

# **Mikrováhový senzor a možnosti jeho využitia**

Microbalance sensor and its possible usage

Bc. Katarína Okresová

---

Diplomová práca  
2010



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta aplikované informatiky

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta aplikované informatiky  
akademický rok: 2009/2010

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Katarína OKRESOVÁ**  
Osobní číslo: **A08531**  
Studijní program: **N 3902 Inženýrská informatika**  
Studijní obor: **Bezpečnostní technologie, systémy a management**

Téma práce: **Mikrováhový senzor a možnosti jeho využití**

Zásady pro vypracování:

1. Popište činnost mikrováhového senzoru.
2. Provedte teoretický popis činnosti krystalového oscilátoru.
3. Provedte rozbor možného použití mikrováhového senzoru pro detekci vybraných druhů látek.
4. Navrhněte a proveďte základní experimentální ověření vybrané metody měření.
5. Vypracujte modelovou úlohu s využitím získaných poznatků pro laboratoře FAI.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. QCM Quartz Crystal Microbalance: Operation and Service Manual . 2.0th rev. edition. U.S.A.: Stanford Research Systems, Inc., 2004. xii, 106s.
2. 25 th Anniversary Edition: Scientific and Engineering Instruments. U.S.A.: Stanford Research Systems, Inc., 2005.212 s.
3. C. Lu and A. W. Czanderna, Applications of Piezoelectric Quartz Crystal Microbalances, Elsevier, New York, NY, USA, 1984.
4. Biha J.: Malá encyklopedie chemie, SNTL, Praha 1976.
5. Veis Š.: Malá encyklopédia fyziky, Obzor, Bratislava 1970.

Vedoucí diplomové práce:

**doc. RNDr. Vojtěch Křesálek, CSc.**

Ústav elektroniky a měření

Datum zadání diplomové práce:

**19. února 2010**

Termín odevzdání diplomové práce:

**7. června 2010**

Ve Zlíně dne 19. února 2010

  
prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.  
děkan



  
doc. RNDr. Vojtěch Křesálek, CSc.  
ředitel ústavu

## **ABSTRAKT**

Práca teoreticky popisuje činnosť mikrováhového senzora a kremenného kryštálového oscilátora. Bola dokázaná vhodnosť metódy merania zmeny frekvencie kremenného kryštálového oscilátora na detekciu aerosolov v prostredí a kvantitatívne stanovenie ich hmotnosti uplatnením Sauerbreyho vzťahu. Na základe experimentálnych výsledkov bola vypracovaná modelová úloha pre laboratóriá FAI.

Kľúčové slová:

kremenný kryštálový oscilátor, piezoelektrický senzor, kremenný kryštálový mikrováhový senzor, Sauerbreyho rovnica, frekvencia, hmotnosť, aerosol

## **ABSTRACT**

The graduation theses describes the theoretical principles of Quartz Crystal Microbalance Sensor and Quartz Crystal Resonator. It was demonstrated that measuring method of the Quartz Crystal Microbalance Resonator frequency changes is suitable for detection of aerosols in environment and also for the quantitative determination of aerosols mass by Sauerbrey equation counting. On the ground of experimental results was designed a model lesson for FAI laboratories.

Keywords:

Quartz Crystal Resonator, Piezoelectric Sensor, Quartz Crystal Microbalance Sensor, Sauerbrey equation, frequency, mass, aerosol

Dovoľujem si vyjadriť poďakovanie svojim rodičom za morálnu podporu pri štúdiu a doc. RNDr. Vojtěchovi Křesálkovi, Csc. a Ing. Milanovi Navrátilovi Ph.D. za odborné znalosti, vedomosti a pripomienky poskytnuté pri spracovaní mojej diplomovej práce.

Motto:

„Dôležitá vec je neprestať sa pýtať.“

Albert Einstein

**Prehlasujem, že**

- beriem na vedomie, že odovzdaním diplomovej/bakalárskej práce súhlasím so zverejnením svojej práce podľa zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o zmene a doplnení ďalších zákonov (zákon o vysokých školách), v znení neskorších právnych predpisov, bez ohľadu na výsledok obhajoby;
- beriem na vedomie, že diplomová/bakalárska práca bude uložená v elektronickej podobe v univerzitnom informačnom systéme dostupná k prezenčnému nahliadnutiu, že jeden výtlačok diplomovej/bakalárskej práce bude uložený v príručnej knižnici Fakulty aplikovanej informatiky Univerzity Tomáša Bati v Zlíne a jeden výtlačok bude uložený u vedúceho práce;
- bol/a som zoznámený/á s tým, že na moju diplomovú/bakalársku prácu sa plne vzťahuje zákon č. 121/2000 Sb. o práve autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon) v znení neskorších právnych predpisov, hlavne § 35 odst. 3;
- beriem na vedomie, že podľa § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB v Zlíne právo na uzatvorenie licenčnej zmluvy o použití školského diela v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beriem na vedomie, že podľa § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona môžem použiť svoje dielo – diplomovú/bakalársku prácu alebo poskytnúť licenciu k jej využitiu len s predchádzajúcim písomným súhlasom Univerzity Tomáša Bati v Zlíne, ktorá je oprávnená v takomto prípade odomňa požadovať primeraný príspevok na úhradu nákladov, ktoré boli Univerzitou Tomáša Bati v Zlíne na vytvorenie diela vynaložené (až do ich skutočnej výšky);
- beriem na vedomie, že pokiaľ bol k vypracovaniu diplomovej/bakalárskej práce využitý softwar poskytnutý Univerzitou Tomáša Bati v Zlíne alebo inými subjektami len k študijným a výskumným účelom (teda len k nekomerčnému využitiu), nie je možné výsledky diplomovej/bakalárskej práce využiť na komerčné účely;
- beriem na vedomie, že pokiaľ je výstupom diplomovej/bakalárskej práce akýkoľvek softwarový produkt, považujú sa za súčasť práce aj zdrojové kódy, popr. súbory, z ktorých sa projekt skladá. Neodovzдание tejto súčasti môže byť dôvodom k neobhájeniu práce.

**Prehlasujem,**

- že som na diplomovej práci pracoval samostatne a použitú literatúru som citoval. V prípade publikácie výsledkov budem uvedený ako spoluautor.
- že odovzdaná verzia diplomovej práce a verzia elektronickej nahraná do IS/STAG sú totožné.

V Zlíne

.....  
podpis diplomanta

**OBSAH**

<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>I TEORETICKÁ ČASŤ</b> .....	<b>10</b>
<b>1 ČINNOSŤ MIKROVÁHOVÉHO SENZORA</b> .....	<b>11</b>
1.1 PRIAMY PIEZOELEKTRICKÝ JAV .....	11
1.2 NEPRIAMY PIEZOELEKTRICKÝ JAV .....	12
1.3 MONOKRYŠTÁL KREMEŇA.....	12
<b>2 TEORETICKÝ POPIS ČINNOSTI KRYŠTÁLOVÉHO OSCILÁTORA</b> .....	<b>17</b>
2.1 VYUŽITIE KRYŠTÁLOVÉHO OSCILÁTORA NA STANOVENIE ZMENY HMOTNOSTI.....	21
<b>3 POUŽITIE KREMENNÉHO MIKROVÁHOVÉHO SENZORA (QCM 200) NA DETEKCIU A STANOVENIE AEROSOLOV</b> .....	<b>25</b>
3.1 APLIKÁCIA KREMENNÉHO MIKROVÁHOVÉHO SENZORA NA ŠTÚDIUM AEROSOLOV .....	26
3.1.1 Rozdelenie aerosolov.....	26
3.1.2 Literárne poznatky – sledovanie aerosolov na princípe využitia kremenného mikrováhového senzora .....	27
<b>II PRAKTICKÁ ČASŤ</b> .....	<b>29</b>
<b>4 POPIS PRÍSTROJA QCM 200</b> .....	<b>30</b>
4.1 PREDNÝ PANEL QCM 200 .....	30
4.2 ZADNÝ PANEL QCM 200.....	31
4.3 UŽÍVATEĽSKÉ ROZHRAŇIE QCM 200 .....	32
<b>5 POPIS METÓDY MERANIA</b> .....	<b>34</b>
<b>6 POPIS USPORIADANIA A ZÁMER EXPERIMENTU</b> .....	<b>35</b>
6.1 POKUS Č.1 .....	35
6.2 POKUS Č.2 .....	36
6.2.1 Obranný sprej .....	37
6.3 POKUS Č.3 .....	38
6.4 POKUS Č.4 .....	38
6.5 POKUS Č.5 .....	39
<b>7 VÝPOČTY</b> .....	<b>41</b>
7.1 ZÁKLADNÉ VÝPOČTY.....	41
7.2 OSTATNÉ VÝPOČTY .....	41
<b>8 NAMERANÉ ÚDAJE</b> .....	<b>43</b>
8.1 POKUS Č.1 .....	43
8.1.1 Nádoba č.1 .....	43
8.1.2 Nádoba č.2.....	45
8.1.3 Nádoba č.3 .....	48
8.2 POKUS Č.2 .....	52
8.2.1 Nádoba č.1 .....	52
8.2.2 Nádoba č.2.....	56
8.2.3 Nádoba č.3.....	59

8.3	POKUS Č.3 .....	60
8.3.1	Nádoba č.1 .....	61
8.3.2	Nádoba č.2 .....	62
8.3.3	Nádoba č.3 .....	63
8.4	POKUS Č.4 .....	63
8.5	POKUS Č.5 .....	65
<b>9</b>	<b>VYHODNOTENIE NAMERANÝCH ÚDAJOV.....</b>	<b>67</b>
9.1	POKUS Č.1 .....	67
9.1.1	Nádoba č.1 .....	67
9.1.2	Nádoba č.2 .....	67
9.1.3	Nádoba č.3 .....	68
9.1.4	Celkové vyhodnotenie výsledkov pokusu č.1 .....	69
9.2	POKUS Č.2 .....	69
9.2.1	Nádoba č.1 .....	69
9.2.2	Nádoba č.2 .....	70
9.2.3	Nádoba č.3 .....	70
9.2.4	Celkové vyhodnotenie výsledkov pokusu č.2 .....	71
9.3	POKUS Č.3 .....	73
9.3.1	Nádoba č.1 .....	73
9.3.2	Nádoba č.2 .....	74
9.3.3	Nádoba č.3 .....	74
9.3.4	Vyhodnotenie výsledkov pokusu č.3 .....	74
9.4	POKUS Č.4 .....	75
9.5	POKUS Č.5 .....	75
<b>10</b>	<b>MODELOVÁ ÚLOHA PRE FAI.....</b>	<b>77</b>
	<b>ZÁVER.....</b>	<b>78</b>
	<b>CONCLUSION.....</b>	<b>80</b>
	<b>ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY .....</b>	<b>82</b>
	<b>ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK .....</b>	<b>85</b>
	<b>ZOZNAM OBRÁZKOV .....</b>	<b>86</b>
	<b>ZOZNAM TABULIEK.....</b>	<b>89</b>
	<b>ZOZNAM PRÍLOH.....</b>	<b>90</b>



## ÚVOD

Kremenný mikrováhový senzor ako ho dnes poznáme pracuje na princípe piezoelektrického javu. Ako piezoelektrický materiál využíva kremenný kryštál. Tento jav bol objavený Curieovcami v roku 1880 a v súčasnosti je základom pre mnohé aplikácie. Prvý kremeňom riadený oscilátor bol popísaný v roku 1921. Táto vtedy nová technológia sa postupne vyvíjala až do roku 1959. V tomto roku nastal prielom vo vytváraní prístroja vhodného pre meranie veľmi malých hmotností. Sauerbrey predstavil prácu, vďaka ktorej poznáme súčasný kremenný mikrováhový senzor, ktorý je označovaný aj ako ultracitlivý senzor hmotnosti.

V diplomovej práci sa zaoberám získaním teoretických a hlavne praktických poznatkov o kremennom mikrováhovom senzore QCM 200 od firmy Stanford Research Systems, Inc.

Cieľom je zamerať sa na možné použitie senzora, prioritne na detekciu a meranie aerosolov v prostredí, vrátane prevedení skúšobných meraní. Výsledky meraní je možné aplikovať do výuky na FAI a do odbornej praxe v oblasti bezpečnostných technológií. Využitie kremenného mikrováhového senzora môžeme rozdeliť do dvoch úrovní, a to ako aplikácie, ktoré už boli v literatúre popísané a ako aplikáciu, ktorá vyplýva z výsledkov meraní v diplomovej práci.

## I. TEORETICKÁ ČASŤ

## 1 ČINNOSŤ MIKROVÁHOVÉHO SENZORA

Mikrováhový senzor QCM200 firmy SRS Stanford Research Systems, USA je extrémne citlivý senzor na stanovenie hmotnosti na jednotku plochy na základe merania zmeny frekvencie kremenného kryštálového rezonátora QCM25. Je to v podstate zariadenie, ktoré má schopnosť merať veľmi malé zmeny hmotnosti na kremennom kryštáli rezonátora v reálnom čase. Citlivosť senzora je približne 100 krát vyššia ako u elektronických jemných váh s citlivosťou 0,1mg. To znamená, že kremenný mikrováhový senzor je schopný merať zmeny hmotnosti také malé, ako zlomok monomolekulárnej vrstvy, alebo jednej vrstvy atómu [1].

Hlavnou súčasťou senzora je piezoelektrický kremenný kryštál s AT rezom umiestnený medzi dvojicou elektród. Pokiaľ sú elektródy pripojené na oscilátor a elektródami prechádza striedavé elektrické napätie, kremenný kryštál začne kmitať na jeho rezonančnú frekvenciu pre piezoelektrický efekt. Kmitanie je všeobecne veľmi stabilné, kvôli vysokej kvalite oscilácie (vysoký Q faktor) [1].

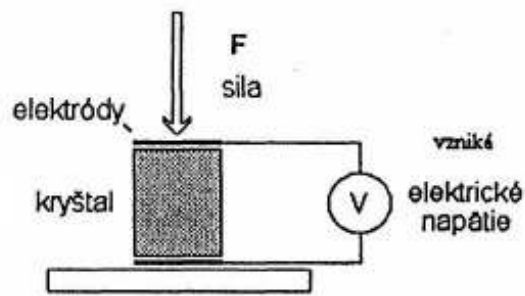
Uvedený rezonátor pracuje na princípe tzv. piezoelektrického javu. Piezoelektrický jav objavili u niektorých kryštalických látok manželia Curieovci v roku 1880. Následne v roku 1881 Lipmann objavil opačný jav oproti priamemu piezoelektrickému javu a nazval ho nepriamy piezoelektrický jav.

Fyzika pozná 2 typy piezoelektrického javu:

- priamy piezoelektrický jav,
- nepriamy piezoelektrický jav [2].

### 1.1 Priamy piezoelektrický jav

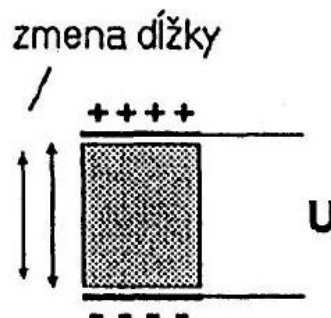
Pôsobením mechanického tlaku na nesymetrický dielektrický materiál dochádza k deformácii kryštálovej mriežky (deformujú sa molekuly, z ktorých je kryštál zložený), zároveň sa posúvajú elektrické náboje v jeho štruktúre, pričom vzniká viazaný statický elektrický náboj. Veľkosť elektrického náboja je priamo úmerná pôsobiacemu tlaku. Polohy častíc sa s nábojom zmenia a na protiľahlých plochách kryštálu tak vzniknú rovnako veľké opačné náboje. Elektrónový obal sa deformuje a preto sa elektróny posunú v smere pôsobiacej sily [3].



Obr. 1. Priamy piezoelektrický jav [3]

## 1.2 Nepriamy piezoelektrický jav

Ide o opačný piezoelektrický jav oproti priamemu piezoelektrickému javu. Pri privedení dostatočne veľkého napätia k elektródam kryštálu sa zmenia jeho rozmery. Vonkajšie elektrické pole spôsobí posunutie iontov a to vedie k deformácii kryštálu. Zmeny rozmeru kryštálu sú doprevádzané zvukom. Pri napojení kryštálu na striedavé napätie je možné týmto spôsobom získať zdroj zvuku alebo ultrazvuku. Frekvenciu zvuku ovplyvníme materiálom kryštálu a frekvenciou pripojeného striedavého elektrického napätia. Po vypnutí napätia sa kryštál vracia do pôvodného stavu [3].



Obr. 2. Nepriamy piezoelektrický jav [3]

## 1.3 Monokryštál kremeňa

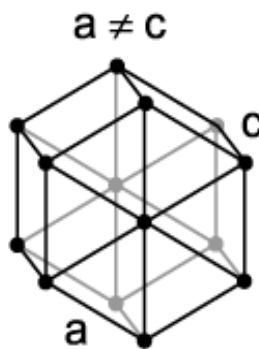
Princípom piezoelektrického javu v kryštáli kremeňa všeobecne je pôsobenie mechanického napätia (sily) na kryštálovú mriežku. Pritom dochádza popri elastickej deformácii mriežky, bežnej aj u iných materiálov, aj k elektrickej polarizácii kryštálu a teda k zmene rozloženia elektrického náboja na povrchu kryštálu. Tento povrchový náboj indukuje opačné náboje, ktoré možno odvieŕať do vonkajšieho elektrického obvodu.

Opačne, ak sa kryštál polarizuje vonkajším elektrickým poľom, dochádza v dôsledku posuvu nábojov k elastickej deformácii kryštálovej mriežky, pohybu na povrchu kryštálu a k vyvodu vonkajšej sily. Tieto javy sú navzájom recipročné a vo veľkom rozsahu pôsobiacich účinkov (mechanického alebo elektrického) lineárne a bez relaxačných dejov. Piezoelektrické vlastnosti každého takéhoto materiálu sú jeho vnútornou vlastnosťou a závisia od teploty. Nad určitou teplotou (tzv. Curieho teplotou) zanikajú [4, 5, 6].

Závislosť medzi pôsobiacou silou a nábojom je lineárna. V dôsledku odvádzania náboja vonkajším elektrickým obvodom sa takto vytvorený kondenzátor postupne vybíja a preto sa jav nehodí na sledovanie statických dejov. Jav je vhodný výlučne na sledovanie dynamických dejov (periodických, náhodných a prechodových). Zároveň vonkajší elektrický obvod musí čo najmenej zaťažovať kryštál, t.j. odoberať z citlivého prvku čo najmenej energie. Musí teda vykazovať extrémne vysoký vnútorný odpor, blízky izolačnému odporu bežných elektronických prvkov [4, 5, 6].

Mnokryštál kremeňa, chemicky  $\text{SiO}_2$ , ktorý kryštalizuje v hexagonálnej kryštalografickej sústave, sa začal používať ako prvý kryštalický rezonátor [6, 7].

- hexagonálna (šestorečná) sústava

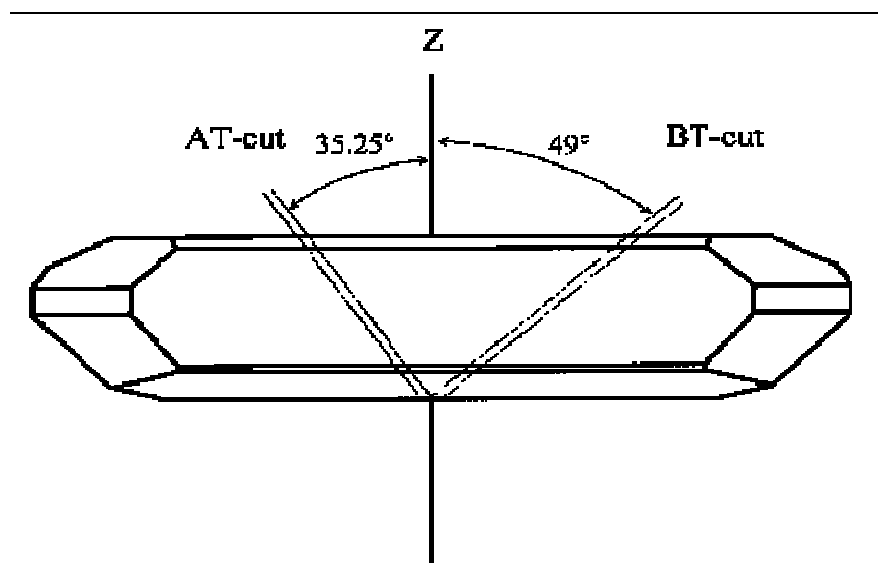


Obr. 3. Hexagonálna sústava

Piezoelektrický jav vzniká len v kryštalických štruktúrach bez strednej symetrie. Piezoelektrické materiály patria do skupiny dielektrických materiálov so spontánnou elektrickou polarizáciou. Na výrobu sa používa materiál, ktorý v kryštalickej mriežke obsahuje kladné aj záporné ióny. Kryštál sa vybrúsi tak, že na jednej ploche sú sústredené kladné náboje a na druhej záporné náboje. Z vonkajšieho pohľadu sa výbrus stáva zdrojom elektrostatického poľa, ktorého intenzita závisí na plošnej povrchovej hustote nábojov a na vzdialenosti nábojov vnútri materiálu [8].

Ak sa z monokryštálu kremeňa vyreže doštička špeciálnym rezom, tzv. AT rezom, vzniká pri pôsobení dvojice síl v dvoch smeroch tzv. pozdĺžny piezoelektrický jav a tzv. priečny piezoelektrický jav. Vektor elektrickej polarizácie je v oboch prípadoch rovnobežný s elektrickou osou kryštálu. Pri pôsobení sily v smere optickej osi nedochádza k elektrickej polarizácii [4]. V praxi sa tiež využíva tzv. šmykový piezoelektrický jav, ktorý vykazuje väčšiu citlivosť a menšiu závislosť od teploty [4, 5, 6]. Výbrus z kremenného kryštálu má vysokú mechanickú stálosť a malé vnútorné trenie [5].

Smer rezu cez kremenný kryštál určuje finálne vlastnosti kryštálového oscilátora (QCM) [9].



Obr. 4. AT a BT rez kremenným kryštálom [9]

Rezonančný obvod so zaradeným kremenným kryštálom tvorí oscilátor s veľmi vysokou kvalitou a s veľmi stálou frekvenciou, ktorej stabilita sa dá ovplyvniť technológiou výroby kryštálu, spôsobom rezu kryštálového výbrusu a spôsobom montáže do úchytky. Tzv. piezoelektrická kryštálová jednotka, t.j. zapuzdrený kremenný kryštál (angl. „quartz”) tvorí súčasť väčšiny prevádzkových oscilátorov na meranie času, frekvencie a odvodených veličín (ako sú digitálne hodiny, merače frekvencie, kryštálom riadené oscilátory, sekundárne časové normály a pod). Zapuzdrený kremenný kryštál pracuje v sériovej alebo paralelnej rezonancii s vonkajším, relatívne jednoduchým, elektronickým obvodom [6].

Vzhľadom na ťažkosti pri výrobe kremenných monokryštálov a ich nízkej piezoelektrickej konštante sa objavil a vytvoril celý rad ďalších materiálov s piezoelektrickými vlastnosťami:

- kryštalické materiály:  $\text{SiO}_2$ , triglycinsulfát, Seignettova soľ (vínan sodno-draselný),
- polykryštalické materiály: titaničnan barnatý ( $\text{BaTiO}_3$ ),
- titaničnan olovnatý  $\text{PbTiO}_3$  a tuhé roztoky typu titaničnan-zirkoničnan olovnatý,
- organické polyméry, z ktorých sa ako perspektívny javí polyvinylidéndifluorid – PVDF [4, 5, 6, 10].

Všetky uvedené materiály vykazujú závislosť vlastností od teploty. Táto skutočnosť je obyčajne nežiadúca a musí sa vhodným spôsobom kompenzovať. Na druhej strane sa táto skutočnosť tiež využíva na meranie teploty v tzv. kryštalovom teplomeri. Pri tomto snímači teploty sa merajú malé zmeny rezonančnej frekvencie kremenného kryštálu v závislosti od teploty a tieto zmeny sa vyhodnocujú pomocou frekventomera s veľmi presným a teplotne stabilizovaným oscilátorom. Dosahuje sa rozlíšenie lepšie ako  $10^{-3}\text{K}$  [5,6].

K uvedenému treba ešte doplniť, že číry kremeň a tavený kremeň majú zároveň významné optické vlastnosti, okrem iného prepúšťajú viditeľné, ultrafialové i blízke infračervené žiarenie. Vykazujú optický dvojlom a polarizáciu svetla, čo sa využíva napr. pri fyzikálno-chemickej analýze látok [6].



Obr. 5. Prírodný kremeň

V skorších dobách bol kremenný kryštál do kryštalového oscilátora rezaný z prírodného kremeňa. Jeho vlastnosti boli rôzne. Najkvalitnejší kremeň sa doloval v Brazílii. V súčasnosti sa kremenné kryštály vyrábajú synteticky. Kryštalizácia sa uskutočňuje v alkalickom roztoku  $\text{SiO}_2$  v autokláve pri tlaku 1000 atm [11]. Vo svete sa vyrába viac ako 2 milióny kremenných kryštálov ročne [12].

Kremenné kryštály sa vyrábajú pre frekvencie od niekoľko desiatok kHz do desiatok MHz. Táto frekvencia sa obyčajne využíva na meranie času, poskytuje stabilný časový signál pre digitálne integrované obvody, stabilizuje frekvenciu pre rádiové vysielacie a prijímače. Väčšinou sa kremenné kryštály využívajú na meranie času v náramkových hodinkách, hodinách, ďalej v počítačoch, telefónoch, ale aj v mnohých meracích prístrojoch, ako sú počítadlá, generátory signálu, osciloscipy a pod [12].

Kremenný kryštál sa využíva aj v mikrováhovom senzore (QCM) na meranie extrémne malých zmien hmotnosti, viskozity látok, štúdium viskoelastických vlastností látok, štúdium interakcií medzi biomolekulami, štúdium vlastností väčších molekúl, ako sú polyméry, proteíny a pod. a mnohé ďalšie aplikácie [13].

Kremenný kryštál má v porovnaní s inými piezoelektrickými materiálmi prednosť, že zmenu frekvencie od teploty má veľmi nízku. Špecifické charakteristiky kremeného plátku oscilátora sú závislé od režimu vibrácie a od uhla, v akom je kryštál rezaný [11]. Rezonančná frekvencia plátku kremenného kryštálu je pomerne stabilná. Je závislá hlavne od jeho veľkosti. Pre kritické aplikácie sa kremenný oscilátor montuje do zariadení s kontrolovanou teplotou, alebo do zariadení, v ktorých je zabránené mechanickým externým vibráciám [13].

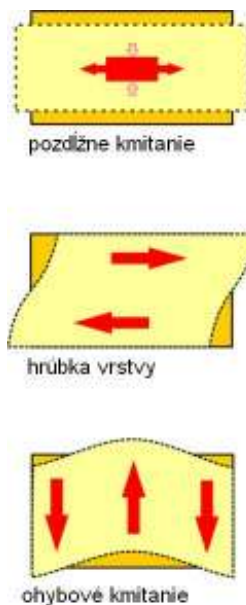


Obr. 6. Miniaturný 4MHz kremenný kryštál v hermetickom obale využívaný ako rezonátor v kryštalickom oscilátore [12]



## 2 TEORETICKÝ POPIS ČINNOSTI KRYŠTÁLOVÉHO OSCILÁTORA

Kryštálový oscilátor je elektronický obvod, ktorý využíva mechanickú rezonanciu vibrácie kryštálu z piezoelektrického materiálu, čím vytvára elektrický signál s veľmi presnou frekvenciou. Najčastejšie sa ako piezoelektrický rezonátor používa kremenný kryštál [12]. V závislosti od tvaru kryštálu a umiestnenia elektród je možné získať rozličné módy vibrácií. Rezonancia frekvencie kremenného kryštálu je závislá od fyzikálnych vlastností kremenného kryštálu, ako sú jeho hustota, hrúbka a tvar rezu, zároveň je vnútorne veľmi stabilná. Ak sa niektorý z týchto parametrov zmení, rezonancia frekvencie rezonátora sa taktiež zmení.

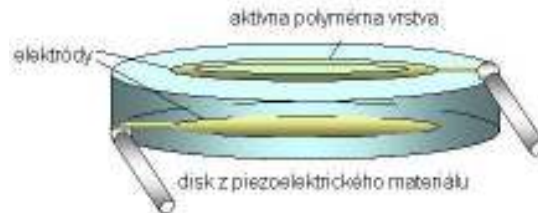


Obr. 7. Kmitanie kryštálového oscilátora [12]

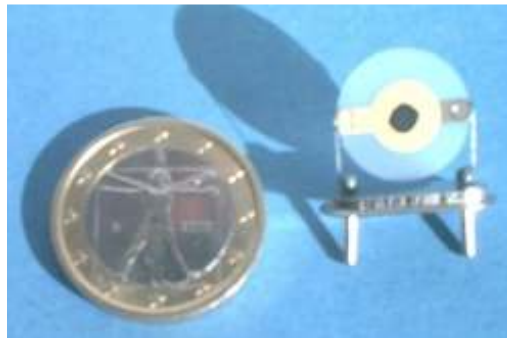
Najdôležitejším prvkom v kryštálovom oscilátore QCM (Quartz Crystal Microbalance) je piezoelektrický kryštál kremeňa konštruovaný vo forme disku, ktorý je komponentom určujúcim frekvenciu. V súvislosti s piezoelektrickými vlastnosťami kryštálu kremeňa oscilácia v kremennom kryštáli je ľahko indukovaná aplikáciou elektrického poľa cez elektródy [14].

Typická štruktúra QCM senzora je znázornená na obr. 8. Ako vidno z obr. 8, kremeň má tvar disku s dvomi zlatými elektródami na protíahlých stranách povrchu kryštálu. Elektródy sú konštruované z materiálu z drahých kovov, ako sú zlato, platina alebo striebro. Na povrchu jednej elektródy je nanesená aktívna vrstva, obyčajne z kovového

alebo polymérneho materiálu. Tieto senzory sa veľmi ľahko vyrábajú, nie sú drahé, pracujú pri teplotách okolitého prostredia, poskytujú veľmi spoľahlivé výsledky. Avšak stabilita polymérnej vrstvy je vo všeobecnosti nižšia, ako vrstvy z oxidov kovov, preto senzory s vrstvou z polymérnych materiálov rýchlejšie stáru [30].



Obr. 8. Znázornenie štruktúry kremenného kryštálového senzora [30]



Obr. 9. Štruktúra kremenného kryštálového senzora [30]

Hodnota rezonančnej frekvencie QCM senzora je závislá na dvoch charakteristikách, a to rezonančnej frekvencii kryštálu a senzitivity povrchovej vrstvy. Charakteristická rezonančná frekvencia kryštálu je v rozsahu MHz. Usadzovanie materiálu na povrchovú vrstvu zapríčiňuje zmenu v rezonančnej frekvencii. Napr. ak sa usadzuje látka na povrch kryštálového senzora, rezonancia frekvencie sa zníži.

Rovnako je možné citlivo registrovať aj injektáž plynnej fázy pomocou citlivej vrstvy na povrchu elektródy, pričom molekuly plynnej fázy sa sorbujú na senzitivný film na povrchu. Plyn je často injektovaný za súčasnej kontroly rýchlosti toku plynnej fázy. Takto je možné senzor používať na mnohé aplikácie a zároveň variácie merania hmotnosti rôznych skupenstiev látok [30].

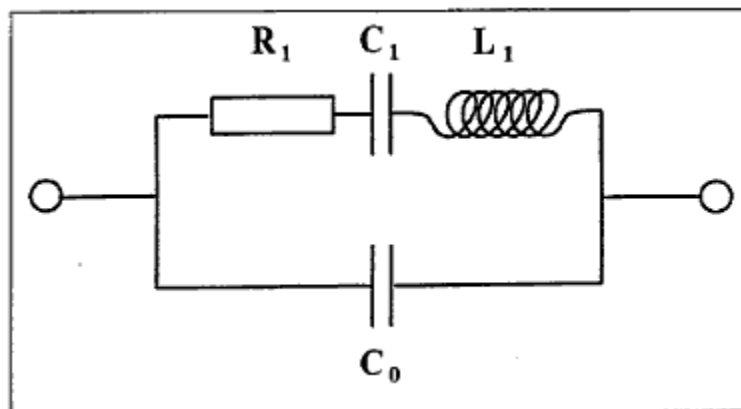
Všeobecne meracie systémy založené na QCM senzore sa zapájajú do oscilačných obvodov.

Elektrický obvod pre kryštalický oscilátor navrhol Butterworth-van Dyke, tzv. BVD model [14].

BVD model kryštalického oscilátora je znázornený na obr. 10. Obvod je platný pre vibrácie rezonátora v tenkej vrstve blízkej k základnej rezonančnej frekvencii oscilátora v prostredí vzduch. Jednotlivé premenlivé veličiny sú:

- $R_1$  - odpor – hodnota odporu zodpovedá strate oscilačnej energie nosiča a prostredia v kontakte s nosičom (kryštálom). Straty sú vyvolané viskozitou prostredia,
- $C_1$  - kondenzátor – hodnota  $C_1$  zodpovedá akumulovanej energii oscilácie a je úmerná elasticite kryštálu,
- $L_1$  – indukčná cievka – hodnota indukcie zodpovedá zotrvačnej energii oscilácie a je úmerná zmene hmotnosti počas vibrácie,
- $C_0$  – zodpovedá statickej kapacite prístroja vznikajúcej medzi elektródami  
V prípade modelu QCM200 je hodnota  $C_0$  približne 20pF.

Typické hodnoty odporu pre 5MHz kryštál sú nasledovné:  $R_1$ (pre suchý kryštál)  $10\Omega$ ,  $R_1$  (pre suchý kryštál jednou stranou vo vode)  $400\Omega$ ,  $R_1$  (pre suchý kryštál a jednou stranou v 85% glycerole)  $3500\Omega$  [9,15].



Obr. 10. BVD ekvivalentný model kryštalického oscilátora pre prostredie vzduch

[9]

Zmena frekvencie sérií rezonancií je veľmi senzitívny indikátor zmeny hmotnosti ( $L_1$ ). Touto metódou sú spoľahlivo stanovené filmy látky s hmotnosťou nižšou ako  $1 \text{ ng/cm}^2$ . Premennivý odpor  $R_1$  poskytuje ďalšie veľmi dôležité informácie súvisiace s viskozitou látky.

Kremenný kryštálový oscilátor môže byť modelovaný ako elektrický obvod s nízkou impedanciou (sériovo) a vysokou impedanciou (paralelne) rezonancie spoločne. Matematicky (použitím Laplaceovej transformácie) je možné impedanciu obvodu popísať:

$$Z(s) = \left( \frac{1}{s \cdot C_1} + s \cdot L_1 + R_1 \right) \parallel \left( \frac{1}{s \cdot C_0} \right) \quad (1)$$

alebo

$$Z(s) = \frac{s^2 + s \frac{R_1}{L_1} + \omega_s^2}{(s \cdot C_0) \left[ s^2 + s \frac{R_1}{L_1} + \omega_p^2 \right]} \Rightarrow \quad (2)$$

$$\omega_s = \frac{1}{\sqrt{L_1 \cdot C_1}}, \quad (3)$$

$$\omega_p = \sqrt{\frac{C_1 + C_0}{L_1 \cdot C_1 \cdot C_0}} = \omega_s \sqrt{1 + \frac{C_1}{C_0}} \approx \omega_s \left( 1 + \frac{C_1}{2C_0} \right) \quad (C_0 \gg C_1) \quad (4)$$

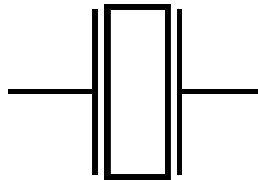
Kde  $s$  je komplexná frekvencia ( $s = j\omega$ ),

$\omega_s$  je sériová rezonančná frekvencia v radiánoch za sekundu,

$\omega_p$  je paralelná rezonančná frekvencia v radiánoch za sekundu.

Kremenný kryštál poskytuje obe rezonancie, sériové aj paralelné. Sériové rezonancie sú o niekoľko kHz nižšie, ako paralelné. Kryštály pod 30 MHz všeobecne oscilujú medzi sériovou a paralelnou rezonanciou, čo znamená, že sa prejavuje účinok induktívnej reaktancie. Každý ďalší prídavný obvod kapacitného odporu zapríčiní pokles frekvencie nadol. Pri paralelnej rezonancii kryštál osciluje na úrovni jeho špecifickej frekvencie. Elektronický obvod poskytuje celkový paralelný kapacitný odpor, ktorý je udávaný výrobcom kryštálu. Kryštály nad 30 MHz (do 200 MHz) všeobecne oscilujú v sériovej rezonancii, kde sa prejavuje minimálna impedancia rovnajúca sa sérii odporov. Pre tieto kryštály je špecifická séria odporov ( $< 100 \Omega$ ), namiesto paralelného kapacitného odporu.

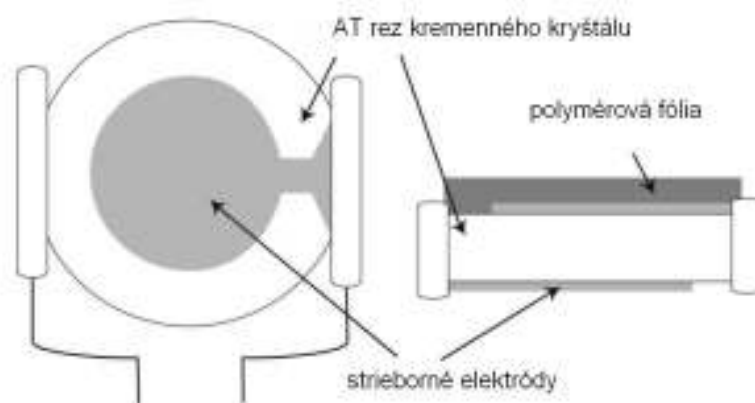
Pri dosiahnutí vyššej frekvencie kryštál môže vibrovať vo vyššom tóne, ktorý sa prejavuje ako viacnásobok základnej rezonančnej frekvencie. Používajú sa niekoľkonásobné násobky základnej rezonančnej frekvencie. Na dosiahnutie uvedeného javu oscilačný okruh obyčajne obsahuje dodatočné LC obvody na selekciu jednotlivých požadovaných tónov.



Obr. 11. Elektronický symbol piezoelektrického kryštálového rezonátora [12]

## 2.1 Využitie kryštálového oscilátora na stanovenie zmeny hmotnosti

Súvislosť medzi hmotnosťou a frekvenciou študoval Sauerbrey [16], ktorý ako prvý navrhol rovnicu na kvantitatívne meranie hmotnosti látky sedimentovanej na kryštalický piezoelektrický rezonátor na základe merania poklesu frekvencie, ktorá pritom nastáva. Neskôr bol vyvinutý prístroj vhodný na stanovenie extrémne malých zmien hmotnosti pomocou merania zmeny frekvencie kryštalického oscilátora a bol nazvaný QCM - Quartz Crystal Microbalance, tj. mikrováhový kremenný kryštál.



Obr. 12. Schématické znázornenie kremenného kryštálu používaného v kremennom mikrováhovom senzore

Jednou z prvých aplikácií mikrováhového kremenného kryštálu bolo meranie hrúbky vrstvy látky nanesej na povrch kryštálu vo vákuu. Vzťah medzi nanesenou vrstvou látky a frekvenciou popisuje Sauerbreyho rovnica [16]. Sauerbreyho rovnica neplatí v týchto prípadoch:

- pridaná hmota (hmotnosť) nie je pevne umiestnená na povrchu elektród,
- pridaná hmota (hmotnosť) nie je rovnomerne uložená na povrchu elektród,
- pridaná hmota (hmotnosť) sa pohybuje po povrchu elektród.

Preto je Sauerbreyho rovnica aplikovateľná len na jednotný, pevný tenký povlak sedimentu [1]. Uvedený matematický vzťah bol odvodený nasledovne:

Kmitočtový posun je vyvolaný tenkou vrstvou, ktorá je pevne umiestnená na kryštáli. Tento jav je popísaný rovnicou, kde  $u_0$  je amplitúda oscilácie a  $m_F$  je priemer hmotnosti na jednotku plochy.

$$\frac{\Delta f^*}{f_f} \approx \frac{i}{\pi Z_p} \frac{-w^2 u_0 m_{\nu_0 F}}{i w u_0} = -\frac{2f}{Z_q} m_F \quad (5)$$

Ak je hmotnosť vzorky známa, môžeme upraviť hmotnosť na jednotku plochy  $m_F$  na hrúbku  $d_F$ . Hrúbku takto odvodenú tiež nazývame Sauerbreyho hrúbka, ktorá bola odvodená zo Sauerbreyovej rovnice pre kmitočtový posun. Pokiaľ Sauerbreyho rovnica platí, je posun šírky pásma nulový. Kontrola šírky pásma je teda kontrola použiteľnosti rovnice. Sauerbreyho rovnica teda koreluje zmeny vo frekvencii kmitania hmotnosti piezoelektrického kryštálu.

Pretože vzorka je upravená ako rozšírenie hrúbky, Sauerbreyho rovnica platí len pre systémy, v ktorých:

- deponovaná hmotnosť má rovnaké akustické vlastnosti ako kryštál,
- zmeny frekvencie sú malé  $\Delta f/f < 0,05$  (zmena frekvencie je menšia ako 5%).

Pokiaľ je zmena frekvencie väčšia ako 5% musí byť použitá metóda na určenie zmeny hmotnosti:

$$\tan\left(\frac{\pi \Delta f}{f_f}\right) = \frac{-Z_F}{Z_q} \tan(k_F d_F) \quad (6)$$

$k_F$  je vlnový vektor vnútri vzorky a  $d_F$  je hrúbka, pričom

$$k_F = 2 \cdot \pi \cdot f / c_F = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \rho_F / Z_F \quad (7)$$

$$d_F = m_F / \rho_F \quad (8)$$

$$\Delta f = -\frac{f_f}{\pi} \left( \arctan \frac{Z_F}{Z_q} \tan \left( \frac{2\pi f}{Z_F} m_F \right) \right) \quad (9)$$

Výsledky Sauerbreyho práce sú obsiahnuté v rovnici na určenie zmeny hmotnosti na jednotku plochy, ktoré sú pozorované na povrchu elektród ako zmeny oscilačnej frekvencie kryštálu.

Zjednodušený zápis Sauerbreyho rovnice:

$$\Delta f = -\frac{f_0^2}{N \cdot \rho_4} \cdot \Delta m \quad (10)$$

kde  $\Delta f$  je zmena frekvencie

$f_0$  je nulová rezonancia frekvencie kryštálu,

$N$  (1670 kHz mm) je frekvenčná konštanta,

$\rho_4$  hustota kremeňa (2,648 g.cm<sup>-3</sup>),

$\Delta m$  je zmena hmotnosti látky na jednotku plochy.

Mínusové znamienko v rovnici indikuje, že prírastok hmotnosti na povrchu kryštálu zapríčiňuje zníženie frekvencie oscilácie. Vzhľadom na to, že všetky konštanty je možné fyzikálne určiť, vzťah medzi frekvenciou a zmenou hmotnosti je absolútny. Keď fyzikálne konštanty látok zhrnieme do jednej spoločnej konštanty, môžeme Sauerbreyho rovnicu zapísať v tvare:

$$\Delta m = \frac{\Delta f}{-c_f} \quad (11)$$

alebo v tvare:

$$\Delta f = -c_f \cdot \Delta m \quad (12)$$

kde  $\Delta f$  sú pozorované zmeny frekvencie, [Hz],

$\Delta m$  je zmena hmotnosti na jednotku plochy, [g/cm<sup>2</sup>],

$c_f$  je faktor citlivosti vzhľadom k použitému kryštálu ([56,6 Hz μg<sup>-1</sup>cm<sup>2</sup>] pre 5 MHz kremenný kryštál s AT – rezom pri izbovej teplote (pre prístroj oscilátor QCM25, použitý v našich meraniach).

Teoreticky QCM hmotnostný detektor nevyžaduje kalibráciu [16].

Sauerbreyho rovnica bola vyvinutá pre osciláciu vo vzduchu a aplikovateľná len na konštantnú vrstvu usadenú na povrchu kryštálu. Bolo dokázané, že mikrováhový senzor sa môže použiť aj v kvapalinách. V tomto prípade bola Kanazawom a Gordonom [17] pozorovaná závislosť viskozity kvapaliny od zníženia rezonančnej frekvencie oscilátora podľa rovnice:

$$\Delta f = -f_0^{3/2} (\eta_l \rho_l / \pi \rho_{pq} \mu_q)^{1/2} \quad (13)$$

kde  $\rho_l$  je hustota kvapaliny,

$\eta_l$  je viskozita kvapaliny [17].



### 3 POUŽITIE KREMENNÉHO MIKROVÁHOVÉHO SENZORA (QCM 200) NA DETEKCIU A STANOVENIE AEROSOLOV

Vysoká citlivosť a monitorovanie zmien hmotnosti v reálnom čase na kryštálovom senzore vytvára z kremenného mikrováhového senzora technicky veľmi atraktívny prístroj pre veľký rozsah aplikácií. Významný je rozvoj senzora pre použitie v kvapalinách alebo štúdium viskózne elastických vrstiev [1].

Všeobecne možno mikrováhový senzor využiť na nasledovné aplikácie:

- Monitorovanie vrstvy tenkej hrúbky za rôznych podmienok (teplota, e-lúče, rozprašovanie, magnetické pole, ionizácia, laserové pole).
- Elektrochémia medziplošných procesov na povrchu elektród.
- Biotechnológia
  - interakcie medzi DNA a RNA s doplnkovými štandardmi,
  - špecifické rozpoznávanie proteinových ligánd nepohyblivých receptorov, imunologické reakcie,
  - detekcia vírusov, baktérií, savčích buniek,
  - súdržnosť buniek, lipozómov a bielkovín,
  - biokompatibilita povrchov,
  - formovanie a prevencia formovania biovrstiev.
- Funkčné povrchy
  - vytváranie selektívnych povrchov,
  - lipidové membrány,
  - polymérne povlaky,
  - reaktívne povrchy,
  - GSA senzory,
  - imunosenzory.
- Vytváranie tenkých vrstiev
  - Langmuirove a Langmuirovo-Blodgettové vrstvy,
  - zhromaždené monovrstvy,
  - polyelektrolytická absorbcie,
  - točivý povlak,
  - vytváranie dvojvrstvy,
  - absorbované monovrstvy.

- Výskum surfaktantov
  - interakcie surfaktantu s povrchmi,
  - účinnosť surfaktatov.
- Výskum liečiv
  - rozklad polymérnych povlakov,
  - molekulárne interakcie liečiv,
  - citlivosť bunky na farmakologické substancie,
  - podávanie liečiv.
- Kvapalný povlak a rytiny.
- Monitorovanie maziva a ropných vlastností na ich prirodzenom mieste.
- Optické povlaky.
- Rôzne ďalšie aplikácie [1].

### **3.1 Aplikácia kremenného mikrováhového senzora na štúdium aerosolov**

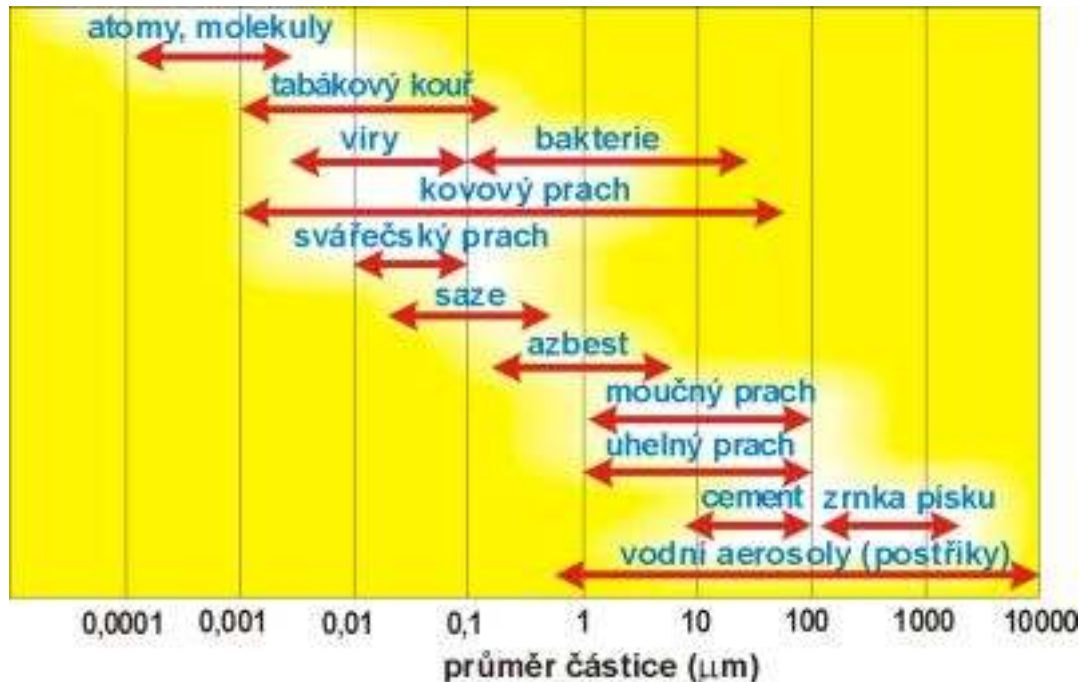
Aerosol je všeobecne definovaný ako heterogénna zmes malých častíc, a to pevných alebo kvapalných v plyne. V prípade pevných častíc v plyne hovoríme o dyme, v prípade kvapalných o hmle. Častice aerosolu majú veľkosť od  $10^{-8}\text{m}$  do  $10^{-4}\text{m}$  [18].

Aerosoly vznikajú rôznymi spôsobmi. Jedná sa o vznik prírodnou cestou, dispergačnou a kondenzačnou cestou.

#### **3.1.1 Rozdelenie aerosolov**

Aerosoly sa delia podľa viacerých kritérií:

1. Podľa vzniku
  - disperzné (dym),
  - kondenzačné (hmla).
2. Podľa pôvodu
  - prirodzené (zvírený prach),
  - umelé (priemysel).
3. Podľa veľkosti
  - najmenšie sú víry a proteíny,
  - najväčšie dažďové kvapky [19].



Obr. 13. Jednotlivé velikosti aerosolových částic [20]

### 3.1.2 Literárne poznatky – sledovanie aerosolov na princípe využitia kremenného mikrováhového senzora

Princíp kremenného mikrováhového senzora sa v súčasnosti široko využíva vo veľkom počte komerčných analyzátorov na sledovanie aerosolov v ovzduší. Napríklad California Measurements, Inc. ponúka 10 stupňový kaskádový analyzátor na princípe kremenného mikrováhového senzora PC-2 (Quartz Crystal cascade impactor, QCM) [21, 22], ktorý bol použitý na monitorovanie distribúcie častíc v aerosole veľkosti od 0,05 do 25 μm aerodynamického priemeru. Kalibrácia analyzátoru je limitovaná v prípade častíc menších ako 0,5 μm. Podobne bol predstavený QCM analyzátor Model 3000 (California Measurements, Inc. ) na sledovanie aerosolov pri tlaku 59 až 88 torrov, čo zodpovedá podmienkam v stratosfére, snímaním na palube lietadla. Existuje mnoho ďalších verzií analyzátorov na princípe QCM od uvedeného výrobcu na monitorovanie aerosolov v ovzduší v reálnom čase, ako aj na farmaceutické využitie [22].

Ďalej bol v práci [23] študovaný QCM (Quartz Crystal Mikrobalance) analyzátor na príklade merania monodisperzného aerosolu kyseliny olejovej a porovnávaný s optickým čítačom častíc. Bola zistená veľmi dobrá zhoda nameraných výsledkov použitím oboch metód.

Andersenov kaskádový analyzátor na princípe QCM bol využitý na stanovenie veľkosti častíc inhalovanej dávky [21]. Pomocou neho bol študovaný efekt surfaktantov prítomných v inhalovanej dávke, efekt filmu naneseného na povrch kryštálového senzora, zahĺtenie povrchu kryštálového senzora časticami a úlet častíc z povrchu kryštálového senzora. Bol vyvinutý nový citlivý systém [24] s využitím dvoch kremenných kryštálových senzorov s nanosenou vrstvou hydrogelu na meranie koncentrácie a distribúcie častíc v prúde vzduchu. Hydrogel bol odskúšaný ako spoľahlivý film na zachytávanie častíc aerosolu. Uvedený systém bol využitý ďalej na meranie hmotnosti zachytených častíc na základe zmeny rezonančnej frekvencie.

V práci [25] bola použitá meracia metóda na princípe kremenného kryštálového senzora na sledovanie aerosolov v ovzduší v priemyselnej pobrežnej oblasti Visakhapatnamu v Indii. Získali sa veľmi zaujímavé výsledky poukazujúce na interakciu vlhkého vzduchu vejúceho z mora s priemyselnou emisiou za následnej tvorby častíc v ovzduší procesom kondenzácie a vlastnej koagulácie. Zvyšovaním vlhkosti vzduchu sa zvyšovala hmotnostná koncentrácia nových častíc aerosolu v ovzduší sub-mikrónových rozmerov.

QCM senzor bol integrovaný do nového nekomplikovaného systému na meranie aerosolov na princípe adsorpcie na rozhraní para-kvapalina a následnej detekcie na základe zmeny rezonančnej frekvencie. Systém bol navrhnutý na detekciu výbušnín a narkotík. Detekcia heroínu a kokaínu bola prezentovaná s veľmi spoľahlivými výsledkami [26].

V práci [27] sú porovnávané rôzne metódy detekcie chemických zbraní, taktiež sa diskutuje možnosť využitia QCM senzora na daný účel.

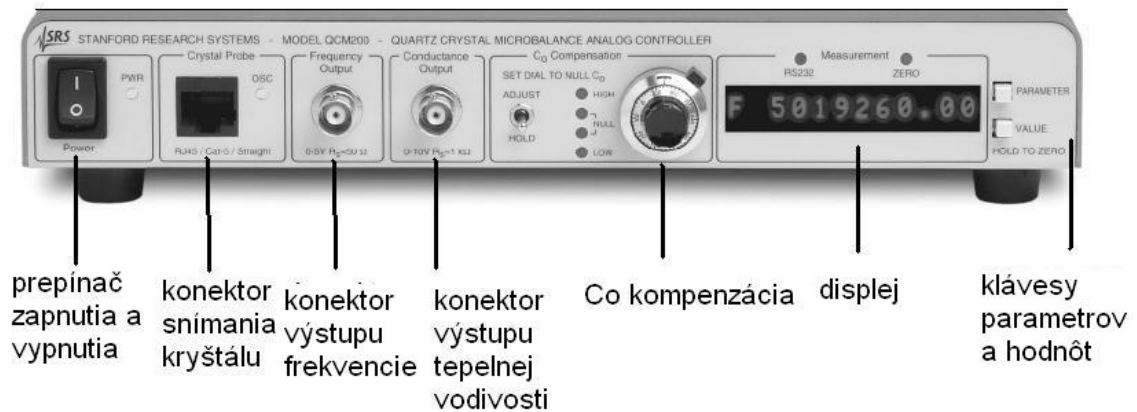
Uvedený literárny prehľad je len názornou ukážkou a príkladom využitia princípu mikrováhového kryštálového senzora v celej škále aplikácií od monitorovania aerosolov v ovzduší v reálnom čase na báze komerčných analyzátorov, cez vedecké štúdie aerosolov v atmosfére, až po detekciu drog a narkotík, včítane detekcie chemických zbraní. Uvedený literárny prehľad len v krátkosti poukazuje na nespočetné možnosti využitia kryštálového senzora v súčasnosti a potenciál rozvoja tejto metódy v budúcnosti vďaka jej vysokej citlivosti a reprodukovateľnosti nameraných údajov.

V diplomovej práci sa venujem meraniu aerosolov vody, merania sú podrobne popísané v ďalších kapitolách.

## II. PRAKTICKÁ ČASŤ

## 4 POPIS PRÍSTROJA QCM 200

### 4.1 Predný panel QCM 200



Obr. 14. Predný panel QCM 200

#### 1. Prepínač zapnutia a vypnutia

Prepínač slúži na zapnutie alebo vypnutie prístroja. LED dióda signalizuje, že prístroj je zapnutý.

#### 2. Konektor snímania kryštálu

Funkciou konektora snímania kryštálu je spojenie meracieho prístroja QCM 200 s kryštálovým oscilátorom QCM 25. LED dióda (OSC) signalizuje prítomnosť oscilačného kryštálu v obvode.

#### 3. Konektor výstupu frekvencie

Konektor výstupu frekvencie je výstup frekvencie kryštálového oscilátora. Signál má TTL úroveň a zdrojový odpor 50Ω. Výstup sa používa na spojenie s voliteľnou externou frekvenciou.

#### 4. Konektor výstupu mernej tepelnej vodivosti

Konektor výstupu mernej tepelnej vodivosti je výstup signálu mernej tepelnej vodivosti ( $V_C$ ), ktorý súvisí so sériou rezonančných odporov kryštálu QCM. Zdrojová impedancia je 1kΩ. Výstup sa používa na spojenie s externým vysoko presným multimetrom.

#### 5. $C_0$ kompenzácia

Prepínač je dostupný v sade meracieho prístroja v nastaviteľnom režime pre nulovanie  $C_0$ . 10 otočení číselníka ovláda predpätie potrebné pre kryštálový oscilátor QCM 25 na nulovanie  $C_0$ . Štyri LED diódy poskytujú vizuálnu informáciu o nulovaní  $C_0$ .

#### 6. Displej

Jedná sa o alfanumerický LED displej, ktorý zobrazuje frekvenciu, hmotnosť a odpor v priebehu merania. Pomocou displeja môže prebiehať nastavenie jednotlivých nástrojov.

#### 7. Klávesy parametrov a hodnôt

Klávesy parametrov a hodnôt sa používajú na vybraný režim displeja, nastavenie programových inštrumentov a pri nulovom relatívnom odpore (relatívnej frekvencii). Klávesy sa tiež používajú na ovládanie v menu systému.

## 4.2 Zadný panel QCM 200



Obr. 15. Zadný panel QCM 200

#### 1. RS-232

QCM 200 je štandardizovaný s RS-232 komunikačným portom. Rozhranie konektoru je štandardizované. Komunikačné parametre sa nemenia.

#### 2. Konektor výstupu analógovej frekvencie

Konektor výstupu analógovej frekvencie je vlastne výstup lineárneho elektrického napätia v súvislosti s frekvenciou displeja meracieho prístroja QCM 200. Úrovně elektrického napätia sú v rozmedzí od 0V do  $\pm 10V$  jednosmerného prúdu

a zdrojová impedancia je  $1k\Omega$ . Výstup sa používa aj na spojenie externého A/D vstupného konektora pre EQCM aplikácie.

### 3. Konektor externého 10 MHz vstupu

Tento konektor sa využíva pre extrémne náročné aplikácie. Pre bežné účely sa používa konektor výstupu frekvencie z prednej strany. Externý 10 MHz vstup dovoľuje vstup s veľmi vysokou stabilitou signálu. Tento vstup obsahuje  $1k\Omega$  vstupnú impedanciu.

### 4. Kostra uzemnenia

Uzemnenie sa používa na spojenie tela QCM 200 s priamym príslušenstvom.

### 5. Vstup A.C. energie

Vstup A.C. energie sa používa na spojenie QCM 200 so zdrojom napätia.

## 4.3 Užívateľské rozhranie QCM 200

Užívateľské rozhranie pozostáva z nasledujúcich častí:

- displeja,
- ponuky systému,
- rozhranie RS-232 s kompletnou príkazovou sadou.

Tab. 1. Ponuka systému QCM 200

PARAMETER	HODNOTA	SYMBOL	DISPLAY
<b>Frekvencia</b>	Absolútna frekvencia	F	Absolútna frekvencia [Hz] = sériová rezonančná frekvencia v kremennom kryštáli
	Relatívna frekvencia	f	Relatívna frekvencia [Hz] = Absolútna frekvencia – nulová frekvencia ( frekvencia nulového stavu )
	Hmotnosť	m	Hmotnosť [ng] = Relatívna frekvencia/0,0566
<b>Odpor</b>	Absolútny odpor	R	Absolútny odpor [Ohm] = sériový rezonančný odpor v kremennom kryštáli
	Relatívny odpor	r	Relatívny odpor [Ohm] = Absolútny odpor – nulový odpor
<b>Čas (Gate)</b>	10 sek	gate 10 S	nastavený časový interval pre počítadlo frekvencie
	1 sek	gate 1 S	
	0,1 sek	gate 100 mS	

V nasledujúcich tabuľkách je uvedený rozsah údajov QCM 200 pri meraní frekvencie a odporu.



Tab. 2. Špecifikácia merania frekvencie QCM 200

<b>MERANIE FREKVENCIE</b>	
<b>Display</b>	
Čas (gate)	0,1s; 1s; 10s
Rozlíšenie	0,01Hz (čas 10s) 0,1Hz (čas 1s) 1Hz (čas 0,1 s)
<b>Meranie (interný TCXO)</b>	
Stabilita	<2x10(-9)
Presnosť	±1,5ppm
<b>Výstup analógovej frekvencie</b>	
Výstup	±10V (20bit) ±200kHz, 100kHz, 50kHz, 20kHz, 10kHz, 5kHz,
Rozsah	2kHz
<b>Výstup frekvencie</b>	
Frekvencia	5MHz
Úroveň	TTL
Zdrojová impedancia	50W
Konektor	BNC

Tab. 3. Špecifikácia merania odporu QCM 200

<b>MERANIE ODPORU</b>	
<b>Display</b>	
Rozsah	od 0W do 5000W
Rozlíšenie	0,001W; R<100W 0,01W; 100W≤R<1000W 0,1W; 1000W≤R<5000W
<b>Merná tepelná vodivosť</b>	
Rozsah odporu	od 0W do 5000W
Napät'ová úroveň	od 0V do 10,625V DC
Impedancia	1kW
Konektor	BNC

## 5 POPIS METÓDY MERANIA

Aerosol v prostredí sme merali pomocou prístroja QCM 200 s ultracitlivým 5 MHz kryštálovým oscilátorom QCM 25. Prístroj bol vyrobený firmou Stanford Research Systems, California, USA.

QCM 200 je ultracitlivý prístroj určený na meranie veľmi malých hmotností. Je schopný odmerať hmotnosť častočiek aerosolu, ktoré dopadnú na ultracitlivý kremenný mikrováhový kryštálový senzor a následne zaznamenať priebeh chovania kvapiek aerosolov (odparovanie z povrchu senzora). Aerosoly sa v našich experimentoch do prostredia dostali z presne určených zdrojov.

V práci je podrobne rozobraných päť typov meraní:

1. Výskyt aerosolov v prostredí po streknutí aerosolovým rozprašovačom, meranie dosahu aerosolových rozprašovačov.
2. Výskyt aerosolov v prostredí po streknutí aerosolovým rozprašovačom v rôznych uhloch, meranie dosahu aerosolových rozprašovačov v rôznych uhloch.
3. Stanovenie rozptylu aerosolových rozprašovačov.
4. Rýchlosť odparovania aerosolov vytvorených z čistej vody ( $H_2O$ ).
5. Výskyt aerosolov v prostredí po použití klozetu.

Z QCM 200 bola pomocou už vytvoreného programu v prostredí VEE Pro 9.0 zaznamenávaná absolútna frekvencia a absolútny odpor v závislosti na čase a z nich sme vypočítali relatívne hodnoty frekvencie a odporu. V prípade, že na kremenný senzor nedopadli žiadne častice aerosolu, hodnoty relatívnej frekvencie sa pohybovali v rozmedzí od -1Hz do 1Hz. Na základe poklesu relatívnej frekvencie sme vypočítali prírastok hmotnosti podľa Sauerbreyho rovnice v tvare:

$$\Delta m = \frac{\Delta f}{-c_f} \quad (14)$$

kde  $c_f$  mal hodnotu 0,0566.

## 6 POPIS USPORIADANIA A ZÁMER EXPERIMENTU

### 6.1 Pokus č.1

V pokuse č.1 sme merali dosah, t.j. vzdialenosť dopadu (dostreku) aerosolu a hmotnosť dopadnutých častíc aerosolu po streknutí z rôznych typov rozprašovačov. Vzdialenosť rozprašovača a senzora QCM 25 l bola na začiatku merania 0,2m. Postupne sa táto vzdialenosť menila po 0,2m až do konečnej vzdialenosti, kde nebol zaznamenaný žiadny výskyt častíc aerosolov. Smer streku bol konštantný, priamo na kremenný kryštál.

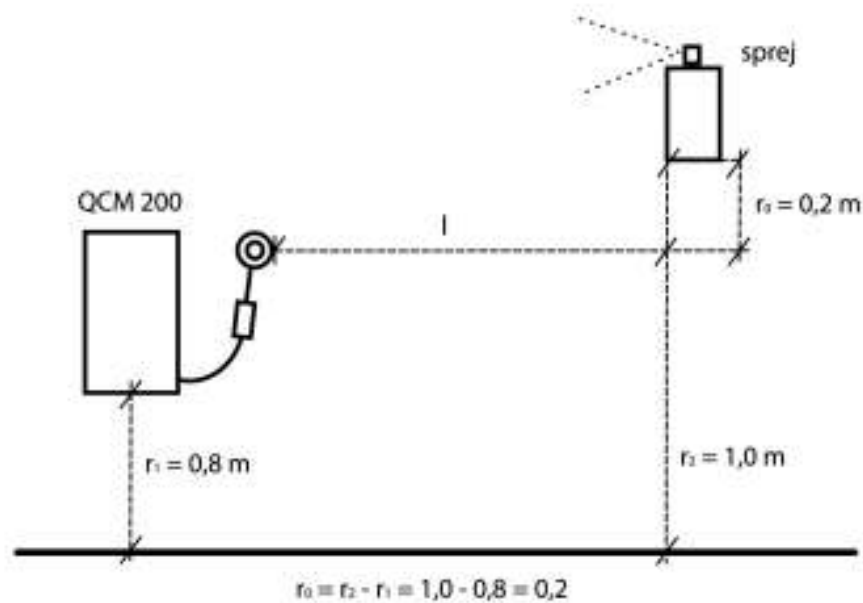
Na pokus č.1 boli použité 3 rôzne nádoby s mechanickým rozprašovačom. Nádoby boli naplnené vodou (H<sub>2</sub>O).

- Nádoba č.1: objem 200ml, závit 26mm,
- Nádoba č.2: objem 150ml, závit 26mm,
- Nádoba č.3: objem 600ml, závit 32mm.



Obr. 16. Nádoby použité v pokuse č.1

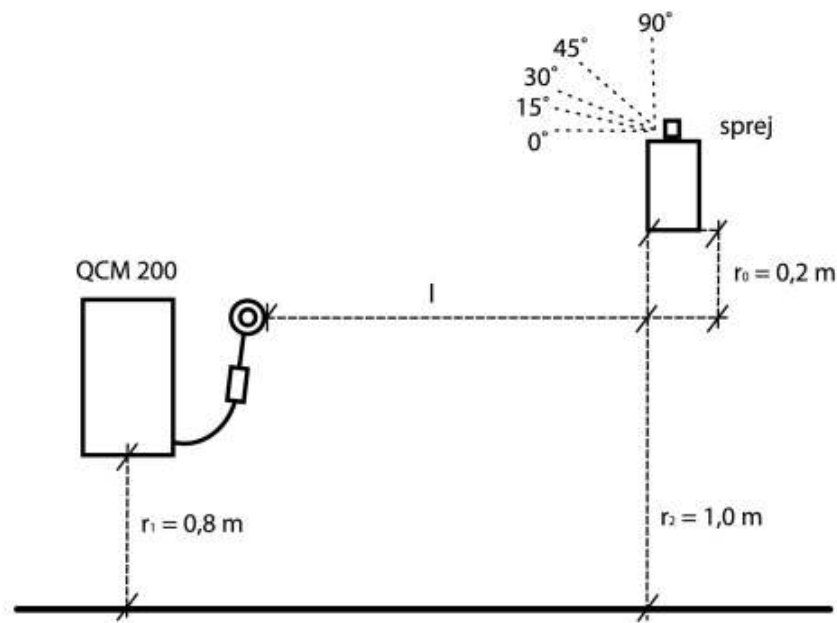
Schématický náčrt je uvedený na obr. 17.



Obr. 17. Schématický nákres pokusu č.1

## 6.2 Pokus č.2

V pokuse č.2 sme merali dosah, resp. vzdialenosť dopadu aerosolu a hmotnosť aerosolu dopadnutého na senzor QCM 25 po streknutí mechanickým rozprašovačom v rôznych uhloch pri striekaní. Postup pri meraní, rovnako ako nádoby na rozprašovanie boli rovnaké, ako v pokuse č.1. Porovnávali sme dosah striekania a hmotnosť častíc aerosolu, ktoré dopadli na kremenný senzor pri striekaní pod rôznymi uhlami. Striekali sme pod uhlami 15°, 30°, 45° a 90°. Schématický nákres je uvedený na obr. 18. Hodnoty frekvencie boli merané vždy v rovnakej vzdialenosti mechanického rozprašovača od senzora pri striekaní v rozličných uhloch. Vzdialenosť kremenného senzora od zdroja aerosolu  $l$  na začiatku merania bola 0,2m. Postupne sa vzdialenosť zväčšovala v intervale 0,2m, až kým zaznamenaný nárast hmotnosti pri striekaní v rozličných uhloch bol nulový.



Obr. 18. Schématický nákres pokusu č.2

Experimenty č.1 a 2 sú zamerané na určenie dosahu a účinnosti obranných sprejov. Keďže nie je možné meranie vykonávať s originálnym sprejom v uzavretom priestore, za vhodnú variantu boli zvolené merania s náhradnými mechanickými rozprašovačmi naplnenými vodou.

### 6.2.1 Obranný sprej

Na komerčnom trhu existuje veľa rozličných typov obranných sprejov. Ich účinok na útočníka je odlišný podľa použitých látok v spreji. Existujú dva základné typy látok, ktoré sú obsiahnuté v obranných sprejoch a to:

1. Látka CN a CS – je látka pôsobiaca na očnú sliznicu. Je obsiahnutá v slzotvorných sprejoch. Účinok nastáva až po niekoľkých sekundách po styku so sliznicou a účinnosť je obmedzená.
2. Látka OC – látka, ktorá obsahuje výťažok z kayanského čierneho korenia. Táto látka spôsobuje silné slzenie, dýchacie ťažkosti, dráždivý kašeľ a pálenie pokožky.

Podľa spôsobu rozprašovania látky obranné spreje delíme do troch kategórií:

1. Penový sprej (vypúšťa užší prúd trieskajúcej peny).
2. Hmlový sprej (vytvára hmlu, ktorú je možné okamžite vdýchnuť).
3. Tekutý sprej (vypúšťa prúd malých kvapiek tekutiny) [28].

Výrobcovia uvádzajú rozdielne dosahy sprejov. Dosah závisí od použitej trysky. Dosah sprejov uvedený výrobcom sa pohybuje od 1m do 4m. Všeobecne najväčší dostrek majú spreje s výstrekom, ktoré majú charakter hmly.



Obr. 19. Rôzne typy obranných sprejov

### 6.3 Pokus č.3

Pokus č.3 bol zameraný na určenie rozptylu jednotlivých sprejov. Nádoby použité na rozprašovanie boli rovnaké, ako v predchádzajúcich pokusoch. Pokus bol uskutočnený za týchto podmienok:

- uzavretá miestnosť,
- konštantná teplota miestnosti 22°C,
- streknutie vždy v 20. sekunde,
- vzdialenosť 1, t.j. nádoba – QCM 200 0,2m a 0,4m.

### 6.4 Pokus č.4

Pokus č.4 bol zameraný na zistenie času, za ktorý sa odparia častice aerosolu vody z aerosolu streknutého na kremenný senzor pomocou mechanického rozprašovača. Teplota okolitého prostredia v priebehu pokusu bola konštantná 22°C. Pokus prebiehal v uzavretej miestnosti, čím sa eliminoval pohyb nad kvapalinou. Na kremenný senzor bolo nastriekané malé množstvo vody ( $H_2O$ ), resp. vodného aerosolu a bola pozorovaná rýchlosť odparovania častíc aerosolu za jednotku času.

Vyparovanie je skupenská premena, pri ktorej sa kvapalina mení na plyn len z povrchu. Pri vyparovaní kvapalina odoberá teplo z okolia. Rýchlosť vyparovania závisí hlavne na:

- teplote – čím vyššia teplota, tým rýchlejšie vyparovanie,
- veľkosti povrchu – čím väčší povrch, tým rýchlejšie vyparovanie,
- na vlastnostiach kvapaliny (prítlačlivé sily medzi časticami kvapaliny),
- na pohybe plynu nad kvapalinou,
- na tlaku pár plynu nad kvapalinou [29].

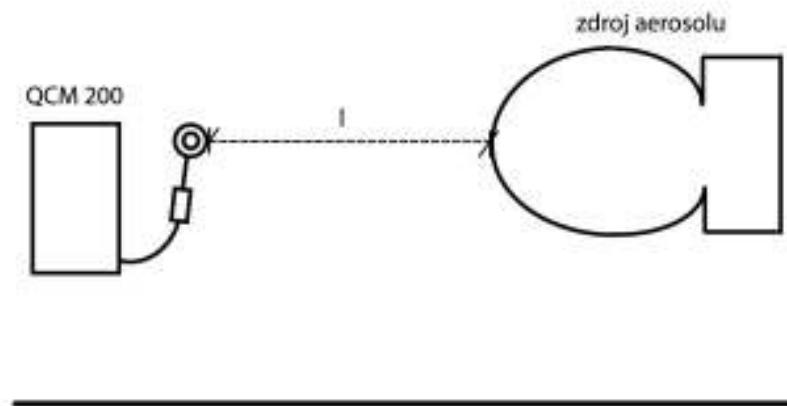
Výsledky meraní boli vzťahnuté na jednotnú hmotnosť 5000 ng.

## 6.5 Pokus č.5

Pokus č.5 bol zameraný na zistenie výskytu aerosolov v prostredí po použití klozetu. Meranie bolo uskutočnené na základe podnetu z televíznych správ. Obsahom reportáže bol trend v moderných výstavbách, že kúpeľne čoraz častejšie bývajú spojené s toaletou. Podľa odborníkov je tento trend nezdravý, pretože sa predpokladá, že po spláchnutí klozetu dochádza k šíreniu aerosolov do prostredia a tak sa škodlivé látky dostanú do priestoru kúpeľne. Predpokladá sa, že tieto látky môžu kontaminovať rôzne predmety, ako sú napr. zubné kefky a iné predmety v kúpeľni. Aerosoly z toalety zo zrejmých dôvodov nepôsobia priaznivo na ľudský organizmus, hlavne na osoby so zníženou imunitou. Keďže toto tvrdenie nie je doteraz vedecky podložené, rozhodli sme sa pomocou prístroja QCM 200 túto hypotézu potvrdiť alebo vyvrátiť.

Vzdialenosť zdroja aerosolu (klozetu) po kremenný kryštálový senzor l na začiatku pokusu bola 0,2m. Postupne v intervale 0,2m sme vzdialenosť predlžovali až do vzdialenosti, kedy už nebol zaznamenaný žiadny výskyt aerosolu po spláchnutí klozetu.

Ďalší pokus sme uskutočnili tak, že vzdialenosť senzora od zdroja aerosolu bola konštantná 0,4m. Výskyt aerosolu v prostredí sme merali po každom spláchnutí. Spláchnutie sme opakovali 10 krát. Schématický náčrt pokusu č.5 je znázornený na obr. 20.



Obr. 20. Schématický nákres pokusu č.5

Experiment bol prevedený na dvoch typoch klozetov:

- novší typ - voda prúdi najskôr horizontálnym a neskôr vertikálnym smerom,
- starší typ – voda prúdi priamo nadol vertikálnym smerom.



## 7 VÝPOČTY

### 7.1 Základné výpočty

QCM 200 patrí medzi extrémne citlivé senzory schopné odmerať zmeny hmotnosti v rozsahu  $ng/cm^2$  s rozsiahlym dynamickým rozsahom rozšíreným do rozsahu  $100 \mu g/cm^2$ .

Na základe upravenej Sauerbreyho rovnice, sme vypočítali zmenu hmotnosti:

$$m_{rel} = \frac{f_{rel}}{-0,0566} \quad (15)$$

kde

$m_{rel}$  je relatívna hmotnosť nameraných častíc udávaná v  $[ng]$ ,

$f_{rel}$  relatívna frekvencia kryštálu udávaná v  $[Hz]$ .

Pre výpočet hmotnosti je potrebné vypočítať relatívnu frekvenciu z absolútnej frekvencie.

Pre výpočet sme použili vzorec:

$$f_{rel} = F_{abs} - F_{offset} \quad (16)$$

kde

$f_{rel}$  relatívna frekvencia kryštálu udávaná v  $[Hz]$ ,

$F_{abs}$  je absolútna frekvencia v  $[Hz]$ ,

$F_{offset}$  je frekvencia offset (nulová) udávaná v  $[Hz]$ .

Za frekvenciu offset sme považovali prvú nameranú hodnotu absolútnej frekvencie v čase 0.

Zhrnutie:

$$m_{rel} = \frac{F_{abs} - F_{offset}}{-0,0566} \quad (17)$$

### 7.2 Ostatné výpočty

Na základe nameraných údajov sme vypočítali hmotnosť aerosolov na  $1m^2$ . Tento výpočet slúžil ako porovnávací ekvivalent (výsledná hodnota udávaná v  $ng/m^2$ ).

Nameraná hmotnosť aerosolov bola zachytená na ploche, ktorá odpovedá ploche kremenného senzora, ktorý má tvar kruhu. Priemer senzora je  $d=0,021\text{m}$ . Zo vzorca pre plochu kruhu vyplýva, že:

$$S_{KS} = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot \frac{d^2}{4} = \pi \cdot \frac{0,021^2}{4} = 3,46 \cdot 10^{-4} \quad (18)$$

Hmotnosť na  $1\text{m}^2$  sme vypočítali na základe relatívnej hmotnosti a plochy kremenného senzora ako:

$$m_m = \frac{m_{rel}}{S_{KS}} = \frac{m_{rel}}{3,46 \cdot 10^{-4}} \quad (19)$$

Ďalej sme vypočítali hmotnostný prietok  $Q_m$ , ktorý je definovaný ako hmotnosť kvapaliny, ktorá preteká kontrolným prierezom za jednotku času:

$$Q_m = \frac{dm}{dt} \quad (20)$$

Pri odparovaní kvapôčiek aerosolu vody bol vypočítaný čas, za ktorý sa odparí 5000 ng aerosolu  $H_2O$ . Tento čas sme vypočítali pomocou priamej úmernosti z nameraného maximálneho prírastku hmotnosti a času, za ktorý sa tento maximálny prírastok hmotnosti odparil a vzťahli sme ho na jednotku hmotnosti 5000 ng.

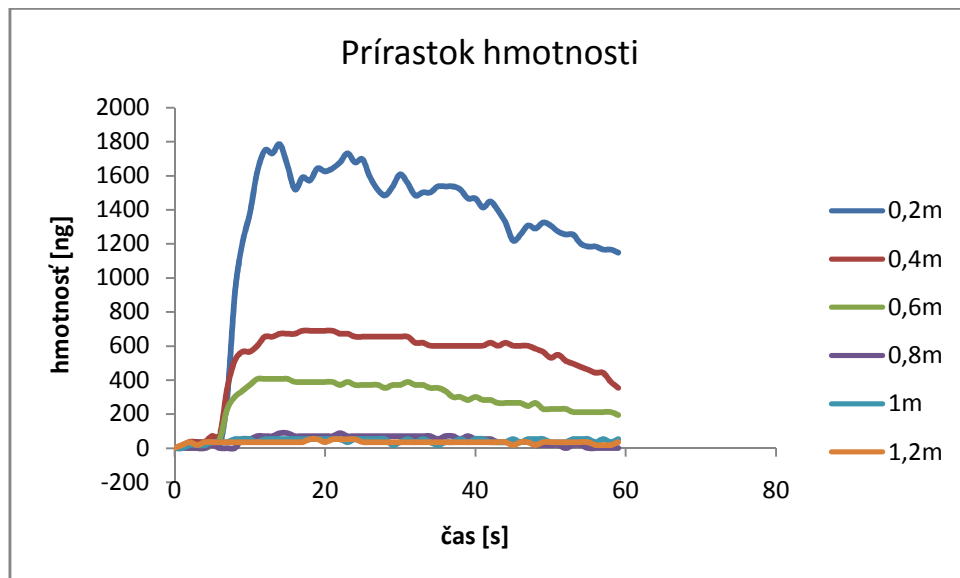
V tabuľkách nameraných údajov sú uvedené iba vypočítané hodnoty jednotlivých meraní.

## 8 NAMERANÉ ÚDAJE

### 8.1 Pokus č.1

#### 8.1.1 Nádoba č.1

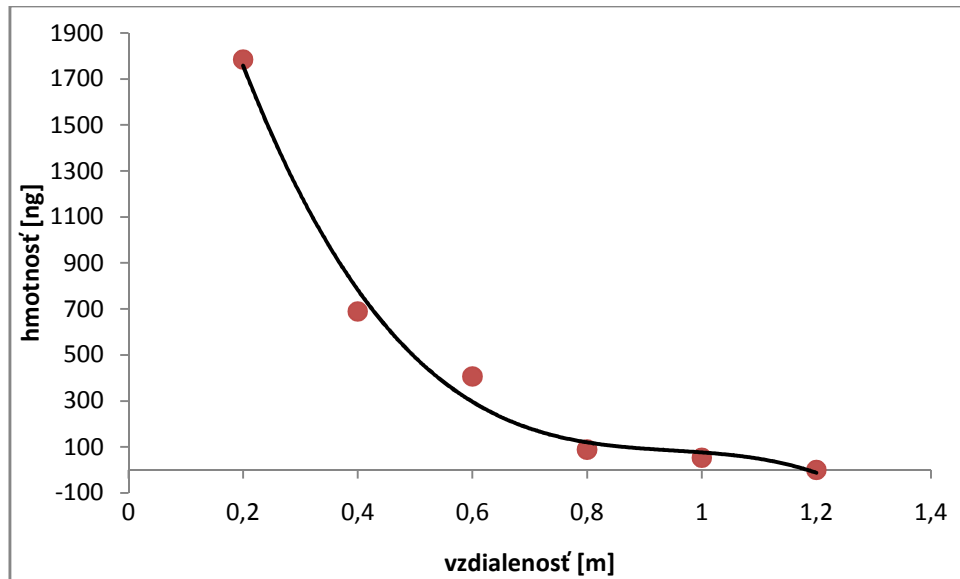
Na obr. 21 je zobrazený priebeh prírastku hmotnosti aerosolu pri striekaní sprejom č.1 pre jednotlivé vzdialenosti za jednotku času. Ako vyplýva z obr. 21 a tab. 4, sprej č. 1 dostrekol prakticky do vzdialenosti 1m. Nad touto vzdialenosťou senzor zaznamenal len minimálny prírastok hmotnosti. Na obr. 22 je znázornená hmotnosť aerosolu v závislosti od vzdialenosti striekania pri použití nádoby č.1.



Obr. 21. Prírastok hmotnosti pri použití nádoby č.1 v závislosti od vzdialenosti a času

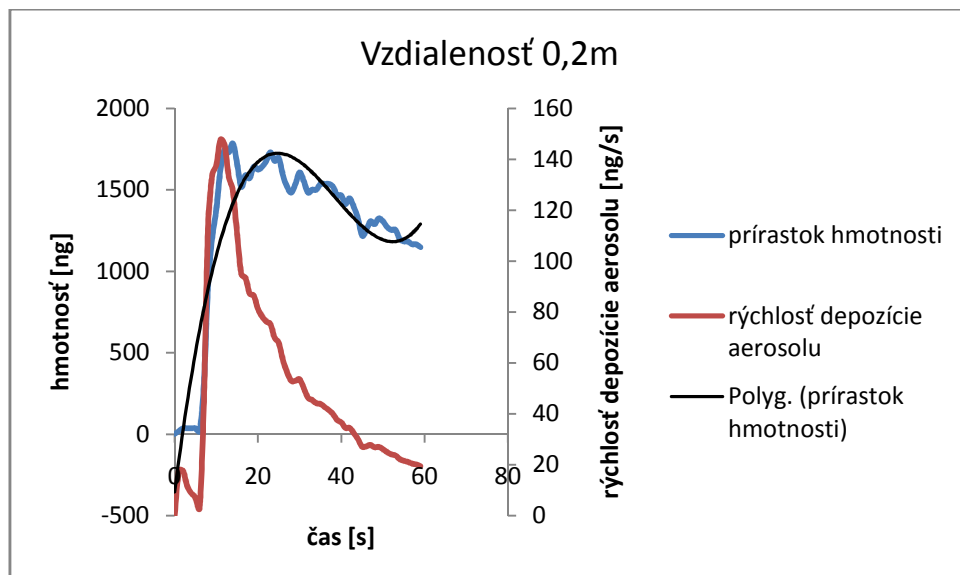
Tab. 4. Hmotnosť aerosolu pri použití nádoby č.1 v závislosti od vzdialenosti

VZDIALENOSŤ [m]	HMOTNOSŤ [ng]	HMOTNOSŤ [ng/m <sup>2</sup> ]	HMOTNOSŤ [kg/m <sup>2</sup> ]
0,2	1784,5	5157514	$5,2 \cdot 10^{-6}$
0,4	689	1991329	$2,0 \cdot 10^{-6}$
0,6	406,4	1174566	$1,2 \cdot 10^{-6}$
0,8	88,3	255202	$2,6 \cdot 10^{-7}$
1	53	153179	$1,5 \cdot 10^{-7}$
1,2	0	0	0

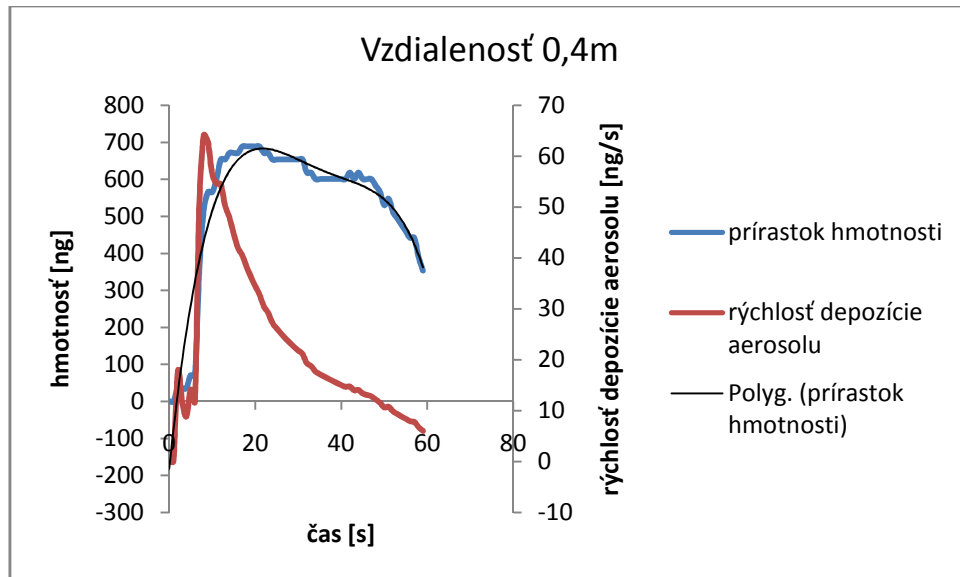


Obr. 22. Hmotnosť dopadnutého aerosolu v závislosti od vzdialenosti striekania pri použití nádoby č.1

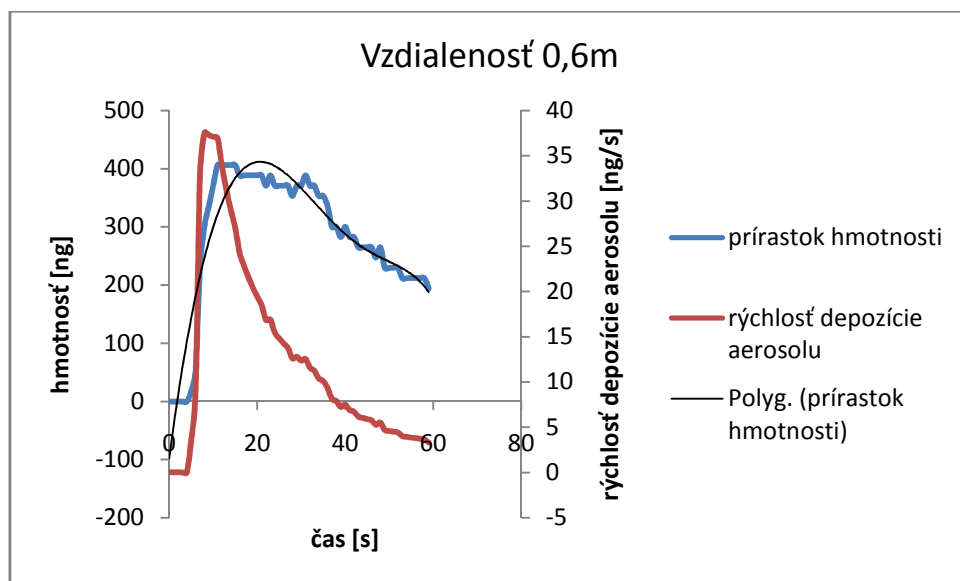
Na nasledujúcich obrázkoch 23 až 25 sú znázornené prírastky hmotnosti aerosolu pri dopade na senzor jednotlivo podľa uvedených vzdialeností pri ktorej boli hodnoty namerané a rýchlosť depozície aerosolu, resp. hmotnostný prietok dopadania aerosolu na kryštálový senzor pre danú vzdialenosť pri použití nádoby č.1.



Obr. 23. Rýchlosť depozície a prírastok hmotnosti aerosolu vo vzdialenosti 0,2m pri použití nádoby č.1



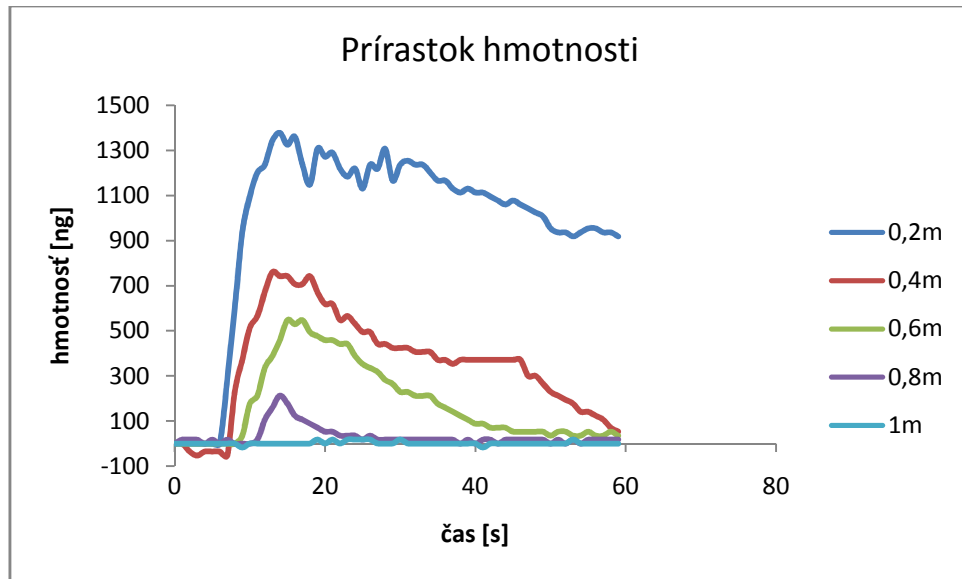
Obr. 24. Rýchlosť depozície a prírastok hmotnosti aerosolu vo vzdialenosti 0,4m pri použití nádoby č.1



Obr. 25. Rýchlosť depozície a prírastok hmotnosti aerosolu vo vzdialenosti 0,6m pri použití nádoby č.1

### 8.1.2 Nádoba č.2

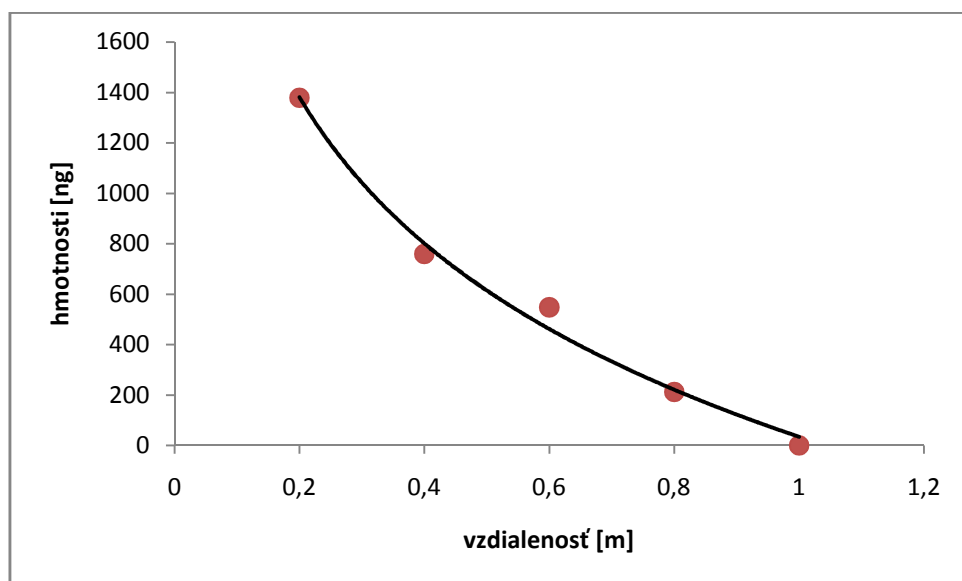
Na obr. 26 je zobrazený priebeh prírastku hmotnosti aerosolu pri striekaní sprejom č.2 pre jednotlivé vzdialenosti za jednotku času. Ako vyplýva z obrázku 26 a tab. 5, sprej č. 2 dostrekol do vzdialenosti 0,8m. Nad touto vzdialenosťou senzor zaznamenal takmer nulový prírastok hmotnosti.



Obr. 26. Prírastok hmotnosti pri použití nádoby č.2 v závislosti od vzdialenosti a času

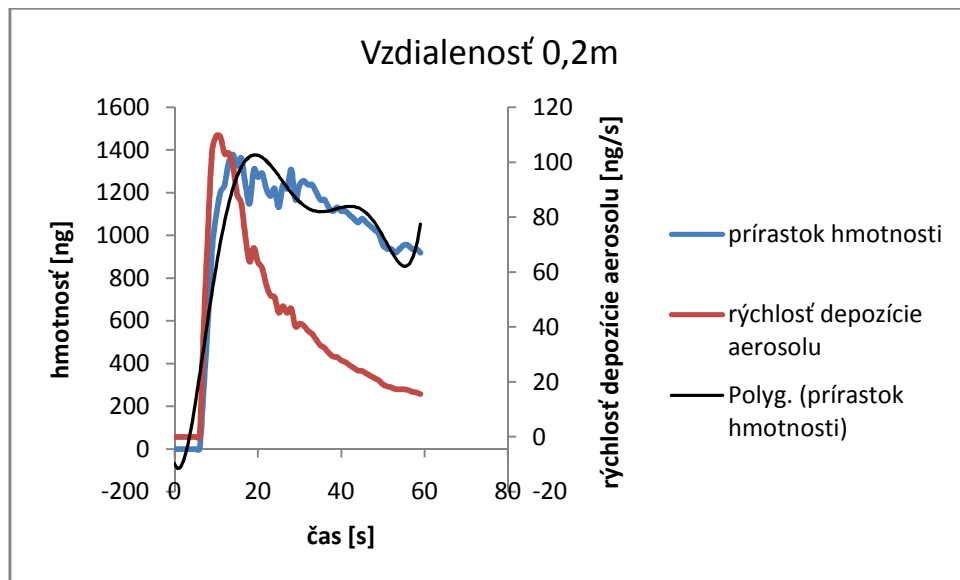
Tab. 5. Hmotnosť aerosolu pri použití nádoby č.2 v závislosti od vzdialenosti

VZDIALENOSŤ [m]	HMOTNOSŤ [ng]	HMOTNOSŤ [ng/m <sup>2</sup> ]	HMOTNOSŤ [kg/m <sup>2</sup> ]
0,2	1378,1	3982948	$4,0 \cdot 10^{-6}$
0,4	759,1	2193931	$2,2 \cdot 10^{-6}$
0,6	547,7	1582948	$1,6 \cdot 10^{-6}$
0,8	212	612717	$6,1 \cdot 10^{-7}$
1	0	0	0

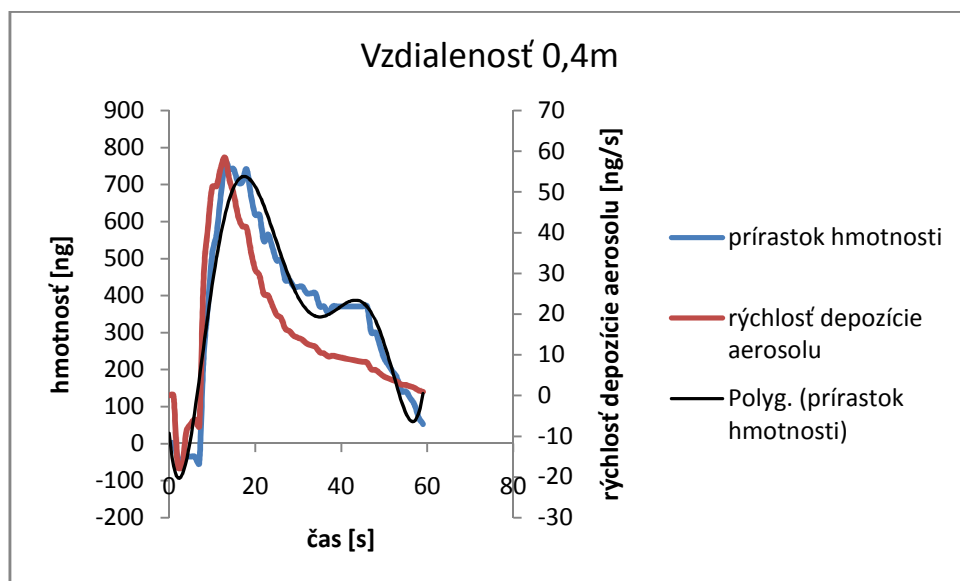


Obr. 27. Hmotnosť dopadnutého aerosolu v závislosti od vzdialenosti striekania pri použití nádoby č. 2

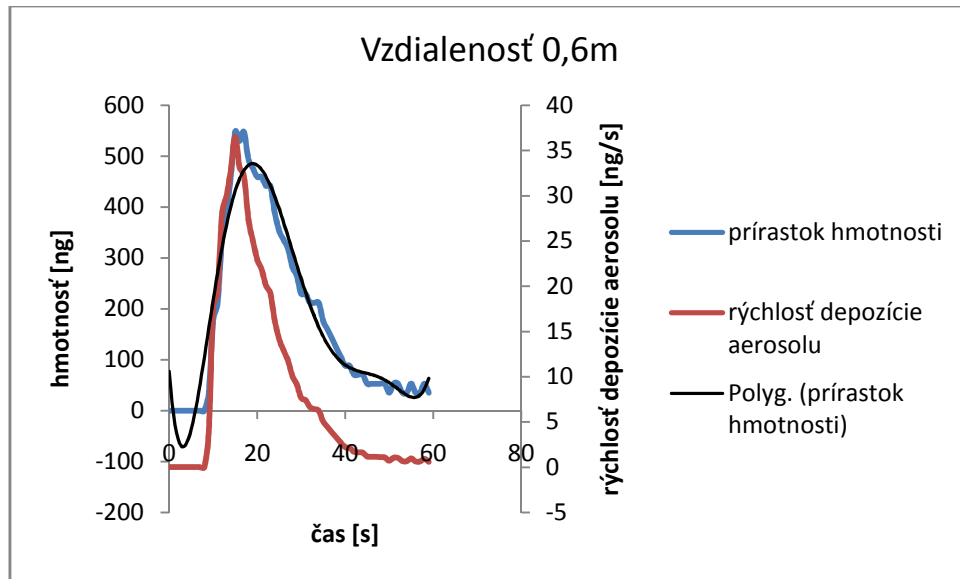
Na nasledujúcich obrázkoch 28 až 31 sú znázornené prírastky hmotnosti aerosolu pri dopade na senzor jednotlivo podľa uvedených vzdialeností pri ktorej boli hodnoty namerané a rýchlosť depozície aerosolu, resp. hmotnostný prietok dopadania aerosolu na kryštálový senzor pre danú vzdialenosť pri použití nádoby č.2.



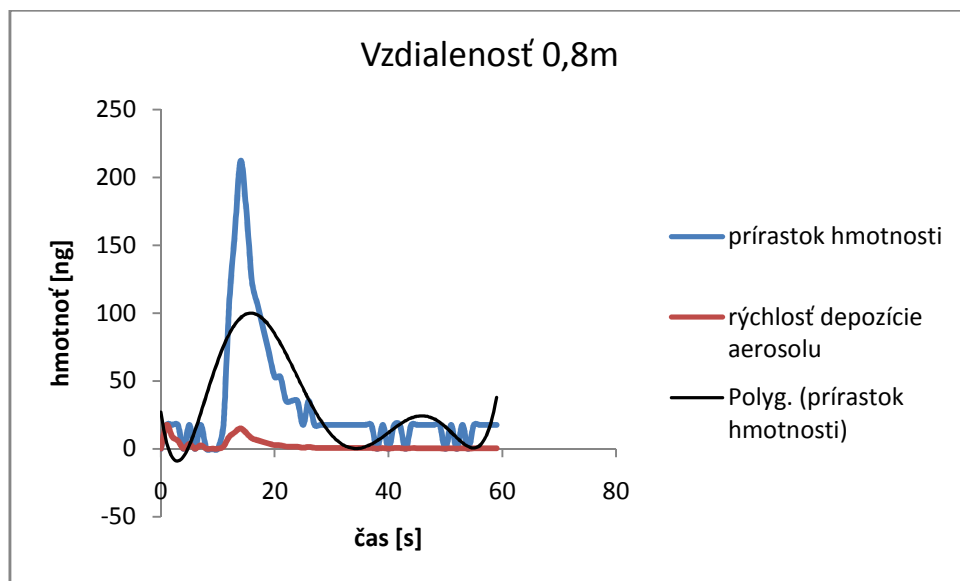
Obr. 28. Rýchlosť depozície aerosolu a prírastok hmotnosti vo vzdialenosti 0,2m pri použití nádoby č.2



Obr. 29. Rýchlosť depozície aerosolu a prírastok hmotnosti vo vzdialenosti 0,4m pri použití nádoby č.2



Obr. 30. Rýchlosť depozície aerosolu a prírastok hmotnosti vo vzdialenosti 0,6m pri použití nádoby č.2

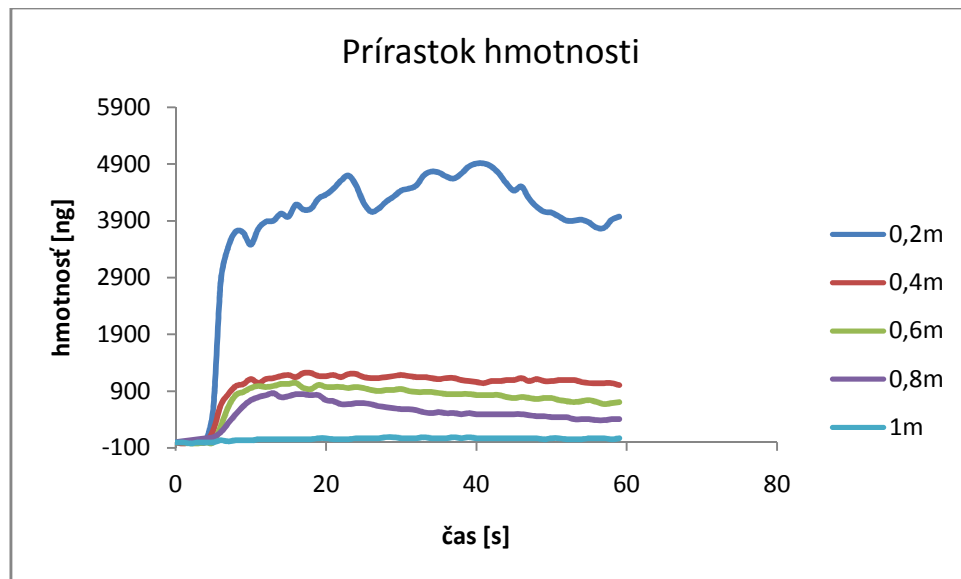


Obr. 31. Rýchlosť depozície aerosolu a prírastok hmotnosti vo vzdialenosti 0,8m pri použití nádoby č.2

### 8.1.3 Nádoba č.3

Na obr. 32 je zobrazený priebeh prírastku hmotnosti aerosolu pri striekaní sprejom č.3 pre jednotlivé vzdialenosti za jednotku času. Ako vyplýva z obr. 32 a tab.6, sprej č.3 dostrekol prakticky do vzdialenosti 0,8m. Nad touto vzdialenosťou senzor zaznamenal minimálny prírastok hmotnosti.

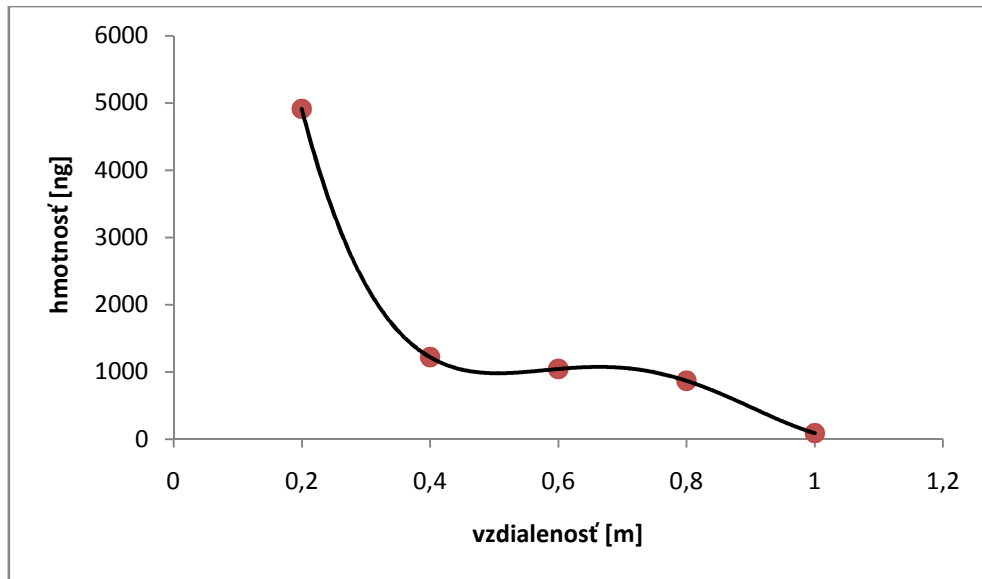




Obr. 32. Prírastok hmotnosti pri použití nádoby č.3 v závislosti od vzdialenosti a času

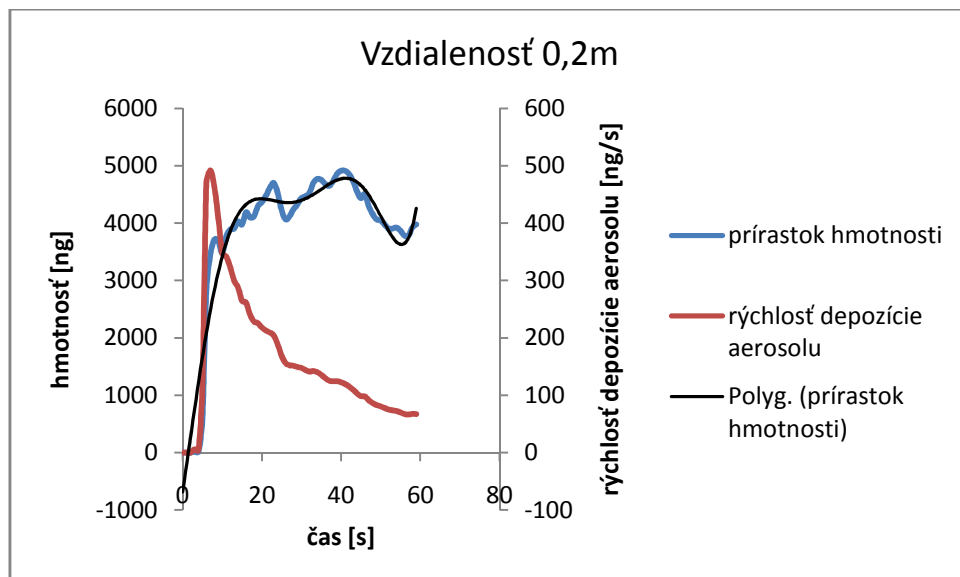
Tab. 6. Hmotnosť aerosolu pri použití nádoby č.3 v závislosti od vzdialenosti

VZDIALENOSŤ [m]	HMOTNOSŤ [ng]	HMOTNOSŤ [ng/m <sup>2</sup> ]	HMOTNOSŤ [kg/m <sup>2</sup> ]
0,2	4911,7	14195665	$1,4 \cdot 10^{-5}$
0,4	1219,1	3523410	$3,5 \cdot 10^{-6}$
0,6	1042,4	3012717	$3,0 \cdot 10^{-6}$
0,8	865,7	2502023	$2,5 \cdot 10^{-6}$
1	88,4	255491,3	$2,6 \cdot 10^{-7}$
1,2	0	0	0

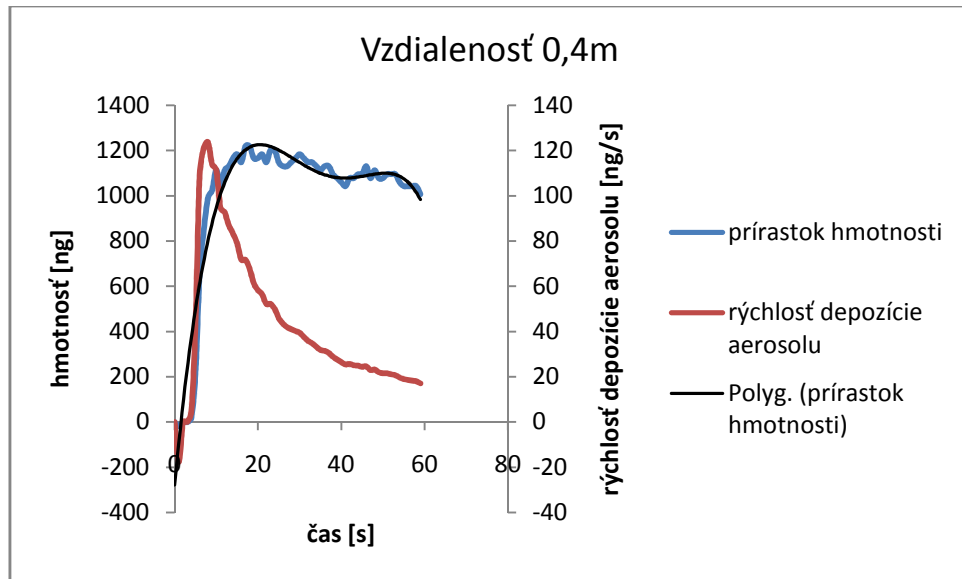


Obr. 33. Hmotnosť dopadnutého aerosolu v závislosti od vzdialenosti striekania pri použití nádoby č.3

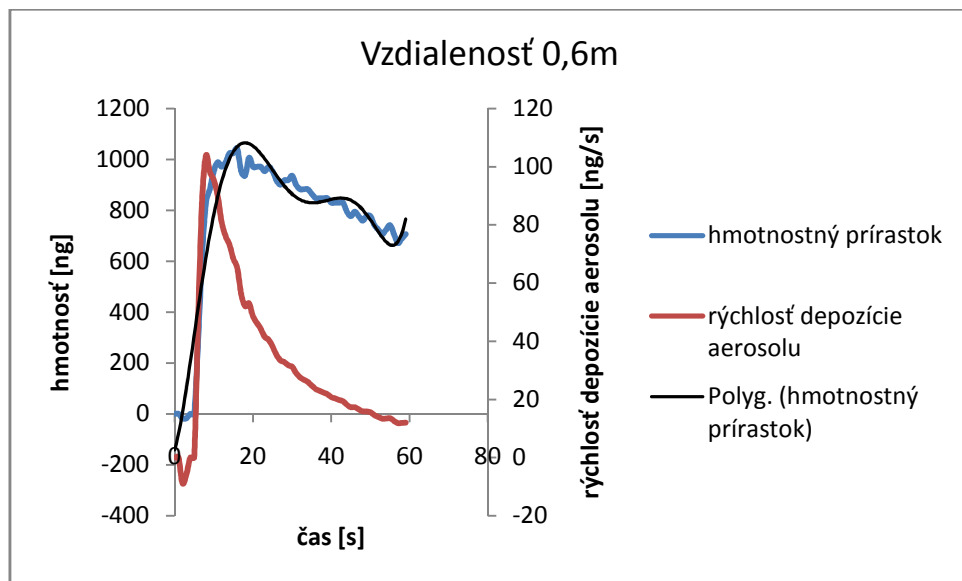
Na nasledujúcich obrázkoch 34 až 37 sú znázornené prírastky hmotnosti aerosolu pri dopade na senzor jednotlivo podľa uvedených vzdialeností pri ktorej boli hodnoty namerané a rýchlosť depozície aerosolu na kryštálový senzor pre danú vzdialenosť pri použití nádoby č.3.



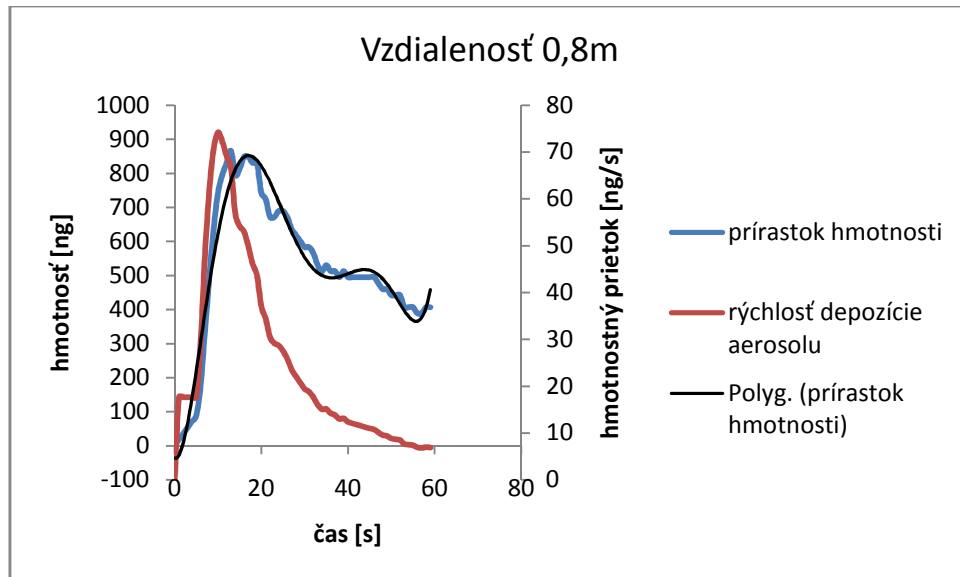
Obr. 34. Rýchlosť depozície aerosolu a prírastok hmotnosti vo vzdialenosti 0,2m pri použití nádoby č.3



Obr. 35. Rýchlosť depozície aerosolu a prírastok hmotnosti vo vzdialenosti 0,4m pri použití nádoby č.3



Obr. 36. Rýchlosť depozície aerosolu a prírastok hmotnosti vo vzdialenosti 0,6m pri použití nádoby č.3

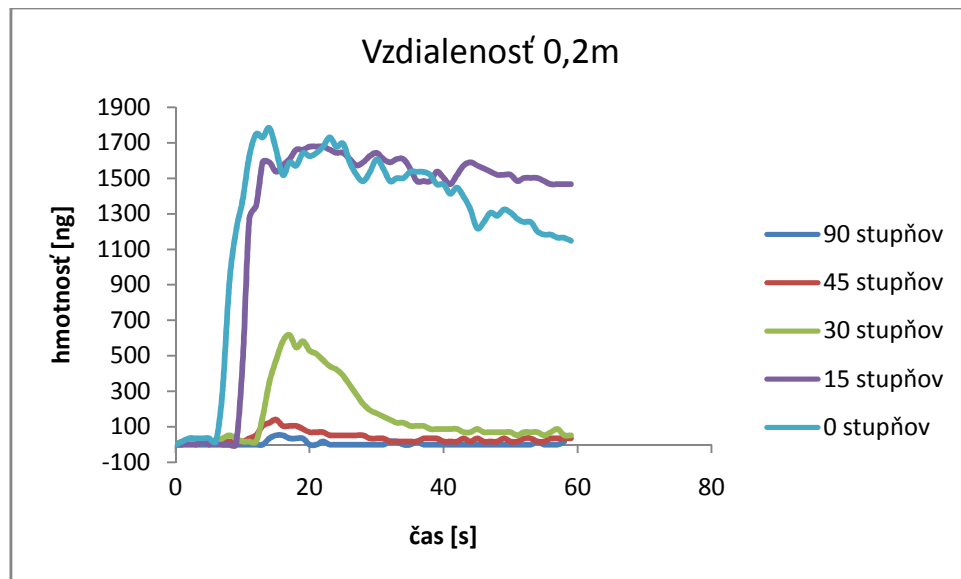


Obr. 37. Rýchlosť depozície aerosolu a prírastok hmotnosti vo vzdialenosti 0,8m pri použití nádoby č.3

## 8.2 Pokus č.2

### 8.2.1 Nádoba č.1

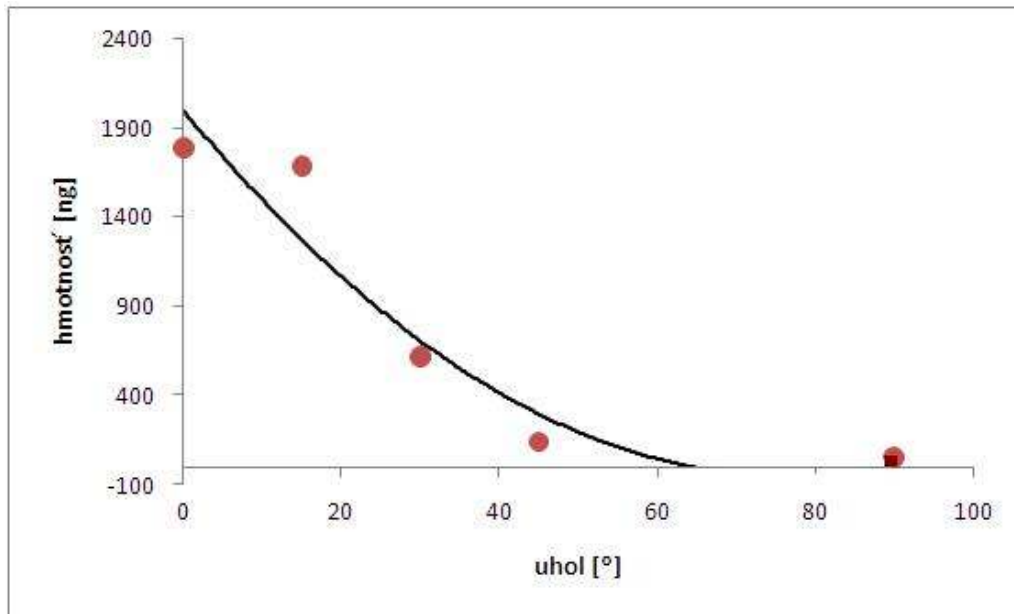
Na obr. 38 je zobrazený prírastok hmotnosti aerosolu za jednotku času pri striekaní v rôznych uhloch sprejom č.1 vo vzdialenosti 0,2 m. Ako vyplýva z obr. 38 a tab. 7, sprej č. 1 dostrekol do uhla  $45^\circ$ . V uhle väčšom ako  $45^\circ$  bol prírastok hmotnosti aerosolu na senzore minimálny.



Obr. 38. Prírastok hmotnosti aerosolu vo vzdialenosti 0,2 m pri použití nádoby č.1 v rozličných uhloch

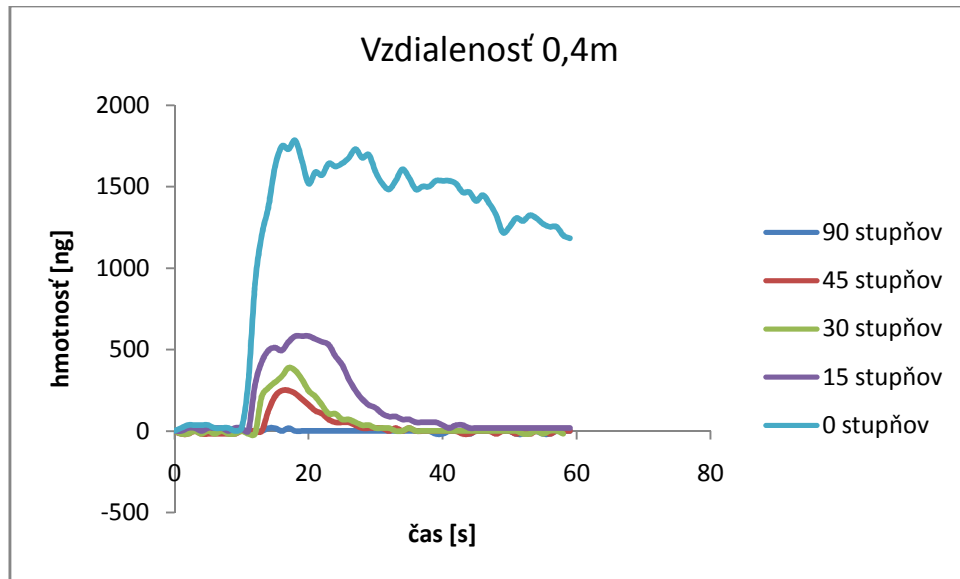
Tab. 7. Hmotnosť aerosolu vo vzdialenosti 0,2 m pri použití nádoby č.1 v rozličných uhloch

UHOL [°]	HMOTNOSŤ [ng]	HMOTNOSŤ [ng/m <sup>2</sup> ]	HMOTNOSŤ [kg/m <sup>2</sup> ]
0	1784,5	5157514	$5,2 \cdot 10^{-6}$
15	1678,4	4850867	$4,9 \cdot 10^{-6}$
30	618,4	1787283	$1,8 \cdot 10^{-6}$
45	141,3	408382	$4,1 \cdot 10^{-7}$
90	53	153179	$1,5 \cdot 10^{-7}$



Obr. 39. Hmotnosť aerosolu vo vzdialenosti 0,2 m pri použití nádoby č.1 v rozličných uhloch

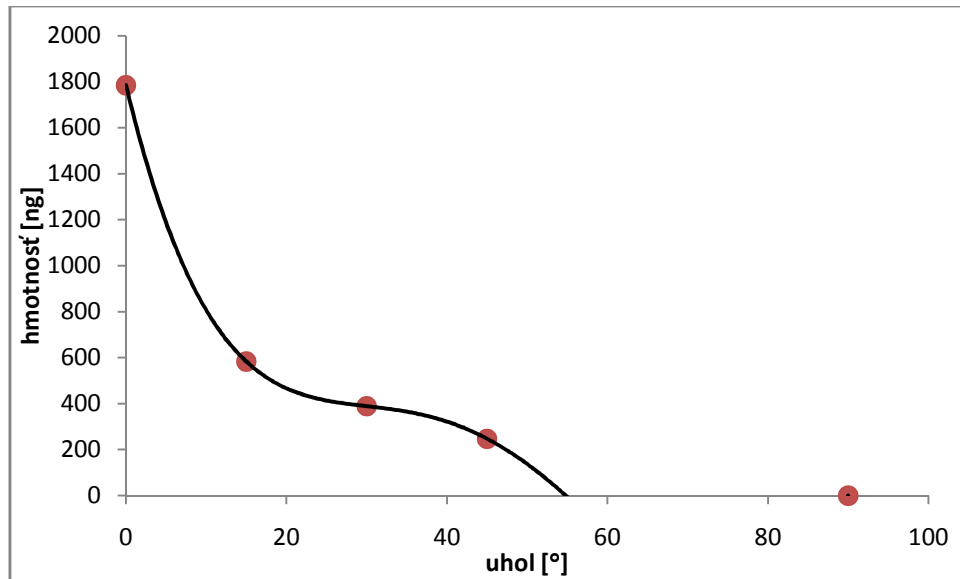
Na obr. 40 je zobrazený prírastok hmotnosti aerosolu za jednotku času pri striekaní v rôznych uhloch sprejom č.1 vo vzdialenosti 0,4 m. Ako vyplýva z obr. 40, obr. 41 a tab. 8, sprej č.1 v tomto prípade dostrekol do uhla  $45^\circ$ . V uhle väčšom ako  $45^\circ$  bol prírastok hmotnosti aerosolu na senzore nulový.



Obr. 40. Prírastok hmotnosti vo vzdialenosti 0,4m pri použití nádoby č.1  
v rozličných uhloch

Tab. 8. Hmotnosť aerosolu vo vzdialenosti 0,4m pri použití nádoby č.1  
v rozličných uhloch

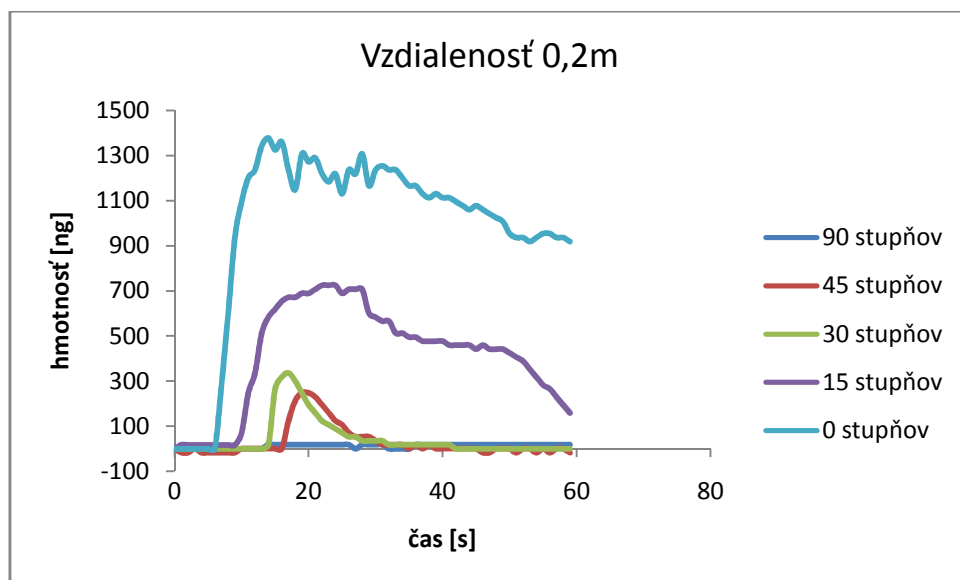
UHOL [°]	HMOTNOSŤ [ng]	HMOTNOSŤ [ng/m <sup>2</sup> ]	HMOTNOSŤ [kg/m <sup>2</sup> ]
0	1784,5	5157514	$5,2 \cdot 10^{-6}$
15	583	1684971	$1,7 \cdot 10^{-6}$
30	388,7	1123410	$1,1 \cdot 10^{-6}$
45	247,3	714740	$7,1 \cdot 10^{-7}$
90	0	0	0



Obr. 41. Hmotnosť aerosolu vo vzdialenosti 0,4m pri použití nádoby č.1 v rozličných uhloch

### 8.2.2 Nádoba č.2

Na obr. 42 je zobrazený prírastok hmotnosti aerosolu za jednotku času pri striekaní v rôznych uhloch sprejom č.2 vo vzdialenosti 0,2m. Ako vyplýva z obr. 42, obr. 43 a tab. 9, sprej č. 2 dostrekol do uhla 45° až 90°. V uhle 90° bol prírastok hmotnosti aerosolu na senzore nulový.

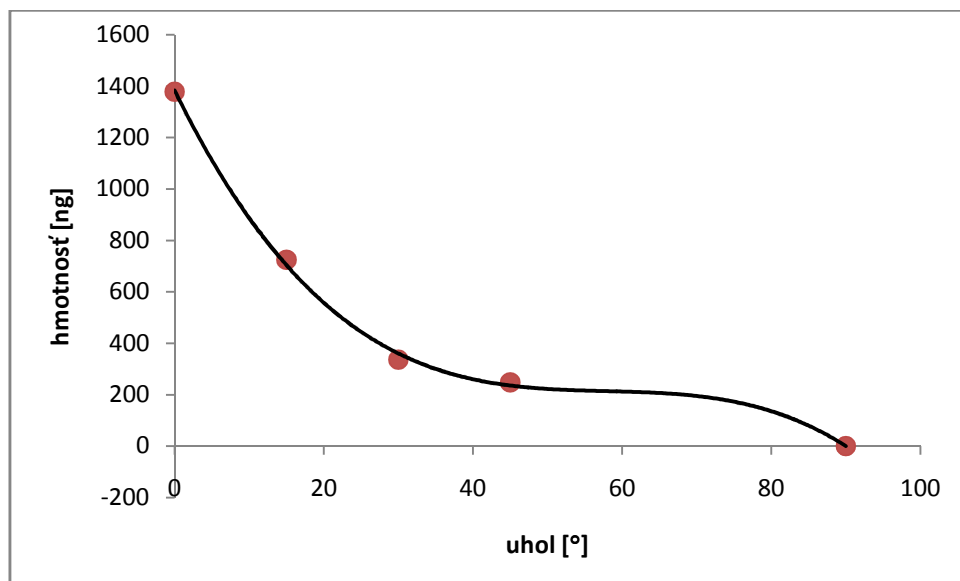


Obr. 42. Prírastok hmotnosti vo vzdialenosti 0,2m pri použití nádoby č.2 v rozličných uhloch



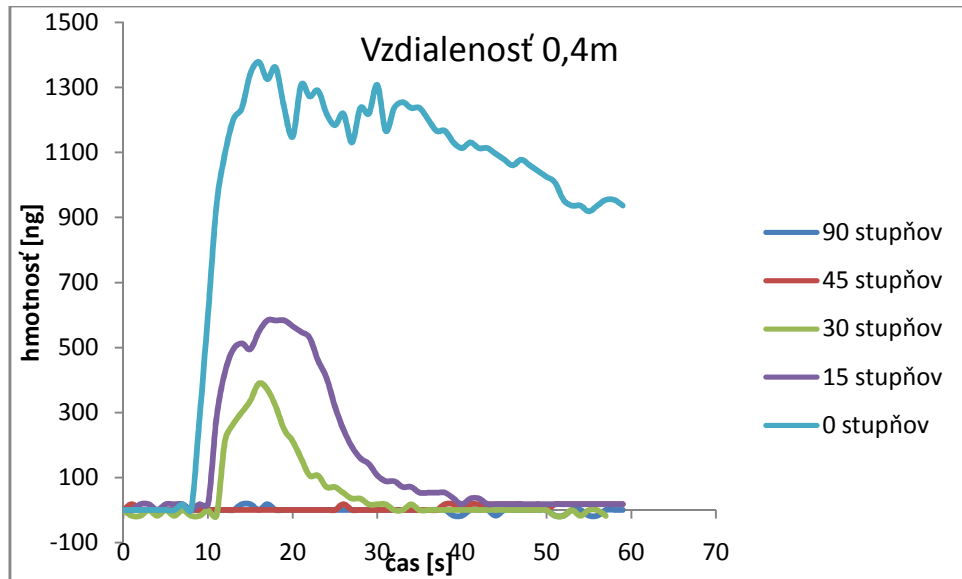
Tab. 9. Hmotnosť aerosolu vo vzdialenosti 0,2m pri použití nádoby č.2  
v rozličných uhloch

UHOL [°]	HMOTNOSTI [ng]	HMOTNOSŤ NA 1m <sup>2</sup> [ng/m <sup>2</sup> ]	HMOTNOSTI NA 1m <sup>2</sup> [kg/m <sup>2</sup> ]
0	1378,1	3982948	$4,0 \cdot 10^{-6}$
15	724,4	2093642	$2,1 \cdot 10^{-6}$
30	335,7	970231	$9,7 \cdot 10^{-7}$
45	247	714740	$7,1 \cdot 10^{-7}$
90	0	0	0



Obr. 43. Hmotnosť aerosolu vo vzdialenosti 0,2m pri použití nádoby č.2  
v rozličných uhloch

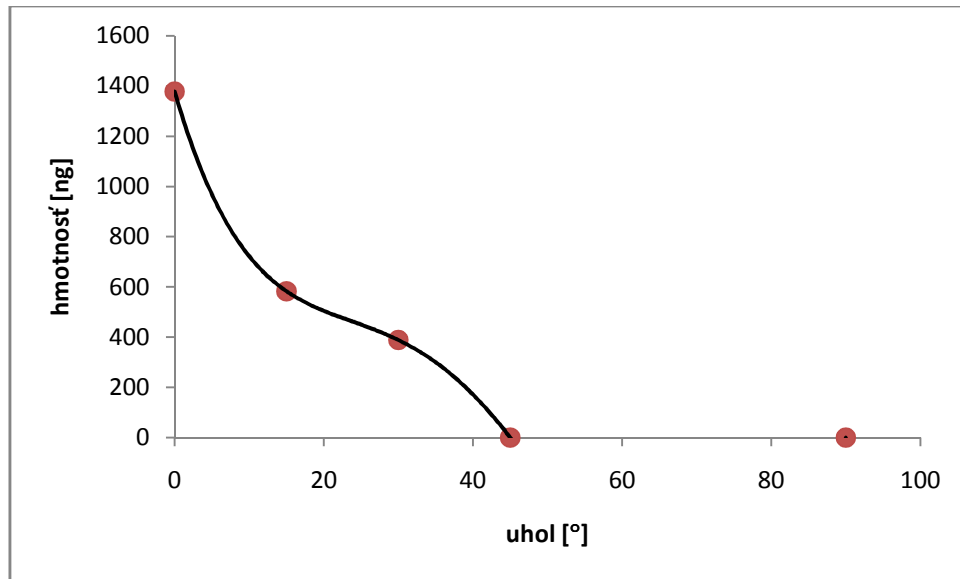
Na obr. 44 je zobrazený prírastok hmotnosti aerosolu za jednotku času pri striekaní sprejom č.2 vo vzdialenosti 0,4 m v rôznych uhloch. Ako vyplýva z obr. 44 a tab. 10, sprej č. 2 dostrekol vo vzdialenosti 0,4 m do uhla striekania 45°. Zo závislosti na obr. 45 sa dá taktiež extrapolovať, že sprej č.2 dostrekol do uhla 45°. V uhloch nad 45° bol prírastok hmotnosti aerosolu na senzore nulový.



Obr. 44. Prírastok hmotnosti vo vzdialenosti 0,4m pri použití nádoby č.2 v rozličných uhloch

Tab. 10. Hmotnosť aerosolu vo vzdialenosti 0,4m pri použití nádoby č.2 v rozličných uhloch

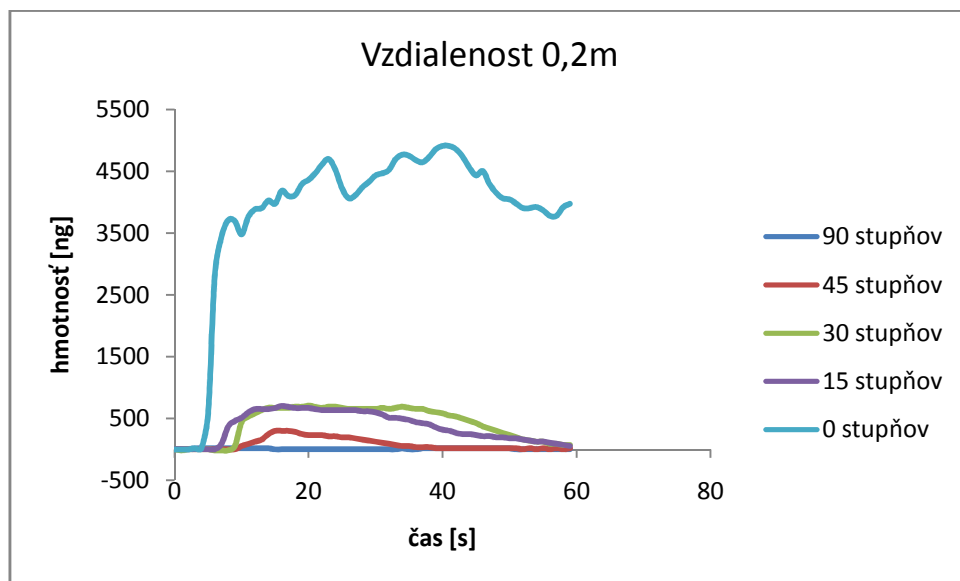
UHOL [°]	HMOTNOSTI [ng]	HMOTNOSŤ [ng/m <sup>2</sup> ]	HMOTNOSŤ [kg/m <sup>2</sup> ]
0	1378,1	3982948	$4,0 \cdot 10^{-6}$
15	583	1684971	$1,7 \cdot 10^{-6}$
30	388,7	1123410	$1,1 \cdot 10^{-6}$
45	0	0	0
90	0	0	0



Obr. 45. Hmotnosť aerosolu vo vzdialenosti 0,4m pri použití nádoby č.2 v rozličných uhloch

### 8.2.3 Nádoba č.3

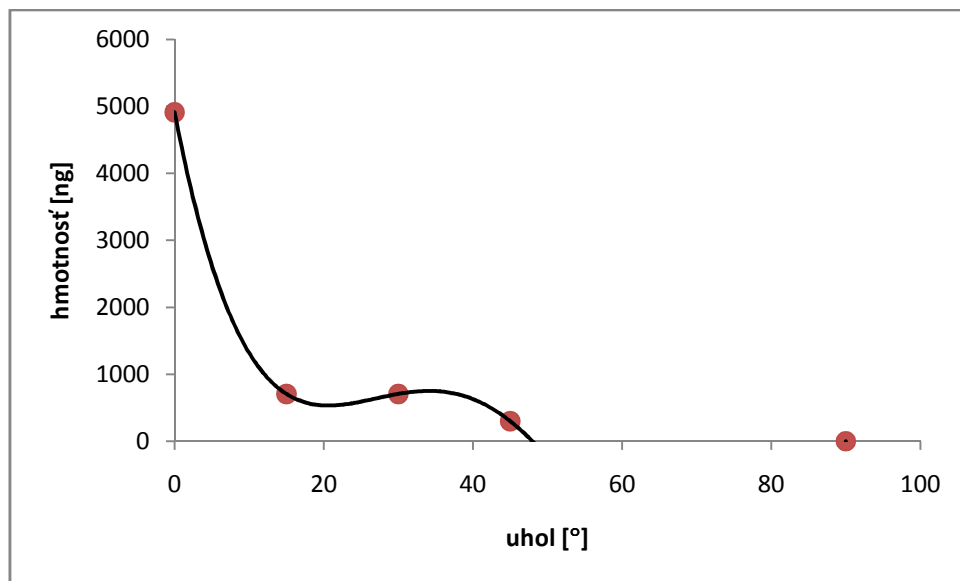
Na obr. 46 je zobrazený prírastok hmotnosti aerosolu za jednotku času pri striekaní sprejom č.3 vo vzdialenosti 0,2 m v rôznych uhloch. Ako vyplýva z obr. 46 a tab. 11, sprej č. 3 dostrekol vo vzdialenosti 0,2 m do uhla striekania  $45^\circ$ . Zo závislosti na obr. 47 sa dá taktiež extrapolovať, že sprej č.3 dostrekol do uhla  $45^\circ$ . V uhloch nad  $45^\circ$  bol prírastok hmotnosti aerosolu na senzore nulový.



Obr. 46. Prírastok hmotnosti vo vzdialenosti 0,2m pri použití nádoby č.3 v rozličných uhloch

Tab. 11. Hmotnosť aerosolu vo vzdialenosti 0,2m pri použití nádoby č.3  
v rozličných uhloch

UHOL [°]	HMOTNOSŤ [ng]	HMOTNOSŤ [ng/m <sup>2</sup> ]	HMOTNOSŤ [kg/m <sup>2</sup> ]
0	4911,7	$1,4 \cdot 10^7$	$1,4 \cdot 10^{-5}$
15	706,7	2042486	$2,0 \cdot 10^{-6}$
30	706,7	2042486	$2,0 \cdot 10^{-6}$
45	300,4	868208	$8,7 \cdot 10^{-7}$
90	0	0	0

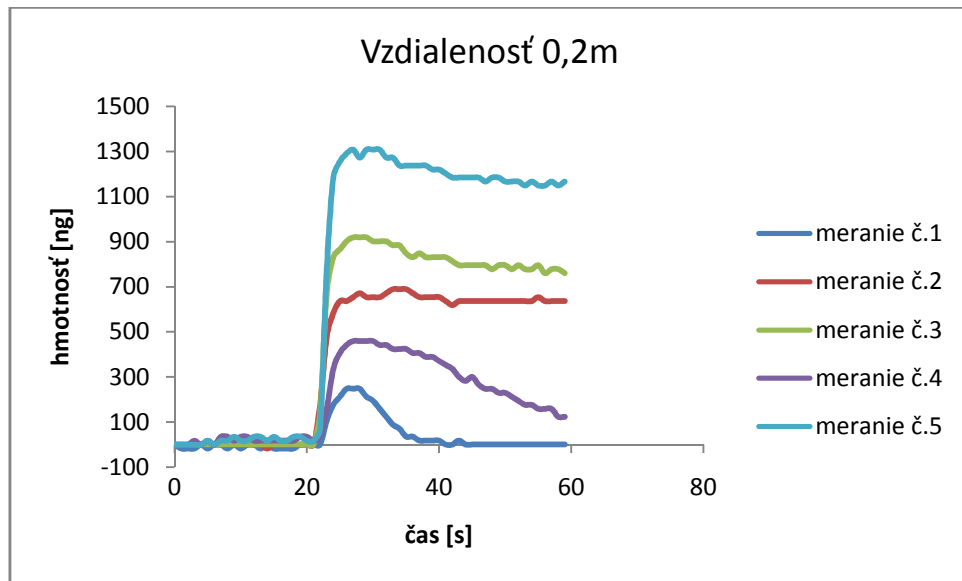


Obr. 47. Hmotnosť aerosolu vo vzdialenosti 0,2m pri použití nádoby č.3  
v rozličných uhloch

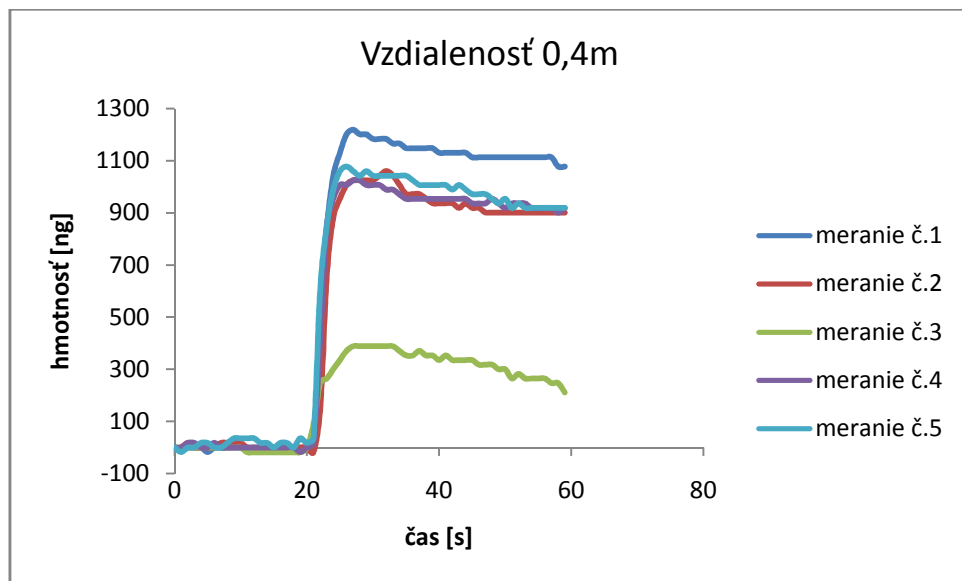
### 8.3 Pokus č.3

Pokus č.3 bol zameraný na určenie rozptylu jednotlivých sprejov č.1 až 3. Rozptyl jednotlivých sprejov bol meraný vo vzdialenostiach 0,2m a 0,4m od kremenného senzora. Streknutie sa uskutočnilo vždy v 20-tej sekunde. Uskutočnili sme 5 jednotlivých meraní stanovenia rozptylu. Na obr. 48 až 53 sú znázornené priebehy prírastkov hmotnosti aerosolu v čase pri striekaní sprejmi za uvedených podmienok.

8.3.1 Nádoba č.1

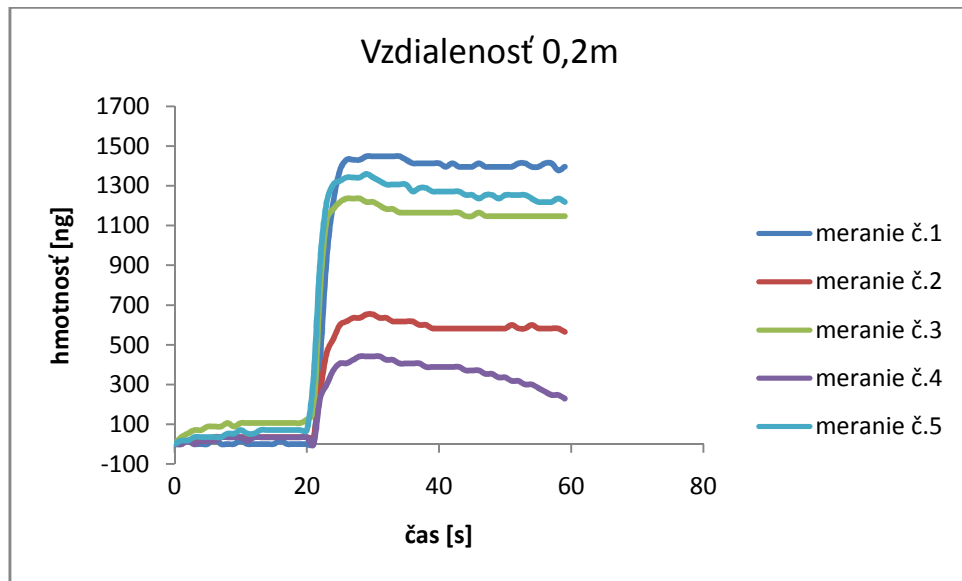


Obr. 48. Rozptyl pri striekaní aerosolu vo vzdialenosti 0,2m pri použití nádoby č.1

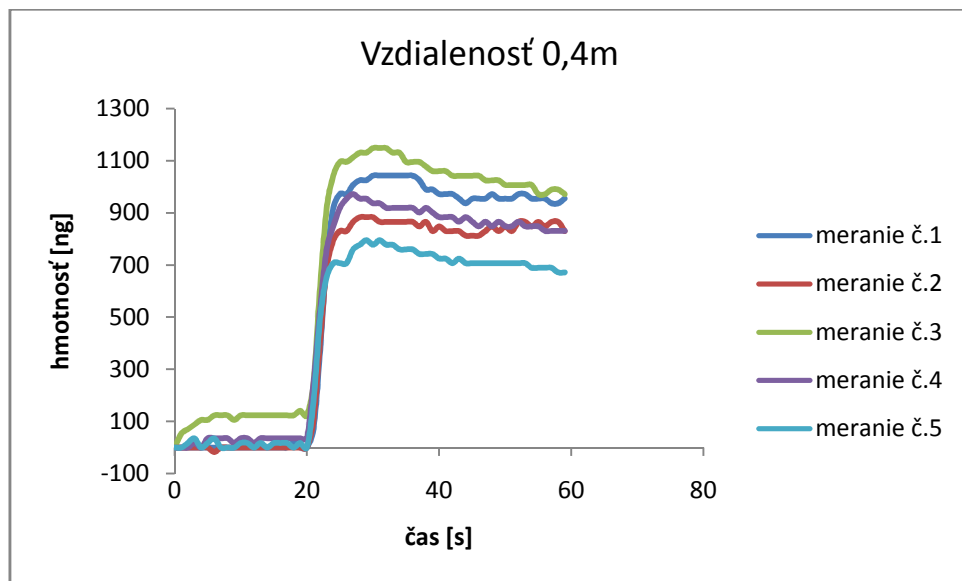


Obr. 49. Rozptyl pri striekaní aerosolu vo vzdialenosti 0,4m pri použití nádoby č.1

8.3.2 Nádoba č.2

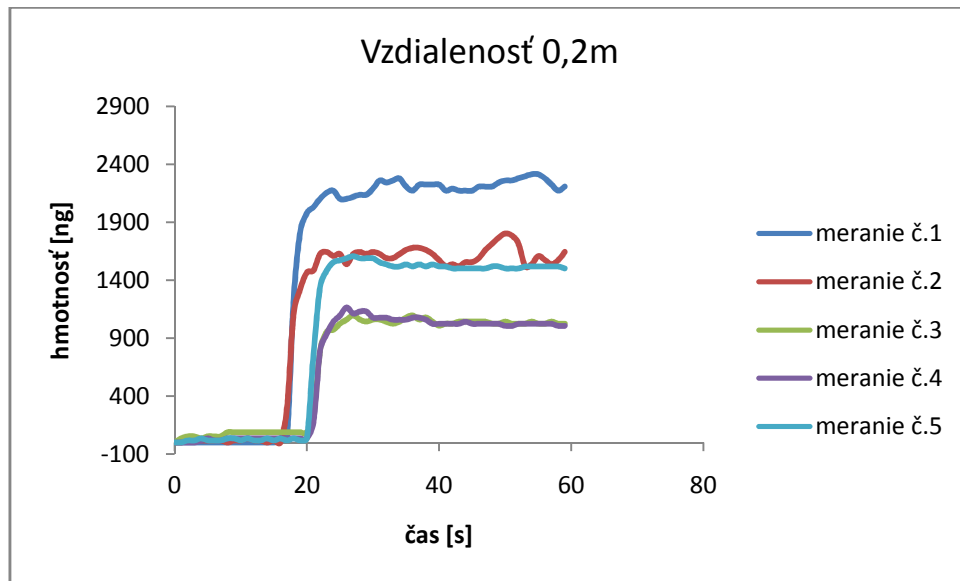


Obr. 50. Rozptyl pri striekaní aerosolu vo vzdialenosti 0,2m pri použití nádoby č.2

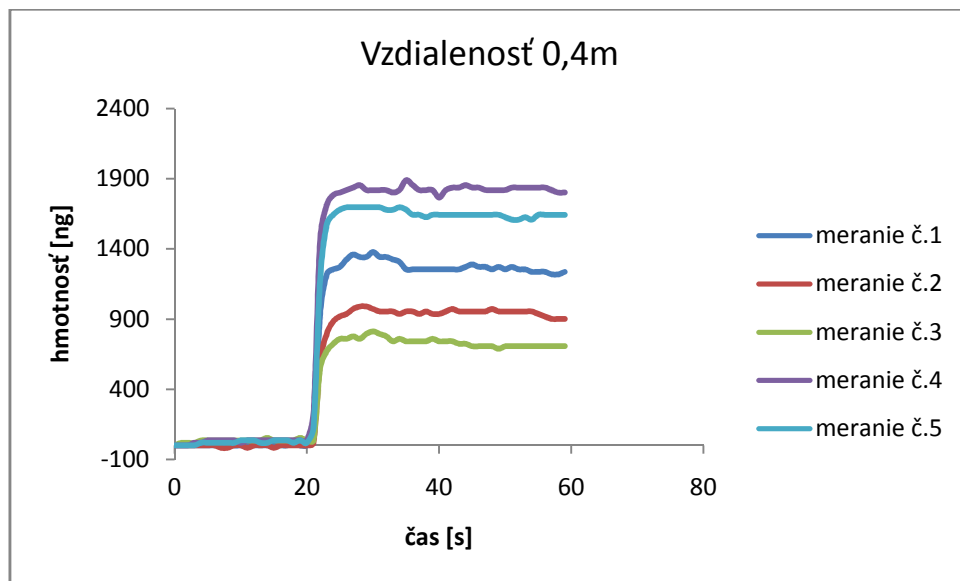


Obr. 51. Rozptyl pri striekaní aerosolu vo vzdialenosti 0,4m pri použití nádoby č.2

### 8.3.3 Nádoba č.3



Obr. 52. Rozptyl pri striekaní aerosolu vo vzdialenosti 0,2m pri použití nádoby č.3

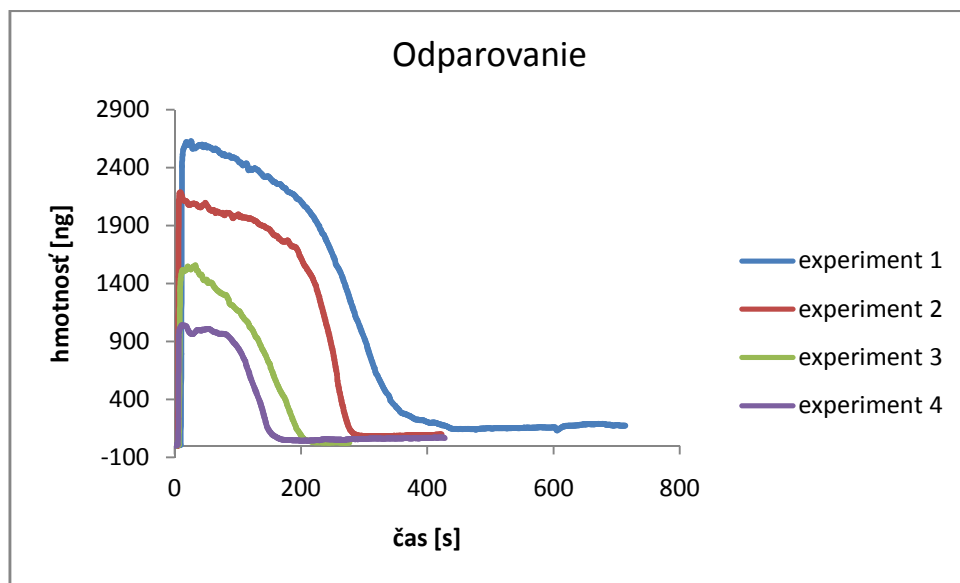


Obr. 53. Rozptyl pri striekaní aerosolu vo vzdialenosti 0,4m pri použití nádoby č.3

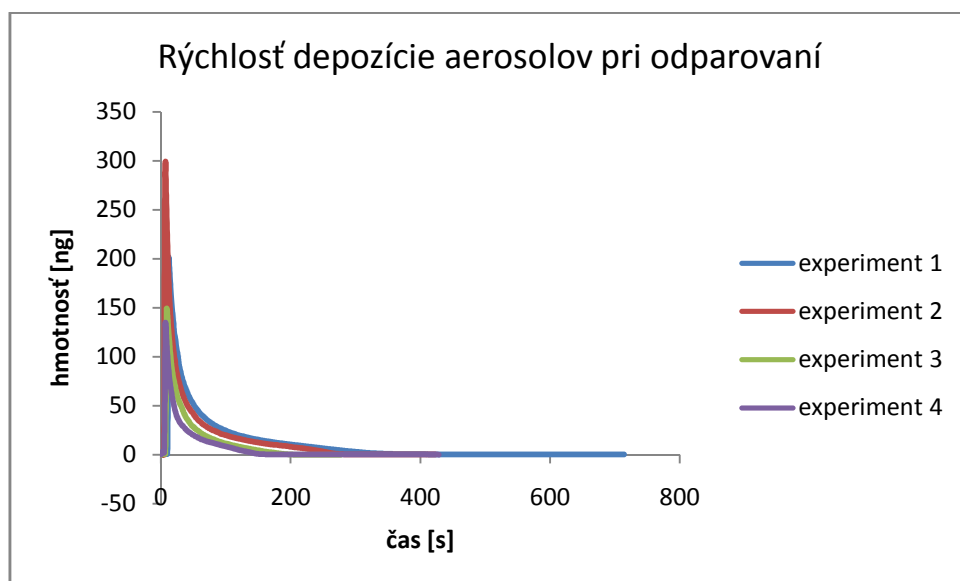
## 8.4 Pokus č.4

Pokus č. 4 bol zameraný na meranie rýchlosti odparovania vodného aerosolu, ktorý bol streknutý na kremenný senzor pomocou mechanického rozprašovača. Teplota okolitého prostredia v priebehu pokusu bola konštantná 22°C. Pokus prebiehal v uzavretej miestnosti, čím sa eliminovalo urýchlenie odparovania na základe prestupu látky medzi

kvapalnou a plynnou fázou vplyvom zrýchleného pohybu plynnej fázy nad kvapalnou vrstvou. Na kremenný senzor bolo nastriekané malé množstvo vodného aerosolu pomocou mechanického rozprašovača. Pozorovali sme úbytok hmotnosti aerosolu v čase pri odparovaní. Priebeh úbytku hmotnosti aerosolu v čase sme znázornili na obr. 54. Jednotlivé merania sa navzájom líšili počiatkovou hmotnosťou streknutej dávky aerosolu. Na obr. 55 sme znázornili rýchlosť depozície aerosolov pri odparovaní pre jednotlivé streknuté dávky.



Obr. 54. Úbytok hmotnosti aerosolu pri odparovaní

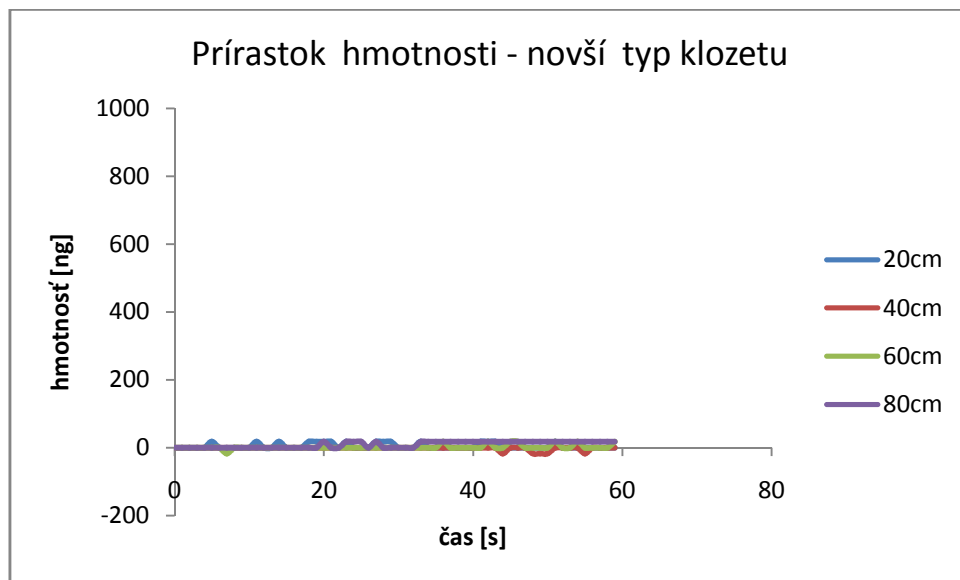


Obr. 55. Rýchlosť depozície aerosolov pri odparovaní

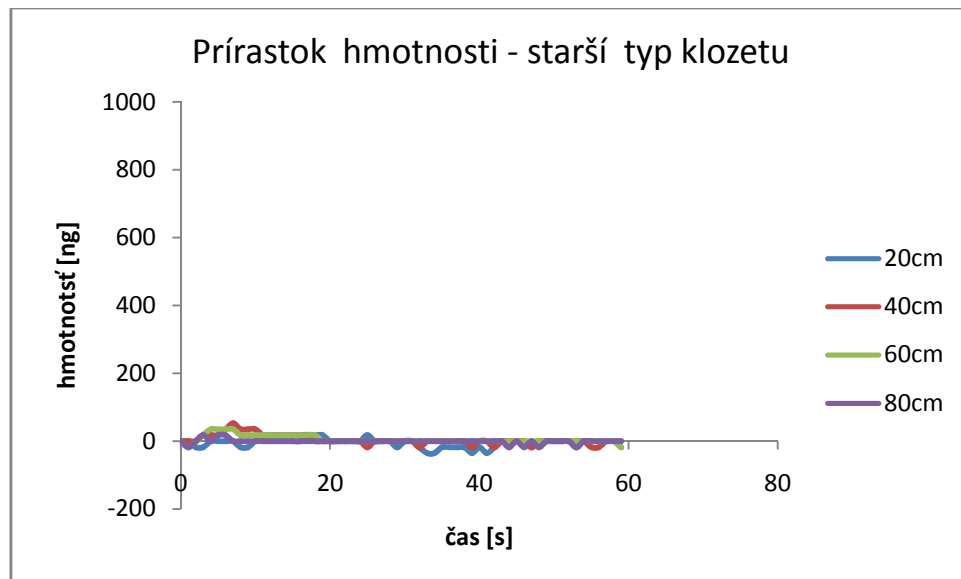


## 8.5 Pokus č.5

V pokuse č.5 sme sa pokúsili overiť predpoklad výskytu prevažne vodného aerosolu pri splachovaní klozetu. Merania sme uskutočňovali v uzavretej miestnosti pri teplote okolia 22°C. Na merania sme použili 2 typy klozetu. Vzďialenosť zdroja aerosolu (klozetu) po kremenný kryštálový senzor na začiatku pokusov bola 0,2m. Postupne v intervale 0,2m sme vzdialenosť predlžovali až do vzdialenosti 0,8m. Na obr. 56 a 57 sme znázornili priebeh prírastku hmotnosti aerosolu v závislosti od vzdialenosti pri použití oboch typov klozetov.



Obr. 56. Prírastok hmotnosti v závislosti od vzdialenosti pri použití novšieho typu klozetu



Obr. 57. Prírastok hmotnosti v závislosti od vzdialenosti pri použití staršieho typu klozetu

Ďalší pokus sme uskutočnili tak, že vzdialenosť senzora od zdroja aerosolu bola konštantná 0,4m. Výskyt aerosolu v prostredí sme merali po každom spláchnutí. Celkove sme spláchnutie opakovali 10 krát. Ani v tomto prípade sme nezaznamenali výskyt aerosolu v prostredí.

## 9 VYHODNOTENIE NAMERANÝCH ÚDAJOV

### 9.1 Pokus č.1

V pokuse č.1 sme porovnávali dostrek a hmotnosť dopadnutých častíc aerosolov na kremenný senzor v závislosti od vzdialenosti zdroja aerosolu od kremenného senzora. Zároveň sme medzi sebou porovnávali 3 spreje, resp. nádoby. Na porovnanie nám slúžili údaje hmotnostného prietoku a prírastkov hmotnosti aerosolu za jednotlivých premenných podmienok.

#### 9.1.1 Nádobka č.1

Z nameraných údajov, ktoré sú zobrazené na obr. 21 vyplýva, že s narastajúcou vzdialenosťou ( $l$ ) klesá hmotnosť aerosolu ( $m_{rel}$ ) dopadnutého na senzor. Maximálna hmotnosť aerosolu dopadla na senzor vždy v rovnakom čase 14 sekúnd od streku spreja.

Po dopade aerosolu na senzor jeho hmotnosť v priebehu merania, t. j. po dobu 60s, mierne klesala. Pravdepodobne dochádzalo k odparovaniu vody z aerosolovej vrstvy na senzore.

Maximálna hmotnosť, ktorá bola nameraná je  $m_{rel} = 1784,5ng$  vo vzdialenosti 0,2m a najnižšia  $m_{rel} = 53ng$  vo vzdialenosti 1m. Dosah nádoby č.1 je teda 1m. Vid' tab. 4. Vo vzdialenosti 1,2m už nie je potvrdený výskyt aerosolov po streknutí.

Na obr. 22 je znázornený prírastok hmotnosti v závislosti od vzdialenosti spreja od senzora. Z obrázka vyplýva, že hmotnosť klesá polynomicky v závislosti na vzdialenosti ( $l$ ).

Namerali a vypočítali sme maximálny hmotnostný prietok  $Q_m = 146,8ng/s$  vo vzdialenosti 0,2m.

#### 9.1.2 Nádobka č.2

Z nameraných údajov znázornených na obr. 26 vyplýva, že maximálna hmotnosť aerosolu dopadla na senzor pri vzdialenosti:

$l=0,2m$  v 13. sekunde,

$l=0,4m$  v 14. sekunde,

$l=0,6m$  v 15. sekunde,

$l=0,8m$  v 16. sekunde.

Po dopade aerosolu na senzor sme tiež pozorovali pokles hmotnosti v priebehu merania, čo zapríčiňovalo pravdepodobne odparovanie kvapôčiek vody aerosolu z povrchu senzora.

Ako vyplýva z tab. 5, maximálna hmotnosť  $m_{rel} = 1378,1 \text{ ng}$  bola nameraná vo vzdialenosti 0,2m, minimálna hmotnosť  $m_{rel} = 212 \text{ ng}$  bola nameraná vo vzdialenosti 0,8m. Dosah nádoby č.2 je 0,8m. Vo vzdialenosti 1m už boli hodnoty hmotnosti nulové. Prírastok hmotnosti klesá logaritmicky v závislosti na vzdialenosti, čo je znázornené na obr. 27.

Maximálny hmotnostný prietok  $Q_m = 109,5 \text{ ng/s}$  bol nameraný vo vzdialenosti 0,2m.

### 9.1.3 Nádoba č.3

Maximálna hmotnosť aerosolou dopadla na kremenný senzor vždy v rovnakom čase v 17. sekunde.

Maximálna hmotnosť  $m_{rel} = 4911,7 \text{ ng}$  bola nameraná vo vzdialenosti 0,2m, minimálna hmotnosť  $m_{rel} = 88,4 \text{ ng}$  bola nameraná vo vzdialenosti 1m. Po streknutí z nádoby č.3 bola nameraná najvyššia hmotnosť dopadnutých častíc aerosolu v porovnaní s ostatnými nádobami. Dosah nádoby č.3 je 1m.



Obr. 58. Kremenný senzor s čiaščkami aerosolov po streknutí

Prírastok hmotnosti klesá polynomiccky v závislosti na vzdialenosti, graficky je uvedená závislosť znázornená na obr. 33.

Maximálny hmotnostný prietok  $Q_m = 492,2 \text{ ng/s}$  bol nameraný vo vzdialenosti 0,2m.

#### 9.1.4 Celkové vyhodnotenie výsledkov pokusu č.1

Z tab. 12 vyplýva, že sprej č.3 vykazoval najvyšší prírastok hmotnosti aerosolu dopadajúceho na kremenný senzor. Pritom pri porovnaní účinnosti vzhľadom na dosah bol porovnateľný so sprejom č.1.

Z výsledkov pokusu č.1 môžeme usudzovať, že dosah a hmotnosť dopadnutých častíc je v prípade jednotlivých sprejov rozdielna a môže súvisieť s objemom nádoby a konštrukciou sprejového rozprašovača.

Tab. 12. Prírastok hmotnosti aerosolu v závislosti od vzdialenosti v prípade jednotlivých nádob

VZDIALENOSŤ [m]	PRÍRASTOK HMOTNOSTI NÁDOBY č.1 [ng]	PRÍRASTOK HMOTNOSTI NÁDOBY č.2 [ng]	PRÍRASTOK HMOTNOSTI NÁDOBY č.3 [ng]
0,2	1784,5	1378,1	4911,7
0,4	689	759,1	1219,1
0,6	406,4	547,7	1042,4
0,8	88,3	212	865,7
1	53	0	88,4
1,2	0	0	0

Z pokusu č.1 vyplýva, že primeraná vzdialenosť k útočníkovi je pre správny účinok obranného spreja dôležitá. Čím je útočník zasiahnutý z bližšej vzdialenosti, tým bude jeho paralizovanie účinnejšie.

## 9.2 Pokus č.2

V pokuse č.2 sme porovnávali dostrek a hmotnosť dopadnutých častíc aerosolov na kremenný senzor v závislosti od vzdialenosti zdroja aerosolu od kremenného senzora a uhla pri striekaní. Zároveň sme medzi sebou porovnávali 3 nádoby, resp. spreje. Na porovnanie nám slúžili údaje prírastkov hmotnosti aerosolu za jednotlivých premenných podmienok. Celkový súhrnný prehľad nameraných údajov uvádzame v tab. 13, 14, 15.

### 9.2.1 Nádoba č.1

Dosah nádoby č.1 bol 0,4 m pri striekaní v rozličných uhloch. Vo vzdialenosti 0,6m už boli namerané hodnoty hmotnosti nulové (okrem priameho streku  $0^\circ$ ).

Vo vzdialenosti 0,2m bol zaznamenaný maximálny prírastok hmotnosti pod uhlom  $15^\circ$   $m_{rel} = 1678,4ng$ . Minimálny prírastok hmotnosti, prakticky rovnajúci sa nule, bol nameraný pod uhlom  $90^\circ$   $m_{rel} = 53ng$ .

Vo vzdialenosti 0,4m bol maximálny prírastok hmotnosti pod uhlom  $15^\circ$   $m_{rel} = 583ng$  a minimálny prírastok hmotnosti po uhlom  $45^\circ$   $m_{rel} = 247,3ng$ . Prírastky hmotnosti v jednotlivých uhloch sú oveľa menšie ako vo vzdialenosti 0,2m. Nádobka č.1 dostrekla na kremenný senzor vo vzdialenosti 0,4m len pod uhlom  $15^\circ$  a  $45^\circ$ . V uhle  $90^\circ$  už boli hodnoty hmotnosti nulové.

Vo vzdialenosti 0,6m už nebol nameraný výskyt aerosolov na kremennom senzore po streknutí z nádoby č.1.

### 9.2.2 Nádoba č.2

Dosah nádoby č.2 pri použití v rôznych uhloch bol 0,4m (okrem priameho streku  $0^\circ$ ).

Vo vzdialenosti 0,2m bol nameraný maximálny prírastok hmotnosti  $m_{rel} = 724,4ng$  pod uhlom  $15^\circ$  a pod uhlom  $45^\circ$  minimálny nárast hmotnosti  $m_{rel} = 247ng$ . Dosah nádoby č.2 pri použití v rôznych uhloch vo vzdialenosti 0,2m je po uhol  $45^\circ$ . V uhle  $90^\circ$  už nebol nameraný žiadny prírastok hmotnosti.

Vo vzdialenosti 0,4m pod uhlom  $15^\circ$  bol nameraný maximálny nárast hmotnosti  $m_{rel} = 583ng$  a minimálny nárast hmotnosti pod uhlom  $30^\circ$   $m_{rel} = 388,7ng$ . Dosah vo vzdialenosti 0,4m bol po uhol  $30^\circ$ . V uhle  $45^\circ$  nebol zaznamenaný výskyt aerosolov po streknutí.

### 9.2.3 Nádoba č.3

Dosah nádoby č.3 bol len do vzdialenosti 0,2m. Pri striekaní z nádoby č.3 v rôznych uhloch vo vzdialenosti 0,4m už nebol preukázaný výskyt aerosolov pri žiadnom z uhlov.

Vo vzdialenosti 0,2m bol pod uhlom  $15^\circ$  nameraný maximálny prírastok hmotnosti  $m_{rel} = 706,7ng$  a pod uhlom  $45^\circ$  minimálny prírastok hmotnosti  $m_{rel} = 300,4ng$ . Dosah spreja č.3 vo vzdialenosti 0,2m bol po uhol  $45^\circ$ . Pod uhlom  $90^\circ$  nebol nameraný výskyt aerosolov na kremennom senzore po streknutí.

#### 9.2.4 Celkové vyhodnotenie výsledkov pokusu č.2

Výsledky pokusu, ktorého cieľom bolo overiť dosah aerosolu pri striekaní v rozličných uhloch na kremenný kryštálový senzor sú uvedené v tab. 13, 14, 15. Ako vidno z tabuliek, nádoby č.1 a č.2 dostrekli na kremenný kryštálový senzor až do uhla menšieho až rovného  $45^\circ$  a do vzdialenosti 0,4m. Striekacie v uhloch väčších ako  $45^\circ$  už bolo neúčinné, t.j. spreje č.1 a 2 nedostrekli na kremenný senzor.

V prípade nádoby č.3 bol maximálny dostrek 0,2m do uhla  $45^\circ$ . Nad touto vzdialenosťou a vo vyššom uhle už sprej nádoby č.3 nedostrekol.

Uhol, v ktorom útočíme na nepriateľa s obranným sprejom je veľmi dôležitý vzhľadom na primeraný výsledok obrany. Spreje v našich experimentoch mali najvyšší účinok pri priamom streknutí, resp. zaznamenali sme najvyšší prírastok hmotnosti pri dopade na kremenný kryštálový senzor. Týmto je zároveň experimentálne dokázané, že v prípade obrany pred útočníkom je najväčší zásah nepriateľa obranným sprejom pri priamom streknutí. Pri menšej výchyľke v smere striekania dochádza tiež k požadovanému paralizovaniu útočníka, avšak dostreknutá dávka je nižšia a obrana menej účinná. Zároveň sme experimentálne overili, že pri striekaní v rôznych uhloch je možné nepriateľa paralizovať do uhla  $45^\circ$  a do vzdialenosti 0,4m. Nad touto vzdialenosťou a pri striekaní vo väčšom uhle je zásah nepriateľa veľmi málo pravdepodobný. Navyše je veľmi dôležitý typ obranného spreja z hľadiska konštrukcie, resp. objemu, typu trysky, tlaku v nádobke a pod. Dokazuje to aj výsledok nášho experimentu v prípade nádoby č.3, kedy sme namerali maximálny dostrek 0,2m pod uhlami do  $45^\circ$ . Výsledok je odlišný v porovnaní s nádobkami č.1 a 2, čo súvisí predovšetkým s typom spreja a jeho mechanickými a objemovými charakteristikami.

Tab. 13. Prírastok hmotnosti aerosolu v závislosti od vzdialenosti a uhla v prípade nádoby č.1

NÁDOBA č.1	Vzdialenosť [m]	Uhol striekania [°]	Prírastok hmotnosti [ng]
	0,2	0	1784,5
		15	1678,4
		30	618,4
		45	141,3
		90	53
	0,4	0	1784,5
		15	583
		30	388,7
		45	247,3
		90	0

Tab. 14. Prírastok hmotnosti aerosolu v závislosti od vzdialenosti a uhla v prípade nádoby č.2

NÁDOBA č.2	Vzdialenosť [m]	Uhol striekania [°]	Prírastok hmotnosti [ng]
	0,2	0	1378,1
		15	724,4
		30	335,7
		45	247
		90	0
	0,4	0	1378,1
		15	583
		30	388,7
		45	0
		90	0



Tab. 15. Prírastok hmotnosti aerosolu v závislosti od vzdialenosti a uhla v prípade nádoby č.3

NÁDOBA č.3	Vzdialenosť [m]	Uhol striekania [°]	Prírastok hmotnosti [ng]
	0,2	0	4911,7
		15	706,7
		30	706,7
		45	300,4
		90	0
	0,4	0	0
		15	0
		30	0
		45	0
		90	0

### 9.3 Pokus č.3

Pokus č.3 bol zameraný na určenie rozptylu jednotlivých sprejov č.1 až 3. Uskutočnili sme 5 jednotlivých meraní stanovenia rozptylu pri striekaní sprejmi č.1 až 3. Rozptyl jednotlivých sprejov bol meraný vo vzdialenostiach 0,2m a 0,4m od kremenného senzora. Streknutie sa uskutočnilo vždy v 20-tej sekunde. V tab. 16 až 18 uvádzame údaje maximálnych prírastkov hmotnosti na kremennom kryštálovom senzore pri uvedených podmienkach merania.

#### 9.3.1 Nádoba č.1

Tab. 16. Maximálne prírastky hmotnosti pri jednotlivých meraniach pri striekaní s nádobou č.1

ČÍSLO MERANIA	MAXIMÁLNY PRÍRASTOK HMOTNOSTI VO VZDIALENOSTI 0,2m [ng]	MAXIMÁLNY PRÍRASTOK HMOTNOSTI VO VZDIALENOSTI 0,4m [ng]	MAXIMÁLNY PRÍRASTOK HMOTNOSTI VO VZDIALENOSTI 0,2m [kg]	MAXIMÁLNY PRÍRASTOK HMOTNOSTI VO VZDIALENOSTI 0,4m [kg]
1	247,3	1219,1	$2,5 \cdot 10^{-10}$	$1,2 \cdot 10^{-9}$
2	689	1060,1	$6,9 \cdot 10^{-10}$	$1,1 \cdot 10^{-9}$
3	918,7	388,7	$9,2 \cdot 10^{-10}$	$3,9 \cdot 10^{-10}$
4	459,4	1024,7	$4,6 \cdot 10^{-10}$	$1,0 \cdot 10^{-9}$
5	1307,4	1077,7	$1,3 \cdot 10^{-9}$	$1,1 \cdot 10^{-9}$

### 9.3.2 Nádoba č.2

Tab. 17. Maximálne prírastky hmotnosti pri jednotlivých meraniach pri striekaní s nádobou č.2

ČÍSLO MERANIA	MAXIMÁLNY PRÍRASTOK HMOTNOSTI VO VZDIALENOSTI 0,2m [ng]	MAXIMÁLNY PRÍRASTOK HMOTNOSTI VO VZDIALENOSTI 0,4m [ng]	MAXIMÁLNY PRÍRASTOK HMOTNOSTI VO VZDIALENOSTI 0,2m [kg]	MAXIMÁLNY PRÍRASTOK HMOTNOSTI VO VZDIALENOSTI 0,4m [kg]
1	1448,8	1042,4	$1,4 \cdot 10^{-9}$	$1,0 \cdot 10^{-9}$
2	653,7	883,4	$6,5 \cdot 10^{-10}$	$8,8 \cdot 10^{-10}$
3	1236,7	1148,4	$1,2 \cdot 10^{-9}$	$1,1 \cdot 10^{-9}$
4	441,7	971,7	$4,4 \cdot 10^{-10}$	$9,7 \cdot 10^{-10}$
5	1360,4	795,1	$1,4 \cdot 10^{-9}$	$8,0 \cdot 10^{-10}$

### 9.3.3 Nádoba č.3

Tab. 18. Maximálne prírastky hmotnosti pri jednotlivých meraniach pri striekaní s nádobou č.3

ČÍSLO MERANIA	MAXIMÁLNY PRÍRASTOK HMOTNOSTI VO VZDIALENOSTI 0,2m [ng]	MAXIMÁLNY PRÍRASTOK HMOTNOSTI VO VZDIALENOSTI 0,4m [ng]	MAXIMÁLNY PRÍRASTOK HMOTNOSTI VO VZDIALENOSTI 0,2m [kg]	MAXIMÁLNY PRÍRASTOK HMOTNOSTI VO VZDIALENOSTI 0,4m [kg]
1	2314,5	1378,1	$2,3 \cdot 10^{-9}$	$1,4 \cdot 10^{-9}$
2	1802,1	989,4	$1,8 \cdot 10^{-9}$	$9,9 \cdot 10^{-10}$
3	1095,4	812,7	$1,1 \cdot 10^{-9}$	$8,1 \cdot 10^{-10}$
4	1166,1	1890,5	$1,2 \cdot 10^{-9}$	$1,9 \cdot 10^{-9}$
5	1607,8	1696,1	$1,6 \cdot 10^{-9}$	$1,7 \cdot 10^{-9}$

### 9.3.4 Vyhodnotenie výsledkov pokusu č.3

Nádoba č.1 má pri striekaní vo vzdialenosti 0,2m rozptyl od 247ng po 1307ng a vo vzdialenosti 0,4m má rozptyl 389ng až 1219ng.

Nádoba č.2 má pri striekaní vo vzdialenosti 0,2m rozptyl od 442ng po 1449ng a vo vzdialenosti 0,4m od rozptyl 883ng do 1148ng.

Nádoba č.3 má pri striekaní vo vzdialenosti 0,2m rozptyl od 1095ng po 2315ng a vo vzdialenosti 0,4m od 813ng po 1696ng.

## 9.4 Pokus č.4

Výsledky merania pokusu č.4, ktorého cieľom bolo stanoviť dobu odparovania vrstvy vodného aerosolu, uvádzame v tab. 19. Uskutočnili sme 4 merania. Z nameraných údajov zmeny frekvencie piezoelektrického kryštálu sme podľa Sauerbreyho rovnice vypočítali hmotnosť jednotlivej streknutej vrstvy vodného aerosolu v maxime. Priemerný čas odparovania vrstvy sme vzťahli na jednotku 5000ng . Experimenty sme uskutočňovali pri teplote okolia 22°C v uzavretej miestnosti. Priemernú dobu odparovania vrstvy vodného aerosolu vzťahnutého na hmotnosť 5000ng sme namerali 624,4s. Nakoniec sme vypočítali štatistickú chybu merania.

Tab. 19. Čas odparovania aerosolu, namerané a vypočítané hodnoty

	maximálna hmotnosť aerosolu [ng]	čas odparovania aerosolu [s]	čas odparovania aerosolu pri hmotnosti 5000ng [s]
EXPERIMENT 1	2628,9	332	631,4
EXPERIMENT 2	2187,3	278	635,6
EXPERIMENT 3	1795,1	202	562,6
EXPERIMENT 4	1040,6	139	667,8
		PRIEMER	624,35

Smerodajná odchýlka pri meraní: 38,3s.

Namerali sme, že čas odparovania vrstvy aerosolu hmotnosti 5000ng, ktorý je  $624 \pm 38$ s.

## 9.5 Pokus č.5

Výsledky meraní pokusu č.5 sú na obr. 56 a 57. Sú tu znázornené prírastky hmotnosti aerosolu v závislosti od vzdialenosti pri použití dvoch typov klozetov. Vzdialenosť sa menila od 0,2m po 0,8m v intervale 0,2m. Výsledky pokusu č.5 potvrdzujú, že za uvedených podmienok nebol pri použití klozetu rozptýlený aerosol do prostredia. Na senzore QCM 200 sa nedetegoval aerosol vo vzdialenosti 0,2m až 0,8m od zdroja aerosolu.

Uvedený experimentálny výsledok sme ešte raz overili v sérii meraní za nasledovných podmienok: Pokus sme uskutočnili pri konštantnej vzdialenosti senzora od zdroja aerosolu 0,4m. Výskyt aerosolu v prostredí sme merali po každom spláchnutí. Celkove sme spláchnutie opakovali 10 krát. Ani v tomto prípade sme nezaznamenali výskyt aerosolu v prostredí.

Na záver je potrebné konštatovať, že napriek skutočnosti, že sme nedokázali výskyt, resp. prítomnosť aerosolu v prostredí v rôznych vzdialenostiach senzora od zdroja aerosolu a zároveň ani po niekoľkonásobnom spláchnutí klozetu, tento výsledok je potrebné ešte ďalej experimentálne overiť pomocou merania na senzitivnej vrstve so selektívnou schopnosťou sorbovať častičky vodného aerosolu na povrchu.

Uvedená problematika však presahuje rámec tejto práce.

## 10 MODELOVÁ ÚLOHA PRE FAI

Fakulta aplikovanej informatiky vyučuje v obore Bezpečnostné technológie, systémy a management predmety vhodné pre aplikáciu QCM 200 vo forme laboratórnej úlohy.

Laboratórnu úlohu je možné realizovať v bakalárskom programe v rámci predmetu Technické prostriedky bezpečnostného priemyslu (A4PBP) alebo v magisterskom programe v rámci predmetu Nadštandardné prvky objektovej bezpečnosti (A7NPB). Anotácia obidvoch predmetov umožňuje realizáciu úlohy, pričom predmet Technické prostriedky bezpečnostného priemyslu je vhodnejší. Preferujem realizáciu úlohy v bakalárskom programe.

Hlavným cieľom úlohy je možnosť študentov ohodnotiť funkcie QCM 200 a vytvoriť nové možnosti použitia QCM 200 na základe získaných teoretických a praktických poznatkov priamo z laboratórnej úlohy.

Dôraz sa kladie hlavne na samostatnosť študentov pri práci so senzorom.

V laboratórnej úlohe sú využité merania priamo z diplomovej práce. Výsledky z meraní z diplomovej práce slúžia na porovnanie nameraných výsledkov študentmi. Výsledné hodnoty by mali rádozo zodpovedať výsledkom z diplomovej práce.

Presné znenie laboratórnej práce je uvedené v prílohe P I.

## ZÁVER

Na základe merania hmotnosti aerosolu vody pomocou kremenného mikrováhového senzora (QCM) sme určili dosah sprejov pri striekaní v priamom uhle a v rôznych uhloch striekania. Pri striekaní v priamom uhle bol dosah sprejov do maximálnej vzdialenosti 1m. Pri striekaní v rôznych uhloch  $> 0^\circ$  bol dosah sprejov maximálne do vzdialenosti 0,4m v uhloch do  $45^\circ$ . Vo vzdialenostiach vyšších ako je uvedené bola hmotnosť aerosolu na senzore rovná nule. Aplikovaním nameraných výsledkov na príklade použitia obranných sprejov je možné predpokladať, že vo vzdialenostiach väčších ako 1m v priamom uhle a 0,4m v uhloch do  $45^\circ$  je zásah útočníka v obrannej situácii veľmi málo pravdepodobný. Rôzne hodnoty nameraných údajov dosahu jednotlivých sprejov použitých v sérii experimentov poukazujú na skutočnosť, dosah je zároveň funkciou typu obranného spreja z hľadiska konštrukcie, objemu, typu trysky, tlaku v nádobke a pod.

Ďalej sme v sérii meraní experimentálne stanovili čas odparovania vrstvy vodného aerosolu. Namerané údaje sme vzťahli na hmotnosť 5000ng a čas odparovania vrstvy sme stanovili  $624 \pm 38$ s.

V sérii pokusov stanovenia rozptylu meraní na základe merania hmotnosti aerosolu pri striekaní vo vzdialenostiach 0,2m a 0,4m sme namerali rozptyl spreja č.1 vo vzdialenosti 0,2m od 247ng po 1307ng a vo vzdialenosti 0,4m bol rozptyl od 389ng do 1219ng.

Sprej č.2 mal pri striekaní vo vzdialenosti 0,2m rozptyl od 442ng do 1449ng a vo vzdialenosti 0,4m mal rozptyl od 883ng do 1148ng.

Sprej č.3 mal pri striekaní vo vzdialenosti 0,2m rozptyl od 1095ng do 2315ng a vo vzdialenosti 0,4 m od 813ng do 1696ng.

Ako vidno z výsledkov meraní, rozptyl merania aerosolu pomocou kremenného mikrováhového senzora bol veľmi veľký. Súvisí to s metodikou merania hmotnosti aerosolu, pri ktorej nebola na povrch mikrováhového kryštálového senzora nanosená selektívna vrstva umožňujúca adsorpciu aerosolu vody na povrchu. Uvedená skutočnosť zapríčinila veľký rozptyl nameraných hodnôt a nízku reprodukovateľnosť nameraných údajov. Cieľom tejto práce však bolo overenie použitia mikrováhového kryštálového senzora na merania aerosolov v prostredí, čo bolo experimentálne dokázané. Zabezpečenie vyššej reprodukovateľnosti meraní pomocou selektívnej adsorpčnej vrstvy je nad rámec tejto práce.

V práci sme ďalej overili predpoklad vzniku prevažne vodného aerosolu pri splachovaní klozetu. Merania sme uskutočnili vo vzdialenosti 0,2m až 0,8m od klozetu a jednonásobnom spláchnutí a vo vzdialenosti 0,4m a 10-násobnom spláchnutí. Výskyt aerosolu v prostredí sme nepotvrdili.

Dokázali sme, že kremenný mikrováhový senzor je vhodný na detekciu a stanovenie aerosolov v prostredí. Metodika merania na stanovenie a detekciu aerosolov bola úspešná. Cieľ diplomovej práce bol splnený.

## CONCLUSION

The maximal working radius of sprays value 1 m by straight angle spraying was determined on the ground of aqueous aerosol mass measuring by means of quartz crystal microbalance sensor (QCM). Maximal working radius of sprays 0,4m was determined in various angles from greater than  $> 0^\circ$ . Over the mentioned distances was detected zero mass of aerosols on the sensor. The measured results can be applicable in example of defense sprays and enables us to suppose, that over the presented values of distances is intervention of attacker by defence situation very low presumptive.

The various values of working radius of sprays used in these series of experiments shows, that the working radius is function of type, construction, volume, press and type of sprays, etc.

The time of evaporation of aqueous aerosols was determined. The measured data were counted on mass 5000 ng and time was determined  $624 \pm 38$  s .

In the series of experiments was measured data dispersion on the ground of mass microbalance aerosols measuring. The data dispersions were in case of spray No.1 in distance 0,2m from 247ng to 1307ng and in distance 0,4m from 389ng to 1219ng.

Spray No.2 had the data dispersion in distance 0,2m from 442ng to 1449ng and in distance 0,4m from 883ng to 1148ng.

Spray No.3 had the data dispersion in distance 0,2m from 1095ng to 2315ng and in distance 0,4m from 813ng to 1696ng.

The experimental results points to the facts, that the data dispersions of aerosols measuring by quartz crystal microbalance sensors is too high. It is connected to the measuring technique approach, in which was not applied the selective layer on the surface of microbalance sensor enabled the adsorption of aqueous aerosol on it ground. These facts caused the high data dispersion and low reproducibility of the measured data. Targets of this these was verification of uses the quartz crystal microbalance sensor on measuring of aerosols in environment. This target was fulfilled. Securing of the better data reproducibility by selective adsorption layer is over the frame of this graduation these.

In the graduation these was demonstrated a thesis of aqueous aerosols generation by flush of lavatory. The detection was realised in distances from 0,2 m to 0,8 m from the lavatory



by 1-multiple flush and in distance 0,4 m by 10-multiple flush. The presence of aerosols in environment was not detected.

The method of quartz crystal microbalance technique is suitable for detection and measuring of aerosols in environment. The presented measuring method was successful. The target of this graduation these was fulfilled

**ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY**

- [1] What is a quartz crystal microbalance-QCM. *KSV* [online]. October 2004, 1, [cit. 2010-05-17]. Dostupný z WWW  
: <[http://www.terralab.biz/edoc/ksv/KSV\\_QCM\\_Article\\_What\\_is\\_QCM.pdf](http://www.terralab.biz/edoc/ksv/KSV_QCM_Article_What_is_QCM.pdf)>.
- [2] *Wikipedie: otvorená encyklopedie* [online]. 17.5.2009, 23.4.2010 [cit. 2010-05-17]. Piezoelektrický jev. Dostupné z WWW  
:<[http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Piezoelektrick%C3%BD\\_jev&oldid=5258638](http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Piezoelektrick%C3%BD_jev&oldid=5258638)>.
- [3] BANÍK, Ivan; CHOVANCOVÁ, Marcela; ZÁMEČNÍK, Jozef. *Fyzika 1* [online]. Bratislava : Slovenská Technická univerzita v Bratislave, 2006 [cit. 2010-05-17]. Ultrazvuk, s. . Dostupné z WWW:  
<[http://web.svf.stuba.sk/kat/FYZ/fyzika\\_ta\\_vola/skripta/other/ultrazvuk.pdf](http://web.svf.stuba.sk/kat/FYZ/fyzika_ta_vola/skripta/other/ultrazvuk.pdf)>.
- [4] ZEHNULA, K. *Snímače neelektrických veličin.* Praha : SNTL, 1986. 400 s.
- [5] ĎAĎO, S; KREIDL, M. *Senzory a měřící obvody.* Praha : ČVUT, 1996. 315 s.
- [6] *AT&P journal* [online]. 2010 [cit. 2010-05-17]. AT&P journal-odborný mesacnik. Dostupné z WWW: <<http://www.atpjournal.sk/>>.
- [7] KLEMENTEV, I; KYŠKA, R. *Elektrické meranie mechanických veličin.* Bratislava : Alfa, 1990. 328 s.
- [8] REICHL, Jaroslav; VŠETIČKA, Martin. *Encyklopedie fyziky* [online]. [s.l.] : [s.n.], 2006-2010 [cit. 2010-05-17]. Dostupné z WWW:  
<<http://fyzika.jreichl.com/index.php?sekce=browse&page=1>>.
- [9] TJÄRNHAGE, Torbjörn. *Thin polymer and phospholipid films for biosensors characterisation with gravimetric, electrochemical and optical methods.* Sweden : Umel, 1996. 105 s.
- [10] TOMAN, M. Ultrazvuk pre priestorové meranie. . *AT&P Journal plus2.* 2001, 7, s. 66-75.
- [11] BOTTOM, V.E. *Introduction to Quartz Crystal Unit Design.* New York : Van Nostrand Reinhold Company, 1982. 265 s.

- [12] Crystal oscillator In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 2005, 26 April 2010 [cit. 2010-05-18]. Dostupné z WWW: <[http://en.wikipedia.org/wiki/Crystal\\_oscillator](http://en.wikipedia.org/wiki/Crystal_oscillator)>.
- [13] Quartz crystal microbalance#General In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 2005, 28 January 2010 [cit. 2010-05-18]. Dostupné z WWW: <[http://en.wikipedia.org/wiki/Quartz\\_crystal\\_microbalance#General](http://en.wikipedia.org/wiki/Quartz_crystal_microbalance#General)>.
- [14] HENDERSON, John. *Electronic Devices, Concepts and Applications*. Prentice Hall : College Div, 1991. 250 s.
- [15] *QCM 200m : Operation and Service Manual* [online]. California : QC Microbalance, 2004 [cit. 2010-05-18]. Dostupné z WWW: <<http://www.thinksrs.com/downloads/PDFs/Manuals/QCM200m.pdf>>.
- [16] SAUERBREY, G. *Verwendung von Schwingquartzen zur Wägung dünner Schichten und zur Mikrowägung*. German : Phys, 1959. 222 s.
- [17] K.K. Kanazawa and J.G. Gordon, *Analytical Chemistry*, **57**(1985) 1770-1771.
- [18] CHUCHVALEC, Pavel; SVOBODA, Ondřej. Fyzikálne-chemické aspekty umělého vyvolání deště. *Chemické listy* [online]. 2009, 103, [cit. 2010-05-18]. Dostupný z WWW: <[http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2009\\_10\\_823-826.pdf](http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2009_10_823-826.pdf)>.
- [19] *Znečišťující látky v životním prostředí* [online]. 2009 [cit. 2010-05-18]. Zlvzp. Dostupné z WWW: <[http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:TRFYwmstI3sJ:www.osu.cz/fpd/kpv/dokumenty/zlvzp.ppt+rozdelenie+aerosol%C5%AF&cd=6&hl=cs&ct=clnk&client=firefox-a20.http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid\\_es-001/figures/aerosol.jpg](http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:TRFYwmstI3sJ:www.osu.cz/fpd/kpv/dokumenty/zlvzp.ppt+rozdelenie+aerosol%C5%AF&cd=6&hl=cs&ct=clnk&client=firefox-a20.http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_es-001/figures/aerosol.jpg)>.
- [20] *Aerosol* [online]. 2005 [cit. 2010-05-18]. Aerosol. Dostupné z WWW: <[http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid\\_es-001/hesla/aerosol.html](http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_es-001/hesla/aerosol.html)>.
- [21] ELSEVIER, B.V. *ScienceDirect* [online]. 2010 [cit. 2010-05-18]. ScienceDirect. Dostupné z WWW: <<http://www.sciencedirect.com/>>.
- [22] *Air particle analyzers and samplers* [online]. 2010 [cit. 2010-05-18]. California Measurements, Inc. Dostupné z WWW: <<http://www.californiameasurements.com/html/product.html>>.

- [23] *Informaword* [online]. 2010 [cit. 2010-05-18]. Informaword. Dostupné z WWW: <<http://www.informaworld.com/smpp/home~db=all>>.
- [24] DAO, Liang, et al. A Miniature System for Separating Aerosol Particles and Measuring Mass Concentrations. *Sensors* [online]. 2010, 10, [cit. 2010-05-18]. Dostupný z WWW: <<http://www.mdpi.com/1424-8220/10/4/3641/pdf>>.
- [25] NIRANJAN, K, et al. Aerosol spectral optical depths and size characteristics at a coastal industrial location in India – effect of synoptic and mesoscale weather. *Annales geophysicae* [online]. 2004, 22, [cit. 2010-05-18]. Dostupný z WWW: <<http://www.ann-geophys.net/22/1851/2004/angeo-22-1851-2004.pdf>>.
- [26] *UK a search* [online]. 2010 [cit. 2010-05-18]. Publications and Reports of School of Electrical Engineering. Dostupné z WWW: <[http://www.ee.kth.se/php/modules/publications\\_polopoly/index.php?action=publications\\_polopoly&year=&author=&title=aerosol&div=&type=&l=en\\_UK&search=yes](http://www.ee.kth.se/php/modules/publications_polopoly/index.php?action=publications_polopoly&year=&author=&title=aerosol&div=&type=&l=en_UK&search=yes)>.
- [27] MURRAY, George M.; SOUTHARD, Glen E. Sensors for chemical weapons detection. *IEEE Instrumentation and Measurement magazine* [online]. 2002, 17, [cit. 2010-05-18]. Dostupný z WWW: <<http://www.emory.edu/BUSINESS/mote/Sniffer.pdf>>.
- [28] *ČIP* [online]. 2010 [cit. 2010-05-18]. Jak vybrat pepřový a obranný sprej. Dostupné z WWW: <[http://cip.inshop.cz/inshop/jak\\_vybrat\\_obranny\\_sprej](http://cip.inshop.cz/inshop/jak_vybrat_obranny_sprej)>.
- [29] Vypařování. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 2003, last modified on 20. 4. 2010 [cit. 2010-05-19]. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Vypařování>>.
- [30] *QCM sensors* [online]. 2009 [cit. 2010-05-23]. QCM sensors. Dostupné z WWW: <<http://www.dii.unisi.it/~electron/lab/Ricerca/QCM%20sensors.htm>>.

**ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK**

- QCM      Kremenný mikrováhový senzor.
- AT rez    Rez monokryštálom kremeňa.
- BT rez    Rez monokryštálom kremeňa.
- Q faktor    Kvalita oscilácie.
- PVDF      Polyvinylidéndifluorid.
- BVD      Model kryštalického oscilátoru.

**ZOZNAM OBRÁZKOV**

Obr. 1. Priamy piezoelektrický jav [3].....	12
Obr. 2. Nepriamy piezoelektrický jav [3] .....	12
Obr. 3. Hexagonálna sústava.....	13
Obr. 4. AT a BT rez kremenným kryštálom [9].....	14
Obr. 5. Prírodný kremeň.....	15
Obr. 6. Miniaturny 4MHz kremenný kryštál v hermetickom obale využívaný ako rezonátor v kryštalickom oscilátore [12] .....	16
Obr. 7. Kmitanie kryštálového oscilátora [12].....	17
Obr. 8. Znáznornenie štruktúry kremenného kryštálového senzora [30].....	18
Obr. 9. Štruktúra kremenného kryštálového senzora [30] .....	18
Obr. 10. BVD ekvivalentný model kryštalického oscilátora pre prostredie vzduch [9].....	19
Obr. 11. Elektronický symbol piezoelektrického kryštálového rezonátora [12] .....	21
Obr. 12. Schématické znázornenie kremenného kryštálu používaného v kremenném mikrováhovom senzore.....	21
Obr. 13. Jednotlivé veľkosti aerosolových častíc [20].....	27
Obr. 14. Predný panel QCM 200 .....	30
Obr. 15. Zadný panel QCM 200.....	31
Obr. 16. Nádoby použité v pokuse č.1 .....	35
Obr. 17. Schématický nákres pokusu č.1 .....	36
Obr. 18. Schématický nákres pokusu č.2 .....	37
Obr. 19. Rôzne typy obranných sprejov.....	38
Obr. 20. Schématický nákres pokusu č.5 .....	40
Obr. 21. Prírastok hmotnosti pri použití nádoby č.1 v závislosti od vzdialenosti a času.....	43
Obr. 22. Hmotnosť dopadnutého aerosolu v závislosti od vzdialenosti striekania pri použití nádoby č.1.....	44
Obr. 23. Rýchlosť depozície a prírastok hmotnosti aerosolu vo vzdialenosti 0,2m pri použití nádoby č.1.....	44
Obr. 24. Rýchlosť depozície a prírastok hmotnosti aerosolu vo vzdialenosti 0,4m pri použití nádoby č.1.....	45
Obr. 25. Rýchlosť depozície a prírastok hmotnosti aerosolu vo vzdialenosti 0,6m pri použití nádoby č.1.....	45

Obr. 26. Prírastok hmotnosti pri použití nádoby č.2 v závislosti od vzdialenosti a času .....	46
Obr. 27. Hmotnosť dopadnutého aerosolu v závislosti od vzdialenosti striekania pri použití nádoby č. 2.....	46
Obr. 28. Rýchlosť depozície aerosolu a prírastok hmotnosti vo vzdialenosti 0,2m pri použití nádoby č.2.....	47
Obr. 29. Rýchlosť depozície aerosolu a prírastok hmotnosti vo vzdialenosti 0,4m pri použití nádoby č.2.....	47
Obr. 30. Rýchlosť depozície aerosolu a prírastok hmotnosti vo vzdialenosti 0,6m pri použití nádoby č.2.....	48
Obr. 31. Rýchlosť depozície aerosolu a prírastok hmotnosti vo vzdialenosti 0,8m pri použití nádoby č.2.....	48
Obr. 32. Prírastok hmotnosti pri použití nádoby č.3 v závislosti od vzdialenosti a času .....	49
Obr. 33. Hmotnosť dopadnutého aerosolu v závislosti od vzdialenosti striekania pri použití nádoby č.3.....	50
Obr. 34. Rýchlosť depozície aerosolu a prírastok hmotnosti vo vzdialenosti 0,2m pri použití nádoby č.3.....	50
Obr. 35. Rýchlosť depozície aerosolu a prírastok hmotnosti vo vzdialenosti 0,4m pri použití nádoby č.3.....	51
Obr. 36. Rýchlosť depozície aerosolu a prírastok hmotnosti vo vzdialenosti 0,6m pri použití nádoby č.3.....	51
Obr. 37. Rýchlosť depozície aerosolu a prírastok hmotnosti vo vzdialenosti 0,8m pri použití nádoby č.3.....	52
Obr. 38. Prírastok hmotnosti aerosolu vo vzdialenosti 0,2 m pri použití nádoby č.1 v rozličných uhloch.....	53
Obr. 39. Hmotnosť aerosolu vo vzdialenosti 0,2 m pri použití nádoby č.1 v rozličných uhloch.....	54
Obr. 40. Prírastok hmotnosti vo vzdialenosti 0,4m pri použití nádoby č.1 v rozličných uhloch.....	55
Obr. 41. Hmotnosť aerosolu vo vzdialenosti 0,4m pri použití nádoby č.1 v rozličných uhloch .....	56

Obr. 42. Prírastok hmotnosti vo vzdialenosti 0,2m pri použití nádoby č.2 v rozličných uhloch.....	56
Obr. 43. Hmotnosť aerosolu vo vzdialenosti 0,2m pri použití nádoby č.2 v rozličných uhloch .....	57
Obr. 44. Prírastok hmotnosti vo vzdialenosti 0,4m pri použití nádoby č.2 v rozličných uhloch.....	58
Obr. 45. Hmotnosť aerosolu vo vzdialenosti 0,4m pri použití nádoby č.2 v rozličných uhloch .....	59
Obr. 46. Prírastok hmotnosti vo vzdialenosti 0,2m pri použití nádoby č.3 v rozličných uhloch.....	59
Obr. 47. Hmotnosť aerosolu vo vzdialenosti 0,2m pri použití nádoby č.3 v rozličných uhloch .....	60
Obr. 48. Rozptyl pri striekaní aerosolu vo vzdialenosti 0,2m pri použití nádoby č.1 .....	61
Obr. 49. Rozptyl pri striekaní aerosolu vo vzdialenosti 0,4m pri použití nádoby č.1 .....	61
Obr. 50. Rozptyl pri striekaní aerosolu vo vzdialenosti 0,2m pri použití nádoby č.2.....	62
Obr. 51. Rozptyl pri striekaní aerosolu vo vzdialenosti 0,4m pri použití nádoby č.2.....	62
Obr. 52. Rozptyl pri striekaní aerosolu vo vzdialenosti 0,2m pri použití nádoby č.3.....	63
Obr. 53. Rozptyl pri striekaní aerosolu vo vzdialenosti 0,4m pri použití nádoby č.3.....	63
Obr. 54. Úbytok hmotnosti aerosolu pri odparovaní.....	64
Obr. 55. Rýchlosť depozície aerosolov pri odparovaní .....	64
Obr. 56. Prírastok hmotnosti v závislosti od vzdialenosti pri použití novšieho typu klozetu.....	65
Obr. 57. Prírastok hmotnosti v závislosti od vzdialenosti pri použití staršieho typu klozetu.....	66
Obr. 58. Kremenný senzor s čiastočkami aerosolov po streknutí.....	68



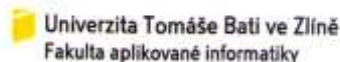
**ZOZNAM TABULIEK**

Tab. 1. Ponuka systému QCM 200 .....	32
Tab. 2. Špecifikácia merania frekvencie QCM 200 .....	33
Tab. 3. Špecifikácia merania odporu QCM 200 .....	33
Tab. 4. Hmotnosť aerosolu pri použití nádoby č.1 v závislosti od vzdialenosti .....	43
Tab. 5. Hmotnosť aerosolu pri použití nádoby č.2 v závislosti od vzdialenosti .....	46
Tab. 6. Hmotnosť aerosolu pri použití nádoby č.3 v závislosti od vzdialenosti .....	49
Tab. 7. Hmotnosť aerosolu vo vzdialenosti 0,2 m pri použití nádoby č.1 v rozličných uhloch .....	53
Tab. 8. Hmotnosť aerosolu vo vzdialenosti 0,4m pri použití nádoby č.1 v rozličných uhloch .....	55
Tab. 9. Hmotnosť aerosolu vo vzdialenosti 0,2m pri použití nádoby č.2 v rozličných uhloch .....	57
Tab. 10. Hmotnosť aerosolu vo vzdialenosti 0,4m pri použití nádoby č.2 v rozličných uhloch .....	58
Tab. 11. Hmotnosť aerosolu vo vzdialenosti 0,2m pri použití nádoby č.3 v rozličných uhloch .....	60
Tab. 12. Prírastok hmotnosti aerosolu v závislosti od vzdialenosti v prípade jednotlivých nádob.....	69
Tab. 13. Prírastok hmotnosti aerosolu v závislosti od vzdialenosti a uhla v prípade nádoby č.1 .....	72
Tab. 14. Prírastok hmotnosti aerosolu v závislosti od vzdialenosti a uhla v prípade nádoby č.2.....	72
Tab. 15. Prírastok hmotnosti aerosolu v závislosti od vzdialenosti a uhla v prípade nádoby č.3.....	73
Tab. 16. Maximálne prírastky hmotnosti pri jednotlivých meraniach pri striekaní s nádobou č.1 .....	73
Tab. 17. Maximálne prírastky hmotnosti pri jednotlivých meraniach pri striekaní s nádobou č.2 .....	74
Tab. 18. Maximálne prírastky hmotnosti pri jednotlivých meraniach pri striekaní s nádobou č.3 .....	74
Tab. 19. Čas odparovania aerosolu, namerané a vypočítané hodnoty .....	75

## ZOZNAM PRÍLOH

P I Vzorová laboratórna úloha

# PRÍLOHA P I: VZOROVÁ LABORATÓRNA ÚLOHA



## Laboratórna úloha

### Názov

Použitie kremenného mikrováhového senzora QCM 200 a oscilátora QCM25 od firmy SRS Stanford Research Systems na meranie aerosolov.

Určenie vzdialenosti dostreku sprejov pomocou kremenného mikrováhového senzora.

### Úloha

1. Zoznámte sa teoreticky s funkciami a fungovaním prístroja QCM 200.
2. Dôkladne naštudujte manuál priložený k senzoru (<http://www.thinksrs.com/downloads/PDFs/Manuals/QCM200m.pdf>).
3. Oboznámte sa s priloženým programom (vee pro), ktorý umožňuje prenos údajov z QCM 200 do PC.
4. Nastavte parametre QCM 200 pre potreby merania. Postupujte podľa návodu.
5. Uskutočnite prvé meranie frekvencie bez akéhokoľvek zaťaženia senzora. Vypočítajte relatívnu frekvenciu prvého merania. Relatívna frekvencia sa má rovnať nule. Overíte tak správnu funkčnosť meracieho prístroja. Meranie označte ako meranie č.1. Ak sa relatívna frekvencia nerovná nule, nastavte znova prístroj podľa návodu a meranie opakujte.
6. Pomocou prístroja QCM200 zistite, aký je dosah striekania a účinnosť dvoch sprejov. Striekanie uskutočnite v rôznych vzdialenostiach od kremenného kryštalického senzora sprejmi naplnenými čistou vodou ( $H_2O$ ). Jednotlivé spreje porovnajte.
7. Pri výpočtoch použite upravenú Sauerbreyho rovnicu. Hodnoty frekvencie a vypočítané údaje hmotnosti aerosolu uveďte do tabuľky.
8. Porovnajte účinnosť oboch sprejov.
9. Na základe výsledkov merania diskutujte použitie sprejov v obrannej situácii.
10. Navrhните ďalšie aplikácie prístroja QCM 200.

## Teória

### QCM 200

Mikrováhový senzor QCM200 firmy SRS Stanford Research Systems, USA je extrémne citlivý prístroj na stanovenie hmotnosti látky na jednotku plochy na základe merania zmeny frekvencie kremenného kryštálového oscilátora QCM25. Zariadenie veľmi citlivo sníma zmeny frekvencie kryštálového oscilátora v reálnom čase. Citlivosť senzora je približne 100 krát vyššia ako u elektronických jemných váh s citlivosťou 0,1 mg. Kremenný mikrováhový senzor je schopný merať zmeny hmotnosti také malé, ako zlomok monomolekulárnej vrstvy alebo jednej vrstvy atómu.

### Ponuka systému QCM 200

Tab. 1. Ponuka systému QCM 200.

PARAMETER	HODNOTA	SYMBOL	DISPLAY
<b>Frekvencia</b>	Absolútna frekvencia	F	Absolútna frekvencia [Hz] = sériová rezonančná frekvencia v kremennom kryštáli
	Relatívna frekvencia	f	Relatívna frekvencia [Hz] = Absolútna frekvencia – nulová frekvencia ( frekvencia nulového stavu )
	Hmotnosť	m	Hmotnosť [ng] = Relatívna frekvencia/0,0566
<b>Odpor</b>	Absolútny odpor	R	Absolútny odpor [Ohm] = sériový rezonančný odpor v kremennom kryštály
	Relatívny odpor	r	Relatívny odpor [Ohm] = Absolútny odpor – nulový odpor
<b>Čas (Gate)</b>	10 sek	gate 10 S	nastavený časový interval pre počítadlo frekvencie
	1 sek	gate 1 S	
	0,1 sek	gate 100 mS	

### Kryštálový oscilátor QCM 25

Hlavnou súčasťou oscilátora QCM25 je piezoelektrický kremenný kryštál s AT rezom umiestnený medzi dvojicou elektród. Piezoelektrický kryštál kremeňa je konštruovaný vo forme disku. V súvislosti s piezoelektrickými vlastnosťami kryštálu kremeňa oscilácia v kremennom kryštáli je ľahko indukovaná aplikáciou elektrického poľa cez elektródy. Pokiaľ elektródami prechádza striedavé elektrické napätie, kremenný kryštál začne kmitať na jeho rezonančnú frekvenciu pre piezoelektrický efekt. Kmitanie je všeobecne veľmi stabilné, kvôli

vysoké kvalite oscilácie (vysoký Q faktor). Elektrický obvod pre kryštalický oscilátor navrhol Butterworth-van Dyke, tzv. BVD model. Obvod využíva mechanickú rezonanciu vibrácie kryštálu z piezoelektrického materiálu, čím vytvára elektrický signál s veľmi presnou frekvenciou. Najčastejšie sa ako piezoelektrický rezonátor používa kremenný kryštál. V závislosti od tvaru kryštálu a umiestnenia elektród je možné získať rozličné módy vibrácií. Rezonancia frekvencie kremenného kryštálu je závislá od fyzikálnych vlastností kremenného kryštálu, ako sú jeho hustota, hrúbka a tvar rezu, zároveň je vnútorne veľmi stabilná. Ak sa niektorý z týchto parametrov zmení, rezonancia frekvencie rezonátora sa taktiež zmení. Pomocou uvedeného modelu je možné merať zmenu frekvencie kryštálového oscilátora, ktorá je zapríčinená zmenou hmotnosti na povrchu kryštálového senzora z piezoelektrického materiálu. Napr. ak sa usadzuje látka na povrch kryštálového senzora, rezonancia frekvencie sa zníži. Na výpočet zmeny hmotnosti sa používa Sauerbreyho rovnica.

V prípade kremenného mikrováhového senzora QCM 200 sa Sauerbreyho rovnica používa v upravenom tvare:

$$m_{rel} = \frac{f_{rel}}{-0,0566}$$

kde

$m_{rel}$  je relatívna hmotnosť meranej vrstvy na povrchu kryštálu udávaná [ng],

$f_{rel}$  relatívna frekvencia kryštálu udávaná v [Hz].

Pre výpočet hmotnosti je potrebné vypočítať relatívnu frekvenciu z absolútnej frekvencie. Pre výpočet použite vzorec:

$$f_{rel} = F_{abs} - F_{offset}$$

kde

$f_{rel}$  relatívna frekvencia kryštálu udávaná v [Hz],

$F_{abs}$  je absolútna frekvencia v [Hz],

$F_{offset}$  je frekvencia offset (nulová) udávaná v [Hz].

Za frekvenciu offset považujte prvú nameranú hodnotu absolútnej frekvencie v čase 0.

Zhrnutie:

$$m_{rel} = \frac{F_{abs} - F_{offset}}{-0,0566}$$

## Praktická časť

### Meranie na prístroji QCM 200

Nastavte prístroj podľa návodu a uskutočnite 3 merania:

1. Meranie frekvencie oscilátora bez záťaže.
2. Meranie frekvencie oscilátora QCM25 pri dopade vodného aerosolu na povrch senzora pri striekaní sprejom č. 1 v rôznych vzdialenostiach.
3. Meranie frekvencie oscilátora QCM25 pri dopade vodného aerosolu na povrch senzora pri striekaní sprejom č. 2 v rôznych vzdialenostiach.
4. Vypočítajte hmotnosť vodného aerosolu podľa upravenej Sauerbreyho rovnice.
5. Vypracujte tabuľku nameraných a vypočítaných údajov podľa vzoru.

Tab. 2. Nastavenie QCM 200 pri meraniach.

NASTAVENIE QCM 200	HODNOTY
Analógová frekvencia pomere	v
Zobrazenie na displeji	
Čas (gate)	
Doba merania	
Vzorkovanie	

### Tabuľka nameraných a vypočítaných údajov

*Meranie č. 1: meranie bez záťaže*

Tab. 3. Namerané a vypočítané údaje merania č.1

ČÍSLO MERANIA	ABSOLÚTNA FREKVENCIA [Hz]	RELATÍVNA FREKVENCIA [Hz]	HMOTNOSŤ [ng]
1.			
2.			
3.			
4.			
5.			
6.			
7.			
8.			
9.			
10.			

*Meranie č. 2: striekanie sprejom č. 1 v rôznych vzdialenostiach*

Tab. 4. Namerané a vypočítané údaje merania č. 3, pri použití spreja č. 1

ČÍSLO MERANIA	VZDIALENOSŤ [m]	MAXIMÁLNY PRÍRASTOK HMOTNOSTI [ng]
1.		
2.		
3.		
4.		
5.		
6.		
7.		
8.		
9.		
10.		

*Meranie č. 3: striekanie sprejom č.2 v rôznych vzdialenostiach*

Tab. 5. Namerané a vypočítané údaje merania č.3, pri použití spreja č.2

ČÍSLO MERANIA	VZDIALENOSŤ [m]	MAXIMÁLNY PRÍRASTOK HMOTNOSTI [ng]
1.		
2.		
3.		
4.		
5.		
6.		
7.		
8.		
9.		
10.		

### Vyhodnotenie nameraných údajov

Z údajov v tabuľke 4 a 5 určite:

- dosah spreja č.1:
- maximálny hmotnostný prírastok spreja č.1 a vzdialenosť maximálneho hmotnostného prírastku spreja č.1:
  
- dosah spreja č.2:
- maximálny hmotnostný prírastok spreja č.2 a vzdialenosť maximálneho hmotnostného prírastku spreja č.2:

*Grafické zobrazenie nameraných údajov:*

Z nameraných údajov zostrojte grafické závislosti :

- Závislosť hmotnosti od času v rôznych vzdialenostiach striekania pri striekaní oboma sprejmi, č.1 a č.2.



## **Záver**

- porovnanie účinnosti striekania spreja č. 1 a 2,
- diskusia použitia oboch sprejov v obrannej situácii,
- návrhy na iné aplikácie kremenného mikrováhového senzora v praxi.