRC 1:	FRC 2:
Průměr FRC:	Čas měření (Engström):

Prostor pro poznámky

Znovuzapojení EIT po konci elektrokauterizace

Jakmile chirurg přestane používat elektrokauterizaci, obnovit měření EIT:

Zapojit zpět do přístrojů kabel EIT.

Spustit záznam EIT pás č. 1 - KAPNO:

Začátek záznamu, čas EIT pás č. 1 (hh:mm):
Název souboru:

Spustit záznam EIT pás č. 2 - KAPNO:

Začátek záznamu, čas EIT pás č. 2 (hh:mm):
Název souboru:

Provést měření EELV těsně před skončením kapnoperitonea

na ventilátoru Engström Carestation menu Spirometry → FRC INview, použít volbu Start Single.

zaznamenat změřené hodnoty EELV:

FRC 1:	FRC 2:
Průměr FRC:	Čas měření (Engström):

Zaznamenat čas konce kapnoperitonea:

Čas konce kapnoperitonea (hh:mm):

Zaznamenat změnu polohy pacienta

Čas:	Výsledná poloha:
------	------------------

Měření při ukončování kapnoperitonea

Spustit záznam EIT pás č. 2 – desuflace KAPNO:

Začátek záznamu, čas EIT pás č. 2 (hh:mm):
Název souboru:

Provedení manévru s PEEP

Zaznamenat ventilační parametry před zvýšením hodnoty PEEP:

V _T :	RR:
PEEP:	FiO ₂ :
I:E:	Čas (Engström):

Prostor pro poznámky

Před zvýšením PEEP provést měření EELV

na ventilátoru Engström Carestation menu **Spirometry** → **FRC INview**, použít volbu **Start Single**.

zaznamenat změřené hodnoty EELV:

FRC 1:	FRC 2:
Průměr FRC:	Čas měření (Engström):

Zvýšit hodnotu PEEP na 10 cmH₂O a zaznamenat ventilační parametry (stále spuštěn záznam EIT č. 2):

V _T :	RR:
PEEP:	FiO ₂ :
I:E:	Čas (Engström):

Provést měření EELV při zvýšené hodnotě PEEP

na ventilátoru Engström Carestation menu **Spirometry** → **FRC INview**, použít volbu **Start Single**.

zaznamenat změřené hodnoty EELV:

FRC 1:	FRC 2:
Průměr FRC:	Čas měření (Engström):

Pořídít cca 1minutovou sekvenci EIT záznamu s vyšším PEEP

Ukončit záznam EIT pás č. 2 a spustit záznam EIT pás č. 1:

Začátek záznamu, čas EIT pás č. 1 (hh:mm):
Název souboru:

Snižít hodnotu PEEP zpět na 5 cmH₂O a zaznamenat ventilační parametry:

V _T :	RR:
PEEP:	FiO ₂ :
I:E:	Čas (Engström):

Provést měření EELV po skončení PEEP manévru

na ventilátoru Engström Carestation menu **Spirometry** → **FRC INview**, použít volbu **Start Single**.

zaznamenat změřené hodnoty EELV:

FRC 1:	FRC 2:
Průměr FRC:	Čas měření (Engström):

Vyvedení pacienta z anestezie

- Zaznamenat čas extubace:

Čas extubace (hh:mm):

- Zaznamenat 2minutovou sekvenci spont. dýchání po extubaci.

- Spustit záznam EIT pás č. 1 – SPONT:

Začátek záznamu, čas EIT pás č. 2 (hh:mm):

Název souboru:

- Spustit záznam EIT pás č. 2 - SPONT:

Začátek záznamu, čas EIT pás č. 2 (hh:mm):

Název souboru:

- konec měření, odpojit pacienta od EIT.

Konec experimentu.

Prostor pro poznámky