



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ
Katedra biomedicínské techniky

**Fantom pánevní oblasti pro regionální
hypertermický systém**

**Phantom of pelvic region for regional
hyperthermic system**

Bakalářská práce

Studijní program: Biomedicínská a klinická technika

Studijní obor: Biomedicínský technik

Autor bakalářské práce: Kristýna Míková

Vedoucí bakalářské práce: doc. Dr.-Ing. Jan Vrba, M.Sc.

Kladno 2018/2019

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Míková** Jméno: **Krístýna** Osobní číslo: **465471**
Fakulta: **Fakulta biomedicínského inženýrství**
Garantující katedra: **Katedra biomedicínské techniky**
Studijní program: **Biomedicínská a klinická technika**
Studijní obor: **Biomedicínský technik**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Fantom pánevní oblasti pro regionální hypertermický systém

Název bakalářské práce anglicky:

Phantom of pelvic region for regional hyperthermic system

Pokyny pro vypracování:

Vytvořte homogenní fantom pánevní oblasti pacienta pro testování regionálního hypertermického systému. Pro konstrukci fantomu využijte plexisklovou nádrž, vyplněnou kapalným médiem o vhodných dielektrických vlastnostech. Složení kapalného média (vodného roztoku soli, který je svými dielektrickými vlastnostmi blízký svalové tkáni) určete na základě testování různých koncentrací soli ve vodě komerčním měřicím systémem DAK (Speag, Švýcarsko). Vyberte vhodné LED pro vizualizaci rozložení elektromagnetického pole. Navrhněte a realizujte plexisklový díl, do kterého půjde integrovat matice těchto LED a který bude možné vložit do fantomu pánevní oblasti na různé pozice. Proveďte RF expozici fantomu pánevní oblasti s vloženou maticí LED a zaznamenejte rozložení elektromagnetického pole.

Seznam doporučené literatury:

- [1] J. Vrba, Lékařské aplikace mikrovlnné techniky, ed. 1st, ČVUT Praha, 2003, ISBN 80-01-02705-8
- [2] A. Sihvola, Electromagnetic Mixing Formulae and Applications, ed. 1st, The Institution of Engineering and Technology, 2000, ISBN 0852967721

Jméno a příjmení vedoucí(ho) bakalářské práce:

doc. Dr.-Ing. Jan Vrba, M.Sc.

Jméno a příjmení konzultanta(ky) bakalářské práce:

doc. Ing. David Vrba, Ph.D., Ing. Tomáš Dříždál, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce: **18.02.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: **20.09.2020**



prof. Ing. Peter Kneppo, DrSc.
podpis vedoucí(ho) katedry



prof. MUDr. Ivan Dylevský, DrSc.
podpis děkana(ky)

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem: Fantom pánevní oblasti pro regionální hypertermický systém vypracovala samostatně a použila k tomu úplný výčet citací použitých pramenů, které uvádím v seznamu přiloženém k bakalářské práci.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů.

V dne

.....

Kristýna Míková

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych poděkovala především svému vedoucímu práce, panu doc. Dr.-Ing. Janu Vrbovi, M.Sc. za jeho odborné vedení práce, trpělivost, cenné rady a připomínky. Dále bych ráda poděkovala panu Ing. Ondřeji Fišerovi, Ph.D. za ochotu, trpělivost a spolupráci při měření.

ABSTRAKT

Fantom pánevní oblasti pro regionální hypertermický systém

Pro vyvíjený regionální mikrovlnný hypertermický systém byl vyroben kapalný fantom pánevní oblasti s vhodnými dielektrickými vlastnostmi pro účely testování regionálního systému. Cílem práce byl návrh nádrže pro kapalný homogenní fantom, návrh složení a realizace vhodné kapaliny s dielektrickými vlastnostmi odpovídající svalové tkáni, tyto vlastnosti dále proměřit komerčním systémem a porovnat s tabulkovými hodnotami. Dalším cílem byl návrh matice LED pro vizualizaci rozložení elektrického pole. 3D modely geometrií nádrže kapalného fantomu a stojanu pro LED matici byly vytvořeny v programu SOLIDWORKS®. Komponenty byly zaslány do výroby. Jako výplň nádrže fantomu byl hledán vhodný poměr destilované vody, propylenglykolu a chloridu sodného. Dielektrické vlastnosti kapaliny byly měřeny sondou DAK-12 od firmy SPEAG, která využívá metodu měření otevřeným koaxiálním koncem. Výsledná kapalina se skládá ze složek v hmotnostním poměru: destilovaná voda 84 %; propylenglykol 15,95 %; chlorid sodný 0,61 %. Realizované komponenty byly otestovány a výsledky jsou prezentovány ve formě fotografií. Byly nalezeny vhodné LED pro osazení matice a hotová matice byla podrobena testováním expozicí elektromagnetickým polem a výsledek byl fotograficky zaznamenán. Výsledek práce podpoří výzkum mikrovlnné hypertermie a její výuku na fakultě.

Klíčová slova

Regionální hypertermie, homogenní fantom, dielektrické vlastnosti, LED matice

ABSTRACT

Phantom of pelvic region for regional hyperthermic system

A liquid pelvic region phantom with appropriate dielectric properties has been made for testing the developed regional microwave hyperthermia system. The aim of the work was to design a tank for liquid homogeneous phantom, design of composition and realization of suitable liquid with dielectric properties corresponding to muscle tissue, measurement of these properties by commercial system and their comparison with table values. Another goal was to design a LED matrix for visualizing the electric field distribution. The 3D models of the liquid phantom tank geometry and the LED matrix holder geometry were created in CAD programme SOLIDWORKS®. Components were sent to production. A suitable ratio of distilled water, propylene glycol and sodium chloride were sought as the filler of the phantom tank. The dielectric properties of the liquid were measured with a DAK-12 probe from SPEAG, which uses an open-ended coaxial measurement method. The resulting liquid consists of components in weight ratio: distilled water 84%; propylene glycol 15.95%; sodium chloride 0.61%. The components have been tested and the results are presented as photographs. Appropriate LEDs were found to complete the matrix and the finished matrix was tested by electromagnetic field exposure and the results were photographed. The results of the work will support research on microwave hyperthermia and its education at the faculty.

Keywords

Regional hyperthermia, homogeneous phantom, dielectric properties, LED matrix

Obsah

Seznam symbolů a zkratk	9
Seznam obrázků	10
1 Úvod	12
1.1 Přehled současného stavu.....	13
1.1.1 Regionální hypertermie	13
1.1.2 Fantomy v regionální hypertermii	15
1.1.3 Homogenní fantomy	15
1.1.4 Výplně homogenních fantomů	15
1.1.5 Metoda zobrazení rozložení elektromagnetického pole pomocí LED matice	16
1.1.6 Systémy měření dielektrických vlastností	17
1.2 Cíle práce.....	19
2 Metody	21
2.1 Návrh nádrže pro fantom pánevní oblasti a stojanu LED matice	21
2.1.1 Rozměry fantomu	21
2.1.2 LED matice.....	22
2.2 Testování LED matice a vhodných LED	22
2.3 Měření dielektrických vlastností vhodné kapaliny.....	27
2.3.1 Způsob měření dielektrických vlastností.....	27
2.3.2 Postup míchání kapaliny.....	29
2.3.3 Vyhodnocení dat měření.....	31
3 Výsledky	32
3.1 Nádrž fantomu.....	32
3.1.1 3D model nádrže fantomu	32
3.1.2 Realizace nádrže fantomu.....	34
3.2 LED matice	36
3.2.1 3D model LED matice.....	36
3.2.2 Realizace LED matice	39
3.3 Testování LED matice a vhodných LED	42
3.4 Výsledky měření dielektrických vlastností kapaliny	45

4	Diskuse	46
5	Závěr	48
	Seznam použité literatury	49
	Příloha A: Doplnující fotografie	52
	Příloha B: Doplnující data	54
	Příloha C: Přílohy na CD	55

Seznam symbolů a zkratk

Seznam symbolů

Symbol	Jednotka	Význam
f	Hz	Frekvence
N	-	Počet měření
σ	S/m	Elektrická vodivost
ϵ_r	-	Relativní permitivita
M_m	g/mol	Molární hmotnost
ρ	kg/m ³	Hustota látek
t	°C	Teplota
k	-	Koeficient pro rozšířenou nejistotu
E	V/m	Intenzita elektrického pole
Z	Ω	Impedance
C	F	Elektrická kapacita
ω	rad/s	Úhlová frekvence
S_{11}	dB	Odrazový parametr
ϵ	F/m	Permitivita

Seznam zkratk

Zkratka	Význam
3D	Trojrozměrný prostor
M	Jednotky molární koncentrace používané v analytické chemii ($\approx 1000 \text{ mol/m}^3$)
LED	Light-emitting diode, diody emitující světlo
CAD	Computer-aided design, projektování pomocí počítače
PC	Osobní počítač

Seznam obrázků

Obrázek 1.1 Blokové schéma pro jednoduchý prstencový aplikátor regionální hypertermie se čtyřmi zdroji signálu [22].....	14
Obrázek 1.2 Fantom a LED matice dle [10], upraveno	16
Obrázek 1.3 Návrh LED matice, převzato z [20]	17
Obrázek 1.4 Zjednodušený diagram použití nejčastějších metod měření dielektrických vlastností, převzato a upraveno z [23]	18
Obrázek 1.5 Princip měření sondou pro měření dielektrických vlastností metodou otevřeného konce koaxiálního vedení (a) a jeho náhradní model (b), ϵ jako permitivita měřeného vzorku; převzato a upraveno z [24].....	19
Obrázek 2.1 Tělo fantomu (uvnitř) kopírující rozměry aplikátoru (vně), program COMSOL Multiphysics® [16]	22
Obrázek 2.2 Rozmístění různých druhů LED s označenými pozicemi	24
Obrázek 2.3 LED lepené silikonem.....	24
Obrázek 2.4 Zobrazení délky dipólů (5 cm).....	25
Obrázek 2.5 Sestava pro testování funkčnosti LED matice.....	25
Obrázek 3.1 Celkový pohled na model nádrže	32
Obrázek 3.2 Pohled shora, (mm)	33
Obrázek 3.3 Pohled zepředu, (mm)	33
Obrázek 3.4 Pohled ze strany, (mm).....	34
Obrázek 3.5 Fotografie vypuštěné nádrže fantomu v pozadí s aplikátorem hypertermie	34
Obrázek 3.6 Fotografie nádrže fantomu s napuštěným médiem uvnitř aplikátoru.....	35
Obrázek 3.7 Celkový pohled na model stojanu LED matice.....	36
Obrázek 3.8 Pohled na přední stěnu modelu LED matice, (mm).....	37
Obrázek 3.9 Pohled ze strany na model stojanu LED matice, (mm).....	38
Obrázek 3.10 Celkový pohled na model fantomu s vloženým modelem sestavy LED matice uvnitř	39
Obrázek 3.11 Realizovaný stojan LED matice s vloženými LED.....	40
Obrázek 3.12 Pohled shora na LED matici.....	40
Obrázek 3.13 Pohled zepředu na LED matici.....	41

Obrázek 3.14 Celkový pohled na sestavu – nádrž fantomu s vloženou LED maticí.....	41
Obrázek 3.15 Matice s různými LED umístěná do středu působení elektromagnetického pole nad anténu	42
Obrázek 3.16 Matice se stejnými LED umístěná do středu působení elektromagnetického pole nad anténu	43
Obrázek 3.17 Matice se stejnými LED umístěná 5 cm od středu po ose působení elektrické složky pole	43
Obrázek 3.18 Matice se stejnými LED umístěná 10 cm od středu po ose působení elektrické složky pole	44
Obrázek 3.19 Matice se stejnými LED umístěná 15 cm od středu po ose působení elektrické složky pole	44
Obrázek A.1 Fotografie nádrže fantomu	52
Obrázek A.2 Fotografie nádrže fantomu	52
Obrázek A.3 Fotografie nádrže fantomu zepředu.....	53
Obrázek A.4 Fotografie plné nádrže fantomu umístěného uvnitř aplikátoru	53
Obrázek B.1 Srovnání relativní permitivity výsledné kapaliny s relativní permitivitou svalové tkáně ve frekvenčním rozmezí 70-130 MHz	54
Obrázek B.2 Srovnání elektrické vodivosti výsledné kapaliny s elektrickou vodivostí svalové tkáně ve frekvenčním rozmezí 70-130 MHz	55

1 Úvod

Dnes existuje mnoho metod léčby rakoviny. Žádná z nich ale není tak dokonalá, aby se dala prohlásit za stoprocentně fungující. Vědci se takový způsob snaží najít, ale mezitím musí dále postupovat ve zdokonalování již známých, a ne tolik dokonalých metod léčby. Zkoumají se metody i kombinace metod a jejich úspěšnost jak v preklinických studiích, tak i na pacientech. U hypertermie je například dokázána větší úspěšnost léčby v kombinaci s jinými metodami léčby rakoviny [1, 2].

Hypertermie není příliš nová metoda léčby. První zmínky o léčení nádorů teplem pocházejí z dob starověkých národů, nejstarší ze starověkého Egypta a Indie. Konkrétnější informace potom máme z různých poznatků a výzkumů z poloviny 19. a začátku 20. století. Přesto tato metoda začala být populární až v 70. letech minulého století, kdy se s rozvojem techniky a elektrotechniky začalo pracovat na výzkumech s konkrétními výsledky. Vrcholem pak bylo první mezinárodní symposium týkající se hypertermie v roce 1975 a do roku 1977 měla již metoda své první pacienty [3, 4]. Nicméně je potřeba tento způsob léčby dále zkoumat a vylepšovat, neboť je v této oblasti stále prostor, kam se posouvat, nejen díky stále modernějším technologiím.

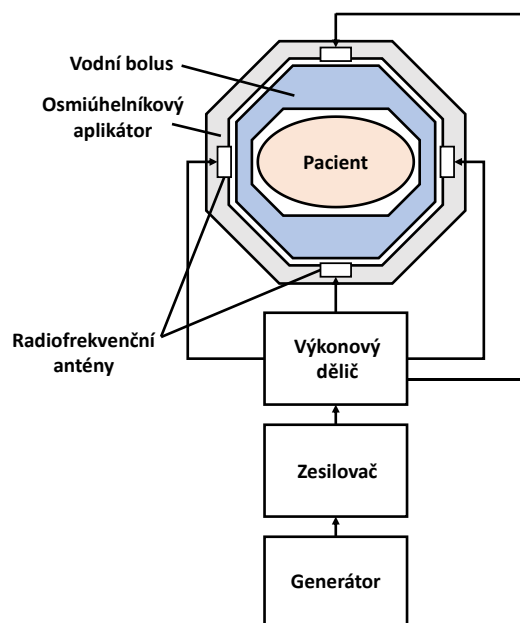
Jeden z vědeckých týmů zabývajících se lékařskými aplikacemi mikrovln a mikrovlnnou regionální hypertermií se nachází právě na Fakultě biomedicínského inženýrství, ČVUT v Praze. Tým momentálně vyvíjí vlastní systém pro regionální hypertermii. Tento systém je třeba testovat na konkrétním fantomu zastupujícím pánevní oblast.

1.1 Přehled současného stavu

Hypertermie je metoda léčby rakoviny, kdy je místo karcinomu vystaveno vyšším teplotám, obvykle 40–45 °C. Metodu lze rozdělit do tří skupin podle rozsahu tepelného působení. Lokální hypertermií se léčí především karcinomy na povrchu těla nebo těsně pod kůží pacienta, případně se využívá přirozených fyziologických otvorů člověka. Využívá elektromagnetické či ultrazvukové energie a je zde zaměřeno přesné místo působení tepla. Celotělová hloubková hypertermie se naopak snaží zahřát mnohem větší objem tkání až celé tělo. Protože jsou zde zahřívány ve velké míře i zdravé tkáně, je teplota ohřevu snížena na maximální hodnotu 42 °C. Regionální hypertermií se léčí tkáně a orgány uloženy hluboko v dutině břišní. Aby se mohla hodnota ohřevu zvýšit až na 43 °C, je nutné zajistit co nejpřesnější lokalizaci cílového místa. V moderní hypertermii je snaha o neinvazivnost, a proto se tato problematika nejčastěji řeší například mikrovlnným ohřevem [2, 5].

1.1.1 Regionální hypertermie

V regionální hypertermii je využíváno radiofrekvenční energie o frekvenci 70–120 MHz [6, 7]. Antény jsou rozmístěny v řezu kolem těla pacienta a nastavením frekvence, amplitud a fází signálů z různých směrů je zaměřeno přesné místo působení energie, kde dochází k dynamickému ohřevu tkáně [1, 2, 8]. Na Obrázku 1.1 se nachází blokové schéma pro jednoduchý aplikátor hypertermie. Základem je generátor s velmi výkonným zesilovačem (výkon až 2000 W). Dále se signál upravuje a posílá do aplikátoru, kde jsou jednotlivé zdroje signálu – antény uspořádány do kruhu kolem těla pacienta. Povrch těla je pak chlazen vodním bohem.[22]



Obrázek 1.1 Blokové schéma pro jednoduchý prstencový aplikátor regionální hypertermie se čtyřmi zdroji signálu [22]

Terapie využívá teplo, neboť rakovinné buňky jsou pro teploty nad $41\text{ }^{\circ}\text{C}$ více senzitivní než buňky zdravé. Teplo také inhibuje syntézu RNA, DNA a bílkovin, blokuje buňky v přechodu z S fáze do G_2 fáze a teplo vyvolává v maligních buňkách apoptózu [9]. Zdravé buňky naopak přežívají vystavení teplotám až do $45\text{ }^{\circ}\text{C}$. Hypertermie má významný účinek především v kombinaci s jinými protirakovinnými terapiemi, mnohonásobně zvyšuje účinnost chemoterapie a radioterapie. Pro dostatečnou účinnost se musí hypertermie aplikovat do několika hodin po těchto terapiích [1, 2].

Pro regionální hypertermii je důležité především plánování léčby, které musí být přesné, aby se zamezilo zahřívání zdravé okolní tkáně. Typické pro regionální hypertermii je zahřívání povrchu těla pacienta, které je snaha minimalizovat úpravami signálu nebo chladícím systémem povrchu těla – vodním bolem. Rozložení elektromagnetického pole lze pomocí numerických metod vypočítat, nebo se dá využít měření amplitudy elektrického pole uvnitř exponovaného fantomu lidského těla s podobnými dielektrickými vlastnostmi, případně měření rozložení teploty uvnitř fantomu a rozložení amplitudy elektrického pole přepočítat [3, 10].

1.1.2 Fantomy v regionální hypertermii

Pro testování regionálního hypertermického systému se používá celá řada druhů fantomů. Existují fantomy heterogenní, u kterých jsou rozlišeny struktury jednotlivých tkání a zároveň se snaží napodobit reálné rozložení orgánů v těle. Různé jsou i materiály, ze kterých jsou fantomy vyráběny. U heterogenních – suchých fantomů se jedná nejčastěji o pevnou strukturu realizovanou agarovou želatinou či silikonem, aby se zamezilo pohybu fantomů jednotlivých tkání v prostoru a zároveň, aby nedošlo ke smíchání struktur [11, 12]. Nevýhodou je náročnější výroba fantomu a jeho neuniverzálnost týkající se právě rozměrů a uspořádání orgánů – tyto vlastnosti se u každého jedince liší. Homogenní fantomy se snaží napodobit dielektrické vlastnosti pouze jedné tkáně, nejčastěji svalu. Vodní homogenní fantomy jsou založeny na vodě jako rozpouštědlo látek. Jsou taktéž ideálnější z hlediska vlastností týkajících se teplotní vodivosti, neboť tkáně jsou z velké části tvořeny vodou. [3, 11]

1.1.3 Homogenní fantomy

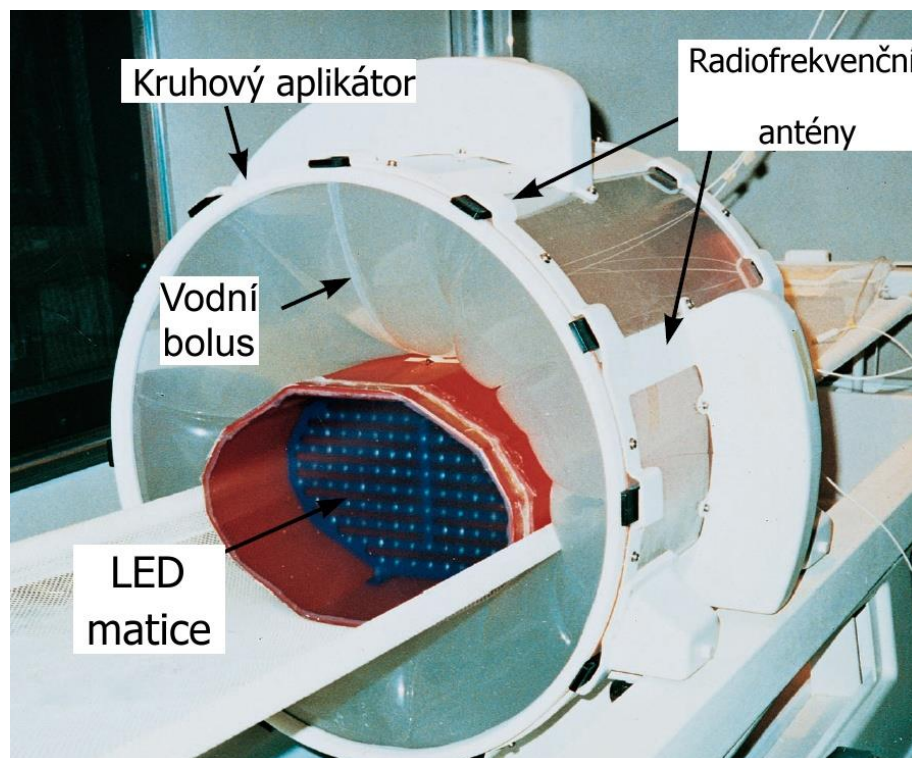
Homogenní fantomy jsou realizovány jako nádrž s podobnými rozměry lidského těla. Nádrž bývá napuštěna vodným roztokem s co nejpodobnějšími dielektrickými vlastnostmi nahrazované tkáně či části těla. Pro účely testování vyvíjeného systému uvažujeme vnitřní strukturu fantomu homogenní.

1.1.4 Výplně homogenních fantomů

Základem pro výplň fantomů bývá roztok soli [3, 10, 13]. Chlorid sodný zvyšuje vodivost látek a jen mírně snižuje permitivitu [14]. Často jsou přidávány i jiné látky, například různé alkoholy, které snižují permitivitu, či hliníkový prášek, který permitivitu naopak zvyšuje [3, 15]. Kapalina ve fantomech bývá zahuštěna želatinou či xantanovou gumou, přidávají se oleje, pevné částice a bývají zde přidávány i konzervační látky a látky vhodné pro konkrétní druhy výzkumu [12]. Pro naše účely bude nejvhodnější zvolit nejjednodušší verzi vyplňující kapaliny, a to vhodný poměr vody, alkoholu a soli.

1.1.5 Metoda zobrazení rozložení elektromagnetického pole pomocí LED matice

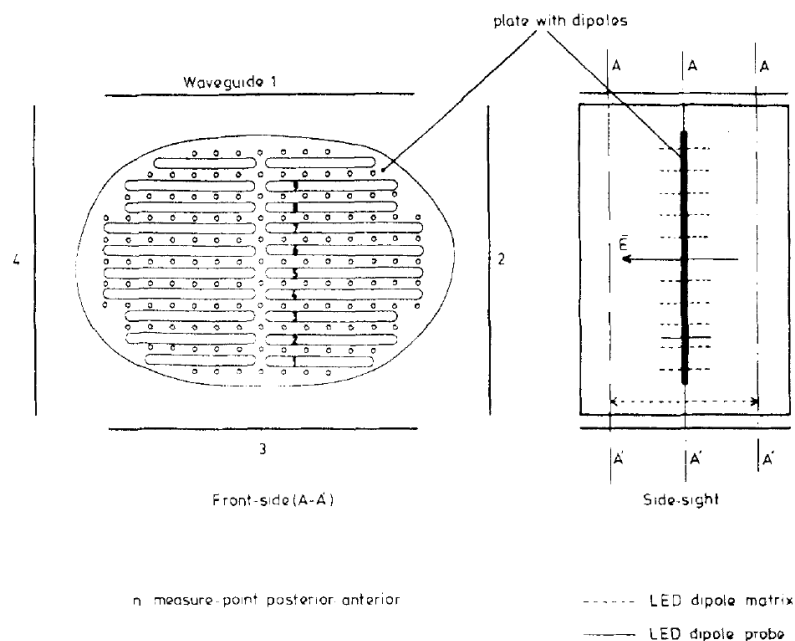
Jednou z mnoha metod vizualizace rozložení elektromagnetického pole je využití sondy s pravidelně uspořádanými diodami emitujícími světlo. LED diody svítí právě v místě soustředěné energie – metoda je tedy klíčová pro rychlou a přesnou lokalizaci místa působení. Obrovskou výhodou této metody je totiž okamžité zobrazení rozložení pole a rychlá odpověď na změny v nastavení jednotlivých vysílačů. Správné místo je tedy rychle a jasně lokalizováno. Naopak nevýhodou může být malé rozlišení matice – fyzické rozměry diod nikdy nedovolí potřebné rozlišení. Další nevýhodou je absence konkrétních parametrů pole a fakt, že měříme pouze jednu komponentu (i když dominantní) elektrického pole ve směru osy fantomu. Rozložení pole sice vidíme, ale chybí nám vlastnosti v jednotlivých bodech. Pokud ale máme energii lokalizovanou na konkrétní ploše v průřezu, není už takový problém vlastnosti numericky přepočítat pouze na této malé části na rozdíl od celé plochy. Samozřejmě existují i jednodušší metody získání konkrétnějších vlastností. Použít se dá například termokamera, její použití ale není ideální pro vodní homogenní fantomy, nebo můžeme před každou diodu v matici umístit senzor reagující na světlo a pomocí vytvořeného algoritmu převést množství světla na intenzitu elektrického pole. [20, 21] Na Obrázku 1.2 je fantom s LED maticí dle [10].



Obrázek 1.2 Fantom a LED matice dle [10], upraveno

LED diody jsou v matici poskládány pravidelně ve formě dipólů – dráty vedoucí do samotné diody jsou ohnuty proti sobě a oba jsou rovnoběžné se směrem dominantní složky vektoru elektrického pole. Dráty bývají ošetřeny protikorozním sprejem. Délka rozstupů bývá 2 cm a délka dipólů bývá 5 cm – tento parametr je ale upravován v souvislosti s citlivostí LED diod na elektrické pole, neboť vodiče diod fungují v elektromagnetickém poli jako antény a jejich délkou ovlivňujeme indukované napětí. [10, 20, 21]

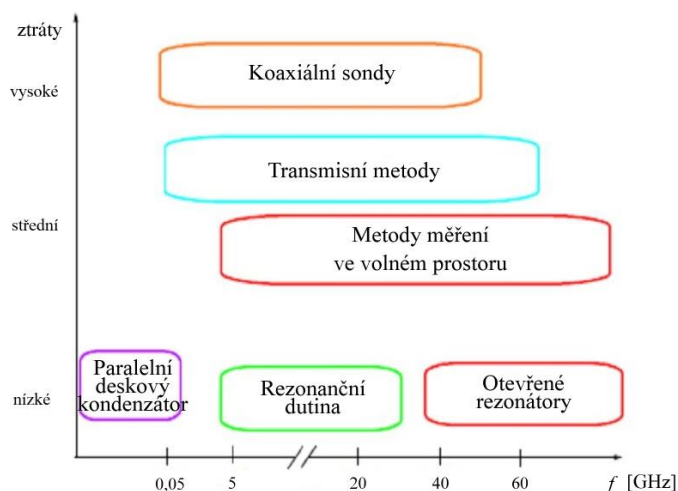
Na Obrázku 1.3 je návrh matice LED pro fantom dle [20], kterým bude navrhovaná matice inspirována. Na levé straně je pohled na matici zepředu, je zde využíváno čtyř zdrojů – antén elektromagnetického signálu. Na pravé straně jsou naznačeny dipóly LED a nakreslen vektor intenzity elektrického pole \vec{E} .



Obrázek 1.3 Návrh LED matice, převzato z [20]

1.1.6 Systémy měření dielektrických vlastností

Existuje mnoho systémů měření dielektrických vlastností látek, výběr záleží na mnoha faktorech. Základním parametrem pro výběr bývá frekvence f , pro které chceme vlastnosti měřit, nebo požadovaná relativní permitivita ϵ_r . Dále závisí na teplotě, vlastnostech materiálu měřeného vzorku, formě látky, velikosti vzorku a zda můžeme vzorek nebo jeho část zničit. Základní rozdělení používaných metod je na Obrázku 1.4. [23]



Obrázek 1.4 Zjednodušený diagram použití nejčastějších metod měření dielektrických vlastností, převzato a upraveno z [23]

Pro naše účely je nejvhodnější metoda využívající odrazné – koaxiální sondy. Metoda umožňuje pohodlné měření v širokém frekvenčním pásmu a je vhodná pro měření kapalin a polotekutých látek. Pro měření je důležitá precizní výroba vzorku, ve kterém se nesmí nacházet vzduchové bubliny, či jiné artefakty, které by mohly zkreslit výsledky měření. Výhodou je také nedestruktivní způsob měření. [23]

Sonda je připojena koaxiálním kabelem do vektorového analyzátoru (Obrázek 1.5, a). Sondu lze aproximovat náhradním ekvivalentním obvodem skládajícího se ze dvou paralelně zapojených kondenzátorů, kde první kondenzátor představuje kapacitu sondy C_f související s uzavřeným elektrickým polem mimo měřený vzorek a druhý kondenzátor je modelem kapacity pro vybraný měřený vzorek $C_0\varepsilon$ (Obrázek 1.5, b). Vektorový analyzátor pak zpracovává odrazový koeficient S_{11} , který je definován vztahem

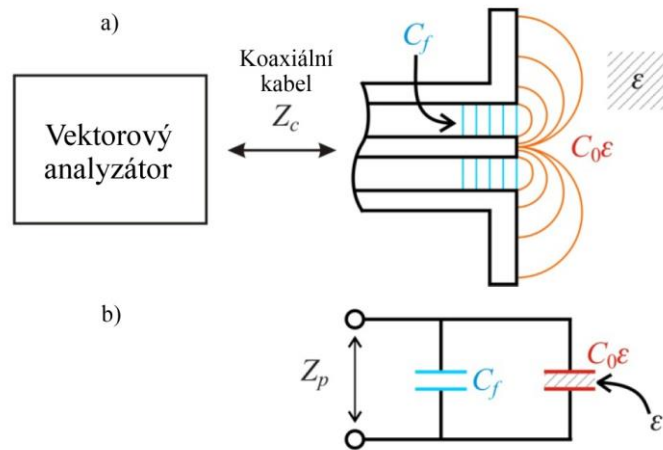
$$S_{11} = \frac{Z_p - Z_c}{Z_p + Z_c}, \quad (1.1)$$

kde Z_c je impedance koaxiálního kabelu (většinou 50Ω) a Z_p je impedance senzoru daná součtem paralelně zapojených kondenzátorů C_f a $C_0\varepsilon$ dle

$$Z_p = \frac{1}{j\omega(C_f + C_0\varepsilon)}, \quad (1.2)$$

kde ω je úhlová frekvence. [24]

Počítačový software, dodávaný firmou vyrábějící zmíněné sondy, poté zpracovává signál z vektorového analyzátoru porovnáváním hodnot s tabelovanými hodnotami pro prostředí, na která je sonda předem kalibrována. Software potom podává výsledky měření ve formě dielektrických vlastností vzorku závislých na frekvenci v určitém čase.



Obrázek 1.5 Princip měření sondou pro měření dielektrických vlastností metodou otevřeného konce koaxiálního vedení (a) a jeho náhradní model (b), ϵ jako permitivita měřeného vzorku; převzato a upraveno z [24]

1.2 Cíle práce

Cílem práce je návrh nádrže fantomu pánevní oblasti pro účely výzkumu na vyvíjeném mikrovlnném regionálním hypertermickém systému a pro účely výuky na fakultě. Nádrž by měla kopírovat tvar již vytvořeného aplikátoru vyvíjeného hypertermického systému, pro který bude fantom používán [16]. Délka fantomu by měla být dostatečně velká pro manipulaci uvnitř aplikátoru a zároveň by zde měl být prostor pro dostatečně velký otvor z horní strany nádrže. Důvodem je plánované vložení LED matice pro vizualizaci rozložení elektrického pole a pro snadnější údržbu fantomu. Pro naše účely bude geometrie fantomu aproximovat vnější rozměry pánevní oblasti [17]. Fantom bude inspirován fantomem uvedeným v [3, 10, 13, 18] a fantomem používaným firmou Pyrexar.

Dalším cílem práce je návrh matice LED pro vizualizaci rozložení elektromagnetického pole uvnitř fantomu. LED matice bude inspirována maticemi uvedenými v [10, 20, 21]. Matice bude kopírovat vnitřní stěny fantomu v jeho řezu a měla by být kolmá na vektor působení elektrického pole. Současně je nutné zvolit ideální druh LED.

Součástí práce bude také návrh a měření dielektrických vlastností vhodné kapaliny nahrazující svalovou tkáň. Tímto roztokem bude fantom vyplněn. Pro naše účely bude nejvhodnější vodný roztok soli a alkoholu, který umožní vložit matici LED pro vizualizaci rozložení elektrického pole, či vkládání sond pro měření elektrického pole [10, 13]. Pracovní frekvence vyvíjeného hypertermického systému je 70 MHz. Elektrické parametry svalové tkáně, které se budeme snažit poměrem složek napodobit, jsou dle [19] rovny měrné elektrické vodivosti $\sigma = 692$ mS/m a relativní permitivitě $\epsilon_r = 70,8$ při frekvenci 70 MHz.

Závěrem celé práce bude testování celého fantomu a LED matice.

2 Metody

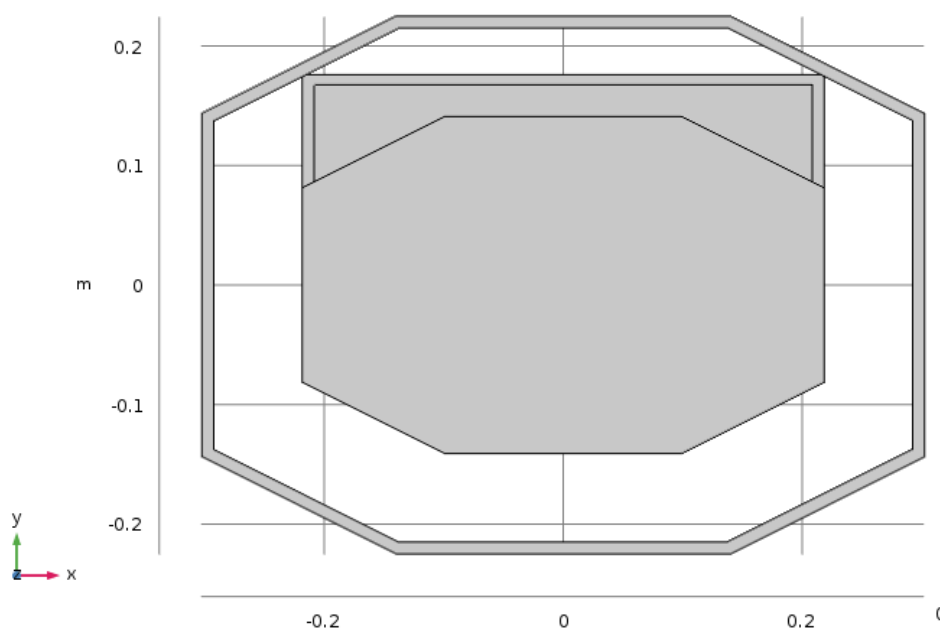
Práce se dělí na tři části. První část je návrh nádrže pro fantom pánevní oblasti, druhou částí je návrh LED matice pro vizualizaci rozložení elektromagnetického pole. Třetí část se zabývá návrhem vhodného média pro vyplnění nádrže fantomu a měřením jeho dielektrických vlastností.

2.1 Návrh nádrže pro fantom pánevní oblasti a stojanu LED matice

Modely nádrže fantomu a stojanu pro matici LED byly vytvořeny pomocí CAD programu Solidworks®. 3D modely byly následně odeslány třetí straně, která podle modelů provedla realizaci komponentů. Výsledné návrhy jsou prezentovány ve formě popisů 3D modelů a realizované komponenty jsou prezentovány ve formě fotografií.

2.1.1 Rozměry fantomu

Tělo fantomu kopíruje tvar již navrženého aplikátoru vyvíjeného systému [16]. Tělo fantomu má tvar nepravidelného osmiúhelníku s rovnoběžnými protilehlými stranami a se stejnými velikostmi úhlů jako u aplikátoru (Obrázek 2.1). Rozměry fantomu aproximují vnější rozměry pánevní oblasti lidského těla [17]. Délka fantomu by měla být dostatečně velká, aby umožňovala snadnou manipulaci a posunování fantomu uvnitř aplikátoru. Také by zde měl být dostatečný prostor pro otvor do nádrže.



Obrázek 2.1 Tělo fantomu (uvnitř) kopírující rozměry aplikátoru (vně), program COMSOL Multiphysics® [16]

2.1.2 LED matice

LED matice je navržena ve formě plastové desky s požadovaným tvarem. Rozměry LED matice kopírují rozměry vnitřních proporcí nádrže fantomu, avšak stojan zde má určitou pohybovou rezervu. Jako způsob připevnění diod byly zvoleny kruhové otvory o mírně větším průměru, než mají klasické LED s 5mm průměrem, ale menší než průměr obruby v dolní části pouzdra 5mm diody. Pouzdro LED se provlékne otvorem společně s jedním přívodním vodičem, pro který je připraveno malé vykrojení na straně hlavního otvoru, diody tak ve stojanu mechanicky drží. V případě vypadávání je lze připevnit lepidlem, které nereaguje s médiem uvnitř fantomu. Stojan pro hlavní desku je realizován jako dvě malé desky, které se kolmo zasunují do hlavní desky LED matice.

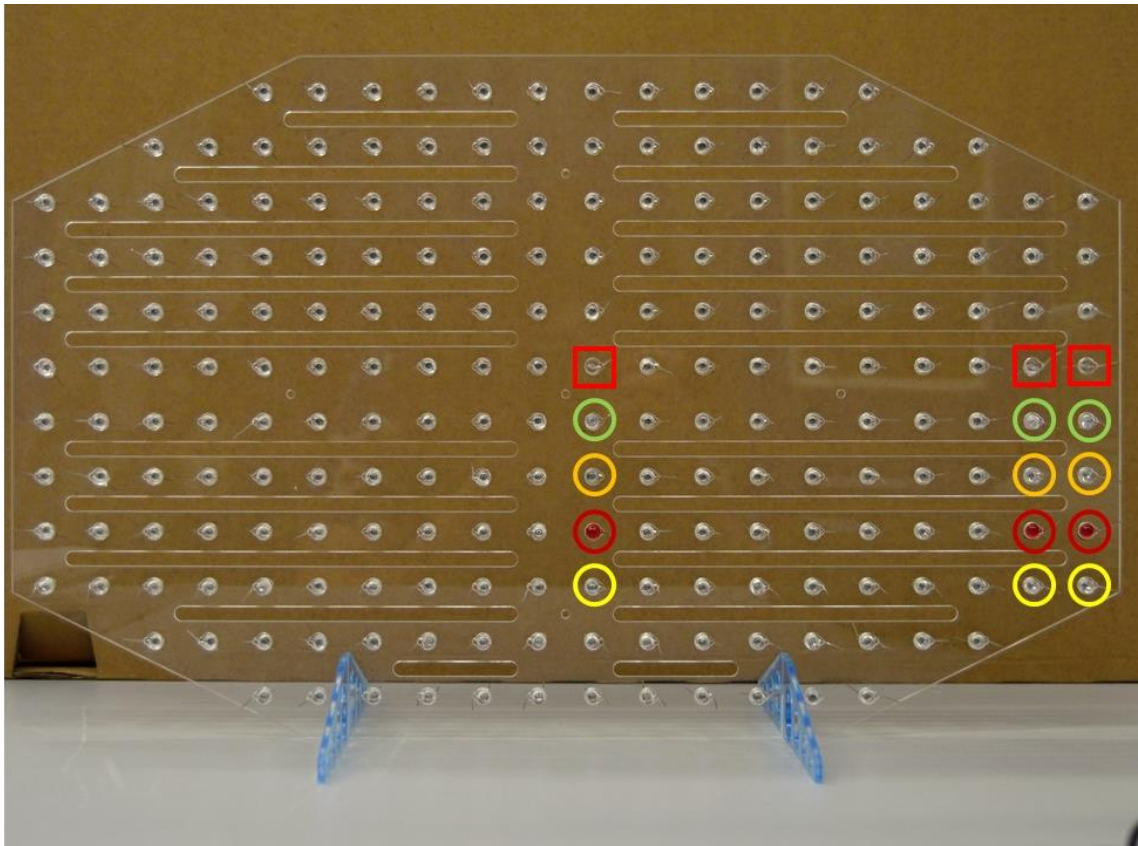
2.2 Testování LED matice a vhodných LED

Pro výběr vhodných LED byly klíčové následující parametry. Aby se nemusel u generátoru používat příliš vysoký výkon, mělo by být prahové napětí LED v propustném směru co nejnižší, což obecně splňují diody červené barvy. Dalším logickým požadavkem je tedy co nejvyšší hodnota poměru svítivosti a uvedeného proudu. O dalších parametrech, které by LED měly mít, se dá spekulovat. V Tabulce 2.1 jsou uvedeny parametry vybraných LED. Diody byly vybrány tak, aby jednotlivé parametry

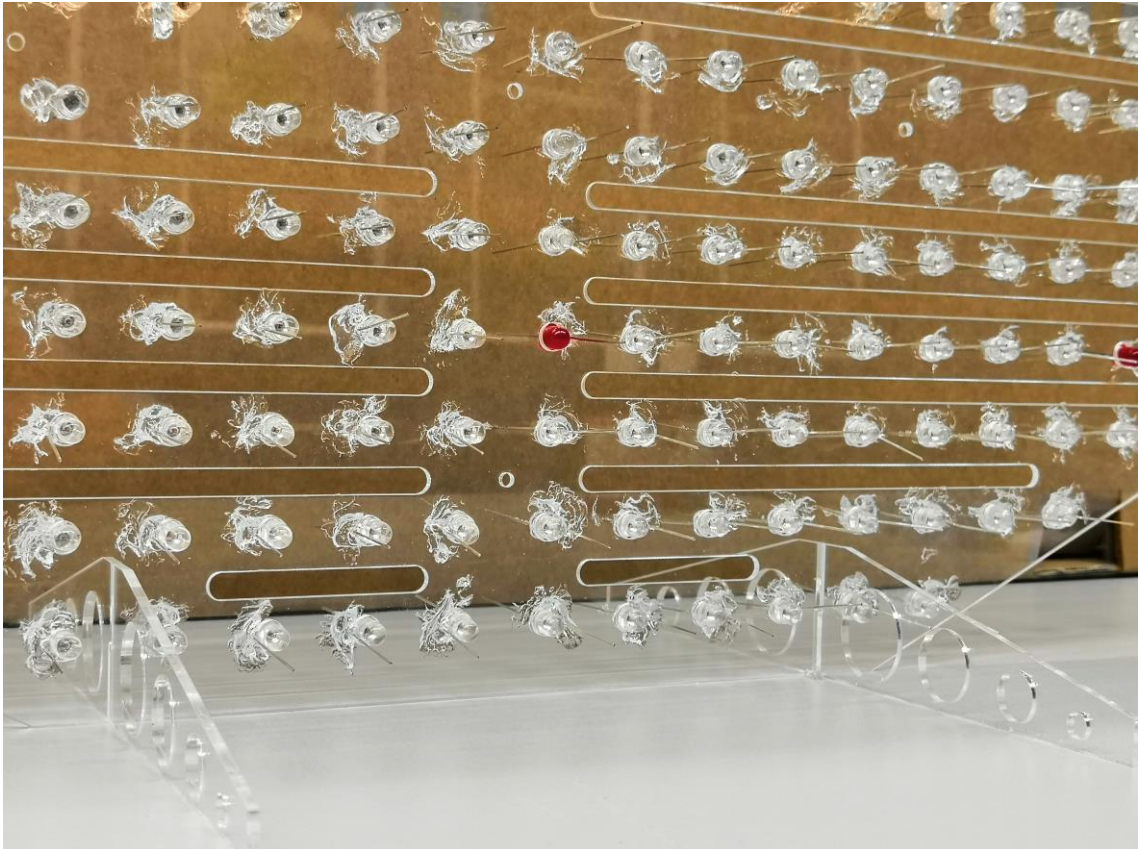
diod zaujaly co největší spektrum možností. Jako dioda, která by měla s co největší pravděpodobností fungovat, byla zvolena LED s označením 503UYC2E-Y2-2BE. Má červenou barvu, její pouzdro je čiré – dovoluje tedy se soustředit na co nejmenší světelný bod. Má nejvyšší svítivost v poměru s hodnotou proudu a optimální vyzařovací úhel. Ostatní typy byly zvoleny jako variace těchto parametrů.

Na Obrázku 2.2 se nachází rozmístění diod ve stojanu. Celý stojan byl vyplněn diodami 503UYC2E-Y2-2BE, které nemají na obrázku žádné označení pomocí značky. Ostatní LED byly rozmístěny po třech kusech přibližně doprostřed a na kraj stojanu. Diody jsou označeny značkou dohledatelnou v Tabulce 2.1.

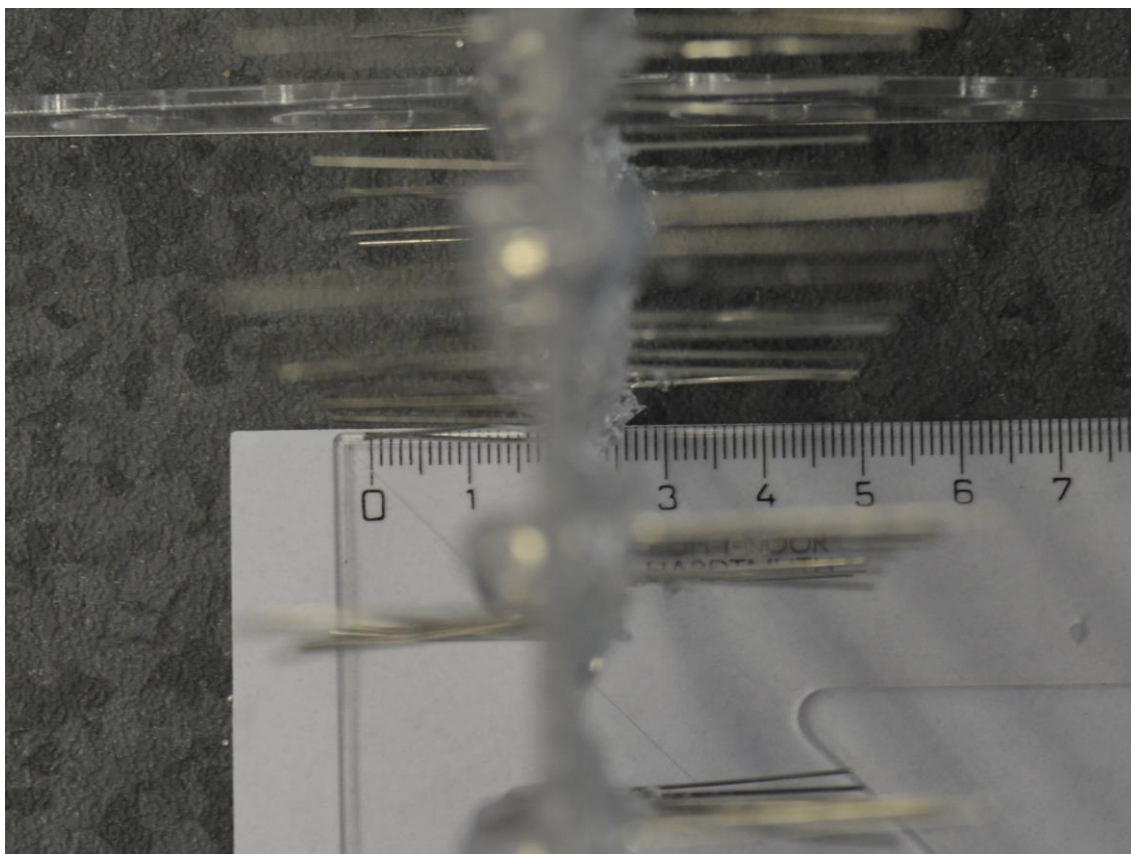
Pro testování matice bylo nutné LED přilepit pomocí silikonu (T-REX® CRYSTAL, SOUDAL), který se dá snadno z plastového povrchu odstranit pro výměnu LED. Silikon zabraňuje vypadávání LED ze stojanu a umožňuje přesné narovnání dipólů do opačných směrů (Obrázek 2.3). Diody byly vsazeny do stojanu kladným dipólem vpřed – ve směru šíření světla, délka dipólů je 5 cm (Obrázek 2.4). Na Obrázku 2.5 se nachází sestava použitá pro testování LED matice. Použita byla flíčková anténa připojená ke generátoru signálu, který byl připojen k PC. Kmitočet signálu byl nastaven na 70 MHz. Nejdříve byla testována strana s různými LED a poté strana s vybranými LED. Výsledky jsou prezentovány ve formě fotografií po úsecích 5 cm od středu působení elektromagnetického pole. Matice byla posouvána po ose elektrické složky.



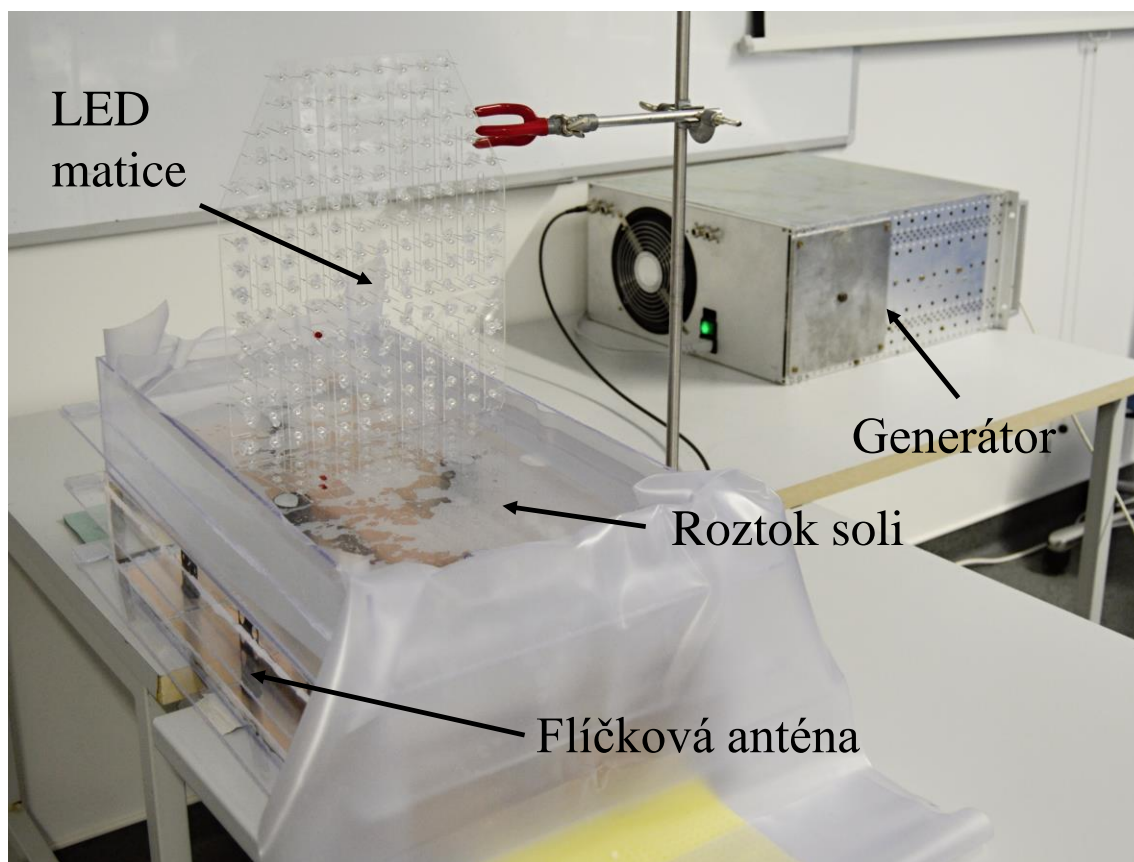
Obrázek 2.2 Rozmístění různých druhů LED s označenými pozicemi



Obrázek 2.3 LED lepené silikonem








Obrázek 2.4 Zobrazení délky dipólů (5 cm)



Obrázek 2.5 Sestava pro testování funkčnosti LED matice

Tabulka 2.1 Vybrané LED a jejich parametry

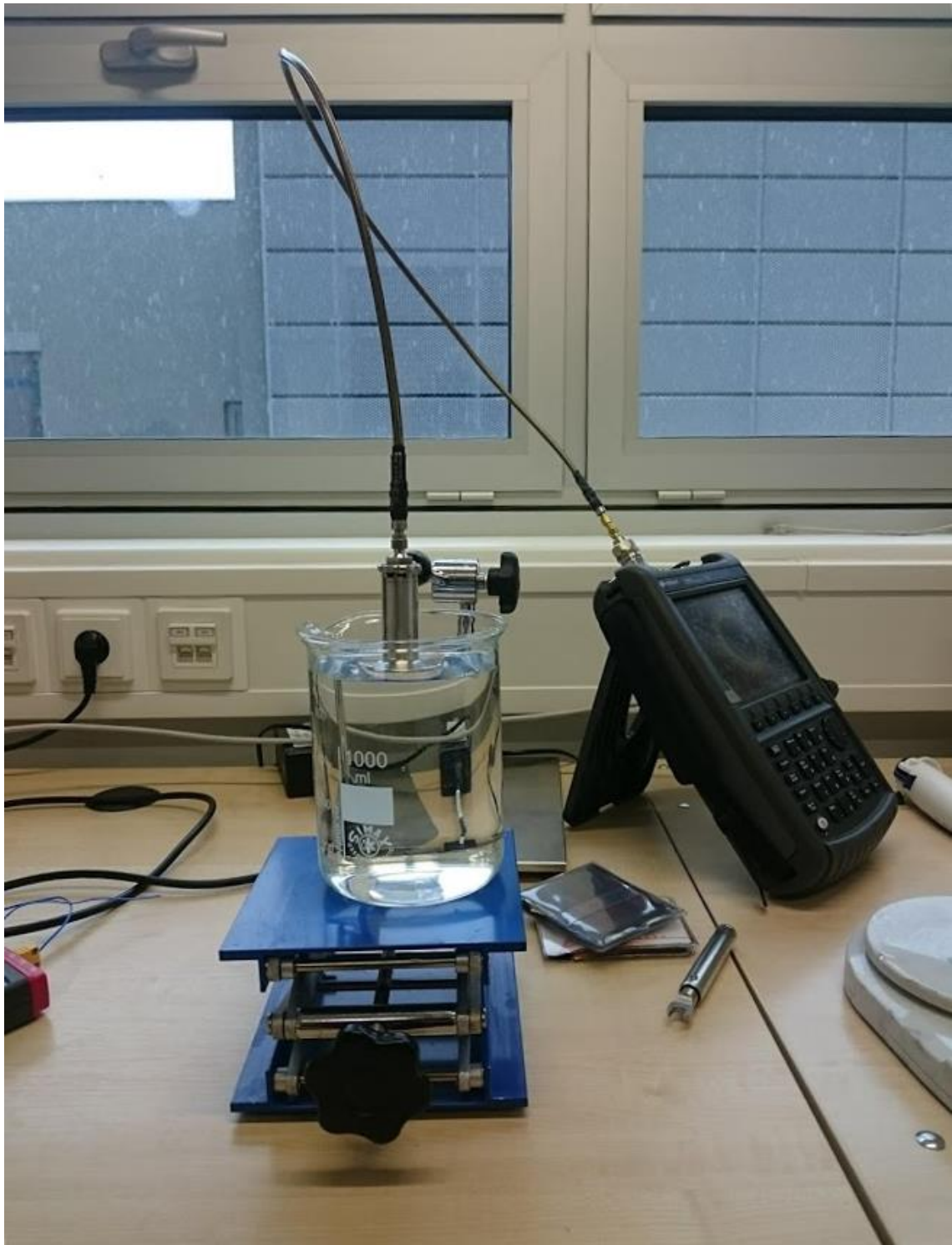
Označení	Barva	Pouzdro	Vyzařovací úhel	Svítivost (mcd)	Uvedená svítivost při proudu (mA)	Napětí (V)	Maximální propustný proud (mA)	Důvod zvolení	Značka
599MR2C	červená	cíl T-1 ³ / ₄ , čiré	90°	400	20	2,1	20	Jiný typ pouzdra, velký v. úhel	
BL-B2334-L	zelená	čiré	25°	20	2	1,8	7	Barva, slabý proud, malé napětí, malý v. úhel	
503UAC2V- 2AD	oranžová	čiré	30°	2200	20	2	25	Barva, vysoká svítivost, úhel	
L-53LSRD	červená	difuzní	60°	20	2	1,85	20	Difuzní typ pouzdra, slabý proud, nízké napětí	
503VC2Z-V1- 4KF	žlutá	čiré	45°	1000	20	2	25	Barva, úhel	
503UYC2E- Y2-2BE	červená	čiré	60°	5000	20	25	25	Vysoká svítivost	-

2.3 Měření dielektrických vlastností vhodné kapaliny

2.3.1 Způsob měření dielektrických vlastností

Dielektrické vlastnosti byly měřeny koaxiální sondou DAK-12 od firmy SPEAG (Obrázek 2.8). Sonda využívá metody otevřeného konce koaxiálního vedení a zvládá měřit vlastnosti ve frekvenčním pásmu od 10 MHz do 3 GHz. Sonda musí být do počítače připojena přes vektorový analyzátor, v našem případě byl použit analyzátor KEYSIGHT FieldFox N9923A (Obrázek 2.8). V počítači byly dielektrické vlastnosti měřeny softwarem od společnosti SPEAG.

Sonda se před měřením musela vždy kalibrovat. Bylo důležité udělat kalibraci správně a v průběhu měření hlídat křivku, jestli se příliš nemění, což by vedlo ke zkreslení výsledků. V takovém případě bylo třeba provést kalibraci znovu. Bylo také důležité dbát na to, aby se koaxiální kabel vedoucí do analyzátoru nijak nehýbal nebo s ním úmyslně nebylo pohnuto. Vzorek kapaliny se tedy musel k sondě přibližovat pomocí malého zvedacího stolku (Obrázek 2.8).



Obrázek 2.8 Měření vzorku sondou DAK-12 (SPEAG), zvedací stolek a vektorový analyzátor FieldFox N9923A (KEYSIGHT)

Kalibrace sondy se prováděla v počítačovém programu v záložce *Calibration*. Nejprve bylo nutné zadat teplotu kalibračního média s přesností na jedno desetinné místo. Samotná kalibrace pak probíhala ve třech krocích. Prvním krokem bylo zkratování sondy. Do příslušného nástavce se buďto vložil pletený měděný pásek určený pro měření při nízkých frekvencích, nebo celistvý měděný pásek pro frekvence vysoké. Přestože bylo

měřeno v nižších frekvencích, osvědčila se spíše kalibrace celistvým páskem. Pásek se nástavcem přitiskl k sondě a v programu bylo stisknuto tlačítko pro kalibraci zkratem s označením *Short*. Další krok byla kalibrace sondy volně ve vzduchu, určené k tomu bylo tlačítko *Open*. Třetí krok byla kalibrace 0,1M roztokem NaCl. Do roztoku byla ponořena sonda a pak zvoleno tlačítko *Load*. Kalibrace se uloží tlačítkem *Save* a dále se může přejít do záložky *Measure*, kde stiskem tlačítka *Sweep* můžeme pozorovat průběh výsledků měření.

Po každé změně složení vzorku kapaliny bylo provedeno deset měření. Sonda byla po každém měření vyndána ze vzorku a opět ponořena do jiné hloubky. Data byla v programu uložena a na závěr pomocí funkce *Export* vyexportována do tabulky v programu Microsoft® Office Excel, kde byla následně zpracována.

2.3.2 Postup míchání kapaliny

K míchání kapaliny byla používána destilovaná voda s dielektrickými vlastnostmi uvedenými v Tabulce 2.2.

Tabulka 2.2 Dielektrické vlastnosti použité destilované vody za uvedených podmínek

	Frekvence f (MHz)	Teplota t (°C)	Relativní permitivita ϵ_r (-)	Elektrická vodivost σ (S/m)
Destilovaná voda	70	25	78,303*	0,0044*

*Data získána aritmetickým průměrem z pěti měření

Vlastnosti látek, chlorid sodný a propylenglykol, použitých pro míchání kapaliny se nachází v Tabulce 2.3.

Tabulka 2.3 Vlastnosti použitých látek, data převzata z dat udaných výrobcem na obalu látek

Látka	Molární hmotnost M_m (g/mol)	Hustota ρ (g/cm ³)
Propylenglykol	76,09	1,036
Chlorid sodný	58,44	-

Seznam použitých pomůcek a přístrojů se nachází v Tabulce 2.4. Množství destilované vody bylo zvoleno tak, aby mohla být sonda do kapaliny volně ponořena. Byla zvolena dostatečně velká kádinka, aby měření nebylo zkresleno odrazem od dna kádinky a aby zde byl dostatečný prostor pro přidání alkoholu. V našem případě byla

zvolena kádinka s přibližným objemem jednoho litru a destilované vody bylo použito 882 ml. Nejprve byl do roztoku po 20ml dávkách přidáván propylenglykol pro snížení relativní permitivity kapaliny [15]. Byla pozorována změna relativní permitivity s rostoucím objemovým zastoupením propylenglykolu v roztoku. S blížící se požadovanou hodnotou bylo přidáno alkoholu méně. Jakmile bylo dosaženo požadované hodnoty s přesností na jednotky, bylo přidáno 5 g chloridu sodného (s přesností na setiny) pro zvýšení elektrické vodivosti kapaliny [14]. Chlorid sodný byl dále přidáván po menších hmotnostech do kapaliny, dokud nebyla dosažena přibližná hodnota elektrické vodivosti. Neboť smícháním propylenglykolu s vodou proběhla vždy malá exotermická reakce (přibližně o 0,5 °C na každých 20 ml propylenglykolu), proběhlo závěrečné měření s časovým odstupem, aby se teplota kapaliny ustálila na pokojové teplotě.

Při závěrečném měření bylo přidáno pouze minimální množství soli pro doladění elektrické vodivosti.

Tabulka 2.4 Přístroje a pomůcky použité pro namíchání kapaliny

Přístroj Pomůcka	Specifikace	Účel použití
Analytické váhy	VWR SM1245Di	Vážení chloridu sodného
Laboratorní váhy	KERN EMB 1200-1	Vážení destilované vody
Kalibrovaná plastová pipeta dělená	Pro objemy do 25 ml s přesností na 0,1 ml	Odměření objemu propylenglykolu
Pipetovací nástavec mechanický	Pro objemy do 100 ml	Odměření objemu propylenglykolu
Skleněná kádinka	Objem 1 l	Nádoba pro měřenou kapalinu
Plastová lžice	-	Míchání kapaliny
Plastová lžička	-	Vážení chloridu sodného
Plastový kelímek	-	Nádoba na propylenglykol
Papírové ubrousky	-	Sušení sondy
Plastová miska	-	Vážení chloridu sodného

2.3.3 Vyhodnocení dat měření

Pro počet měření ($N = 10$) byl použit jako odhad střední hodnoty aritmetický průměr. Z těchto měření byla vypočtena standardní nejistota typu A.

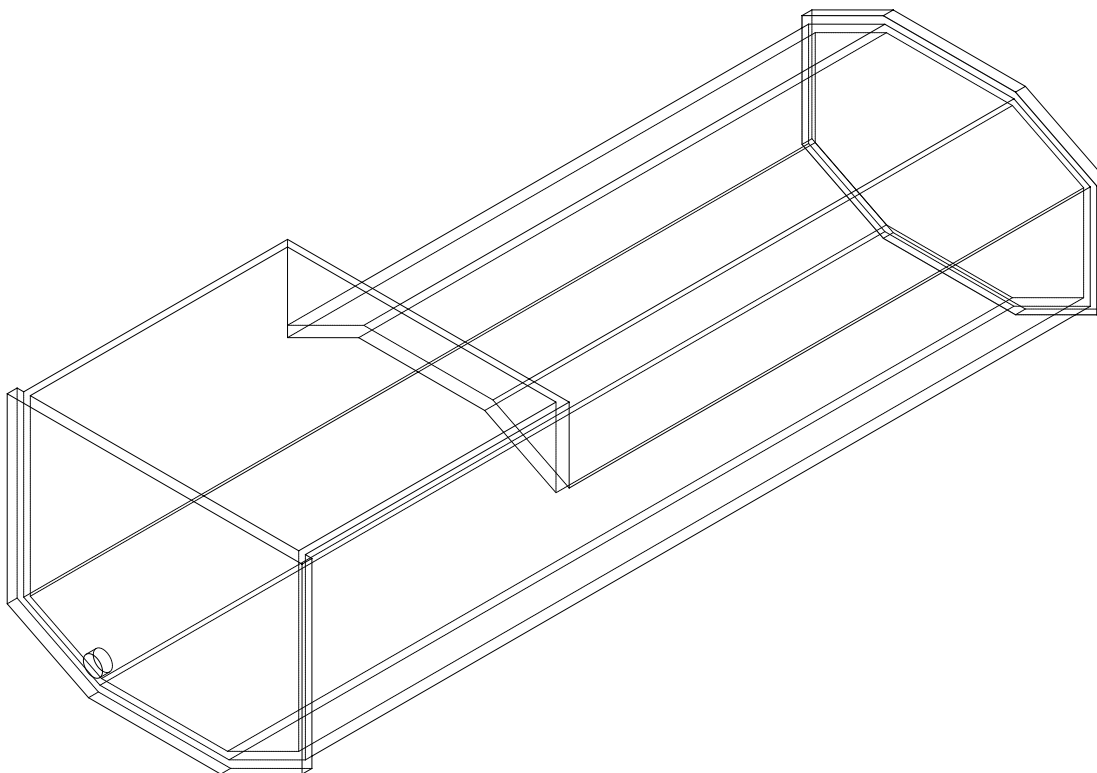
Rozšířená nejistota typu B je dle technického listu od výrobce sondy 2,1 % (pro výsledky s relativní permitivitou v rozmezí 35–100, ve frekvenčním rozmezí 20–200 MHz, koeficient rozšíření $k = 2$). Z obou nejistot byla vypočtena rozšířená nejistota typu C (koeficient rozšíření $k = 2$).

Následně byla zpracovaná data porovnána s dielektrickými vlastnostmi svalové tkáně při frekvenci 70 MHz.

3 Výsledky

3.1 Nádrž fantomu

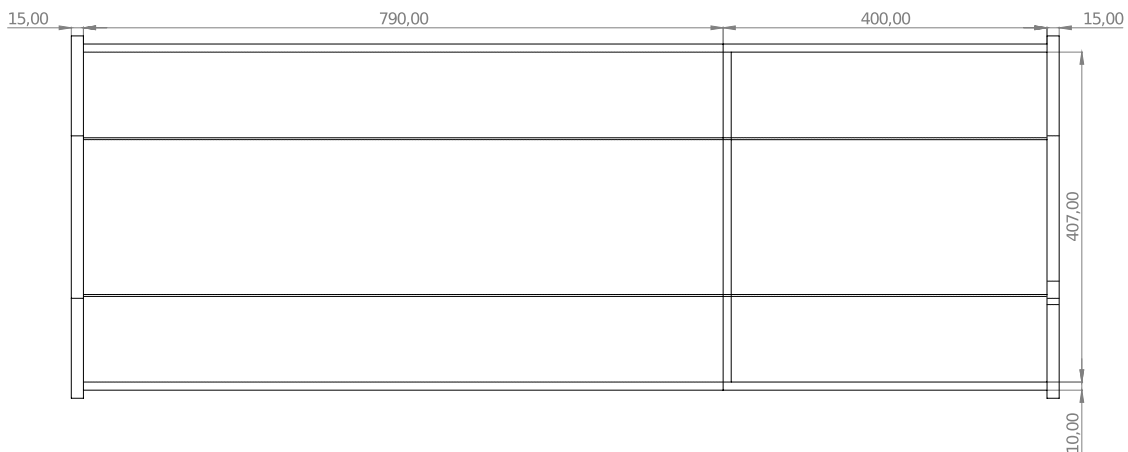
3.1.1 3D model nádrže fantomu



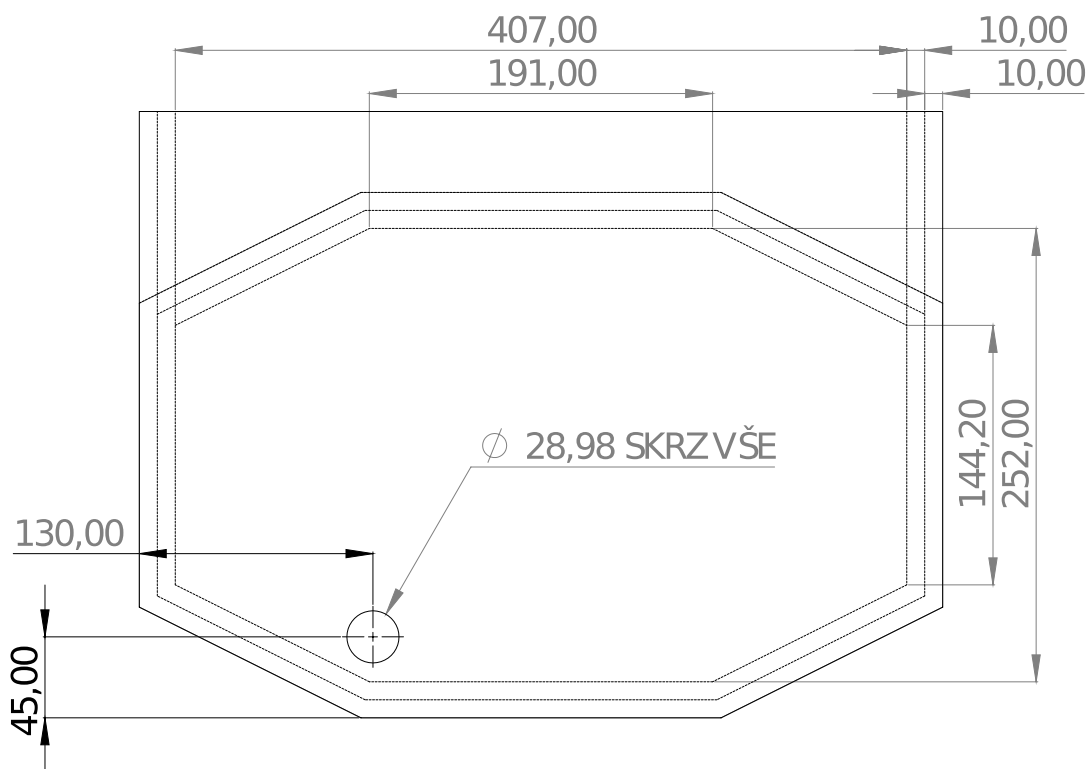
Obrázek 3.1 Celkový pohled na model nádrže

Na Obrázku 3.1 se nachází celkový pohled na výsledný model nádrže fantomu. Jsou předpokládány mírné konstrukční změny při výrobě, nicméně hlavní rozměry nádrže by se neměly změnit. Celá nádrž bude vyrobena z průhledného plastu pro účely pozorování.

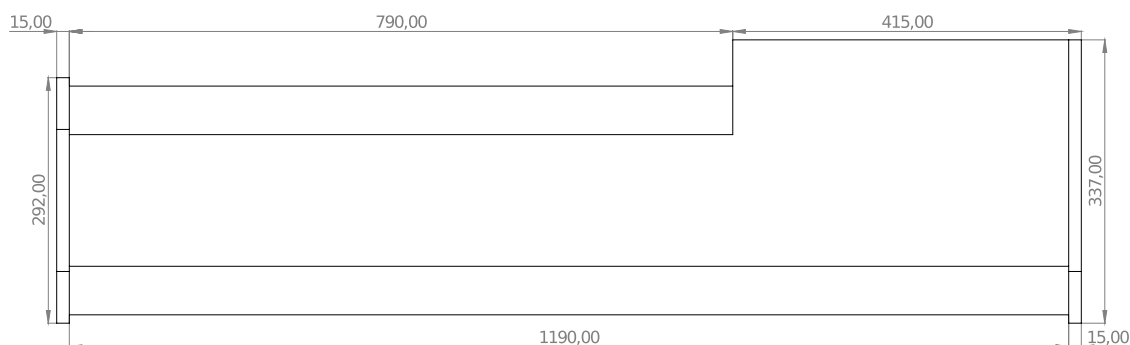
Na Obrázku 3.2 je pohled shora. Stěny nádrže jsou stanoveny na tloušťku 10 mm, boční stěny na tloušťku 15 mm. Rozměry hlavního horního otvoru jsou 40,7x39 cm a délka nádrže je celkem 122 cm. Na Obrázku 3.3 je pohled na přední stěnu fantomu s otvorem pro výpusť, který má standardizovanou velikost a bude opatřen závitkem. Vnitřní rozměry odpovídají rozměrům pánevní oblasti a výška vnější strany horní ohrady okolo hlavního otvoru je 5,5 cm. Na Obrázku 3.4 je pohled ze strany.



Obrázek 3.2 Pohled shora, (mm)



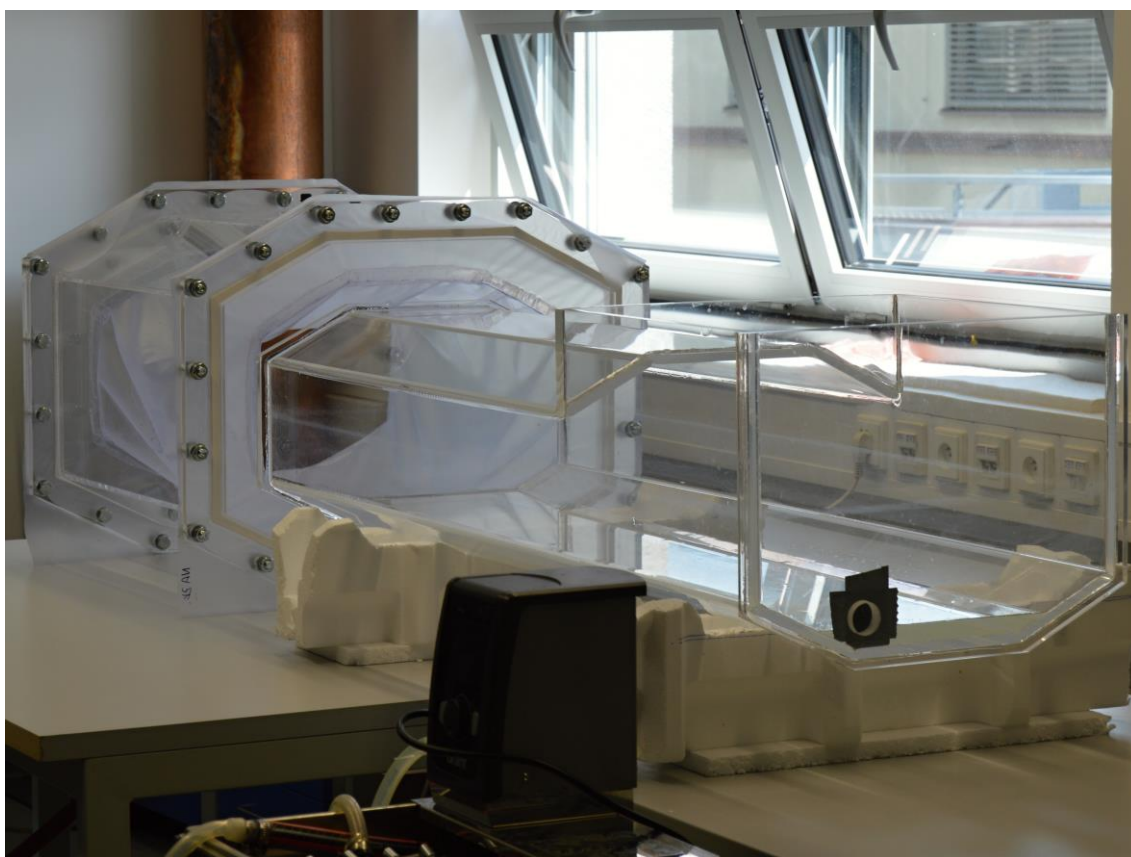
Obrázek 3.3 Pohled zepředu, (mm)



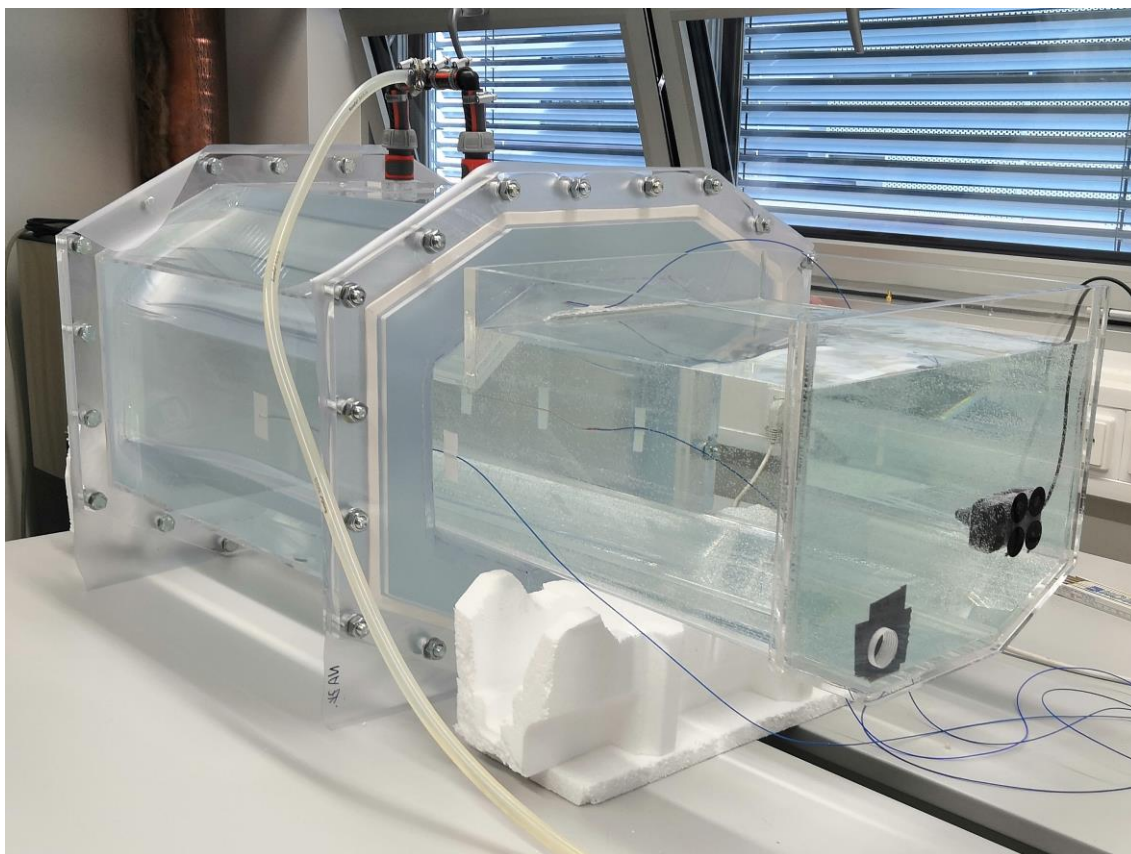
Obrázek 3.4 Pohled ze strany, (mm)

3.1.2 Realizace nádrže fantomu

Na Obrázcích 3.5 a 3.6 se nachází fotografie realizované nádrže fantomu pánevní oblasti. Na Obrázku 3.5 je nádrž společně s navrženým aplikátorem hypertermie. Na aplikátor je připevněn vodní bolus, kterým proudí voda pro chlazení systému. Na Obrázku 3.6 je již fantom naplněn médiem a vložen do aplikátoru s proudící vodou uvnitř vodního bolu. Další fotografie se nachází v Příloze A.



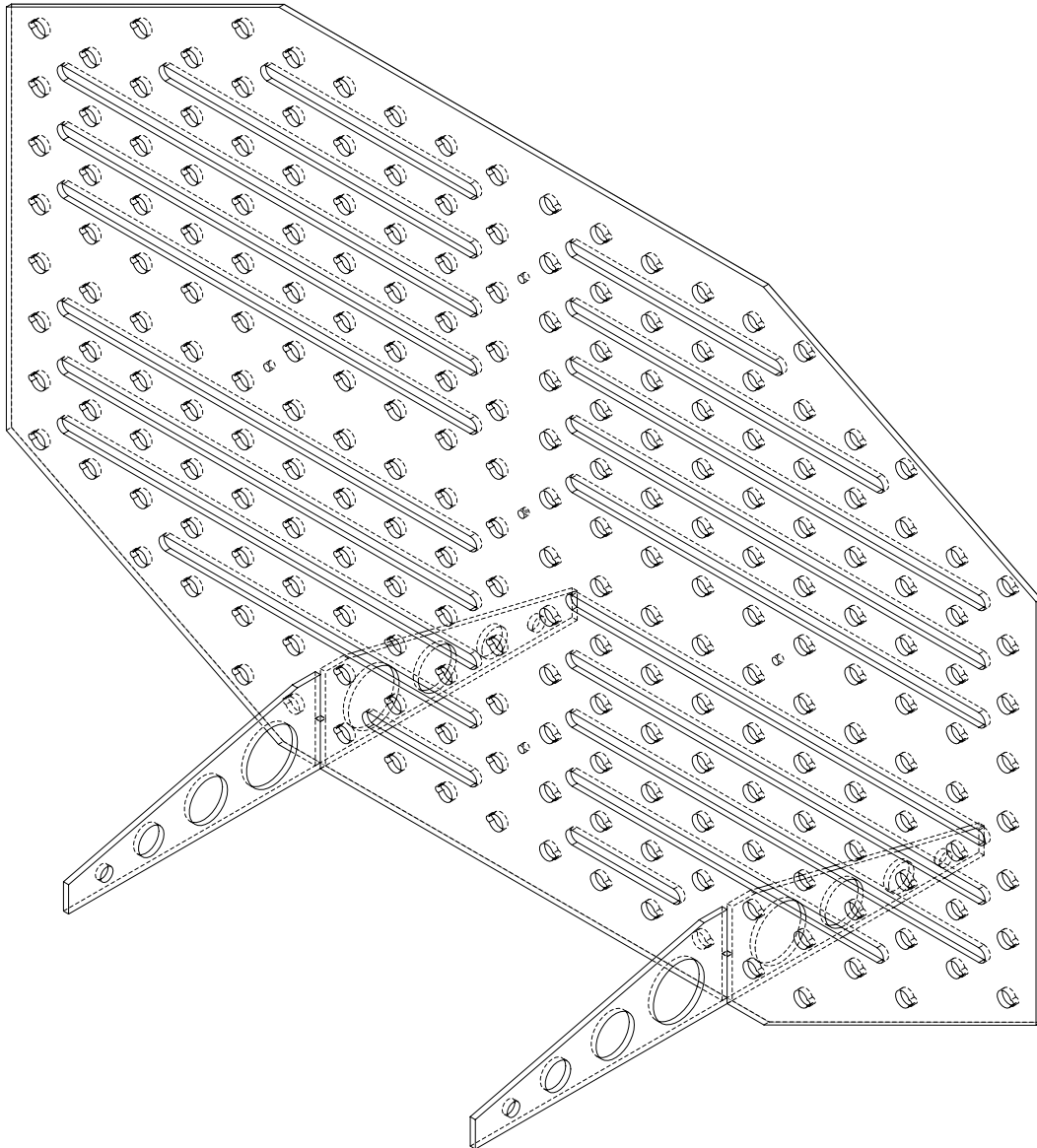
Obrázek 3.5 Fotografie vypuštěné nádrže fantomu v pozadí s aplikátorem hypertermie



Obrázek 3.6 Fotografie nádrže fantomu s napaštěným médiem uvnitř aplikátoru

3.2 LED matice

3.2.1 3D model LED matice

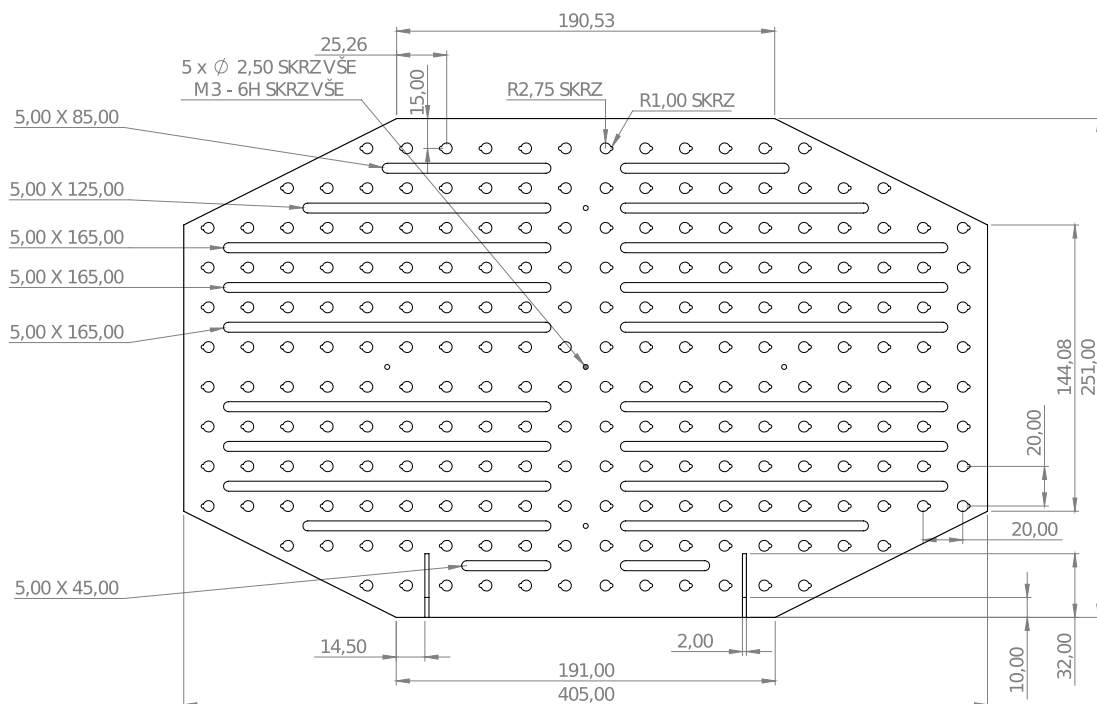


Obrázek 3.7 Celkový pohled na model stojanu LED matice

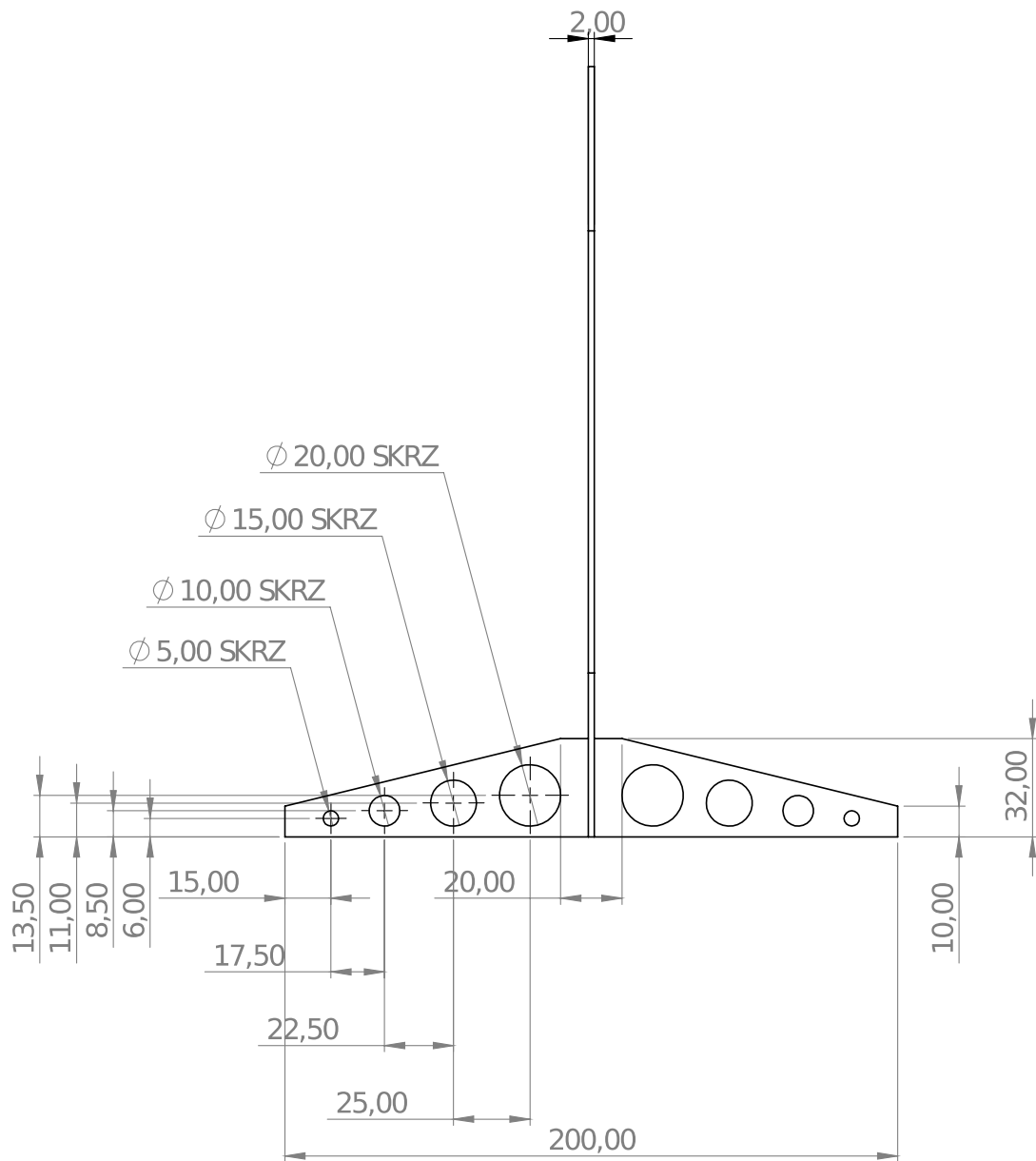
Na Obrázku 3.7 se nachází celkový pohled na vytvořený model stojanu LED matice. Hlavní deska je ukotvena do dvou destiček – stojanů pomocí zářezů do dílů. V případě vypadávání lze části snadno přilepit.

Na Obrázku 3.8 je pohled zepředu na hlavní desku. LED jsou rozmístěné po celé ploše pravidelně po 2 cm. Otvory pro diody jsou připraveny pro zasunutí standardních LED o průměru 5 mm. Navíc jsou zde připravené otvory pro otočení jednoho přívodního vodiče diody do opačného směru tak, aby přívodní vodiče vytvořili malý dipól. Diody by

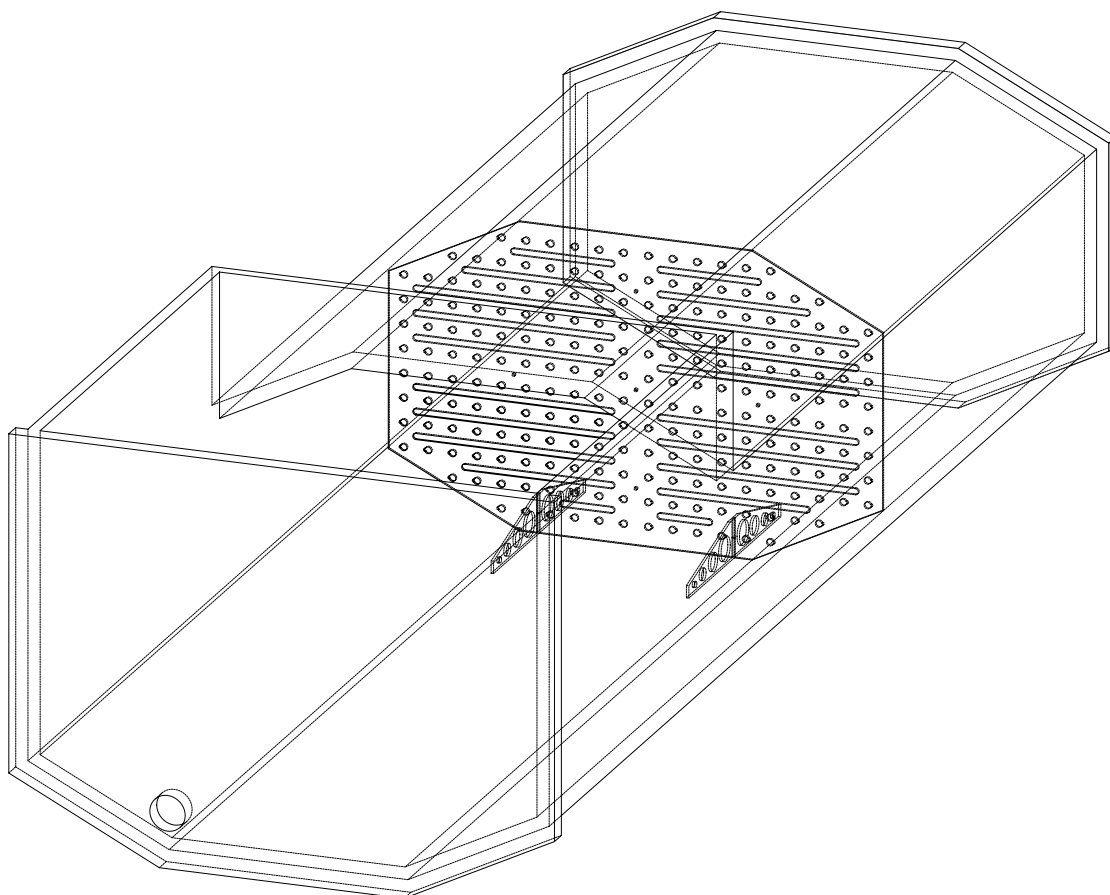
měly ve stojanu držet právě pomocí otočeného drátku, ale v případě vypadávání se dají snadno přilepit. Do stojanu byly přidány otvory o standardizované velikosti, například pro uchycení držáku, kterým se bude moci stojan posouvat uvnitř nádrže, a otvory pro snížení odporu vody při manipulaci. Rozměry hlavní desky jsou přibližně o 1 mm menší než vnitřní rozměry fantomu. Na Obrázku 3.9 se nachází pohled ze strany na sestavu. Na oba spodní stojany byly přidány otvory pro odlehčení a lepší viditelnost ze strany fantomu, na jejich velikosti a pozici nezáleží. Celkový pohled na model nádrže fantomu s vloženým modelem sestavy LED matice dovnitř nádrže se nachází na Obrázku 3.10.



Obrázek 3.8 Pohled na přední stěnu modelu LED matice, (mm)



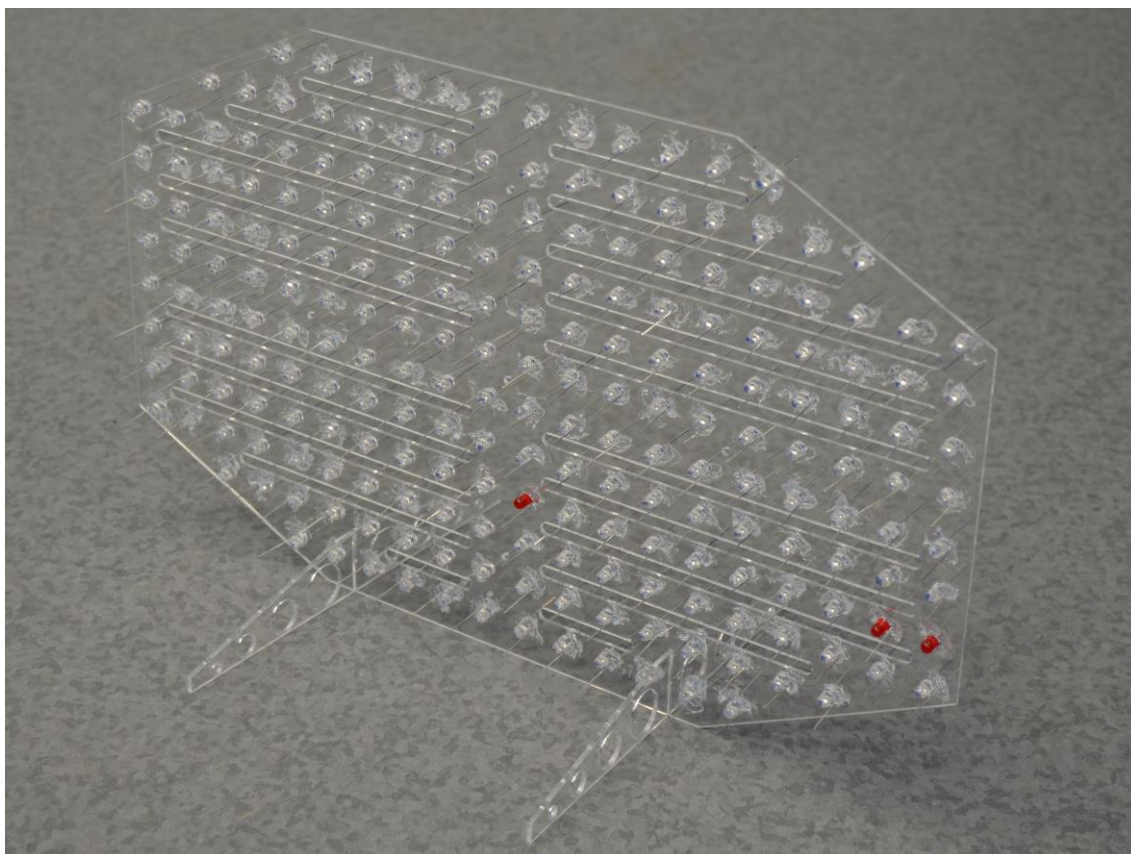
Obrázek 3.9 Pohled ze strany na model stojanu LED matice, (mm)



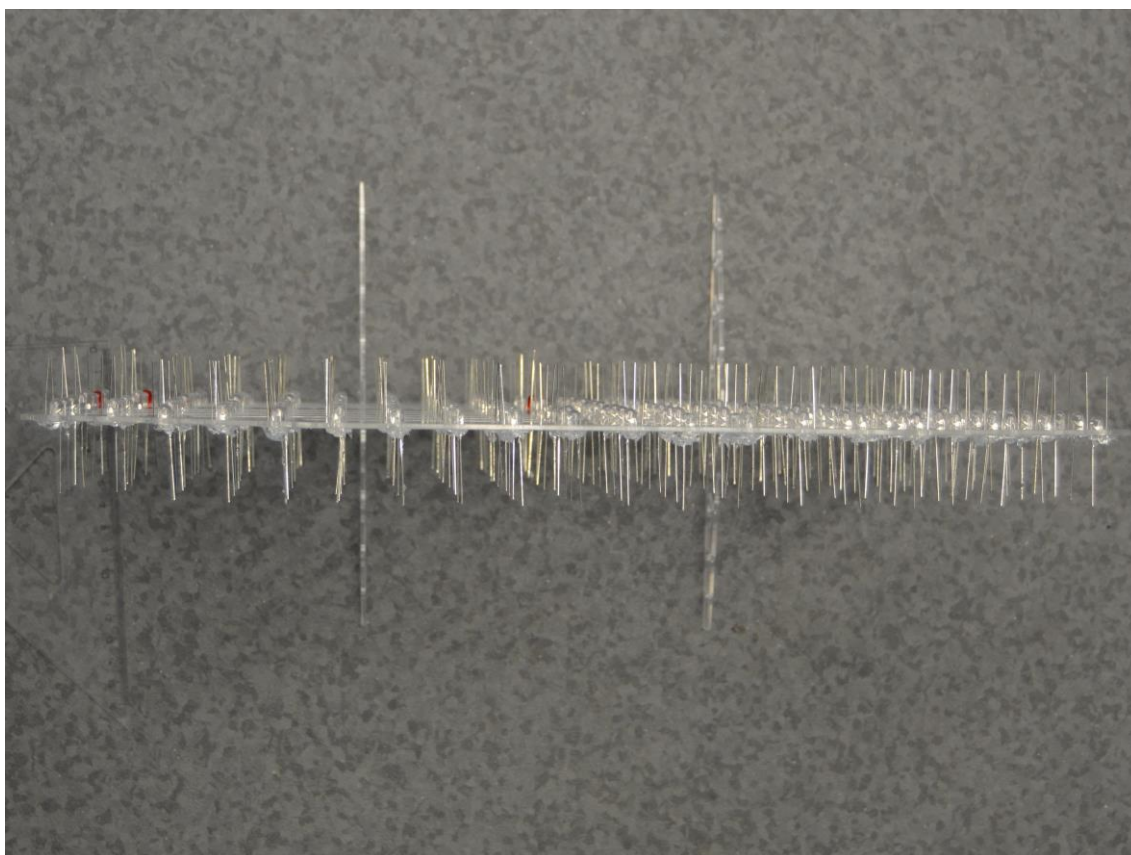
Obrázek 3.10 Celkový pohled na model fantomu s vloženým modelem sestavy LED matice uvnitř

3.2.2 Realizace LED matice

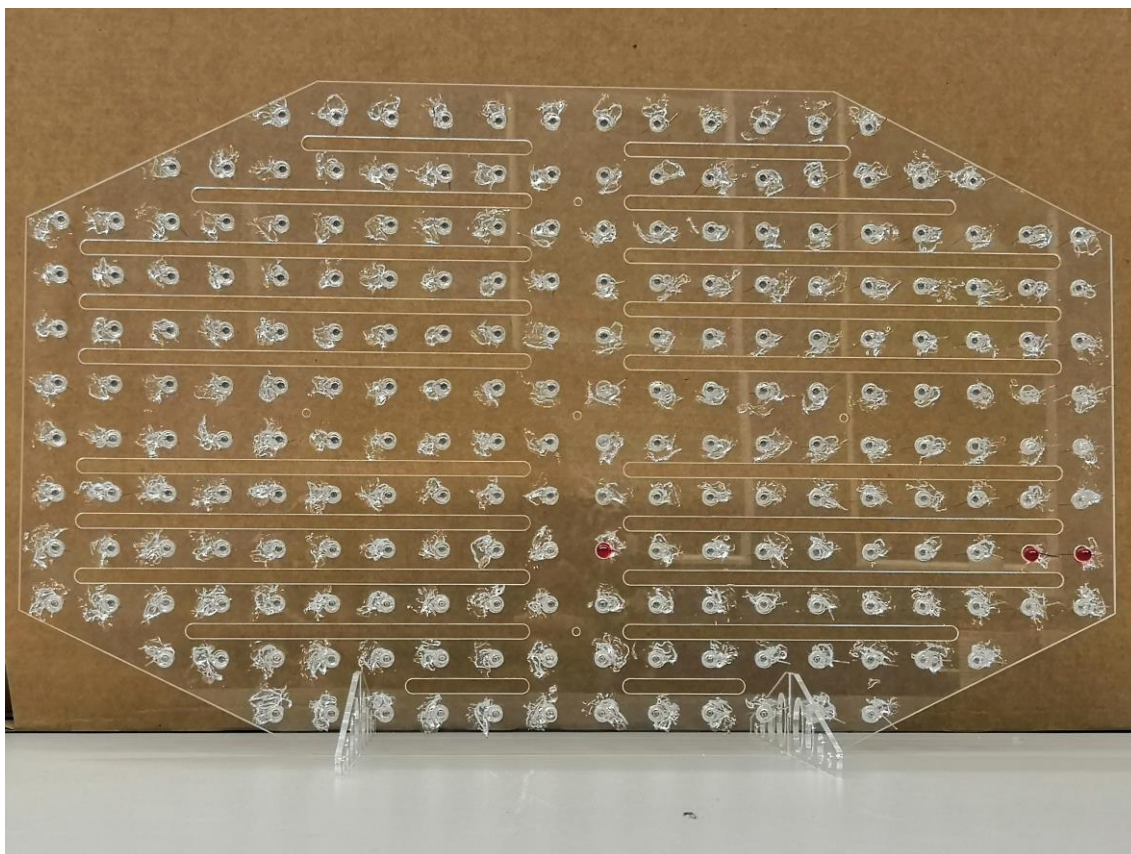
Na Obrázku 3.11 je fotografie celkového pohledu na LED matici. Na Obrázku 3.12 je pohled shora a na Obrázku 3.13 je pohled na LED matici přímo zepředu. Na Obrázku 3.14 je fotografie celé sestavy – LED matice vložené do nádrže fantomu.



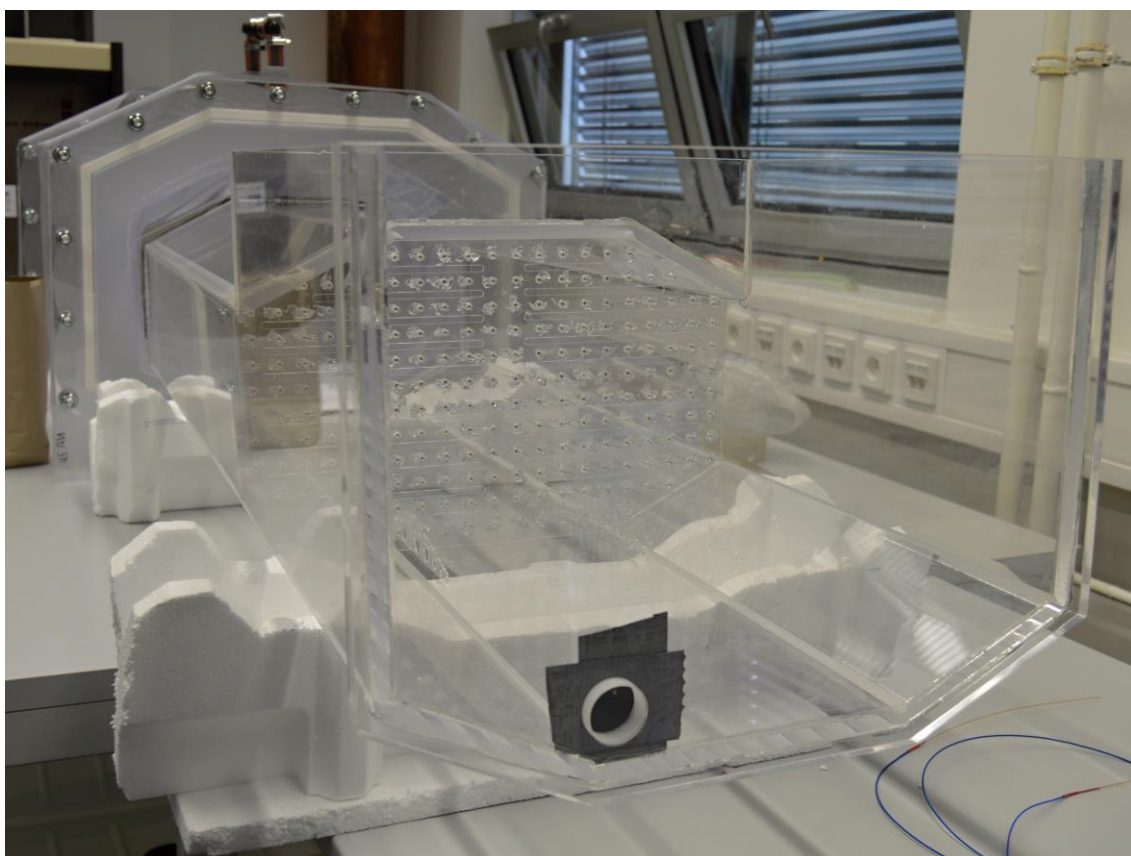
Obrázek 3.11 Realizovaný stojan LED matice s vloženými LED



Obrázek 3.12 Pohled shora na LED matici



Obrázek 3.13 Pohled zepředu na LED matici



Obrázek 3.14 Celkový pohled na sestavu – nádrž fantomu s vloženou LED maticí

3.3 Testování LED matice a vhodných LED

Na Obrázku 3.15 je fotografie LED matice umístěné uprostřed působení elektromagnetického pole nad anténou. Na obrázku je znázorněno umístění různých druhů LED dle Tabulky 2.1 a Obrázku 2.2. Neoznačené LED jsou diody typu 503UYC2E-Y2-2BE. Na Obrázku 3.16 se nachází fotografie LED matice se stejnými LED 503UYC2E-Y2-2BE po celé sledované ploše ve středu působení elektromagnetického pole, tedy ve stejné pozici jako na Obrázku 3.15. Na Obrázcích 3.17, 3.18 a 3.19 je matice se stejnými LED posunuta o různé vzdálenosti od středu působení elektrické složky pole.



Obrázek 3.15 Matice s různými LED umístěná do středu působení elektromagnetického pole nad anténu



Obrázek 3.16 Matice se stejnými LED umístěná do středu působení elektromagnetického pole nad anténu



Obrázek 3.17 Matice se stejnými LED umístěná 5 cm od středu po ose působení elektrické složky pole



Obrázek 3.18 Matice se stejnými LED umístěná 10 cm od středu po ose působení elektrické složky pole



Obrázek 3.19 Matice se stejnými LED umístěná 15 cm od středu po ose působení elektrické složky pole

3.4 Výsledky měření dielektrických vlastností kapaliny

Dielektrickým vlastnostem svalu se nejvíce blížilo následující složení kapaliny (Tabulka 3.1). Výsledky měření a porovnání s dielektrickými vlastnostmi svalu jsou v Tabulce 3.2.

Tabulka 3.1 Složení vzorku výsledné kapaliny

Použité látky	Složení vzorku kapaliny	Hmotnostní poměr látek (%)
Destilovaná voda	795,7 ml	84,00
Propylenglykol	145,8 ml	15,95
Chlorid sodný	5,75 g	0,61

Tabulka 3.2 Dielektrické vlastnosti svalu a výsledné kapaliny

	f (MHz)	ϵ_r (-)	σ (S/m)
Výsledná kapalina	70	$70,94 \pm 1,49$	$0,681 \pm 0,014$
Sval [19]	70	70,80	0,692

4 Diskuse

Hlavním výsledkem práce jsou realizované fungující komponenty (LED matice a nádrž pro fantom pánevní oblasti) a zjištění složení vyplňujícího média fantomu s dielektrickými vlastnostmi odpovídajícími svalu (Tabulka 3.1). Kapalina byla navržena z dostupných chemikálií což umožňuje snadnou výměnu. Důvodem výměny mohou být změny dielektrických vlastností kapaliny způsobené stárnutím média. Změnám by se dalo předejít přidáním konzervačních látek do kapaliny. Tyto látky však mohou způsobit rozdíly v dielektrických vlastnostech, proto by bylo nutné s nimi počítat již při návrhu složení kapaliny. Výsledky měření dielektrických vlastností (Tabulka 3.2) výsledné kapaliny vykazují poměrně velkou rozšířenou nejistotu měření. Ta je zejména ovlivněna rozšířenou nejistotou typu B, která je dána technickým listem sondy (při této frekvenci a rozsahu relativní permitivity 2,1 %, $k = 2$). Nejistota měření je však obvyklá pro tuto metodu. Na základě výsledků doporučuji s každou výměnou kapaliny v nádrži přeměřit dielektrické vlastnosti nové kapaliny. Pokud by došlo k měření na jiné frekvenci než frekvenci pracovní, je třeba zvážit namíchání jiné kapaliny s rozdílnými poměry látek. Kapalina se při jiných frekvencích nechová stejně jako svalová tkáň a její vlastnosti se liší výrazněji (Obrázky B.1 a B.2 v Příloze B). Kapalinu ale lze v budoucnu snadno vystřídat například kapalinou s dielektrickými vlastnostmi jiných orgánů nacházejících se v pánevní oblasti či kapalinou s vlastnostmi shrnující celou pánevní oblast.

Model nádrže fantomu byl vytvořen se všemi požadovanými parametry. Návrh však prošel při realizaci mírnými konstrukčními změnami. Model byl vytvořen pro třetí stranu jako soubor parametrů, které je třeba při výrobě dodržet. Nádrž pak byla třetí stranou mírně pozměněna kvůli výrobnímu postupu. Dno nádrže bylo vyrobeno z jednoho kusu plastové desky, do které byly vyřezány ohybové rýhy. Celá deska pak byla ohnuta do požadovaného tvaru s požadovanými rozměry. Tělo fantomu je přilepeno k postranním deskám, které celou nádrž fixují. Navzdory mírným konstrukčním změnám, všechny důležité rozměry však sedí s 3D modelem a za provozu nádrž nikde neprotýká. Provizorně je pak vyřešena pouze výpust fantomu, ke které je třeba sehnat vhodný plastový kohout, a stojan, který by systém držel a umožnil by snadnější manipulaci. Celý systém v provozu se nachází na Obrázcích A.1-A.4 v Příloze A.

Stojan LED matice byl vyhotoven přesně dle 3D modelu. Z praktického hlediska se ukázalo být lepší přilepení LED na místa silikonem. LED ve stojanu držely tak, jak bylo

předpokládáno, ale nebyl nalezen způsob ohybu přívodních vodičů takový, aby LED ve stojanu držely i při neopatrném zacházení. Silikon lze navíc jednoduše odstranit bez zanechání stop. Při údržbě a manipulaci je třeba dbát na rovnoběžnost všech dipólů diod. U vodičů je třeba zajistit, aby se na každý dipól indukovalo stejné napětí v poměru s rozmístěním v matici. Vodiče by měly mít stejné pravidelné rozestupy, jako LED v matici, a neměly by být ohnuty vícekrát než jednou. Tento požadavek není v této matici plně zajištěn a je odkázán pouze na manuální úpravu. Nicméně pro účely, pro jaké bude tato matice použita, je takovéto vyhotovení naprosto dostačující.

Při testování LED matice bylo dospěno k závěru, že nejideálnějším druhem LED z testovaných diod, jsou diody, které byly původně zamýšleny jako nejpravděpodobněji fungujícími, tedy diody 503UYC2E-Y2-2BE. Tyto LED byly rozmístěny po celé matici mezi ostatními testovanými diodami. LED byly hodnoceny pouze vizuálně, neboť ostatní testované diody taktéž fungovaly. Nejvhodnější LED byly vybrány na základě intenzity světla v centru šíření energie, změny intenzity světla při přemístění dále od centra a kvůli čirému pouzdru. Zelené LED byly naopak označeny jako nejméně vyhovujícími z důvodu velmi nízké světelné intenzity. Bohužel se nepodařilo LED matici otestovat přímo uvnitř fantomu z důvodu absence anténního systému okolo aplikátoru, nicméně způsob otestování pomocí flíčkové antény poskytl kvalitní výsledky. Všechny testované LED mají ideální délku vodičů – při ohybu jednoho vodiče přes pouzdro do opačného směru mají oba dipóly dohromady délku 5 cm. Délka tedy nemusí být upravována, neboť právě při této délce byly LED s úspěchem otestovány. Před zavedením LED matice do pravidelného provozu by bylo vhodné pokrýt dipóly ochranným lakem, který zabraňuje reakci kovu s médiem uvnitř nádrže fantomu.

5 Závěr

Byl vytvořen 3D model nádrže fantomu pro pánevní oblasti dle daných požadavků. Tento model byl předán třetí straně s požadavky na realizaci nádrže. Výsledná nádrž z plexiskla má základní tvar osmiúhelníkového hranolu s velkým otvorem na boku pro umístování senzorů, komponentů a LED matice. Rovněž byl stejným způsobem vytvořen stojan LED matice, který kopíruje vnitřní rozměry nádrže fantomu a může být dovnitř reálně vložen. Nádrž byla otestována naplněním a vložením do aplikátoru mikrovlnné hypertermie.

Bylo určeno přesné složení kapaliny s dielektrickými vlastnostmi odpovídajícími svalové tkáni. Vlastnosti této kapaliny byly změřeny sondou DAK-12 od firmy SPEAG a výsledky jsou prezentovány s rozšířenou nejistotou v Tabulce 3.2.

Stojan matice byl osazen vhodnými druhy LED a vystaven expozici elektromagnetickým polem o frekvenci 70 MHz. Výsledky byly zaznamenány ve formě fotografií. Nejvhodnější diodou byla na základě vizuálního hodnocení zvolena LED s označením 503UYC2E-Y2-2BE, kterou byla následně osazena celá LED matice.

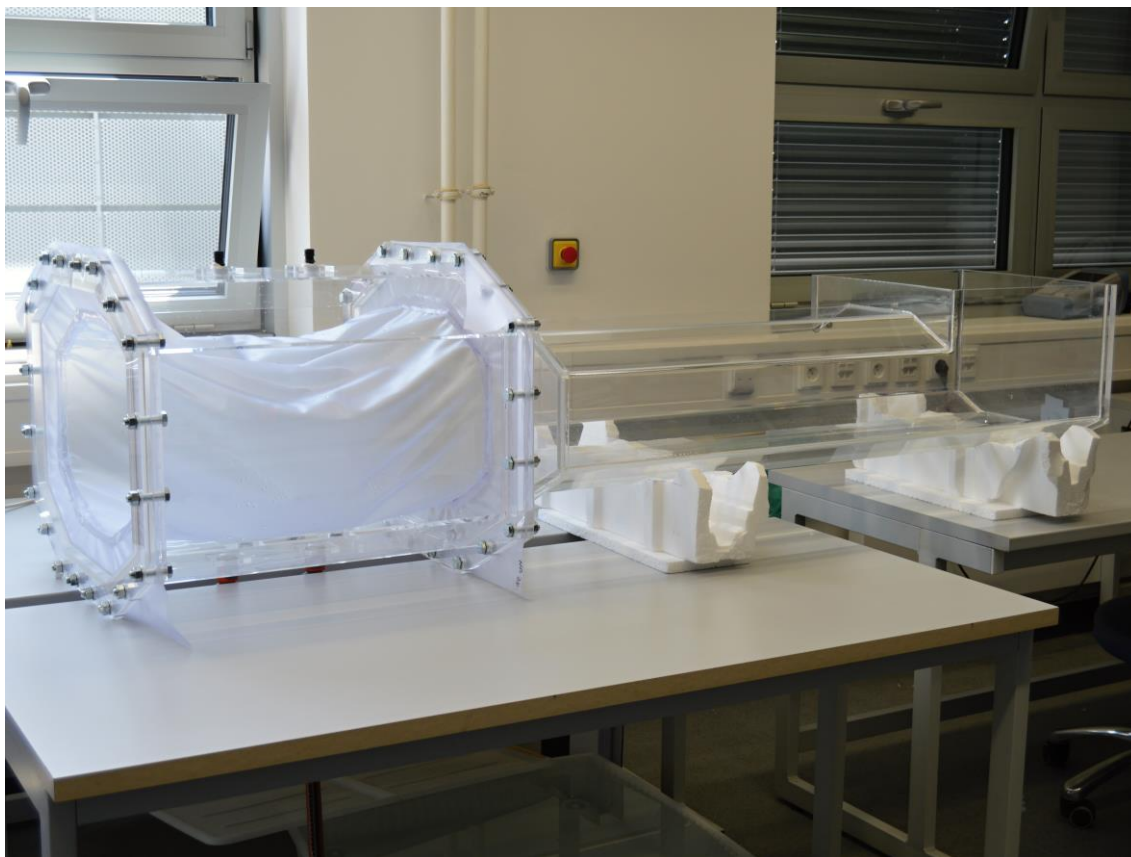
Seznam použité literatury

- [1] ISSELS, Rolf D. Hyperthermia adds to chemotherapy. *European Journal of Cancer*. 2008, 44(17), 2546-2554. DOI: 10.1016/j.ejca.2008.07.038. ISSN 09598049.
- [2] WUST, P., B. HILDEBRANDT, G. SREENIVASA, B. RAU, J. GELLERMANN, H. RIESS, R. FELIX a P.M. SCHLAG. Hyperthermia in combined treatment of cancer. *The Lancet Oncology*. 2002, 3(8), 487-497. DOI: 10.1016/S1470-2045(02)00818-5. ISSN 14702045
- [3] VRBA, Jan. *Lékařské aplikace mikrovlnné techniky*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN 80-01-02705-8.
- [4] GAS, Piotr. Essential Facts on the History of Hyperthermia and their Connections with Electromedicine. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2011, (87 12b), 37-40. ISSN 0033-2097.
- [5] VAN DER ZEE, J. Heating the patient: a promising approach? *Annals of Oncology*. 2002, (13), 1173–1184. DOI: 10.1093/annonc/mdf280.
- [6] Pyrexar Medical. *Pyrexar Medical – Hyperthermia products treat cancer* [online]. [cit. 25.11.2018]. Dostupné z: <https://www.pyrexar.com/>
- [7] ALBA Hyperthermia System. *ALBA Hyperthermia System, an effective Oncological Hyperthermia System* [online]. [cit. 25.11.2018]. Dostupné z: <http://www.albahyperthermia.com/index.html>
- [8] JHA, Sheetal, Pramod Kumar SHARMA a Rishabha MALVIYA. Hyperthermia: Role and Risk Factor for Cancer Treatment. *Achievements in the Life Sciences*. 2016, 10(2), 161-167. DOI: 10.1016/j.als.2016.11.004. ISSN 20781520
- [9] OVERGAARD, Jens. Effect of hyperthermia on malignant cells in vivo: A review and a hypothesis. *Cancer*. 1977, 39(6), 2637-2646. DOI: 10.1002/1097-0142(197706)39:6<2637::AID-CNCR2820390650>3.0.CO;2-S.
- [10] FENN, Alan J., Vythialingam SATHIASEELAN, Gerald A. KING a Paul STAUFFER. Improved Localization of Energy Deposition in Adaptive Phased-Array Hyperthermia Treatment of Cancer. *Lincoln Lab J*. 1996, 9(01).
- [11] SPURNÝ, Pavel. *Návrh suchých heterogenních fantomů pro mikrovlnné zobrazování a hypertermii pomocí numerických simulací*. Kladno, 2016. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta biomedicínského inženýrství.
- [12] ISLAM, M. T., SAMSUZZAMAN, KIBRIA, S. a ISLAM, M. T. Experimental Breast Phantoms for Estimation of Breast Tumor Using Microwave Imaging Systems. *IEEE Access*, vol. 6, pp. 78587-78597, 2018. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2885087

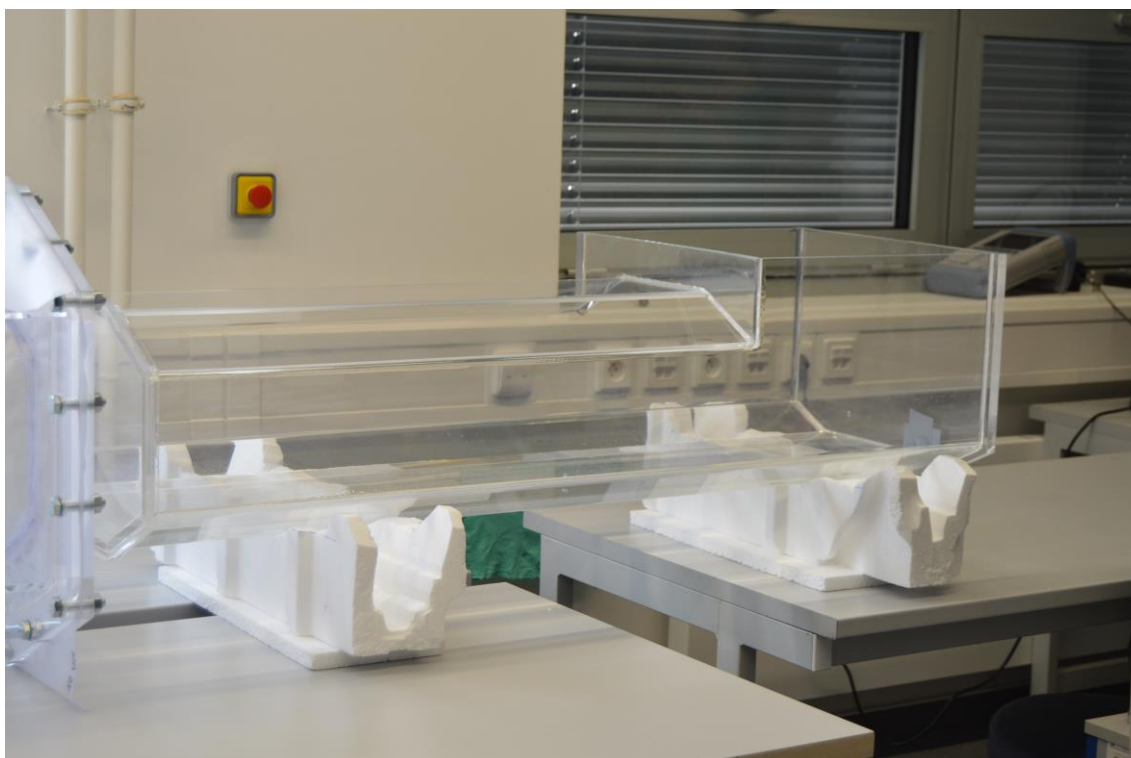
- [13] BOLOMEY, J. C, SEEGENSCHMIEDT, M. H., FESSENDEN, P. a VERNON, C. *C. Thermoradiotherapy and thermochemotherapy*. New York: Springer, 1996. ISBN 3540572309.
- [14] PEYMAN, A., C. GABRIEL a E. GRANT. Complex permittivity of sodium chloride solutions at microwave frequencies. *Bioelectromagnetics*. 2007, (28), 264-274. DOI: 10.1002/bem.20271.
- [15] SENGWA, R. J., Rakhee CHAUDHARY a S. C. MEHROTRA. Dielectric behaviour of propylene glycol water mixtures studied by time domain reflectometry. *Molecular Physics*. 2001, (99:21), 1805-1812. DOI: 10.1080/00268970110072782.
- [16] Osobní korespondence s Bc. Jitkou Menclovou. [8.1.2019]. *Nepublikováno*
- [17] Osobní korespondence s Ing. Tomášem Dřížd'alem, Ph.D. [8.1.2019]. *Nepublikováno*
- [18] MULDER, Hendrik Thijmen, Sergio CURTO, Margarethus Marius PAULIDES, Martine FRANCKENA a Gerard C. VAN RHOON. Systematic quality assurance of the BSD2000-3D MR-compatible hyperthermia applicator performance using MR temperature imaging. *International Journal of Hyperthermia*. 2018, 35(1), 305-313. DOI: 10.1080/02656736.2018.1497209
- [19] P. A. Hasgall, F. Di Gennaro, C. Baumgartner, E. Neufeld, B. Lloyd, M. C. Gosselin, D. Payne, A. Klingenboeck, and N. Kuster. Tissue Properties Database V4.0. *IT'IS Foundation*, 2018.
- [20] SCHNEIDER, Chr. a J. D.P. VAN DIJK. Visualization by a matrix of light-emitting diodes of interference effects from a radiative four-applicator hyperthermia system. *International Journal of Hyperthermia*. 1991, 7(2), 355-366. DOI: 10.3109/02656739109005001
- [21] SCHNEIDER, C. J., J. D. P. VAN DIJK, A. A. C. DE LEEUW, P. WUST a W. BAUMHOER. Quality assurance in various radiative hyperthermia systems applying a phantom with LED matrix. *International Journal of Hyperthermia*. 1994, 10(5), 733-747. DOI: 10.3109/02656739409022451
- [22] TURNER, P. F. Regional Hyperthermia with an Annular Phased Array. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. 1984, BME-31(1), 106-114. DOI: 10.1109/TBME.1984.325376.
- [23] TERESHCHENKO, O. V., F. J. V. BUESINK a F. B. J. LEFERINK. An overview of the techniques for measuring the dielectric properties of materials. *2011 XXXth URSI General Assembly and Scientific Symposium*. 2011, Istanbul, 1-4. DOI: 10.1109/URSIGASS.2011.6050287.

[24] SKIERUCHA, Wojciech a Andrzej WILCZEK. A FDR Sensor for Measuring Complex Soil Dielectric Permittivity in the 10–500 MHz Frequency Range. *Sensors*. 2010, 10(4), 3314-3329. DOI: 10.3390/s100403314

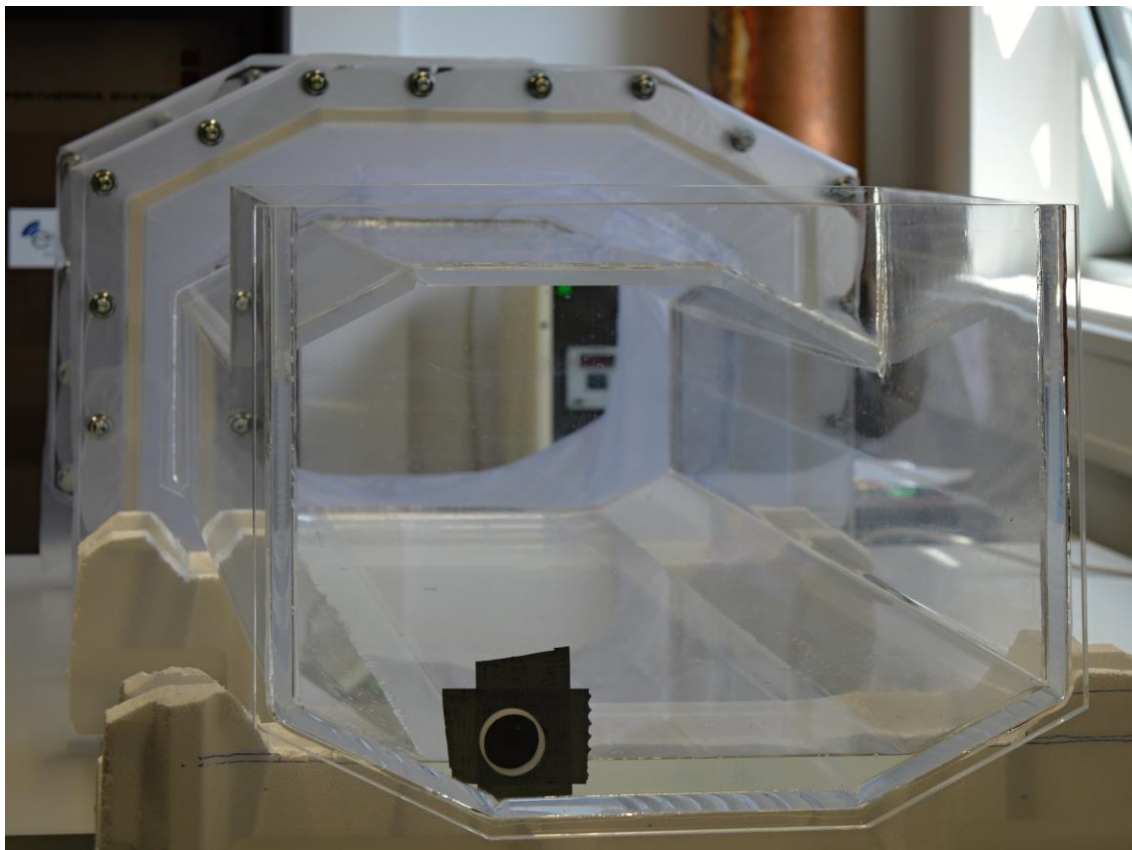
Příloha A: Doplnující fotografie



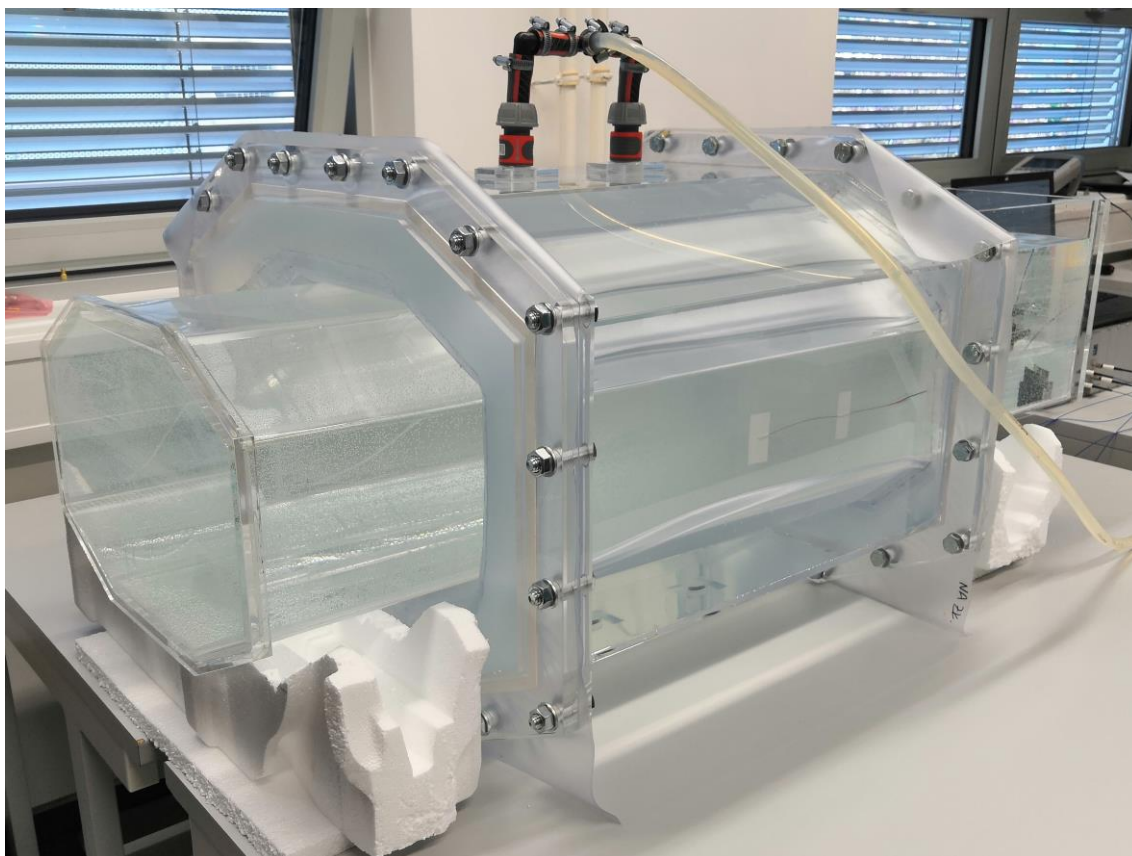
Obrázek A.1 Fotografie nádrže fantomu



Obrázek A.2 Fotografie nádrže fantomu

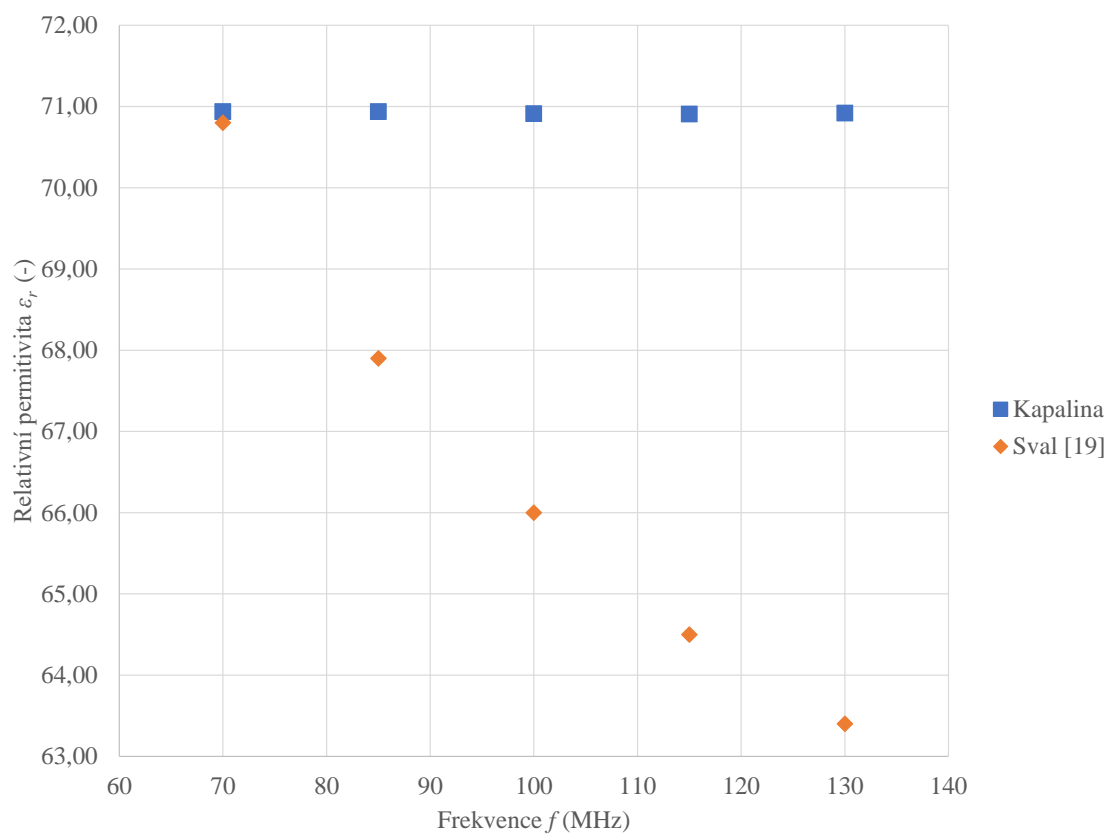


Obrázek A.3 Fotografie nádrže fantomu zepředu

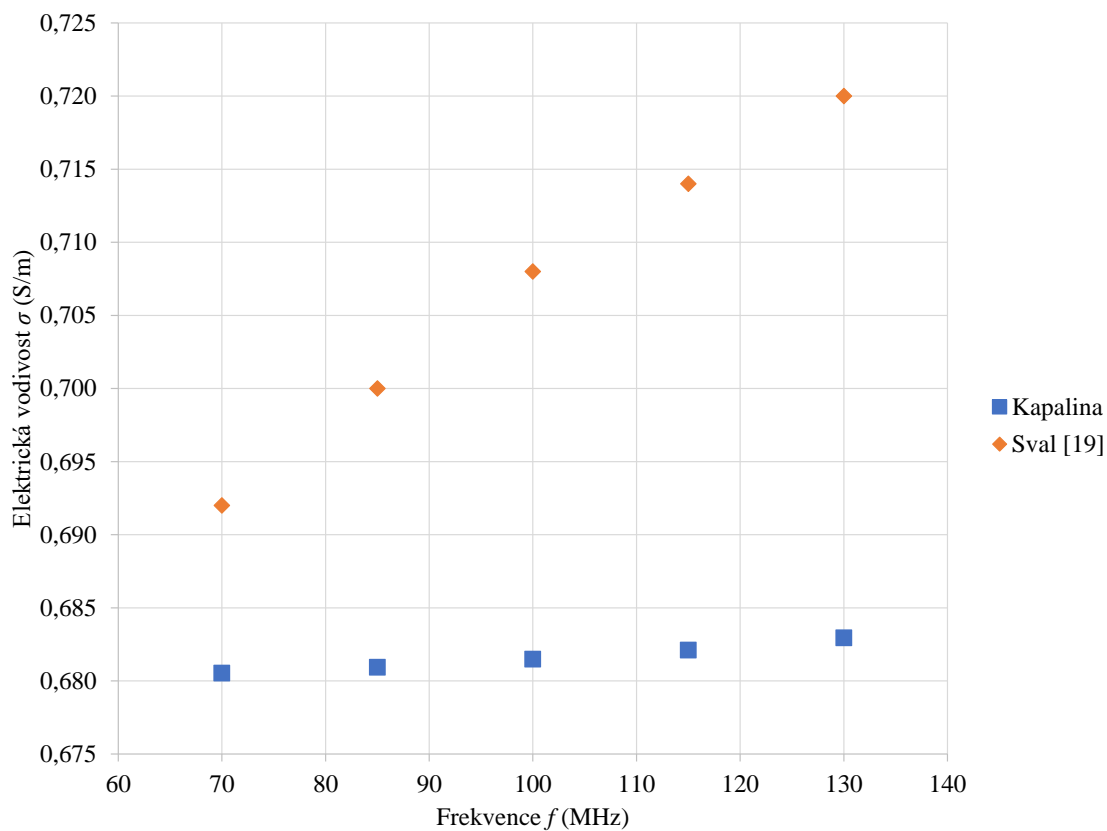


Obrázek A.4 Fotografie plné nádrže fantomu umístěného uvnitř aplikátoru

Příloha B: Doplnující data



Obrázek B.1 Srovnání relativní permitivity výsledné kapaliny s relativní permitivitou svalové tkáně ve frekvenčním rozmezí 70-130 MHz



Obrázek B.2 Srovnání elektrické vodivosti výsledné kapaliny s elektrickou vodivostí svalové tkáně ve frekvenčním rozmezí 70-130 MHz

Příloha C: Přílohy na CD

- Bakalářská práce
- Klíčová slova
- Abstrakt ČJ
- Abstrakt AJ
- Zadání práce
- 3D modely komponentů