



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

## MĚŘENÍ VLHKOSTI

MOISTURE MEASUREMENTS

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Hřib

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.

BRNO 2018

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Automatizační a měřicí technika**  
Ústav automatizace a měřicí techniky

**Student:** Jan Hřib

**ID:** 186089

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2017/18

**NÁZEV TÉMATU:**

## Měření vlhkosti

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem bakalářské práce je návrh a ověření metody pro bezkontaktní měření vlhkosti stavebních materiálů. Zadání lze shrnout do následujících bodů:

1. Zpracujte rešerši a průzkum trhu týkající se měření vlhkosti stavebních materiálů s využitím kapacitního a mikrovlnného principu.
2. Navrhněte a proveďte praktické experimenty s oběma typy vlhkoměrů.
3. Diskutujte dosažené výsledky, hlavní zdroje nejistot, způsoby omezení jejich vlivu, možnost využití bezkontaktních principů pro stanovení rozložení vlhkosti v objemu stavebních materiálů.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

KUTÍLEK, Miroslav. Vlhkost pórovitých materiálu. Praha: SNTL, 1984.

FEXA, J. a K. ŠIROKÝ. Měření vlhkosti. Praha: SNTL, 1983

**Termín zadání:** 5.2.2018

**Termín odevzdání:** 21.5.2018

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.

**Konzultant:**

**doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.**  
*předseda oborové rady*

### UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce se zabývá měřením vlhkosti ve stavebních materiálech, se zaměřením na kapacitní a mikrovlnnou metodu. Cílem práce bylo zjistit, jestli by tyto metody byly možná použít při zjišťování rozložení vlhkosti v objemu materiálu. Práce obsahuje teoretický úvod k měření vlhkosti. Následně bylo provedeno několik experimentů s kapacitní a mikrovlnnou metodou. Kapacitní metoda byla doplněna o simulace. Na základě výsledků bylo rozhodnuto, že kapacitní metoda pravděpodobně nepůjde využít pro zjišťování rozložení vlhkosti v objemu materiálu. U mikrovlnné metody jsem dospěl ke stejnému závěru, avšak spíše na základě teorie.

## **Klíčová slova**

Vlhkost, Měření, Kapacitní metoda, Mikrovlnná metoda, Stavební Materiál

## **Abstract**

This bachelor's thesis deals with measuring moisture in building materials and it is focused on the capacitive and microwave method. The goal was to find out whether it is possible to employ these two methods to determine moisture distribution in the volume of a measured material. This thesis contains theoretical introduction to the moisture measurement. Practical experiments were made with both capacitive and microwave method. Capacitive method was supplemented with a simulation. Based on the results, I conclude that the capacitive method is not suitable to determine moisture distribution in the volume of a material. The same conclusion was reached in the case of the microwave method, although this conclusion was based more on the theory than on the measurements.

## **Keywords**

Moisture, Measurement, Capacitive method, Microwave method, Building Material

## **Bibliografická citace:**

HŘIB, J. Měření vlhkosti. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 71 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.

## **Prohlášení**

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Měření vlhkosti jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: **10. května 2018**

.....

podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Petrovi Benešovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce. Dále děkuji panu Ing. Jakobovi Krejčímu za odbornou pomoc při řešení simulací.

V Brně dne: **10. května 2018**

.....  
podpis autora

# Seznam symbolů a zkratk

## Symbols:

$C$	...	kapacita	[F]
$W$	...	absolutní vlhkost	[-]
$\varepsilon$	...	permitivita	[F/M]
$\varepsilon_r$	...	relativní permitivita	[-]
$S$	...	plocha elektrod	[m <sup>2</sup> ]
$d$	...	vzdálenost elektrod	[m]
$a$	...	délka hrany elektrody	[m]
$m$	...	hmotnost	[kg]
$\delta_c$	...	relativní změna kapacity	[%]
$f$	...	frekvence	[Hz]
$Z$	...	impedance	[ $\Omega$ ]
$Y$	...	admitance	[S]
$L$	...	indukčnost	[H]
$R$	...	odpor	[ $\Omega$ ]
$\omega$	...	úhlová frekvence	[rad/s]

# Obsah

1	Úvod.....	12
2	Vlhkost.....	13
3	Metody měření vlhkosti .....	14
3.1	Přehled vybraných metod měření vlhkosti tuhých těles .....	14
3.1.1	Gravimetrická metoda.....	14
3.1.2	Gamaskopická metoda .....	14
3.1.3	Odporová vodivostní metoda.....	14
3.2	Kapacitní metoda .....	16
3.2.1	Impedanční metoda.....	17
3.2.2	Rezonanční metoda.....	18
3.3	Mikrovlnná metoda.....	18
4	Praktické ověření kapacitní metody .....	21
4.1	Raspberry Pi .....	21
4.1.1	Obecné parametry měření.....	22
4.1.2	První měření s Raspberry Pi.....	23
4.1.3	Druhé měření s Raspberry Pi.....	27
4.2	Texas Instruments .....	31
4.2.1	FDC1004QEVm – integrovaný snímač.....	32
4.2.2	FDC1004QEVm – vlastní elektrody.....	33
4.2.3	Simulace .....	37
4.2.4	FDC1004QEVm praktické ověření simulace.....	46
4.2.5	Simulace gradientu vlhkosti .....	52
4.2.6	Měření gradientu v pórobetonu.....	56
5	Praktické ověření mikrovlnné metody .....	60
5.1	Měření pěnového vzorku.....	60
5.2	Měření vlhkosti pórobetonu .....	61
6	Faktory ovlivňující měření.....	64
7	Závěr .....	67
	Literatura .....	71

## Seznam obrázků

Obr. 1 – Vodivostní metoda [4].....	15
Obr. 2 – Kapacitní metoda [4].....	17
Obr. 3 – Měření útlumu signálu [1] .....	19
Obr. 4 – Měření odraženého signálu [1] .....	19
Obr. 5 – Elektrické pole snímače Flick [7] .....	22
Obr. 6 – Rozložení elektrod uvnitř snímače Flick [7].....	22
Obr. 7 – Modul FDC1004QEVm od firmy Texas Instruments [8] .....	32
Obr. 8 – Význam stínění zadní strany elektrody [9].....	33
Obr. 9 – Uspořádání elektrod o velikosti 12 x 12 cm a stínění, pohled ze shora .....	34
Obr. 10 – Uspořádání druhého měření s modulem FDC1004QEVm, pohled ze shora .....	35
Obr. 11 – Model pro simulaci.....	38
Obr. 12 – Přístroj na měření relativní permitivity vzorku.....	39
Obr. 13 – Kontaktní metoda.....	39
Obr. 14 – Bezkontaktní metoda.....	39
Obr. 15 – Uspořádání experimentu pro ověření simulace.....	46
Obr. 16 – Model pro simulování gradientu vlhkosti.....	52
Obr. 17 – Experiment, ověření simulace gradientu .....	56
Obr. 18 – Vliv stínění vodičů [9].....	64

## Seznam grafů

Graf 1 – Porovnání jednotlivých měření, Flick Large, 1. měření.....	25
Graf 2 – Porovnání jednotlivých měření, Flick HAT, 1. měření .....	26
Graf 3 – Porovnání jednotlivých měření, Flick Large, 2. měření.....	28
Graf 4 – Porovnání jednotlivých měření, Flick HAT, 2. Měření .....	30
Graf 5 – Závislost hodnoty osy Z na vlhkosti vzorku, Flick HAT, konst. vzdálenost	31
Graf 6 – FDC1004QEVm 2. měření, elektrody 12 x 12 cm, vzdálenost vzorku 2 cm	36
Graf 7 – FDC1004QEVm 2. měření, elektrody 4 x 4 cm, vzdálenost vzorku 2 cm ...	37
Graf 8 – Výsledek simulace, elektrody o délce hrany $a = 4$ cm, srovnání jednotlivých roztečí $d$ .....	43
Graf 9 – Výsledek simulace, elektrody o délce hrany $a = 8$ cm, srovnání jednotlivých roztečí $d$ .....	43
Graf 10 – Simulace, relativní změna kapacity, elektrody o velikosti $a = 4$ cm .....	45
Graf 11 – Simulace, relativní změna kapacity, elektrody o velikosti $a = 8$ cm .....	45
Graf 12 – Měření, elektrody o délce hrany $a = 4$ cm, srovnání jednotlivých roztečí $d$ .....	50
Graf 13 – Měření, relativní změna kapacity, elektrody o délce hrany $a = 4$ cm.....	50

Graf 14 – Měření, elektrody o délce hrany $a = 8$ cm, srovnání jednotlivých roztečí $d$ .....	51
Graf 15 – Měření, relativní změna kapacity, elektrody o délce hrany $a = 8$ cm.....	51
Graf 16 – Simulace gradientu, suchá strana blíže k elektrodám.....	54
Graf 17 – Simulace gradientu, mokrá strana blíže k elektrodám .....	54
Graf 18 – Závislost hmotnosti a vlhkosti vzorku na době vlhčení, pórobeton s gradientem .....	57
Graf 19 – Závislost hmotnosti a vlhkosti vzorku na době vlhčení, pórobeton celý ponořený .....	57
Graf 20 – Měření pórobetonu s gradientem, suchá strana nahoru .....	58
Graf 21 – Měření pórobetonu s gradientem, mokrá strana nahoru.....	59
Graf 22 – Mikrovlnný snímač BOSCH D-Tect 100, měření s pěnou.....	61
Graf 23 – Mikrovlnné měření pórobetonu s gradientem, suchá strana u snímače..	62
Graf 24 – Mikrovlnné měření pórobetonu s gradientem, mokrá strana u snímače	62
Graf 25 – Mikrovlnné měření pórobetonu, celý ponořený .....	63

## Seznam tabulek

Tab. 1 – Flick Large, suchý vzorek, 1. měření .....	24
Tab. 2 – Flick Large, vlhký vzorek, 1. měření .....	24
Tab. 3 – Flick HAT, suchý vzorek, 1. měření .....	25
Tab. 4 – Flick HAT, vlhký vzorek, 1. měření.....	26
Tab. 5 – Flick Large, suchý vzorek, 2. měření .....	27
Tab. 6 – Flick Large, vlhký vzorek, 2. měření .....	28
Tab. 7 – Flick HAT, suchý vzorek, 2. měření.....	29
Tab. 8 – Flick HAT, vlhký vzorek, 2. měření.....	29
Tab. 9 – Flick HAT, závislost hodnoty osy Z na vlhkosti, konst. vzdálenost.....	30
Tab. 10 – FDC1004QEVm integrovaný snímač, první měření .....	33
Tab. 11 – FDC1004QEVm s elektrodami 12 x 12 cm, vzdálenost vzorku od elektrod 2 cm.....	36
Tab. 12 – FDC1004QEVm s elektrodami 4 x 4 cm, vzdálenost vzorku od elektrod 2 cm.....	36
Tab. 13 – Stanovení relativní permitivity vzorku, kontaktní metoda .....	40
Tab. 14 – Stanovení relativní permitivity vzorku, bezkontaktní metoda.....	41
Tab. 15 – Výsledek simulace, elektrody o délce hrany $a = 4$ cm.....	42
Tab. 16 – Výsledek simulace, elektrody o délce hrany $a = 8$ cm.....	44
Tab. 17 – Elektroda o hraně $a = 4$ cm, $d = a/4$ .....	47
Tab. 18 – Elektroda o hraně $a = 4$ cm, $d = a/2$ .....	47
Tab. 19 – Elektroda o hraně $a = 4$ cm, $d = a$ .....	48
Tab. 20 – Elektroda o hraně $a = 8$ cm, $d = a/4$ .....	48
Tab. 21 – Elektroda o hraně $a = 8$ cm, $d = a/2$ .....	49
Tab. 22 – Elektroda o hraně $a = 8$ cm, $d = a$ .....	49
Tab. 23 – Výsledky simulace s gradientem, suchá strana blíže k elektrodám .....	53
Tab. 24 – Výsledky simulace s gradientem, mokrá strana blíže k elektrodám.....	53
Tab. 25 – Poměry hodnot mezi jednotlivými roztečemi elektrod, suchá strana blíže k elektrodám.....	55
Tab. 26 – Poměry hodnot mezi jednotlivými roztečemi elektrod, mokrá strana blíže k elektrodám.....	55
Tab. 27 – Hodnoty naměřené mikrovlnným snímačem BOSCH D-Tect 100, měřeno s pěnou .....	61
Tab. 28 – Proměnlivost měřené hodnoty v čase.....	65
Tab. 29 – Rozptyl hodnot během měření s FDC1004QEVm .....	65

# 1 ÚVOD

Vlhkost hraje důležitou roli v mnoha odvětvích. S jejím měřením se můžeme setkat v průmyslu, stavebnictví, zemědělství, potravinářství a v mnoha dalších oblastech. Míra vlhkosti může například ovlivňovat samotnou kvalitu výrobku, vlastnosti materiálu, činnost některých zařízení, nebo životnost stavebního materiálu a tím pádem životnost celé stavby. Z těchto důvodů můžeme říct, že měření vlhkosti má zdravotní, bezpečnostní ale i ekonomický důvod. Existuje několik metod měření vlhkosti. V této práci se zaměřím jen na některé z nich.

Tématem této bakalářské práce je měření vlhkosti stavebních materiálů se zaměřením na využití kapacitní a mikrovlnné metody při zjišťování rozložení vlhkosti v objemu měřeného vzorku.

Obsahem práce je teoretické představení těchto dvou nedestruktivních metod doplněné o stručný přehled několika dalších často používaných metod měření vlhkosti tuhých látek. Dále byly provedeny praktické experimenty, které měly vést k rozhodnutí, jestli lze kapacitních nebo mikrovlnných principů měření využít při sestavení rozložení vlhkosti v objemu měřeného materiálu.

## 2 VLHKOST

Vlhkost materiálu můžeme vyjádřit více způsoby. Rozlišujeme absolutní a relativní vlhkost. Při definování absolutní a relativní vlhkosti záleží na skupenství materiálu, jehož vlhkost měříme. Například absolutní vlhkost plynu je stanovena jako hmotnost vodní páry v měřeném objemu vlhkého plynu. Proto je jednotka absolutní vlhkosti plynu  $\text{kg/m}^3$  [1]. Vzhledem k tématu této práce nás však bude zajímat především vlhkost tuhých materiálů.

Vlhkost tuhých materiálů se vyjadřuje jako poměr hmotnosti vody ( $m_v$ ) a hmotnosti materiálu. Absolutní vlhkost  $w$  je poměr hmotnosti vody vůči hmotnosti vlhkého materiálu ( $m_v + m_s$ ), relativní vlhkost  $w_r$  se naopak stanoví jako hmotnost vody vůči hmotnosti suchého materiálu ( $m_s$ ) [1]:

$$w = \frac{m_v}{m_v + m_s} \quad (1)$$

$$w_r = \frac{m_v}{m_s} \quad (2)$$

Voda může být v tuhých látkách uložena ve dvou formách, přičemž však neexistuje přesná hranice mezi těmito formami. Rozlišujeme formu volnou a formu vázanou. Způsob, jak je voda vázaná na materiál, můžeme opět rozdělit na tři možnosti. První možností je vazba chemická, která je nejsilnější. Molekula vody je vázána přímo na molekuly materiálu a můžeme ji odstranit jedinež destrukcí a změnou chemické struktury materiálu. Druhá nejsilnější vazba je fyzikálně chemická. Touto vazbou je vázána voda na povrchu materiálu a její sílu ovlivňuje například i hrubost povrchu. Nejslabší formou vazby vody na materiál je fyzikální vazba. Forma a způsob vazby vody na materiál ovlivňuje její vlastnosti, což hraje podstatnou roli u některých metod měření vlhkosti (především u těch nepřímých). Konkrétním příkladem je rozdílná relativní permitivita vody  $\epsilon_r$ . V případě vody vázané je  $\epsilon_r$  přibližně 4 až 6, což je způsobeno menší pohyblivostí molekulových dipólů. Zatímco volná voda má  $\epsilon_r$  kolem 80. Vidíme, že rozdíl je opravdu značný. [1] [2]

## 3 METODY MĚŘENÍ VLHKOSTI

Metody měření vlhkosti můžeme rozdělit podle několika kritérií. Pokud při měření musíme odebrat část materiálu, tak se metoda nazývá destruktivní. Jejím opakem je pak metoda nedestruktivní. U nedestruktivních metod je čidlo obvykle zabudováno do materiálu nebo je umístěno na povrch měřeného materiálu.

Podle způsobu měření můžeme metody rozlišit na metody přímé a nepřímé. U přímých metod je měřenou veličinou množství vody obsažené ve vzorku materiálu a tím pádem patří většinou do skupiny destruktivních metod. U nepřímých metod měříme jinou fyzikální veličinu, která je na vlhkosti funkčně závislá např.: elektrický odpor (vodivost), elektrickou kapacitu, útlum mikrovlnného záření nebo tepelnou vodivost. Vlhkost materiálu musíme následně stanovit pomocí přepočtu měřené veličiny.

### 3.1 Přehled vybraných metod měření vlhkosti tuhých těles

Kromě kapacitní a mikrovlnné metody si v kapitole 3.1 stručně představíme i některé další z metod měření vlhkosti tuhých těles. Metoda kapacitní a mikrovlnná budou vzhledem k tématu práce představené v samostatných kapitolách.

#### 3.1.1 Gravimetrická metoda

Gravimetrická metoda patří mezi přímé destruktivní metody a velmi často se používá při kalibraci vlhkoměrů. Princip této metody spočívá ve stanovení rozdílu hmotnosti vlhkého a vysušeného vzorku. Nevýhodou je její destruktivní povaha a také časové zpoždění, ke kterému dochází mezi odebráním vzorku a získáním výsledků, což brání využití například u kontinuálních výrobních procesů. [3]

#### 3.1.2 Gamaskopická metoda

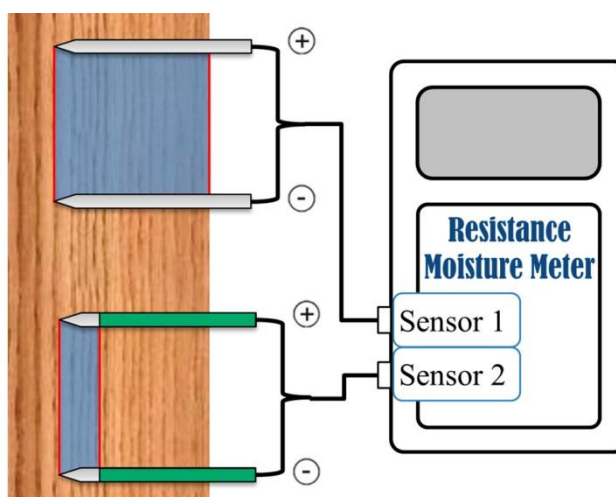
Gamaskopická metoda funguje na principu snížení intenzity  $\gamma$ -záření, které prochází měřeným materiálem. Absorpce záření je úměrná hmotnosti prozařovaného materiálu, která je právě ovlivněna množstvím obsažené vody. Jako zdroje záření se používá například izotop americia  $\text{Am}^{241}$  nebo cesia  $\text{Cs}^{137}$ . [3]

#### 3.1.3 Odporová vodivostní metoda

Odporová metoda patří mezi často využívané nepřímé metody měření vlhkosti. Měření vlhkosti vzorku materiálu je převedeno na měření elektrického odporu mezi dvěma kovovými elektrodami, což se dá poměrně snadno a levně realizovat. Tato metoda však není vhodná pro měření velmi nízké ani velmi vysoké

relativní vlhkosti. Při nízkých hodnotách relativní vlhkosti dochází k nepřesnostem při měření velkého odporu - typická hodnota měrného odporu suchého materiálu pohybuje od  $10^8$  do  $10^{13} \Omega\text{m}$  [1]. Naopak při vysokých vlhkostech se odpor v závislosti na vlhkosti mění málo, takže se změna odporu může pohybovat v rozmezí chyb měření. Látky iontového charakteru obsažené v materiálu působením vody disociují, což má za následek velké změny odporu. Z tohoto důvodu musíme při měření přihlížet ke způsobu, jakým je voda v materiálu vázaná (fyzikálně nebo chemicky).

Změřený odpor materiálu však není ovlivněn jen vodou obsaženou v pórech materiálu, ale ovlivňují ho další faktory jako je například teplota. Proto musíme vliv teploty kompenzovat kalibrací na konkrétní teplotu nebo můžeme teplotu měřit a následně hodnotu naměřeného odporu korigovat. Důležitou roli hraje samotné uložení elektrod do měřeného materiálu. Pro zachování přesné geometrie elektrod a jejich dobrého kontaktu s měřeným materiálem se elektrody zalívají do bločků, které mají v ideálním případě stejnou pórovitost jako měřený materiál – při odlišné pórovitosti se projevuje setrvačnost bločků a změny se projevují s prodlevou [3]. Takto připravené bločky se vkládají do měřených materiálů. Geometrie a způsob uložení elektrod má podstatný vliv na měření. Je výhodnější neměřit vodivost hned u povrchu, protože na povrchu se může vyskytovat větší množství nečistot z okolí, které mohou měření taktéž ovlivnit [4]. Rozdíl uložení elektrod znázorňuje Obr. 1.



**Obr. 1 - Vodivostní metoda [4]**

Po přiložení stejnosměrného napětí na elektrody, mezi kterými je umístěn vlhký materiál, začne docházet k parazitnímu jevu – polarizaci. Tento problém lze snadno vyřešit použitím střídavého napětí. Literatura [1] uvádí, že měřící frekvence nepřesahuje 1000 Hz, novější literatura [2] však uvádí vyšší měřící frekvenci a to až do 10 kHz a doplňuje, že při souvislém měření by měla být

frekvence vyšší než 100 Hz. Alternativou je použití velmi slabých proudů (mřížkových proudů silně podžhavených elektrod), ale vzhledem roku vydání zdroje této informace, bych považoval tuto metodu za zastaralou [3].

## 3.2 Kapacitní metoda

Kapacitní metoda patří do skupiny nedestruktivních nepřímých metod měření vlhkosti. Mezi její hlavní výhody patří nedestruktivní povaha, nízká časová náročnost získání výsledků (na rozdíl od gravimetrické metody) a poměrně dobrá přesnost. Pro dlouhodobé měření je poměrně snadné zajistit automatické logování hodnot, avšak literatura [5] upozorňuje na problém s korozí snímačů.

U každého materiálu můžeme stanovit tzv. permitivitu  $\epsilon$ . Většinou se však bavíme o relativní permitivitě  $\epsilon_r$ , která se stanoví jako poměr permitivity materiálu vůči permitivitě vakua  $\epsilon_0$ , jejíž velikost je  $8,854 \cdot 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$ .

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (3)$$

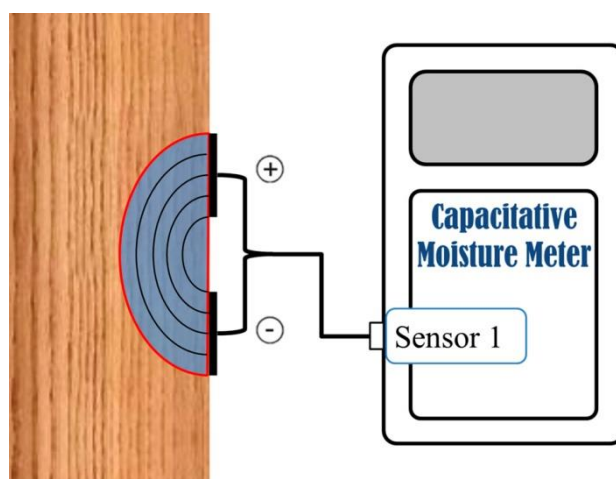
Jak již bylo uvedeno v kapitole 2, relativní permitivita volně vázané vody se při teplotě 20°C pohybuje kolem hodnoty 80. Naopak voda vázaná má relativní permitivitu přibližně 4 až 6. Relativní permitivita většiny materiálů se pohybuje kolem 5 [5]. Z těchto hodnot vyplývá, že obsah vody v materiálu neboli vlhkost, bude mít vliv na celkové elektrické vlastnosti zkoumaného materiálu. Problém může nastat, pokud voda v materiálu přejde do pevného skupenství. Relativní permitivita ledu je totiž  $\epsilon_r \approx 3$ , tudíž ji při měření nebudeme schopni detekovat. Permitivita je nepatrně ovlivněna například i okolní teplotou, nebo frekvencí měřícího signálu. Příkladem může být  $\epsilon_r$  vody při konstantní teplotě 18°C. Při  $f < 1 \text{ MHz}$  je  $\epsilon_r = 80,18$ , při  $f > 20 \text{ MHz}$  je  $\epsilon_r \ll 80$  [2]. Frekvence měřícího signálu se u kapacitní metody pohybuje řádově v jednotkách až desítkách MHz.

Výsledky kapacitní metody mohou zkreslovat jakékoliv kovové materiály, které se budou vyskytovat v elektrickém poli měřících elektrod. Z toho lze usoudit, že tato metoda není vhodná pro železobetonové konstrukce. Měřené hodnoty může ovlivnit i například množství solí v měřeném vzorku a vůbec jeho celkové chemické složení. Proto je vždy vhodné čidlo kalibrovat vůči konkrétnímu materiálu. Při srovnání s vodivostní metodou je však vliv solí menší [5].

Měřící elektrody umístíme na povrch měřeného vzorku, jak znázorňuje Obr. 2. Zde je důležité zajistit dobrý kontakt s povrchem, protože případná vzduchová mezera může ovlivnit naměřené hodnoty. Z toho plyne, že použití kapacitní metody není vhodné pro vzorky s hrubým povrchem. Čidlo funguje jako kondenzátor, přičemž měřený vzorek plní funkci dielektrika. Pro tuhé materiály se používají deskové kondenzátory, jejichž výslednou kapacitu  $C$  stanovíme při zanedbání okrajových podmínek podle následující rovnice.

$$C = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{S}{d} \quad (4)$$

kde  $S$  je plocha kondenzátoru a  $d$  je vzdálenost elektrod. Vidíme, že pokud bude vzdálenost elektrod a jejich plocha konstantní, tak je výsledná kapacita dána hodnotou  $\varepsilon_r$ , která je závislá na množství vody ve vzorku materiálu. Údaj, do jaké hloubky materiálu jsme schopní pomocí kapacitního čidla měřit, se v jednotlivých literaturách liší, nikdo z autorů však neuvádí hloubku větší než 70 mm [2] [5]. Většina kapacitních vlhkoměrů na trhu však udává hloubku měření přibližně do 30 mm.



Obr. 2 – Kapacitní metoda [4]

U kapacitní metody nemusíme měřit pouze kapacitu kondenzátoru (čidla). Můžeme měřit také přímo permitivitu materiálu, útlum přijatého signálu oproti vyslanému, nebo rezonanční frekvenci obvodu, jehož součástí je kondenzátor s měřeným, vzorkem. Výběr vhodné metody se odvíjí od požadavků měření a těmi může být například měřicí frekvence, požadavek na linearitu měření ve velkém rozsahu, nebo požadavek na délku přívodních kabelů [1]. Dále si uvedeme dvě nejčastěji používané kapacitní metody měření vlhkosti.

### 3.2.1 Impedanční metoda

V měřícím obvodu se většinou využívá střídavého můstku, proto se jí také říká i můstková metoda. Díky můstkovému zapojení je měření velmi přesné. Hlavní nevýhodou této metody je omezená délka přívodních kabelů. Do čidla se neumísťuje celý můstek, takže přívodní kabely způsobují parazitní kapacitu, která ovlivňuje měření [3]. Frekvence měřícího signálu se pohybuje od kHz do desítek MHz [1].

### 3.2.2 Rezonanční metoda

Snímače využívající rezonanční metodu pracují se signálem o frekvenci až desítky MHz, čímž se snižuje vliv iontové vodivosti dielektrika [3]. Čidlo je zapojeno v oscilačním obvodu a se změnou vlhkosti se mění kapacita čidla a tím i rezonanční kmitočet celého obvodu. Většina zapojení obsahuje dva rezonanční obvody, přičemž je jeden referenční a druhý je měřicí. Rezonanční obvod může být zapojen buď sériově, nebo paralelně. Pro impedanci sériové obvodu pak platí rovnice (5) a pro admitanci paralelního obvodu rovnice (6).

$$Z = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C_m}\right) \quad (5)$$

$$Y = G + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C_m}\right) \quad (6)$$

Přičemž  $C_m$  je kondenzátor s měřeným vzorkem materiálu,  $L$  je neměnná indukčnost a  $R$  neměnný odpor. Rezonance nastane, pokud jsou v obou případech rovnic (5) a (6) imaginární složky rovny nule. Z toho získáme vztah pro výpočet rezonanční frekvence  $\omega_r$  (7).

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC_m}} \quad (7)$$

Výhodou této metody je, že do čidla můžeme snadno umístit celý obvod, takže se zbavíme problému s parazitními kapacitami přívodních vodičů.

### 3.3 Mikrovlnná metoda

Mikrovlnná metoda se v podstatě příliš neliší od metody kapacitní. Patří také do skupiny nedestruktivních nepřímých metod a má i stejné výhody, kterými jsou dobrá přesnost, rychlost stanovení vlhkosti a nedestruktivní povaha. Zásadní rozdíl spočívá ve frekvenci měřicího signálu. U této metody používáme signál o frekvenci v řádu jednotek až desítek GHz (literatura [2] uvádí rozsah 2,5 až 20 GHz), což přináší jisté výhody, které si v této kapitole uvedeme později. Mikrovlnnou metodu lze použít v rozsahu teplot od 0 do 115°C a zvládá měřit ve velkém rozsahu vlhkostí 0 až 85% objemové vlhkosti [2].

Při použití mikrovlnné metody měříme především útlum signálu, který prochází měřeným vzorkem. Útlum je způsoben hlavně absorpcí energie molekulami volně vázané vody. Jeho vlhkost však můžeme vyhodnocovat i ze vztahů mezi vyslaným, odraženým a pohlceným signálem. Měřený vzorek umístíme mezi vysílač a přijímač, jak znázorňuje Obr. 3. Při tomto uspořádání jsme schopni měřit vlhkost až do hloubky 50 mm, záleží však na konkrétním materiálu [5]. Velikost útlumu  $A$  vyjadřujeme pomocí jednotky zvané decibel (dB) a v základní podobě si ho můžeme vyjádřit pomocí rovnice (8)

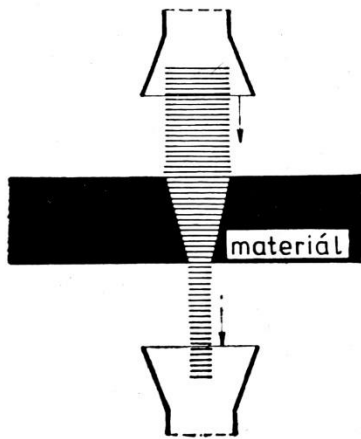
$$A = 10 \log \frac{P(0)}{P(x)} \quad (8)$$

kde  $P(0)$  je počáteční výkon a  $P(x)$  je výkon po průchodu dielektrikem o tloušťce  $x$ . Útlum materiálu se odvíjí od jeho permitivity, což můžeme vidět z následujícího vztahu [1].

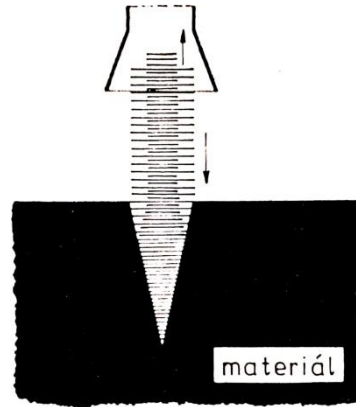
$$A = \frac{27,3}{\lambda_0} \sqrt{\varepsilon'_r} \cdot \operatorname{tg} \delta \quad (9)$$

Kde  $\lambda_0$  je vlnová délka signálu ve vakuu,  $\varepsilon'$  je reálná složka komplexní permitivity a  $\operatorname{tg} \delta$  je ztrátový úhel, který je roven poměru imaginární a reálné složky permitivity.

Existuje i varianta, při které vzorek neprozařujeme, ale měříme velikost odraženého záření (Obr. 4). Vysílač je zároveň přijímač. V tomto případě je důležité, aby byl vzorek dostatečně tlustý, aby nedocházelo k odrazu na zadní straně vzorku. Při tomto uspořádání měříme hlavně povrchovou vlhkost vzorku.



Obr. 3 – Měření útlumu signálu [1]



Obr. 4 – Měření odraženého signálu [1]

Oproti kapacitní metodě můžeme uvést navíc další výhodu a to, že vysílací a přijímací anténa nemusí být v přímém kontaktu s měřeným materiálem, takže tato metoda je vhodnější i pro vzorky s hrubým povrchem. V úvodu kapitoly byla zmíněna výhoda pramenící z vysoké frekvence měřícího signálu. Přibližně při frekvenci do 1GHz se mohou projevit vedlejší rušivé jevy, mezi které patří například Maxwell-Wagnerův jev (polarizace na rozhraní). Při použití frekvencí vyšších než 100MHz se tento jev přestává uplatňovat [1]. Z tohoto důvodu pracuje většina mikrovlnných snímačů vlhkosti s pracovní frekvencí alespoň okolo 10GHz [6].

Na druhou stranu nevýhodou takto vysoké měřící frekvence je fakt, že při velmi malých koncentracích vody (v krajním případě pokrytí povrchu jednou až dvěma molekulami vody), vzrůstá její aktivační energie a tím pádem klesá její schopnost absorbovat mikrovlnné záření o vysokých frekvencích [1]. Tento

problém lze sice řešit snížením měřící frekvence, ale pak se mohou začít projevovat jiné nežádoucí vlivy. Mikrovlnná metoda nelze použít tam, kde měřený vzorek obsahuje prvky s vysokou permitivitou, což je stejné jako u kapacitní metody. Naměřené výsledky může zkreslit i přítomnost solí, které mohou být rozpuštěné ve vodě, avšak čím vyšší má signál frekvenci, tím nižší je tento vliv. Anizotropní látky jako je například dřevo, mají v každém směru jinou absorpci, proto se při měření těchto látek musí zohlednit, aby byl vzorek při měření orientován stejně, jako při kalibraci [1]. Pro správné výsledky musí být snímač vždy kalibrován podle měřeného materiálu.

Literatura [1] zmiňuje kromě metody měření ve volném prostoru ještě mikrovlnnou metodu měření ve vlnovodu a v rezonátoru. Autoři však uvádí, že tyto dvě metody se v praxi neuchytili a zůstaly pouze v laboratorním prostředí.

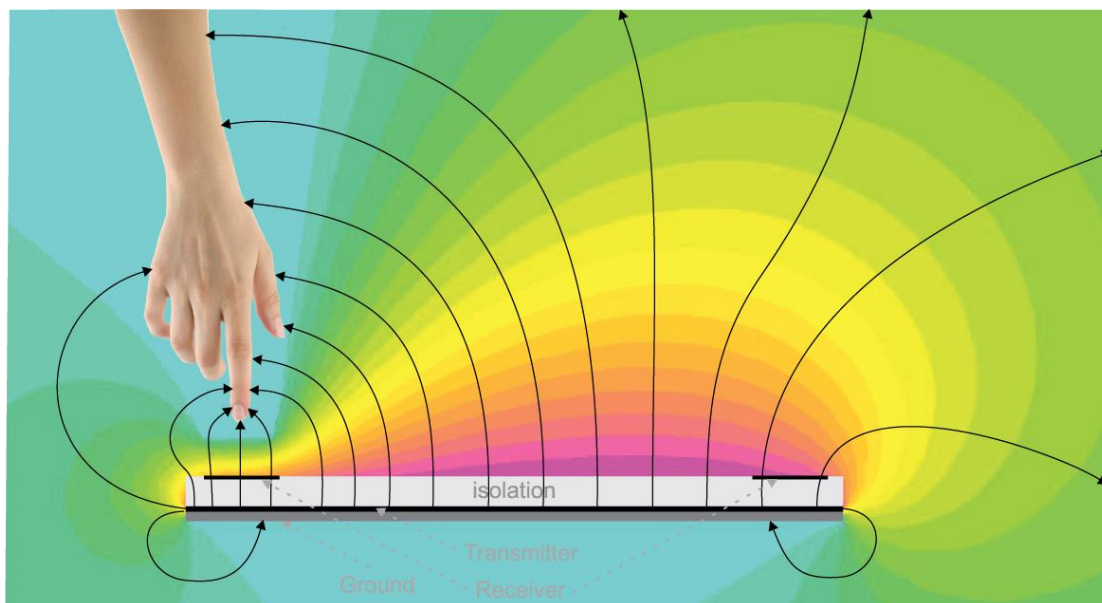
## 4 PRAKTICKÉ OVĚŘENÍ KAPACITNÍ METODY

### 4.1 Raspberry Pi

V dnešní době existuje na trhu poměrně velké množství dostupných měřičů vlhkosti, které pracují na kapacitním principu. Tyto přístroje však většinou slouží k jednoduchému stanovení průměrné vlhkosti měřené oblasti. Mým cílem je najít řešení, které by umožnilo sestavit mapu rozložení vlhkosti v objemu měřeného materiálu. Tato mapa může být například cenná v případě, že řešíme nadměrnou vlhkost zdi, ale nevíme, jestli se vlhkost ve zdi objevuje kvůli zatékání střechy, nebo naopak od země, nebo je zdroj v jiném místě stěny. Proto jsem se při tomto měření rozhodl použít modul, který sice není určen k měření vlhkosti, ale taktéž pracuje na kapacitním principu. Pokud by základní měření prokázalo, že jsme pomocí takové sestavy schopni detekovat vlhkost, byla by to dále spíše otázka zpracování naměřených dat tak, aby z nich šla sestavit například výše zmíněná vlhkostní mapa. Využití komerčně vyráběného a cenově dostupného modulu by také znamenalo usnadnění výrobní části. Odpadly by případné problémy s návrhem a výrobou vlastního snímače.

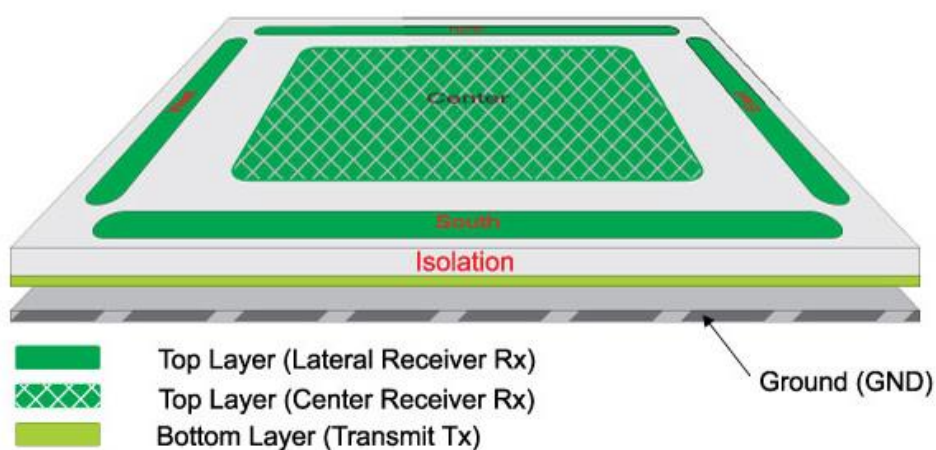
Pro měření jsem použil sestavu Raspberry Pi 2 doplněnou o kapacitní snímač od firmy Flick. Tento snímač slouží primárně jako nástroj na ovládání různých aplikací gesty rukou. Výhodou této sestavy je, že vše je připravené na zapojení bez rozsáhlejšího nastavování nebo programování, což nám pro prvotní ověření, jestli je tato sestava vhodná pro měření vlhkosti, stačí. Snímače pohybu od firmy Flick se prodávají v různých velikostech. Já jsem při měření testoval největší velikost Large a menší velikost HAT.

Oba modely Large i HAT jsou připravené na komunikaci přes I2C sběrnici, což je standard pro Raspberry Pi. Obě verze jsou osazené stejným čipem MGC3130 od firmy Microchip, který je určen právě pro kapacitní snímače. Zpracování signálu zajišťuje přímo čip uvnitř modulu Flick. Princip detekce je založen na narušení elektrického pole, které vzniká mezi jednotlivými elektrodami, tak jak ukazuje Obr. 5. V našem případě nebude elektrické pole narušovat ruka, tak jak je znázorněno na obrázku, nýbrž voda obsažená v materiálu.



Obr. 5 – Elektrické pole snímače Flick [7]

Modul Flick je z vrchní strany osazen pěti přijímacími elektrodami (Rx) a ze spodní strany má přes celou plochu jednu velkou vysílací elektrodu (Tx). Rozložení elektrod zobrazuje Obr. 6. Signál, se kterým model Flick pracuje, se pohybuje v rozmezí 44 až 115 kHz [7]. Logika modulu Flick automaticky upravuje použitou frekvenci v tomto rozsahu, aby docházelo k co nejlepším výsledkům.



Obr. 6 – Rozložení elektrod uvnitř snímače Flick [7]

#### 4.1.1 Obecné parametry měření

Modul Flick má v sobě nahraný demo program, na kterém si může člověk ověřit, že modul funguje. Tento program poskytuje informace o poloze (např. ruky) ve 3D prostoru nad snímačem. Zobrazuje i další parametry, jako jsou směr pohybu ruky, nebo místo doteku, to však pro moje účely není podstatné. Souřadnice jsou stanoveny pomocí čísla v rozsahu 0 až 1 s krokem 0,001. Jde tedy jen o poměrové

vyjádření polohy snímaného objektu vůči prostoru sledovaného snímačem, takže tato čísla nemají žádné pevně dané jednotky. Mě bude zajímat pouze hodnota v ose Z, což je osa kolmá na rovinu snímače. Zde nastává menší komplikace, protože souřadnice s hodnotou 0 znamená, že se předmět nachází přímo na snímači a hodnota 1 znamená, že je předmět v nejvzdálenějším bodě, kdy ho snímač ještě zachytí. Problém je, že se nedá jednoduše stanovit, v jaké vzdálenosti se nachází bod s hodnotou 1. Výrobce modelu Flick uvádí dosah do výšky 15cm nad snímačem, tento rozsah však záleží na předmětu, který chceme snímat. Méně vodivé předměty jsou rozpoznány jen do menší vzdálenosti.

Tento fakt však pro moje účely není rozhodující. Potřebuji zjistit, jak modul reaguje na vzorky s různou vlhkostí a jestli lze stanovit nějaká opakovatelná závislost. Jako měřený materiál jsem použil obyčejnou kuchyňskou houbovou utěrku, která je vyrobena z viskózy a má velkou savost. Rozměry těchto utěrek jsou přibližně 200x200x50mm. Měřený vzorek jsem umisťoval nad snímač v různých výškách a sledoval jsem údaje z osy Z. Abych zajistil co největší opakovatelnost, umisťoval jsem mezi měřený vzorek a snímač polystyrenu, které sloužily jako distanční podložky. Každá vrstva polystyrenu měla tloušťku 1cm. Polystyren je vhodný, protože má relativní permitivitu velmi blízkou 1 (podobně jako vzduch), takže nebude ovlivňovat naměřené hodnoty.

## **4.1.2 První měření s Raspberry Pi**

Při měření jsem sledoval hodnotu osy Z v závislosti na poloze a vlhkosti měřeného vzorku. Snímač ležel v horizontální poloze na pracovním stole. Na něj jsem postupně přidával vrstvy polystyrenu, přičemž měřený vzorek byl vždy nahoře jakožto poslední vrstva. Nejprve jsem změřil suchý vzorek, následně jsem stejný postup aplikoval s vlhkým vzorkem. Vlhkost měřeného vzorku jsem stanovil gravimetrickou metodou. Pro mokré vzorek bylo provedeno více opakujících se měření pro lepší ověření opakovatelnosti výsledků. K vážení byla využita velmi přesná laboratorní váha RADWAG AS 310.R2.

### **4.1.2.1 Flick Large – první měření**

Flick Large se od menší verze Flick HAT liší především v připojení. S Raspberry Pi je propojen přibližně 20cm dlouhým kabelem. Flick Large byl položen přímo na stole a přímo na něj byly pokládány vrstvy polystyrenu. Nejprve jsem proměřil charakteristiku suchého vzorku. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v Tab. 1.

**Tab. 1 – Flick Large, suchý vzorek, 1. měření**

Suchý vzorek, Flick Large								
Vrstev polystyrenu	0	1	2	3	4	5	6	7
Hodnota osy Z	-	-	-	-	-	-	-	-

Vidíme, že snímač přítomnost suchého vzorku ani přítomnost polystyrenů vůbec nezaznamenal. Relativní permitivita obou materiálů je blízká relativní permitivitě vzduchu, takže nedochází k narušení elektrického pole mezi elektrodami. Dalším krokem bylo zvážit hmotnost suchého a následně vlhkého vzorku. Za využití gravimetrické metody a následným výpočtem podle rovnice (1) získáme absolutní vlhkost vzorku  $w$ .

$$m_s = 8,76 \text{ g}$$

$$m_{mokra} = m_s + m_v = 17,36 \text{ g}$$

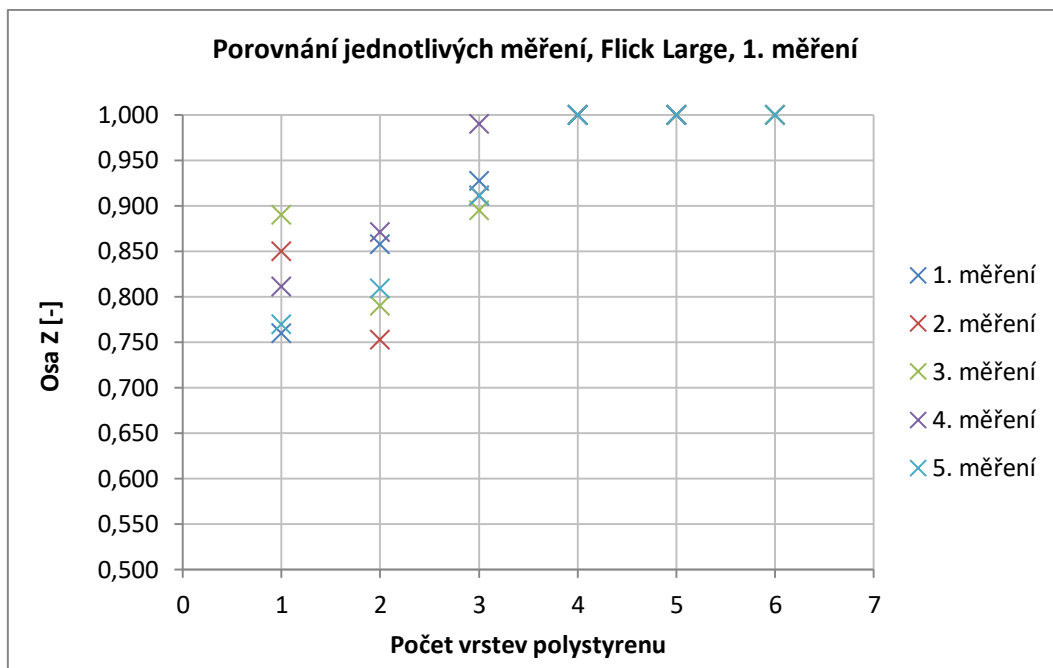
$$w = \frac{m_v}{m_s + m_v} = \frac{17,36 - 8,76}{17,36} = 0,495$$

Dalším krokem bylo provést měření s mokrým vzorkem. Měření bylo prováděno stejně jako se suchým vzorkem – mezi měřený vzorek a snímač byly vkládány vrstvy polystyrenu a měřený vzorek byl vždy nahoře a nad ním už žádná vrstva polystyrenu nebyla. Mokrý vzorek nebyl pokládán přímo na snímač, proto hodnoty začínají až od vrstvy 1. Hodnoty získané z měření jsou v Tab. 2.

**Tab. 2 – Flick Large, vlhký vzorek, 1. měření**

Mokrý vzorek, Flick Large					
Vrstev polystyrenu	Hodnota osy Z				
	1. měření	2. měření	3. měření	4. měření	5. měření
0	-	-	-	-	-
1	0,760	0,850	0,890	-	0,770
2	0,858	0,753	0,790	0,811	0,809
3	0,927	0,911	0,895	0,871	0,911
4	1,000	1,000	1,000	0,099	1,000
5	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
6	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
7	-	-	-	-	-

Naměřené hodnoty z Tab. 2 zobrazuje Graf 1, ze kterého lépe vidíme opakovatelnost jednotlivých měření.



Graf 1 – Porovnání jednotlivých měření, Flick Large, 1. měření

#### 4.1.2.2 Flick HAT – první měření

Díky svým menším rozměrům se Flick HAT připojí na Raspberry Pi přímo bez použití prodlužovacích kabelů. Rozdíl oproti měření s Flick Large spočívá mimo jiné v tom, že snímač neleží přímo na stole, ale je nacvaknutý právě na Raspberry. Vzhledem k menším rozměrům nelze pokládat polystyrenové vrstvy přímo na plochu snímače, proto musí být kolem Raspberry vytvořena základna ze dvou vrstev polystyrenu, na které se budou skládat teprve další vrstvy, které už souvisí přímo s měřením. Kvůli tomuto uspořádání vznikla mezi první vrstvou polystyrenu a snímačem vzduchová mezera přibližně 8 mm, to by však nemělo měření nijak ovlivnit. Další postup je stejný jako u měření s Flick Large. Naměřené hodnoty pro suchý vzorek najdeme v Tab. 3.

Tab. 3 – Flick HAT, suchý vzorek, 1. měření

Suchý vzorek, Flick HAT								
Vrstev polystyrenu	0	1	2	3	4	5	6	7
Hodnota osy Z	0	0,181	0,332	0,520	0,764	0,917	1,000	-

Flick HAT na rozdíl od Flick Large zvládl zachytit ve svém snímaném poli i suchý vzorek. Parametry obou snímačů by měly být stejné, ale v tuto chvíli se zdá, že Flick HAT má větší citlivost. Dále opět stanovíme vlhkost vzorku.

$$m_s = 9,26 \text{ g}$$

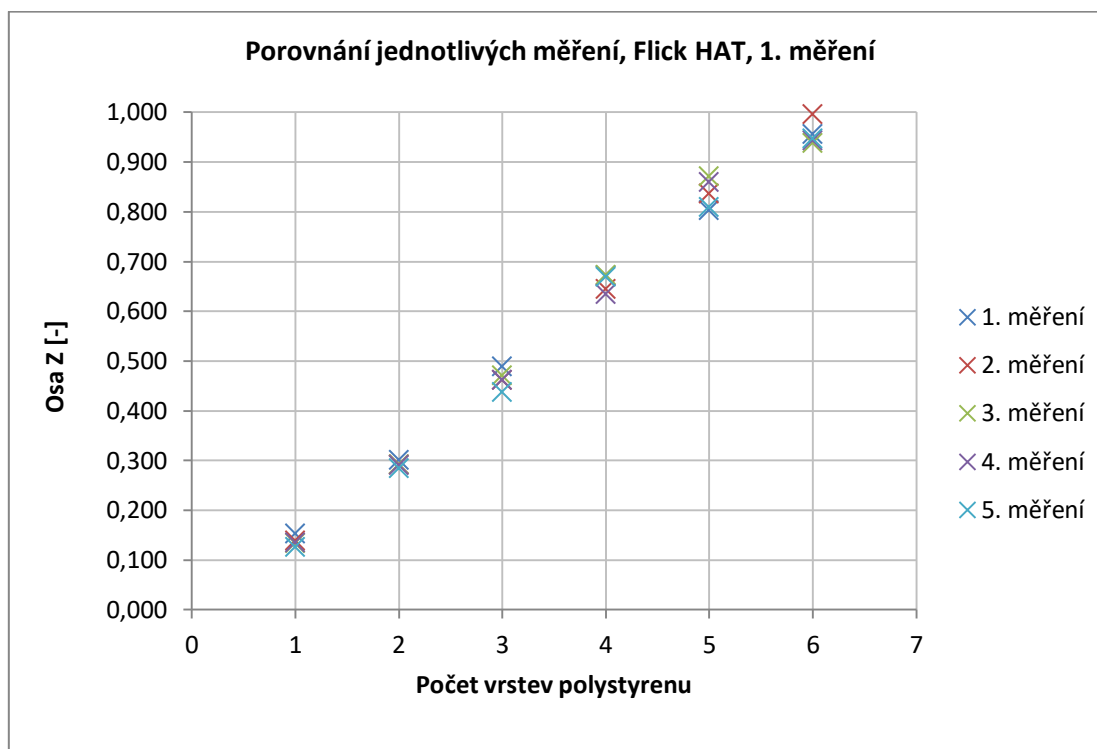
$$m_{mokra} = m_s + m_v = 23,95 \text{ g}$$

$$w = \frac{m_v}{m_s + m_v} = \frac{23,95 - 9,26}{23,95} = 0,613$$

Postup je pořád stejný, jako při měření s Flick Large, takže dalším krokem je změření závislosti osy Z na poloze vlhkého materiálu. Naměřená data znázorňuje Graf 2.

Tab. 4 - Flick HAT, vlhký vzorek, 1. měření

Mokrý vzorek, Flick HAT					
Vrstev polystyrenu	Hodnota osy Z				
	1. měření	2. měření	3. měření	4. měření	5. měření
0	-	-	-	-	-
1	0,152	0,138	0,133	0,134	0,126
2	0,301	0,291	0,291	0,290	0,284
3	0,488	0,461	0,470	0,461	0,437
4	0,671	0,644	0,672	0,634	0,668
5	0,802	0,836	0,870	0,859	0,809
6	0,955	0,995	0,937	0,942	0,946
7	-	-	-	-	-



Graf 2 - Porovnání jednotlivých měření, Flick HAT, 1. měření

#### 4.1.2.3 Závěr prvního měření

Při porovnání výsledků získaných pomocí Flick Large a HAT zjišťujeme, že měření s Flick HAT více odpovídalo očekávání. Je překvapivé, že Flick HAT zvládl rozpoznat i suchý vzorek a při měření s vlhkým vzorkem bylo naměřeno víc hodnot, než snímač došel do saturace. Graf 2 nám ukazuje, že naměřené hodnoty pomocí Flick HAT byly mnohem více konzistentní. Při práci s Flick Large jsem pojal podezření, že snímač není dobře odstíněný ze zadní strany. Mohlo tak

docházet k jistému rušení. Zvláštní však je, že Flick HAT by měl být vyroben stejným způsobem, ale žádné problémy nejevil. Tím spíše, že Flick HAT je usazen přímo na Raspberry Pi, takže by mohlo snáze docházet k nějakému rušení.

### 4.1.3 Druhé měření s Raspberry Pi

Druhé měření sloužilo k ověření výsledků prvního měření. Postup byl vesměs stejný až na drobné úpravy, které by měly zajistit lepší opakovatelnost výsledků. Jedním z opatření bylo, že snímače Flick při měření neležely přímo na stole, ale byly podloženy 10 cm tlustou vrstvou polystyrenu. Tohle opatření by mělo pomoci, pokud by byly snímače rušeny ze spodní strany od stolu. Druhou změnou byl způsob umístování měřeného vzorku nad snímač. Nejde o radikální změnu, pořád se jako distanční podložky používají vrstvy polystyrenu. Změna je v tom, že nyní bude nad snímačem umístěn stále stejný počet vrstev polystyrenu a měřený vzorek bude umístován mezi vrstvy. Při prvním měření byl měřený vzorek vždy nahoře a postupně přibývaly vrstvy mezi snímačem a vzorkem.

#### 4.1.3.1 Flick Large – druhé měření

Postup byl stejný jako při prvním měření. Tab. 5 zobrazuje naměřené hodnoty. Je zajímavé, že oproti prvnímu měření jsme získali hodnoty i při měření se suchým vzorkem. Tyto hodnoty jsou však během jednotlivých měření značně rozdílné.

Tab. 5 – Flick Large, suchý vzorek, 2. měření

Suchý vzorek, Flick Large					
Vrstev polystyrenu	Hodnota osy Z				
	1. měření	2. měření	3. měření	4. měření	5. měření
0	-	-	-	-	-
1	0,470	0,534	0,790	0,807	0,810
2	0,540	0,937	0,778	0,901	0,990
3	0,589	0,818	0,960	0,875	0,920
4	0,850	0,940	1,000	1,000	1,000
5	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

Opět si zvážíme suchý a mokrá vzorek, abychom mohli určit absolutní vlhkost mokrého vzorku.

$$m_s = 12,55 \text{ g}$$

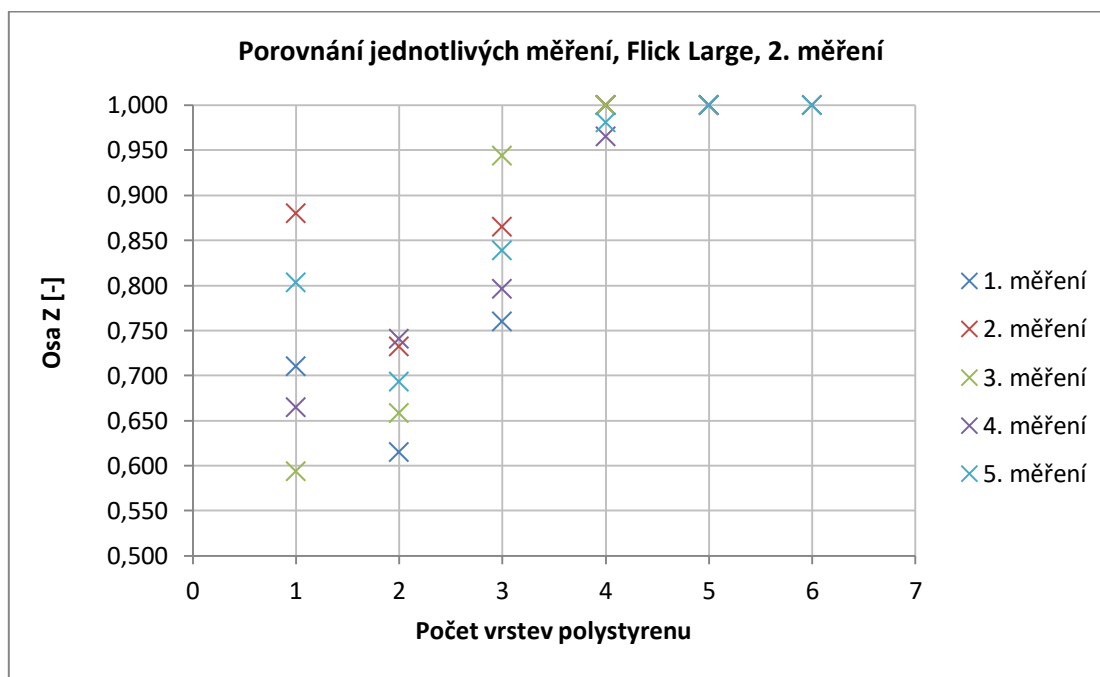
$$m_{mokra} = m_s + m_v = 28,33 \text{ g}$$

$$w = \frac{m_v}{m_s + m_v} = \frac{28,33 - 12,55}{28,33} = 0,557$$

Vidíme, že tentokrát budeme měřit s vlhčím vzorkem, než při prvním měření. Uvidíme, jestli i tento fakt nebude mít vliv na naměřené hodnoty. Tyto hodnoty obsahuje Tab. 6. Hodnoty nám zobrazuje rovněž Graf 3.

**Tab. 6 – Flick Large, vlhký vzorek, 2. měření**

Mokrý vzorek, Flick Large					
Vrstev polystyrenu	Hodnota osy Z				
	1. měření	2. měření	3. měření	4. měření	5. měření
0	-	-	-	-	-
1	0,710	0,880	0,594	0,665	0,803
2	0,615	0,732	0,658	0,741	0,693
3	0,760	0,865	0,944	0,796	0,839
4	1,000	1,000	1,000	0,965	0,981
5	-	1,000	1,000	1,000	1,000



**Graf 3 – Porovnání jednotlivých měření, Flick Large, 2. měření**

#### 4.1.3.2 Flick HAT – druhé měření

U tohoto měření byly provedeny stejné změny jako u druhého měření pomocí Flick Large. Vše ostatní odpovídá postupu z prvního měření. Tab. 7 obsahuje hodnoty měření se suchým vzorkem. Zde můžeme vidět mnohem lepší opakovatelnost oproti Flick Large.

**Tab. 7 – Flick HAT, suchý vzorek, 2. měření**

Suchý vzorek, Flick HAT					
Vrstev polystyrenu	Hodnota osy Z				
	1. měření	2. měření	3. měření	4. měření	5. měření
0	0	0	0	0	0
1	0,113	0,094	0,090	0,900	0,091
2	0,290	0,267	0,253	0,263	0,263
3	0,490	0,458	0,433	0,457	0,443
4	0,690	0,643	0,635	0,648	0,646
5	0,840	0,857	0,838	0,840	0,866
6	-	-	-	-	-

Opět stanovíme absolutní vlhkost měřeného vzorku.

$$m_s = 12,44 \text{ g}$$

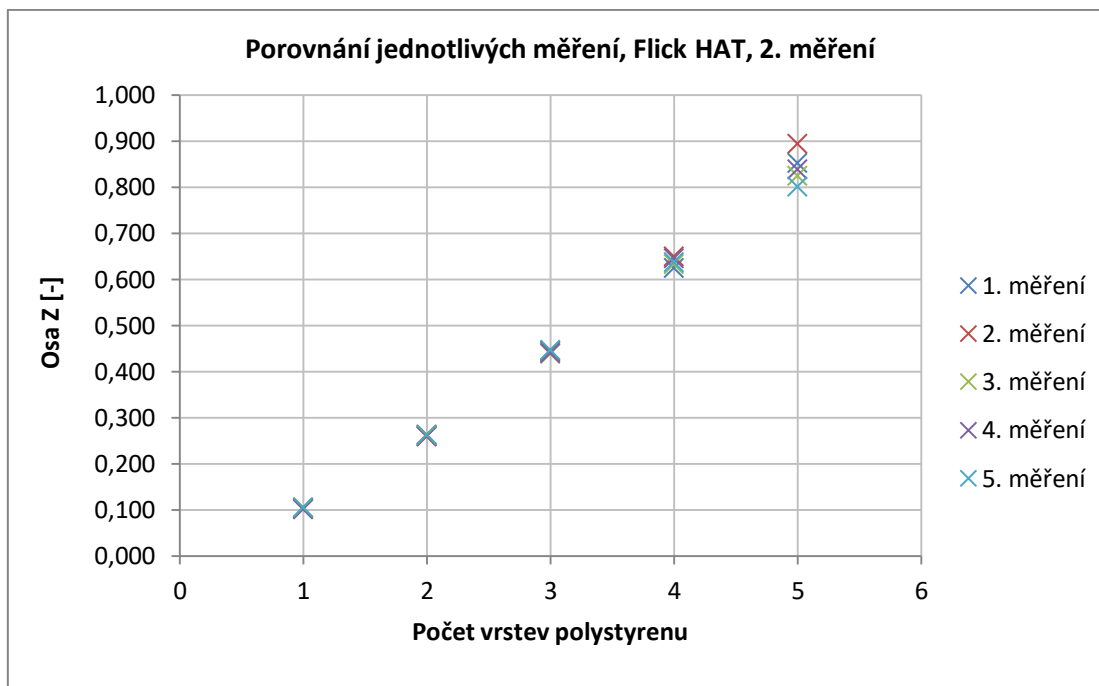
$$m_{mokra} = m_s + m_v = 31,09 \text{ g}$$

$$w = \frac{m_v}{m_s + m_v} = \frac{31,09 - 12,44}{31,09} = 0,599$$

Tab. 8 obsahuje hodnoty z měření s vlhkým vzorkem, tyto hodnoty znázorňuje i Graf 4.

**Tab. 8 – Flick HAT, vlhký vzorek, 2. měření**

Mokrý vzorek, Flick HAT					
Vrstev polystyrenu	Hodnota osy Z				
	1. měření	2. měření	3. měření	4. měření	5. měření
0	-	-	-	-	-
1	0,102	0,103	0,105	0,104	0,106
2	0,260	0,259	0,264	0,262	0,262
3	0,443	0,445	0,439	0,440	0,447
4	0,625	0,650	0,633	0,645	0,637
5	0,852	0,894	0,824	0,839	0,801
6	-	-	-	-	-

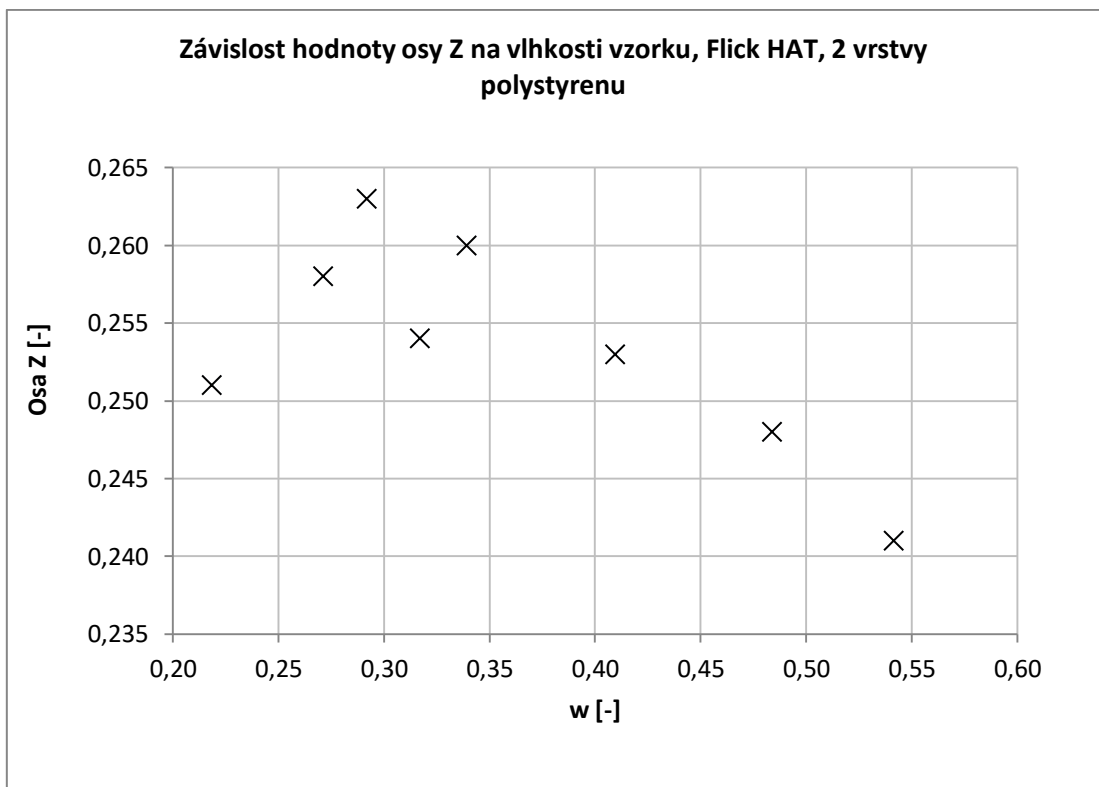


**Graf 4 – Porovnání jednotlivých měření, Flick HAT, 2. Měření**

Vidíme, že pomocí Flick HAT jsme získali opět slušné výsledky. Vidíme, že jednotlivá měření se téměř překrývají. V krajních hodnotách je sice situace horší, ale tam je to pochopitelné. Vzhledem ke slušné opakovatelnosti bylo provedeno s Flick HAT ještě měření závislosti hodnoty osy Z na vlhkosti, při konstantní vzdálenosti od snímače. Získané hodnoty obsahuje Tab. 9 a závislost je zobrazena v Grafu 5.

**Tab. 9 – Flick HAT, závislost hodnoty osy Z na vlhkosti, konst. vzdálenost**

Závislost hodnoty osy Z na vlhkosti	
Vrstev polystyrenu	2
w [-]	Hodnota osy Z [-]
0,54	0,241
0,48	0,248
0,41	0,253
0,34	0,260
0,32	0,254
0,29	0,263
0,27	0,258
0,22	0,251



**Graf 5 – Závislost hodnoty osy Z na vlhkosti vzorku, Flick HAT, konst. vzdálenost**

#### 4.1.3.3 Závěr druhého měření

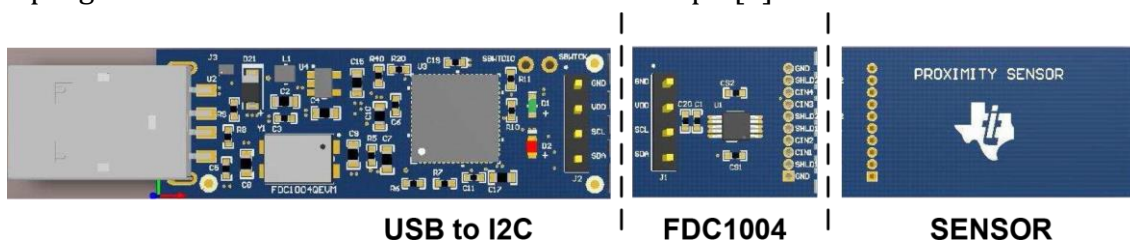
I přes drobné změny jsme dospěli i během druhého měření k podobným výsledkům jako u měření prvního. Flick Large vykazuje o mnoho hroší výsledky měření než Flick HAT. Avšak ani Flick HAT nenaměřil přesvědčivá data při měření závislosti hodnoty osy Z na vlhkosti při konstantní vzdálenosti. U nižších vlhkostí (pod  $w < 0,3$ ) byly hodnoty nižší, než bych očekával. Citlivost na změnu vlhkosti je poměrně nízká.

## 4.2 Texas Instruments

Poté, co se sestava v podobě Raspberry Pi a snímače Flick ukázala jako nevhodná, jsem se rozhodl přejít na jinou variantu. Další měření jsem se rozhodl realizovat pomocí modulu FDC1004QEVm od firmy Texas Instrument, který je přímo určen pro měření kapacity. Jeho velkou výhodou je, že se dá téměř ihned po rozbalení z krabice používat bez jakéhokoliv složitého nastavování. Na stránkách výrobce je k dispozici software (FDC1004EVM GUI), který nám nejen umožňuje jednoduše zobrazit měřenou kapacitu, ale také nastavit různé parametry, jako je například offset, zesílení signálu, atd. Modul připojíme k počítači pomocí rozhraní USB.

Modul se skládá ze tří oddělitelných částí: převodníku z I2C sběrnice na USB, převodníku kapacity na digitální signál a integrovaného snímače. Modul

můžeme vidět na Obr. 7. Část, která je označena jako FDC1004 má připraveno celkem deset kontaktů, ke kterým si můžeme připojit čtyři vlastní elektrody. Dva z těchto kontaktů jsou zem (GND), čtyři jsou napojeny na jednotlivé měřící kanály (CIN1–4) a zbylé čtyři slouží k připojení dvou aktivních stínění (SHLD1 a SHLD 2, pro každé jsou vyhrazeny dva kontakty). Integrovaný senzor je připojen k měřicímu kanálu číslo 1 (CIN1) a má připojené stínění 1 (SHLD1). Měřící elektroda má stínění jak zezadu tak po stranách. Modul pracuje s měřicí frekvencí 25 kHz a je schopný měřit kapacitu v rozsahu  $\pm 15$  pF. V případě potřeby můžeme v programu FDC1004EVM GUI nastavit offset  $\pm 15$  pF [8].



Obr. 7 - Modul FDC1004QEVm od firmy Texas Instruments [9]

#### 4.2.1 FDC1004QEVm – integrovaný snímač

První měření s modulem FDC1004QEVm mělo za cíl otestovat integrovaný senzor. Experiment byl realizován stejně, jako v případě experimentu se sestavou Raspberry Pi + Flick. Modul byl umístěn ve vodorovné poloze na stole tak, aby snímač směřoval směrem vzhůru. Do prostoru nad snímačem byla opět umístěována houbová kuchyňská utěrka z viskózy o rozměrech 20 x 20 x 5 mm a to jak ve vlhkém tak i v suchém stavu. Jako distanční podložky byly opět použity centimetrové desky polystyrenu. Otestoval jsem i vliv samotného polystyrenu a ukázalo se, že polystyren nemá na měřenou kapacitu žádný vliv. V případě, kdy nad senzorem nebyl žádný předmět, byla naměřená kapacita 0,689 pF. Po umístění pěti vrstev polystyrenu o tloušťce 1 cm se tato hodnota vůbec nezměnila.

Dále jsem provedl měření se suchým vzorkem. Umisťoval jsem ho do prostoru nad snímač v rozmezí 1–5 cm. Naměřené hodnoty jsou v Tab. 10. Poté jsem suchý vzorek zvážil na laboratorní váze RADWAG AS 310.R2, abych mohl následně gravimetrickou metodou stanovit vlhkost měřeného vzorku.

$$m_s = 14,86 \text{ g}$$

$$m_{mokra} = m_s + m_v = 33,05 \text{ g}$$

$$w = \frac{m_v}{m_s + m_v} = \frac{33,05 - 14,86}{33,05} = 0,550$$

Další krokem bylo změření závislosti změřené kapacity na vzdálenosti vlhkého vzorku od snímače. Tyto hodnoty jsou taktéž v Tab. 10.

Vidíme, že naměřené hodnoty pro suchý vzorek se téměř zcela shodují s hodnotami pro vlhký vzorek. Můžu tedy pouze konstatovat, že integrovaný

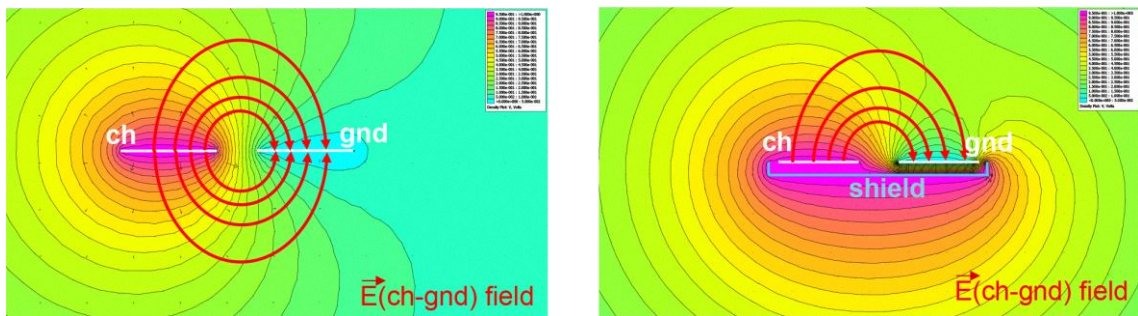
snímač pro moje měření nelze použít. Dalším krokem bude tedy výrobení a připojení vlastních elektrod.

**Tab. 10 – FDC1004QEVm integrovaný snímač, první měření**

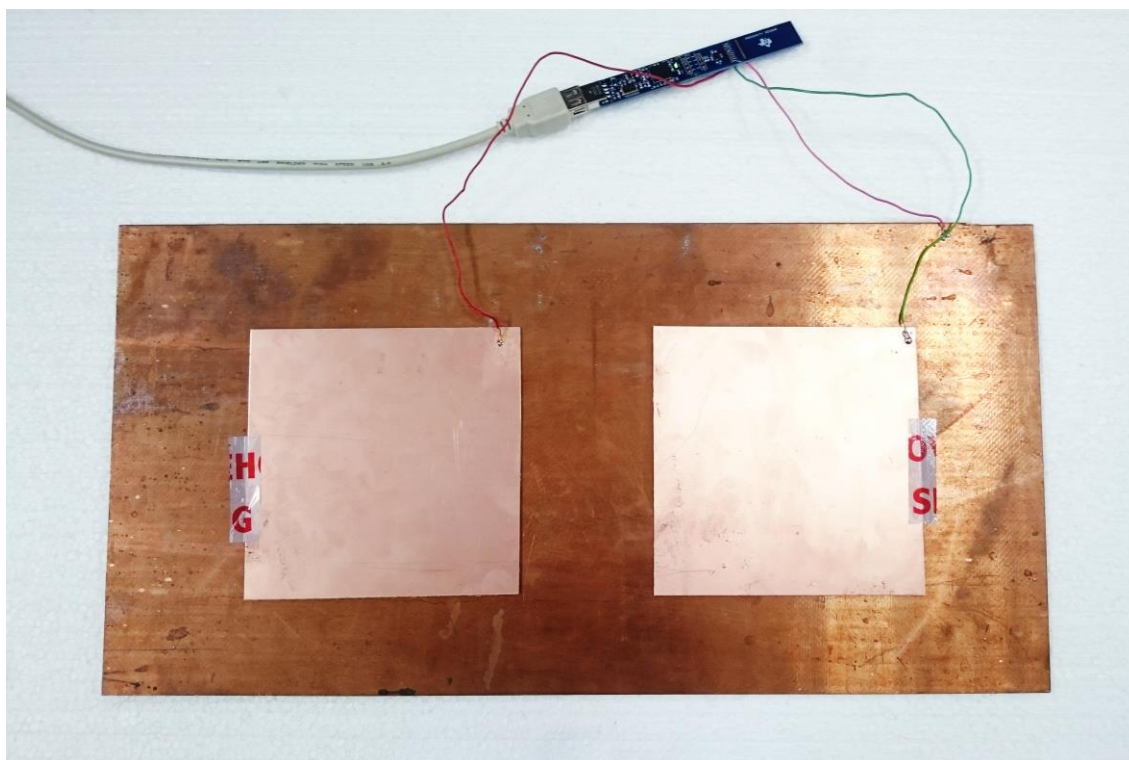
FDC1004QEVm integrovaný snímač		
Vzdálenost vzorku od snímače [cm]	$C_{\text{suchý}}$ [pF]	$C_{\text{vlhký}}$ [pF]
1	0,732	0,732
2	0,707	0,708
3	0,699	0,699
4	0,695	0,695
5	0,689	0,689

#### 4.2.2 FDC1004QEVm – vlastní elektrody

První měření ukázalo, že integrovaný snímač nebude možné použít pro mé další experimenty. Proto jsem se rozhodl vyrobit si vlastní elektrody. Na jejich výrobu jsem použil jednostranný cuprexit, ze kterého jsem vystříhl čtvercové elektrody o velikosti 12 x 12 cm a 4 x 4 cm. Integrovaný snímač měl však výhodu implementovaného aktivního stínění ze zadní strany a také z bočních stran snímače. Stínění ze strany jsem neřešil, ale stínění ze zadní strany může mít větší vliv na měřenou hodnotu (jak znázorňuje Obr. 8), a proto jsem ho zajistil větší cuprexitovou deskou, která se připojila na aktivní stínění modulu FDC1004QEVm a sloužila jako podložka pro měřicí a zemní elektrodu. Stínící deska měla rozměry 47,7 x 21,5 cm. Uspořádání elektrod a stínění pro mé následující měření je patrné z Obr. 9. Elektrody byly připojeny pomocí nestíněných vodičů.



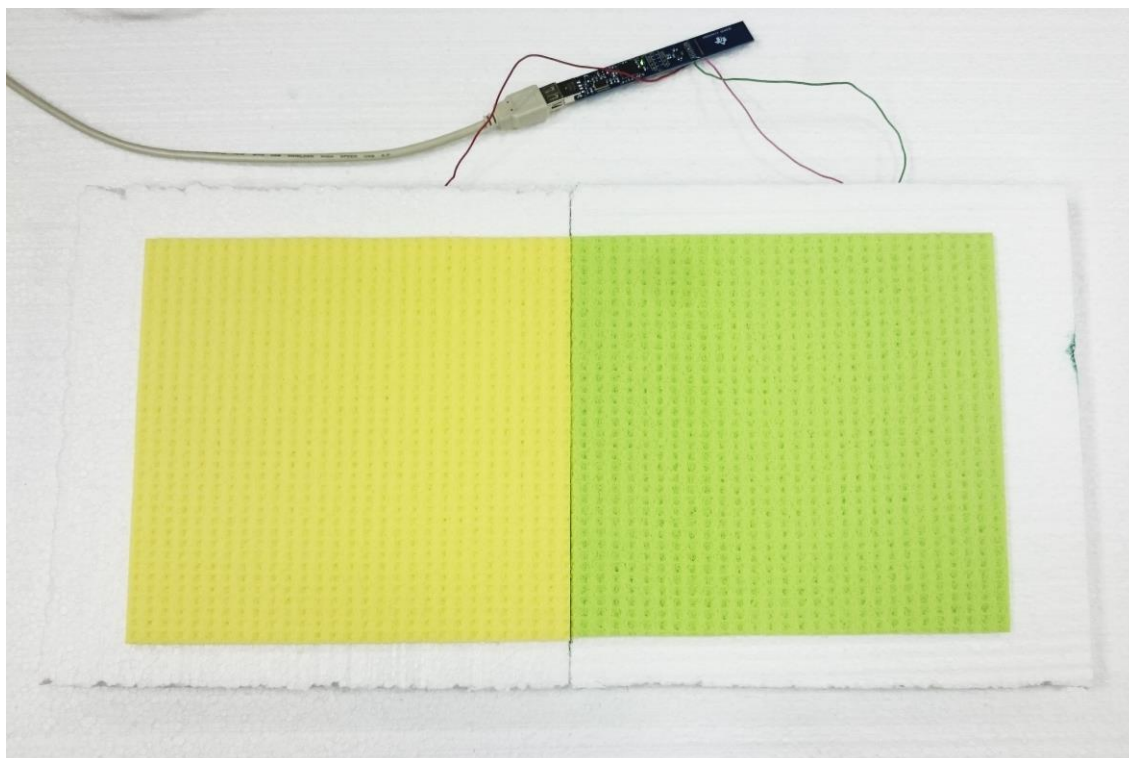
**Obr. 8 – Význam stínění zadní strany elektrody [10]**



**Obr. 9 – Uspořádání elektrod o velikosti 12 x 12 cm a stínění, pohled ze shora**

V tomto experimentu jsem chtěl zjistit, jaký vliv bude mít rozměr elektrod a vzdálenost mezi nimi na výslednou změřenou kapacitu. Měření bylo provedeno při konstantní vzdálenosti vzorku od elektrod a to ve vzdálenosti 2 cm. Otázkou bylo, jestli se se zvětšující roztečí elektrod bude výsledná kapacita zvětšovat nebo zmenšovat. Zvětšovat by se měla z toho důvodu, že v elektrickém poli bude větší část vlhkého vzorku, který má větší relativní permitivitu než vzduch, ale mohla by se i naopak zmenšovat kvůli větší vzdálenosti mezi elektrodami. Pokud by měření prokázalo nějaký vztah mezi měřenou kapacitou a roztečí elektrod, možná by šlo tohoto faktu využít při stanovování rozložení vlhkosti v objemu měřeného materiálu. Měřící sestava by mohla mít více elektrod, které by měly rozdílnou vzdálenost mezi sebou, a přepínáním měření mezi jednotlivými elektrodami bychom mohli získat informaci o rozložení vlhkosti v materiálu.

Uspořádání experimentu je částečně naznačeno na Obr. 9, kde vidíme upořádání elektrod a stínění ze shora. Elektrody a stínění leží na stole a směřují nahoru. Pro zajištění stálé polohy jsou elektrody přichyceny ke stínící podložce lepicí páskou. Vrstvy polystyrenu jsou položeny přímo na elektrodách. Na polystyrenových deskách leží měřené vzorky, jak znázorňuje Obr. 10. Z důvodu větších rozměrů elektrod jsem musel použít dvě houbové utěrky, aby pokryly celou oblast nad elektrodami. V průběhu měření jsem jejich vzájemnou polohu nezaměňoval, abych udržel co nejkonzistentnější podmínky v průběhu celého měření.



**Obr. 10 - Uspořádání druhého měření s modulem FDC1004QEV, pohled ze shora**

Měření probíhalo obdobně jako v předchozích případech. Gravimetrickou metodou jsem stanovil vlhkost jednotlivých pěn. Při vlhčení jsem se snažil, aby byly obě pěny stejně vlhké. První část pokusu byla měřena s elektrodami o rozměrech 12 x 12 cm.

$$\begin{aligned}
 m_{s\_žlutá} &= 12,73 \text{ g} \\
 m_{mokra\_žlutá} &= m_{s\_žlutá} + m_{v\_žlutá} = 67,20 \text{ g} \\
 w_{žlutá} &= \frac{m_{v\_žlutá}}{m_{s\_žlutá} + m_{v\_žlutá}} = \frac{67,20 - 12,73}{67,20} = 0,811 \\
 m_{s\_zelená} &= 13,10 \text{ g} \\
 m_{mokra\_zelená} &= m_{s\_zelená} + m_{v\_zelená} = 66,98 \text{ g} \\
 w_{žlutá} &= \frac{m_{v\_zelená}}{m_{s\_zelená} + m_{v\_zelená}} = \frac{66,98 - 13,10}{66,98} = 0,804
 \end{aligned}$$

Vidíme, že vlhkost obou vzorků je velmi podobná, mírný rozdíl by měření neměl zásadně ovlivnit. Měření proběhlo nejprve se suchými vzorky a následně s vlhkými, abych mohl vyhodnotit relativní změnu vlhkosti, přičemž hodnota naměřená se suchým vzorkem bude brána jako referenční. Naměřené a vypočtené hodnoty jsou v Tab. 11.

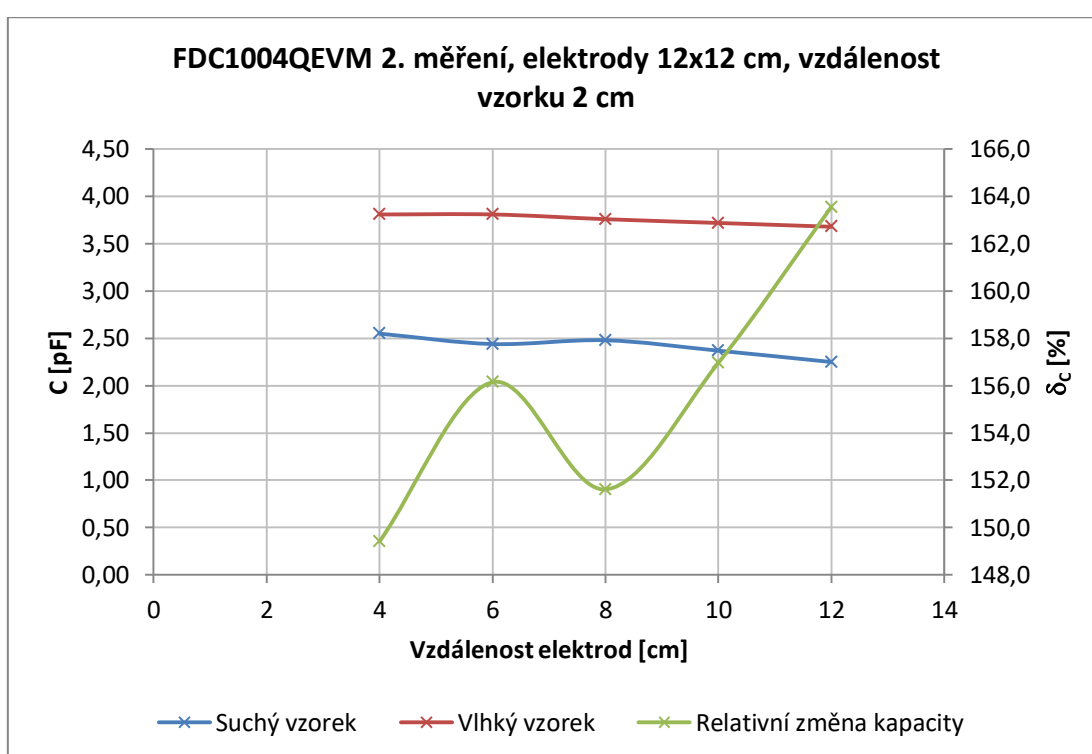
Relativní změnu kapacity vypočteme podle rovnice 10. Výpočet je uveden pro vzdálenost elektrod 4 cm. Hodnoty z Tab. 11 znázorňuje Graf 6.

$$\delta_c = \frac{100 \cdot C_{m\acute{e}r}}{C_{ref}} \quad [\%] \quad (10)$$

$$\delta_c = 100 \cdot \frac{3,81}{2,55} = 149,4 \%$$

**Tab. 11 – FDC1004QEV M s elektrodami 12 x 12 cm, vzdálenost vzorku od elektrod 2 cm**

FDC1004QEV M s elektrodami 12 x 12 cm, vzdálenost vzorku od elektrod 2 cm					
Vzdálenost elektrod [cm]	4	6	8	10	12
Kapacita se suchými vzorky [pF]	2,55	2,44	2,48	2,37	2,25
Kapacita s vlhkými vzorky [pF]	3,81	3,81	3,76	3,72	3,68
Relativní změna kapacity [%]	149,4	156,1	151,6	157,0	163,6

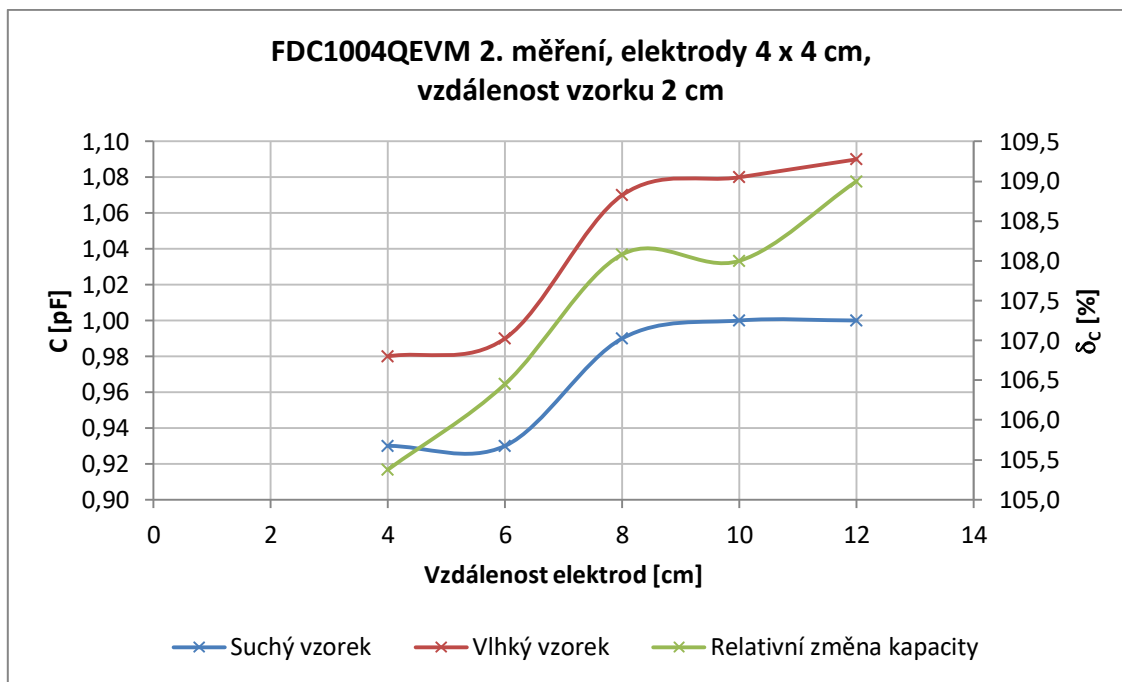


**Graf 6 – FDC1004QEV M 2. měření, elektrody 12 x 12 cm, vzdálenost vzorku 2 cm**

Měření s menšími elektrodami o rozměrech 4 x 4 cm probíhalo stejně. Absolutní vlhkost žluté pěny byla 0,811 a zelené 0,804, což je stejné jako při měření s elektrodami o rozměrech 12 x 12 cm. Naměřené a vypočtené hodnoty jsou v Tab. 12 a tyto hodnoty znázorňuje Graf 7.

**Tab. 12 – FDC1004QEV M s elektrodami 4 x 4 cm, vzdálenost vzorku od elektrod 2 cm**

FDC1004QEV M s elektrodami 4 x 4 cm, vzdálenost vzorku od elektrod 2 cm					
Vzdálenost elektrod [cm]	4	6	8	10	12
Kapacita se suchými vzorky [pF]	0,93	0,93	0,99	1,00	1,00
Kapacita s vlhkými vzorky [pF]	0,98	0,99	1,07	1,08	1,09
Relativní změna kapacity [%]	105,4	106,5	108,1	108,0	109,0



**Graf 7 – FDC1004QEV M 2. měření, elektrody 4 x 4 cm, vzdálenost vzorku 2 cm**

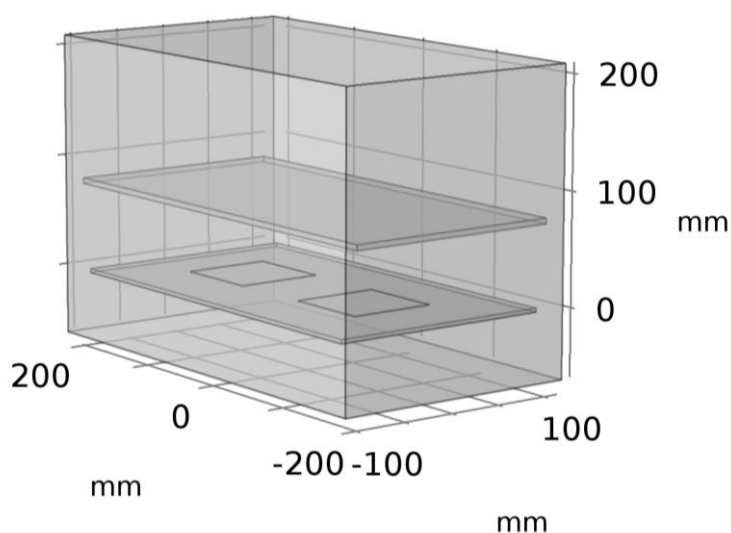
Z Grafu 6 a 7 můžeme vidět, že se zvětšující se vzdáleností mezi elektrodami roste i relativní změna kapacity, což by znamenalo, že s větší roztečí získávám větší citlivost, tudíž bych mohl měřit vlhkost ve větší hloubce. Překvapivé je, že v případě menších elektrod o rozměru 4 x 4 cm absolutní hodnota kapacity rostla, ale v případě elektrod o velikosti 12 x 12 cm mírně klesala. Fakt, že oba průběhy relativních změn kapacity jsou poměrně zvlněné, si vysvětluji tím, že jsem elektrody k modulu připojil nestíněnými vodiči. Během manipulace s elektrodami mohlo dojít ke změně parazitní kapacity, která se vytvořila mezi okolním prostředím a přívodními vodiči. Řešením pro další měření je použití aktivně stíněných vodičů. Tohle měření však aspoň ukázalo, že má smysl pokračovat s touto sestavou v dalších experimentech. V dalším měření bych rád proměřil charakteristiku měřené kapacity i vůči vzdálenosti vzorku od elektrod.

### 4.2.3 Simulace

Místo dalšího měření „naslepo“ jsem se rozhodl zkusit pokus nejdřív simulovat. Výsledky simulace budou oproštěny od všech parazitních jevů z okolí, takže by mi mohly dát lepší představu o tom, jaké výsledky bych měl očekávat při dalším měření. K simulování mého pokusu jsem použil program COMSOL Multiphysics.

Simulaci jsem provedl pro dvě velikosti elektrod. Menší elektrody měly rozměr 4 x 4 cm a ty větší 8 x 8 cm. Od elektrod o velikosti 12 x 12 cm, které byly použity během předchozího měření, jsem upustil, protože jejich rozměr byl už nepoměrně velký vzhledem velikosti měřeného vzorku. Elektrické pole mezi

elektrodami už mohlo příliš zasahovat do okolí. Model pro simulaci obsahuje stínící podložku, zemnicí a měřící elektrodu a vrstvu, která představuje vlhký vzorek. Okolní prostředí je považováno za vzduch, což odpovídá reálnému uspořádání experimentu, protože polystyrenové vrstvy, které používám jako distanční podložky, se od vzduchu svou relativní permitivitou příliš neliší. Model pro simulaci je na Obr. 11.



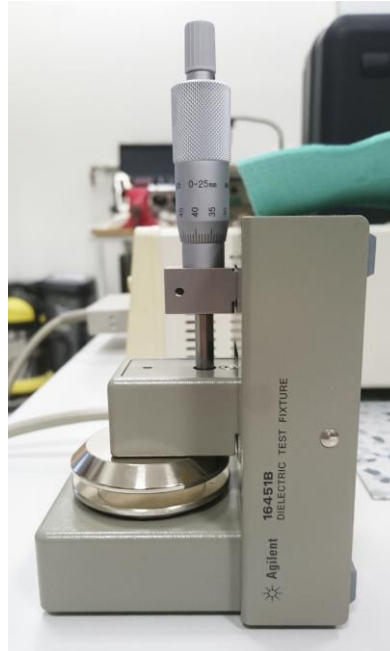
**Obr. 11 – Model pro simulaci**

Pro obě velikosti elektrod jsem provedl simulaci pro tři různé vzdálenosti mezi nimi. Abych mohl výsledky normalizovat a lépe porovnávat mezi sebou, volil jsem rozteč elektrod jako poměr jejich velikosti. Délku hrany elektrody si označíme jako  $a$  a vzdálenost mezi elektrodami jako  $d$ . Simulaci jsem provedl pro rozteče elektrod  $d = a/4$ ,  $d = a/2$  a  $d = a$ . Tedy pro menší elektrody byla rozteč 1 cm, 2 cm a 4 cm, u větších elektrod to bylo 2 cm, 4 cm a 8 cm. Pro každou rozteč jsem provedl několik simulací, přičemž vlhký vzorek byl postupně umístován ve vzdálenosti od 5 do 120 mm s krokem 5 mm.

U všech předmětů, které jsou součástí modelu, jsem musel nastavit relativní permitivitu daného materiálu. Použitý software již obsahuje nejrůznější vlastnosti běžných materiálů, jako je právě měď, vzduch, atd. Relativní permitivitu mnou používaného vlhkého zorku jsem si však musel nejprve změřit, abych tento parametr mohl zanést do simulace.

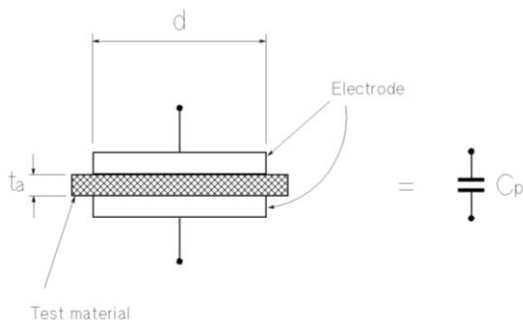
#### 4.2.3.1 Stanovení relativní permitivity vzorku

Pro stanovení relativní permitivity vlhkého vzorku, jsem využil přístroj pro měření relativní permitivity Agilent 16451B (Obr. 12).

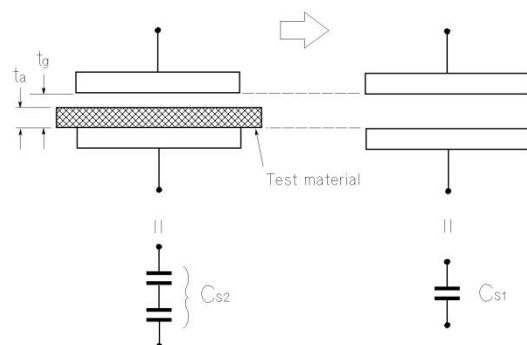


Obr. 12 – Přístroj na měření relativní permitivity vzorku

Tento přístroj jsem připojil k RLC metru HIOKI 3532 LCR HiTester. Relativní permitivita je závislá na měřící frekvenci, proto jsem na RLC metru zvolil měřící frekvenci shodnou s měřící frekvencí modulu FDC1004QEVN a to  $f = 25$  kHz. Manuál k přístroji Agilent 16451B obsahuje dvě metody, jak změřit relativní permitivitu vzorku. Jedna metoda je kontaktní, při které se obě měřící elektrody dotýkají měřeného vzorku a měří se paralelní kapacita (Obr. 13), a druhá je bezkontaktní se vzduchovou mezerou, při které se nejprve měří sériová kapacita vzorku a vzduchové mezery a následně se měří sériová kapacita při stejné vzdálenosti, ale bez vloženého vzorku (Obr. 14). Vyzkoušel jsem obě metody, abych mohl výsledky porovnat.



Obr. 13 – Kontaktní metoda



Obr. 14 – Bezkontaktní metoda

U kontaktní metody jsem se rozhodl vyzkoušet ještě variantu, při které jsem měřící elektrody oblepil jednou vrstvou kaptonové pásky, která měla sloužit jako izolační materiál. Obával jsem se totiž, že vlhkým vzorkem bude kvůli vodě procházet proud a měření bude tím pádem zkreslené. U kontaktní metody jsem narazil na problém s nastavením správné vzdálenosti měřících elektrod. Pěnový vzorek, který používám, je na povrchu totiž mírně zvlňžený (cca ± 0,5 mm) a navíc při dotahování mikrometrem není poznat, kdy došlo ke kontaktu elektrod se vzorkem, protože vzorek je měkký a stlačí se. Proto jsem se rozhodl, že kontaktní měření provedu při dvou rozdílných vzdálenostech měřících elektrod a za výsledek budu považovat průměr těchto hodnot. U měření s kaptonovou páskou jsem provedl měření pouze při jedné vzdálenosti. Pro všechna tři měření měl vlhký vzorek absolutní vlhkost  $w = 0,831$ , což bylo stanoveno gravimetrickou metodou. Výsledná relativní permitivita byla spočítána podle rovnice (11) [11]:

$$\epsilon_r = \frac{t_a \cdot C_p}{\pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot \epsilon_0} \quad (11)$$

kde  $t_a$  je tloušťka vzorku,  $C_p$  je paralelní kapacita,  $d$  je průměr elektrody a  $\epsilon_0$  je permitivita vakua. Vše je dosazováno v základních jednotkách. Naměřené hodnoty a vypočtené relativní permitivity pro všechny případy kontaktního měření jsou uvedeny v

Tab. 13. Zde je uveden výpočet pro měření 1 podle rovnice (11).

$$\epsilon_r = \frac{0,00415 \cdot 1,3 \cdot 10^{-10}}{\pi \cdot \left(\frac{0,038}{2}\right)^2 \cdot 8,854 \cdot 10^{-12}} = 53,78$$

**Tab. 13 – Stanovení relativní permitivity vzorku, kontaktní metoda**

<b>Kontaktní měření relativní permitivity</b>			
	Měření 1	Měření 2	Kaptonová páska
$t_a$ [m]	0,00415	0,005	0,00429
$C_p$ [F]	1,3E-10	8,5E-11	2,13E-10
$d$ [m]	0,038	0,038	0,038
$\epsilon_0$ [F/m]	8,854E-12	8,854E-12	8,854E-12
$\epsilon_r$ [-]	53,78	42,32	90,9998

Měření 1 a 2 vyšlo přibližně tak, jak bych očekával. Relativní permitivita vody se pohybuje kolem 81, takže výsledek naměřený při použití kaptonové pásky není reálný. Kaptonová páska má relativní permitivitu okolo 4, navíc její vrstva byla velmi tenká, na to aby zásadně ovlivnila měření. Průměr hodnot z měření 1 a 2 potom vychází:

$$\epsilon_r \text{ prům} = \frac{\epsilon_{r1} + \epsilon_{r2}}{2} = \frac{53,7273 + 42,3245}{2} = 48,05$$

Vlhkost materiálu pro bezkontaktní měření se vzduchovou mezerou byla také  $w = 0,831$ . Naměřené hodnoty a vypočtená relativní permitivita je v Tab. 14. Relativní permitivita byla vypočtena podle rovnice (12), která byla opět uvedena v manuálu k přístroji na měření relativní permitivity [11]:

$$\epsilon_r = \frac{1}{1 - \left(1 - \frac{C_{s1}}{C_{s2}}\right) \cdot \frac{t_g}{t_a}} \quad (12)$$

$$\epsilon_r = \frac{1}{1 - \left(1 - \frac{1,886 \cdot 10^{-12}}{64 \cdot 10^{-9}}\right) \cdot \frac{0,0055}{0,005}} = 11,00$$

kde  $t_a$  je tloušťka vzorku,  $t_g$  je vzdálenost mezi elektrodami,  $C_{s1}$  je sériová kapacita bez vloženého vzorku a  $C_{s2}$  je sériová kapacita s vloženým vzorkem. Vše je dosazováno v základních jednotkách.

**Tab. 14 - Stanovení relativní permitivity vzorku, bezkontaktní metoda**

Bezkontaktní měření se vzduch. mezerou	
$t_a$ [m]	0,005
$t_g$ [m]	0,0055
$C_{s1}$ [pF]	1,886
$C_{s2}$ [nF]	64
$d$ [m]	0,038
$\epsilon_0$ [F/m]	8,854E-12
$\epsilon_r$ [-]	11,00

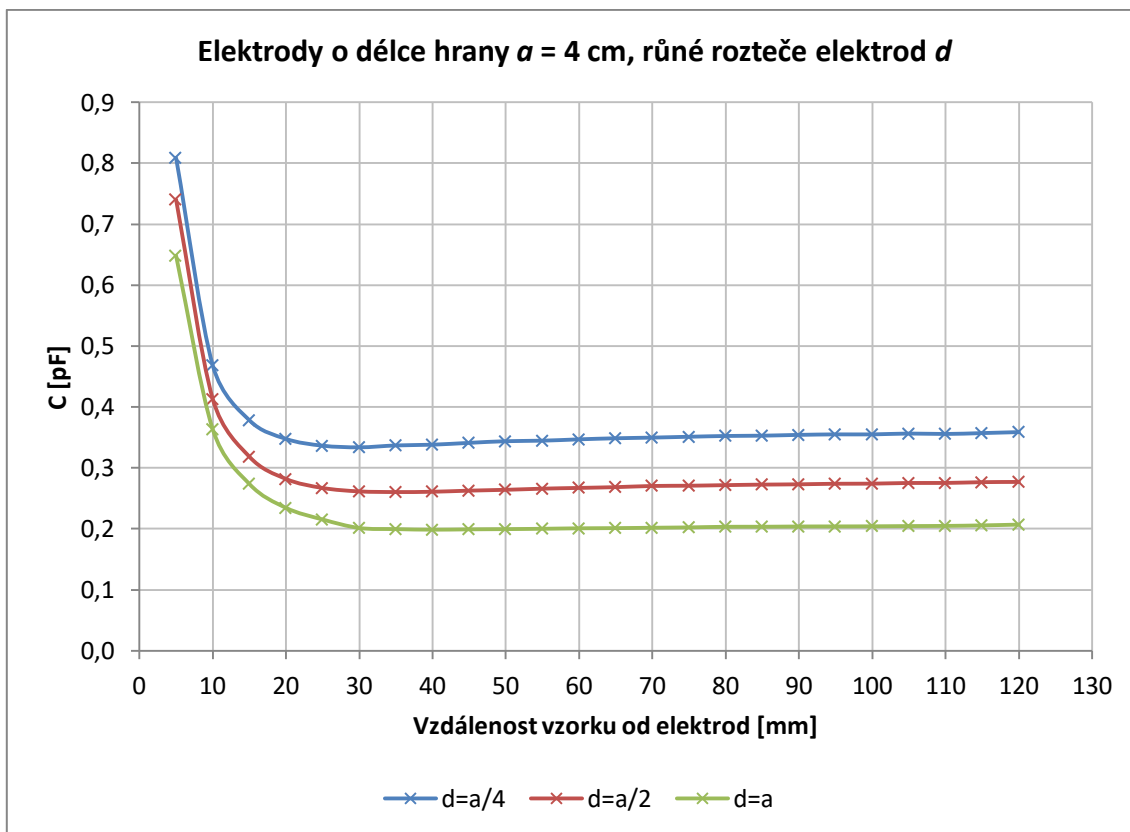
Výsledek získaný bezkontaktní mezerou považuji za nesprávný v porovnání s tím, který jsem získal kontaktní metodou. U bezkontaktní metody vyšla relativní permitivita příliš malá. Do simulace jsem se tedy rozhodl dosadit průměr z kontaktního měření 1 a 2 tedy  $\epsilon_r = 48,05$ .

#### 4.2.3.2 Výsledky simulace

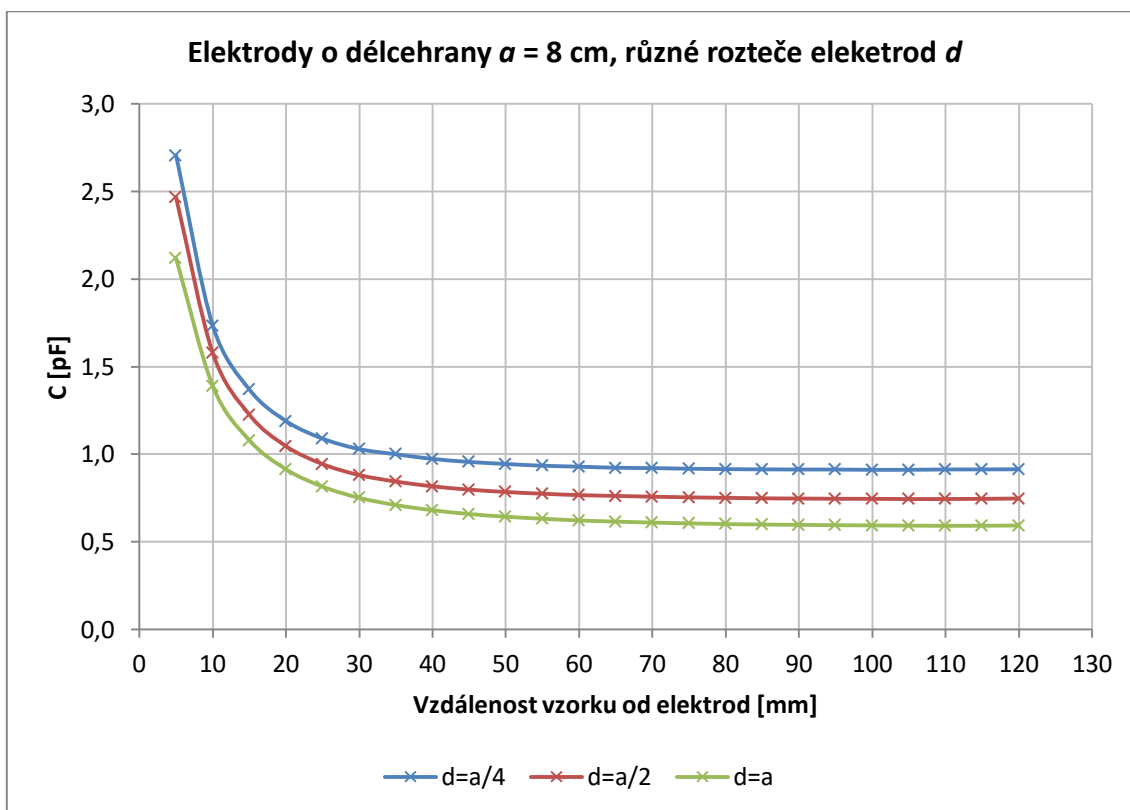
Tab. 15 - Výsledek simulace, elektrody o délce hrany  $a = 4$  cm

Závislost kapacity na vzdálenosti mezi měřeným vzorkem a elektrodami o velikosti 4 x 4 cm			
Vzdálenost vzorku [mm]	C [pF]		
	$d = a/4$	$d = a/2$	$d = a$
5	0,80855	0,74029	0,64812
10	0,46825	0,41320	0,36332
15	0,37829	0,31848	0,27367
20	0,34768	0,28192	0,23444
25	0,33653	0,26713	0,21537
30	0,33384	0,26149	0,20143
35	0,33693	0,26044	0,19960
40	0,33816	0,26092	0,19866
45	0,34116	0,26276	0,19923
50	0,34389	0,26411	0,19957
55	0,34473	0,26599	0,20014
60	0,34692	0,26723	0,20092
65	0,34870	0,26847	0,20122
70	0,34978	0,27042	0,20184
75	0,35118	0,27082	0,20242
80	0,35245	0,27178	0,20341
85	0,35296	0,27265	0,20345
90	0,35425	0,27311	0,20390
95	0,35509	0,27405	0,20402
100	0,35506	0,27421	0,20419
105	0,35643	0,27532	0,20459
110	0,35576	0,27536	0,20486
115	0,35719	0,27665	0,20570
120	0,35881	0,27704	0,20702
<b>Naprázdko</b>	0,35711	0,27567	0,20429

V této podkapitole jsou zpracována výsledná data ze simulace. Hodnoty ze simulace s elektrodami o délce hrany  $a = 4$  cm jsou v Tab. 15 a znázorňuje je Graf 8. Pro elektrody o délce hrany  $a = 8$  cm jsou hodnoty v Tab. 16 a Grafu 9. U obou grafů vidíme, že čím dál jsou elektrody od sebe, tím menší kapacitu naměříme. U Grafu 8 vidíme, že od vzdálenosti 30 mm hodnota vypočtené kapacity stoupá, což není správně. Tento jev je způsobený tím, že u simulace byla nastavena proměnná síť bodů, ve kterých program simulaci spočítá. Proto můžeme hodnoty kapacity ve vzdálenosti větší jak 30 mm považovat za konstantní a rovné bodu ve vzdálenosti 30 mm.



Graf 8 - Výsledek simulace, elektrody o délce hrany  $a = 4$  cm, srovnání jednotlivých roztečí  $d$



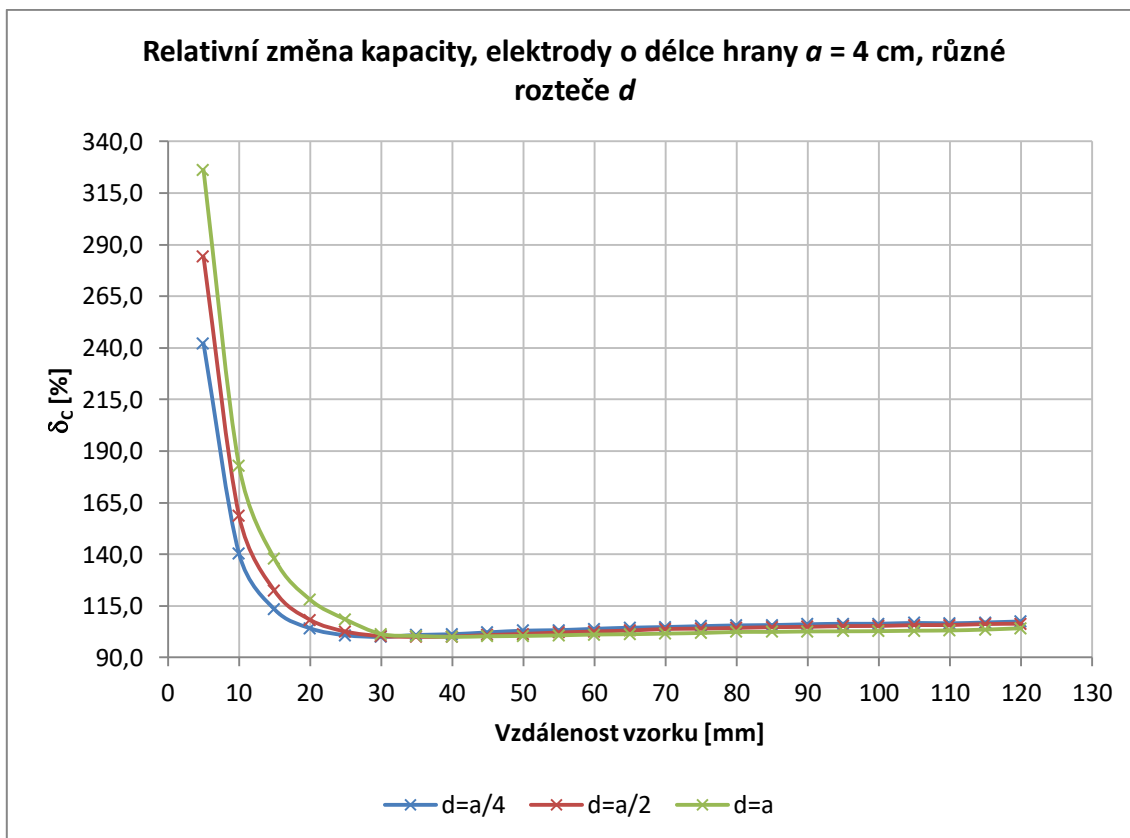
Graf 9 - Výsledek simulace, elektrody o délce hrany  $a = 8$  cm, srovnání jednotlivých roztečí  $d$

Tab. 16 - Výsledek simulace, elektrody o délce hrany  $a = 8$  cm

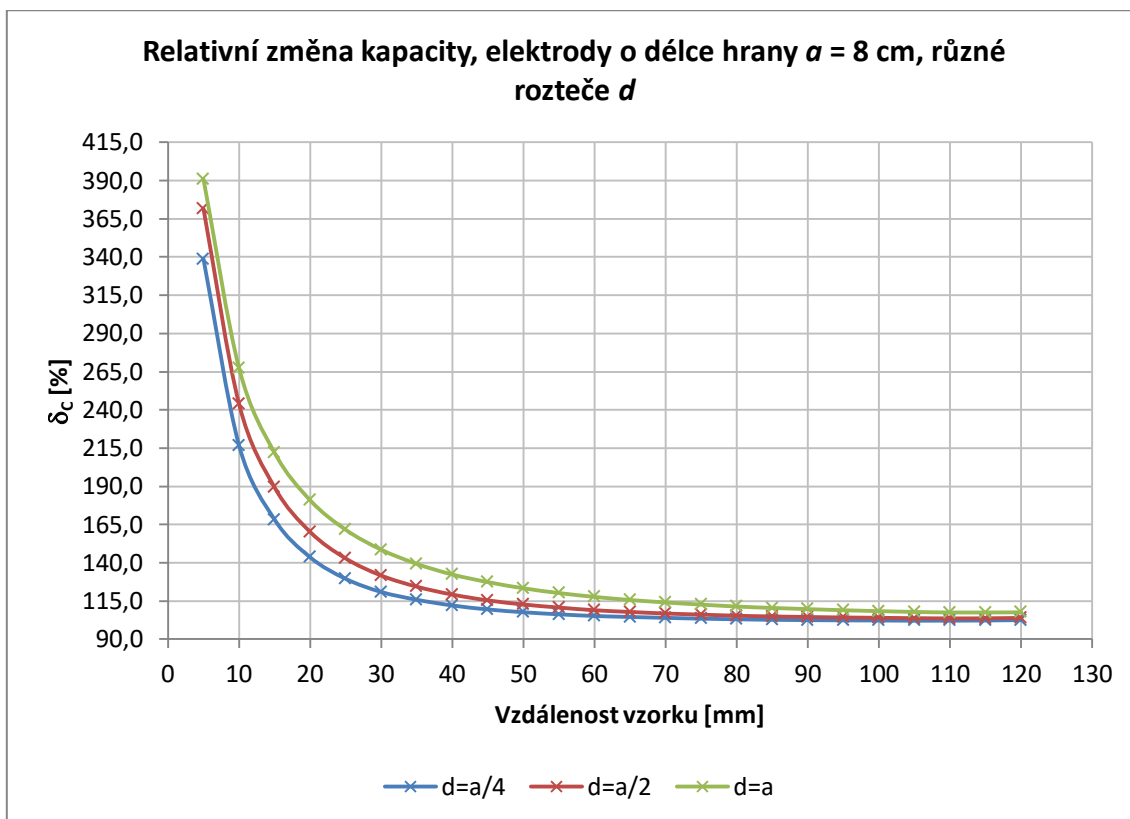
Závislost kapacity na vzdálenosti mezi měřeným vzorkem a elektrodami o velikosti 8 x 8 cm			
Vzdálenost [mm]	C [pF]		
	$d = a/4$	$d = a/2$	$d = a$
5	2,70670	2,46580	2,11810
10	1,73400	1,57790	1,39000
15	1,36900	1,22520	1,07920
20	1,18900	1,04550	0,91327
25	1,08870	0,94304	0,81422
30	1,02890	0,88040	0,75058
35	0,99921	0,84338	0,70910
40	0,97281	0,81617	0,67960
45	0,95559	0,79731	0,65799
50	0,94384	0,78386	0,64264
55	0,93389	0,77396	0,63126
60	0,92848	0,76603	0,62121
65	0,92231	0,76147	0,61483
70	0,92017	0,75705	0,60902
75	0,91675	0,75343	0,60490
80	0,91452	0,75037	0,60071
85	0,91311	0,74781	0,59813
90	0,91217	0,74649	0,59603
95	0,91212	0,74525	0,59430
100	0,91038	0,74469	0,59305
105	0,91065	0,74368	0,59165
110	0,91242	0,74389	0,59077
115	0,91275	0,74470	0,59122
120	0,91366	0,74651	0,59256
<b>Naprázdko</b>	0,89647	0,72815	0,57011

Pro mé účely by však mohla mít větší vypovídající hodnotu relativní změna kapacity oproti hodnotě, která byla změřená naprázdno bez vlhkého vzorku. Tyto hodnoty jsou na konci Tab. 15 a Tab. 16 a budeme je považovat za referenční. Relativní hodnoty, které jsou vyneseny v Grafu 10 a 11, získáme podle rovnice (10).

Z obou grafů vidíme, že čím větší je vzdálenost mezi elektrodami, tím větší je relativní změna měřené kapacity. Neboli můžeme říct, že tím je měřící sestava citlivější a mohla by tak detekovat vlhkost ve větších hloubkách. Při porovnání podle velikosti elektrod, vidíme, že větší elektrody (Graf 11) mají pozvolnější charakteristiku a měří do větší vzdálenosti (hloubky).



**Graf 10 – Simulace, relativní změna kapacity, elektrody o velikosti  $a = 4$  cm**



**Graf 11 – Simulace, relativní změna kapacity, elektrody o velikosti  $a = 8$  cm**

#### 4.2.4 FDC1004QEVm praktické ověření simulace

Tohle měření mělo sloužit k ověření výsledků získaných ze simulace. Pro zajištění lepší opakovatelnosti jsem připojil měřící elektrodu k modulu FDC1004QEVm pomocí aktivně stíněného vodiče. Abych omezil vliv proměnlivosti měřené hodnoty, spočítal jsem vždy průměr z pěti po sobě změřených hodnot. Zbytek měření probíhal stejně jako v předchozích případech. Obr. 15 ukazuje uspořádání experimentu. Na obrázku je ukázána odkrytá zemní elektroda, aby bylo vidět umístění vzorku. Během měření byl nad zemní elektrodou taktéž umístěn pěnový vzorek.



Obr. 15 – Uspořádání experimentu pro ověření simulace

Pro elektrody o hraně délky  $a = 4$  cm jsou naměřené hodnoty v Tab. 17 až 19. Zprůměrované hodnoty z jednotlivých pěti měření z těchto tří tabulek znázorňuje Graf 12. Pro elektrody o délce hrany  $a = 8$  cm jsou naměřené hodnoty v Tab. 20 až 21. Stejně jako u menší elektrody jsou hodnoty z těchto tří tabulek znázorněny v Grafu 14. Při pohledu na jednotlivé tabulky s naměřenými hodnotami můžeme vidět, že hodnoty se mezi jednotlivými měřeními 1 – 5 nepatrně liší, i přesto, že podmínky byly vždy konstantní. Tohle kolísání například způsobilo, že hodnota změřená naprázdno (tzn. volný prostor nad elektrodami) je u většiny tabulek mírně vyšší, než hodnota z měření, kdy byly nad elektrodami umístěny pouze distanční vrstvy polystyrenu. Polystyren má sice  $\epsilon_r$  blízkou vzduchu, ale má ji mít lehce vyšší, proto by i výsledná kapacita měla být vždy mírně

vyšší. Vliv tohoto kolísání by mělo zmírňovat právě průměrování pěti změřených hodnot.

Tab. 17 – Elektroda o hraně  $a = 4 \text{ cm}$ ,  $d = a/4$

Elektrody o délce hrany $a = 4 \text{ cm}$ , vzdálenost elektrod $d = a/4$						
Vzdálenost vzorku [mm]	C [pF]					Průměr
	Měření 1	Měření 2	Měření 3	Měření 4	Měření 5	
10	0,280787	0,289413	0,288727	0,288166	0,290104	0,287439
20	0,263254	0,268129	0,278435	0,262678	0,276245	0,269748
30	0,274990	0,282730	0,278200	0,286539	0,285133	0,281518
40	0,277849	0,275471	0,288712	0,279345	0,284304	0,281136
50	0,269825	0,279984	0,284927	0,279970	0,280085	0,278958
60	0,272236	0,270359	0,281612	0,282211	0,278711	0,277026
70	0,262035	0,289505	0,275545	0,276325	0,275045	0,275691
80	0,273710	0,263805	0,278816	0,282528	0,270596	0,273891
90	0,267906	0,272470	0,265606	0,265417	0,273872	0,269054
100	0,277761	0,266949	0,259125	0,279465	0,268410	0,270342
110	0,262177	0,254425	0,247456	0,272923	0,266785	0,260753
120	0,254713	0,244442	0,269728	0,244631	0,262159	0,255135
pouze vrstvy polystyrenu	0,242340	0,249130	0,253639	0,240711	0,259666	0,249097
zcela naprázdno	0,248518	0,255108	0,252504	0,250864	0,256229	0,252645

Tab. 18 – Elektroda o hraně  $a = 4 \text{ cm}$ ,  $d = a/2$

Elektrody o délce hrany $a = 4 \text{ cm}$ , vzdálenost elektrod $d = a/2$						
Vzdálenost vzorku [mm]	C [pF]					Průměr
	Měření 1	Měření 2	Měření 3	Měření 4	Měření 5	
10	0,218365	0,236092	0,229092	0,234610	0,240528	0,231737
20	0,233810	0,232224	0,233955	0,222546	0,229361	0,230379
30	0,232258	0,211742	0,224308	0,229256	0,232420	0,225997
40	0,234936	0,222336	0,227921	0,221813	0,244781	0,230357
50	0,238668	0,220457	0,211773	0,221165	0,226862	0,223785
60	0,214935	0,215384	0,232105	0,220633	0,223019	0,221215
70	0,219854	0,226494	0,204525	0,216494	0,227259	0,218925
80	0,209770	0,209240	0,215250	0,220800	0,216774	0,214367
90	0,220762	0,216066	0,216978	0,212868	0,222336	0,217802
100	0,219143	0,218147	0,220448	0,214462	0,209805	0,216401
110	0,213562	0,193375	0,218355	0,215643	0,212818	0,210751
120	0,212633	0,205128	0,202538	0,210848	0,207619	0,207753
pouze vrstvy polystyrenu	0,188866	0,199881	0,199198	0,212095	0,202726	0,200553
zcela naprázdno	0,201260	0,217497	0,195473	0,207905	0,184933	0,201414

Tab. 19 - Elektroda o hraně  $a = 4$  cm,  $d = a$

Elektrody o délce hrany $a = 4$ cm, vzdálenost elektrod $d = a$						
	C [pF]					
Vzdálenost vzorku [mm]	Měření 1	Měření 2	Měření 3	Měření 4	Měření 5	Průměr
10	0,239210	0,238720	0,240707	0,227861	0,236568	0,236613
20	0,249456	0,220076	0,216753	0,214226	0,211943	0,222491
30	0,213243	0,209192	0,214170	0,220106	0,203207	0,211984
40	0,214170	0,213701	0,198879	0,214052	0,204569	0,209074
50	0,201262	0,183132	0,188044	0,200911	0,195967	0,193863
60	0,184635	0,207796	0,201276	0,202843	0,193962	0,198102
70	0,193178	0,197481	0,199345	0,196241	0,180801	0,193409
80	0,190617	0,190985	0,186861	0,213673	0,193977	0,195223
90	0,194818	0,181856	0,185030	0,189135	0,185143	0,187196
100	0,189276	0,174828	0,175468	0,181236	0,161421	0,176446
110	0,183626	0,165995	0,182919	0,185984	0,177740	0,179253
120	0,188946	0,188255	0,188980	0,194538	0,188562	0,189856
pouze vrstvy polystyrenu	0,183643	0,162851	0,173485	0,177105	0,171194	0,173656
zcela naprázdno	0,171797	0,172386	0,180260	0,168125	0,178009	0,174115

Tab. 20 - Elektroda o hraně  $a = 8$  cm,  $d = a/4$

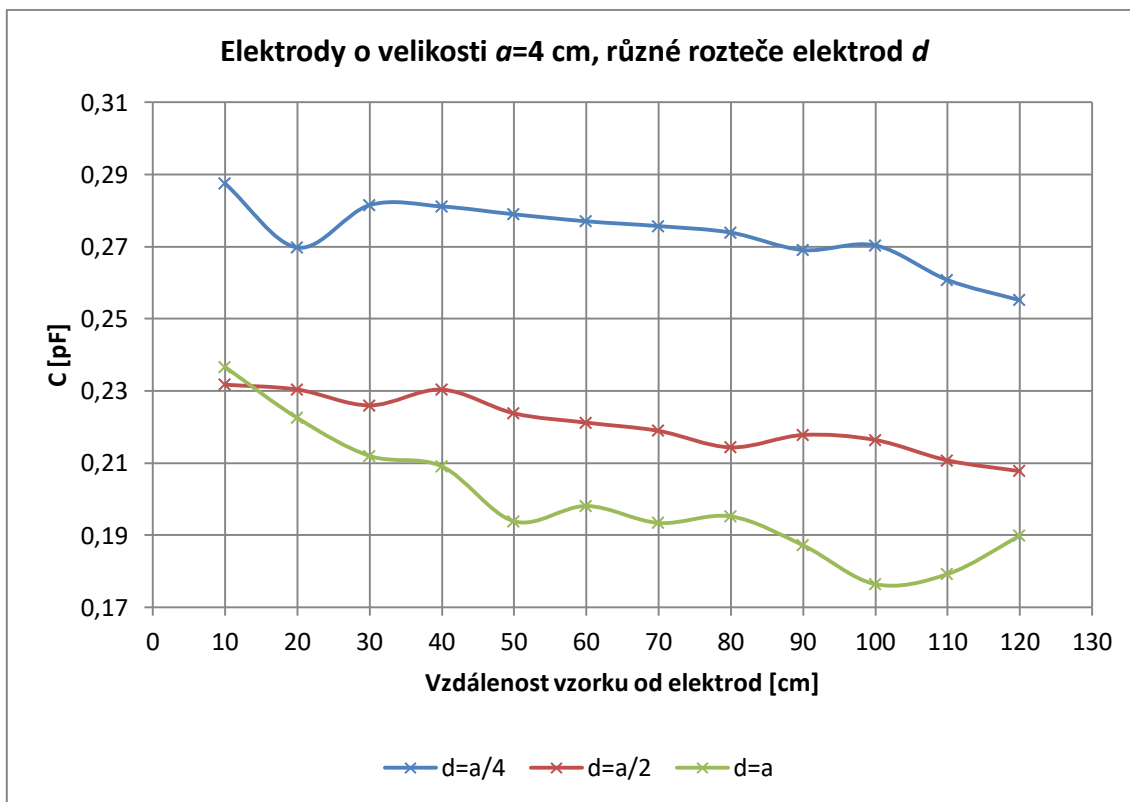
Elektrody o délce hrany $a = 8$ cm, vzdálenost elektrod $d = a/4$						
	C [pF]					
Vzdálenost vzorku [mm]	Měření 1	Měření 2	Měření 3	Měření 4	Měření 5	Průměr
10	1,261917	1,237125	1,273474	1,218155	1,233646	1,244863
20	0,820379	0,818769	0,833834	0,810568	0,821131	0,820936
30	0,794081	0,775961	0,778484	0,774706	0,804739	0,785594
40	0,780628	0,757740	0,792753	0,769602	0,757460	0,771637
50	0,751373	0,740641	0,750444	0,773491	0,759548	0,755099
60	0,740885	0,742561	0,737753	0,734631	0,749142	0,740994
70	0,719900	0,720453	0,717720	0,738682	0,720570	0,723465
80	0,711926	0,708406	0,719591	0,710562	0,704655	0,711028
90	0,687786	0,687632	0,695154	0,677582	0,701227	0,689876
100	0,684546	0,674932	0,687330	0,683458	0,691902	0,684434
110	0,662712	0,674543	0,718828	0,681776	0,677582	0,683088
120	0,675144	0,681061	0,682634	0,651127	0,680172	0,674028
pouze vrstvy polystyrenu	0,656057	0,651834	0,643572	0,631262	0,643572	0,645259
zcela naprázdno	0,637259	0,654526	0,685190	0,919450	0,657757	0,710836

Tab. 21 – Elektroda o hraně  $a = 8$  cm,  $d = a/2$

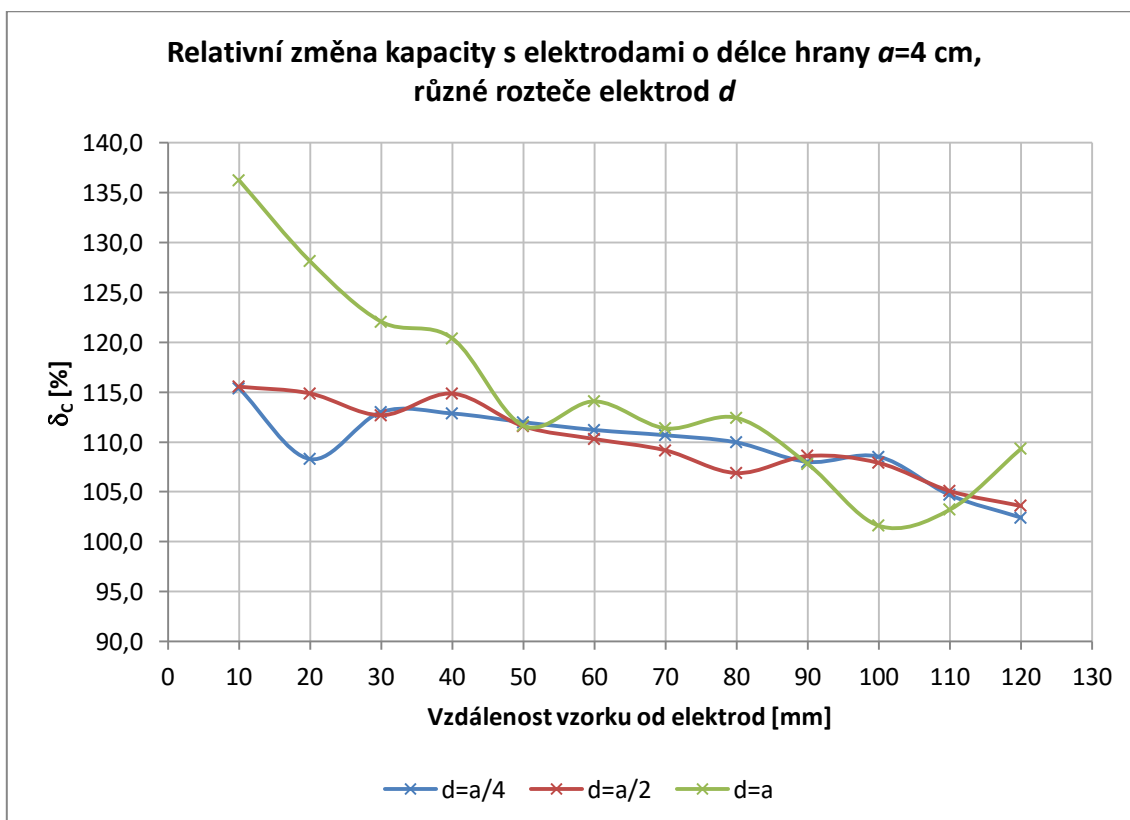
Elektrody o délce hrany $a = 8$ cm, vzdálenost elektrod $d = a/2$						
	C [pF]					
Vzdálenost vzorku [mm]	Měření 1	Měření 2	Měření 3	Měření 4	Měření 5	Průměr
10	0,911465	0,911003	0,906511	0,894348	0,902971	0,905260
20	0,775877	0,777401	0,749702	0,784037	0,793791	0,776162
30	0,769058	0,742197	0,745279	0,724421	0,762814	0,748754
40	0,707134	0,711897	0,705179	0,710915	0,710135	0,709052
50	0,707392	0,699114	0,701101	0,689360	0,704157	0,700225
60	0,661249	0,658615	0,657700	0,662889	0,659805	0,660052
70	0,634050	0,643866	0,642878	0,638506	0,655087	0,642877
80	0,628181	0,615417	0,629913	0,638691	0,620630	0,626566
90	0,609764	0,581215	0,613564	0,600533	0,570898	0,595195
100	0,597504	0,602345	0,586653	0,596733	0,608967	0,598440
110	0,589399	0,590940	0,579792	0,592100	0,591032	0,660653
120	0,579374	0,590643	0,573360	0,572659	0,581583	0,579524
pouze vrstvy polystyrenu	0,542131	0,523657	0,537479	0,545013	0,527248	0,535106
zcela naprázdno	0,550098	0,556850	0,552158	0,557507	0,541651	0,551653

Tab. 22 – Elektroda o hraně  $a = 8$  cm,  $d = a$

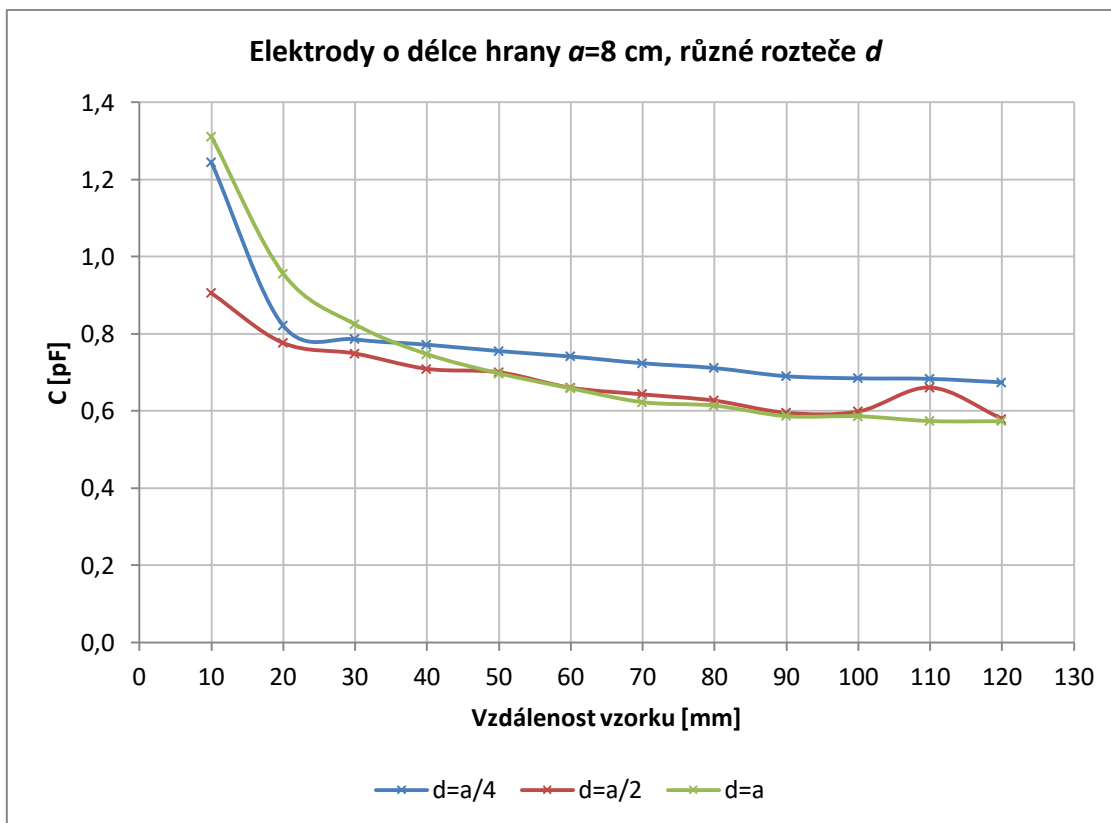
Elektrody o délce hrany $a = 8$ cm, vzdálenost elektrod $d = a$						
	C [pF]					
Vzdálenost vzorku [mm]	Měření 1	Měření 2	Měření 3	Měření 4	Měření 5	Průměr
10	1,319201	1,316986	1,301460	1,303711	1,317036	1,311679
20	0,953888	0,966093	0,967800	0,939554	0,951990	0,955865
30	0,827082	0,843842	0,821096	0,802244	0,827688	0,824390
40	0,751703	0,765316	0,727312	0,746099	0,745300	0,747146
50	0,702152	0,682510	0,689636	0,693884	0,718779	0,697392
60	0,656494	0,672691	0,670553	0,636175	0,656397	0,658462
70	0,624342	0,631105	0,633865	0,633778	0,589676	0,622553
80	0,606152	0,625078	0,604681	0,612207	0,620281	0,613680
90	0,576616	0,608988	0,575453	0,581320	0,589064	0,586288
100	0,578896	0,589867	0,588373	0,583384	0,590542	0,586212
110	0,561430	0,562208	0,585009	0,587265	0,572336	0,573650
120	0,579304	0,573257	0,557629	0,571178	0,585026	0,573279
pouze vrstvy polystyrenu	0,514708	0,527304	0,535179	0,532961	0,533577	0,528746
zcela naprázdno	0,521358	0,537992	0,531349	0,522659	0,541174	0,530906



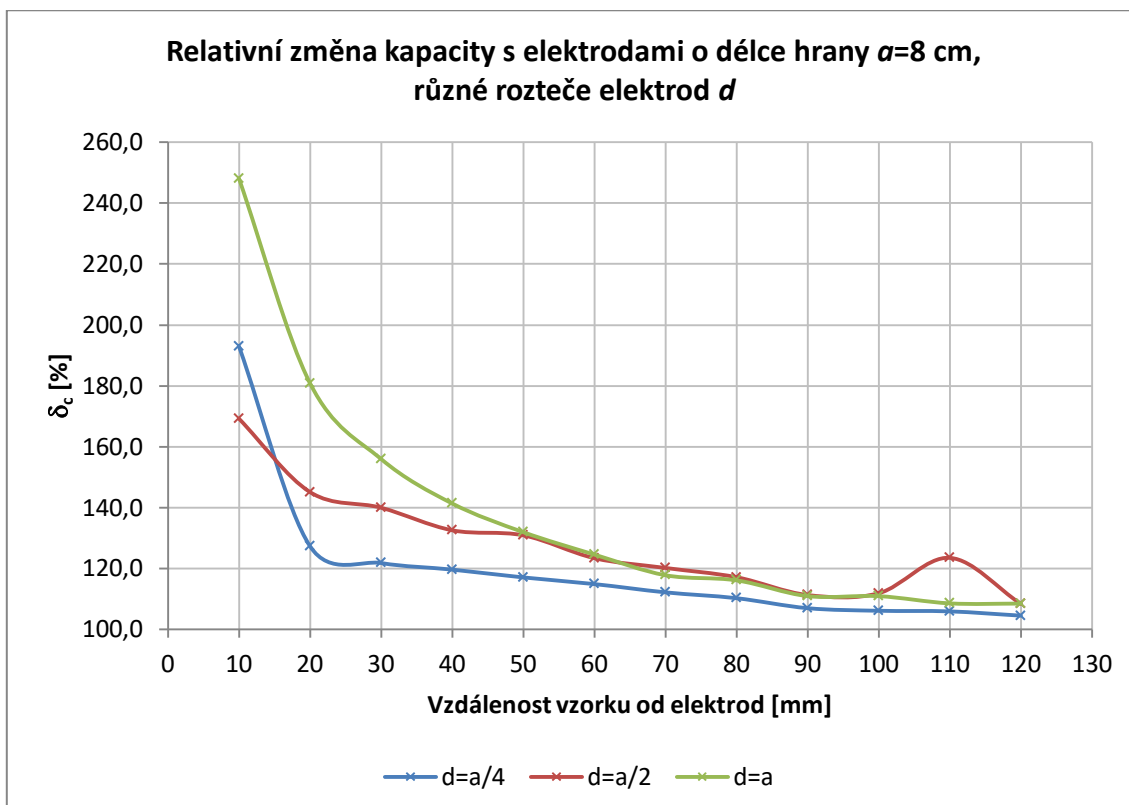
Graf 12 - Měření, elektrody o délce hrany  $a = 4$  cm, srovnání jednotlivých roztečí  $d$



Graf 13 - Měření, relativní změna kapacity, elektrody o délce hrany  $a = 4$  cm



**Graf 14 - Měření, elektrody o délce hrany  $a = 8$  cm, srovnání jednotlivých roztečí  $d$**



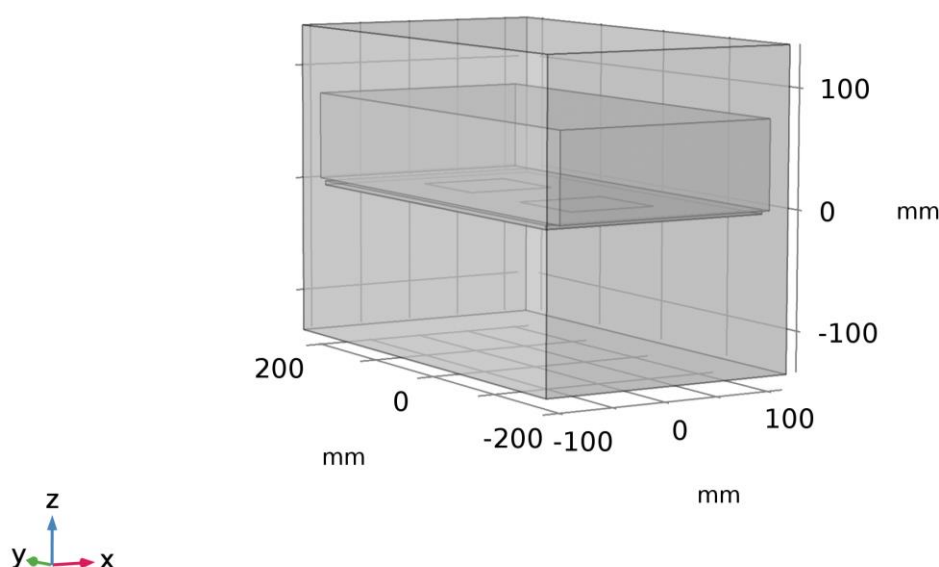
**Graf 15 - Měření, relativní změna kapacity, elektrody o délce hrany  $a = 8$  cm**

Když se podíváme na Graf 12, který znázorňuje data naměřená s elektrodami o velikosti 4 x 4 cm a porovnáme ho s Grafem 8, který zobrazuje simulované hodnoty, vidíme, že naměřené hodnoty jsou značně odlišné. Z naměřených hodnot není patrný žádný trend, který by se podobal tomu simulovanému. Hodnoty pro větší elektrody o rozměrech 8 x 8 cm, které jsou vyneseny v Grafu 14, vypadají o něco slibněji. Sice se také rozcházejí s hodnotami získanými ze simulace, ale u naměřených hodnot je poměrně patrný trend, který se podobá tomu ze simulace. Největší podobnost se simulací můžeme nalézt při pohledu na průběh relativní změny kapacity u elektrod o rozměrech 8 x 8 cm s roztečí  $d = a$ .

Konkrétní důvod, proč se naměřené hodnoty tolik liší od těch simulovaných, neznám. Co se týče absolutních hodnot kapacity, ty se mohou lišit například kvůli špatně změřené relativní permitivitě, která byla zadána do simulace. Ale to, že změřené charakteristiky nemají tak hezké průběhy, musí být způsobeno jinými faktory, jako je okolní rušení, nerovnoměrné rozložení vlhkosti uvnitř vzorku, nepřesnosti v umístění vzorku vůči elektrodám, atd. Chyby způsobené nepřesným umístěním vzorku nad elektrody by šly potlačit použitím vzorku o větší ploše.

#### 4.2.5 Simulace gradientu vlhkosti

V této podkapitole se budu zabývat simulací, která by měla lépe představovat reálný stav při měření vlhkosti ve stavebních materiálech. V předchozích případech jsem pouze umisťoval tenkou vlhkou vrstvu v různých vzdálenostech od snímače, ale v tomto případě budu nastavovat měřenému objektu gradient vlhkosti v celém jeho objemu. Pro simulaci jsem použil opět program COMSOL Multiphysics. Model, pro simulaci znázorňuje Obr. 16.



Obr. 16 – Model pro simulování gradientu vlhkosti

Gradient vlhkosti v objemu vzorku byl v programu vyjádřen pomocí gradientu permitivity. Nepodařilo se mi bohužel dohledat, jaké gradienty vlhkosti jsou typické pro různé materiály, proto jsem se rozhodl simulovat pouze lineární gradient při několik různých strmostech. Krajiní hodnoty přechodu relativní permitivity jsem volil náhodně, avšak v rozmezí „logických“ hodnot. Vzhledem relativní permitivitě vody pohybující se kolem  $\epsilon_r \approx 80$ , jsem nemohl jít přes tuhle hranici. Věděl jsem, že praktické měření budu ověřovat na kvádru pórobetonu a jeho relativní permitivitu v suchém stavu jsem odhadl na  $\epsilon_r \approx 3$ . Zvolil jsem naschvál poměrně nízkou hodnotu, protože pórobeton obsahuje velké množství vzduchu. Rozměry měřeného vzorku v simulaci jsem zvolil podle reálného vzorku v laboratoři a to 153 x 249 x 75 mm.

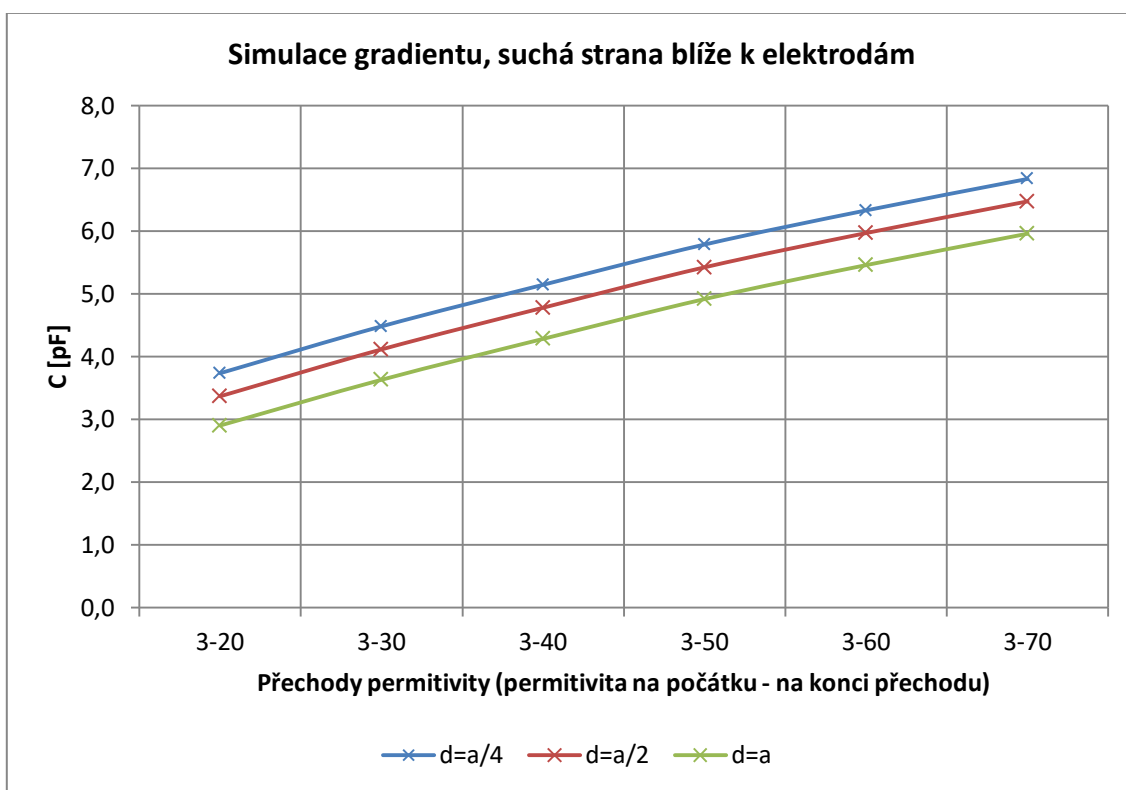
Vzhledem k výsledkům předchozího měření jsem se rozhodl pokračovat pouze s elektrodami o velikosti 8 x 8 cm. Hodnoty získané ze simulace jsou v Tab. 23 a 24 a také v Grafu 16 a 17. Simulace přinesla očekávaný výsledek, že pokud je vlhčí strana gradientu blíže k elektrodám, naměříme výrazně větší kapacitu, než když je přechod orientován opačně. Tato informace nám však neříká nic o tom, jak je vlhkost v materiálu rozložena. Informaci o rozložení vlhkosti v objemu materiálu chceme vyhodnotit ze vztahu mezi hodnotami naměřenými při různých roztečích elektrod.

**Tab. 23 – Výsledky simulace s gradientem, suchá strana blíže k elektrodám**

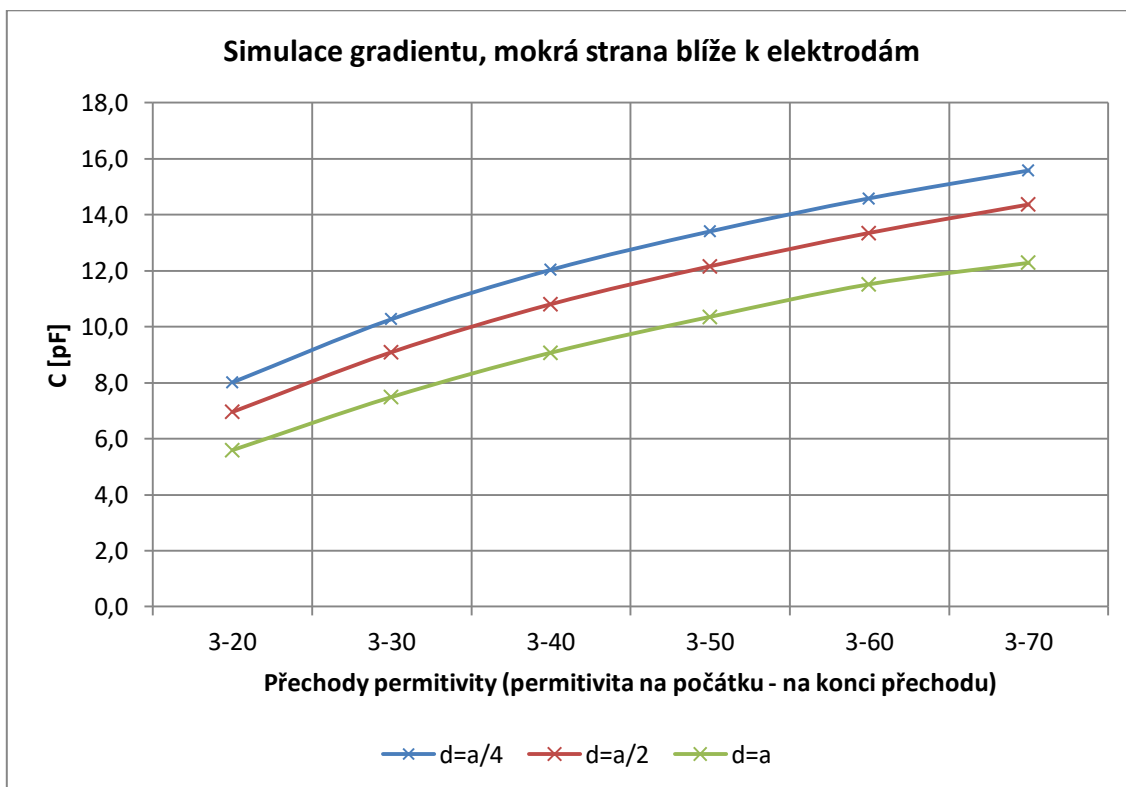
Simulace gradientu, suchá strana blíže k elektrodám			
rozsah přechodu $\epsilon_r$	C [pF]		
	$d = a/4$	$d = a/2$	$d = a$
3-20	3,7387	3,3706	2,9047
3-30	4,4855	4,1183	3,6342
3-40	5,1475	4,7820	4,2855
3-50	5,7893	5,4261	4,9196
3-60	6,3328	5,9721	5,4609
3-70	6,8349	6,4769	5,9619
Naprázdnno	0,72815	0,57011	0,42345

**Tab. 24 – Výsledky simulace s gradientem, mokrá strana blíže k elektrodám**

Simulace gradientu, mokrá strana blíže k elektrodám			
Rozsah přechodu $\epsilon_r$	C [pF]		
	$d = a/4$	$d = a/2$	$d = a$
3-20	8,0138	6,9578	5,5932
3-30	10,272	9,0936	7,4922
3-40	12,034	10,806	9,0737
3-50	13,406	12,161	10,355
3-60	14,587	13,352	11,517
3-70	15,580	14,366	12,282
Naprázdnno	0,72815	0,57011	0,42345



Graf 16 - Simulace gradientu, suchá strana blíže k elektrodám



Graf 17 - Simulace gradientu, mokrá strana blíže k elektrodám

Při hledání vztahu mezi rozložením vlhkosti a hodnotami naměřenými při jednotlivých roztečích elektrod se nabízí udělat poměr těchto hodnot. Poměry hodnot z Tab. 23 a 24 obsahuje Tab. 25 a 26. Do poměru jsem dal vždy nejmenší a střední rozteč vůči největší rozteči elektrod.

**Tab. 25 – Poměry hodnot mezi jednotlivými roztečemi elektrod, suchá strana blíže k elektrodám**

<b>Poměry hodnot mezi jednotlivými roztečemi elektrod, suchá strana blíže k elektrodám</b>		
<b>rozsah přechodu <math>\varepsilon_r</math></b>	<b><math>(a/4) / a</math></b>	<b><math>(a/2) / a</math></b>
<b>3-20</b>	1,287	1,160
<b>3-30</b>	1,234	1,133
<b>3-40</b>	1,201	1,116
<b>3-50</b>	1,177	1,103
<b>3-60</b>	1,160	1,094
<b>3-70</b>	1,146	1,086

**Tab. 26 – Poměry hodnot mezi jednotlivými roztečemi elektrod, mokrá strana blíže k elektrodám**

<b>Poměry hodnot mezi jednotlivými roztečemi elektrod, mokrá strana blíže k elektrodám</b>		
<b>rozsah přechodu <math>\varepsilon_r</math></b>	<b><math>(a/4) / a</math></b>	<b><math>(a/2) / a</math></b>
<b>3-20</b>	1,433	1,244
<b>3-30</b>	1,371	1,214
<b>3-40</b>	1,326	1,191
<b>3-50</b>	1,295	1,174
<b>3-60</b>	1,267	1,159
<b>3-70</b>	1,269	1,170

Z obou výše umístěných tabulek vidíme, že v obou případech orientace gradientu, mají poměry stejný trend, liší se pouze v absolutních hodnotách. Není zde patrné nic, co by od sebe odlišilo opačnou orientaci gradientu. Bohužel jsem simulaci provedl jen u tří roztečí elektrod, chtělo by to víc hodnot, abych mohl lépe vyhodnotit získaná data. V tomto případě nemůžeme stanovit ani žádnou absolutní hodnotu, kdy se jedná o gradient orientovaný suchou stranou blíže nebo naopak dále od elektrod. Dochází k průniku intervalů hodnot pro obě orientace gradientu. Hodnoty poměrů z prvního řádku z Tab. 25 jsou přibližně stejné jako hodnoty poměrů v Tab. 26 u rozsahu gradientu 3-50 nebo 3-60.

#### 4.2.6 Měření gradientu v pórobetonu

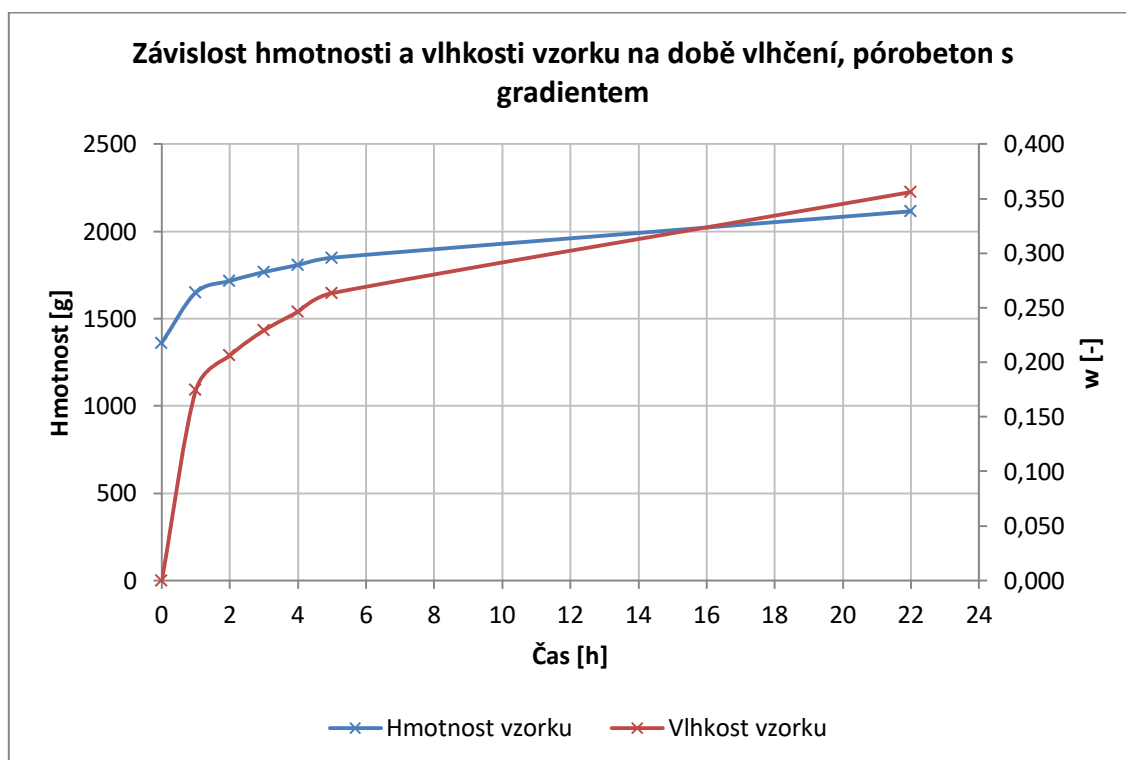
Měření gradientu v pórobetonu probíhalo obdobně jako všechna předchozí měření. Na stole je měl položenou aktivně stíněnou podložku a na ní zemnicí a měřící elektrodu s aktivně stíněným připojením. K měření kapacity posloužil opět modul FDC1004QEVM, uspořádání experimentu je patrné z Obr. 17. Při experimentu jsem pracoval se dvěma stejně velkými vzorky pórobetonu. Jeden z nich jsem nechal absorbovat vlhkost v celém objemu (kompletně ponořený do vody), abych zjistil, jak rychle se bude zvyšovat vlhkost tohoto materiálu. Druhý jsem položil do nádoby tak, aby byla ve vodě ponořena pouze jeho část (cca 1cm) a vznikl v něm gradient vlhkosti. Tento vzorek je zachycen při měření na Obr. 17.



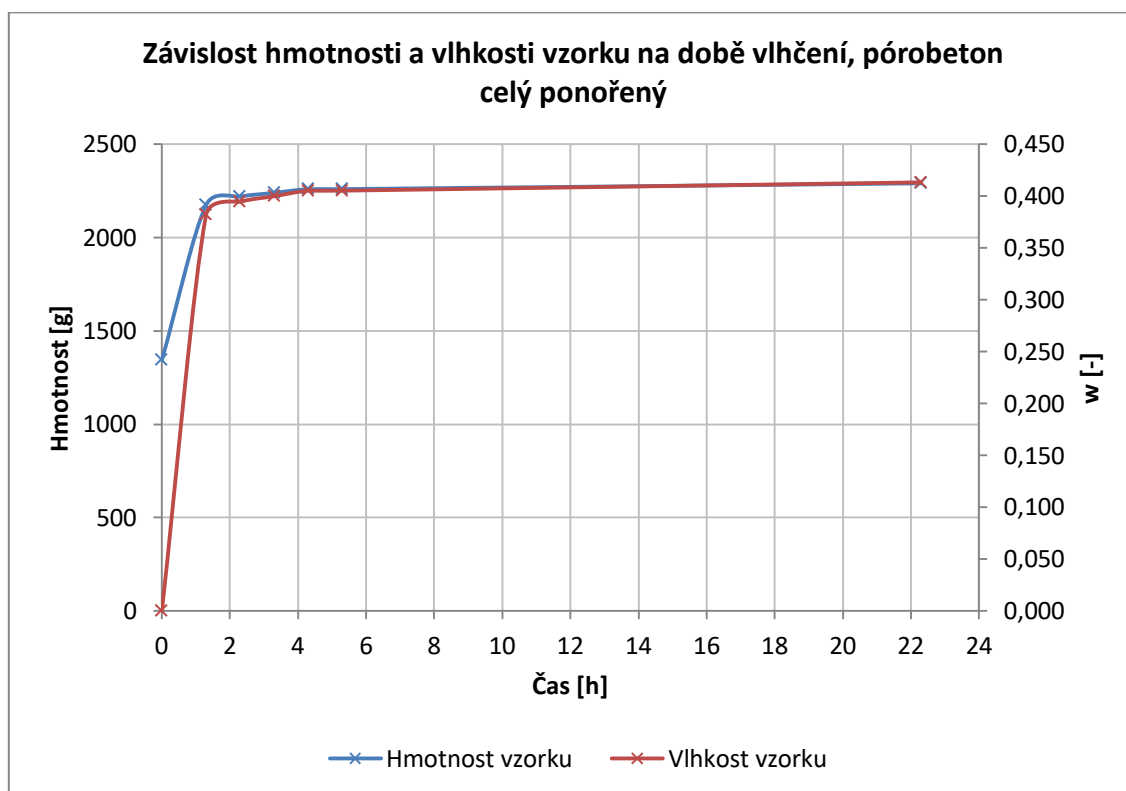
Obr. 17 – Experiment, ověření simulace gradientu

Časový průběh změny vlhkosti vzorků zachycuje Graf 18 a 19. Vlhkost byla určována gravimetrickou metodou. Při tomto pokusu byla pro stanovení hmotnosti použita digitální kuchyňská váha značky ETA. Výrazně přesnější laboratorní váha z předchozích experimentů nemohla být použita kvůli překročení maximální přípustné hmotnosti (limit do 300 g). Z těchto grafů můžeme usoudit, že pórobeton nebyl pro mé měření nejlepší volbou. U vzorku, který byl celý ponořený, došlo k saturaci téměř již po dvou hodinách namočení, následující přírůstek vlhkosti byl velmi malý. U vzorku s gradientem je situace o něco lepší, ale ani tam se vlhkost ke konci měření už moc neměnila. Navíc zde mohlo hrát větší roli

vypařování. Měl jsem zvolit buď jiný materiál, nebo upravit interval mezi jednotlivými měřeními (hlavně ze začátku).



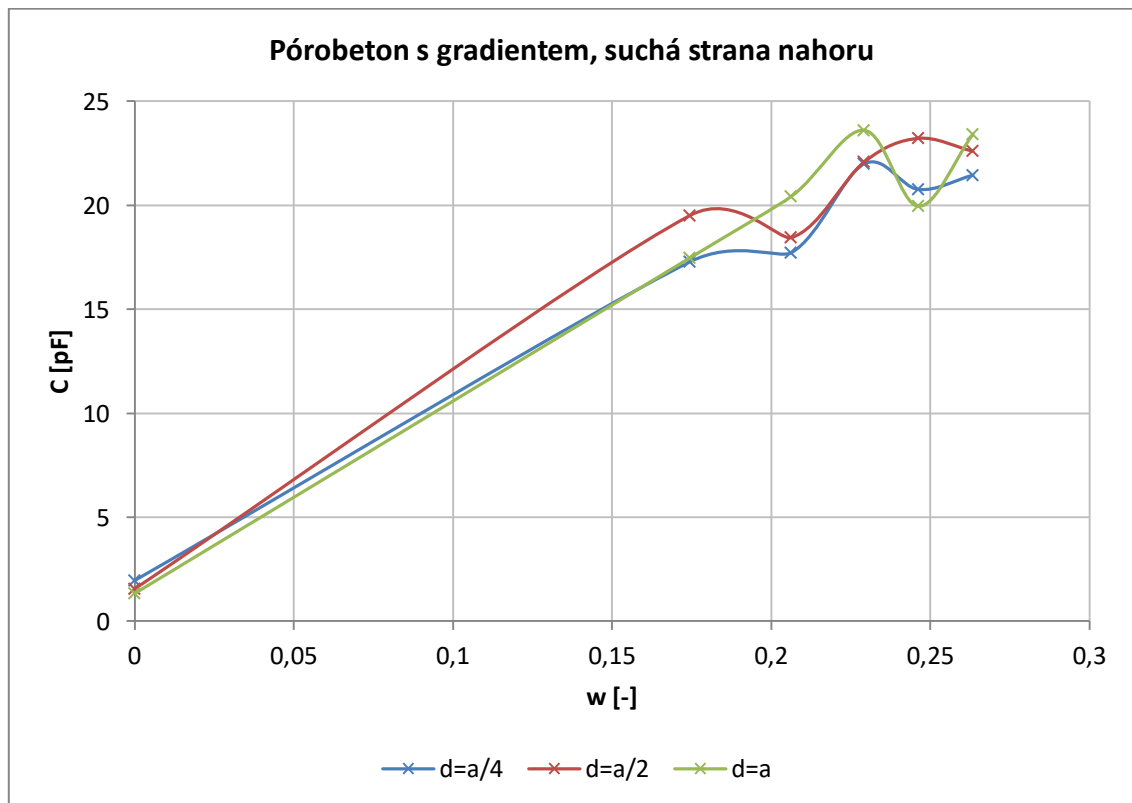
**Graf 18 - Závislost hmotnosti a vlhkosti vzorku na době vlhčení, pórobeton s gradientem**



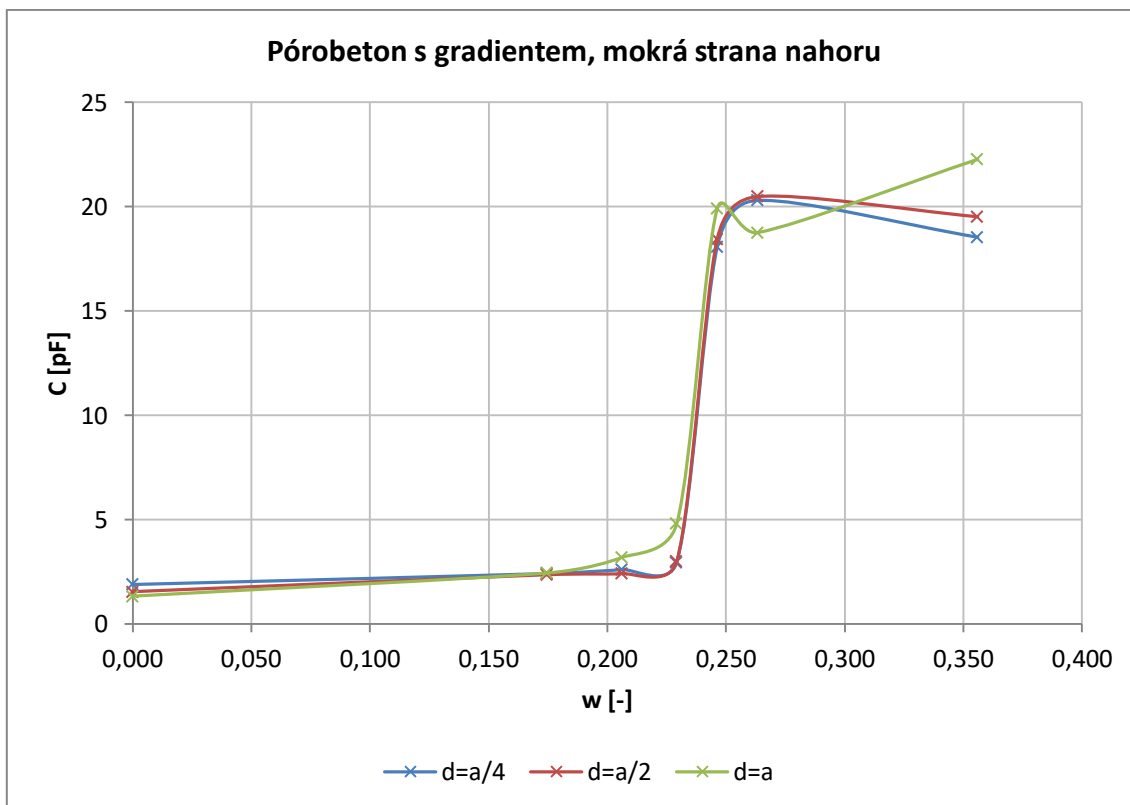
**Graf 19 - Závislost hmotnosti a vlhkosti vzorku na době vlhčení, pórobeton celý ponořený**

Měření kapacity pórobetonu probíhalo stejně jako u měření pěnového vzorku. K měření jsem použil elektrody o velikosti 8 x 8 cm a měřil jsem s nimi opět na třech roztečích. Opět jsem vyhodnocoval průměr pěti po sobě jdoucích naměřených hodnot. Naměřené hodnoty pro vzorek s gradientem obsahuje Graf 20 a 21.

Na začátku měření s již namočeným vzorkem se vyskytl problém při měření, kdy byla vlhčená strana v přímém kontaktu s elektrodami. Pravděpodobně díky velké vlhkosti na povrchu došlo ke zkratu mezi elektrodami a tím pádem jsem nenaměřil žádnou hodnotu. Proto Graf 20 ze začátku ukazuje poměrně zkreslená data, chybí první hodnota po namočení vzorku. Reálně by nárůst od nulové hodnoty vlhkosti neměl tak lineární nárůst, pravděpodobně by se více podobal tomu, co vidíme z Grafu 21. Pro zbylé kroky měření jsem si stihl připravit izolující vrstvu vyrobenou z lepicí pásky. Experimentálně jsem ozkoušel, že tato izolační vrstva nijak neovlivňovala měřenou hodnotu kapacity.



Graf 20 – Měření pórobetonu s gradientem, suchá strana nahoru



**Graf 21 – Měření pórobetonu s gradientem, mokrá strana nahoru**

Křížení jednotlivých charakteristik, které můžeme vidět u obou grafů je nejspíš způsobeno nehomogenitami samotného materiálu, nebo nehomogenním rozložením vlhkosti. Svou roli může opět hrát i přesnost umístování vzorku nad elektrody, protože v tomto případě nebyl vzorek o moc větší, než byla plocha elektrodového systému. Abychom mohli z měření vyvozovat nějaké závěry, muselo by být provedeno s většími vzorky stavebního materiálu a s jinými intervaly měření. Tohle měření by bylo vhodné provést i s jinými stavebními materiály.

## 5 PRAKTICKÉ OVĚŘENÍ MIKROVLNNÉ METODY

Pro ověření mikrovlnné metody jsem se rozhodl provést experiment se zařízením BOSCH D-Tect 100. Tohle zařízení je primárně určeno pro detekci vodičů, potrubí případně jiných předmětů uvnitř zdí. Naměřená data, což je hloubka a poloha, ve které se detekovaný objekt nachází, jsou graficky znázorněna na vestavěném displeji. V této podobě s přístrojem nejspíš nebude možné jakkoliv vyhodnocovat míru vlhkosti, ale chtěl bych ověřit, jestli přístroj na vlhkost nějak reaguje. Pokud by přístroj zvládl detekovat vlhká místa, dalo by se přístroj rozebrat a zkusit z něj dostat lepší data, než v podobě grafického znázornění na displeji.

Podle údajů od výrobce je přesnost zobrazené hloubky předmětu  $\pm 5$  mm. Stejná tolerance platí i pro přesnost určení polohy předmětu směrem ke středu. Minimální vzdálenost dvou objektů musí být větší než 40 mm. Zařízení může pracovat ve třech módech. Mode S detekuje předměty až do hloubky 6 cm, zobrazí duté struktury, které mají průměr větší než 2,5 cm. Mode 1 zachytí předměty v hloubce až 10 cm a hodí se pro měření v homogenních materiálech (např. beton). Mode 2 pracuje do hloubky 4 cm a zobrazí především elektrická vedení, obecně kovy a vodou naplněná potrubí. Sám výrobce udává, že přístroj může vlhké oblasti vyhodnotit jako falešný předmět [12].

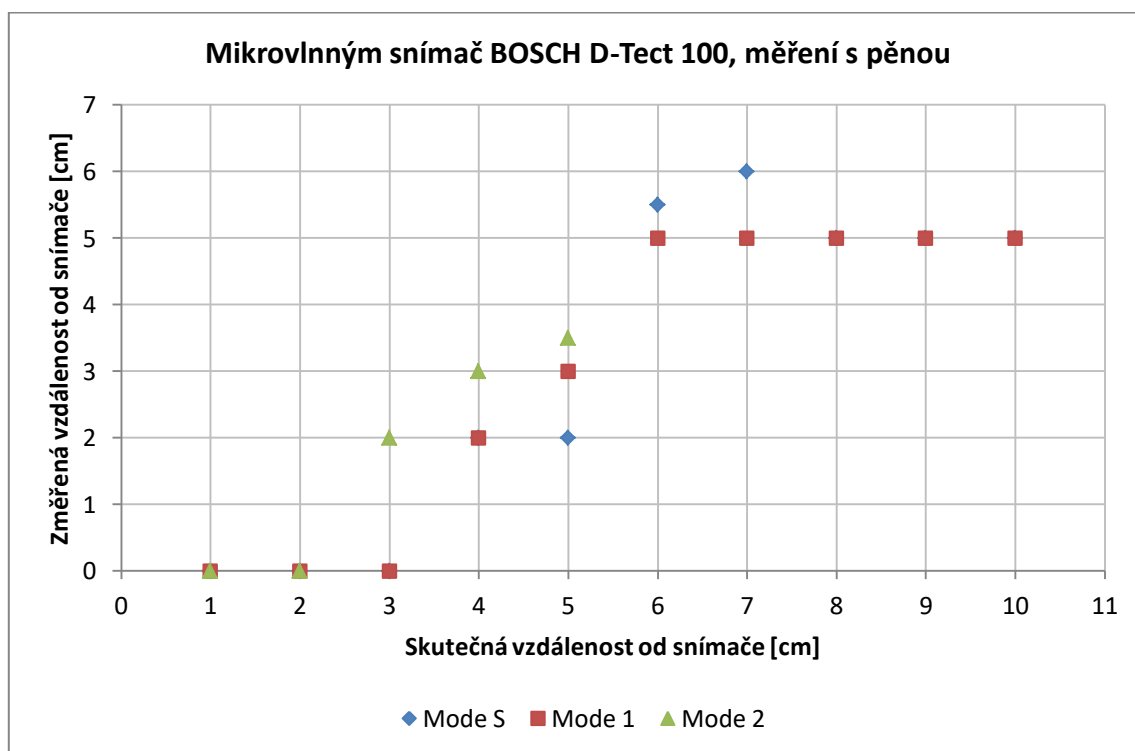
### 5.1 Měření pěnového vzorku

První měření jsem provedl podobně jako u kapacitní metody. Na stole jsem měl položených 15 jednocentimetrových polystyrenových desek, abych zajistil dostatečnou vzdálenost od desky stolu, aby ji snímač nedetekoval. Na těchto 15 desek jsem umístil vlhkou pěnu a na ni jsem postupně pokládal další desky, které už sloužily jako distanční podložky pro měření. Po těchto vrstvách jsem jezdil se skenerem (D-Tect 100) a sledoval naměřené hodnoty. Vlhkost detekovaného materiálu byla  $w = 0,846$ . Získané výsledky z měření obsahuje Tab. 27 a znázorňuje je Graf 22.

Z grafu vidíme, že snímač vlhkou vrstvu v podobě namočené pěnové utěrky zvládl detekovat, což je pozitivní. Tohle měření zatím nevyvrátilo teorii o možném použití tohoto přístroje pro měření vlhkosti. Musím však konstatovat, že snímač často detekoval vzorek v jiné vzdálenosti, než byla ta skutečná. Většinou se skutečná a měřená vzdálenost lišila o 1 a ž 2 cm.

Tab. 27 – Hodnoty naměřené mikrovlnným snímačem BOSCH D-Tect 100, měřeno s pěnou

Mikrovlnná metoda			
Skutečná vzdálenost [cm]	Změřená vzdálenost [cm]		
	mode S	mode 1	mode 2
1	0	0	0
2	0	0	0
3	0	0	2
4	2	2	3
5	2	3	3,5
6	5,5	5	x
7	6	5	x
8	5	5	x
9	5	5	x
10	5	5	x

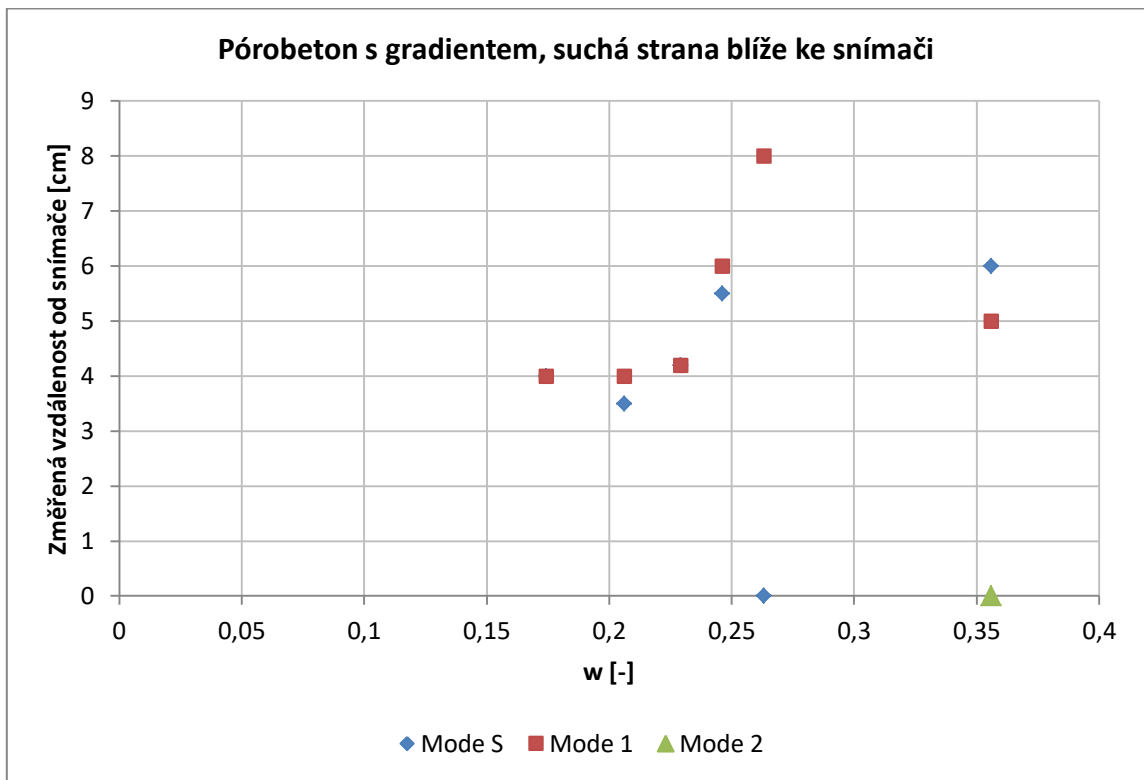


Graf 22 – Mikrovlnný snímač BOSCH D-Tect 100, měření s pěnou

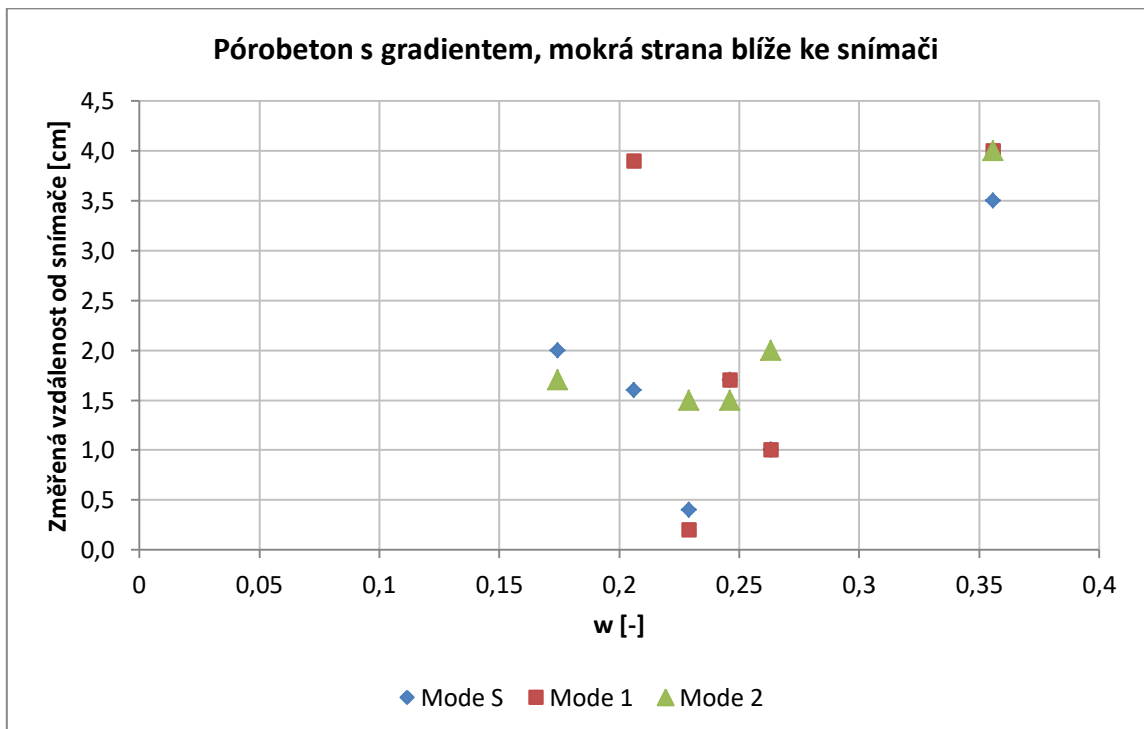
## 5.2 Měření vlhkosti pórobetonu

V předchozím měření jsem ověřil, že přístroj je schopný detekovat vlhkou vrstvu ve vzduchu (mezi vrstvami polystyrenu). Tohle měření by mělo ukázat, jestli rozpozná vlhkou oblast i uvnitř stavebního materiálu. Měření pórobetonu probíhalo zároveň při ověřování kapacitní metody. Vlhkost měřených vzorků v závislosti na době vlhčení zobrazuje Graf 18 a 19 v kapitole 4.2.6. Měření bylo

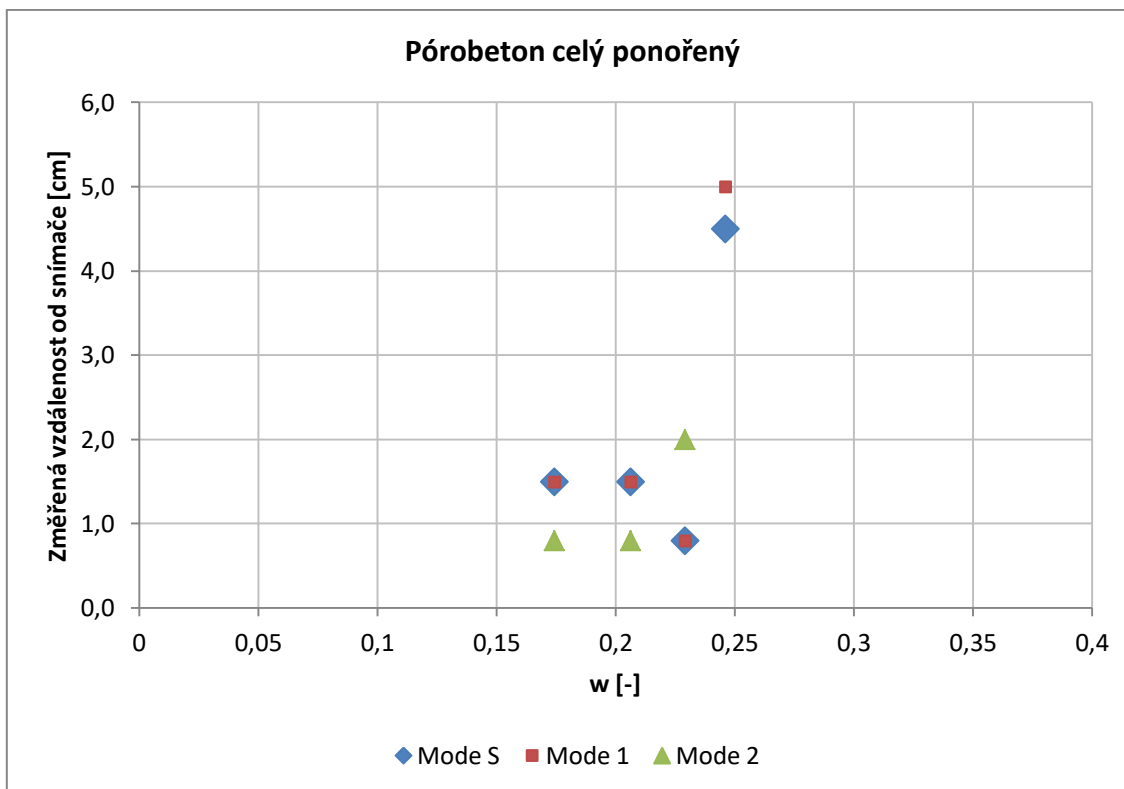
provedeno jak na vzorku s gradientem, tak na vzorku, který byl ponořen celý. Výsledky měření jsou vyneseny v Grafu 23 až 25.



Graf 23 – Mikrovlnné měření pórobetonu s gradientem, suchá strana u snímače



Graf 24 – Mikrovlnné měření pórobetonu s gradientem, mokrá strana u snímače



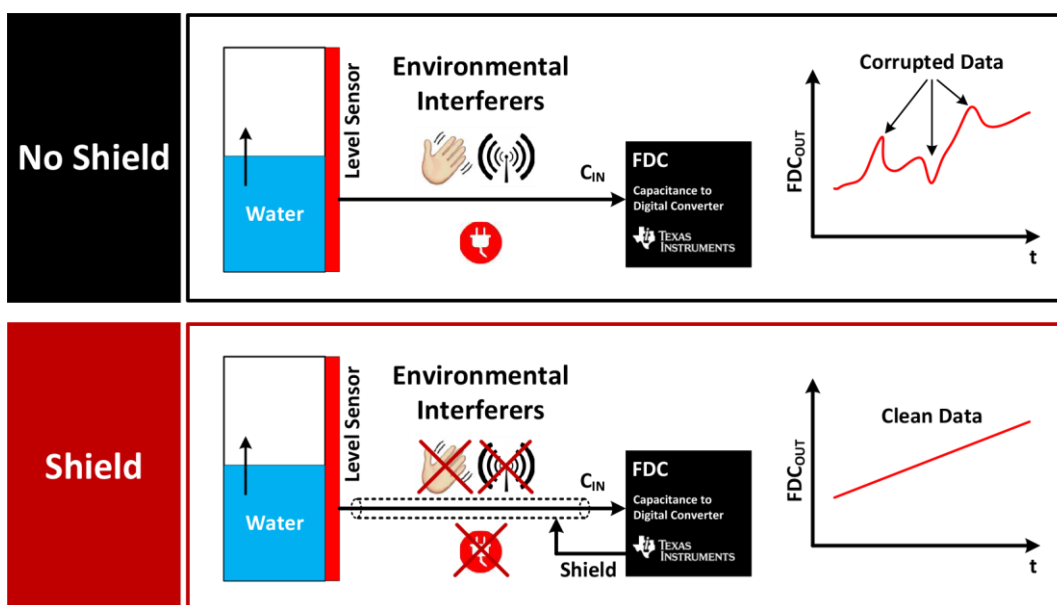
**Graf 25 – Mikrovlnné měření pórobetonu, celý ponořený**

Při pohledu na jednotlivé grafy vidíme, že přístroj je schopný detekovat vlhkost i uvnitř stavebního materiálu. Naměřené hodnoty však nemají žádný trend, který by souvisel s posouvajícím se přechodem vlhkosti uvnitř materiálu. Problém je, že difúze vlhkosti uvnitř materiálu nebude ve všech místech stejná. Tento přístroj ukáže vždy vzdálenost nejbližší detekovaného předmětu a to co je za ním, už nezměří. Vzhledem k teorii si myslím, že je to limitující faktor mikrovlnné metody a není to například zpracováním měřených dat. Na to, abych se více věnoval mikrovlnné metodě měření vlhkosti, mi však už nezbyl čas. Můžu tedy jen konstatovat, že pomocí mikrovlnné metody jsme opravdu schopní detekovat vlhkost ve stavebním materiálu, ale nedokážu vyhodnotit, jestli by se dala pomocí této metody sestavit mapa rozložení vlhkosti v objemu materiálu.

## 6 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ MĚŘENÍ

Výsledky, kterých jsem dosáhl během měření, nepřinesly rozhodující informaci, abych mohl říct, jestli je kapacitní nebo mikrovlnnou metodou možné určit rozložení vlhkosti v objemu materiálu. K samotným výsledkům se dostanu v závěru této práce, v této kapitole bych chtěl uvést možné příčiny, díky kterým měření nevycházela, jak předpověděla simulace.

U kapacitní metody hraje podstatnou roli aktivní stínění. Jedná se jak o samotné stínění zezadu a po stranách měřící elektrody, tak o stínění přívodních vodičů. Vliv stínění samotné elektrody byl znázorněn už dříve na Obr. 8. Na Obr. 18 můžeme vidět, jaký vliv může mít okolní rušení na naměřené hodnoty, pokud nezajistíme aktivní stínění i u přívodních vodičů. Aktivní stínění však není zcela dokonalé, pouze mírní vliv okolního rušení. Zkrácení přívodních vodičů na co nejkratší délku je také řešením, jak lze minimalizovat vliv parazitní kapacity. Já jsem při svých experimentech používal aktivní stínění vodičů i zadní strany elektrod. Dalo by se rozšířit i o stínění bočních stran měřící elektrody, abych ještě více zpřesnil oblast, kterou snímač zabírá.



Obr. 18 – Vliv stínění vodičů [10]

Dalším faktorem, který mohl ovlivňovat měření je rozložení vlhkosti v objemu měřeného vzorku. Při měřeních s pěnovou kuchyňskou utěrkou jsem nechal vzorek nasáknout tekoucí vodou z kohoutku. Následně jsem čtvercový vzorek přehnul na čtvrtiny a vymačkal přebytečnou vodu. Vzhledem k velké savosti materiálu předpokládám, že se vlhkost v celém objemu vyrovnala poměrně rychle a nevznikaly tak oblasti s výrazně větší nebo menší vlhkostí. Lepší by samozřejmě bylo, kdybych nechal vzorek natáhnout vlhkost třeba přes noc uvnitř

nádoby s definovanou vlhkostí prostředí. Vysychání vzorku v průběhu měření nehrálo podstatnou roli. Rozdíl mezi vlhkostí na začátku a na konci měření se pohyboval do 0,3%.

U měření s pórobetonem se zdálo, že v průběhu měření dochází ke stékání vody uvnitř měřeného vzorku. Tento fakt jsem zkusil proměřit s elektrodami o velikosti 8 x 8 cm při vzájemné vzdálenosti 4 cm. Hodnoty jsou v Tab. 28. Pokud se podíváme na počáteční a konečnou hodnotu, zjistíme, že se liší o 2,9%.

**Tab. 28 – Proměnlivost měřené hodnoty v čase**

Čas [s]	0	20	40	60	80
C [pF]	26,882544	26,718582	27,119833	27,373528	27,572329
Čas [s]	100	120	140	160	180
C [pF]	27,656841	27,791334	27,727098	27,684006	27,649914

$$\frac{C_{180}}{C_0} \cdot 100 = \frac{27,649914}{26,882544} \cdot 100 = 102,9 \%$$

Tento rozdíl není markantní, ale dílčí vliv bude mít a dal by se nejspíš poměrně snadno odstranit tím, že bychom vzorek po vytažení z vody nechali nejprve chvíli odstát.

**Tab. 29 – Rozptyl hodnot během měření s FDC1004QEV M**

<b>Elektrody o délce hrany <math>a = 8</math> cm, vzdálenost elektrod <math>d = a</math></b>			
<b>Vzdálenost vzorku [mm]</b>	<b>Min [pF]</b>	<b>Max [pF]</b>	<b><math>\delta_c</math> [%]</b>
1	1,301460	1,319201	1,36
2	0,939554	0,967800	3,01
3	0,802244	0,843842	5,19
4	0,727312	0,765316	5,23
5	0,682510	0,718779	5,31
6	0,636175	0,672691	5,74
7	0,589676	0,633865	7,49
8	0,604681	0,625078	3,37
9	0,575453	0,608988	5,83
10	0,578896	0,590542	2,01
11	0,561430	0,587265	4,60
12	0,557629	0,585026	4,91
<b>pouze vrstvy polystyrenu</b>	0,514708	0,535179	3,98
<b>zcela naprázdno</b>	0,521358	0,541174	3,80

Osobně největší problém vidím v proměnlivosti měřených hodnot modulem FDC1004QEV M. V podkapitole 4.2.4 jsem měřil 5 po sobě jdoucích hodnot a rozdíl mezi nejnižší a největší hodnotou naměřenou během těchto 5 měření není v několika případech vůbec malý. Jako zástupce jsem vybral hodnoty z Tab. 22, kde jsou hodnoty z měření s elektrodami o rozměrech 8 x 8 cm a vzdáleností elektrod 8 cm. Schválně jsem vybral tohle uspořádání měření, protože

tato charakteristika se nejvíce blížila simulovaným hodnotám. V každém řádku jsem vybral minimální a maximální hodnotu získanou během 5 po sobě jdoucích měření a zapsal ji do

Tab. 29. Následně jsem vypočetl podle rovnice (13), o kolik procent je hodnota maxima vyšší než hodnota minima.

$$\delta_c = 100 \cdot \frac{Max}{Min} - 100 \quad [\%] \quad (13)$$

Při pohledu do tabulky zjistíme, že téměř v polovině případů je rozdíl minima a maxima větší než 5 %. Jediný způsob, který mě napadá, jak tento jev minimalizovat, je v zajištění kvalitnějšího stínění a usměrnění měřené oblasti.

Jistou roli mohl hrát i rozměr měřeného vzorku vůči rozměrům elektrodového systému. Kdybych měl měření provést znovu, zajistil bych vzorek o větších rozměrech, aby zasahoval do větší části elektrického pole vytvořeného mezi elektrodami.

## 7 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce pojednává o měření vlhkosti se zaměřením na využití v oblasti stavebních materiálů. V obecné části týkající se vlhkosti jsou uvedeny jednotlivé druhy vazeb vody na materiál, což může mít podstatný vliv při měření vlhkosti. V teoretické části týkající se metod měření vlhkosti jsme si metody rozdělili na destruktivní a nedestruktivní a na metody přímé a nepřímé. Uvedli jsme si z nich ty základní a často používané.

Jako základní metodou pro kalibraci měřidel pracujících na jiných principech, můžeme označit metodu gravimetrickou. Je velice přesná, ale časově náročná a nevýhodou je i její destruktivní charakter. Dále jsme si uvedli metodu odporovou (vodivostní), která se také řadí mezi destruktivní, avšak nepřímé metody. Je to z toho důvodu, že do měřeného vzorku musíme zavést elektrody, kterými protéká proud a vlhkost je vyhodnocována z odporu měřeného materiálu. U této metody je dobré, aby byl měřící proud střídavý nikoliv stejnosměrný, jinak na elektrodách dochází k polarizaci.

Hlavním tématem této práce je kapacitní a mikrovlnná metoda měření vlhkosti a jejich potenciál pro zjištění rozložení vlhkosti v objemu materiálu. Tyto obě metody patří do skupiny nedestruktivních nepřímých metod. Hlavní rozdíl mezi nimi je ve frekvenci měřícího signálu. Mikrovlnná metoda používá signál v řádu jednotek až desítek GHz, zatímco signál kapacitní metody se pohybuje spíše do desítek MHz. Obě metody využívají faktu, že voda má elektricky odlišné vlastnosti oproti většině materiálů, ve kterých se nachází. Konkrétně jde o její vysokou relativní permitivitu  $\epsilon_r$ , která se při teplotě 20°C pohybuje kolem hodnoty 80, zatímco  $\epsilon_r$  ostatních materiálů se pohybuje kolem hodnoty 5. Obě metody budou mít problém, pokud se bude v měřené oblasti vyskytovat předmět, který má rovněž vysokou relativní permitivitu.

V praktické části jsem začal ověřováním kapacitní metody. V prvním kole jsem použil modul Raspberry Pi 2 spolu s kapacitními snímači pohybu od firmy Flick. Měření ukázalo, že tato sestava není pro měření vlhkosti vůbec vhodná. Výsledky neodpovídaly očekávaným představám a uspořádání elektrod na modulu Flick se ukázalo jako zcela nevhodné.

Kapacitní metodu jsem se dále rozhodl prakticky ověřit pomocí modulu FDC1004QEVm od firmy Texas Instruments, který je přímo určený pro měření kapacity. Jeho výhodou je snadné připojení k PC pomocí USB rozhraní, bez nutnosti většího nastavování můžeme ihned měřit. Modul má v sobě integrovaný jeden snímač, který je připojený k jednomu ze 4 měřících kanálů, které modul poskytuje. Ověřil jsem, že tento snímač není vhodný pro použití v mých experimentech. Vyrobil jsem si tedy vlastní elektrody z jednostranného cuprexitu. Pro první

měření, které mělo sloužit hlavně jako orientační, jestli má smysl pokračovat s touto sestavou, jsem použil elektrody o velikosti 12 x 12 cm a 4 x 4 cm. Z měření nevzešla žádná data, která by mělo smysl zpracovávat, ale ukázalo se, že má smysl s touto sestavou pokračovat v dalších experimentech. Uvědomil jsem si, že pro lepší opakovatelnost musím zajistit aktivně stíněný vodič, kterým je měřící elektroda připojena k modulu FDC1004QEVM.

Dalším krokem bylo vytvoření simulace v programu COMSOL Multiphysics. Před dalším rozsáhlejším měřením jsem chtěl celý experiment prověřit nejprve teoreticky. Simulace má tu výhodu, že získaná data jsou ideální, tzn. nejsou zkreslena např. okolím rušením. Dá se očekávat, že měřená data nebudou nikdy přesně taková, jako simulovaná, ale aspoň jsem věděl, jaké hodnoty bych měl při měření očekávat. U simulace bylo největším úskalím zjištění relativní permitivity vlhkého vzorku. Vyzkoušel jsem ji změřit více metodami, přičemž výsledky jednotlivých metod byly značně rozdílné. Rozhodl jsem se použít výsledek změřený kontaktní metodou bez izolovaných elektrod, protože se nejvíce blížil mým odhadům. Problém u měření permitivity měkkých materiálů je to, že se snadno stlačí, takže je těžké stanovit jejich přesnou tloušťku. Proto jsem výslednou  $\epsilon_r$  vzorku stanovil jako průměr dvou hodnot získaných při dvou různých tloušťkách. Do simulace jsem dosadil hodnotu  $\epsilon_r = 48,05$ . Výsledky simulace nejlépe shrnuje Graf 8 až 11. Ze simulace jsem zjistil, že při větší rozteči elektrod bych měl být schopný detekovat vlhkost ve větší vzdálenosti od elektrod. To je patrné hlavně z grafů ukazujících relativní měnu kapacity. Rovněž se ukázalo, že použití větších elektrod by mělo přispět k lepším výsledkům.

Následovalo měření, jehož výsledky jsem chtěl porovnávat se simulací. Měření jsem se pokusil provést co nejprecizněji, abych do měření nevnášel zbytečné chyby. Z tohoto důvodu jsem se i rozhodl výsledné hodnoty průměrovat z pěti po sobě jdoucích hodnot. Při pohledu na Graf 12 a 13 vidíme, že měření s elektrodami 4 x 4 cm nedopadlo zrovna podle očekávání. Z grafů není patrný téměř žádný trend, který by se podobal tomu ze simulace. U větších elektrod (Graf 14 a 15) dopadlo měření o něco lépe, avšak od simulace se průběhy pořád celkem lišily. S oběma elektrodami byly absolutní naměřené hodnoty nižší, než ty ze simulace. To by mohlo být způsobeno špatně změřenou relativní permitivitou vzorku, která byla dosazena do simulace, ale tvar trendů by to nemělo ovlivnit. Po tomto měření jsem se rozhodl přejít na experiment se stavebním materiálem.

Opět přišla řada na simulaci, ve které jsem si chtěl vytvořit uvnitř měřeného vzorku gradient vlhkosti. Gradient vlhkosti byl vyjádřen gradientem relativní permitivity. Zvolil jsem si několik strmostí přechodu, které jsem chtěl proměřit. Výsledná data jsou v Grafu 16 a 17. Z těchto dat jsem chtěl zjistit, jestli jsem schopný poznat, jakým směrem je gradient vlhkosti orientován. Orientaci

gradientu jsem se snažil vyvodit z poměru hodnot naměřených při různých roztečích elektrod. Bohužel však ani trend ani absolutní hodnota poměrů neposkytla žádnou informaci o rozložení vlhkosti v objemu materiálu a nenapadá mě jiné zpracování naměřených dat, které by mohlo ukázat něco jiného. Na základě tohoto faktu se domnívám, že není možné určit rozložení vlhkosti v objemu stavebního materiálu pomocí kapacitní metody. Mým měřením to však nemůžu ani s jistotou vyvrátit. Je možné, že vycházet z předpokladu, že uvnitř materiálu bude gradient vlhkosti lineární, je samo o sobě chybné. Třeba by výsledná data v případě jiného tvaru gradientu dopadla jinak. Na to jsem však už neměl čas, abych se tomu věnoval v této práci.

Nakonec proběhlo ještě jedno měření, ve kterém jsem měřil reálný vzorek stavebního materiálu (pórobetonu) s gradientem vlhkosti. Data z měření však opět neukazují žádný průběh, ze kterého by se dal vyvodit nějaký závěr (Graf 20 a 21). Data jsou ovlivněna nehomogenitami samotného materiálu, pohybu vody nasáklé uvnitř materiálu během měření a malými rozměry měřeného vzorku v porovnání s rozměry elektrodového systému. Tímto experimentem jsem ukončil praktickou část týkající se kapacitní metody.

Dalším krokem bylo ověření mikrovlnné metody měření vlhkosti. Použil jsem přístroj BOSCH D-TECT 100, který slouží na detekování drátů, potrubí a jiných předmětů uvnitř zdí. Tento přístroj není primárně určen k měření vlhkosti, ale pracuje na mikrovlnném principu. Sám výrobce uvádí, že vlhkost ve zdech může být zobrazena jako falešný objekt. Přístroj může měřit ve třech módech, přičemž jsem během měření nevyposoroval, že by byl nějaký pro detekci vlhkosti vhodnější než ostatní. Výstupní informace přístroje je v podobě vzdálenosti, ve které se objekt nachází od snímače. Úvaha byla taková, že kdyby se během měření ukázalo, že přístroj reaguje na vlhkost, mohl by se zkusit rozebrat a dostat z něj surové nezpracované hodnoty a ty vyhodnocovat po svém. První měření ukázalo, že přístroj na vlhký vzorek opravdu reaguje, změřená vzdálenost však moc neodpovídala skutečné vzdálenosti (Graf 22). Druhé měření bylo realizováno na vzorku pórobetonu. Při pohledu na Graf 23, 24 a 25 zjistíme, že přístroj byl schopný detekovat vlhkost i uvnitř stavebního materiálu, což by byl dobrý základ pro další měření. Hodnoty sice nemají žádný trend, který by např. znázorňoval postupný posun přechodu, ale to může být způsobeno i zpracováním dat v přístroji.

Z časových důvodů jsem se však k dalším experimentům s tímto přístrojem nedostal. Proto nemohu na základě měření rozhodnout, jestli by bylo možné použít mikrovlnný princip pro stanovení rozložení vlhkosti v objemu materiálu. Když však přihlédnu k teorii zmíněnou v kapitole 3.3, myslím, že ani mikrovlnná metoda nelze využít k tomuto účelu. Mikrovlnná metoda se používá buď způsobem, kdy

signál prostupuje měřeným vzorkem a měříme útlum procházejícího signálu (Obr. 3), nebo kdy se měří útlum odraženého signálu od povrchu měřeného vzorku (Obr. 4). V prvním případě dostaneme informaci o vlhkosti v celém objemu materiálu a nejsme schopní rozlišit, jestli byl signál více utlumen například na počátku nebo naopak ke konci své cesty skrz materiál. Ve druhém případě měříme spíš povrchovou vlhkost, to co je za vlhkou vrstvou se už nedozvíme. Na tento fakt upozorňuje i výrobce přístroje BOSCH D-TECT 100, že přístroj detekuje pouze nejbližší objekt, na který narazí, a co je za ním, nemůže detekovat.

Tuto bakalářskou práci bych uzavřel s tím, že se mi nepodařilo prokázat možnost využití kapacitní ani mikrovlnné metody pro zjištění rozložení vlhkosti v objemu stavebního materiálu. U mikrovlnné metody si myslím, že to není ani možné na základě teoretických parametrů této metody teorie. U kapacitní nemám dostatek dat, abych ji mohl s jistotou potvrdit nebo vyvrátit.

## LITERATURA

1. **Fexa, Josef a Široký, Karel.** *Měření vlhkosti.* Praha : SNTL, 1983.
2. **Dr. Ing. Wernecke, Roland a Wernecke, Jan.** *Industrial Moisture and Humidity.* Weinheim : Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2014. 978-3-527-33177-2.
3. **Kutílek, Miroslav.** *Vlhkost pórovitých materiálů.* Praha : SNTL, 1984.
4. **Dietsch, Philipp, a další, a další.** *Methods to determine wood moisture content and their applicability in monitoring concepts.* Berlin : Springer-Verlag, 2014. 10.1007/s13349-014-0082-7.
5. **Pinchin, Sarah Eleni.** *Techniques for monitoring moisture in walls, Studies in Conservation.* 2008. 10.1179/sic.2008.53.Supplement-2.33.
6. **Meyer, W a Schliz, W.** A microwave method for density independent determination of the moisture content of solids. *Journal of Physics D: Applied Physics.* 1980, Sv. 13, 10.
7. MGC3030/31303D TRacking and Gesture Controller Data Sheet. 2017. 978-1-5224-1910-5.
8. **Instruments, Texas.** SNOSCY5B. Dallas : autor neznámý, 2015.
9. —. SNAU178. *FDC1004QEVm User Guide.* Dallas : autor neznámý, 2015.
10. —. SNO926A. Dallas : autor neznámý, 2015.
11. **Keysight Technologies.** Operation and Service Manual. *16451B Dielectric Test Fixture.* 2014.
12. BOSCH D-tect 100 Návod.