

UNIVERZITA PARDUBICE

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Návrh pracoviště pro měření stínících vlastností  
materiálů v blízké zóně

Bc. Jiří Svatoň

Diplomová Práce

2024

Univerzita Pardubice  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Akademický rok: 2022/2023

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Jiří Svatoň**  
Osobní číslo: **I21294**  
Studijní program: **N0714A060018 Komunikační a radarové systémy**  
Téma práce: **Návrh pracoviště pro měření stínících vlastností materiálů v blízké zóně**  
Zadávací katedra: **Katedra elektrotechniky**

## Zásady pro vypracování

Student se v rámci DP seznámí s návrhem planárních mikrovlnných antén. Podrobně prostuduje problematiku návrhu sond pro měření intenzity elektrického pole v blízké zóně od zdroje záření. V simulačním SW CST MW Studio navrhne a optimalizuje vzorky anténních sond pro měření přenosu signálu přes stínící materiál. Tyto sondy navrhne pro několik frekvenčních pásem. Optimalizované vzorky anténních sond budou zhotoveny a jejich parametry ověřeny měřením. Následně student navrhne a realizuje pracoviště, které bude obsah vždy dvě shodné navržené sondy a platformu pro umístění a pohyb testovaného vzorku stínícího materiálu. Student navrhne vhodnou metodiku měření útlumových vlastností stínících materiálů a ověří ji na měření dodaného vzorku materiálu v několika frekvenčních pásmech.

Rozsah pracovní zprávy: **70-80**  
Rozsah grafických prací: **0**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

Z. Yan, J. Wang, W. Zhang, Y. Wang, and J. Fan, "A Miniature Ultrawideband Electric Field Probe Based on Coax-Thru-Hole via Array for Near-Field Measurement", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 66, no. 10, pp. 2762-2770, 2017.

J. SLIK, "Measurement of the electric field intensity in the near-field region with proposed electromagnetic field probe", *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY*, vol. 1, no. 2, pp. 93-96, Feb. 2016.

Y. Park, J. Bang, K. Jung and J. Choi, "Design of a Broadband Electric Near-Field Probe With Improved Sensitivity Using Additional Tips," *2018 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*, 2018, pp. 1-2.

D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, 4th Edition. Wiley, 2011.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Tomáš Zálabský, Ph.D.**  
Výzkumné centrum FEI

Datum zadání diplomové práce: **18. listopadu 2022**  
Termín odevzdání diplomové práce: **19. května 2023**

**Ing. Zdeněk Němec, Ph.D. v.r.**  
děkan

L.S.

**Ing. Jan Pidanič, Ph.D. v.r.**  
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 18. listopadu 2022

## **Prohlašuji:**

Práci s názvem Návrh pracoviště pro měření stínících vlastností materiálů v blízké zóně jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze 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, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 27.8.2024

Bc. Jiří Svatoň

## **Poděkování**

Těmito slovy bych rád poděkoval svému vedoucímu diplomové práce Ing. Tomáši Zálabskému, Ph.D., za jeho podporu, odbornou pomoc a cenné rady, které jsem využil pro tvorbu diplomové práce. Rád bych také poděkoval rodině, blízkým a přátelům za pomoc a podporu v průběhu celého studia.

## **Anotace**

Tato práce se zabývá návrhem pracoviště pro měření stínících vlastností materiálů v blízké zóně. Práce je rozdělena na část teoretickou, kde se nachází důležité poznatky z oblasti elektromagnetické kompatibility, mikrovlnných struktur a snímání elektromagnetického pole. Práce pokračuje částí návrhu, kde je detailně popsána struktura vybrané měřicí sondy, návrh pracoviště pro měření stínících vlastností materiálů a dalších potřebných částí. Poslední část je implementační, kde jsou návrhy fyzicky vytvořeny a odzkoušeny.

## **Klíčová slova**

Elektromagnetická kompatibilita, planární mikrovlnné struktury, měřicí mikrovlnná sonda, měření stíněného signálu, blízká zóna, absorpční útlum, elektromagnetické stínění.

## **Title**

Design of a workplace for measuring the shielding properties of materials in the near field zone

## **Annotation**

This diploma thesis deals with the design of a workplace for measuring the shielding properties of materials in the near field. The thesis is divided into a theoretical part, where important knowledge on area electromagnetic compatibility, microwave structures, and electromagnetic field sensing is found. The thesis continues with the design part, where the structure of the selected measuring probe, the design of the measurement station, and other necessary parts are approached. The last part is the implementation part, where the designs are physically build and tested.

## **Keywords**

Electromagnetic compatibility, Planar microwave structures, Measuring microwave probe, Measurement of shielded signal, Near field, Absorption Loss, Electromagnetic Shielding.

## Obsah

<b>Seznam zkratk</b> .....	<b>8</b>
<b>Seznam obrázků</b> .....	<b>9</b>
<b>Seznam tabulek</b> .....	<b>11</b>
<b>1 Úvod</b> .....	<b>12</b>
<b>2 Elektromagnetická kompatibilita</b> .....	<b>13</b>
2.1 Elektromagnetické stínění .....	13
2.2 Základní charakteristiky elektromagnetického stínění .....	14
2.2.1 Útlum odrazem .....	15
2.2.2 Absorpční útlum .....	17
2.2.3 Útlum vlivem mnohonásobných odrazů.....	17
2.2.4 Blízké pole - Near field .....	18
2.2.5 Stínící/bezodrazová komora .....	20
2.2.6 Vliv otvorů a technologických netěsností na stínící účinnost .....	22
<b>3 Planární mikrovlnné struktury</b> .....	<b>24</b>
3.1 Planární mikrovlnná vedení.....	24
3.1.1 Mikropáskové vedení .....	27
3.1.2 Zavěšené páskové vedení .....	28
3.2 Planární anténní struktury.....	30
3.2.1 Mikropásková anténa – patch.....	30
3.2.2 Planární monopól.....	32
<b>4 Popis vybrané struktury mikrovlnné sondy</b> .....	<b>33</b>
4.1 Popis a návrh vybrané varianty sondy .....	33
4.2 Popis optimalizace dílčích částí sondy – vliv rozměrů na dílčí parametry .....	36
4.2.1 Návrh vodivého pásku .....	36
4.2.2 Vliv prokovů.....	37
4.2.3 Vliv vzdálenosti prokovů od středu zavěšeného pásku.....	40
4.2.4 Vliv rozměru sondy .....	42
4.2.5 Vliv délky aktivní části sondy .....	45
4.2.6 Výsledné parametry navržených sond.....	47
4.3 Model přenosu signálu mezi dvěma sondami, závislost na přenosu na vzdálenosti mezi sondami .....	50
4.4 Fyzicky vyrobené sondy .....	53

<b>5</b>	<b>Návrh platformy na měření stínící účinnosti absorpčních materiálů.....</b>	<b>56</b>
<b>6</b>	<b>Nastavení postupů měření stínících vlastností materiálů v blízké zóně .....</b>	<b>61</b>
6.1	Měřené vzorky.....	61
6.2	Blokové schéma měřicího pracoviště a kalibrace vektorového obvodového analyzátoru.....	62
6.3	Nastavení platformy pro měření .....	64
<b>7</b>	<b>Popis výsledků praktických měření stínící účinnosti a jejich zhodnocení .....</b>	<b>66</b>
7.1	Postup měření vzorku .....	66
7.1.1	Postup měření středu buňky .....	67
7.1.2	Postup měření „křížků“ mřížky .....	68
7.1.3	Detailnější proměření trojúhelníkového prvku.....	70
7.2	Naměřené hodnoty a jejich vyhodnocení .....	72
7.2.1	Změřené hodnoty postupem měření středu buňky .....	73
7.2.2	Změřené hodnoty postupem měření křížků buňky .....	75
7.2.3	Vyhodnocení kombinace předchozích měření .....	77
7.2.4	Detailnější proměření trojúhelníkového prvku.....	79
<b>8</b>	<b>Závěr.....</b>	<b>82</b>
	<b>Literatura .....</b>	<b>83</b>
	<b>Příloha A – Popis přílohy.....</b>	<b>85</b>

## Seznam zkratk

EMI	Elektromagnetická interference
EMC	Elektromagnetická kompatibilita
CENELEC	European Commiitee for Electrotechnical standardization
IEC	International Electrotechnical Commitee
EM	Elektromagnetické
RF	Radio Frequency
DIN	Německý institut pro normy a standardizace
PLA	Polylaktid
VF	Vysokofrekvenční
GND	Uzemnění
RFID	Radio Frequency Identification

## Seznam obrázků

Obrázek 1 Kolmý dopad rovinné elektromagnetické vlny na kovovou stínící překážku [1]	15
Obrázek 2 Mnohonásobné odrazy na vstupu a výstupu stínící kovové překážky	18
Obrázek 3 Reaktivní a vyzařující oblasti pole	19
Obrázek 4 Bezodrazová komora[9]	21
Obrázek 5 Princip uzavření do komory	21
Obrázek 6 Zajištění netěsností dveří komory[9]	22
Obrázek 7 Zásady při konstrukci stíněných krytů[1]	23
Obrázek 8 Metoda překryvu[1]	23
Obrázek 9 Různé typy planárních mikrovlnných vedení	25
Obrázek 10 Struktura mikropáskového vedení	27
Obrázek 11 Mikropáskové vedení – rozložení elektrického pole	28
Obrázek 12 Mikropáskové vedení – rozložení magnetického pole	28
Obrázek 13 Struktura zavěšeného páskového vedení	29
Obrázek 14 Zavěšené páskové vedení – rozložení elektrického pole	29
Obrázek 15 Zavěšené páskové vedení – rozložení magnetického pole	29
Obrázek 16 Struktura mikropáskové antény	30
Obrázek 17 Možné tvary vodivého flíčku	31
Obrázek 18 Různé tvary planárního monopólu[14]	32
Obrázek 19 Struktura složení sondy	34
Obrázek 20 Pohled shora struktury sondy	35
Obrázek 21 Kalkulačka pro výpočet šířky pásku	37
Obrázek 22 Možnosti prokovení [13]	38
Obrázek 23 Návrh sondy bez prokovů	38
Obrázek 24 Návrh sondy s využitím prokovů	39
Obrázek 25 Použití prokovů na sondě	40
Obrázek 26 Vliv rozestupu řad prokovů pro sondu na frekvenci 4,8GHz	41
Obrázek 27 Vliv rozestupu řad prokovů pro sondu na frekvenci 1,8 GHz	41
Obrázek 28 Úprava šířky substrátu	42
Obrázek 29 Simulované minimum a maximum rozsahu šířky substrátu sondy na frekvenci 1,8 GHz	43
Obrázek 30 Simulované minimum a maximum rozsahu šířky substrátu sondy na frekvenci 2,8 GHz	43
Obrázek 31 Simulace rozsahu délky substrátu pro sondu na frekvenci 4,8 GHz – Parametr $S_{11}$	44
Obrázek 32 Simulace rozsahu délky substrátu pro sondu na frekvenci 4,8 GHz – Parametr $S_{21}$	44
Obrázek 33 Rozsah délky aktivní části sondy 2,8 GHz	45
Obrázek 34 Rozsah délky aktivní části sondy pracujíc na frekvenci 4,8 GHz	46
Obrázek 35 Rozsah délky aktivní části sondy pracující na frekvenci 1,8 GHz	46
Obrázek 36 Sonda pro 1,8GHz	47

Obrázek 37 S-parametry sondy 1,8 GHz-návrh substrátu 1,524 mm.....	48
Obrázek 38 S-parametry sondy 2,8 GHz-návrh substrátu 1,524 mm.....	48
Obrázek 39 Sonda pro frekvenci 4,8 GHz.....	49
Obrázek 40 S-parametry sondy 4,8 GHz – návrh substrátu 1,524 mm.....	49
Obrázek 41 Závislost přenosu na vzdálenosti mezi sondami.....	50
Obrázek 42 Sonda 1,8 GHz změna vzdálenosti od vzorku.....	51
Obrázek 43 Sonda 2,8 GHz změna vzdálenosti od vzorku.....	51
Obrázek 44 Sonda 4,8 GHz změna vzdálenosti od vzorku.....	52
Obrázek 45 Fyzicky vyrobené sondy.....	53
Obrázek 46 Naměřená data fyzicky vyrobené sondy 1,8 GHz.....	54
Obrázek 47 Naměřená data fyzicky vyrobené sondy 2,8 GHz.....	54
Obrázek 48 Naměřená data fyzicky vyrobené sondy 4,8GHz.....	55
Obrázek 49 Model konstrukce měřicí stanice.....	56
Obrázek 50 Návrh konstrukce k uchycení sond.....	57
Obrázek 51 Fyzicky vytvořená konstrukce.....	58
Obrázek 52 Model návrhu držáku pro uchycení sondy.....	59
Obrázek 53 Průřez návrhu držáku pro uchycení sondy.....	59
Obrázek 54 Umístěná sonda do držáku.....	60
Obrázek 55 Fyzicky vytištěné držáky pro uchycení sondy.....	60
Obrázek 56 Vzorek pro měření.....	61
Obrázek 57 Blokové schéma pracoviště.....	62
Obrázek 58 Kalibrační sada.....	63
Obrázek 59 Kalibrace TOSM.....	63
Obrázek 60 Nastavení sondy do držáku.....	64
Obrázek 61 Měřicí pracoviště.....	65
Obrázek 62 Ukázka rozmístění měřeného vzorku.....	66
Obrázek 63 Princip postupu měřeného vzorku na střed buňky.....	67
Obrázek 64 Princip postupu měřeného vzorku na „křížcích“ protnutých osách mřížky ....	68
Obrázek 65 Aplikace kombinace obou postupů na měřený vzorek.....	69
Obrázek 66 Znázornění vybraného obrazce a měřených bodů pro detailnější měření.....	70
Obrázek 67 Princip postupu měřeného vzorku pro získání detailnějšího celku.....	71
Obrázek 68 Vyhodnocení měřeného vzorku sondou 1,8 GHz – spojená data.....	77
Obrázek 69 Vyhodnocení měřeného vzorku sondou 3,2 GHz – spojená data.....	78
Obrázek 70 Vyhodnocení měřeného vzorku sondou 4,8 GHz – spojená data.....	78

## Seznam tabulek

Tabulka 1 - Výsledné rozměry parametrů jednotlivých sond.....	47
Tabulka 2 - Naměřené hodnoty sondy na frekvenci 1,8 GHz – měření středu buňky .....	73
Tabulka 3 - Hodnoty měření pro sondu 3,2 GHz měření středu buňky .....	74
Tabulka 4 - Hodnoty měření pro sondu 4,8 GHz – střed buňky .....	74
Tabulka 5 - Naměřené hodnoty sondy 1,8 GHz – měření křížků buněk.....	75
Tabulka 6 - Hodnoty měření pro sondu 3,2 GHz – měření křížků buněk.....	76
Tabulka 7 - Hodnoty měření pro sondu 4,8 GHz – měření křížků buněk.....	76
Tabulka 8 - Hodnoty měření pro sondu 1,8 GHz – trojúhelník po 0,5 cm.....	79
Tabulka 9 - Vyhodnocení měření pro sondu 1,8 GHz – trojúhelník po 0,5 cm.....	79
Tabulka 10 - Hodnoty měření pro sondu 3,2 GHz – trojúhelník po 0,5 cm.....	80
Tabulka 11 - Vyhodnocení měření pro sondu 3,2 GHz – trojúhelník po 0,5 cm.....	80
Tabulka 12 - Hodnoty měření pro sondu 4,8 GHz – trojúhelník po 0,5.....	81
Tabulka 13 - Vyhodnocení měření pro sondu 4,8 GHz – trojúhelník po 0,5 cm.....	81

# 1 Úvod

Stínící vlastnosti materiálů jsou důležitým faktorem v mnoha oblastech, zejména z důvodu ochrany a zajištění spolehlivosti provozu elektronických zařízení. Uplatnění se nalézá především v technických oborech, jako jsou telekomunikace, stavebnictví či automobilový průmysl. Správná charakterizace těchto vlastností je nezbytná pro efektivní vývoj a hodnocení použitých materiálů. Přesné a detailní měření stínících schopností je proto důležitou součástí vývoje nových materiálů a při testování různých systémů, které by případně měly zajistit ochranu před elektromagnetickým rušením.

Cílem této práce je navržení a implementace vhodného systému, pro detailní měření stínících vlastností materiálů.

Diplomová práce se ve své teoretické části zabývá přiblížením problematiky elektromagnetické kompatibility, kde jsou nejprve představeny důvody vzniku tohoto vědního oboru, popis, z čeho se skládá útlum stíněním a jak ho potlačit. Následně je práce zaměřena na mikrovlnnou techniku, která je zásadní při návrhu měřicího zařízení, pro testování stínících vlastností. V rámci teoretické části byly shrnuty důležité poznatky, ze kterých bylo možné vycházet v části aplikační.

Praktická část je zaměřena na samotný návrh a implementaci sondy. Důležité je navrhnout pracoviště, které bude vhodné pro umístění sond a bude zajišťovat snadnou manipulaci měřeného materiálu. V závěru se nachází popis a zhodnocení výsledků jednotlivých měření vzorků stínícího materiálu.

## 2 Elektromagnetická kompatibilita

Elektromagnetická kompatibilita, je vědní obor zaměřený na sounáležitost všech elektrotechnických, i obecně technických a biologických systémů tak, aby byly zajištěny jejich bezproblémové a bezpečné funkce. Bez tohoto vědního oboru by mohlo docházet k nebezpečným situacím, které se již dříve udály a jímž je vhodné zabránit. Mezi tyto události jsou řazeny například různá ovlivnění lékařských přístrojů v nemocnici elektromagnetickým působením telefonu nebo potopení Britského křižníku Sheffield v roce 1982 ve falklandské válce, kde příčinou byla právě nedodržená elektromagnetická kompatibilita komunikačního zařízení lodi s rádiovým obranným protiletadlovým systémem. Při komunikaci bylo za potřeby tento systém vypínat, jelikož systém způsoboval velké poruchy při vlastní komunikaci křižníku. V okamžiku vypnutí tohoto systému byla odpálena raketa Argentinou, a tento křižník byl následně potopen [1].

Všechna zařízení uvedená do provozu v praxi jsou vystavena rušivým vlivům a tyto nežádoucí vlivy mohou zapříčinit jak nesprávné fungování zařízení, tak i v nejhroších případech jeho zničení.

Cílem tohoto oboru je zajistit správnou činnost všech systémů ve všech situacích a prostředích, do nichž zasahují další různé zdroje, ať už vyvolané přírodními jevy, tak i jevy vytvořené uměle lidskou činností. Přirozeným přírodním jevům nelze většinou zamezit ve vzniku, proto je možné pouze jejich následkům předcházet. Mezi tyto jevy jsou řazeny například vlivy Slunce, kosmu a elektronické procesy v atmosféře. Zmíněnému rušení lidskou činností je potřeba věnovat pozornost a zamezit mu. Jedná se o různá technická zařízení jako elektrické motory, různé spotřebiče tepla či světla a další elektronická zařízení. Pro Evropskou unii byla vytvořena komise CENELEC (European Committee for Electrotechnical standardization), která slouží pro vytváření, správu technických norem v rámci Evropské unie a harmonizaci norem na mezinárodní úrovni. Mezinárodní elektrotechnickou komisí je IEC (International Electrotechnical Committee) [1],[2].

### 2.1 Elektromagnetické stínění

Jedním z nejvýznamnějších prostředků pro potlačení EM rušení je elektromagnetické stínění, které dokáže snížit nejen rušivé vyzařování ze strany zdrojů rušivých signálů, ale i zvýšení elektromagnetické odolnosti ze strany přijímačů rušivých signálů. Stínění lze využít pro ochranu jednotlivých součástek, i funkčních bloků nebo celého elektronického zařízení, které mohou zároveň být elektromagneticky rušeny jinými zdroji nebo sami být zdrojem rušení. Účinek stínění je velmi efektivní, jako elektromagnetická ochrana na výkonové rušení ať už kontinuálního, nebo impulzního typu. Stínící překážku, známou pod pojmem štít, sloužící pro elektromagnetické stínění je možné si představit jako kovový kryt, nebo kovovou desku, kterou můžeme částečně, či úplně eliminovat rušení [1].

## 2.2 Základní charakteristiky elektromagnetického stínění

Působení elektromagnetického stínění lze charakterizovat pomocí koeficientu stínění  $K_S$ . Tento koeficient je stanoven poměrem intenzity elektrického pole  $E_t$  nebo intenzity magnetického pole  $H_t$ , (kde index t vychází z anglického transient). Tento koeficient představuje určitý bod stíněného prostoru, kterým prochází tato pole a intenzitou elektrického pole  $E_i$  případně intenzitou magnetického pole  $H_i$  (kde index i vychází z anglického incident). Intenzita  $H_i$  (značí míru intenzity EM pole dopadajícího na stínící překážku, případně pole bez stínící stěny [1]).

Pro výpočet koeficientu stínění se používá následující vzorec:

$$K_S = \frac{E_t}{E_i} [-] \text{ nebo } K_S = \frac{H_t}{H_i} [-] \quad (2.1)$$

Kde:  $K_S$  – koeficient stínění

$E_t$  – intenzita elektrického pole za překážkou

$E_i$  – intenzita elektrického pole při dopadu na překážku

$H_t$  – intenzita magnetického pole za překážkou

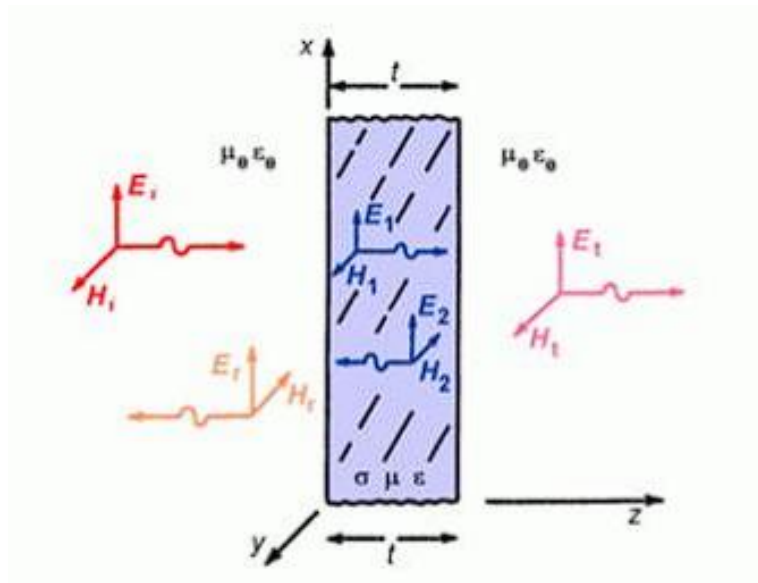
$H_i$  – intenzita magnetického pole při dopadu na překážku

Více používaná je logaritmická hodnota koeficientu, která je známá jako účinnost stínění, případně útlum stínění a vychází z anglického shielding effectiveness.

$$SE = 20 \cdot \log \frac{1}{|K_S|} [\text{dB}] \quad (2.2)$$

Kde: SE – útlum stínění

Pokud je prostředí stínící překážky z obou stran totožné a je přítomna homogenní rovnoměrná rovinná dopadající vlna, tak obě definice pro magnetické i elektrické pole jsou shodné, jelikož obě pole vzájemně váže stejná charakteristická impedance prostředí. Definice by mohla mít odlišné výsledky pro stínění v blízké zóně elektromagnetického pole nebo taky pro stínění které má z obou stran odlišné prostředí [1].



Obrázek 1 Kolmý dopad rovinné elektromagnetické vlny na kovovou stínící překážku [1]

Účinnost stínění SE ve vzdáleném elektromagnetickém poli je možné zapsat níže uvedeným vztahem, který snáze reprezentuje stínící efekt a jeho fyzikální mechanismus.

$$SE = R + A + M \text{ [dB]} \quad (2.3)$$

Kde: R – odraz

A – absorpce

M – mnohonásobné odrazy

Účinnost stínění překážky závisí na třech principech:

- absorpce elektromagnetické energie  $A$ ,
- odraz elektromagnetické vlny od překážky směrem ke zdroji  $R$ ,
- mnohonásobné odrazy uvnitř překážky  $M$ .

Jako nejvýznamnější útlumy pro celkovou účinnost stínění je možné pozorovat absorpční útlum  $A$  a útlum odrazem  $R$ .

### 2.2.1 Útlum odrazem

Při útlumu odrazem vzniká u elektromagnetické vlny odraz energie, kvůli impedančnímu rozhraní při přechodu mezi dielektrikem, které může představovat třeba vzduch s charakteristickou impedancí  $Z_0$  a impedancí  $Z_m$ , která představuje právě stínící materiál. Stínícím materiálem může být například kovová deska. Tento princip se také opakuje, pokud vlna prochází i z kovové překážky zpět do dielektrika. Odraz  $R$  je tedy vstupní odraz překážky ze směru vzduch na kov a poté výstup kov na vzduch. K největšímu útlumu dochází právě na vstupním odrazu materiálu. Níže je uveden vzorec pro výpočet

charakteristické impedance prostředí, kterou představuje vzduch a dále impedance stínící překážky, výpočet těchto vzorců je nutný pro určený útlumu odrazu [1],[5].

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = 377\Omega \qquad Z_M = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma}} \quad [\Omega] \qquad (2.4)$$

Kde:  $Z_0$  – charakteristická impedance volného prostředí před a za překážkou

$Z_M$  – impedance překážky

$\mu_0$  – permeabilita vakua

$\varepsilon_0$  – permitivita vakua

$\mu$  – permeabilita překážky

$\sigma$  – konduktivita

$$R = 20 \cdot \log \left| \frac{(Z_0 + Z_M)^2}{4Z_0 Z_M} \right| \quad [\text{dB}] \qquad (2.5)$$

Tento vzorec lze dále rozepsat jako  $R_1$  – značící odraz vlny na vstupním rozhraní vzduch-kov a  $R_2$  – výstupní rozhraní kov-vzduch.

$$R = 20 \cdot \log \left| \frac{Z_0 + Z_M}{2Z_M} \cdot \frac{Z_0 + Z_M}{2Z_0} \right| = R_1 \cdot R_2 \quad [\text{dB}] \qquad (2.6)$$

Pokud je materiálem velice dobrý vodič, kdy nastane případ že  $Z_0 \gg Z_M$ , tak výpočet bude vypadat přibližně podle vztahů níže, kde je poznat, že vstupní rozhraní vzduch na kov je zdroj hlavního útlumu a na výstupní rozhraní přichází malá část energie.

$$R_1 \approx 20 \cdot \log \left| \frac{Z_0}{2Z_M} \right| \quad [\text{dB}] \qquad (2.7)$$

$$R_2 \approx 20 \cdot \log \frac{1}{2} = -6 \quad [\text{dB}] \qquad (2.8)$$

Tloušťka překážky stínícího materiálu není podstatná pro útlum odrazem a je možné docílit velice dobrého stínícího účinku za použití velice dobrého vodivého materiálu i s tenkým rozměrem.

### 2.2.2 Absorpční útlum

Absorpční útlum  $A$  reprezentuje pohlcení energie elektromagnetické vlny, průchodem materiálu stínící překážky s tloušťkou překážky, vlivem tepelných ztrát.

$$A = 20 \cdot \log \left( e^{\frac{t}{\delta}} \right) \text{ [dB]} \quad (2.9)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} \text{ [m]} \quad (2.10)$$

Kde:  $t$  – tloušťka překážky

$\delta$ - hloubka vniku elektromagnetického pole do materiálu

Hodnota hloubky vniku udává, do jaké hloubky se elektromagnetická vlna dostane před poklesem její intenzity na  $\frac{1}{e}$ , což představuje přibližný pokles o 37% původní hodnoty na povrchu (Konstanta  $e$  ve vzorci je Eulerovo číslo, které má přibližnou hodnotu 2,718) [1],[5].

### 2.2.3 Útlum vlivem mnohonásobných odrazů

Útlum mnohonásobným odrazem  $M$  je průchodem elektromagnetické vlny uvnitř stínící překážky, kdy na vnitřní struktuře materiálu dochází k rozptylu a opakovaným odrazům signálu. Tyto odrazy je možné zanedbat, pokud je stínící překážka z dobře vodivého materiálu a její tloušťka je větší než hloubka vniku. V takovém případě jsou mnohonásobné odrazy zanedbatelné, v opačném případě může snížit celkovou účinnost stínění [1],[5].

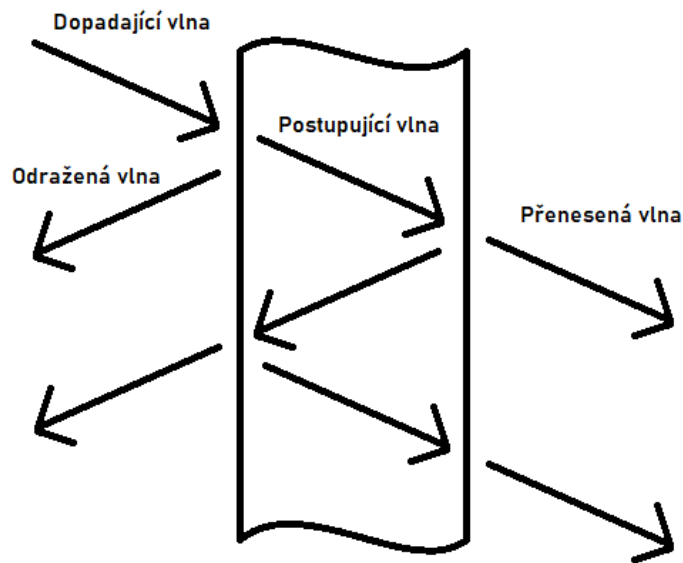
$$M = 20 \cdot \log \left| 1 - \left( \frac{Z_0 - Z_M}{Z_0 + Z_M} \right)^2 \cdot e^{-2\gamma t} \right| \text{ [dB]} \quad (2.11)$$

$$\gamma = \alpha + j\beta \text{ [m}^{-1}\text{]} \quad (2.12)$$

Kde:  $\gamma$  – konstanta šíření v překážce

$\alpha$ - měrný útlum způsobený pohlcením (absorpcí) v dané látce

$\beta$  – fázová konstanta



Obrázek 2 Mnohonásobné odrazy na vstupu a výstupu stínící kovové překážky

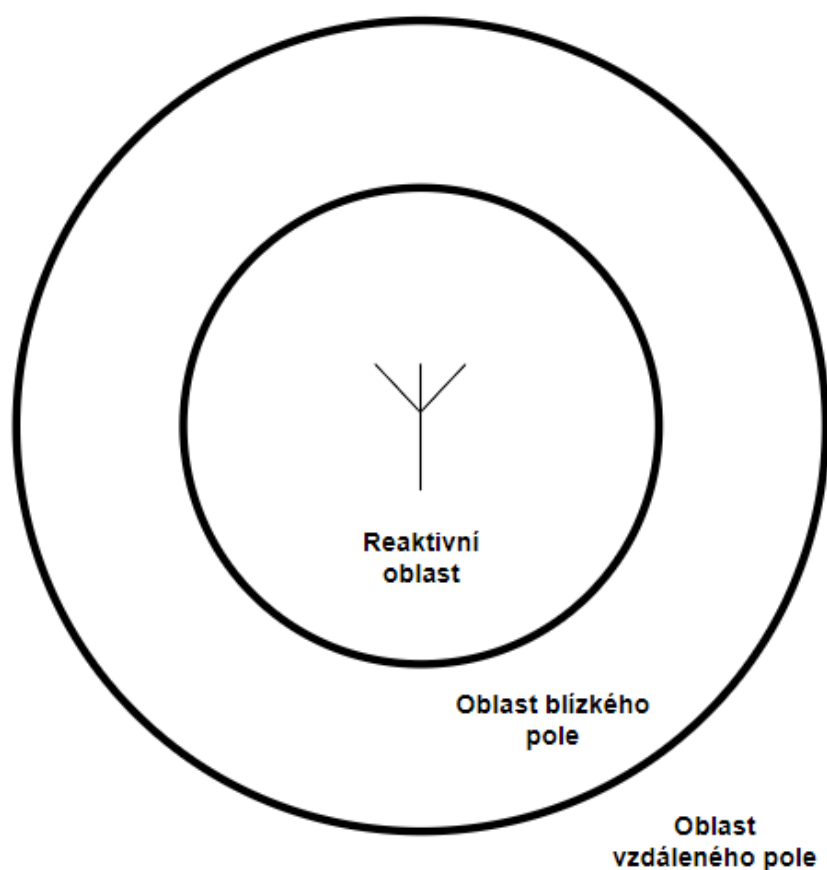
#### 2.2.4 Blízké pole - Near field

Výše uvedený rozbor byl popsán pro stínící překážku a její účinek ve vzdálené zóně elektromagnetického pole. Vzdálená zóna pro elektromagnetickou vlnu v prostoru počítá s tím, že charakteristická impedance  $Z_0$  je konstantní.

V blízkém poli dochází ke specifickému chování elektromagnetické vlny, kdy elektromagnetické složky jsou nepravidelné, a tím se liší od vzdálené zóny. Charakteristická impedance se zde mění s různou vzdáleností od zdroje, to má za následek významné dopady na účinnost stínění.

Pro určování stínících účinků je důležité vědět, zdali je stínění umístěno v blízkém, nebo vzdáleném poli od zdroje rušení. To má zásadní vliv na metody určování stínící účinnosti. Blízké pole je totiž často jiné a složitější oproti řešení případu ve vzdáleném poli. Pro vzdálené pole je možné využít rovnoměrnou rovinnou vlnu kolmo dopadající na povrch stínění. Jelikož elektrické a magnetické pole jsou na sebe kolmé a přímo spolu souvisí.

Podle obrázku (Obrázek 3), je blízké pole nejbližší k anténě. Mezi blízkou a vzdálenou oblastí není náhlý a jasně definovaný přechod.



Obrázek 3 Reaktivní a vyzařující oblasti pole

V bezprostřední blízkosti antény převažují reaktivní složky nad složkami vyzařovanými, proto se tato část nazývá reaktivní blízká zóna. Hranice vzdálenosti reaktivní oblasti je vypočítána pomocí vzorce  $R_r$  (2.14).

$$\lambda = \frac{c}{f} \text{ [m]} \quad (2.13)$$

$$R_r < \frac{\lambda}{2\pi} \text{ [m]} \quad (2.14)$$

Kde:  $\lambda$  – vlnová délka

$c$  – rychlost šíření ve volném prostoru

$f$  – frekvence

S rostoucí vzdáleností od antény se intenzita reaktivních složek postupně stává zanedbatelná ve srovnání s vyzařovanými složkami EM pole, které se stávají dominantními a představují vzdálené pole. Pro antény, které jsou elektricky velké (největší rozměr antény,

který je značen  $D$  je mnohonásobně větší než vlnová délka), se oblast s převládajícími vyzařovanými složkami, dělí na zářivou blízkou a vzdálenou zónu. Pro tyto zmíněné elektrické velké antény, se vzdálená zóna určí pomocí vzorce  $R_f$ (2.15) [4].

$$R_f > \frac{2D^2}{\lambda} \text{ [m]} \quad (2.15)$$

Různí autoři publikace uvádějí odlišné výsledky jak pro určení kritéria blízké reaktivní zóny, tak i pro vzdálenou zónu.

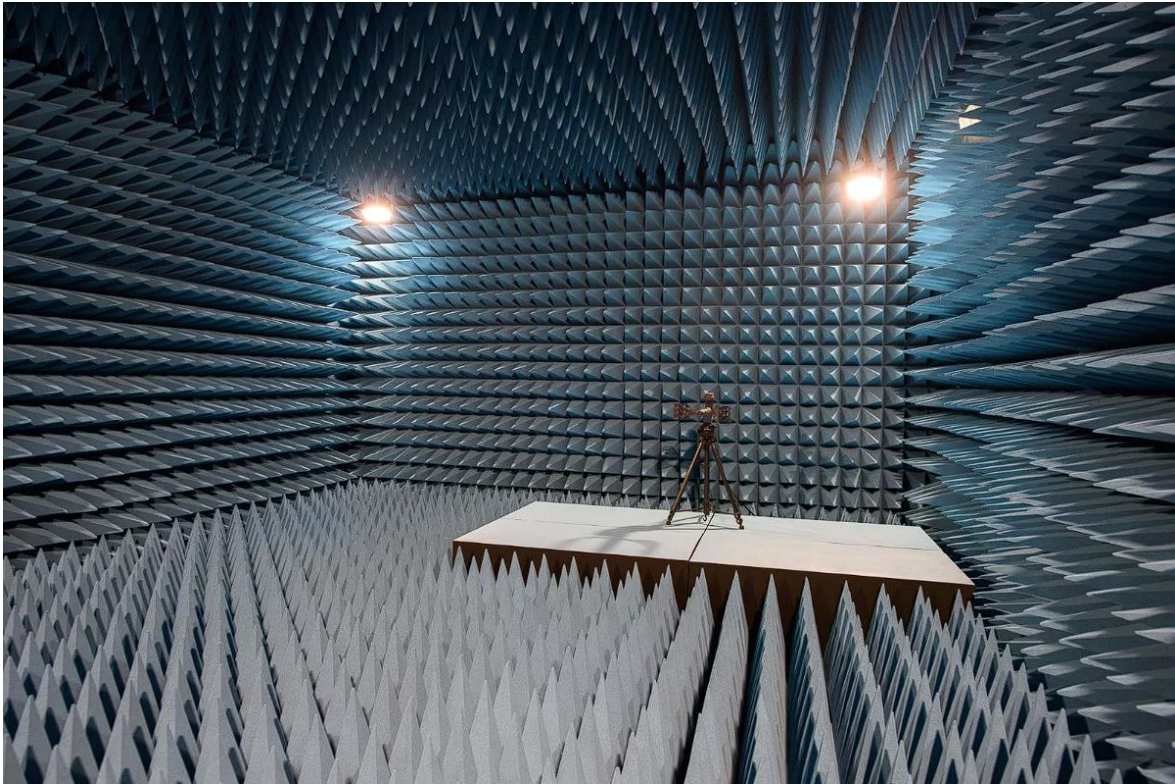
Obecné výhody měření v blízkého zóně:

- nižší požadavky na prostor,
- minimální vznik problémů odrazů od země a okolních odrazů,
- vyloučení vlivu počasí,
- nepohyblivá anténa (při snímání na rovině),
- rychlejší měření,
- jednoduchá modifikace na měření povrchu antény.

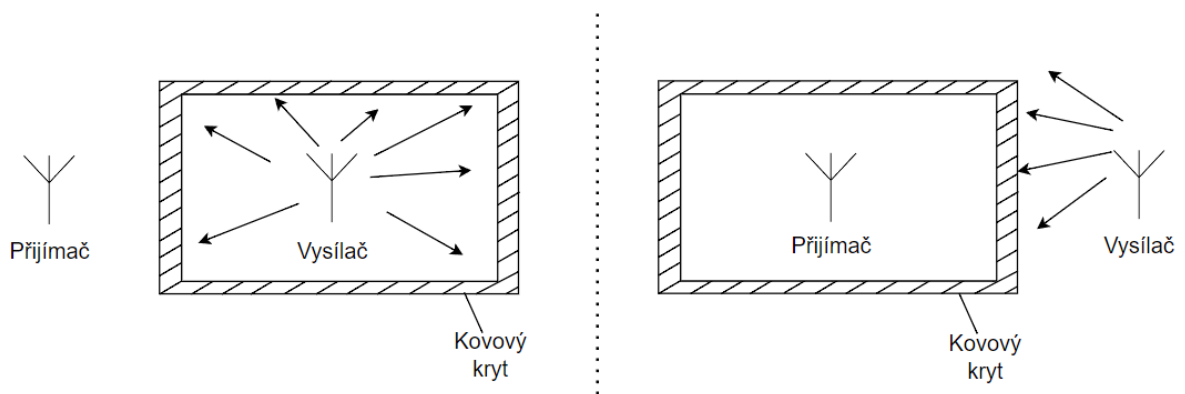
Obecně řečeno je měření ve vzdálené zóně výhodnější pro antény v nižších frekvenčních pásmech, a když se vyžadují pouze jednotlivé řezy. Blízká zóna je výhodnější pro vyšší frekvence, a když se vyžaduje měření kompletní 3D vyzařovací charakteristiky včetně měření polarizačních vlastností [4].

### 2.2.5 Stínící/bezodrazová komora

Bezodrazová komora je typ komory vhodný pro elektromagnetické experimenty. Návrh je udělán tak, aby zde byl výrazně omezen odraz elektromagnetických vln od stěn komory. Bezodrazivosti se dosahuje pomocí absorpčních materiálů, které vyplňují místnost. Využívají se vhodné tvary těchto absorpčních materiálů (například jehlany) tak, aby charakteristická impedance plynule navazovala na impedanci volného prostoru. Většina bezodrazových komor je též účinně stíněna proti nechtěnému rušení signály z vnějšího prostředí. Toto stínění je provedeno precizní kovovou konstrukcí s minimalizací technologických průchodů pro kabeláž procházející z vnějšku do komory a dokonalým vodivým spojením dveří komory s konstrukcí stěn – (Obrázek 6). Stínění též slouží pro omezení nechtěného rušení způsobeného vyzařováním během testovacích měření do okolí, toto stínění má uplatnění především v rámci měření odolnosti zařízení vůči vlivům EM záření - viz.(Obrázek 5). Je potřeba mít na paměti, že stínící účinnost, a především útlum odrazu signálu od stěn v komoře je frekvenčně závislý [1],[5].



Obrázek 4 Bezodrazová komora[9]



Obrázek 5 Princip uzavření do komory



Obrázek 6 Zajištění netěsností dveří komory[9]

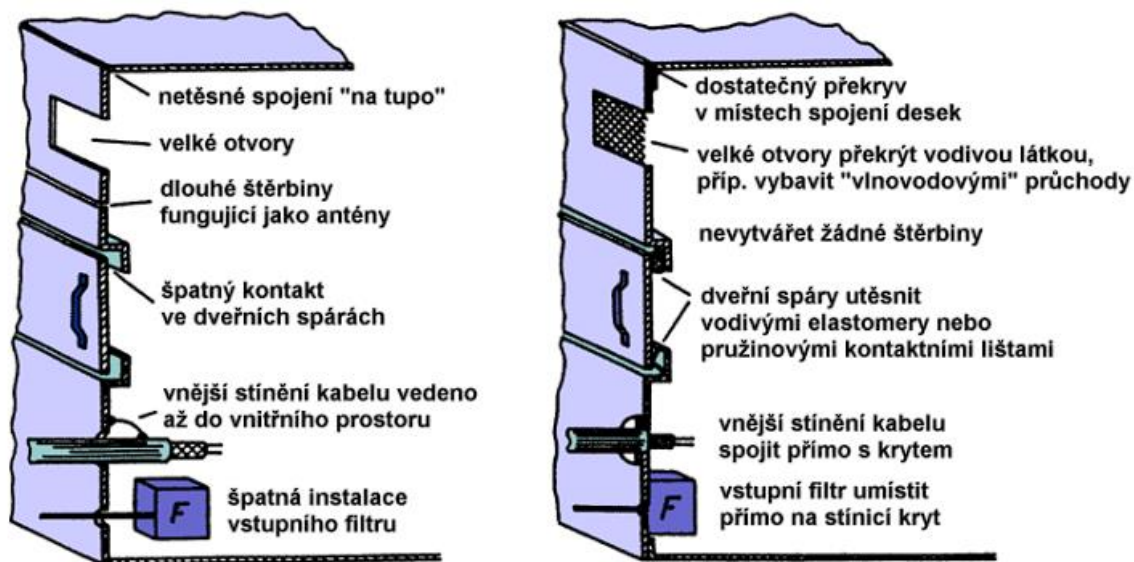
### 2.2.6 Vliv otvorů a technologických netěsností na stínící účinnost

Nejlepším způsobem, jak odstínit elektrické zařízení vůči vlivům EM rušení a zároveň zabránit nechtěnému vyzařování je aplikovat stínící kryt. Tento kryt kromě požadované stínící účinnosti, musí pro správný chod celku, splňovat i další technologická kritéria. Mezi tato kritéria lze zařadit nutnost regulace teploty pomocí chlazení/větrání, případně možnost se do daného krytu dostat pro budoucí údržbu či opravu. Z těchto a mnoho dalších důvodů kryty obsahují řadu netěsností, které mají za následek nehomogenitu a snížení stínící účinnosti [1].

Největší ovlivnění účinnosti stínění u kovových krytů způsobují otvory ve stínící ploše. Pokud budou v kovovém stínícím krytu malé kruhové otvory, například navržené pro účel chlazení, případně průchod kabelů, tak může nastat významné ovlivnění stínící účinnosti. [1].

Podobná situace nastává i u obdélníkových otvorů, které se mohou chovat jako štěrbinové antény.

Z těchto důvodů, je pro minimalizaci negativních účinků technologických otvorů důležité optimalizovat jejich velikost a tvar. Například lze využít otvorů ve tvaru mřížky nebo různých jiných geometrických tvarů, které dokážou lépe blokovat průchod elektromagnetické vlny.



Obrázek 7 Zásady při konstrukci stíněných krytů[1]

Pokud se vyskytují problémy se stíněním ve spoji nebo těsnění stínícího krytu, je potřeba využít stínícího těsnění, které může realizováno s využitím překrytí vytvořeného prostoru nebo použitím absorpčního materiálu pro výplň vzniklé mezery.



Obrázek 8 Metoda překryvu[1]

### 3 Planární mikrovlnné struktury

Mikrovlnná technika je využívána v širokém spektru oborů, své aplikace nalézá ve spojovací technice, vojenském sektoru, dopravě i v medicíně. Velká část realizace mikrovlnných systémů je využívána pro vědecké přístroje, navigaci či radiolokaci. Oblast mikrovlnné techniky je uvažována na vysokých kmitočtech přibližně ve frekvenčním pásmu 300 MHz až 3 THz. Celé mikrovlnné kmitočtové pásmo je poté rozděleno na pod pásma, která jsou [7]:

- Decimetrové vlny 300 MHz až 3 GHz,
- Centimetrové vlny 3 GHz až 30 GHz,
- Milimetrové vlny 30 GHz až 300 GHz,
- Submilimetrové vlny 300 GHz až 3 THz.

Vlnová délka signálu šířícího se ve volném prostředí ve výše uvedených frekvenčních pásmech může být různá od 1 metru až po 0,1 milimetru. Planární struktura znamená, že všechny důležité prvky jsou umístěné na jedné rovině povrchu substrátu a není obsažen žádný zásadně převyšující prvek této roviny [8].

Mikrovlnná technika z hlediska fyzikálně-technických principů má řadu výhod, například v realizaci obvodů pro velkou šířku přenášených kmitočtových pásem, jelikož v rádiové komunikaci je možné dosáhnout dobré přenosové rychlosti informace a kapacity komunikačních kanálů pouze dostatečnou šířkou pásma, využití nalézá i ve vzájemné komunikaci počítačů mezi sebou. Další výhodou je možnost využití antén o malých rozměrech, při dosažení vysoké směrovosti, také výroba malých systémů, jelikož mikrovlnné části jsou v relaci s vlnovou délkou [7].

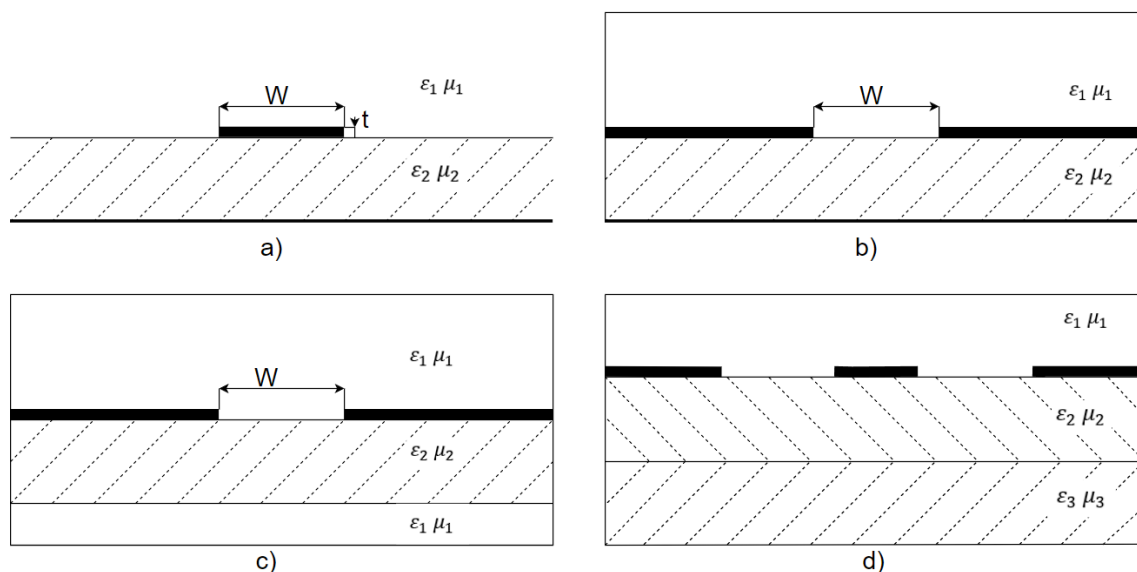
#### 3.1 Planární mikrovlnná vedení

Pro přenos signálu se využívají různé druhy mikrovlnných vedení, jedná se například o vlnovodné vedení nebo koaxiální vedení. Kovový vlnovod je využíván, protože na rozdíl od ostatních metod vedení, je schopný přenášet velké výkony s nízkým útlumem. Mezi nevýhody se řadí velké rozměry, váha, cena a přenášené kmitočtové pásmo, přičemž vlnovod pro přenos signálu představuje filtr typu horní propust. Koaxiální vedení je relativně širokopásmové a vhodné pro řadu aplikací mikrovlnných obvodů, problémem ale může být komplikovanost výroby a cenová nákladnost, při sériové výrobě mikrovlnných obvodů. Z tohoto důvodu se již od padesátých let začaly rozvíjet planární přenosová vedení, která mají výhodu v podobě malých rozměrů a nízkých nákladů na výrobu, jsou tedy vhodnější pro sériovou výrobu. Do těchto planárních struktur patří pásková, mikropásková, šterbinová a koplanární vedení [7].

Možná kritéria a posuzované vlastnosti lze rozdělit do tří kategorií, které jsou:

Elektrické vlastnosti:	měrný útlum, maximální přenesený výkon.
Mechanické vlastnosti:	velikost rozměrů, hmotnost.
Ekonomické hledisko	náklady na výrobu, možnosti sériové výroby.

Pod pojmem planární mikrovlnné vedení si lze představit kovovou rovinnou zemnicí desku s jedním nebo případně i více rovnoběžnými planárními vodiči. Tyto planární vodiče mohou být tvořeny kovovými pásky jako elektrické vodiče, případně i štěrbiny v kovové desce. Tyto struktury mohou obsahovat i další dielektrické vrstvy, které se vzájemně liší ať už vlastnosti elektrickými či magnetickými. Planární vedení se dá dělit na otevřené vedení, nebo na stíněné, kdy je umístěno stíněné uvnitř vodivé konstrukce [6].



**Obrázek 9 Různé typy planárních mikrovlnných vedení**

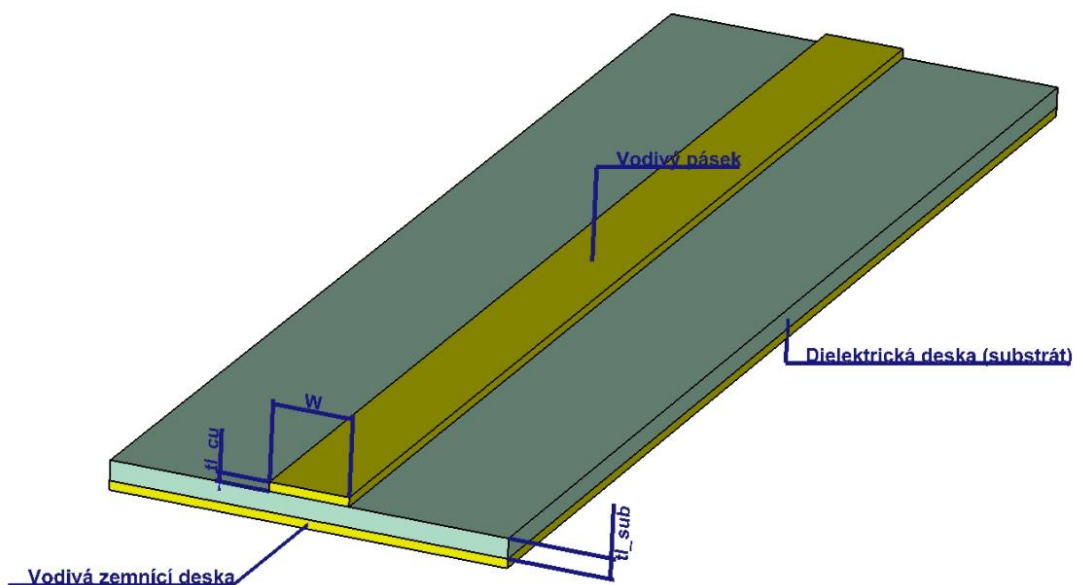
Na (Obrázek 9) je uvedeno několik často používaných druhů planárních mikrovlnných vedení. Jsou zde vykresleny následující mikrovlnná vedení:

- Otevřená mikropásková vedení – často používaná v mikrovlnných obvodech pro vysoké frekvence, jsou využívány díky jejich nízkým ztrátám a jednoduché výrobě.
- Stíněná štěrbinová vedení – jedná se o vedení se stíněnou štěrbinou, proto je dobře využitelné k aplikaci, kde je vyžadována ochrana před elektromagnetickým rušením.

- c) Stíněné štěrbinové vedení – pole je omezeno pouze do blízké oblasti štěrbiny, proto má toto vedení velice malé ztráty. Využívají se zde substráty s vyšší permitivitou kolem hodnoty 10. Díky stínění nedochází k nežádoucímu vyzařování ani ovlivňování vedení z vnějších zdrojů (např. rušení).
  
- d) Stíněné koplanární vedení – jedná se o vedení, které je schopné zajistit stabilitu a dobrou ochranu vůči rušení. Tato vlastnost je způsobená tím, že stínění obklopuje celé vedení, a tak způsobuje ochranu proti vnějším elektromagnetickým vlivům, takže jsou vhodné pro vysokofrekvenční obvody, které jsou citlivé na rušení.

### 3.1.1 Mikropáskové vedení

Mikropáskové vedení je efektivním a jednoduchým typem planárního mikrovlnného vedení a slouží k přenosu vysokofrekvenčních signálů s důrazem na minimální ztrátovost a nízké zkreslení. Skládá se z dielektrického substrátu, na kterém je umístěn tenký vodivý pásek sloužící jako vodič, podél kterého je přenášen elektromagnetický signál ovlivňovaný dielektrickým substrátem. Mikropáskové vedení má velké spektrum využití v různých aplikacích od antén, zesilovačů, filtrů a integrovaných obvodů pro mikrovlnnou a radiovou technologii.

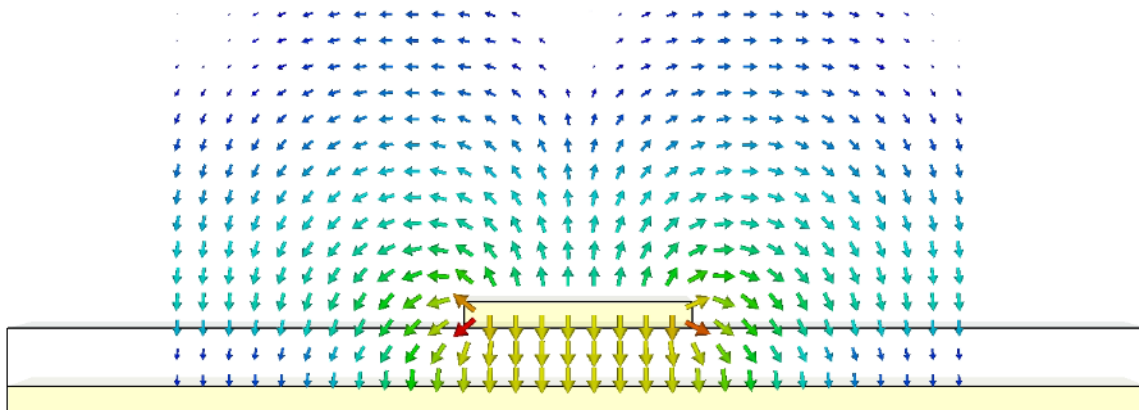


Obrázek 10 Struktura mikropáskového vedení

Při návrhu homogenního vedení, je důležité vědět jaké má dané vedení rozložení elektromagnetického pole, k zjištění jeho chování při přenosu signálu. Pro zjištění rozložení EM polí navržených vedení jsou využívány simulační programy. Na následujících obrázcích je vidět rozložení elektrického a magnetického pole v okolí mikropáskového vedení.

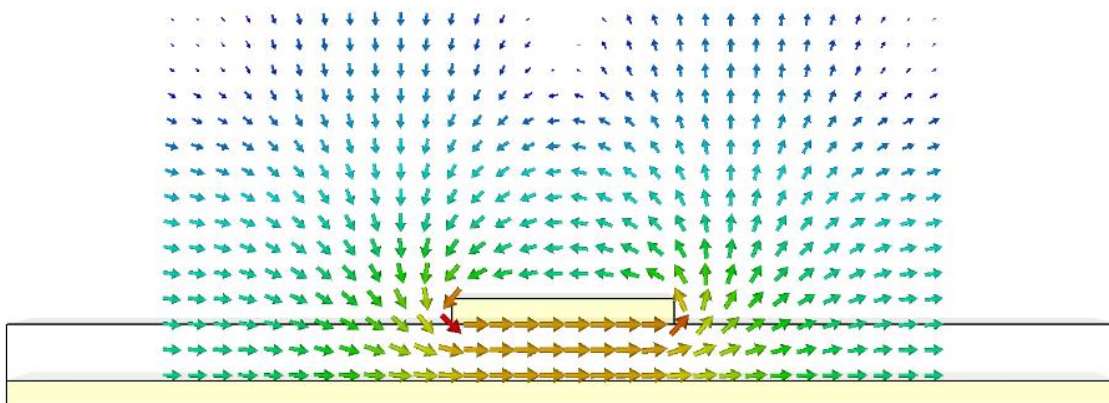
Na (Obrázek 11) je znázorněno rozložení elektrického pole, orientace siločar elektrického pole je znázorněna pomocí orientovaných šipek. Je zde dobře vidět uzavírání elektrického pole vycházejícího ze všech směrů mikropásku postupně k zemnicí ploše.

Majoritní část výkonu je přenášena mezi vodivým páskem a zemnicí deskou, kde šipky intenzity elektrického pole jdou přímo svisle a mají největší velkou intenzitu. Vrchní a boční část intenzity pole se rozprostírá i do okolí, tedy mimo pásek a zemnicí rovinu do okolního prostředí, tedy prochází vzduchem nebo jiným médiem a poté skrz substrát k zemní rovině.



Obrázek 11 Mikropáskové vedení – rozložení elektrického pole

Rozložení magnetického pole je možné pozorovat na obrázku (Obrázek 12), kde je patrné, že siločáry magnetického pole uzavírají elipsy kolem vodivého pásku. Opět je možné vidět, že je největší intenzita je mezi vodivým páskem a zemnicí plochou.



Obrázek 12 Mikropáskové vedení – rozložení magnetického pole

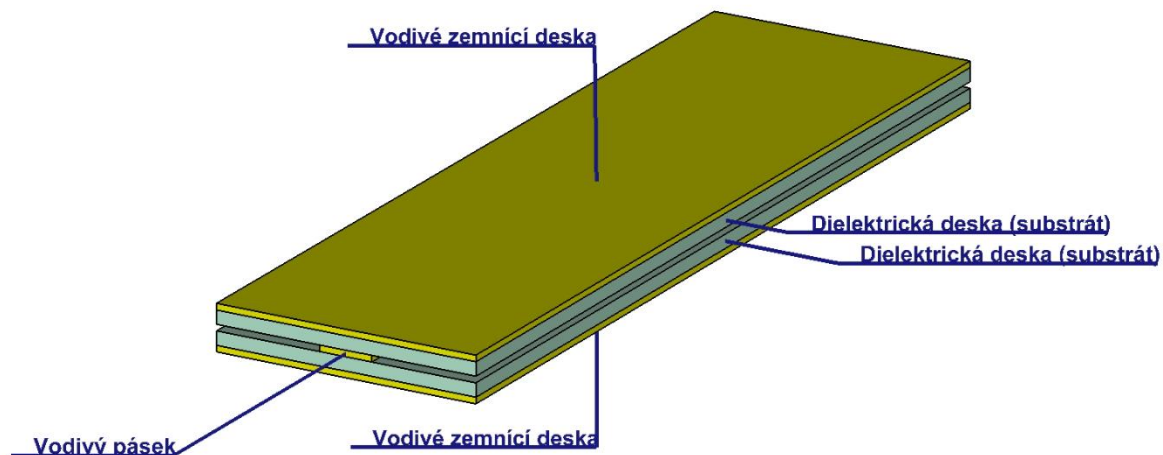
### 3.1.2 Zavěšené páskové vedení

Zavěšené páskové vedení je specifický typ páskového vedení. Běžná struktura zavěšeného páskového vedení je složena ze dvou zemnicích rovin, mezi které je umístěn vodivý pásek obklopený ze všech stran stejnorodým homogenním dielektrikem. Výhodou této páskové struktury je šíření elektromagnetické vlny, kdy nedochází k vyzařování do okolí a eliminace příjmu okolního rušení. Struktura má tedy velice dobré vlastnosti, ale je náročná z hlediska výroby a kvalitu/čistotu dielektrika materiálu.

Při praktické realizaci se zavěšené páskové vedení navrhuje v podobě pětivrstvé desky plošného spoje. Vyrobí se jedna deska, která obsahuje pouze jednu plnou vodivou plochu GND na substrátu a druhá deska která je oboustranná, tedy z jedné strany substrátu

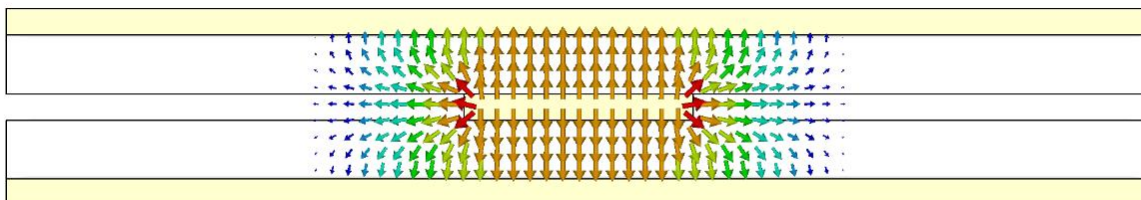
je vodivá rovina GND a z druhé je vodivý pásek. Tyto dvě desky se k sobě slepí pomocí tzv. prepregu, který má obecně velice podobné vlastnosti jako zvolený substrát.

Pro počítačový model v CST Studiu jsem použil zjednodušení v podobě vzduchové mezery obklopující vodivý pásek místo lepidla (prepregu) - viz struktura zavěšeného páskového vedení na (Obrázek 13).



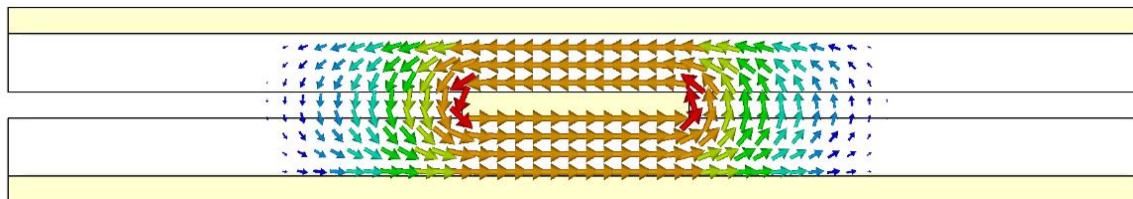
Obrázek 13 Struktura zavěšeného páskového vedení

Ze simulovaného rozložení elektrického pole (viz Obrázek 14) lze pozorovat, že elektrické pole je nejsilnější mezi zavěšeným vodivým páskem a okrajovými zemními deskami. Rozložení intenzity je do obou směrů identické.



Obrázek 14 Zavěšené páskové vedení – rozložení elektrického pole

Magnetické pole se kolem vodivého pásku uzavírá do eliptického tvaru. V obou případech rozložení magnetické a elektrické intenzity, je intenzita symetrická podle vertikální i horizontální osy.



Obrázek 15 Zavěšené páskové vedení – rozložení magnetického pole

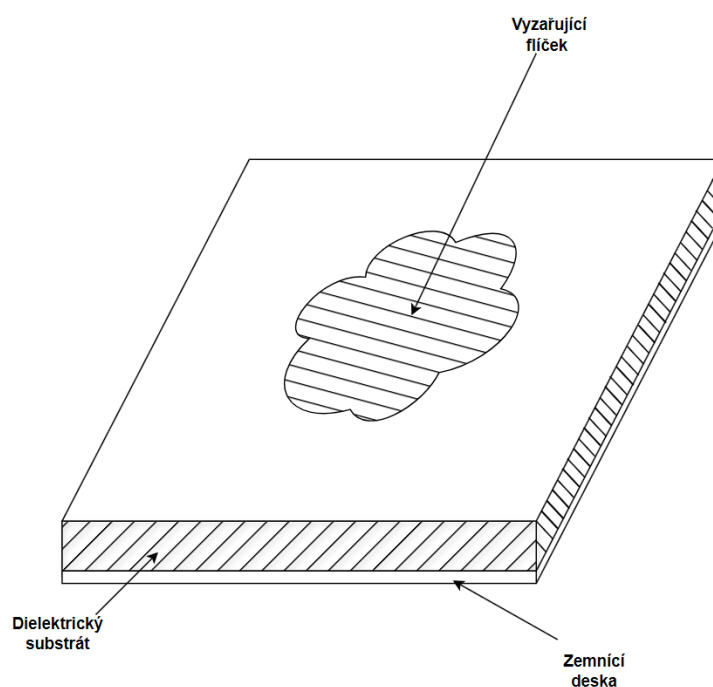
## 3.2 Planární anténní struktury

V mnoho aplikacích anténní techniky je klíčové zohlednit faktory, jako jsou velikost, hmotnost, náklady a výrobní náročnost. Tyto požadavky jsou zvláště důležité v oblastech, jako je letecká doprava, satelitní komunikace, či různé bezdrátové technologie. Vzhledem k těmto požadavkům se často jako vhodné řešení nabízí použití planárních anténních struktur, které svou konstrukcí umožňují splnění těchto kritérií a nabízejí řadu výhod, jako jsou kompaktnost a snadná integrace do signálových rozvodů.

Mezi často využívané planární struktury patří mikropáskové (patch) antény a planární monopól. Následující kapitoly jsou zaměřené právě na tyto struktury.

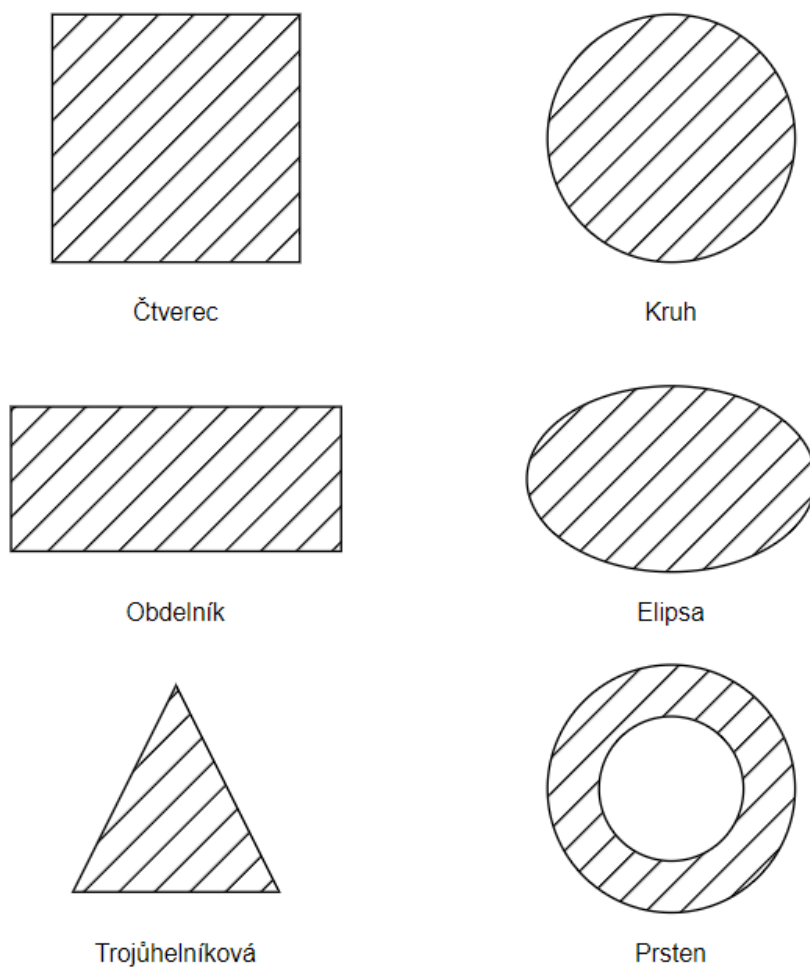
### 3.2.1 Mikropásková anténa – patch

Mikropásková anténa, známá také jako patch anténa, se skládá z vodivého flíčku (patch), který má tvar planárního, případně i neplanárního geometrického útvaru, umístěného na jedné straně dielektrického substrátu. Z druhé strany substrátu, se nachází zemní rovina.



Obrázek 16 Struktura mikropáskové antény

Tvar flíčku je vybrán na základě vybrané varianty použití a požadovaných vlastnostech, jako jsou šířka pásma, velikost, směrovost a zisk. Běžnými základními tvary flíčku jsou, obdélník, čtverec nebo třeba kruh. Mezi složitější tvary je možné zařadit tvary jako jsou elipsa, trojúhelník a jiné specifické tvary [10].



**Obrázek 17 Možné tvary vodivého flíčku**

Možnosti napájení mikropáskových antén lze řadit do dvou základních kategorií. Tyto kategorie jsou, kontaktní a bezkontaktní. Mezi kontaktní způsoby napájení patří mikropáskové a koaxiální vedení. Bezkontaktní lze provést vazební štěrbinou nebo pomocí otevřeného konce vedení. Nejdůležitějším faktorem pro zvolení napájení je dbát na účinnost přenosu energie mezi vyzařující strukturou a napájecí strukturou. To znamená zajistit dobré impedanční přizpůsobení [10].

- Výhoda mikropáskových antén spočívá v:
- nízké hmotnosti,
  - jednoduché konstrukci,
  - dobré integritě s mikrovlnnými obvody.
- Nevýhody mikropáskových antén:
- úzká kmitočtová šířka pásma,
  - nižší zisk (přibližně 6 dB),
  - velké vyzařování z napájení.

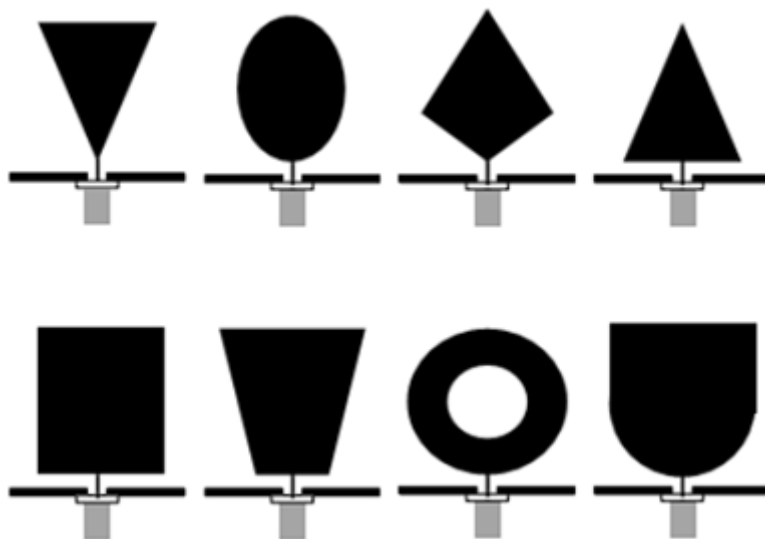
### 3.2.2 Planární monopól

Dalším typem planární anténní struktury, která je často využívána v moderních bezdrátových systémech, je planární monopól. Tento typ antény je obdobou klasického monopólu, ovšem s tím rozdílem, že zářič je navržen na rovinném substrátu. To má za následek možnost lepší integrace do moderních elektronických zařízení, jako jsou mobilní telefony, Wi-fi routery nebo třeba i využití pro RFID.

Planární monopólní antény jsou navrženy tak, aby vyzařovaly elektromagnetickou vlnu ve všech směrech v horizontální rovině. To umožňuje dobré pokrytí signálu, které je důležité například pro mobilní komunikační a bezdrátové sítě.

Mezi hlavní výhody jsou zahrnuty nízké náklady na výrobu, jednoduchost konstrukce a kompaktní velikost, která zahrnuje lehkou a malou konstrukci.

Stejně jako u planární patch antény, planární monopól je složen z vodivého prvku z jedné strany dielektrického substrátu a zemnicí roviny na druhé straně. To vytváří všesměrové vyzařování v horizontální rovině, což má za následek rovnoměrné vyzařování kolem antény.



Obrázek 18 Různé tvary planárního monopólu[14]

Pro správnou funkci planární monopólové antény, je potřebné, aby zemnicí rovina byla elektricky dostatečně velká. Z tohoto důvodu je nutné při návrhu pro udržení kompaktnosti optimalizovat právě zemnicí rovinu. Je možné využít více vrstev substrátu, upravit tvar zemnicí roviny nebo přidat takzvané měkké okraje. Měkké okraje, se vytvoří zaoblením hran, čím vzniká větší plynulost impedančních přechodů. Zbavením se ostrých hran může být předejito problémům jako jsou odrazy a nekontrolované vyzařování [14].

## 4 Popis vybrané struktury mikrovlnné sondy

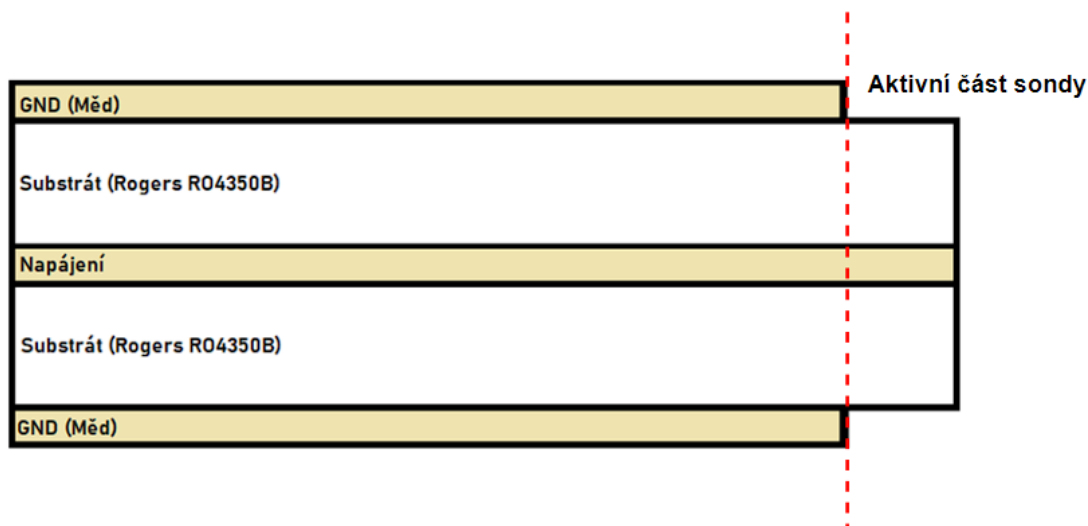
Tato kapitola se zabývá popisem, návrhem a optimalizací anténních sond pro několik zájmových frekvencí, které jsou použity pro měření úrovně signálu procházejícího skrz měřený vzorek útlumového materiálu. Tato kapitola popisuje praktickou část mé diplomové práce. Navržené a optimalizované sondy budou následně vyrobeny a jejich vlastnosti ověřeny měřením. Cílem je nejen popsat strukturu jednotlivých sond, ale také optimalizovat jejich design, aby co nejefektivněji fungovaly v zamyšlených podmínkách.

K tomuto účelu je využíván software CST Studio Suite, který umožňuje provádět elektromagnetické simulace, analyzovat chování struktur a optimalizovat parametry sond. Tento software je široce využíván v oblastech, jako jsou elektrotechnika, telekomunikace, letecký průmysl a nabízí pokročilé možnosti návrhu vysokofrekvenčních obvodů [11].

### 4.1 Popis a návrh vybrané varianty sondy

Mnou vybraný typ sondy elektrického pole se celkově skládá z pěti vrstev materiálu. Tyto vrstvy jsou symetrické vůči střední vrstvě, je tedy jedno, jestli na návrh sondy pohlédneme z vrchu, nebo ze spodu. Níže je uveden podrobnější popis jednotlivých vrstev, včetně grafické reprezentace jejich uspořádání na (Obrázek 19).

1. Vrchní zemnicí deska GND – vyrobena z mědi. Tato deska slouží jako horní vrstva uzemnění sondy.
2. Vrchní vrstva substrátu – vyrobena z dielektrika Rogers RO4350B. Jedná se o vrstvu, která odděluje vrchní uzemnění sondy od napájecí vrstvy.
3. Napájecí vrstva – jedná se o středovou část, kde je umístěn napájecí měděný pásek, pro přenos signálu.
4. Spodní vrstva substrátu – vyrobena z dielektrika Rogers RO4350B. Odděluje napájecí vrstvu od spodního uzemnění sondy.
5. Spodní zemnicí deska GND – vyrobena z mědi, slouží jako spodní část sondy pro uzemnění.

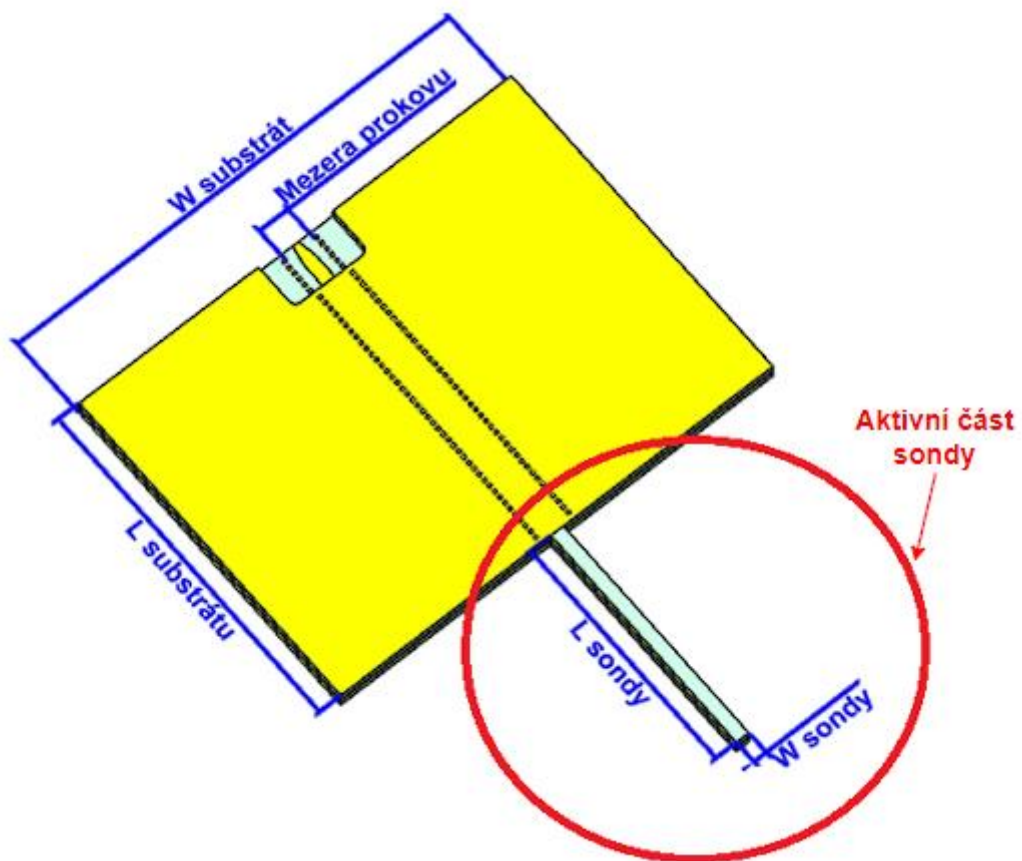


Obrázek 19 Struktura složení sondy

Koncová aktivní část sondy se lehce odlišuje od předchozích vrstev. Neobsahuje vnější (vrchní a spodní) zemnicí desky GND, jelikož tyto desky by ovlivňovaly vazbu elektrického pole na aktivní část sondy.

Materiál Rogers je tvořen na bázi hydrokarbonu/ keramického laminátu, je vhodný pro návrhy vysokofrekvenční obvodů. Tento materiál vyniká nízkými ztráty, konstantní permitivitou napříč celým průřezem materiálu a relativně dostupnou cenou. Obecně se výběr vhodných dielektrických materiálů pro konstrukci napájecích vedení zmenšuje, jestliže jsou využívány kmitočty nad 500 MHz. Teplotní koeficient roztažnosti je srovnatelný jako u mědi, což je potřebné pro konstrukci vícevrstevných desek.

Na (Obrázek 20) je dobře viditelná aktivní část sondy bez GND vrstev a též napájecí část sondy složená ze všech pěti vrstev. Aby nedocházelo k nežádoucímu vyzařování EM pole do boků napájecího vedení, jsou vrchní a spodní vodivé vrstvy GND propojeny pomocí vodivých prokůvů.



Obrázek 20 Pohled shora struktury sondy

## 4.2 Popis optimalizace dílčích částí sondy – vliv rozměrů na dílčí parametry

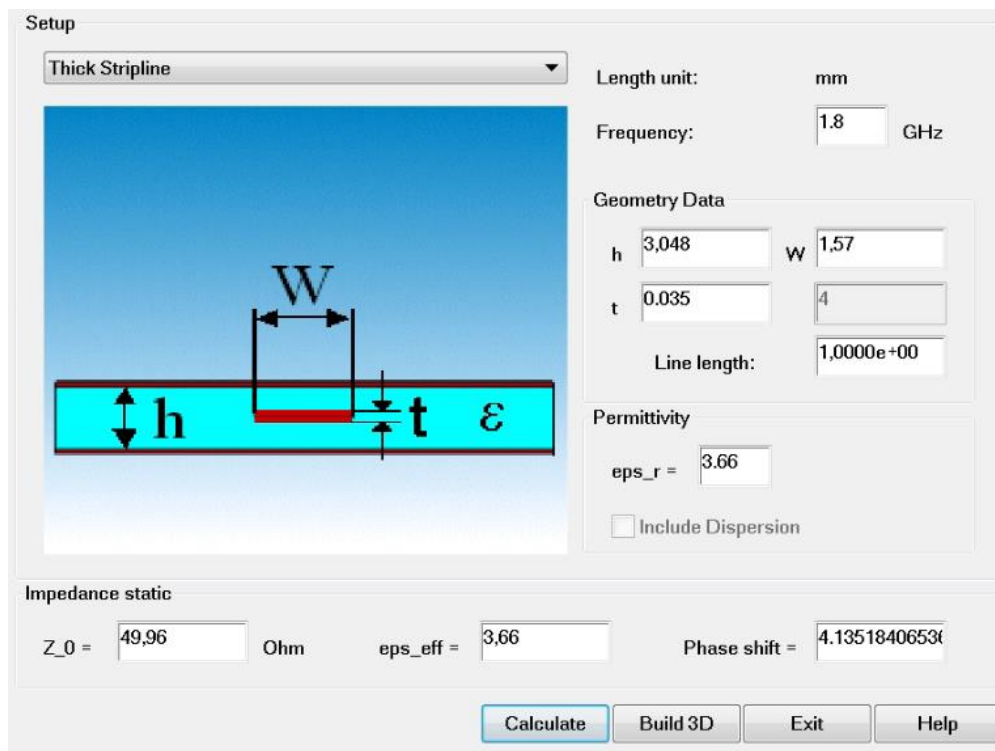
Prvním důležitým krokem bylo definovat cílové parametry sond. Mezi tyto parametry, patří zvolení cílové střední frekvence, na které budou jednotlivé sondy pracovat. Zvolené frekvence jsou stanoveny na 1,8 GHz, 2,8 GHz a 4,8 GHz. Důležité je definovat charakteristickou impedanci na vstupu sond. Aby navržené sondy byly kompatibilní s běžnými měřicími přístroji, byla navržena charakteristická vstupní impedance všech sond  $50 \Omega$ . Jako nosný dielektrický substrát byl zvolen Rogers RO4350B.

### 4.2.1 Návrh vodivého pásku

Nejprve byla navržena napájecí část sondy, sestávající ze zavěšeného páskového vedení obklopeného zvoleným substrátem Rogers RO4350B.

Relativní permitivita tohoto substrátu je podle datasheetu výrobce desek plošných spojů, firmy Pragoboard s.r.o. rovna hodnotě 3,66. Stejná hodnota je pro tento typ substrátu uvedena i v databázi materiálů v CST Studio Suite. Výrobce nabízí různé možnosti tloušťky, pro tento materiál. Tloušťka substrátu byla vybrána nejsilnější z této možné řady, a to je tedy 1,524 mm. Tato tloušťka zajistí větší konstrukční pevnost a zmírní obavy z možného poškození [12].

Z výše zmíněných informací, byla následně pomocí vestavěné kalkulačky v simulačním programu, odhadnuta šířka vodivého pásku na hodnotu 1,57 mm, při jeho základní tloušťce  $35 \mu\text{m}$ . Při realizaci simulací v CST Studiu, tato tloušťka nesplňovala kritéria na požadovanou impedanci a bylo provedena optimalizace. Po více zkušebních verzích, byla finálně zvolena šířka vodivého pásku 2 mm. Tato šířka byla po odzkoušení vhodná pro všechny zvolené frekvence. Rozdíl mezi teoreticky vypočtenou hodnotou a optimalizovanou hodnotou je patrně způsoben vzduchovou mezerou mezi dvěma vrstvami substrátu, která je shodná s tloušťkou vodivého měděného pásku, přičemž vzorec pro výpočet impedance zavěšeného páskového vedení předpokládá, že je vodivý pásek celý obklopen konstantně dielektrikem.

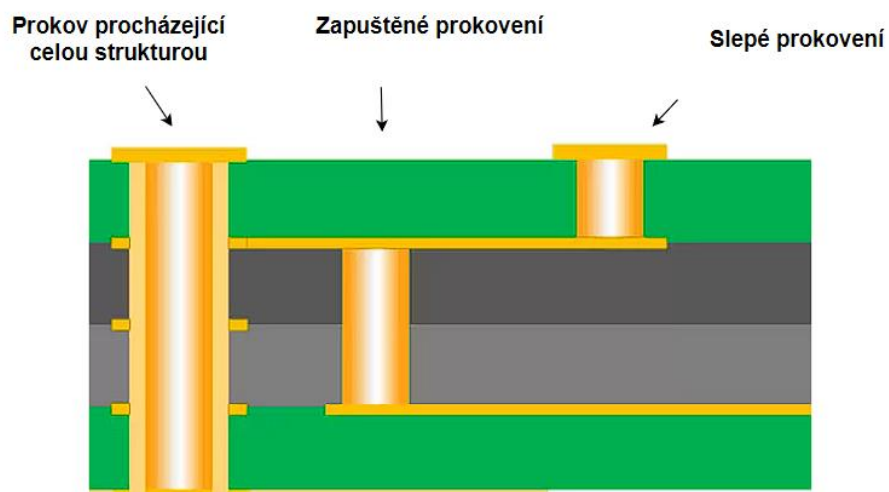


Obrázek 21 Kalkulačka pro výpočet šířky pásku

#### 4.2.2 Vliv prokůvů

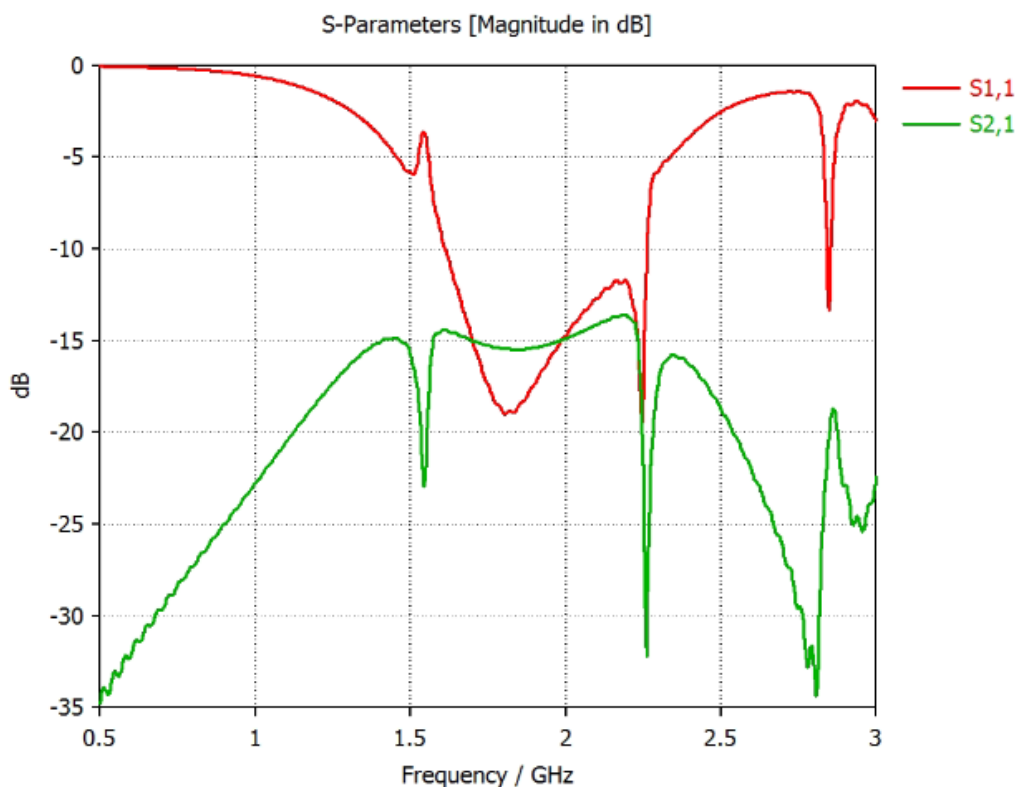
Když se mluví o použití prokůvů (anglicky via), jedná se o malý vodivý průchod, sloužící k elektrickému propojení jednotlivých vodivých vrstev desky plošných spojů. V anténních systémech mají prokůvy důležitou roli, jelikož je díky nim možno nepájet anténní prvky, vytvářet vlnovod integrovaný do substrátu či omezit nežádoucí vyzařování z vodivých cest. Poslední zmiňovaný efekt je využit i při mém návrhu anténních sond

V praxi se využívá více druhů prokůvů. První možností, která je i využita v mé struktuře, jsou prokůvy propojující všechny vrstvy. Jedná se o nejběžnější způsob. Další možné způsoby jsou založeny na využití částečného prokovení, kdy se používají slepé (blind vias) a zapuštěné (buried vias) prokůvy. Slepé prokůvy propojují pouze jednu vnější vrstvu s některými vnitřními vrstvami. Zapuštěné propojují pouze vnitřní vrstvy a jsou zcela ukryté – (Obrázek 22) [13].



Obrázek 22 Možnosti prokovení [13]

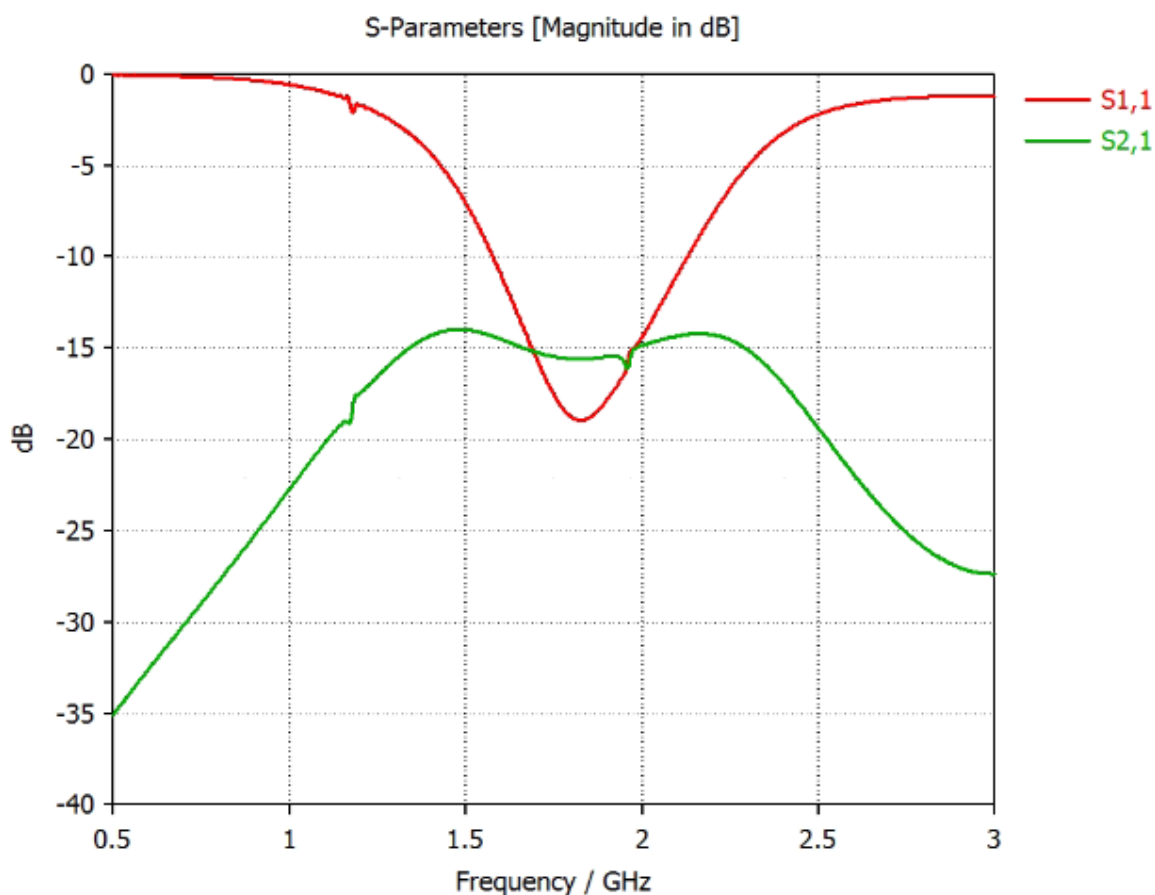
Na obrázku (Obrázek 23) je graf rozptylových parametrů  $S_{11}$  a  $S_{21}$ , pro případ, kdy nejsou využity v návrhu napájecího vedení ze zavěšeného pásku prokovy. Můžeme si všimnout, že graf vykazuje výraznější změny a větší odchylky, zejména od frekvence 1,5 GHz.



Obrázek 23 Návrh sondy bez prokovů

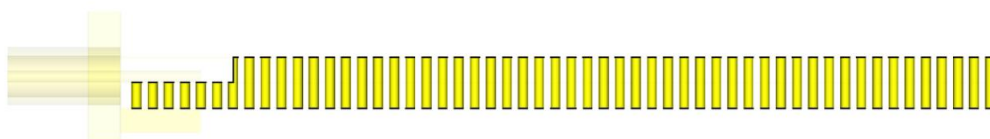
Obrázek (Obrázek 24) ukazuje graf pro stejnou sondu ve stejných podmínkách, jen s přidáním prokovů. Velikost odraženého signálu (parametr  $S_{11}$ ) i přenos signálu (parametr  $S_{21}$ ) je výrazně stabilnější. Z toho lze vyvodit, že přítomnost prokovů zlepšuje impedanční přizpůsobení a redukuje nežádoucí vyzařování signálu do substrátu na bocích zavěšeného pásku, čímž snižuje přenosové ztráty. Zlepšení přenosu je patrné i na vyšších frekvencích. Prokovy mají tedy pozitivní vliv na vlastnosti sondy, což je vhodné pro efektivní přenos signálu v širokém frekvenčním pásmu.

Samotné jednotlivé prokovy měly průměr 0,6 mm. Středů prokovů jsou od sebe ve vzdálenosti 1 mm, tím vzniká rozmístění s volnou mezerou o velikosti 0,4 mm po celé délce napájecí části sondy.



Obrázek 24 Návrh sondy s využitím prokovů

Boční pohled sondy



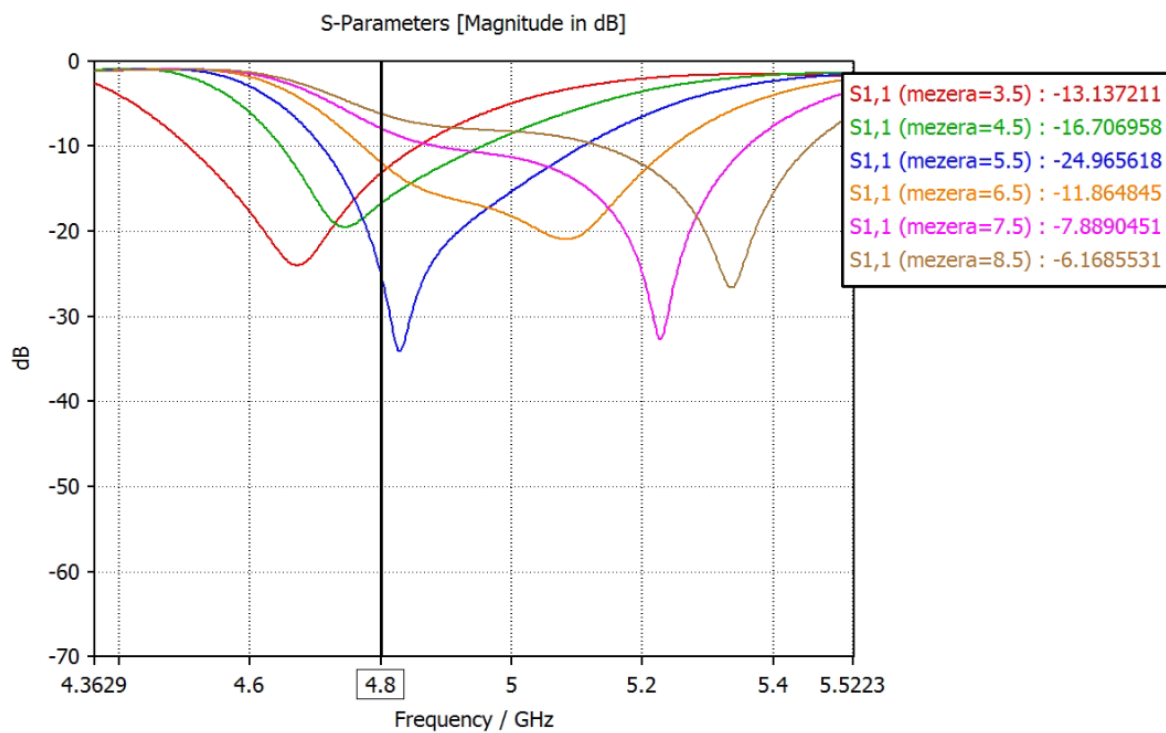
Vrchní pohled sondy



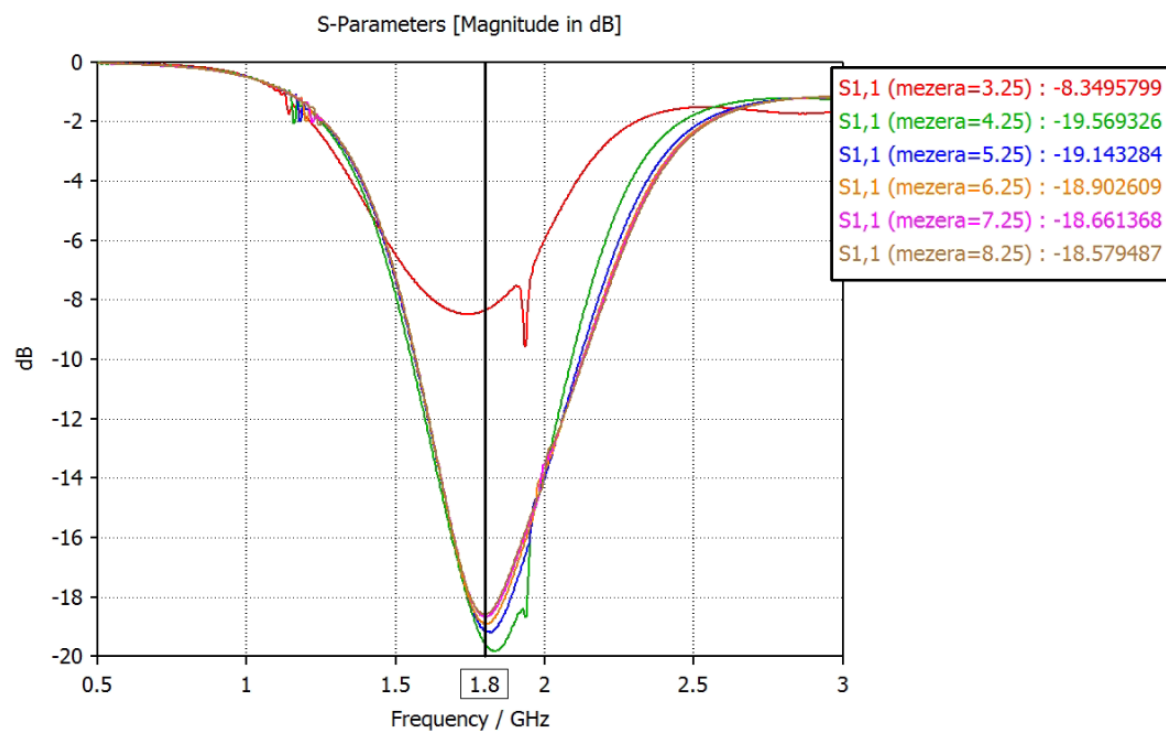
Obrázek 25 Použití prokůvů na sondě

#### 4.2.3 Vliv vzdálenosti prokůvů od středu zavěšeného pásku

Z výše uvedených výsledků je zřejmé, že v případě sondy pro frekvenci 4,8 GHz je její celková šířka nejmenší. Kvůli tomuto malému rozměru, je omezena možnost umístění prokůvů do stran. Nejprve bylo simulováno umístění prokůvů od středu pásku ve vzdálenosti 1,75 mm, tak aby prokův přímo nezasahoval do vodivého pásku. Tyto dvě řady prokůvů tedy mezi sebou měly mezeru 3,5 mm. Provedl jsem i řadu experimentů, kdy jsem zvětšoval tuto mezeru s postupným krokem 1 mm až do vzdálenosti 8,5 mm mezi těmito řadami prokůvů. Výsledky těchto simulací jsou na (Obrázek 26). Z výsledků je zřejmé, že nejlepší hodnot impedančního přizpůsobení sondy je dosaženo při rozestupu 5,5 mm. V případě ostatních sond je vliv šířky rozestupu prokůvených řad výrazně menší – viz (Obrázek 27).



Obrázek 26 Vliv rozestupu řad prokůvů pro sondu na frekvenci 4,8GHz

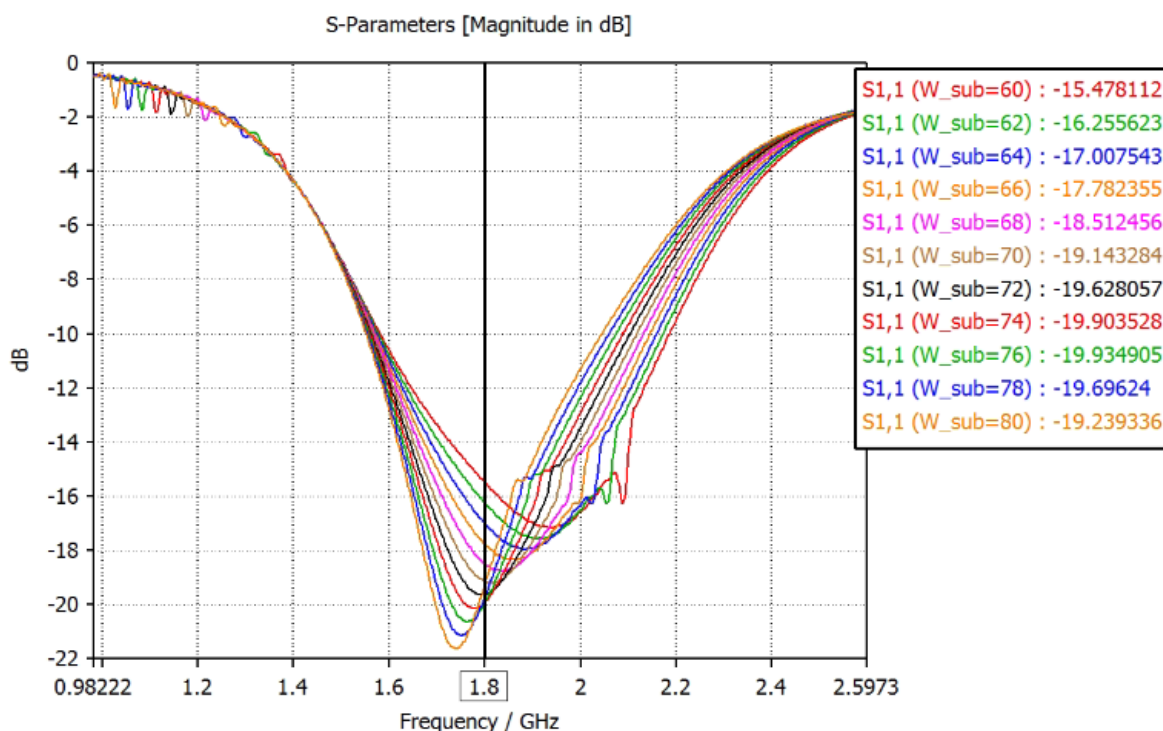


Obrázek 27 Vliv rozestupu řad prokůvů pro sondu na frekvenci 1,8 GHz

#### 4.2.4 Vliv rozměru sondy

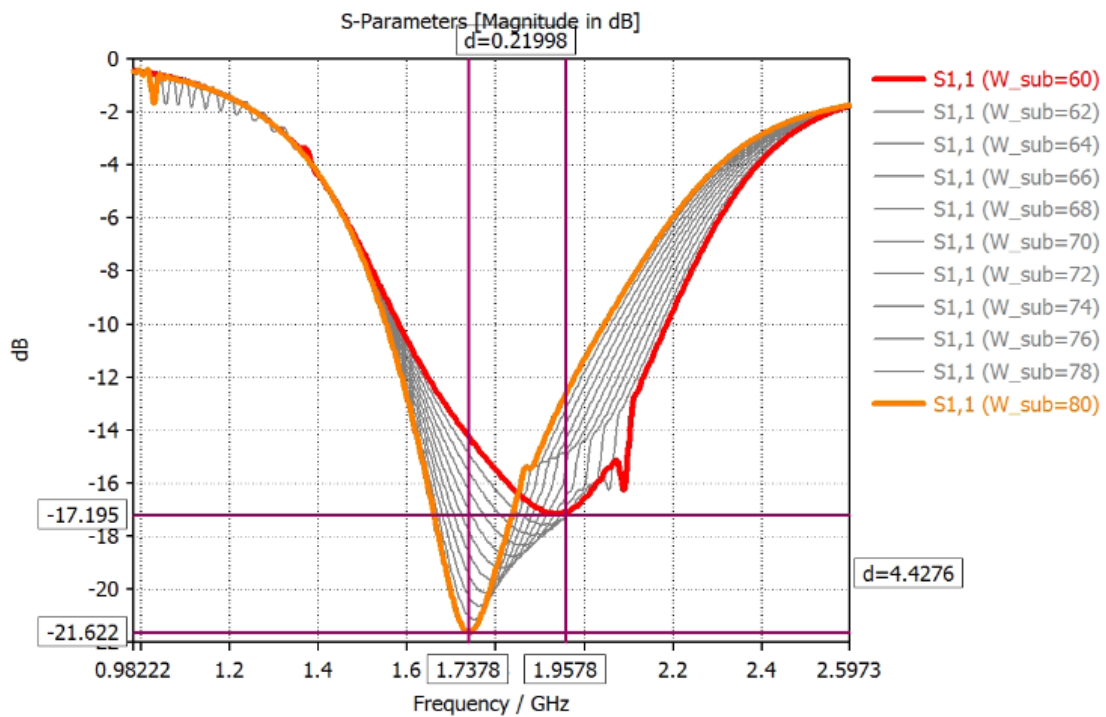
Rozměry substrátu, který je shodný s celkovým rozměrem napájecí části sond, hraje významnou roli při návrhu sondy pro efektivní funkci na dané frekvenci. Tento vliv jsem zkoumal jak pro šířku, tak pro délku substrátu

Výsledky simulací impedančního přizpůsobení sondy (velikost odraženého výkonu od vstupního portu – rozptylový parametr  $S_{11}$ ) pro různé šířky substrátu s krokem 2 mm v rozsahu od 60 do 80 mm, pro sondy na frekvenci 1,8 GHz jsou na (Obrázek 28).



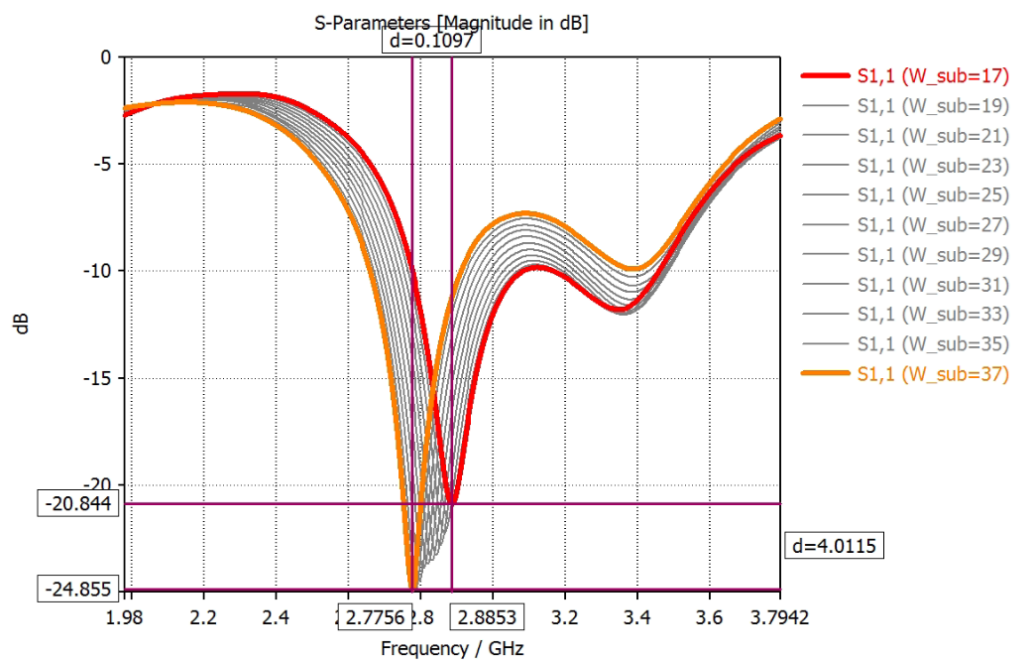
Obrázek 28 Úprava šířky substrátu

Pokud uvažujeme celý rozsah simulované šířky substrátu, tak se při změně o 20 mm posune střed frekvenčního pásma optimálního impedančního přizpůsobení sondy o 219 MHz – viz (Obrázek 29).



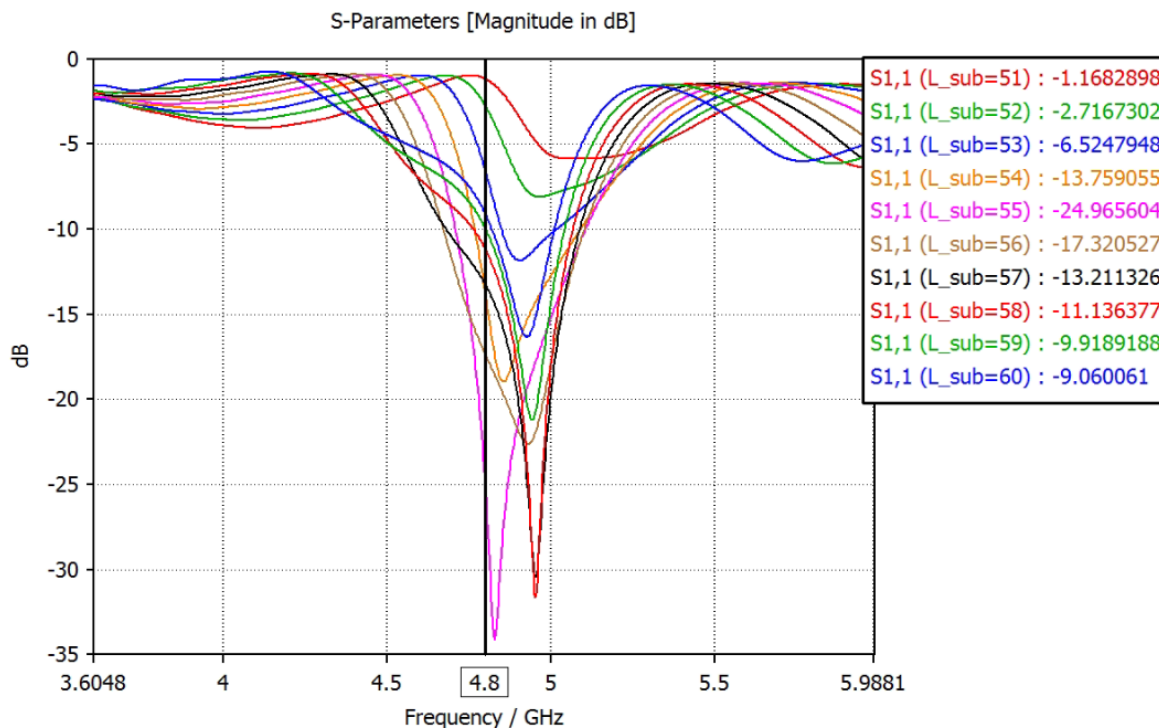
Obrázek 29 Simulované minimum a maximum rozsahu šířky substrátu sondy na frekvenci 1,8 GHz

Druhou ukázkou je návrh sondy pro 2,8 GHz. V tomto případě jsou opět jednotlivé simulace prováděny s krokem 2 mm, a tedy s celkovým rozsahem 20 mm, ale minimální šířka byla 17 mm a maximální 37 mm. V tomto případě změna šířky o 20 mm projeví posunutím frekvenčního pásma o 109 MHz – viz (Obrázek 30). Tento fakt potvrzuje teoretické poznatky.

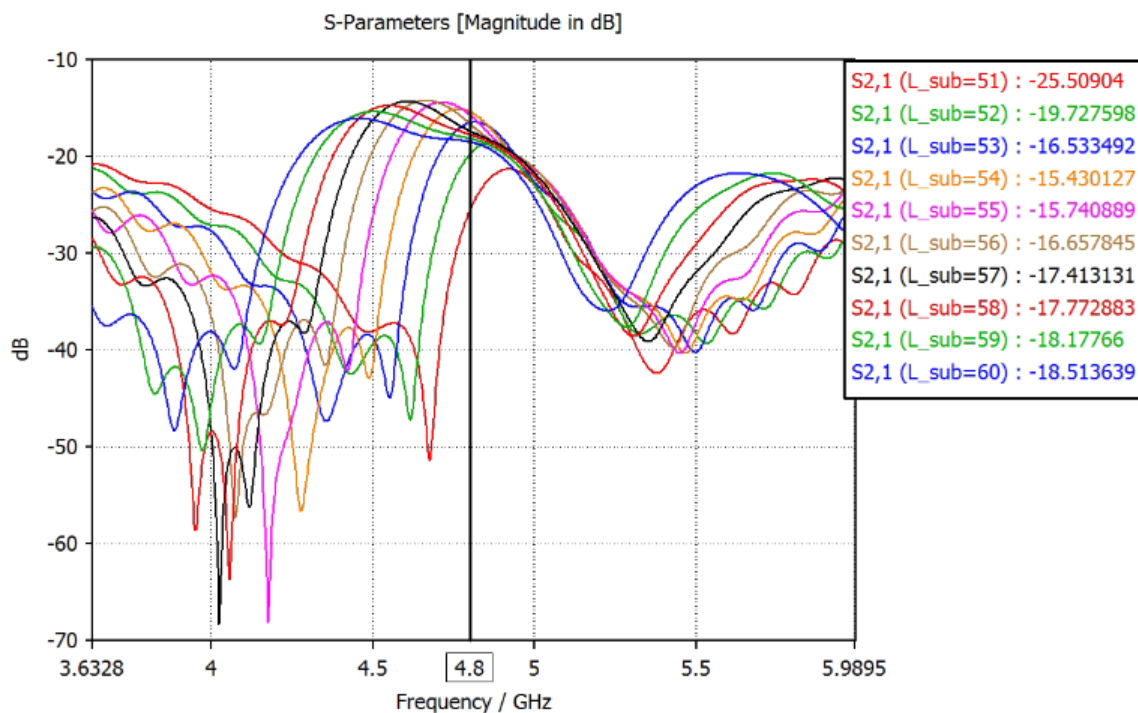


Obrázek 30 Simulované minimum a maximum rozsahu šířky substrátu sondy na frekvenci 2,8 GHz

Níže je provedena simulace optimalizace vhodné délky substrátu. Ve výsledcích simulací (Obrázek 31) a (Obrázek 32) si lze všimnout, že z uvedeného rozsahu s minimem 51 mm a maximem 60 mm, bylo dosaženo nejlepších parametrů s délkou substrátu 55 mm.



Obrázek 31 Simulace rozsahu délky substrátu pro sondu na frekvenci 4,8 GHz – Parametr S<sub>11</sub>

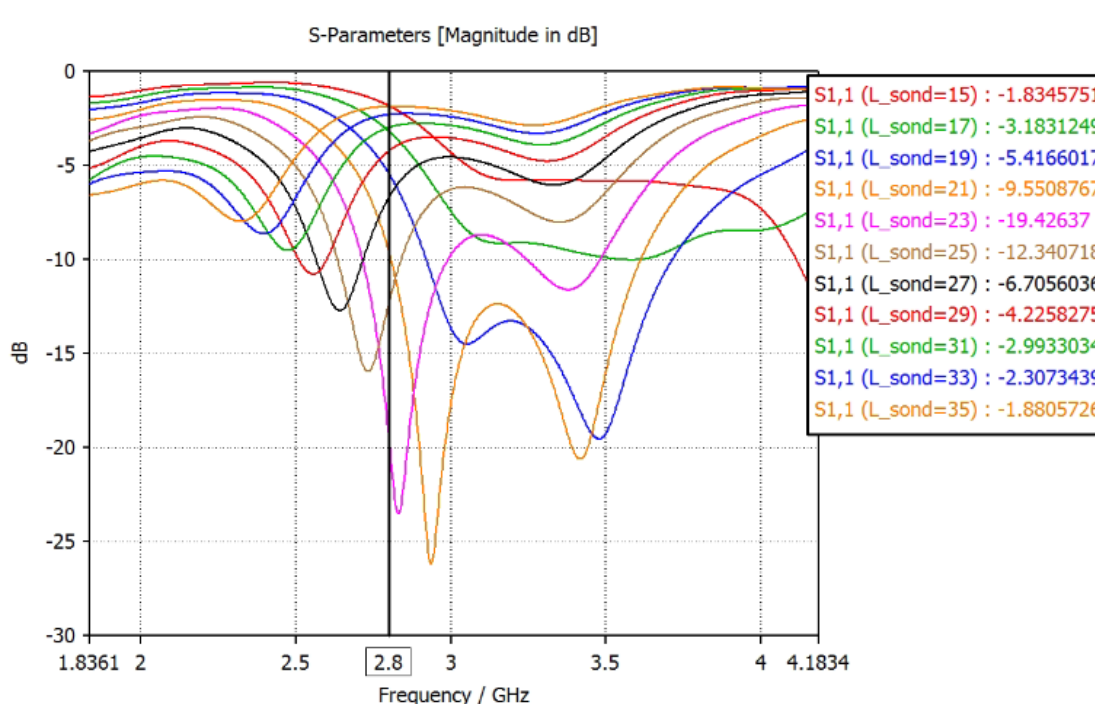


Obrázek 32 Simulace rozsahu délky substrátu pro sondu na frekvenci 4,8 GHz – Parametr S<sub>21</sub>

#### 4.2.5 Vliv délky aktivní části sondy

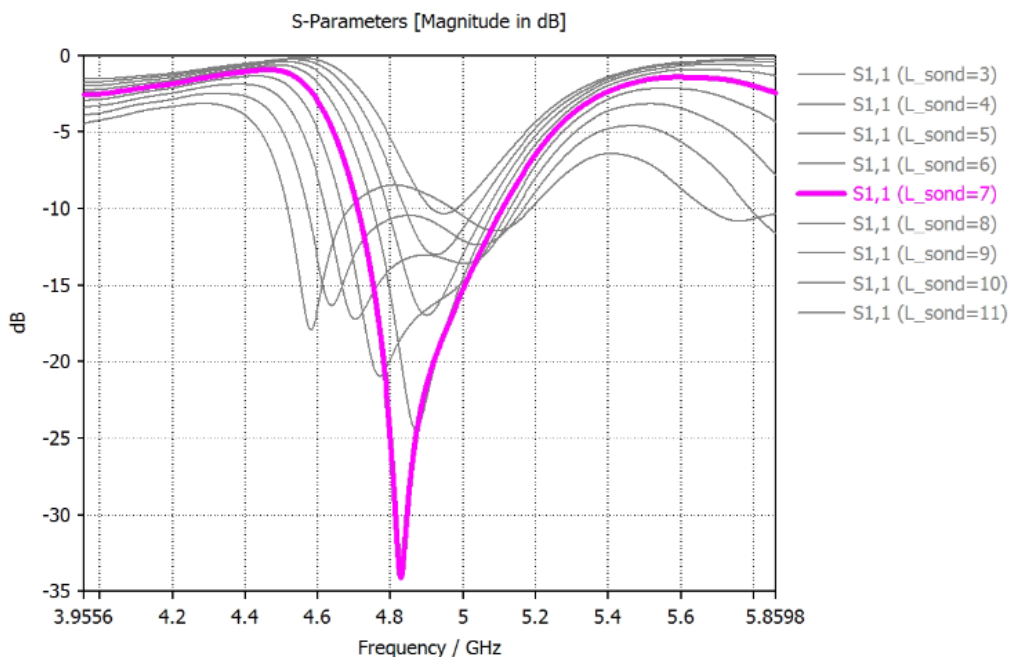
Aktivní část sondy slouží k vyzařování a příjmu elektromagnetického signálu. Šířka této části je shodná s šířkou zavěšeného vodivého pásku a je tedy 2 mm, z tohoto důvodu je potřeba optimalizovat pouze vhodnou délku aktivní části sondy.

Na (Obrázek 33), je vynesena závislost velikosti odraženého výkonu signálu od vstupního portu sondy na frekvenci 2,8 GHz na délce aktivní části v rozsahu od 15 do 35 mm s krokem 2 mm. Z výsledků je zřejmé, že optimální délka aktivní části sondy je 23 mm.

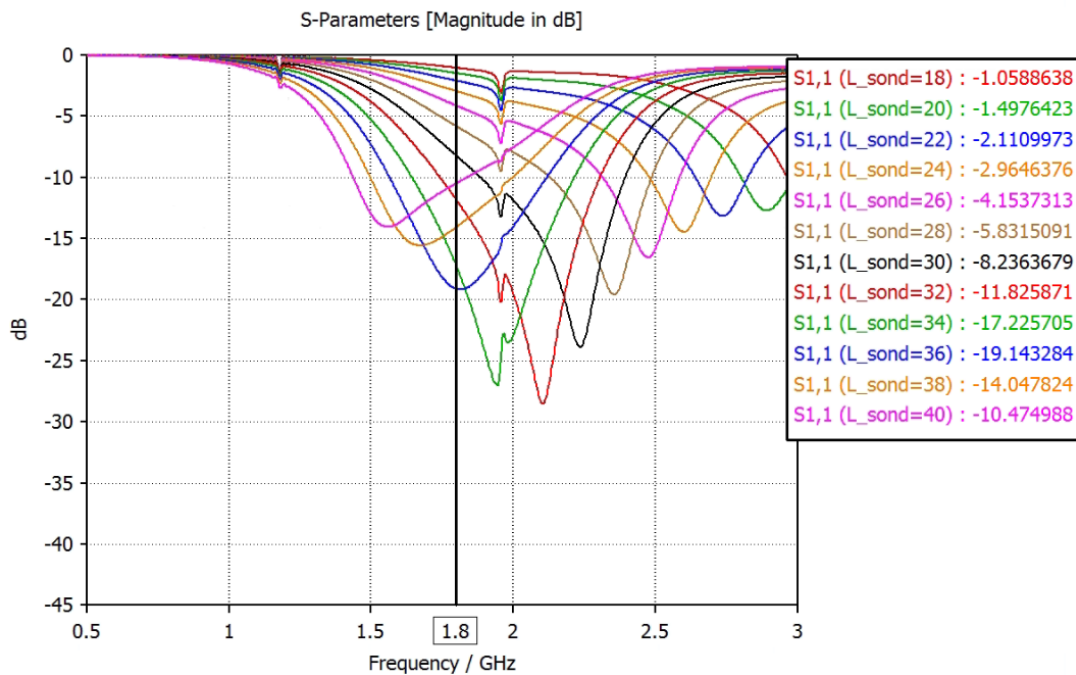


Obrázek 33 Rozsah délky aktivní části sondy 2,8 GHz

Na (Obrázek 34) je ukázka hledání vhodné délky aktivní části sondy pracující na frekvenci 4,8 GHz. Je zde simulován rozsah délek 3 až 11 mm s krokem 1 mm. Z výsledků je zřejmé, že nejlépe vychází sonda s délkou aktivní části 7 mm. Na (Obrázek 35) jsou vyneseny výsledky obdobné simulace, ale tentokrát pro sondu pracující na frekvenci 1,8 GHz



Obrázek 34 Rozsah délky aktivní části sondy pracující na frekvenci 4,8 GHz



Obrázek 35 Rozsah délky aktivní části sondy pracující na frekvenci 1,8 GHz

#### 4.2.6 Výsledné parametry navržených sond

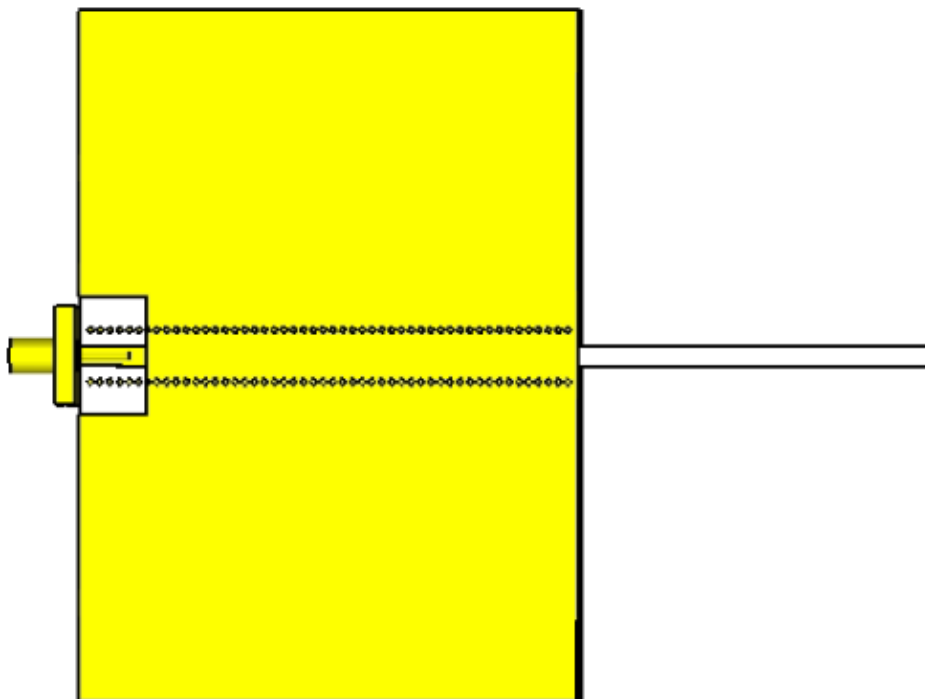
V této kapitole jsou uvedeny finální vybrané parametry navržených sond a výsledky optimalizovaných simulovaných velikostí odražených výkonů od vstupních portů (rozptylový parametr  $S_{11}$ ) a přenosu signálu mezi dvěma totožnými sondami (rozptylový parametr  $S_{21}$ ).

Tloušťka materiálu substrátu RO4350B pro sondy byla zvolena 1,524 mm a tloušťka mědi 0,035 mm. Měděná vrstva je využita pro vytvoření zemní plochy a dále tvoří i vodivý pásek uprostřed substrátu. Tyto hodnoty jsou pro všechny navrhované sondy stejné. Ostatní parametry, pro jednotlivé sondy jsou uvedeny v (Tabulka 1).

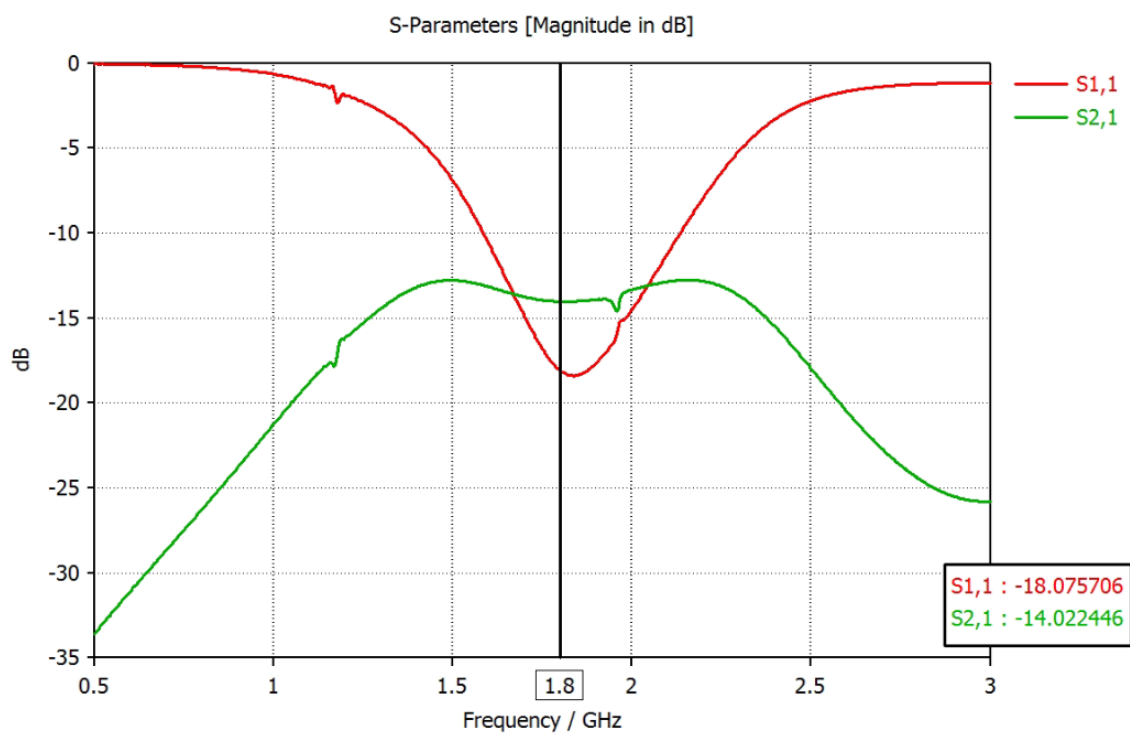
	L_substrátu [mm]	Mezera prokovů [mm]	W_substrátu [mm]	W_sondy(vodič) [mm]	L_sondy [mm]
1,8 [GHz]	51	5,25	70	2	36
2,8 [GHz]	57	12	27	2	23
4,8 [GHz]	55	5,5	14,5	2	7

Tabulka 1 - Výsledné rozměry parametrů jednotlivých sond

Výsledný návrh sondy pro střední kmitočet 1,8 GHz dosahuje po optimalizaci největších rozměrů ze všech navržených sond –viz (Obrázek 36). Délka samotné aktivní části je 36 mm, což při její šířce pouze 2 mm může znamenat značné výrobní riziko zlomení či deformace vlivem frézování. Z tohoto důvodu byl tento návrh a finální rozměry konzultovány s firmou, která vyráběla tyto navržené vzorky, aby bylo zajištěno, že tato sonda půjde vyrobit. Samotné výsledky simulace optimalizované sondy pro tento střední kmitočet jsou na (Obrázek 37).

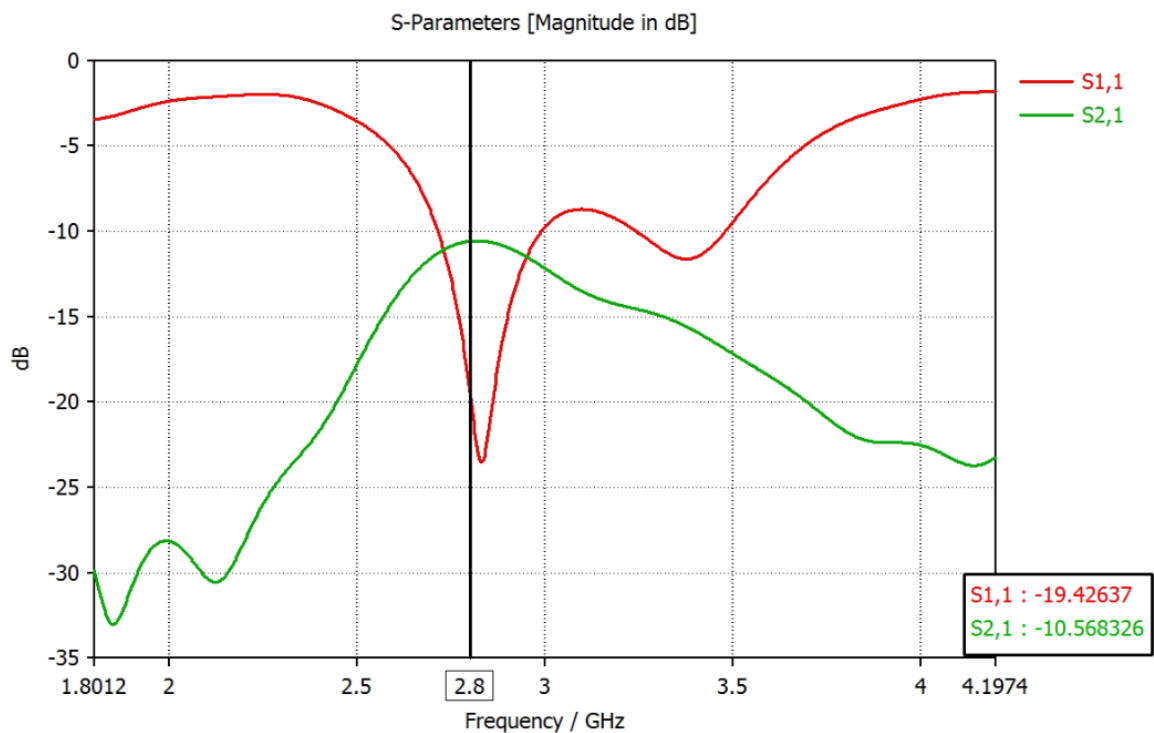


Obrázek 36 Sonda pro 1,8GHz



Obrázek 37 S-parametry sondy 1,8 GHz-návrh substrátu 1,524 mm

Nejlepších hodnot impedančního přizpůsobení a vložného útlumu (přenosu signálu mezi dvěma identickými sondami) se podařilo dosáhnout u sondy pracující na středním kmitočtu 2,8 GHz - viz. (Obrázek 38).

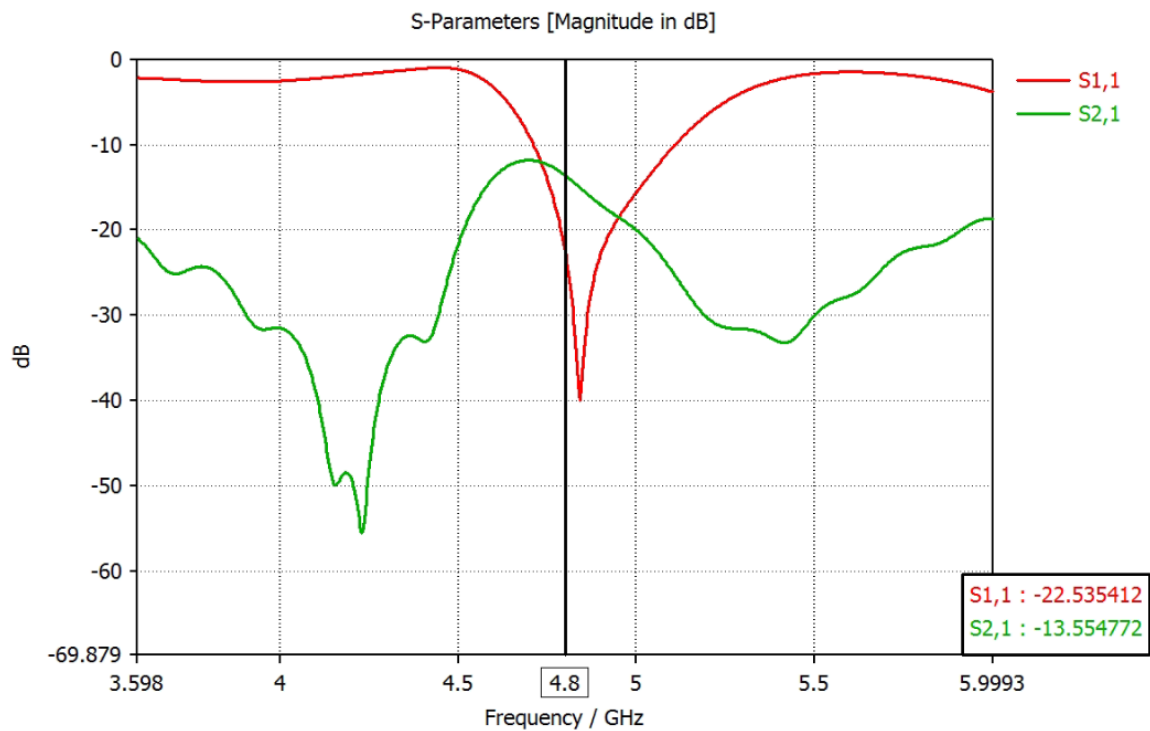


Obrázek 38 S-parametry sondy 2,8 GHz-návrh substrátu 1,524 mm

Velice dobrých výsledků v rámci optimalizace rozměrů se podařilo dosáhnout též u sondy pro střední pracovní kmitočet 4,8 GHz. Dle finálních rozměrů se jedná o nejmenší sondu, kdy šířka substrátu a délka aktivní části sondy, je skoro 5x menší než v případě sondy pro 1,8 GHz.



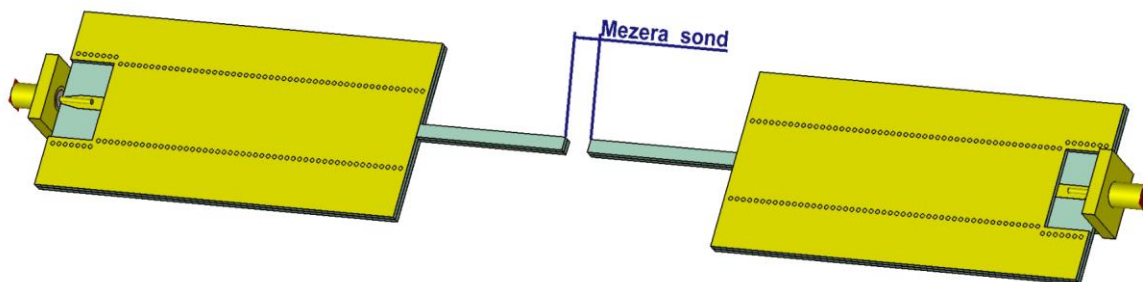
Obrázek 39 Sonda pro frekvenci 4,8 GHz



Obrázek 40 S-parametry sondy 4,8 GHz – návrh substrátu 1,524 mm

### 4.3 Model přenosu signálu mezi dvěma sondami, závislost na přenosu na vzdálenosti mezi sondami

Tato kapitola je zaměřena na simulaci přenosu signálu (vložného útlumu – rozptylový parametry  $S_{21}$ ) mezi sondami. V rámci simulací byl zkoumán vliv vzdálenosti mezi jednotlivými aktivními částmi stejných sond, mezi které nebyl vložen žádný útlumový materiál, ale pouze volný prostor.

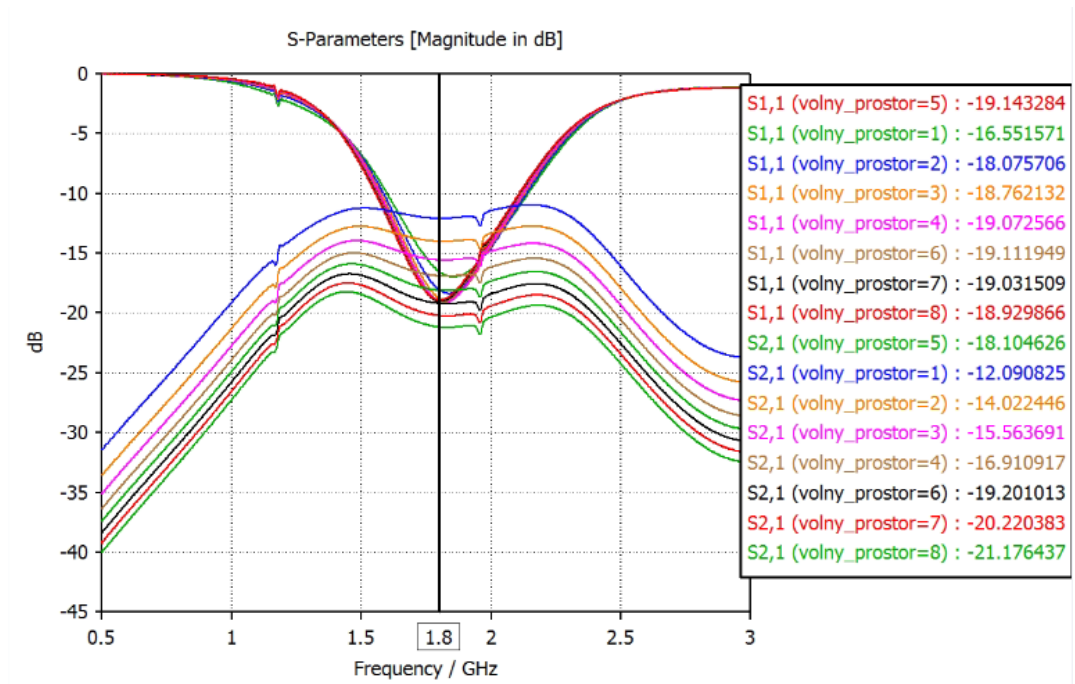


Obrázek 41 Závislost přenosu na vzdálenosti mezi sondami

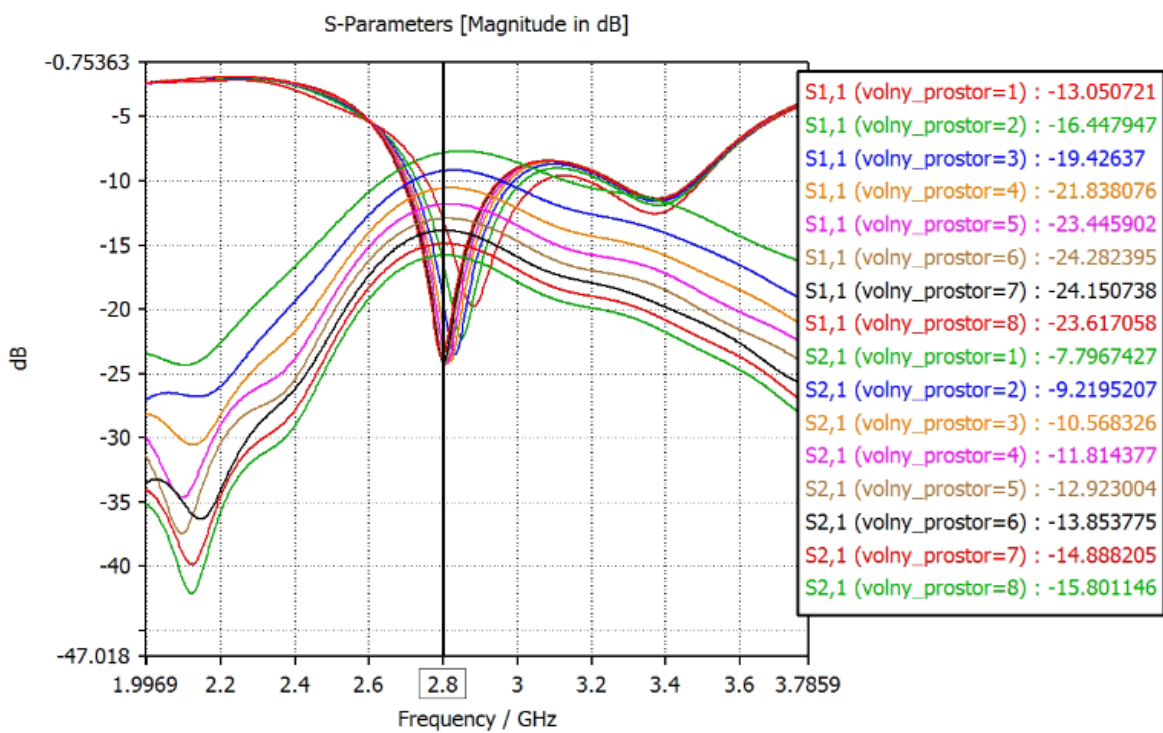
V rámci pracoviště pro měření útlumových charakteristik materiálů bude testovaný vzorek umístěn přímo uprostřed mezi aktivní částmi sond.

V předešlé kapitole, ve které byly popsány výsledky simulací jednotlivých sond, byla pro určení vložného útlumu mezi dvěma shodnými sondami (rozptylový parametr  $S_{21}$ ) nastavena jejich vzdálenost (Mezera sond) 6 mm.

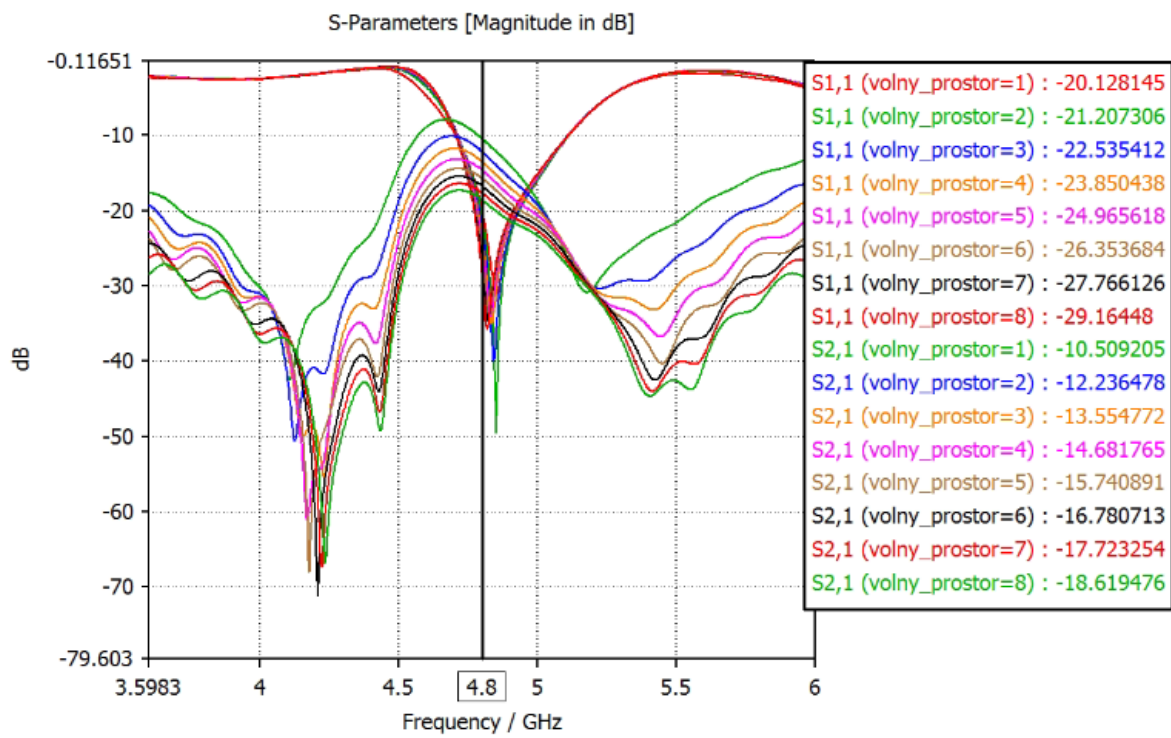
Následující grafy (obrázek 44, 45 a 46) uvádějí pro všechny tři typy navrhovaných sond závislost jejich rozptylových parametrů na vzdálenosti mezi aktivními částmi sond (Mezera sond). Z výsledků je zřejmé, že změna vzdálenosti mezi sondami příliš neovlivňuje impedanční přizpůsobení sond (rozptylový parametr  $S_{11}$ ), ale významně ovlivňuje vložený útlum. Ve shodě s teoretickými předpoklady vychází, že čím je vzdálenost mezi sondami větší, tím stoupá jejich vložený útlum.



Obrázek 42 Sonda 1,8 GHz změna vzdálenosti od vzorku



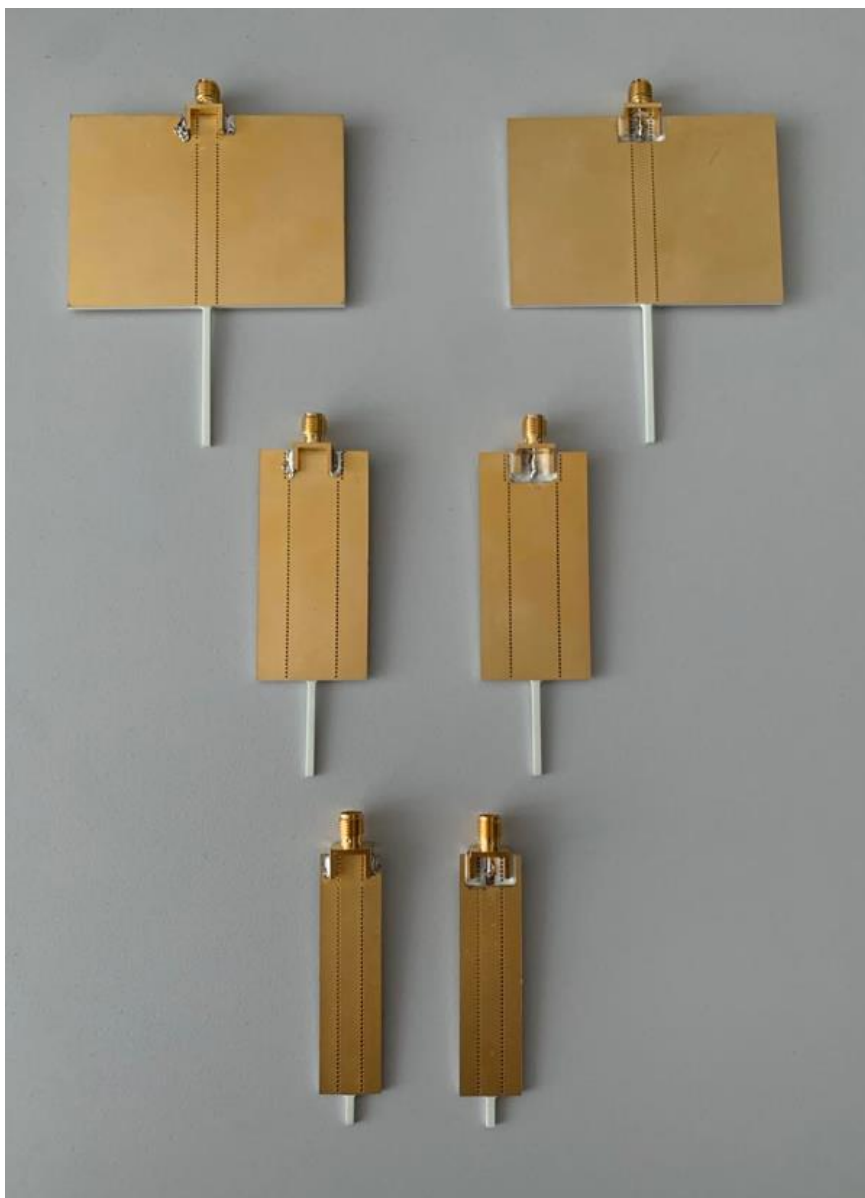
Obrázek 43 Sonda 2,8 GHz změna vzdálenosti od vzorku



Obrázek 44 Sonda 4,8 GHz změna vzdálenosti od vzorku

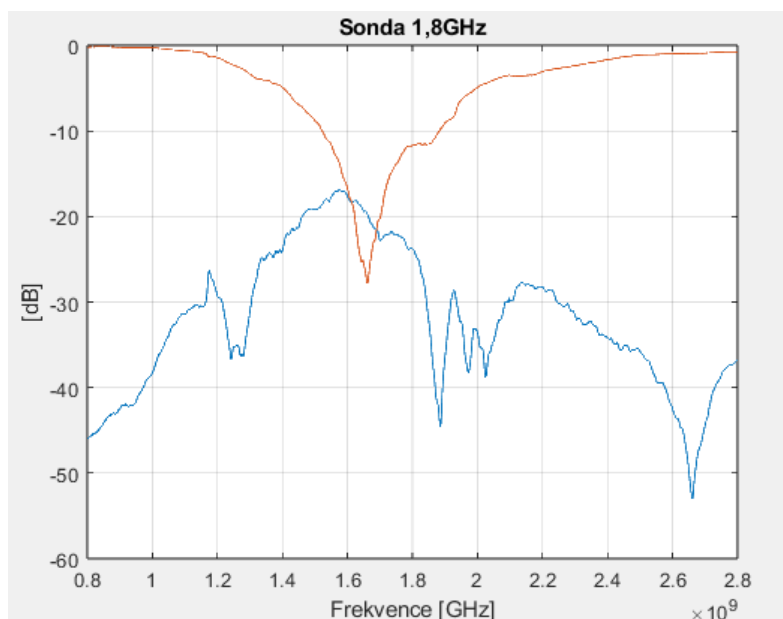
#### 4.4 Fyzicky vyrobené sondy

Návrhy parametrů optimalizovaných sond, byly předány výrobní firmě. Sondy firma vyrobila a odeslala. Při obdržení těchto vyrobených sond, byla provedena kontrola v rámci, níž byly zjištěny rozdíly oproti výrobní dokumentaci. Bylo zjištěno, že byl použit substrát R04350B s tloušťkou 0,762 mm místo požadované tloušťky 1,524 mm. Dalším nedostatkem bylo, že zhotovené sondy neměly vyfrézovaný prostor pro uchycení konektoru. Tato chyba byla napravena ruční frézou a do vzniklého prostoru byl následně napájen SMA konektor. Kvůli vysoké finanční nákladnosti a časovému omezení, bylo měření provedeno právě s těmito vyrobenými a dopravenými sondami.

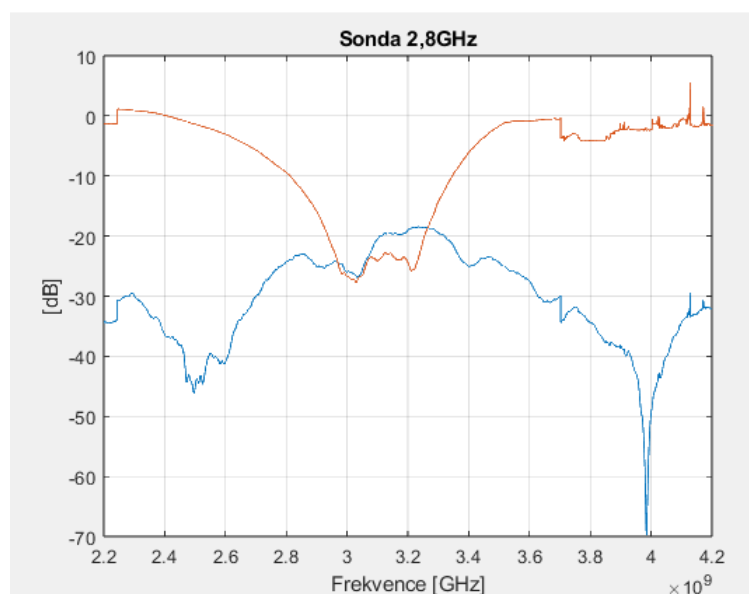


Obrázek 45 Fyzicky vyrobené sondy

Níže jsou uvedeny grafy změřených s-parametrů  $S_{11}$  a  $S_{21}$  vyrobených sond. Parametry jsou změřena pomocí vektorového spektrálního analyzátoru ZNB 20 od firmy Rhode & Schwarz. Sonden byly pro měření umístěny v navržené platformě bez umístění stínícího materiálu. Zmíněná platforma pro umístění sond a měřeného vzorku, je představena v další kapitole. Tyto výsledné grafy se značně odlišují od původních navržených. Tyto rozdíly jsou způsobeny právě jinou tloušťkou substrátu použitého na všechny vyrobené sondy.

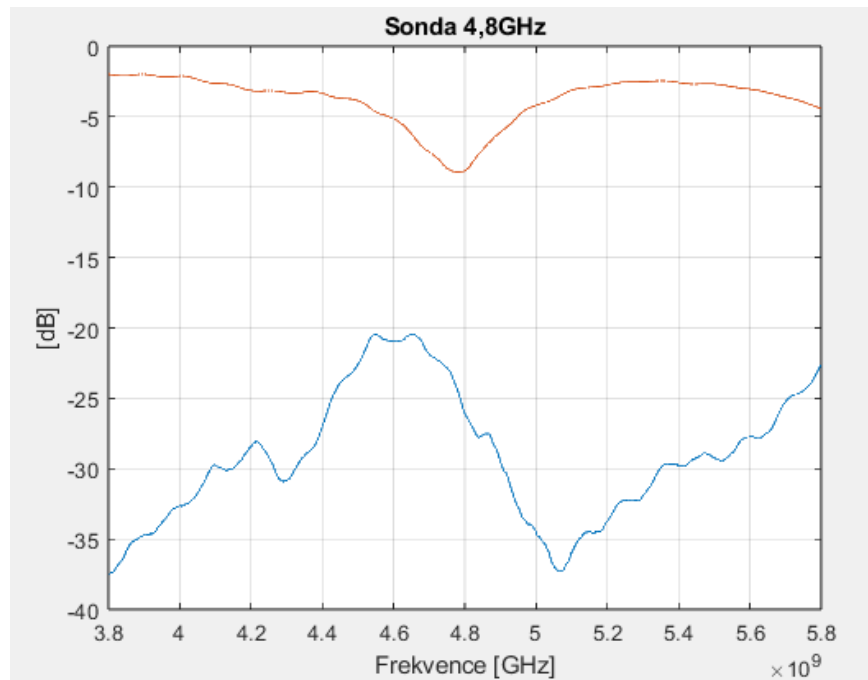


**Obrázek 46** Naměřená data fyzicky vyrobené sondy 1,8 GHz



**Obrázek 47** Naměřená data fyzicky vyrobené sondy 2,8 GHz

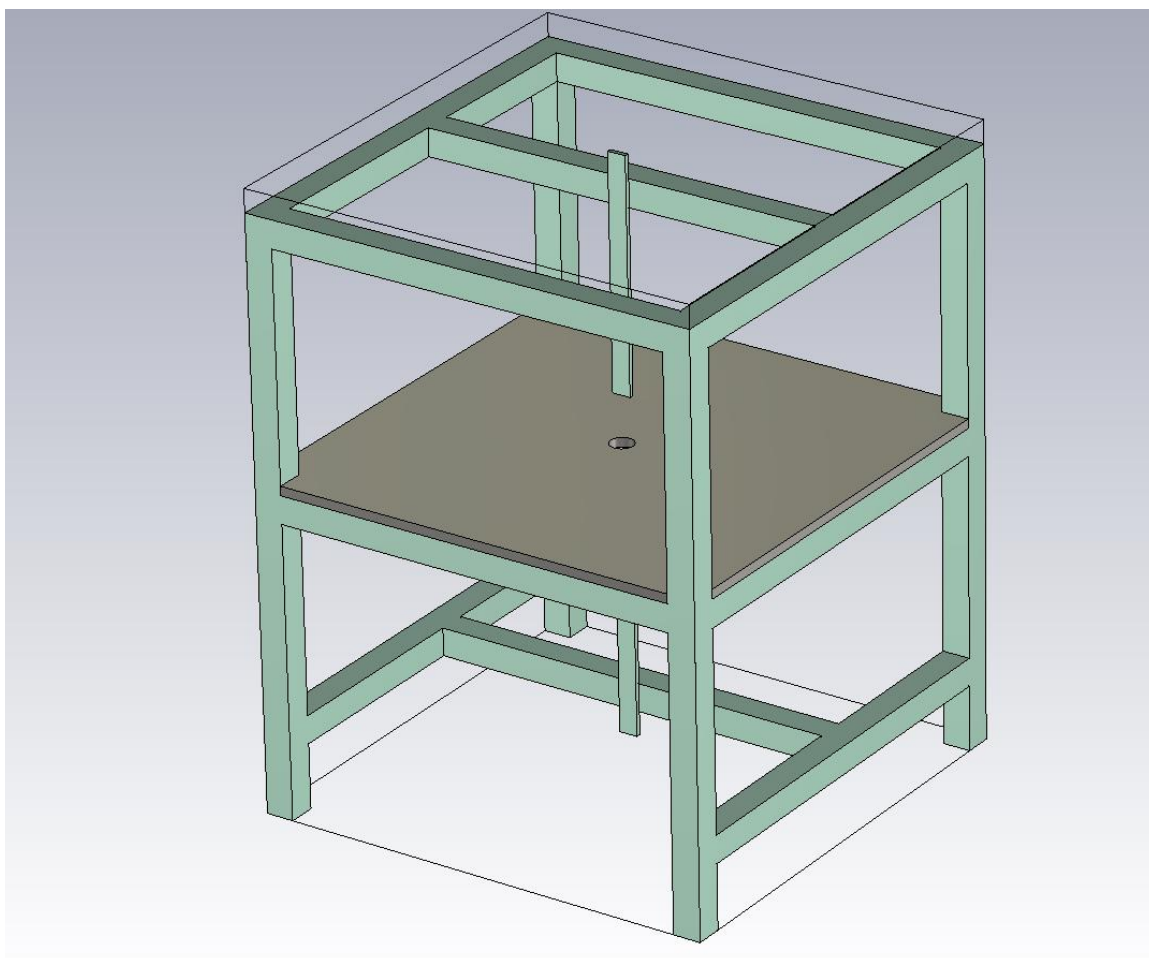
Z výsledků na (Obrázek 48) je zřejmé, že parametr  $S_{11}$ , pro sondu na frekvenci 4,8 GHz nedosahuje ani pod -10 dB oproti původnímu simulačnímu výsledku -22,53 dB. V tomto případě se značná část testovacího signálu odráží od vstupu sondy. Což bude mít za důsledek i značný útlum signálu při přenosu z jedné do druhé sondy, kdy podle změřených dat je parametr  $S_{21}$  pod úrovní -20 dB oproti původnímu navrhovanému -13,5 dB.



**Obrázek 48** Naměřená data fyzicky vyrobené sondy 4,8GHz

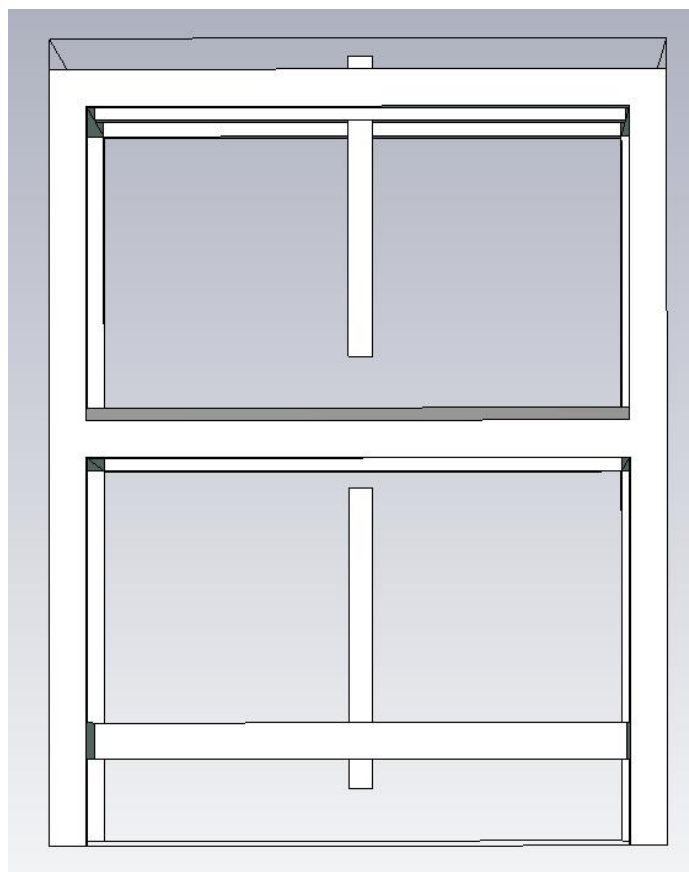
## 5 Návrh platformy na měření stínící účinnosti absorpčních materiálů

Tato kapitola je zaměřena na návrh a realizaci měřicího pracoviště. Účelem tohoto pracoviště je zajistit nastavitelné, ale stabilní uchycení pro dvě shodné navržené měřicí sondy a vytvořit platformu k umístění a pohybu testovacího vzorku, pro měření stínící účinnosti. Nejprve jsem provedl návrh systému pro uchycení sond a měřeného vzorku tak, aby úchyty umožňovaly snadnou manipulaci. Sondy je nutno mít umístěné přesně proti sobě a ve stejné vzdálenosti od vzorku. Návrh je realizován pro vertikální umístění sond vůči vzorku, kdy se vzorek bude pohybovat ve směrech osy „x,, a „z,,. Sondy jsou poté pevně upevněny ve výše zmíněných osách a umožňují měnit jen jejich vzdálenost od vzorku, tedy pohyb po ose y. Pro praktický návrh měřicí platformy, byl vytvořen 3D model, ze kterého jsem vycházel pro fyzickou výrobu. Jak je patrné na (Obrázek 49), model má kostru ve tvaru kvádrů s jedním plným patrem. Toto patro je určeno pro umístění měřeného vzorku, kdy se vzorkem je možná případná další manipulace v horizontální rovině, pro postupné měření jeho částí.



Obrázek 49 Model konstrukce měřicí stanice

Pro uchycení měřicích sond jsou využity děrované lišty DIN, které umožňují nastavení potřebné vertikální vzdálenosti mezi sondou a měřeným vzorkem. Lišty jsou pevně přichyceny do nosné hliníkové konstrukce. Toto uchycení umožňuje nastavení též horizontální polohy sondy. K uchycení sond na lištu, jsem navrhl individuální 3D držáky pro všechny navržené varianty sond, jelikož se velikostně liší. Nosná lišta má v sobě otvory, do kterých se držák uchytil pomocí šroubu a matice. Stejným způsobem je i lišta přichycena k celkové konstrukci přes středový předěl na vrchu i spodku kostry a lze tak nastavovat vzdálenost sondy od měřeného vzorku.



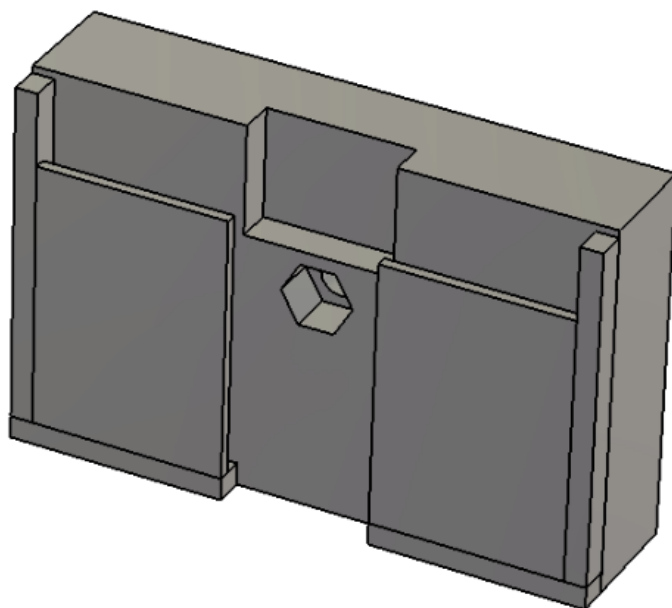
**Obrázek 50 Návrh konstrukce k uchycení sond**

Nosná konstrukce platformy je vytvořena z hliníkových kombi profilů 30x30, které jsou k sobě přichyceny pomocí rohovníků. Tyto rohovníky jsou k profilům uchyceny přes speciální matici, která se do profilu vsune a šroubem utáhne. Jedná se o velice variabilní spojení, které umožňuje kostru snadno upravit a pozměnit, pro případná budoucí vylepšení. Uchycené patro na hliníkových profilech, pro umístění měřeného vzorku, je zhotoveno z opálového plexiskla. Toto plexisklo drží rovinu po celé ploše tak, aby nedocházelo k prověšení ve středu při položení vzorku a následné manipulaci, jelikož by mohly vznikat nepřesnosti v měření. Zmíněné držáky pro uchycení sond, jsem zhotovil podle 3D návrhu na 3D tiskárně typu Creality Ender-3 z materiálu Creality 1.75 mm Ender-PLA červené barvy.



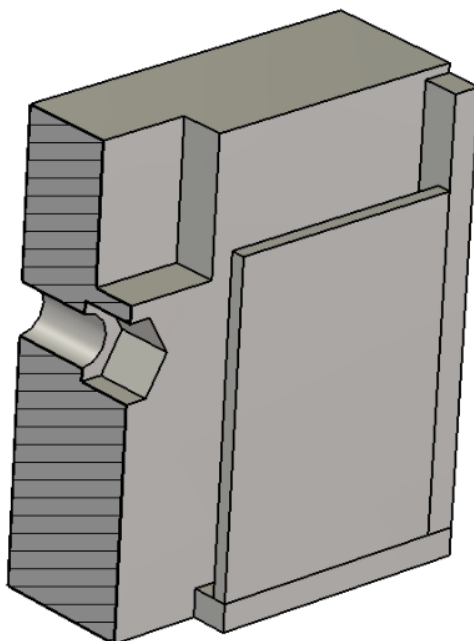
**Obrázek 51 Fyzicky vytvořená konstrukce**

Pro uchycení držáků sond k nosné konstrukci, je v držáku vytvořen otvor, do kterého se vejde celý šroub včetně zapuštěné hlavy. Dále je tento otvor zúžen jen pro závit šroubu procházejícího svisle umístěnou lištou a celý držák je uchycen matickou na druhé straně lišty – viz (Obrázek 52).



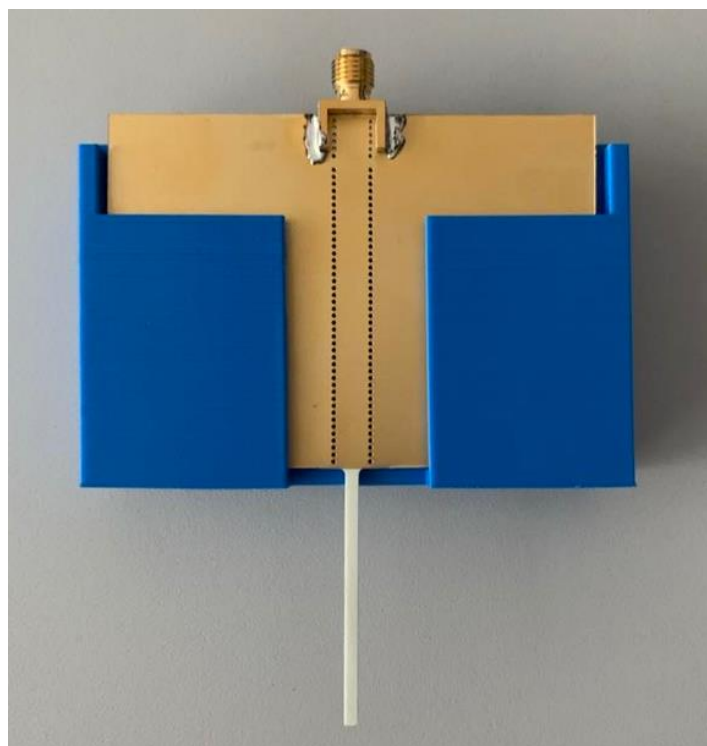
**Obrázek 52 Model návrhu držáku pro uchycení sondy**

Nejdříve byl vytvořen držák s kulatým prostorem pro umístění hlavičky šroubu. Tento prvotní návrh se ale ukázal jako nepraktický, jelikož při montáži a demontáži držáku docházelo k protáčení šroubu ve zmíněném prostoru. Z tohoto důvodu byl návrh držáku upraven. Byl zde upravený prostor pro šroub se šestihrannou hlavou, který zajišťuje, že se umístěný šroub při montáži a demontáži již neprotáčí – viz (Obrázek 53).

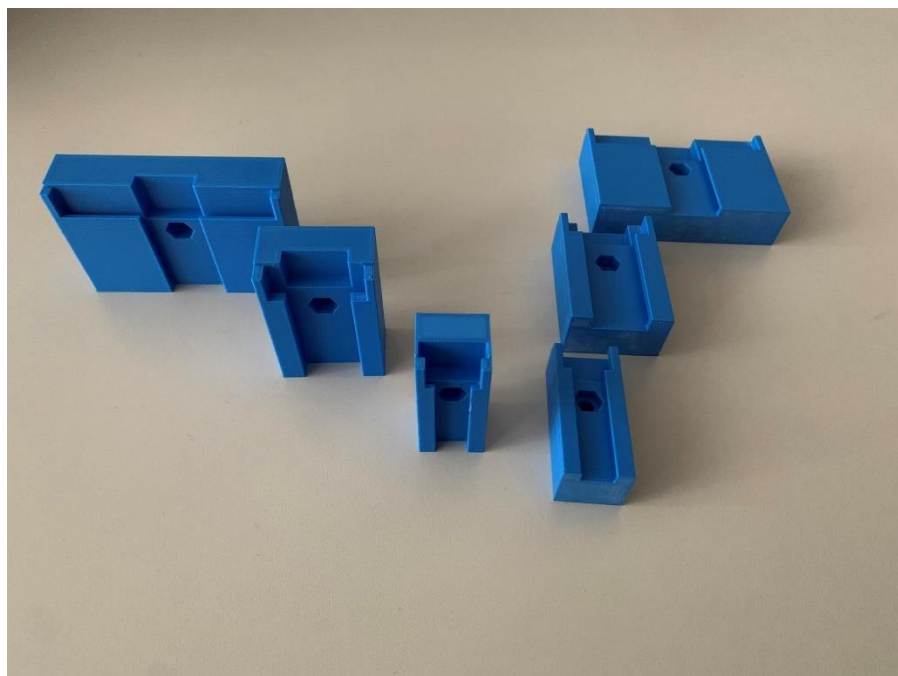


**Obrázek 53 Průřez návrhu držáku pro uchycení sondy**

Držák má také vytvořené prostory pro konektor sondy. Do držáku se sonda jednoduše zasune z vrchu a je držena na spodních prostorech sondy.



**Obrázek 54 Umístění sondy do držáku**



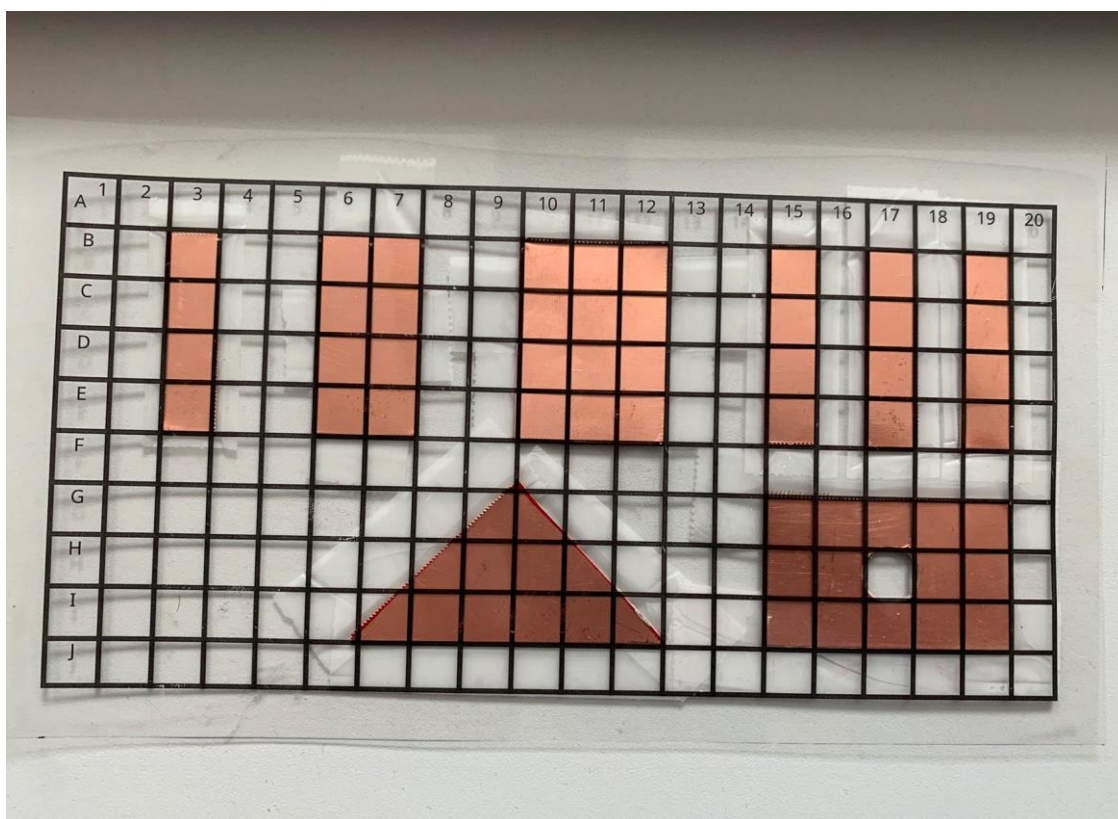
**Obrázek 55 Fyzicky vytištěné držáky pro uchycení sondy**

## 6 Nastavení postupů měření stínících vlastností materiálů v blízké zóně

Tato kapitola je zaměřena na popis přípravy měřicího pracoviště před samotným měřením vybraných vzorků útlumového materiálu. Je zde popsána příprava jak měřených vzorků, tak blokové schéma celého pracoviště pro měření, včetně popisu kalibrace vektorového analyzátoru. V neposlední řadě je uceleně popsán postup měření vybraného vzorku stínícího materiálu.

### 6.1 Měřené vzorky

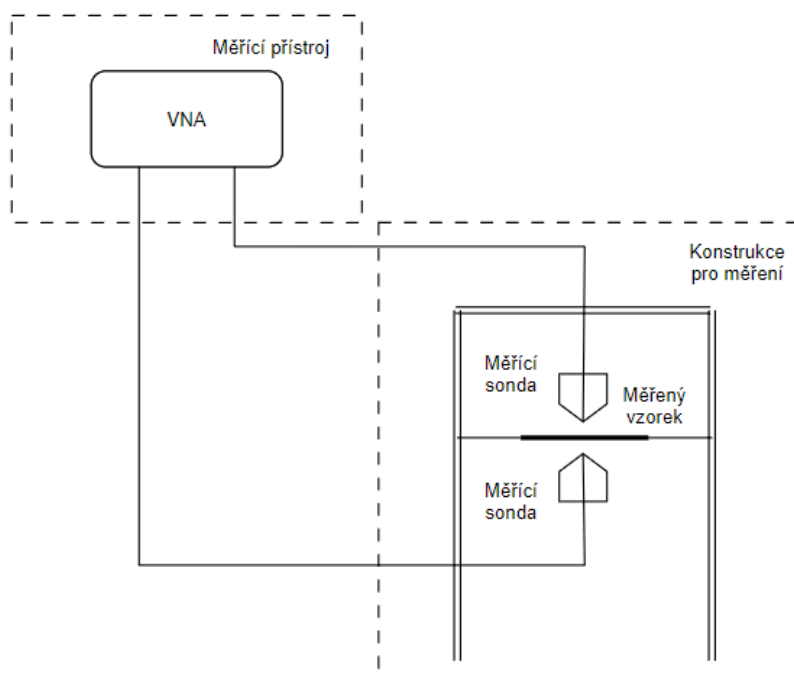
Pro účely ověření zhotovených sond a celého pracoviště pro měření stínících vlastností materiálů byl navržen testovací vzorek. Tento vzorek je složen z řady různých obrazců stínícího materiálu. V mém případě vodivého měděného plechu umístěného do rastru o celkové velikosti 100 mm x 200 mm. Pro přehlednost a jednoduché nastavení měření je rastr rozdělen do čtvercové mříže o rozměrech jednotlivých čtverců 10x10 mm. Políčka jsou pro lepší přehlednost označena vertikálně podle abecedy a horizontálně čísly.



Obrázek 56 Vzorek pro měření

## 6.2 Blokové schéma měřícího pracoviště a kalibrace vektorového obvodového analyzátoru.

Stejně dvojice sond, navržené pro několik frekvenčních pásem, jsou ověřeny na testovaném, výše zmíněném vzorku, pomocí měření útlumových vlastností stínícího materiálu. Tyto útlumové vlastnosti jsou měřeny s využitím přístroje vektorového síťového analyzátoru německé značky Rohde & Schwarz ZNB 20. Tento přístroj slouží pro měření a zobrazení rozptylových parametrů měřeného vzorku pro různá frekvenční pásma.



Obrázek 57 Blokové schéma pracoviště

Pro dosažení přesnějších výsledků, důvěryhodnosti a zabránění chybovosti, je potřeba přístroj nejprve zkalibrovat. Kalibrace zajišťuje korekci chyb způsobených především vlastním útlumem měřících kabelů a fázových posuvů na měřící trase., Tuto kalibraci je nutné provést už předem pro nastavená frekvenční pásma, takže před každým jednotlivým měřením páru sond, bylo zapotřebí nastavení vhodného rozsahu frekvenčního pásma pro konkrétní pár, a poté začít s kalibrací. K tomu je využita kalibrační sada ZV-Z235 Rohde & Schwarz 3.5 mm. Důležité je při samotném měření i při kalibraci dobré dotažení všech konektorů kabelů. Tohoto dobrého dotažení se dosahuje použitím momentového klíče pro VF konektory.



Obrázek 58 Kalibrační sada

Pomocí kalibrační sady na obrázku (Obrázek 58) byla provedená kalibrace TOSM (kde jednotlivá písmena vychází z anglického Through, Open, Short, Match). Tento typ kalibrace dobře potlačí veškeré systematické chyby.

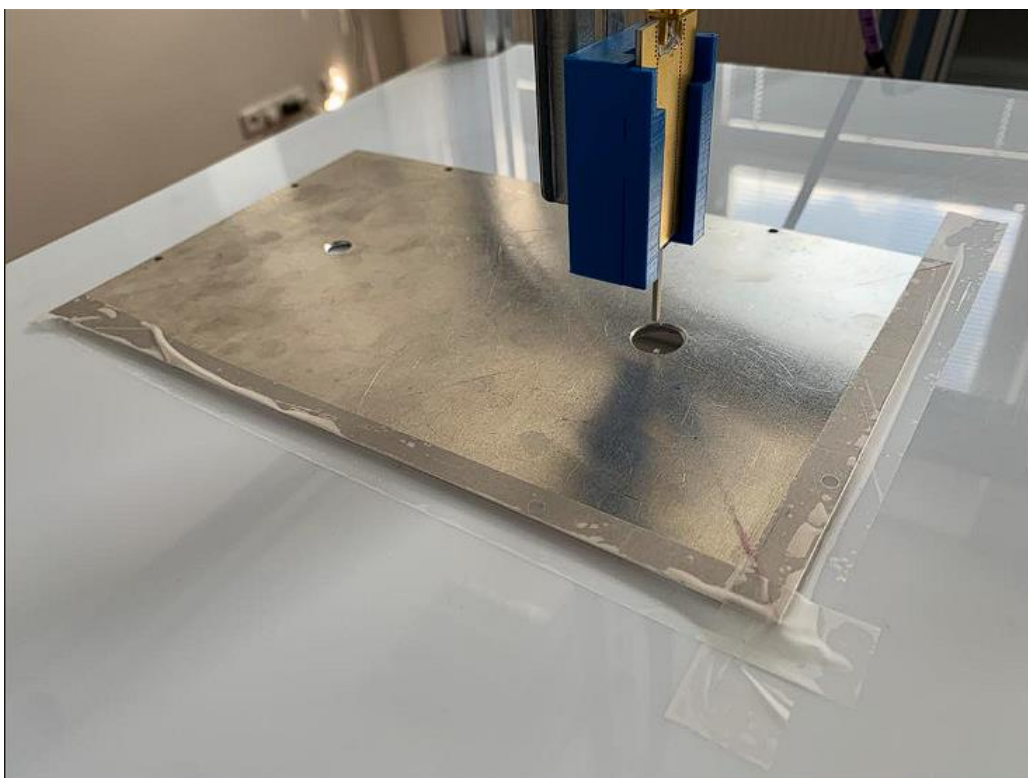


Obrázek 59 Kalibrace TOSM

### 6.3 Nastavení platformy pro měření

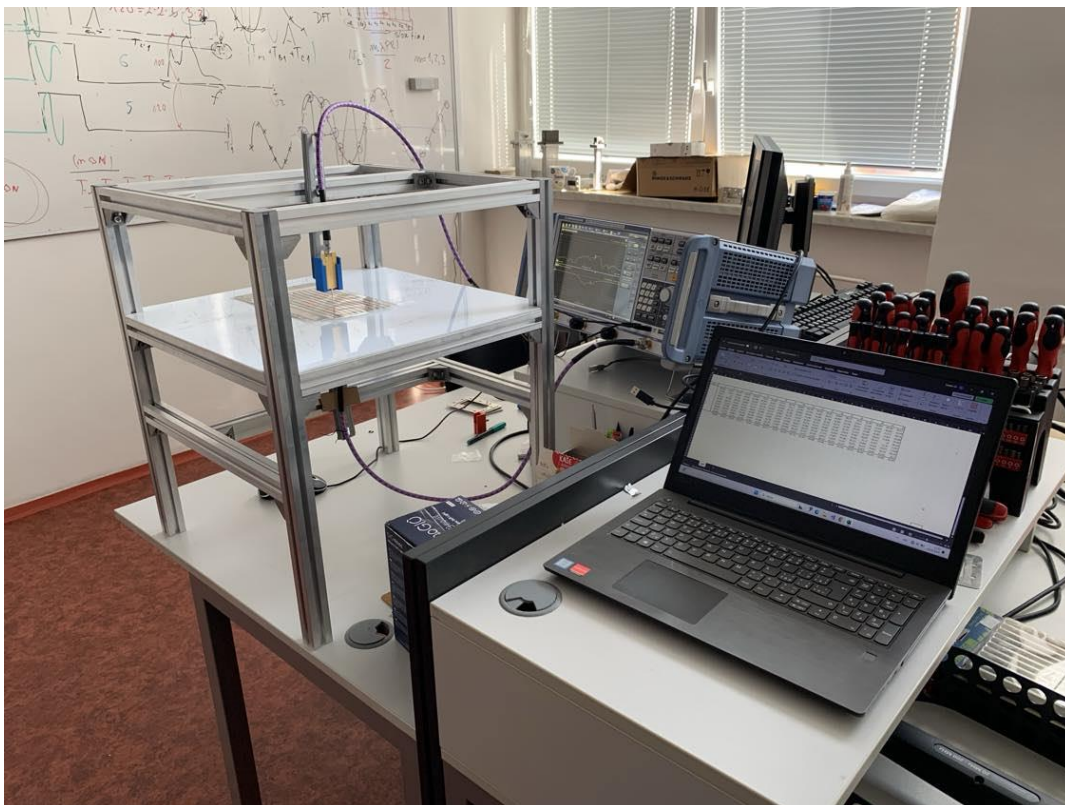
Po kalibraci měřicí soustavy je možné umístit sondy a vzorek do platformy k měření. Sondy jsou umístěny do svých předem navržených a vytištěných držáků, které je potřeba nastavit ve shodné vzdálenosti od vzorku. Vzorek je umístěn do středu konstrukce a jakmile je vzdálenost sond od vzorku nastavena, je možno začít s měřením.

Měřený vzorek na mezipatře platformy byl umístěn na kovovou desku, ve které je vyvrtán otvor o průměru 15 mm, který redukuje nežádoucí prosakování měřeného signálu bočními stranami aktivních částí sond.



**Obrázek 60** Nastavení sondy do držáku

Po projití všech výše uvedených kroků a příprav, bylo měřicí pracoviště připraveno a mohlo se začít měřit. Změřená data byla ručně přepisována do notebooku pro následné zpracování a vyhodnocení. Celé pracoviště je ukázáno na (Obrázek 61).



Obrázek 61 Měřící pracoviště

## 7 Popis výsledků praktických měření stínící účinnosti a jejich zhodnocení

V této kapitole jsou shrnuty a vyhodnoceny výsledné hodnoty z měření. Nejdříve je popsán postup jednotlivých měření., Následně jsou výsledné hodnoty zobrazeny a zhodnoceny.

### 7.1 Postup měření vzorku

Jak již bylo zmíněno v kapitole 6.1., celkový vzorek pro měření a vyzkoušení jednotlivých sond pracujících na různých frekvencích, je složen z vystřižených různorodých tvarů z měděného plechu o tloušťce 0,6 mm. Tyto vzorky jsou pak umístěny do výše uvedeného rastru s buňkami o rozměrech 10 x 10 mm. Umístění různých tvarů a vzorků, do této mřížky umožňuje velkou variabilitu měření.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
A																				
B			■			■	■			■	■	■			■		■		■	
C			■			■	■			■	■	■			■		■		■	
D			■			■	■			■	■	■			■		■		■	
E			■			■	■			■	■	■			■		■		■	
F																				
G															■	■	■	■	■	
H															■	■		■	■	
I															■	■	■	■	■	
J																				

Obrázek 62 Ukázka rozmístění měřeného vzorku

### 7.1.1 Postup měření středu buňky

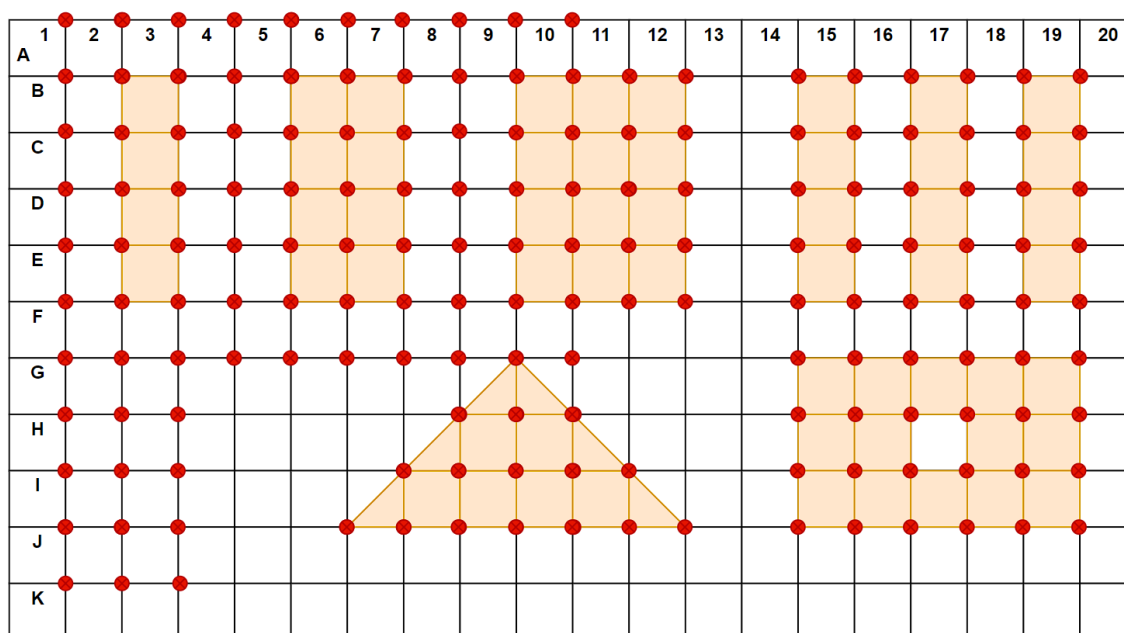
Prvním zvoleným postupem k získání naměřených dat je měření prováděné ve středu každé jednotlivé buňky mřížky. Tento postup začíná ve středu první buňky, která je označena A1 a další změřenou hodnotou bude střed vertikálně, případně horizontálně sousedící buňky A2 nebo B1. Tímto způsobem je celý motiv proměřen s jednotlivými body měření vzdálenými po 1 cm. Celkově bude naměřeno 200 hodnot pro vzorek, který je tvořen mřížkou 10x20 buněk. Tento postup je ukázán na obrázku Princip postupu měřeného vzorku na středu buňky (Obrázek 63), kde jsou měřené body reprezentovány modrou tečkou. Pro větší přehlednost nejsou měřicí body zobrazeny ve všech buňkách, ale jen na přibližné čtvrtině buněk mřížky a následně jen na dílčích měřených vzorcích. Zde je názorně vidět, že žádný bod měření není umístěn na hraně vzorku.

A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
B	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•			•		•		•	
C	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•			•		•		•	
D	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•			•		•		•	
E	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•			•		•		•	
F	•	•	•	•	•	•	•	•	•											
G	•	•						•	•						•	•	•	•	•	
H	•	•						•	•	•	•	•			•	•	•	•	•	
I	•	•	•					•	•	•	•	•	•		•	•	•	•	•	
J	•	•																		

Obrázek 63 Princip postupu měřeného vzorku na středu buňky

### 7.1.2 Postup měření „křížků“ mřížky

Druhým přístupem, který jsem pro měření aplikoval je využití průniků (rohů) jednotlivých buněk rastru. Pro zjednodušení dalšího popisu, bude tento přístup dále nazýván jako postup měření pomocí „křížků“ jelikož se buňky v místech dotyku jeví jako křížky (křížení). První hodnota toho postupu měření je umístěna v buňce A1 v pravém horním buňky - v (Obrázek 64) Princip postupu měřeného vzorku na „křížcích“ protnutých osách mřížky (Obrázek 64), je symbolizována červenou tečkou. Z důvodu přehlednosti tyto zvýrazněné body v obrázku opět nejsou umístěny všude. Od zmíněného změřeného bodu A1 se postupuje stejným způsobem, a to buď k vertikálně sousedící buňce A2, nebo horizontální buňce B1, kdy je znovu vzatý pravý horní bod buňky. Tímto způsobem jsou jednotlivé body od sebe znovu naměřeny po 1 cm.

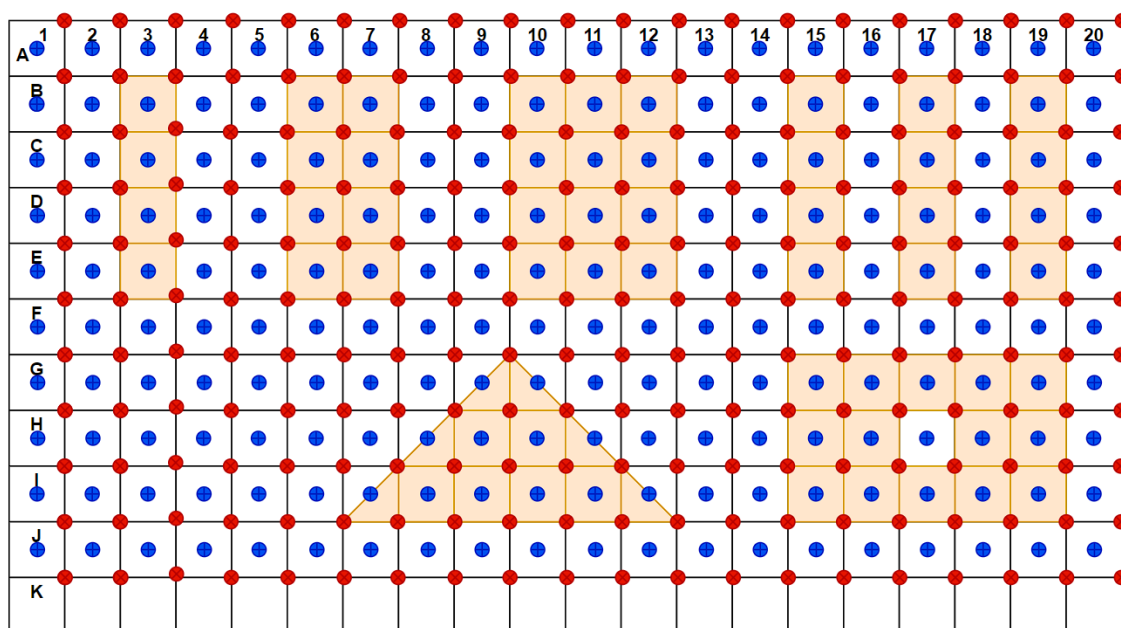


Obrázek 64 Princip postupu měřeného vzorku na „křížcích“ protnutých osách mřížky

Pokud bude tímto způsobem pokračováno po celé mřížce, tak je možné se dostat na původně poslední označený řádek J, kde se znovu získají hodnoty pravého horního rohu. Tento pravý horní roh na řádku udává hodnoty hrany umístěných vzorků. Z důvodu přesnějšího proměření mřížky, jsou naměřeny i spodní hodnoty části označené buňky J, které jsou pro přehlednost dále zpracovány jako řádek K. Hodnoty řádku K jsou sice měřeny ve volném prostoru, ale stále na nich lze pozorovat chování v okolí vzorku. Citlivost přesnosti měření přechodu na hraně vzorku a volného prostoru je dána precizností nastavení polohy anténní sondy do měřeného bodu.

Mřížka, ze zmíněného důvodu, tedy získala ještě jeden řádek K a její rozměr se v tomto případě zvětšil na velikost 11x20cm. Tím pádem vzrostl i počet změřených hodnot na 220.

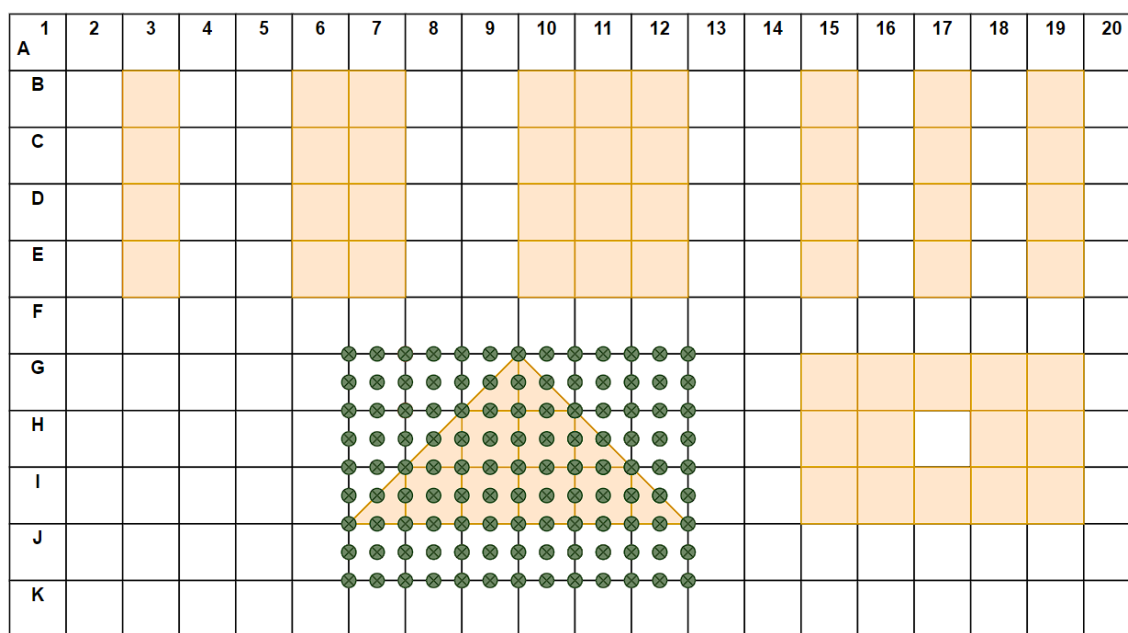
Výsledné měření obou zmíněných postupů lze i kombinovat. Touto kombinací vzniká ještě více zahuštěná síť změřených hodnot, kdy je na buňce změřen její střed i pravý horní roh. Tento postup je ukázán na obrázku Aplikace kombinace obou postupů na měřený vzorek (Obrázek 65). S využitím těchto kombinací a stejným přístupem jako u předchozích postupů lze získat až 420 hodnot měření, která vystihuje jak měření na hraně vzorků, tak uprostřed vzorků, tak ve volném prostoru.



Obrázek 65 Aplikace kombinace obou postupů na měřený vzorek

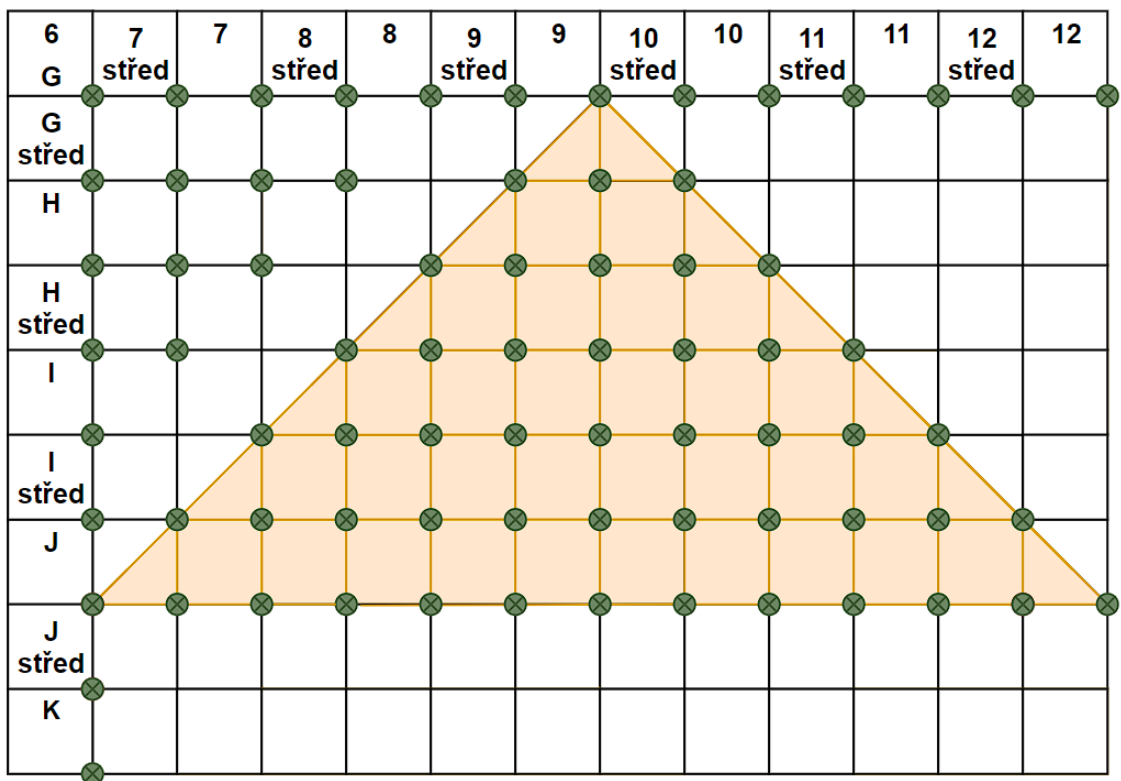
### 7.1.3 Detailnější proměření trojúhelníkového prvku

Pro zajištění detailnějších dat analýzy, měl být z mřížky vybrán jeden z předchozích vzorků, který je dále znovu, a ještě více detailněji proměřen. Z tohoto důvodu je z mřížky vybrán vzorek trojúhelníku a jeho blízkého okolí, pro jeho specifický tvar. Jedná se o obrazec, který má zajímavé ostré přechody hran okrajů a volného prostředí, i velkou vnitřní plochu materiálu.



Obrázek 66 Znárodnění vybraného obrazce a měřených bodů pro detailnější měření

Pro větší zachycení detailních hodnot, je síť buněk ještě více zahuštěna měřenými hodnotami, které jsou brány po vzdálenostech 0,5 cm. Získané hodnoty se nachází na osách, i středech buněk, které jsou rozpůleny v horizontálním a vertikálním směru. Tímto způsobem vznikají další osy, které imaginárně prochází středem buněk. Pro lepší představu jsou tyto body zobrazeny na dalším obrázku Princip postupu měřeného vzorku pro získání detailnějšího celku (Obrázek 67). Tedy první hodnota je měřena na ose G6, další měřená hodnota je zachycená buď vertikálně, kde je střed buňky G7, nebo horizontálně ve prostředku buňky G6. Tímto způsobem je na vzorku vytvořena mřížka o velikosti 9x13 linek a je získáno 117 hodnot měření.



Obrázek 67 Princip postupu měřeného vzorku pro získání detailnějšího celku

## 7.2 Naměřené hodnoty a jejich vyhodnocení

V přechozí kapitole byl uveden detailní popis aplikace různých postupů měření pro následné vyhodnocení. V dále prezentovaných tabulkách změřených hodnot jsou světle oranžovou barvou zvýrazněny body, do kterých zasahuje materiál vzorku. Jedná se o body, do kterých vzorek zasahuje celou plochou nebo je zde přechod mezi vzorkem a volným prostorem. Bílé hodnoty v tabulce značí bod měření volného prostoru (mimo oblast vzorku nebo jeho hrany).

Následně bylo provedeno vyhodnocení naměřených dat. Z naměřených hodnot jsem určil hranici, která definuje přítomnost nebo nepřítomnost útlumového materiálu v měřených datech. Tato hranice tedy stanovuje body, které jsou ovlivněny vzorkem a jsou vyznačeny zeleně. Modře značené body jsou změřená data pro volný prostor. Tato vyhodnocení byla provedena pro spojená data z obou druhů měření, tedy středů a křížků, čímž vznikla ještě více zahuštěná síť pro detailní rozbor vzorku. Tímto postupem vznikla tabulka dvojnásobného rozměru. Tato tabulka je kvůli velkým rozměrům umístěna do přílohy. Výsledky jsou v tabulce přehledně znázorněny. Pro přiblížení vyhodnocených výsledků a jejich grafického rozlišení, je zde uvedena fotka zmíněné tabulky. Vyhodnocení je zpracováno stejným způsobem i pro detailně změřený trojúhelníku. V tabulce jsou uvedeny hodnoty přeneseného signálu s-parametru  $S_{21}$ .

### 7.2.1 Změřené hodnoty postupem měření středu buňky

Podle dříve uvedeného popisu postupu měření viz (Obrázek 63), jsou v této kapitole uvedeny a rozebrány výsledky měření středu buněk. Pro každou sondu bylo při měření středu buňky naměřeno 200 hodnot. Jelikož jde o středy buněk, nenachází se zde hrany přechodu mezi materiálem a vzduchem. Podle teoretických znalostí by se neměly vyskytnout velké odrazy nebo náhlé ztráty signálu vlivem zmíněných hran. Pro každou sondu bude po zhodnocení dat nastavena vyhodnocovací hranice pro určení, zda se jedná o měřenou hodnotu se vzorkem nebo volným prostorem. Níže jsou uvedeny naměřené výsledky jednotlivých sond za daných frekvencí. Oranžově jsou vyznačené tvary jednotlivých vytvořených vzorků.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
A	-29,932	-30,637	-30,138	-29,31	-28,843	-28,349	-29,31	-29,378	-30,751	-32,255	-29,747	-28,064	-26,411	-26,372	-27,433	-26,84	-28,126	-27,559	-29,343	-28,345
B	-31,49	-28,146	-31,616	-29,85	-29,495	-33,724	-33,365	-29,367	-30,178	-32,727	-30,826	-31,526	-27,576	-27,741	-32,497	-28,657	-32,825	-28,596	-32,408	-27,99
C	-29,569	-29,802	-31,286	-29,474	-29,275	-33,057	-32,519	-28,801	-30,041	-32,247	-32,022	-32,349	-27,257	-27,628	-32,586	-29,383	-32,673	-28,377	-32,247	-27,782
D	-28,188	-28,973	-31,824	-29,45	-28,446	-32,648	-32,429	-28,375	-28,779	-33,561	-33,176	-33,398	-27,379	-27,909	-32,712	-28,524	-32,551	-28,842	-32,047	-27,884
E	-27,117	-28,69	-33,676	-29,121	-28,341	-32,292	-32,331	-27,532	-27,947	-34,172	-33,964	-33,279	-27,36	-28,875	-32,115	-28,428	-32,867	-28,368	-32,382	-27,889
F	-27,464	-28,344	-28,644	-27,927	-27,384	-27,353	-27,384	-27,341	-28,582	-29,367	-28,226	-28,026	-27,443	-28,036	-28,48	-28,201	-28,416	-28,124	-28,493	-26,917
G	-28,193	-28,296	-28,617	-27,608	-27,134	-26,925	-27,288	-28,062	-35,342	-34,187	-28,183	-27,754	-27,594	-28,758	-32,827	-32,736	-32,627	-32,355	-33,223	-28,538
H	-28,561	-28,845	-29,165	-27,918	-27,33	-26,855	-27,817	-32,984	-34,169	-34,706	-33,465	-28,388	-27,688	-28,539	-33,277	-32,831	-29,612	-32,389	-33,634	-28,683
I	-28,433	-29,357	-29,526	-27,883	-26,783	-27,241	-32,868	-32,77	-34,827	-33,443	-32,837	-33,577	-27,869	-28,287	-32,919	-33,491	-33,207	-33,397	-33,198	-28,603
J	-28,02	-28,432	-29,128	-29,553	-27,638	-26,916	-27,281	-28,053	-27,988	-28,282	-28,425	-28,153	-27,249	-28,01	-27,766	-27,825	-27,991	-28,381	-27,936	-27,648

Tabulka 2 - Naměřené hodnoty sondy na frekvenci 1,8 GHz – měření středu buňky

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
A	-24,2307	-24,1674	-25,5365	-25,852	-25,333	-27,687	-26,549	-25,727	-25,631	-27,072	-26,1944	-26,432	-24,944	-26,138	-27,5919	-25,264	-25,951	-25,553	-24,08	-24,686
B	-24,315	-26,826	-34,458	-26,978	-26,922	-37,618	-32,783	-25,98	-25,788	-34,098	-32,188	-33,498	-26,157	-27,806	-37,184	-32,831	-37,128	-26,216	-34,686	-24,625
C	-24,479	-27,246	-34,622	-29,478	-28,933	-31,381	-31,125	-26,822	-26,751	-31,274	-31,325	-31,621	-25,662	-25,482	-30,611	-26,102	-30,399	-26,746	-30,145	-25,701
D	-24,737	-27,234	-35,999	-30,62	-27,616	-31,236	-31,332	-26,756	-26,906	-31,457	-31,929	-29,361	-24,891	-26,105	28,945	-25,831	-31,273	-27,868	-30,251	-26,545
E	-25,549	-28,954	-36,539	-27,569	-25,878	-33,488	-35,989	-26,684	-27,474	-37,05	-34,424	-32,575	-25,451	-27,677	-27,069	-25,576	-37,94	-25,195	-33,867	-25,45
F	-25,633	-26,84	-29,243	-26,72	-24,166	-26,613	-26,252	-25,723	-27,616	-28,004	-27,601	-25,686	-24,885	-25,05	-27,879	-26,098	-26,638	-25,889	-25,355	-25,118
G	-25,549	-26,496	-27,835	-26,505	-24,52	-25,623	-25,8	-25,781	-32,099	-33,621	-26,346	-24,581	-25,073	-26,983	-30,374	-30,806	-30,652	-30,648	-30,152	-25,599
H	-25,956	-26,343	-27,296	-27,38	-25,648	-26,967	-26,417	-30,844	-31,867	-31,881	-33,013	-25,456	-24,639	-26,296	-30,068	-29,812	-27,646	-30,46	-24,936	-25,847
I	-25,292	-25,678	-26,431	-28,324	-26,513	-25,523	-26,273	-30,256	-31,294	-31,881	-31,862	-30,98	-25,877	-24,846	-29,559	-31,044	-31,895	-32,343	-33,05	-26,73
J	-24,492	-26,68	-26,812	-27,832	-25,263	-25,685	-25,979	-25,821	-26,154	-26,343	-27,206	-27,616	-24,651	-24,457	-26,269	-26,199	-26,402	-26,483	-26,121	-24,567

Tabulka 3 - Hodnoty měření pro sondu 3,2 GHz měření středu buňky

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
A	-26,995	-27,278	-28,117	-27,546	-27,663	-28,581	-28,54	-27,424	-27,541	-28,308	-28,426	-28,445	-27,452	-27,718	-28,665	-27,516	-27,895	-27,551	-28,557	-27,286
B	-26,665	-28,29	-28,159	-27,825	-28,204	-32,837	-39,01	-27,469	-28,817	-29,239	-44,832	-35,633	-27,8	-28,676	-31,421	-29,67	-27,361	-29,457	-38,976	-27,608
C	-26,611	-28,06	-55,623	-27,698	-28,034	-42,65	-46,907	-27,314	-28,405	-33,579	-47,942	-45,528	-27,692	-29,521	-45,572	-29,692	-46,656	-29,286	-45,793	-28,007
D	-26,704	-28,745	-44,921	-28,096	-28,079	-48,325	-48,753	-27,481	-28,818	-37,583	-51,798	-45,629	-27,627	-28,621	-44,845	-28,257	-45,016	-29,351	-46,373	-28,184
E	-26,866	-27,987	-26,745	-28,441	-28,533	-44,158	-33,056	-27,931	-29,355	-41,782	-47,667	-42,22	-27,827	-28,222	-30,499	-28,695	-26,495	-29,488	-31,046	-28,487
F	-27,199	-27,274	-27,45	-28,53	-27,652	-28,04	-27,958	-27,479	-27,807	-28,96	-28,184	-28,648	-27,264	-27,688	-29,79	-28,381	-28,39	-28,857	-29,115	-27,474
G	-27,379	-27,131	-26,969	-27,718	-27,72	-27,207	-27,241	-28,146	-37,171	-32,627	-27,837	-26,829	-27,539	-29,041	-30,024	-42,543	-43,942	-56,284	-31,544	-29,37
H	-27,252	-27,169	-27,968	-27,695	-27,575	-27,285	-28,4	-46,975	-44,468	-51,539	-43,068	-27,049	-27,73	-28,35	-48,047	-44,458	-31,509	-46,8	-44,343	-28,435
I	-27,229	-26,942	-27,971	-27,523	-27,293	-28,006	-35,228	-43,074	-43,387	-44,711	-43,821	-25,405	-27,598	-28,757	-27,905	-46,514	-37,721	-54,833	-32,349	-28,77
J	-27,334	-27,127	-27,044	-27,264	-27,318	-27,21	-28,83	-28,832	-28,56	-28,495	-29,143	-27,365	-27,233	-27,496	-28,616	-28,68	-27,65	-28,575	-28,681	-27,218

Tabulka 4 - Hodnoty měření pro sondu 4,8 GHz – střed buňky

## 7.2.2 Změřené hodnoty postupem měření křížků buňky

Dalším postupem je měření křížků buňky viz (Obrázek 64). Zde se již nachází body, kde budou změřeny přechody mezi vzorkem a signálem. Byl zde přidán ještě jeden řádek, k zajištění dat v okolí volného prostoru vzorku. V tabulce se nachází 220 naměřených hodnot. Opět jsou výsledky zpracovány pro každou jednotlivou sondu zvlášť.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
A	-30,726	-30,936	-29,783	-28,743	-27,507	-27,273	-27,699	-29,116	-28,728	-28,742	-27,448	-26,868	-25,829	-25,814	-25,72	-26,783	-27,91	-28,95	-29,252	-29,139
B	-31,336	-34,519	-34,999	-28,358	-32,541	-32,964	-31,105	-28,951	-31,345	-32,125	-31,084	-31,562	-26,927	-31,308	-31,186	-30,947	-30,729	-31,6	-31,81	-27,972
C	-30,977	-31,738	-33,638	-28,967	-31,551	-33,004	-31,83	-30,338	-32,072	-35,233	-35,381	-31,478	-27,324	-32,103	-31,771	-32,349	-31,588	-32,813	-32,153	-27,114
D	-28,577	-34,152	-33,053	-28,762	-32,607	-32,983	-32,155	-28,501	-30,9	-33,603	-33,731	-31,586	-26,984	-30,693	-31,465	-31,672	-31,424	-31,804	-31,775	-27,116
E	-28,016	-32,8	-32,813	-27,965	-32,274	-32,754	-32,206	-27,759	-31,511	-33,942	-34,167	-31,322	-27,06	-32,073	-32,159	-32,206	-32,164	-32,533	-32,333	-27,232
F	-27,358	-33,281	-33,208	-27,77	-31,648	-32,159	-31,443	-27,525	-32,304	-32,891	-32,407	-31,607	-27,528	-31,285	-31,15	-32,284	-31,588	-31,374	-30,967	-27,036
G	-27,265	-28,027	-27,647	-27,821	-26,966	-27,617	-27,076	-29,035	-32,463	-28,445	-27,461	-27,58	-27,352	-31,224	-31,805	-32,759	-31,997	-31,897	-31,432	-26,265
H	-28,681	-28,862	-27,768	-27,227	-27,1	-26,991	-27,965	-34,361	-33,905	-33,69	-28,152	-27,559	-27,702	-33,021	-32,555	-33,291	-32,577	-32,328	-32,429	-27,287
I	-28,926	-29,765	-29,186	-27,69	-26,837	-27,785	-32,787	-34,414	-34,922	-34,224	-33,405	-27,837	-27,187	-32,874	-32,982	-33,029	-33,263	-32,984	-33,18	-27,537
J	-28,813	-28,942	-29,689	-27,746	-26,458	-31,129	-31,985	-33,468	-33,691	-33,678	-33,099	-30,863	-27,124	-30,941	-32,109	-32,775	-32,264	-32,261	-31,62	-27,452
K	-28,217	-28,435	-28,868	-27,902	-26,597	-26,549	-26,921	-27,138	-27,586	-27,885	-27,452	-27,379	-26,595	-27,805	-27,271	-26,951	-27,093	-26,973	-27,407	-27,482

Tabulka 5 - Naměřené hodnoty sondy 1,8 GHz – měření křížků buněk

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
A	-24,511	-24,232	-24,663	-24,498	-24,723	-25,437	-25,441	-25,188	-25,057	-25,188	-24,845	-24,0248	-24,338	-24,266	-25,177	-25,277	-25,078	-25,102	-24,756	-24,279
B	-24,242	-29,432	-29,803	-26,064	-29,476	-29,782	-29,353	-25,57	-29,836	-30,419	-30,619	-30,197	-24,962	-30,795	-31,87	-29,31	-29,967	-28,011	-32,928	-25,067
C	-24,565	32,34	-20,172	-27,518	-29,637	-29,397	-29,39	-25,694	-31,357	-32,706	-35,678	-33,037	-24,393	-28,698	-29,119	-29,02	-27,654	-28,339	-28,925	-25,269
D	-25,677	-31,643	-31,443	-28,07	-30,419	-31,147	-30,791	-26,27	-30,495	-33,14	-32,037	-29,824	-24,749	-28,471	-29,252	-28,581	-30,108	-29,348	-29,159	-25,184
E	-26,152	-31,419	-33,318	-28,501	-35,71	-29,718	-29,583	-26,108	-31,846	-22,776	-23,942	-32,559	-24,396	-24,242	-25,252	-34,573	-25,098	-28,62	-28,932	-25,331
F	-26,024	-30,853	-37,903	-27,146	-30,36	-32,293	-32,796	-25,944	-29,591	-33,721	-31,824	-30,388	-24,694	-32,5	-36,515	-29,01	-31,513	-30,772	-33,2514	-25,106
G	-25,827	-28,355	-29,566	-25,962	-25,476	-25,816	-25,721	-26,097	-30,659	-27,751	-26,162	-24,953	-24,701	-28,522	-29,079	-28,721	-29,301	-28,683	-29,197	-24,916
H	-25,63	-27,395	-29,062	-28,536	-25,358	-25,752	-26,153	-30,606	-33,353	-34,179	-27,44	-25,196	-24,846	-29,247	-30,015	-30,063	-29,564	-29,432	-29,855	-25,012
I	-25,855	-26,743	-29,75	-28,737	-25,593	-25,871	-28,165	-33,13	-31,364	-36,076	-30,804	-25,858	-24,77	-28,763	-29,17	-29,997	-29,943	-32,212	-31,017	-25,437
J	-25,788	-26,028	-28,301	-28,498	-25,582	-27,492	-26,944	-30,229	-30,732	-30,969	-30,743	-28,52	-25,106	-27,518	-28,582	-29,309	-29,254	-29,947	-29,123	-25,092
K	-25,735	-25,479	-26,734	-27,177	-25,654	-24,894	-25,479	-25,713	-25,667	-26,499	-26,088	-25,264	-24,369	-24,664	-25,306	-25,498	-25,255	-25,191	-24,877	-24,693

Tabulka 6 - Hodnoty měření pro sondu 3,2 GHz – měření křížků buněk

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
A	-26,947	-26,902	-27,445	-27,553	-27,321	-27,148	-27,252	-27,093	-27,178	-27,146	-27,356	-27,34	-27,442	-27,398	-27,357	-27,221	-27,283	-27,132	-27,148	-27,169
B	-26,974	-32,669	-36,374	-27,398	-36,939	-47,013	-45,707	-27,151	-36,915	-39,975	-38,611	-38,748	-27,187	-33,473	-36,957	-32,86	-34,689	-40,344	-55,158	-27,232
C	-26,777	-34,438	-40,546	-26,898	-39,115	-42,37	-44,762	-26,748	-30,099	-38,815	-47,551	-24,808	-27,188	-35,701	-47,877	-36,149	-41,603	-41,792	-47,12	-27,126
D	-26,803	-37,675	-43,266	-26,894	-37,302	-48,311	-45,377	-26,901	-32,983	-44,679	-52,871	-33,921	-27,076	-38,486	-44,139	-38,908	-42,27	-47,214	-47,675	-27,176
E	-26,914	-37,964	-40,128	-27,071	-37,256	-47,63	-42,57	-26,942	-37,324	-41,43	-47,794	-36,72	-27,165	-33,866	-35,952	-34,885	-37,93	-39,986	-44,056	-27,174
F	-27,122	-33,468	-36,638	-27,579	-34,187	-39,873	-41,29	-27,216	-37,359	-43,901	-41,091	-35,18	-27,302	-31,241	-31,922	-31,388	-33,97	-33,937	-33,981	-27,089
G	-27,254	-26,748	-27,038	-27,693	-27,471	-27,107	-27,296	-26,962	-36,882	-28,297	-27,011	-26,973	-27,442	-37,269	-46,742	-46,363	-41,134	-43,268	-46,594	-27,379
H	-27,236	-26,883	-27,055	-27,754	-27,397	-27,138	-28,095	-44,549	-36,351	-44,676	-27,903	-27,252	-27,705	-39,883	-46,346	-50,624	-40,172	-48,005	-43,384	-27,739
I	-27,213	-26,825	-27,103	-27,626	-27,207	-27,725	-46,588	-46,714	-47,906	-46,187	-38,82	-27,282	-27,557	-39,389	-35,064	-40,358	-42,559	-48,774	-41,512	-27,527
J	-27,661	-26,925	-26,963	-27,387	-26,833	-36,388	-36,731	-46,44	-41,911	-36,246	-31,832	-27,492	-27,329	-31,085	-44,437	-43,767	-39,587	-41,621	-40,24	-27,276
K	-27,332	-27,13	-27,092	-27,524	-27,191	-26,899	-27,141	-27,122	-26,567	-27,049	-27,183	-27,195	-26,913	-27,195	-27,291	-26,997	-27,107	-27,307	-27,13	-26,974

Tabulka 7 - Hodnoty měření pro sondu 4,8 GHz – měření křížků buněk

### 7.2.3 Vyhodnocení kombinace předchozích měření

Výsledky předchozích dvou postupů byly spojeny do jedné tabulky pro zachycení detailnější sítě hodnot. Zde je vytvořena tabulka kombinace obou měření. Jedná se o velkou tabulku, která je přiložena do přílohy. Zde je uvedený vzdálený obrázek. I přesto, že je obrázek menších rozměrů, je zde názorně vidět výskyt chyb pro zvolené hranice. Tyto chyby jsou značeny červeně, mimo ohraničený prostor.

Pro sondu 1,8 GHz byla zvolena hranice -30,7 dB. Pokud hodnota bodu měla menší hodnotu než hranice, byla vyhodnocena jako stínící materiál. Hodnoty větší, jsou vyhodnoceny jako volný průchod a jsou označeny modře. Z celé kombinace bylo vyhodnoceno odlišně 8 buněk, než je původní rozložení materiálu. Z těchto chyb se vyskytovalo sedm vyhodnocení bodu vzorku, na místě volného prostředí. V levém horním rohu je shluk pěti chyb, to by mohlo naznačovat odraz signálu do tohoto místa. Poslední chyba je zjištěna na hraně vzorku a měla hodnotu -30,693 dB, což je těsně pod zvolenou hranicí.

Obrázek 68 Vyhodnocení měřeného vzorku sondou 1,8 GHz – spojená data

V případě druhé sondy, která původně měla být podle návrhu měřena na 2,8 GHz, ale kvůli vzniklým okolnostem a předchozího změření funkčnosti sondy, byla zvolena měřená frekvence na 3,2 GHz. Po zhodnocení dat, byla zvolena hranice -28 dB. Při tomto měření je vidět ztlačeně více chybných vyhodnocení, kde opakovaně převládá špatné vyhodnocení volného prostoru zaměněného za materiál vzorku. Naměřené hodnoty chyb, které vznikly na hraně vzorku mohly být způsobeny chybou při posunu vzorku při samotném měření, z důvodu špatné manipulace při opakovaném posuvu.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20															
A	24,23	24,511	24,732	24,663	25,852	24,498	25,313	24,723	27,687	25,437	26,549	25,441	25,727	25,188	25,631	25,057	27,072	25,188	24,845	26,432	24,0248	24,844	24,318	24,266	27,5919	25,177	25,277	25,078	25,102	25,102	24,08	24,796	24,686	24,279	
B	24,242	24,167	29,431	25,5365	29,801	26,064	26,922	29,476	37,618	29,782	32,783	29,351	25,98	25,798	29,836	34,098	30,419	32,188	30,619	33,498	30,197	24,962	27,804	30,795	37,184	31,87	32,811	29,31	37,128	29,967	26,216	34,686	32,928	24,625	25,067
C	24,565	24,565	32,34	34,458	26,978	27,518	26,922	29,617	29,897	29,39	25,694	26,751	31,357	32,706	31,325	35,478	33,037	24,393	27,804	28,698	29,119	25,462	25,482	28,471	30,611	26,102	30,399	29,252	26,746	29,348	30,145	28,925	25,701	25,268	
D	24,479	27,246	31,643	34,622	31,443	29,476	27,616	30,419	31,147	31,125	30,791	26,822	26,751	30,495	33,14	31,325	32,037	29,824	24,749	25,482	28,471	26,102	26,102	28,471	30,611	26,102	30,399	29,252	26,746	29,348	30,145	28,925	25,701	25,268	
E	24,737	27,234	31,643	35,999	33,318	29,476	27,616	30,419	31,236	31,332	29,583	26,756	26,906	31,846	31,457	27,728	31,929	29,361	24,891	26,102	28,471	26,102	26,102	28,471	30,611	26,102	30,399	29,252	26,746	29,348	30,145	28,925	25,701	25,268	
F	25,548	26,151	28,471	36,539	33,318	29,476	25,878	33,488	29,718	35,989	29,583	26,684	26,108	27,474	29,591	37,05	34,424	32,575	25,451	24,396	27,677	26,102	26,102	28,471	30,611	26,102	30,399	29,252	26,746	29,348	30,145	28,925	25,701	25,268	
G	26,024	26,024	30,653	37,902	27,146	27,146	25,878	30,36	32,293	32,792	25,944	25,944	27,474	29,591	37,05	34,424	32,575	25,451	24,396	27,677	26,102	26,102	28,471	30,611	26,102	30,399	29,252	26,746	29,348	30,145	28,925	25,701	25,268		
H	25,633	25,827	26,84	38,35	36,539	26,72	24,166	26,613	25,816	26,252	25,721	25,723	27,616	30,559	33,621	27,751	27,601	26,162	25,686	24,885	25,05	28,522	27,679	29,079	30,806	30,652	29,564	29,432	28,683	25,355	29,197	24,914	24,914		
I	25,549	26,496	27,395	27,835	26,505	24,52	25,623	25,476	25,816	25,8	26,153	25,781	26,097	27,616	30,559	33,621	27,751	26,346	24,581	25,073	24,846	26,296	29,247	30,015	30,063	30,652	29,564	29,432	28,683	25,355	29,197	24,914	24,914		
J	25,956	25,63	27,395	27,296	27,38	25,648	26,967	25,752	26,417	26,153	26,153	26,097	27,616	30,559	33,621	27,751	26,346	24,581	25,073	24,846	26,296	29,247	30,015	30,063	30,652	29,564	29,432	28,683	25,355	29,197	24,914	24,914	24,914		
K	25,855	26,743	27,395	27,296	27,38	25,648	26,967	25,752	26,417	26,153	26,153	26,097	27,616	30,559	33,621	27,751	26,346	24,581	25,073	24,846	26,296	29,247	30,015	30,063	30,652	29,564	29,432	28,683	25,355	29,197	24,914	24,914	24,914		
L	25,292	25,678	26,431	26,234	26,513	25,523	25,523	26,417	26,153	26,153	26,097	27,616	30,559	33,621	27,751	26,346	24,581	25,073	24,846	26,296	29,247	30,015	30,063	30,652	29,564	29,432	28,683	25,355	29,197	24,914	24,914	24,914	24,914		
M	24,492	25,788	26,028	26,811	27,832	25,263	25,685	25,979	25,821	26,154	26,343	27,206	27,616	26,154	26,343	27,206	27,616	26,154	26,343	27,206	27,616	26,154	26,343	27,206	27,616	26,154	26,343	27,206	27,616	26,154	26,343	27,206	27,616	26,154	26,343
N	25,735	25,479	26,734	27,177	25,654	24,884	25,479	25,711	25,657	26,499	26,088	25,264	24,389	24,664	25,206	25,498	25,255	25,191	24,877	24,686	25,206	25,498	25,255	25,191	24,877	24,686	25,206	25,498	25,255	25,191	24,877	24,686	25,206	25,498	

Obrázek 69 Vyhodnocení měřeného vzorku sondou 3,2 GHz – spojená data

Poslední měřenou sondou je 4,8 GHz. Zvolenou hranicí je -30 dB. Podle (Obrázek 70), se nevyskytují chyby ve volném prostředí, ale chyby se nachází ve vytvořených materiálech. Podle teoretických poznatků lze předpokládat, že se bude jednat o sondu s největším útlumem při průchodu signálu materiálem. Tento jev potvrzují i naměřené hodnoty útlum materiálu dosahoval až hodnot -55 dB.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20																
A	-26,999	-26,947	-26,902	-27,445	-27,553	-27,321	-27,148	-27,252	-27,093	-27,541	-27,178	-27,146	-27,356	-27,34	-27,442	-27,718	-27,998	-27,357	-27,221	-27,283	-27,551	-27,132	-27,148	-27,286	-27,169											
B	-26,974	-27,278	-32,669	-28,117	-27,546	-27,663	-28,581	-28,54	-27,424	-27,093	-27,541	-27,178	-27,146	-27,356	-27,34	-27,442	-27,718	-27,998	-27,357	-27,221	-27,283	-27,551	-27,132	-27,148	-27,286	-27,169										
C	-26,685	-26,974	-32,669	-28,117	-27,546	-27,663	-28,581	-28,54	-27,424	-27,093	-27,541	-27,178	-27,146	-27,356	-27,34	-27,442	-27,718	-27,998	-27,357	-27,221	-27,283	-27,551	-27,132	-27,148	-27,286	-27,169										
D	-26,611	-26,777	-34,438	-35,623	-40,546	-27,698	-26,894	-28,094	-39,115	-42,63	-42,37	-46,907	-44,762	-27,314	-26,748	-28,405	-32,983	-33,579	-44,679	-47,942	-45,528	-27,692	-29,921	-35,701	-45,572	-44,139	-29,692	-36,149	-46,656	-41,603	-29,286	-45,793	-47,675	-28,007	-27,176	
E	-26,704	-26,903	-37,675	-44,921	-43,266	-28,096	-26,894	-28,079	-37,302	-48,323	-48,311	-48,793	-42,57	-27,481	-26,901	-28,818	-37,583	-44,679	-51,798	-45,528	-33,921	-27,627	-27,076	-28,621	-36,486	-44,845	-44,139	-28,237	-38,908	-45,016	-42,27	-29,351	-46,373	-44,056	-28,184	-27,174
F	-26,866	-27,122	-37,987	-44,921	-40,128	-28,441	-27,071	-28,533	-37,256	-44,158	-47,63	-42,57	-27,931	-26,942	-29,355	-37,324	-41,782	-41,43	-47,794	-45,528	-36,72	-27,627	-27,165	-28,222	-33,866	-44,845	-44,139	-28,237	-38,908	-45,016	-42,27	-29,351	-46,373	-44,056	-28,184	-27,174
G	-27,199	-27,234	-33,488	-36,638	-28,579	-27,579	-27,122	-27,216	-27,931	-34,187	-39,873	-41,29	-27,216	-27,931	-34,187	-39,873	-41,29	-27,216	-27,931	-34,187	-39,873	-41,29	-27,216	-27,931	-34,187	-39,873	-41,29	-27,216	-27,931	-34,187	-39,873	-41,29	-27,216	-27,931	-34,187	-39,873
H	-27,379	-27,236	-27,131	-26,969	-27,038	-27,693	-27,72	-27,397	-27,207	-27,138	-28,095	-28,148	-26,962	-27,807	-36,882	-32,627	-28,297	-27,011	-26,829	-27,252	-27,539	-27,442	-29,041	-37,269	-46,742	-42,543	-46,346	-43,942	-41,134	-43,268	-31,544	-46,594	-29,37	-27,379		
I	-27,252	-27,169	-26,883	-27,055	-27,754	-27,575	-27,288	-27,138	-28,095	-28,148	-26,962	-27,807	-36,882	-32,627	-28,297	-27,011	-26,829	-27,252	-27,539	-27,442	-29,041	-37,269	-46,742	-42,543	-46,346	-43,942	-41,134	-43,268	-31,544	-46,594	-29,37	-27,379				
J	-27,229	-27,213	-26,825	-27,103	-27,628	-27,575	-27,288	-27,138	-28,095	-28,148	-26,962	-27,807	-36,882	-32,627	-28,297	-27,011	-26,829	-27,252	-27,539	-27,442	-29,041	-37,269	-46,742	-42,543	-46,346	-43,942	-41,134	-43,268	-31,544	-46,594	-29,37	-27,379				
K	-27,334	-27,661	-26,942	-26,963	-27,523	-27,493	-26,833	-27,318	-28,006	-35,223	-43,074	-43,387	-44,711	-46,187	-43,821	-38,82	-38,349	-37,45	-27,282	-27,598	-27,957	-27,329	-28,757	-39,389	-48,047	-35,064	-40,358	-37,721	-42,559	-44,833	-32,349	-41,512	-28,77	-27,276		
L	-27,332	-27,127	-27,044	-26,963	-27,264	-27,318	-27,21	-26,889	-28,83	-36,588	-36,731	-46,44	-28,56	-28,495	-29,143	-31,832	-37,345	-27,345	-27,333	-27,496	-28,616	-28,68	-27,233	-31,081	-48,437	-43,787	-39,587	-37,65	-38,575	-41,631	-32,349	-41,512	-28,77	-27,276		
M	-27,332	-27,13	-27,092	-27,524	-27,575	-27,288	-27,138	-28,095	-28,148	-26,962	-27,807	-36,882	-32,627	-28,297	-27,011	-26,829	-27,252	-27,539	-27,442	-29,041	-37,269	-46,742	-42,543	-46,346	-43,942	-41,134	-43,268	-31,544	-46,594	-29,37	-27,379					

Obrázek 70 Vyhodnocení měřeného vzorku sondou 4,8 GHz – spojená data

## 7.2.4 Detailnější proměření trojúhelníkového prvku

Níže vyobrazená tabulka představuje detailnější měření jedné části vzorku. Je zde použito měření po 0,5 cm ať se jedná o měření středu, či průtnutí linek buňky. Vybraným tvarem byl trojúhelník. Cílem tohoto měření bylo získání detailnějších dat.

Zvolenou hranicí první sondy s frekvencí 1,8 GHz je -27,1 dB. Po vyhodnocení viz (Tabulka 9) je zde vidět jediná chyba pravého rohu.

	6	7-Střed	7	8-střed	8	9-Střed	9	10-Střed	10	11-Střed	11	12-Střed	12
G	-22,438	-22,619	-22,684	-22,899	-24,018	-26,405	-31,409	-27,073	-24,504	-23,135	-23,264	-22,872	-22,893
G-Střed	-22,731	-22,883	-22,964	-23,944	-26,244	-29,858	-31,407	-29,834	-26,277	-23,377	-23,313	-23,038	-22,553
H	-22,487	-22,951	-23,527	-25,952	-29,484	-30,582	-31,081	-31,587	-30,135	-26,726	-23,764	-23,015	-23,277
H-Střed	-22,457	-23,519	-25,734	-28,451	-30,894	-30,562	-30,692	-30,885	-30,961	-29,834	-25,978	-23,505	-22,534
I	-22,842	-25,255	-29,466	-29,762	-31,574	-30,699	-30,228	-30,371	-30,801	-30,062	-29,009	-25,853	23,012
I-Střed	-25,824	-28,424	-30,392	-29,751	-30,611	-30,738	-30,474	-30,636	-31,065	-30,587	-30,266	-28,615	-25,483
J	-27,731	-27,889	-27,685	-27,982	-29,041	-28,896	-29,174	-29,237	-29,128	-28,788	-28,725	-28,446	-26,511
J-Střed	-22,966	-23,371	-23,645	-23,841	-24,295	-24,281	-23,89	-24,467	-24,664	-24,333	-23,788	-23,806	-23,288
K	-22,55	-22,604	-22,887	-22,835	-23,349	-23,114	-22,691	-23,433	-23,731	-23,285	-23,138	-22,743	-22,865

Tabulka 8 - Hodnoty měření pro sondu 1,8 GHz – trojúhelník po 0,5 cm

	6	7-Střed	7	8-střed	8	9-Střed	9	10-Střed	10	11-Střed	11	12-Střed	12
G	-22,438	-22,619	-22,684	-22,899	-24,018	-26,405	-31,409	-27,073	-24,504	-23,135	-23,264	-22,872	-22,893
G-Střed	-22,731	-22,883	-22,964	-23,944	-26,244	-29,858	-31,407	-29,834	-26,277	-23,377	-23,313	-23,038	-22,553
H	-22,487	-22,951	-23,527	-25,952	-29,484	-30,582	-31,081	-31,587	-30,135	-26,726	-23,764	-23,015	-23,277
H-Střed	-22,457	-23,519	-25,734	-28,451	-30,894	-30,562	-30,692	-30,885	-30,961	-29,834	-25,978	-23,505	-22,534
I	-22,842	-25,255	-29,466	-29,762	-31,574	-30,699	-30,228	-30,371	-30,801	-30,062	-29,009	-25,853	23,012
I-Střed	-25,824	-28,424	-30,392	-29,751	-30,611	-30,738	-30,474	-30,636	-31,065	-30,587	-30,266	-28,615	-25,483
J	-27,731	-27,889	-27,685	-27,982	-29,041	-28,896	-29,174	-29,237	-29,128	-28,788	-28,725	-28,446	-26,511
J-Střed	-22,966	-23,371	-23,645	-23,841	-24,295	-24,281	-23,89	-24,467	-24,664	-24,333	-23,788	-23,806	-23,288
K	-22,55	-22,604	-22,887	-22,835	-23,349	-23,114	-22,691	-23,433	-23,731	-23,285	-23,138	-22,743	-22,865

Tabulka 9 - Vyhodnocení měření pro sondu 1,8 GHz – trojúhelník po 0,5 cm

Měření druhou sondou na frekvenci 3,2 GHz, bylo následně vyhodnoceno hranicí -31 dB. Všechny chyby vznikají ve spodních hranách trojúhelníků, kde jsou body na hraně nebo vloženy vrcholem strany. Jedná se o rizikové body u vybraného obrazce.

	6	7-Střed	7	8-střed	8	9-Střed	9	10-Střed	10	11-Střed	11	12-Střed	12
G	-24,621	-24,641	-24,43	-24,447	-25,721	-30,202	-34,105	-30,904	-25,542	-24,513	-24,463	-24,344	-24,975
G-Střed	-24,451	-24,572	-24,489	-25,988	-30,394	-34,359	-32,372	-33,145	-28,442	-25,254	-24,574	-24,218	-25,772
H	-24,531	-24,479	-25,586	-29,556	-34,112	-32,174	-33,084	-33,161	-35,463	-28,861	-25,065	-24,209	-25,627
H-Střed	-24,75	-25,588	-28,382	-32,081	-33,183	-32,057	-32,587	-33,857	-35,582	-32,349	-27,577	-25,263	-25,518
I	-25,833	-26,568	-31,266	-32,876	-32,482	-32,36	-32,837	-33,591	-35,469	-34,569	-29,667	-27,733	-27,267
I-Střed	-27,107	-29,085	-31,686	-32,758	-31,894	-32,454	-32,64	-33,128	-35,249	-34,726	-23,888	-21,945	-29,659
J	-24,741	-29,657	-22,945	-33,964	-32,571	-32,814	-33,673	-32,403	-33,529	-31,816	-27,789	-25,622	-33,853
J-Střed	-25,773	-26,974	-26,818	-26,822	-26,873	-27,107	-26,437	-26,488	-26,075	-26,086	-25,744	-26,174	-26,585
K	-25,818	-25,95	-25,396	-25,219	-25,455	-25,032	-25,416	-25,216	-24,833	-24,872	-25,321	-25,103	-25,881

Tabulka 10 - Hodnoty měření pro sondu 3,2 GHz – trojúhelník po 0,5 cm

	6	7-Střed	7	8-střed	8	9-Střed	9	10-Střed	10	11-Střed	11	12-Střed	12
G	-24,621	-24,641	-24,43	-24,447	-25,721	-30,202	-34,105	-30,904	-25,542	-24,513	-24,463	-24,344	-24,975
G-Střed	-24,451	-24,572	-24,489	-25,988	-30,394	-34,359	-32,372	-33,145	-28,442	-25,254	-24,574	-24,218	-25,772
H	-24,531	-24,479	-25,586	-29,556	-34,112	-32,174	-33,084	-33,161	-35,463	-28,861	-25,065	-24,209	-25,627
H-Střed	-24,75	-25,588	-28,382	-32,081	-33,183	-32,057	-32,587	-33,857	-35,582	-32,349	-27,577	-25,263	-25,518
I	-25,833	-26,568	-31,266	-32,876	-32,482	-32,36	-32,837	-33,591	-35,469	-34,569	-29,667	-27,733	-27,267
I-Střed	-27,107	-29,085	-31,686	-32,758	-31,894	-32,454	-32,64	-33,128	-35,249	-34,726	-23,888	-21,945	-29,659
J	-24,741	-29,657	-22,945	-33,964	-32,571	-32,814	-33,673	-32,403	-33,529	-31,816	-27,789	-25,622	-33,853
J-Střed	-25,773	-26,974	-26,818	-26,822	-26,873	-27,107	-26,437	-26,488	-26,075	-26,086	-25,744	-26,174	-26,585
K	-25,818	-25,95	-25,396	-25,219	-25,455	-25,032	-25,416	-25,216	-24,833	-24,872	-25,321	-25,103	-25,881

Tabulka 11 - Vyhodnocení měření pro sondu 3,2 GHz – trojúhelník po 0,5 cm

Poslední měřená frekvence 4,8 GHz, má zvolenou hranici – 33 dB. Shluk chyb se znovu objevuje v pravém rohu.

	6	7-Střed	7	8-střed	8	9-Střed	9	10-Střed	10	11-Střed	11	12-Střed	12
G	-25,69	-25,741	-25,751	-25,735	-26,004	-28,368	-34,974	-29,666	-26,169	-25,7973	-25,2008	-25,1739	-25,261
G-Střed	-25,845	-25,769	-25,9115	-26,107	-29,236	-35,155	-23,036	-39,849	-29,761	-26,604	-25,153	-25,106	-25,253
H	-25,875	-25,996	-26,697	-30,734	-39,589	-38,651	-33,467	-43,194	-44,724	-32,973	-25,353	-25,036	-25,313
H-Střed	-25,802	-26,662	-32,708	-41,635	-39,582	-39,671	-41,369	-43,542	-40,183	-39,865	-28,014	-25,426	-25,402
I	-26,538	-30,309	-42,619	-39,499	-39,57	-40,043	-42,256	-41,542	-39,162	-39,033	-35,974	-26,829	-25,621
I-Střed	-32,932	-37,413	-38,813	-38,922	-38,267	-39,027	-39,993	-39,751	-38,234	-38,673	-32,022	-20,527	-25,454
J	-33,914	-36,775	-43,853	-44,934	-41,282	-42,285	-43,891	-44,415	-42,986	-39,456	-28,777	-20,591	-29,196
J-Střed	-26,775	-26,716	-26,739	-27,005	-27,184	-26,752	-26,721	-27,107	-27,015	-27,063	-26,094	-25,942	-25,992
K	-25,592	-25,628	-25,639	-25,719	-25,709	-25,236	-25,275	-25,507	-25,949	-25,958	-25,661	-25,836	-25,658

Tabulka 12 - Hodnoty měření pro sondu 4,8 GHz – trojúhelník po 0,5

	6	7-Střed	7	8-střed	8	9-Střed	9	10-Střed	10	11-Střed	11	12-Střed	12
G	-25,69	-25,741	-25,751	-25,735	-26,004	-28,368	-34,974	-29,666	-26,169	-25,7973	-25,2008	-25,1739	-25,261
G-Střed	-25,845	-25,769	-25,9115	-26,107	-29,236	-35,155	-23,036	-39,849	-29,761	-26,604	-25,153	-25,106	-25,253
H	-25,875	-25,996	-26,697	-30,734	-39,589	-38,651	-33,467	-43,194	-44,724	-32,973	-25,353	-25,036	-25,313
H-Střed	-25,802	-26,662	-32,708	-41,635	-39,582	-39,671	-41,369	-43,542	-40,183	-39,865	-28,014	-25,426	-25,402
I	-26,538	-30,309	-42,619	-39,499	-39,57	-40,043	-42,256	-41,542	-39,162	-39,033	-35,974	-26,829	-25,621
I-Střed	-32,932	-37,413	-38,813	-38,922	-38,267	-39,027	-39,993	-39,751	-38,234	-38,673	-32,022	-20,527	-25,454
J	-33,914	-36,775	-43,853	-44,934	-41,282	-42,285	-43,891	-44,415	-42,986	-39,456	-28,777	-20,591	-29,196
J-Střed	-26,775	-26,716	-26,739	-27,005	-27,184	-26,752	-26,721	-27,107	-27,015	-27,063	-26,094	-25,942	-25,992
K	-25,592	-25,628	-25,639	-25,719	-25,709	-25,236	-25,275	-25,507	-25,949	-25,958	-25,661	-25,836	-25,658

Tabulka 13 - Vyhodnocení měření pro sondu 4,8 GHz – trojúhelník po 0,5 cm

## 8 Závěr

Cílem práce bylo vytvořit návrh pracoviště pro měření stínících vlastností materiálů v blízké zóně. Tomu předcházelo prostudování problematiky elektromagnetické kompatibility, do které spadá stínící účinnost materiálů, prostředí pro měření a zamezení vyzařování signálu vlivem stínící komory či technologických netěsností. Dalším tématem nutným prostudovat byly planární mikrovlnné struktury, což zahrnovalo planární mikrovlnná vedení a planární anténní struktury.

V aplikační části se nachází samotný návrh a realizace sestaveného stanoviště pro měření. V rámci této práce byly použity simulace v CST Studio Suite, tento program mi umožnil teoretický výpočet šířky vodivého pásku, který byl následně s dalšími parametry optimalizován a použit ve výsledném řešení. Součástí jsou i návrhy a optimalizace sond navržených pro několik frekvenčních pásem, konkrétně 1,8 GHz, 2,8 GHz, 4,8 GHz. Sonden byly bohužel výrobcem dodány na chybné tloušťce substrátu. Výsledné sondy pro měření tedy nebyly v souladu s návrhem, a měly odlišné vlastnosti. Z tohoto důvodu byla navržena sonda na 2,8 GHz nakonec měřena na frekvenci 3,2 GHz.

V neposlední řadě bylo navrženo a zkonstruováno měřicí stanoviště pro dvě sondy včetně pohyblivých držáků, vytištěných na 3D tiskárně, pro umístění sond a platforma pro pohyb měřeného stínícího vzorku daného materiálu. S využitím vektorového obvodového analyzátoru bylo provedeno měření přeneseného signálu přes stínící materiál. Sonden byly nastaveny do shodné 3 mm vzdálenosti od měřeného vzorku. Celý vzorek se všemi definovanými specifickými tvary byl změřen dvěma postupy s krokem měření 1 cm, kdy se nejdříve měřily středy jednotlivých buněk a poté protnuté linky mřížky. Z těchto dvou měření byla vytvořena ještě více detailní síť změřených hodnot, které jsou následně vyhodnoceny. Bylo provedeno též detailní měření specifického vzorku s profilem trojúhelníku. Toto měření bylo provedeno v detailním rastru s krokem 0,5 cm. Měřením byla prokázána správnost návrhu celého měřicího pracoviště. Z výsledků je zřejmé, že pracoviště je schopné provádět vyhodnocení útlumových vlastností stínících materiálů s relativně jemným rastrem měření. Výsledky byly do značné míry ovlivněny chybnou výrobou anténních sond. Při správné konstrukci bychom dostali přesnější, a především spolehlivější data o stínících účincích vybraných vzorků materiálu. Další možnou úpravou, která by do značné míry zpřesnila měřená data by byl automatický elektronický posuv buď měřeného vzorku materiálu nebo anténních sond. Dá se tedy shrnout, že vymezené cíle této diplomové práce byly naplněny.

## Literatura

- [1] SVAČINA, Jiří. *Elektromagnetická kompatibilita: principy a poznámky*. Připojujeme se k Evropské unii, sv. 2. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2001. ISBN 80-214-1873-7.
- [2] KOVÁČ, Dobroslav; KOVÁČOVÁ, Irena a KAŇUCH, Ján. *EMC z hlediska teorie a aplikace*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-202-7.
- [3] KAISER, Kenneth L. *Electromagnetic compatibility handbook*. 1. Boca Raton: CRC Press, c2005. ISBN 0-8493-2087-9.
- [4] *Šíření vln v blízké a vzdálené zóně antény: sborník*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2009. ISBN 978-80-7395-172-6.
- [5] PAUL, Clayton R. *Introduction to electromagnetic compatibility*. 2nd ed. Wiley series in microwave and optical engineering. Hoboken: John Wiley, c2006. ISBN 0-471-75500-1.
- [6] ČERNOHORSKÝ, Dušan. *Analýza a optimalizace mikrovlnných struktur*. Brno: VUTIUM, 1999. ISBN 80-214-1512-6.
- [7] VRBA, Jan. *Úvod do mikrovlnné techniky*. Vyd. 2., přeprac. V Praze: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03670-9.
- [8] MAZÁNEK, Miloš; PECHAČ, Pavel a VRBA, Jan. *Základy antén, šíření vln a mikrovlnné techniky*. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2008. ISBN 978-80-01-03997-7.
- [9] *Univerzita Pardubice fakulta elektrotechniky a informatiky*. Online. 2024. Dostupné z: <https://fei.upce.cz/fei/ke/laboratore/bezodrazova-komora>. [cit. 20240].
- [10] GARG, Ramesh; BHARTIA, Prakash; BAHL, Inder a ITTIPIBOON, Apisak. *Microstrip Antenna Design Handbook*. ARTECH HOUSE, 2000. ISBN 0-89006-513-6.

- [11] Dassault Systemes. Online. Dassault Systemes. 2024. Dostupné z: <https://www.3ds.com/products/simulia/cst-studio-suite>. [cit. 20240].
- [12] PragoBoard s.r.o. Online. PragoBoard. 2024. Dostupné z: [https://www.pragoboard.cz/o\\_firme](https://www.pragoboard.cz/o_firme). [cit. 20240].
- [13] Camptech II Circuits INC. Online. Camptech II Circuits INC. 2024. Dostupné z: <https://camptechii.com/>. [cit. 20240].
- [14] MOHAMMAD ABDUL, Matin. *Ultra Wideband - Current Status and Future Trends*. In Tech, 2012. ISBN 978-9535107811.
- [15] SCHULTZ, John W. *Wideband microwave material characterization*. ARTECH HOUSE, 2023. ISBN 978-1-63081-946-0.
- [16] J. SŁIK, "Measurement of the electric field intensity in the near-field region with proposed electromagnetic field probe", *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY*, vol. 1, no. 2, pp. 93-96, Feb. 2016.
- [17] Z. Yan, J. Wang, W. Zhang, Y. Wang, and J. Fan, "A Miniature Ultrawideband Electric Field Probe Based on Coax-Thru-Hole via Array for Near-Field Measurement", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 66, no. 10, pp. 2762-2770, 2017.
- [18] J. SŁIK, "Measurement of the electric field intensity in the near-field region with proposed electromagnetic field probe", *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY*, vol. 1, no. 2, pp. 93-96, Feb. 2016.
- [19] Y. Park, J. Bang, K. Jung and J. Choi, "Design of a Broadband Electric Near-Field Probe With Improved Sensitivity Using Additional Tips," *2018 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*, 2018, pp. 1-2.

## **Příloha A – Popis přílohy**

Všechny tabulky hodnot z měření jsou nahrány na univerzitní portál STAG.