

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV PROCESNÍ A ZPRACOVATELSKÉ TECHNIKY

**MĚŘENÍ ELEKTRICKÉ VODIVOSTI  
KOLAGENU**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2016

MATĚJ VYKOUKAL



Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením  
vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Praze dne .....

.....

Jméno a Příjmení

## **P o d ě k o v á n í**

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce ing. Jaromíru Štanclovi, Ph.D. za cenné pedagogické a metodické rady a také za trpělivost a ochotu. Dále bych chtěl poděkovat ing. Aleši Landfeldovi za pomoc při realizaci praktické části této práce.

V Praze dne: .....

Podpis: .....

# Anotační list

<b>Jméno autora:</b>	Matěj
<b>Příjmení autora:</b>	Vykoukal
<b>Název práce česky:</b>	Měření elektrické vodivosti kolagenu
<b>Název práce anglicky:</b>	Measurement of electrical conductivity of collagen
<b>Rozsah práce:</b>	počet stran: 42 počet obrázků: 18 počet tabulek: 4 počet příloh: 6
<b>Akademický rok:</b>	2015 / 2016
<b>Jazyk práce:</b>	Čeština
<b>Ústav:</b>	Procesní a zpracovatelské techniky
<b>Studijní program:</b>	Strojírenství
<b>Vedoucí práce:</b>	Ing. Jaromír Štancl, Ph.D.
<b>Oponent:</b>	Dr. Milan Houška, CSc.
<b>Konzultant práce:</b>	Ing. Aleš Landfeld
<b>Zadavatel:</b>	prof. ing. Tomáš Jirout, Ph.D.
<b>Anotace česky:</b>	Popis metod měření elektrické vodivosti. Popis různých druhů technologie pro měření elektrické vodivosti. Experimentální měření vodivosti kolagenu. Vyhodnocení závislosti elektrické vodivosti na absorbované dávce ozáření elektronového paprsku.
<b>Anotace anglicky:</b>	Description of methods used for electrical conductivity measurement. Experimental measurement of electrical conductivity of collagen. Evaluation of relation between

electrical conductivity and absorbed dose of electron beam radiation.

**Klíčová slova:**

Elektrická vodivost, Konduktivita, Snímač elektrické vodivosti, Kontaktní metody, Bezkontaktní metody, Kolagen, Absorbované ozáření

**Využití:**

Rozšíření poznatků o kolagenním materiálu v rámci výzkumu podpořeného projektem GA ČR 14-23482S.

<b>1</b>	<b>OBSAH</b>	
<b>2</b>	<b>ÚVOD</b>	<b>9</b>
<b>3</b>	<b>Konduktometrie</b>	<b>10</b>
<b>3.1</b>	<b>Elektrolyty</b>	<b>10</b>
<b>3.2</b>	<b>Základní vztahy</b>	<b>11</b>
<b>3.3</b>	<b>Vlastnosti elektrolytu a jejich vliv na měření</b>	<b>13</b>
3.3.1	Molární koncentrace	13
3.3.2	Molární konduktivita	14
3.3.3	Teplota	14
<b>4</b>	<b>Metody měření konduktivity</b>	<b>16</b>
<b>4.1</b>	<b>Kontaktní metody</b>	<b>16</b>
4.1.1	Dvouelektrodové snímače	16
4.1.2	Tříelektrodové snímače	17
4.1.3	Čtyř-elektrodové snímače	17
4.1.4	Správná volba snímače	18
4.1.5	Faktory ovlivňující měření	19
<b>4.2</b>	<b>Bezkontaktní metody</b>	<b>20</b>
4.2.1	Transformátorové (indukční) snímače	20
4.2.2	Kapacitní snímače	21
<b>4.3</b>	<b>Porovnání metod</b>	<b>22</b>
<b>5</b>	<b>Vliv dávky iradiace na měrnou elektrickou vodivost kolagenu</b>	<b>23</b>
<b>5.1</b>	<b>Měřicí aparatura</b>	<b>23</b>
<b>5.2</b>	<b>Použité přístroje</b>	<b>24</b>
5.2.1	Texturometr	24
5.2.2	Elektrodový systém	25

5.2.3	LCR metr KEYSIGHT E4890AL.....	25
<b>5.3</b>	<b>Měřený materiál.....</b>	<b>26</b>
<b>5.4</b>	<b>Kalibrace.....</b>	<b>26</b>
<b>5.5</b>	<b>Postup měření.....</b>	<b>27</b>
5.5.1	Příprava.....	27
5.5.2	Měření.....	27
5.5.3	Přehled provedených experimentů.....	27
<b>6</b>	<b>Vyhodnocení provedených experimentů a diskuze.....</b>	<b>28</b>
6.1.1	Postup vyhodnocení.....	28
6.1.2	Výsledky provedených experimentů.....	29
6.1.3	Statistika.....	30
<b>7</b>	<b>Závěr.....</b>	<b>33</b>
<b>8</b>	<b>Zdroje.....</b>	<b>34</b>
<b>9</b>	<b>Přílohy.....</b>	<b>35</b>
<b>10</b>	<b>Seznam symbolů.....</b>	<b>41</b>
<b>11</b>	<b>Seznam zkratk.....</b>	<b>42</b>



## 2 ÚVOD

První část této práce je teoretická. Je v ní vysvětlena problematika měření elektrické vodivosti (konduktometrie). Obsahuje základní vlastnosti a principy konduktometrie včetně používaných teoretických vztahů potřebných pro vyhodnocení měření. Dále jsou zde popsány nejčastěji používané metody a technologie, které jsou pro konduktometrii používány. U každé metody je uvedena výhoda i nevýhoda a všechny jsou následně porovnány. Teoretická část se také zabývá jevy, které se při měření běžně vyskytují a mají na něj vliv.

Druhá část je praktická. Je v ní popsán provedený experiment cílený na měření elektrické vodivosti kolagenní hmoty, ozářené elektronovým paprskem. Cílem bylo určit vliv dávky ozáření kolagenní hmoty na její měrnou elektrickou vodivost. Jsou zde uvedeny použité přístroje a sestavení měřící aparatury. Dále je zde popsán postup vyhodnocení naměřených dat.

### 3 KONDUKTOMETRIE

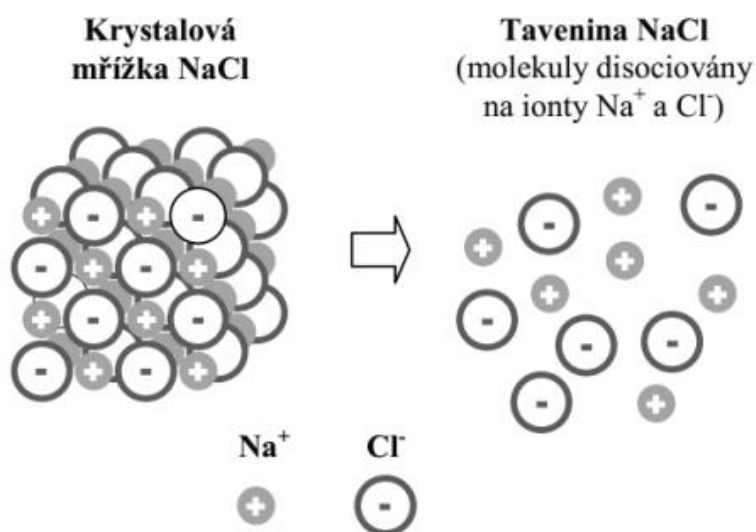
Měření elektrické vodivosti, jinak také Konduktometrie, je elektroanalytická metoda používána pro určování vlastností roztoků a jiných látek. S její pomocí lze určit koncentraci a totožnost látek obsažených v měřeném médiu. Elektrická vodivost je vlastnost charakterizující pevné látky, kapaliny i plyny. V této práci budou popsány především metody, které se používají při měření vodivosti kapalin, neboť metody založené na tomto principu byly použité při měření vodivosti kolagenu.

Měření probíhá ve vyhrazeném prostoru, který je izolovaný od nežádoucích vlivů okolí. I přes toto opatření je měření závislé na několika faktorech, které musí být sledovány, aby bylo možné naměřená data vyhodnotit. Jedná se především o teplotu, konstrukční a materiálové provedení sondy, uspořádání měřicí aparatury, aj.

#### 3.1 ELEKTROLYTY

Kapaliny nebo taveniny, které jsou schopny vést elektrický proud, nazýváme elektrolyty. Jejich základní členění rozlišujeme na silné a slabé. Oproti kovům jsou elektrolyty schopny vést elektrický proud podstatně hůře. Je tomu tak především díky tomu, že nositeli náboje nejsou elektrony, ale podstatně větší a méně pohyblivé ionty.

Vznik roztoku s volně pohyblivými ionty je výsledek chemického děje, který se nazývá elektrolytická disociace. Je to děj, při kterém polární molekuly rozpouštědla štěpí chemické vazby molekul nebo krystalů rozpouštěné látky na menší molekuly, ionty nebo radikály [1].



**Obr. 1** Termická disociace látky s iontovou strukturou NaCl [2]

Jako silné elektrolyty se označují kapaliny s obsahem zcela disociovaných iontů. Jedná se o silné kyseliny, silné zásady, a také soli obou těchto skupin. Ve slabých elektrolytech jsou nabitě částice tvořeny pouze částečnou disociací. Patří mezi ně slabé kyseliny, slabé zásady a soli silných i slabých kyselin a zásad [1].

Mechanismus vedení elektrického proudu pohyblivými ionty v elektrolytu lze sledovat po vložení dvou elektrod, které jsou následně připojeny ke zdroji stejnosměrného proudu. Mezi elektrodami vznikne elektrické pole, které vyvolá usměrněný pohyb nabitých iontů v roztoku a tento pohyb tvoří elektrický proud v elektrolytu. Kladně nabitě ionty se pohybují k záporně nabitě elektrodě (katodě) a záporně nabitě ionty se pohybují ke kladně nabitě elektrodě (anodě), přičemž směr proudu je podle dohody určen směrem pohybu kladných iontů. Tento proces je doprovázen přenosem hmoty [1].

### 3.2 ZÁKLADNÍ VZTAHY

K úspěšnému měření vodivosti je třeba nejdříve určit základní veličiny a jednotky, které se měření týkají a stejně tak i faktory, které měření ovlivňují.

Elektrická vodivost (Konduktance) materiálu je schopnost materiálu přenášet elektrický proud. Její běžné značení je  $G$  a její základní jednotka je Siemens [S]. Čím větší je elektrická vodivost, tím silnější elektrický proud -  $I$  prochází vodičem při stejném napětí -  $U$ . Látky, které mají vysokou vodivost, jsou tedy lepšími vodiči než látky s nižší vodivostí. Její výpočet je charakterizován vztahem (1).

$$G = \frac{I}{U} \text{ [S]} \quad (1)$$

V elektrotechnické praxi se častěji využívá její převrácené hodnoty, kterou je elektrický odpor ( $R$ ). Elektrická vodivost je veličina závislá na geometrickém tvaru vodiče. Lineárně klesá s jeho délkou a stoupá s jeho průřezem. Za účelem eliminace vlivu geometrie se zavádí měrná elektrická vodivost (konduktivita), která je převrácenou hodnotou měrného elektrického odporu (rezistivity). Konduktivita se značí pomocí řeckého písmena kapa -  $\kappa$  (v některých zdrojích se uvádí řecké písmeno sigma -  $\sigma$ ) a její základní jednotkou je S/m. V praxi jsou častěji používána jednotka  $\mu\text{S/cm}$  a pro elektrolyty s vysokým obsahem rozpuštěných částic se volí jednotka  $\text{mS/cm}$  [3].

Aby elektrolytem začal téct elektrický proud, musíme do něj vložit elektrody, na které je přivedeno elektrické napětí. Ve vzniklém elektrickém poli se začnou pohybovat

elektricky nabité částice k opačně nabitým elektrodám. Vzájemný vztah mezi konduktancí a konduktivitou vyjadřuje vztah (2).

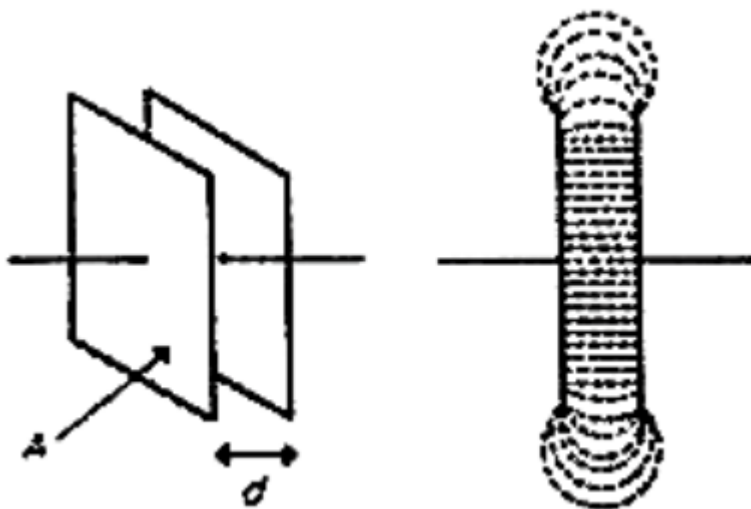
$$G = \frac{\kappa}{c} [S] \quad (2)$$

kde  $S$  [ $m^2$ ] je plocha elektrod a  $l$  [m] je jejich vzdálenost. Ze vztahu (2) můžeme vyjádřit konstantu elektrody (sondy):

$$c = \frac{l}{S} [m^{-1}] \quad (3)$$

Za předpokladu, že je elektrické pole mezi elektrodami homogenní, platí následující tvrzení: Konduktivita  $\kappa$  a konduktance  $G$  se rovnají, pokud bylo měření provedeno v jednotkové vzdálenosti ( $l$ ) sondou, která má jednotkovou plochu ( $S$ ). Tento fakt vyplývá ze vzorce (2) po dosazení jednotkových velikostí vzdálenosti a plochy.

V praxi nebývá dosaženo úplné homogenity elektrického pole a tak se konstanta sondy určuje experimentálně pomocí kalibračního roztoku, který má pevně stanovenou vodivost. Nejčastěji se používá vodný roztok KCL v několika různých koncentracích. Sondou, u které neznáme její konstantu, se nejdříve změří vodivost kalibračního roztoku a na jejím základě se následně určí její konstanta [3].



**Obr. 2** a) Model dvou-elektrodové sondy b) Nehomogenní tok proudu mezi elektrodami [3]

### 3.3 VLASTNOSTI ELEKTROLYTU A JEJICH VLIV NA MĚŘENÍ

Mezi hlavní faktory ovlivňující vodivost patří velikost iontů a rychlost jejich pohybu. Následující část bude věnována vlastnostem elektrolytů a jejich vlivům na měření vodivosti.

#### 3.3.1 Molární koncentrace

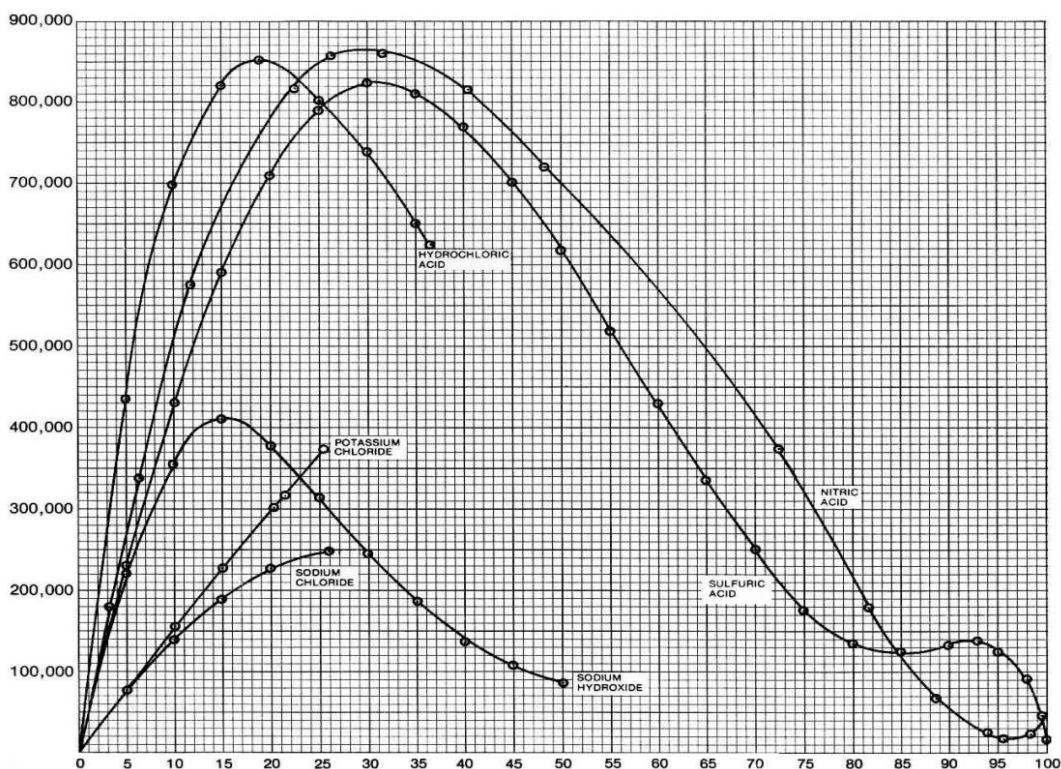
Množství obsažených vodivých látek se dá nejnázne vyjádřit molovou koncentrací  $c$ , kterou vyjádříme vztahem:

$$c = \frac{m_x}{M(x) \cdot V_l} \text{ [mol/l] ,} \quad (4)$$

kde je:  $m_x$  – hmotnost rozpuštěné látky  $x$  v gramech [g],  $M(x)$  – molární hmotnost rozpuštěné látky v gramech/mol [g/mol],  $V_l$  – objem kapaliny v litrech [l].

Molární koncentrace bývá někdy udávána v podobě hmotnostního zlomku  $c_m$  [3].

$$c = \frac{1000 \cdot c_m}{M(x)} \text{ [mol/l]} \quad (5)$$



Obr. 3 Závislost konduktivity [ $\mu\text{S/cm}$ ] na hmotnostní koncentraci [%] u vybraných látek

[4]

### 3.3.2 Molární konduktivita

Dalším důležitou veličinou je molární vodivost (konduktivita). Je to vodivost jednoho molu iontů elektrolytu. Dá se také vyjádřit jakou součet pohyblivostí ( $\lambda_i$ ) všech iontů obsažených v jenom molu sloučeniny. Molární vodivost  $\Lambda_0$  lze spočítat dle následujícího vztahu [5]:

$$\Lambda_0 = \lambda_i^+ + \lambda_i^- [S \cdot cm^2 \cdot mol^{-1}], \quad (6)$$

kde  $\lambda_i^+$  a  $\lambda_i^-$  jsou iontové vodivosti. Tyto hodnoty lze vyhledat v literatuře nebo na internetu, kde lze nalézt rozsáhlé tabulky s uvedenými molovými vodivostmi pro jednotlivé teploty. Jednotkou molové vodivosti je  $S \cdot cm^2 \cdot mol^{-1}$ .

### 3.3.3 Teplota

Teplota elektrolytu úzce souvisí s jeho vlastnostmi. Zvýšení teploty roztoku vede ke snížení jeho hustoty a zároveň ke zvýšení pohyblivosti rozpuštěných iontů. Také může mít za následek zvýšení počtu iontů vzhledem k jejímu vlivu na disociaci molekul.

Při výpočtech se buď vybere hodnota pro danou teplotu, anebo se spočítá dle následujícího vztahu [3]:

$$\Lambda_t = \Lambda_0 \cdot (1 + \beta \cdot (t - t_0)) [S \cdot cm^2 \cdot mol^{-1}], \quad (7)$$

kde  $\Lambda_t$  je molární konduktivita pro danou teplotu,  $\Lambda_0$  je molární konduktivita pro referenční teplotu,  $\beta$  je koeficient teplotní závislosti,  $t$  je žádaná teplota a  $t_0$  je teplota referenční. Jako referenční teplota se běžně používá  $0^\circ\text{C}$ . Koeficient  $\beta$  je také závislý na koncentraci, druhu a teplotě elektrolytu [3].

Z molární konduktivity, která je stanovena v závislosti na teplotě, lze pomocí vztahu (8) spočítat vlastní konduktivitu roztoku [6].

$$\kappa = \Lambda_t \cdot c [s \cdot cm^{-1}], \quad (8)$$

kde  $c$  je molární koncentrace složky rozpuštěné látky v elektrolytu.

V mnoha aplikacích se kontrola teploty může projevit jako nepraktická, ale přitom je při ní kladen nárok na porovnávání naměřených výsledků. Při reálném měření konduktivity se tedy používá přepočítávání výsledků na určitou referenční teplotu. Nejvíce se jako referenční hodnota používá  $25^\circ\text{C}$ . Z tohoto důvodu se zavádí teplotní kompenzace, která nám umožňuje porovnat vodivosti, které byly naměřeny při různých teplotách. Závislost teploty na konduktivitu roztoku můžeme charakterizovat jako lineární. Právě proto se pro její kompenzaci používá lineární algoritmus [7].

Při použití lineární kompenzace se předpokládá, že teplotní variační koeficient má stejnou hodnotu pro všechny měřené teploty. Tento předpoklad je chybný, ale u většiny měření je jeho vliv na konečný výsledek zanedbatelný [7]. Teplotní variační koeficient můžeme vyjádřit následující rovnicí:

$$\alpha_{x,25} = \frac{\kappa_x - \kappa_{25} \cdot 100}{\kappa_{25} \cdot (x - 25)}, \quad (9)$$

kde  $x$  a  $25^\circ\text{C}$  jsou teploty, při kterých jsou měřeny vodivosti  $\kappa_x$  a  $\kappa_{25}$ . Hodnota teplotního variačního koeficientu je vyjádřena jako procentuální změna vodivosti na změnu teploty o  $1^\circ\text{C}$  [7].

Pokud měření neprobíhá při  $25^\circ\text{C}$ , pak může být teplotní variační koeficient použit pro výpočet kompenzované hodnoty vodivosti pro  $25^\circ\text{C}$  dle vztahu (9).

$$\kappa_{25} = \frac{\kappa_x}{1 + \left(\frac{\alpha_{x,25}}{100}\right) \cdot (x - 25)} \quad (10)$$

Jakkoliv budou tyto metody přesné, nikdy se svou přesností nevyrovnají datům naměřeným při požadované teplotě [7].

Při měření se může teplota kompenzovat manuálně nebo automaticky. Manuální kompenzace vyžaduje sérii měření při různých teplotách. Na základě naměřených dat se vypracuje nejvhodnější algoritmus pro výpočet. Kompenzovaná konduktivita se manuálně spočítá pomocí vytvořené rovnice a naměřených hodnot. Automatická teplotní kompenzace využívá mikroprocesoru k určení nejvhodnějšího výpočtu kompenzované konduktivity [7].

## 4 METODY MĚŘENÍ KONDUKTIVITY

Metody, kterými měříme konduktivitu, jsou vždy nepřímé. Jedním z možných způsobů rozlišení je na kontaktní a bezkontaktní.

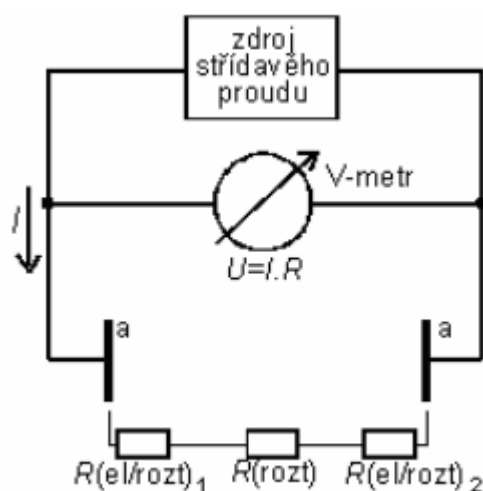
### 4.1 KONTAKTNÍ METODY

Kontaktní metody jsou takové metody, při kterých je měřený elektrolyt v kontaktu s vodivostními sondami. Elektrolyt může být velice agresivní látka, tudíž je kladen velký nárok na odolnost materiálu, ze kterého jsou sondy vytvořeny. Pro kontaktní část sondy se tedy často volí materiály jako platina, nerezová ocel, mosaz nebo grafit zatímco pro tělo se nejčastěji používají synteticky vyrobené látky, např. sklo, PVC, epoxidové pryskyřice [8].

U kontaktních metod rozlišujeme několik druhů snímačů. Každý z nich má jiné vlastnosti a je vhodný pro jiný typ měření.

#### 4.1.1 Dvouelektrodové snímače

U dvouelektrodových (dvoupólových) snímačů prochází střídavý proud mezi jejími dvěma póly a je zde měřeno výsledné napětí. Je to nejjednodušší typ snímače, kterým by měl být měřen pouze odpor elektrolytu mezi póly. Projevuje efekt polarizace elektrod, který má za následek úbytek napětí a přičtení jejich odporu k celkovému odporu elektrolytu a zkreslení naměřených výsledků. Polarizace je závislá na vlastnostech procházejícího proudu a na materiálu, ze kterého jsou elektrody vyrobeny. Doporučuje se používat signál s malou amplitudou o frekvenci 50 Hz až 5 000 Hz a také sondy, jejichž povrch je pokryt vrstvou platiny [8].



**Obr. 4** Schéma dvouelektrodového snímače [8]



Dalším problémem jsou parazitní kapacity snímačů, které jsou dány jejich konstrukcí. Dají se potlačit vhodnou volbou snímací frekvence [8].

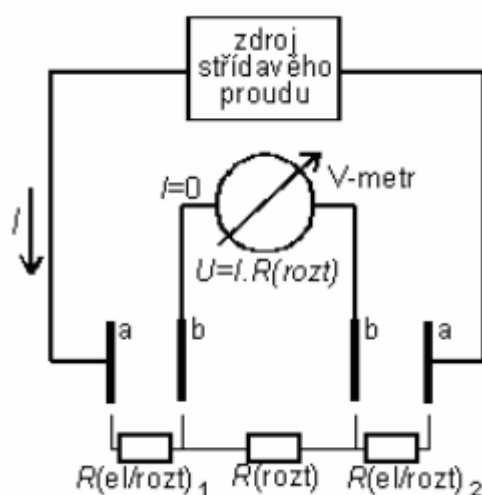
Při měření by se mělo dbát na čistotu povrchu snímače, neboť každá nečistota snižuje přesnost měření. Důležité je také zohlednit geometrii snímače z důvodů výskytu okrajových jevů. Výskyt těchto jevů můžeme zaznamenat po obvodu snímače, kde jsou způsobeny vnější interferencí nelineárních proudnic elektrického pole [3].

#### 4.1.2 Tříelektrodové snímače

Snímače se třemi elektrodami nejsou v současné době tolik rozšířené, jako byly dříve, protože jsou nahrazovány čtyřelektrodovými snímači. Oproti dvouelektrodovým snímačům je jejich výhoda v propojení třetí elektrody s první, což má za následek usměrňování elektrického pole. Toho může být využito ke snížení okrajových efektů a následnému zpřesnění měření. Také to zaručuje větší přesnost při určování konstanty snímače [8].

#### 4.1.3 Čtyř-elektrodové snímače

Tento typ snímačů je vylepšená forma dvouelektrodových snímačů. Ke stávajícím elektrodám, které se ponechají jako proudové, se přidá další pár elektrod, elektrody napěťové. Na proudových elektrodách tedy opět vzniká polarizační efekt, ale napětí se měří na přidaném páru elektrod, které nejsou polarizací ovlivněny. Díky tomu není nutné používat drahé materiály pro výrobu elektrod [9].



Obr. 5 Schéma čtyřelektrodového snímače [8]

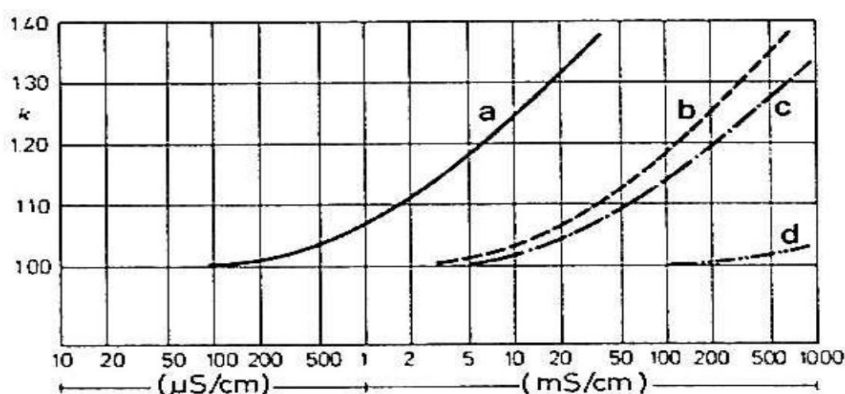
Použití čtyř-elektrodových snímačů také eliminuje výskyt okrajových jevů, ale to pouze v případě, že celé měřící pole je obsaženo v těle snímače. Čtyř-elektrodové sondy mají oproti dvouelektrodovým širší rozsah. Je tedy možné jednou sondou pokrýt prakticky celý rozsah běžných konduktivit [9].

#### 4.1.4 Správná volba snímače

Každý typ sondy má své výhody i nevýhody, které ovlivňují jejich volbu pro určité měření. Mezi výhody dvouelektrodových sond patří: snadná údržba, nízká pořizovací cena, vhodnost pro měření viskózních kapalin nebo suspenzí. Mezi jejich nevýhody můžeme řadit ovlivnitelnost měření okrajovými efekty a vysokou míru polarizace. Čtyř-elektrodová sonda má lineární vlastnosti napříč širokým pásmem konduktivity a v různých pásmech je možné jí speciálně kalibrovat pro přesnější měření. Je vhodná pro použití jako průtoková sonda. Její použití je ale limitováno její geometrií, což se projevuje nároky na množství měřeného vzorku a také na údržbě sondy [9].

Každý typ sondy je také vhodný pro různá spektra vodivosti. Dvoupólové sondy jsou vhodnější pro měření nízkých vodivostí, a to i po vhodné povrchové úpravě. Čtyř-elektrodová sonda se používá pro měření vysokých vodivostí, ale po kompenzaci kapacitance sondy je vhodná i pro nízké vodivosti. Tříelektrodové sondy jsou vhodné pro měření nižších vodivostí [9].

Dalším důležitým kritériem, které je nutné zohlednit, je použitý materiál sondy. Ten ovlivňuje nejen životnost sondy, ale také její konstantu [5].



**Obr. 3** Závislost konstanty sondy na konduktivitě pro různé materiály sond  
a) slinutý karbid b) nerez 316ss c) nerez s vrstvou TiC d) platina [5]

#### 4.1.5 Faktory ovlivňující měření

V průběhu měření se můžeme setkat s mnoha faktory, které ovlivní konečné výsledky. Dá se jim zčásti předcházet a dokážeme je i eliminovat.

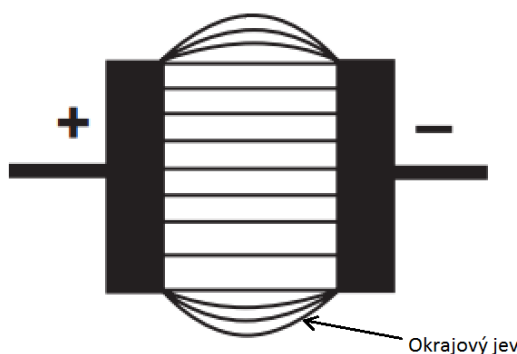
##### 4.1.5.1 Polarizace

Připojení elektrického proudu na elektrody může mít za následek hromadění ionizovaných částic v blízkosti elektrod a chemické reakce na jejich povrchu. Tyto procesy mají za následek vzrůstající odpor na povrchu elektrod a následné chyby v měření [3].

Polarizaci se dá zabránit několika způsoby. Jedním z nich je aplikace druhého páru elektrod, která je popsána v kapitole o čtyř-elektrodových sondách. Další způsob zabránění polarizace je úprava měřicí frekvence. Nízké frekvence jsou používány pro nízké vodivosti, u kterých je polarizace zanedbatelná oproti odporu elektrolytu. Vysoké frekvence se používají u vysokých vodivostí, kde je odpor elektrolytu nízký za účelem minimalizace odporu polarizace. Dalším způsobem je optimalizace oblastí elektrod. Při zvýšení aktivního povrchu elektrody spolu s povrchovou úpravou pomocí černé platiny se sníží hustota proudu a následně také polarizační efekt [9].

##### 4.1.5.2 Geometrie sondy

Geometrie sondy může způsobovat okrajové jevy, které se vyskytují pouze u dvoupólových elektrod. Jsou způsobeny částí elektrického pole, která se odtrhává z prostoru mezi elektrodami. Odtržená část pole může způsobit nepřesnost měření, pokud se dostane do kontaktu s cizím elementem, např. se stěnou měřicí nádoby. Tří a čtyř-elektrodové sondy jsou navrženy tak, aby co nejvíce minimalizovali tento efekt. Princip spočívá v umístění všech elektrod do těla sondy a díky tomu nemůže okrajové elektrické pole reagovat s cizími elementy. Negativní stránkou tohoto řešení je složitá údržba elektrod [9].



**Obr. 4** Znáornění okrajových jevů. Převzato z [9] a upraveno.

## 4.2 BEZKONTAKTNÍ METODY

Bezkontaktní metody můžeme rozdělit podle základního principu na dvě skupiny. Na indukční a kapacitní. Vzhledem k tomu, že sondy, spadající do těchto skupin, nejsou v kontaktu s měřenou látkou, není nutné vyrábět elektrody z drahých a chemicky odolných materiálů. Nevyskytuje se zde ani problém polarizace. Další výhodou je možnost použití odolných materiálů na tělo sondy a možnost jejího využití v prostředích s extrémními podmínkami [3].

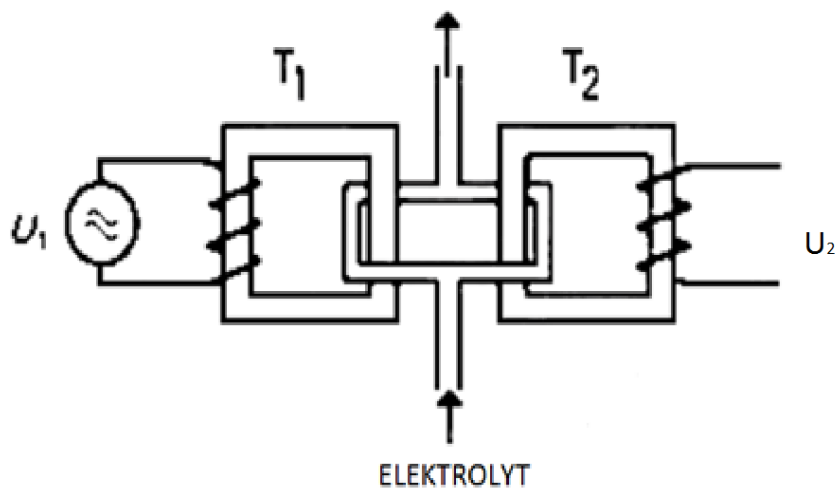
Bezkontaktní sondy postrádají nedostatky spojené s použitím elektrod. Dělí se na transformátorové (indukční) sondy a na kapacitní sondy.

Dalšími výhodami použití bezkontaktních snímačů jsou snížené nároky na vlastnosti měřeného elektrolytu. Jedná se například o množství nečistot, které mohou na povrchu elektrod vytvořit nevodivou vrstvu [8].

### 4.2.1 Transformátorové (indukční) snímače

Transformátorové sondy mají v praxi několik konstrukčních provedení. Nejčastěji se na trhu vyskytují průtokové a ponorné sondy.

Základním konstrukčním prvkem jsou dva transformátory. Ty jsou spojené jedním závitem nakrátko, který je realizovaný elektrolytem. Uspořádání je možné vidět na obr. 5.

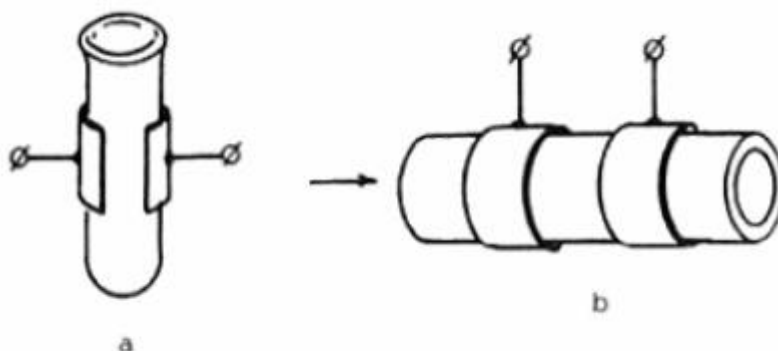


**Obr. 5** Schéma transformátorové sondy Převzato z [3] a upraveno.

Při měření je na primár prvního transformátoru  $T_1$  přivedeno napětí  $U_1$ , které způsobuje buzení proudu v elektrolytu. Proud je přímo úměrný velikosti budícího napětí a vodivosti elektrolytu, kterou určují nejen vlastnosti elektrolytu, ale také geometrie závitu nakrátko. Závitek nakrátko pak prochází druhým transformátorem  $T_2$ , v jehož sekundáru je indukováno napětí  $U_2$ , které je přímo úměrné vodivosti elektrolytu a budícímu napětí  $U_1$ . Jako budící frekvence se nejčastěji používá 15 až 30 KHz [3].

#### 4.2.2 Kapacitní snímače

Používá se několik způsobů použití kapacitních snímačů. Na obr. 6 lze vidět aplikaci na elektrolyt ve zkumavce a v potrubí.



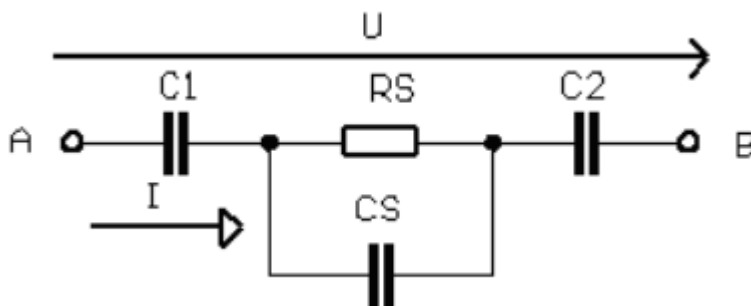
**Obr. 6** Příklad použití kapacitních snímačů a) zkumavka b) potrubí [8]

Na obr. 7 je znázorněno náhradní schéma kapacitního snímače. Kapacity  $C_1$  a  $C_2$  nahrazují izolační dielektrikum elektrod snímače. Dielektrické vlastnosti elektrolytu jsou nahrazeny kapacitou  $C_S$  a jeho konduktance je nahrazena odporem  $R_S$ . Po přiložení vysokofrekvenčního napětí začne obvodem procházet elektrický proud, který je úměrný impedanci roztoku mezi elektrodami. Tato impedance je charakterizována reálnou složkou  $R_S$  a kapacitní složkou  $C_S$ . Obě složky lze od sebe oddělit měřením amplitudy a fáze proudu  $I$  vůči napětí  $U$ . Hledané složky jsou pak rovny [3]:

$$R_S = \frac{U}{I} \cdot \sin(\omega \cdot t), \quad (11)$$

$$C_S = \omega^{-1} \cdot \frac{I}{U} \cdot \cos(\omega \cdot t), \quad (12)$$

kde  $\omega$  je úhlová frekvence budícího napětí.



**Obr. 7** Náhradní schéma kapacitního snímače [3]

### 4.3 POROVNÁNÍ METOD

Výhody a nevýhody jednotlivých druhů metod závisí převážně na konstrukčním provedení snímačů. Od jejich vlastností se odvíjí jejich praktické využití.

Kontaktní metody jsou častěji využívány v laboratorním prostředí. Na trhu se vyskytují převážně dvouelektrodové a čtyřelektrodové snímače. V důsledku přímého kontaktu elektrod s elektrolytem jsou tyto snímače náročnější na údržbu. Také to limituje jejich použití na látky, které nejsou znečištěné, agresivní a nepoškozují povrch elektrody. Měření pomocí kontaktních snímačů je provázeno řadou parazitních jevů, které lze omezit vhodnou volbou snímače a parametrů měření. Výhoda kontaktních snímačů spočívá v nízkých pořizovacích nákladech a snadnější kontrole technického stavu elektrod.

Bezkontaktní snímače jsou naopak velice nákladné a komplikované. Umožňují kontinuální měření s nízkými nároky na kontrolu technického stavu snímačů. Jejich použití je možné i u agresivních látek, které se nedostanou do přímého kontaktu s elektrodou. Díky tomu se využívají převážně v průmyslovém provozu. Bez kontaktu elektrod a měřené látky odpadají problémy s parazitními jevy.

## 5 VLIV DÁVKY IRADIACE NA MĚRNOU ELEKTRICKOU VODIVOST KOLAGENU

V této části práce je prezentováno experimentální stanovení závislosti mezi elektrickou vodivostí vzorků kolagenu na dávce ozáření elektronovým paprskem. Je zde popsáno sestavení a vlastní provedení experimentu a způsob vyhodnocení naměřených dat.

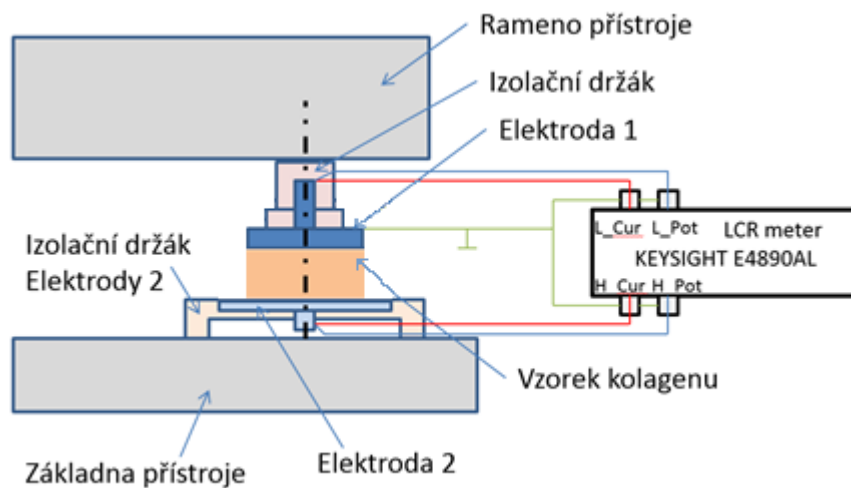
Jednotkou, která popisuje absorbované množství záření je Gray [Gy]. V praktické části je zkoumán neozářený kolagen (0 Gy), ale především kolagen s různým množstvím absorbovaného záření. Konkrétně se jedná o hodnoty 250 Gy, 330 Gy, 400 Gy a 500 Gy.

### 5.1 MĚŘÍCÍ APARATURA

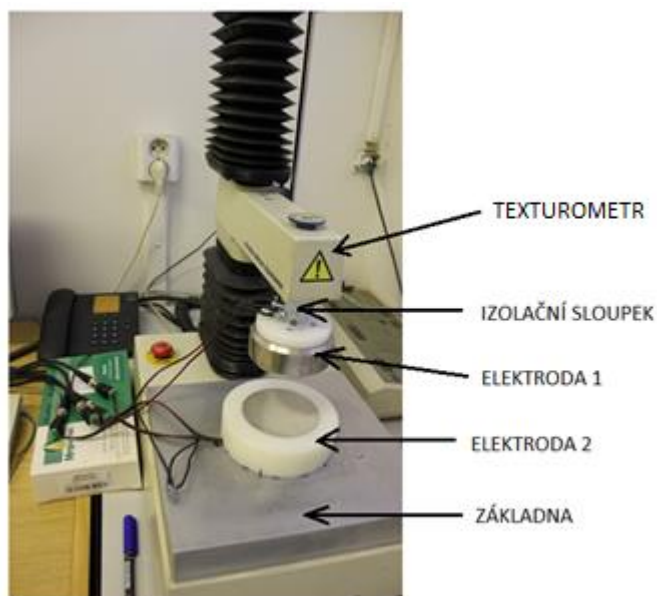
Na obr. 8 a obr. 9 je znázorněno sestavení měřicí aparatury, použité k realizaci experimentů. Měřicí aparatura se sestává z texturometru TA-XT2i (Stable Micro Systems, Velká Británie), k němuž byl připevněn elektrodový systém. K vlastnímu měření elektrické vodivosti byl použit LCR metr KEYSIGHT E4890AL (Keysight Technologies, USA), který byl přes USB kabel propojený do počítače, kde byla naměřená data zaznamenávána. Texturometr byl ovládán vlastním ovládacím software. Elektrodový systém byl tvořen dvojicí elektrod z nerezové oceli. Horní elektroda (elektroda 1) o průměru 49 mm byla přes izolační sloupek z PA 66 připevněna k ramenu texturometru, který umožnil její přesné polohování oproti spodní elektrodě. Spodní elektroda o průměru 100 mm (činná plocha však byla izolační páskou zmenšena na průměr 49 mm) byla upevněna v izolačním držáku a upevněna na základní desce texturometru. Elektrodový systém byl pomocí stíněných vodičů propojen s LCR metrem Keysight – dvouelektrodové uspořádání.

Pro měření teploty v geometrickém středu vzorku v průběhu experimentu byl použit termočlánek typu T, připojený do měřicího zesilovače PReasy a přes A-D převodník National Instruments NI-USB 6009 propojen s měřícím PC pro záznam teploty během experimentu.

Pro zápis dat z LCR metru byla použita měřicí aplikace vytvořená v prostředí National Instruments LabView.



**Obr. 8** Schematické znázornění měřící aparatury



**Obr. 9** Měřící aparatura

## 5.2 POUŽITÉ PŘÍSTROJE

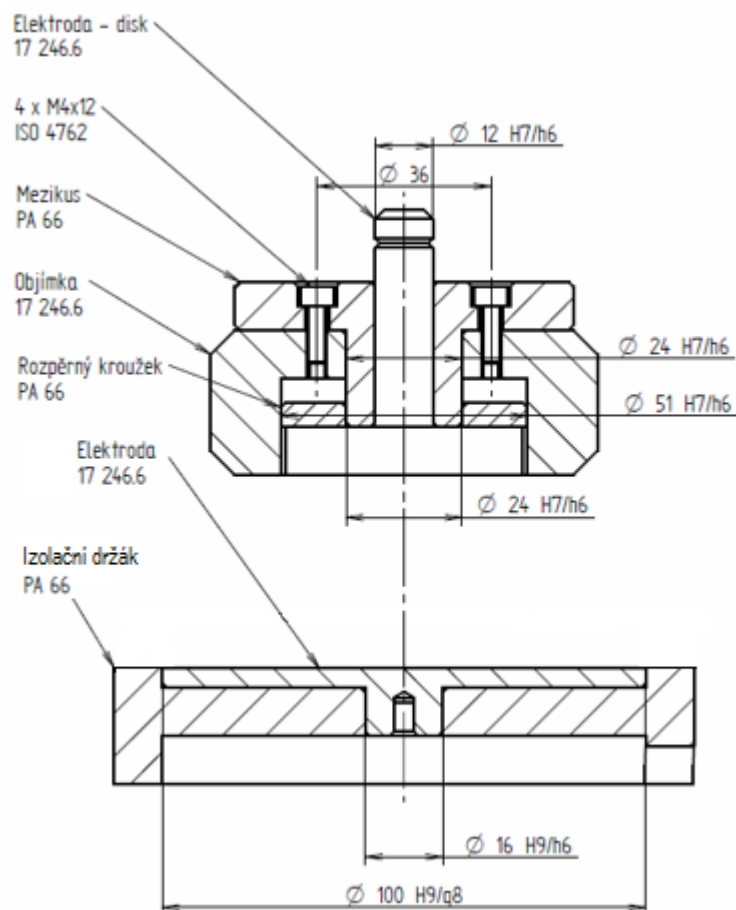
### 5.2.1 Texturometr

Pro upevnění elektrod a realizaci měření byl použit texturometr TA-XT2i od firmy Stable Micro Systems (Velká Británie). Jeho pohyb je jednoosý vertikální. Zařízení umožňuje přesné polohování elektrodového systému a přesné odměřování polohy (přesnost 0,1 mm). Mimoto je zařízení vybaveno i snímačem síly pro měření mechanických vlastností různých materiálů. Je uvedený na obr. 9.



### 5.2.2 Elektrodový systém

Na obr. 10 je technický výkres systému elektrod použitého při měření. Elektroda 2 byla upravena tak, aby se její povrch shodoval s Elektrodou 1. Jejich průměr je 49 mm. Aktivní plocha mezi elektrodami je poměrně velká, což má za následek snížení hustoty elektrického proudu a tím i snížení vlivu polarizace.



Obr. 10 Technický výkres elektrodového systému

### 5.2.3 LCR metr KEYSIGHT E4890AL

Jedná se o LCR metr od firmy Keysight Technologies (USA). Odkaz na technický manuál je uvedený ve zdrojích [10]. Při měření je používán především v G-B režimu při plném rozsahu měřicí frekvence, tzn. 20 – 500 000 Hz.



**Obr. 11** KEYSIGHT E4890AL [10]

### 5.3 MĚŘENÝ MATERIÁL

Experimentální zjišťování vlivu dávky iradiace na elektrickou vodivost kolagenu bylo prováděno u vzorků kolagenní hmoty extrahované z hovězí klišovky. Jednalo se o směs kolagenu a vody. Hmotnostní zlomek kolagenní sušiny ve vzorku byl 7,19 % (zjišťováno sušením vzorku při 105 °C po dobu 24 h).

Vzorky kolagenu byly ozářeny elektronovým paprskem na zařízení Microtron MT 25 (ozáření zajistila mikrotronová laboratoř Ústavu jaderné fyziky AV ČR) v dávkách 0, 250, 330, 400 a 500 Gy.

Vzorky byly vakuově zabaleny v PE obalech a uchovávány v chladničce při teplotě cca 5 - 8 °C.

### 5.4 KALIBRACE

Vzhledem k tomu, že dvouelektrokové měření elektrické vodivosti může být silně ovlivněno efektem polarizace, nebo naopak parazitní kapacitou, byla nejprve provedena kalibrace elektrodového systému roztokem 0,01 M KCl. Pomocí této kalibrace byla určena kalibrační konstanta elektrodové cely.

Velikost této měřicí konstanty je ovlivněna použitou frekvencí elektrického proudu, při níž bylo měření konduktivity prováděno. Volena pak byla taková frekvence, kde byla zjištěna nejnižší odchylka konstanty elektrodového systému zjištěná kalibrací od konstanty určené z geometrie za předpokladu homogenního rozložení elektrického pole.

## 5.5 POSTUP MĚŘENÍ

### 5.5.1 Příprava

Vzorky kolagenu jsou uchovávány v chladničce, aby bylo zamezeno tvorbě plísni a jiným způsobům degradace materiálu. Před měřením byly vystaveny pokojové teplotě, aby byla zaručena jednotná teplota vzorků. Dále byly vzorky homogenizované za účelem odstranění vzduchových bublin a jiných vad ve struktuře vzorku.

### 5.5.2 Měření

1. Zapojení měřicí aparatury dle Obr. 8.
2. Provedení kalibrace texturometru TA-XT2i.
3. Vložení vzorku do měřicí aparatury dle schématu na Obr. 8.
4. Vložení termočlánku do vzorku kolagenu.
5. Nastavení pohyblivého ramena texturometru do vzdálenosti 20 mm.
6. Měření vodivosti kolagenu v plném frekvenčním rozsahu LCR metru Keysight E4890AL (20 Hz – 500 kHz.).
7. Vyjmutí vzorku z aparatury.

### 5.5.3 Přehled provedených experimentů

V tabulce 1 je uveden přehled naměřených hodnot jednotlivých vzorků kolagenu. Všechny naměřené hodnoty jsou uvedeny v příloze 6 (CD).

Absorbovaná dávka ozáření	Počet vzorků	Počet měření G
0 Gy	3	3
	3	6
250 Gy	3	3
	3	6
330 Gy	3	3
	3	6
400 Gy	3	3
	3	6
500 Gy	3	3
	3	6

**Tab. 1** Přehled provedených experimentů

## 6 VYHODNOCENÍ PROVEDENÝCH EXPERIMENTŮ A

### DISKUZE

#### 6.1.1 Postup vyhodnocení

Při měření jsou získány hodnoty konduktance  $G$ . Pro výpočet konduktivity byl z toho důvodu použit vzorec (2) a z něj byla následně vyjádřena konduktivita  $\kappa$ .

$$\kappa = G \cdot c \text{ [S/m]} \quad (13)$$

Ze známých údajů o poloze a velikosti elektrod lze spočítat konstantu snímače podle vzorce (3),  $c=l/S$ . Byl přijat předpoklad, že mezi elektrodami prochází homogenní elektrické pole. Tato konstanta bude používána při vyhodnocování naměřených dat.

Měření probíhá při vzdálenosti elektrod 20 mm. Při dosazení byla získána hodnota konstanty snímače.

$$c = \frac{l}{S} = \frac{l}{\pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2} = \frac{0,02}{\pi \cdot \left(\frac{0,049}{2}\right)^2} = 10,6059 \text{ m}^{-1}$$

Po určení konstanty elektrodového systému bylo možné přejít k výpočtu konduktivity. Při výpočtu byl zanedbán vliv teploty z důvodu její nízké proměnlivosti v průběhu měření ( $\Delta t_{max} = 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Pro znázornění výpočtu dle vzorce (13) je uveden jeho příklad pro hodnotu  $G$  u prvního měření prvního vzorku kolagenu, který absorboval 0 Gy při frekvenci 50 Hz.

$$\kappa = G \cdot c = 0,017 \cdot 10,6059 = 0,18 \text{ S/m}$$

Aby byl zaručen přesnější výsledek, bylo potřeba stanovit měřicí frekvenci, pro kterou má měřicí konstanta  $c_f$  nejmenší odchylku od vypočtené konstanty  $c$ . Z tohoto důvodu byl elektrodový systém před vlastním měřením kolagenu kalibrován pomocí kalibračního roztoku 0,01 M KCl. Pro vzdálenost mezi elektrodami  $l = 20 \text{ mm}$  byla změřena vodivost roztoku pro úplné měřicí pásmo LCR metru. Následně byly (s použitím vzorce (2), naměřených hodnot  $G$  a známých hodnot  $\kappa$  pro roztok 0,01 M KCl) spočítány hodnoty konstant pro jednotlivé frekvence. Nejnižší odchylka byla zjištěna pro měřicí frekvenci 50 Hz.

$$c_{50\text{Hz}} = 10,82038 \text{ m}^{-1}$$

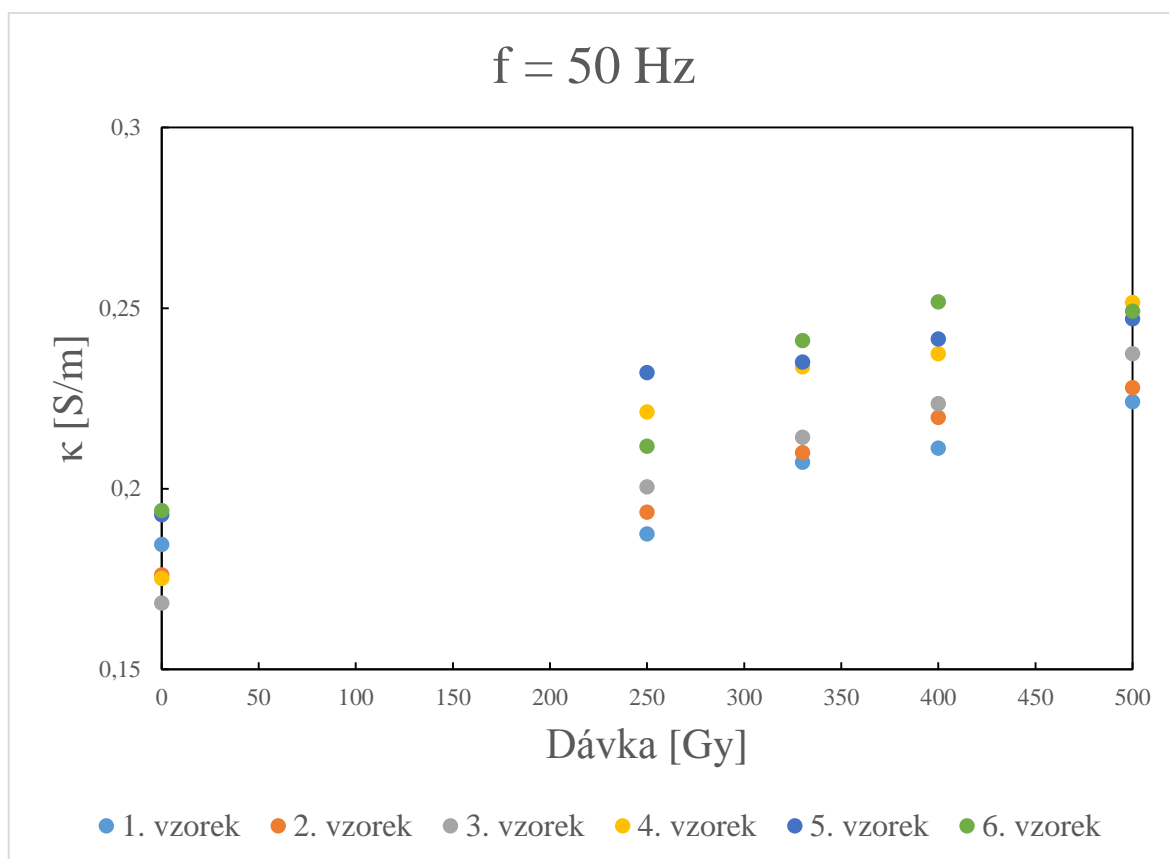
Pro porovnání byly vybrány hodnoty konduktivit jednotlivých vzorků pro frekvenci 50 Hz.

## 6.1.2 Výsledky provedených experimentů

V následující tabulce 2 jsou uvedeny získané výsledky měrné elektrické vodivosti pro různé dávky iradiace kolagenní hmoty pro 6 sérií experimentů. První 3 série udávají průměrnou hodnotu z 3 opakovaných měření, série 4 až 6 pak průměrnou hodnotu z 6 opakovaných měření. Grafické znázornění je patrné z obr. 12 - Grafu 1.

Absorbované Gy	$\kappa$ [S/m] pro $f = 50$ Hz					
	1. vzorek	2. vzorek	3. vzorek	4. vzorek	5. vzorek	6. vzorek
0	0,257	0,176	0,168	0,175	0,193	0,194
250	0,187	0,194	0,201	0,221	0,232	0,212
330	0,207	0,210	0,214	0,234	0,235	0,241
400	0,211	0,220	0,224	0,237	0,241	0,252
500	0,224	0,228	0,237	0,252	0,247	0,249

**Tab. 2** Hodnoty konduktivity  $\kappa$  pro jednotlivé vzorky



**Obr. 12** Graf 1 -Závislost konduktivity  $\kappa$  na množství absorbovaného záření Gy pro měřící frekvenci 50 Hz

Z obr. 12 - Graf 1 je vidět, že se zvyšující se dávkou ozáření kolagenní hmoty elektronovým paprskem nepatrně roste i měrná elektrická vodivost kolagenní hmoty. Z uvedených dat se jeví určitá, pravděpodobně lineární závislost měrné elektrické vodivosti kolagenní hmoty na dávce iradiace. Aby

bylo možné spolehlivě prohlásit, zda mezi měrnou elektrickou vodivostí kolagenní hmoty a dávkou ozáření existuje nějaká závislost, je nutné naměřená data statisticky vyhodnotit a hypotézu statisticky testovat.

V přílohách 1 - 5 této práce jsou dále prezentovány grafy, které znázorňují závislost měrné elektrické vodivosti kolagenní hmoty na frekvenci elektrického pole pro jednotlivé dávky ozáření. Z těchto grafů je mj. patrný i rozptyl jednotlivých opakovaných měření. Měření bylo prováděno ve frekvenčním spektru 20 Hz – 500 kHz. Je vidět, že s rostoucí frekvencí se měrná elektrická vodivost zvyšuje, zatímco u vysokých frekvencí pak opět začíná klesat. Jedná se pravděpodobně o již dříve zmíněné efekty spojené s dvouelektrodovým uspořádáním měřicího zařízení – tedy projev parazitních kapacit a polarizace.

### 6.1.3 Statistika

Statistické vyhodnocení naměřených výsledků je uvedeno v Tab. 3. Byly použity následující výpočty:

#### 6.1.3.1 Aritmetický průměr $\bar{\kappa}$

$$\bar{\kappa} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \kappa_i \quad (14)$$

#### 6.1.3.2 Výběrová směrodatná odchylka $s$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\kappa_i - \bar{\kappa})^2} \quad (15)$$

#### 6.1.3.3 Střední chyba průměru $s_x$

$$s_x = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (16)$$

#### 6.1.3.4 Studentovo rozdělení $t$

Pro výpočet kritické hodnoty dvoustranného testu studentova rozdělení byl použit software Microsoft Excel. Byly zvoleny hodnoty  $\alpha = 0,05$ , tzn. kvantil = 97,5 % a počet stupňů volnosti byl roven počtu měření  $n - 1$ , tedy:

$$\text{Stupeň volnosti} = n - 1 = 27 - 1 = 26$$

#### 6.1.3.5 Interval spolehlivosti $I$

$$I = s_x \cdot t \quad (17)$$

Množství Gy	n	$\bar{\kappa}$	s	$s_x$	t	I
0	27	0,1935	0,0251	0,00482	2,056	0,00992
250	27	0,2128	0,0156	0,00300	2,056	0,00617
330	27	0,2286	0,0134	0,00259	2,056	0,00531
400	27	0,2358	0,0140	0,00269	2,056	0,00552
500	27	0,2433	0,0107	0,00205	2,056	0,00422

**Tab. 3** Statistické vyhodnocení výsledků

### 6.1.3.6 Testování hypotézy

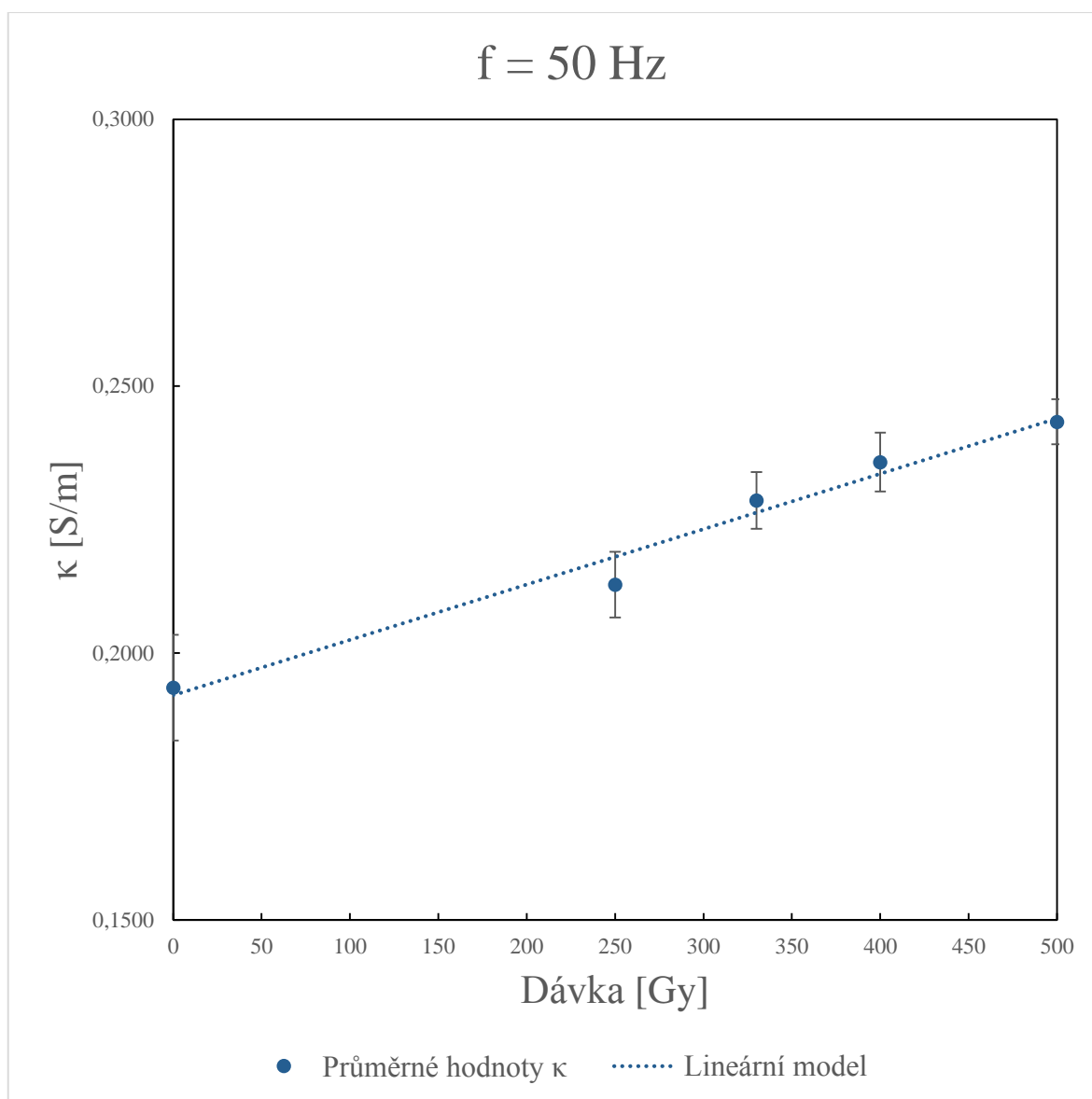
Pro testování hypotézy byl zvolen studentův t-test s hladinou významnosti 0,95. Na obr. 13 - Grafu 2 jsou uvedeny průměrné hodnoty  $\bar{\kappa}$  z tabulky 3 spolu s jejich intervaly spolehlivosti. V tabulce 4 jsou uvedeny výsledky provedeného testu.

Množství Gy	$t_{\text{vypočtené}}$	$t_{0,95}$	Závislost	Statistický význam
0	-4,76	2,01	je	významné
250	-2,05	2,01	je	významné
330	1,25	2,01	není	nevýznamné
400	2,77	2,01	je	významné
500	4,73	2,02	je	významné

**Tab. 4** Výsledky studentova rozdělení

Z výsledku je patrné, že na intervalu od 0 Gy do 500 Gy jsou naměřené hodnoty závislé podle kritéria studentova rozdělení. Testování tedy prokázalo hypotézu a určilo, že závislost mezi měrnou elektrickou vodivostí kolagenní hmoty a absorbovanou dávkou iradiace existuje, a má přibližně lineární průběh. Pro popis této závislosti byl použit následující lineární model ( $R^2=0,975$ ):

$$\kappa = 0,001 \cdot \text{Dávka [Gy]} + 0,1921$$



**Obr. 13** Graf 2 Porovnání naměřených dat s lineárním modelem



## 7 ZÁVĚR

V teoretické části práce byly popsány metody a technologie, které jsou v běžné praxi používány na měření konduktivity kapalin. Jedná se především o popis kontaktních a bezkontaktních metod. Jednotlivé metody jsou v závěru teoretické práce porovnány, jsou zdůrazněny jejich klady i zápory a také pole způsob jejich využití. Teoretická část byla dále věnována parazitním jevům, které mohou ovlivnit měření, a také způsobům, jak tyto parazitní jevy eliminovat nebo jim předejít.

V praktické části je popsán průběh a vyhodnocení experimentu, při kterém byla zjišťována závislost mezi konduktivitou kolagenní hmoty a množstvím absorbovaného elektronového záření. Data byla naměřená podle postupu v části 5 a vyhodnocena podle postupu popsaném v části 6.

Na základě vyhodnocených dat se jevila určitá závislost mezi konduktivitou a dávkou absorbovaného záření. Pro její ověření bylo nutné použít statistické početní metody, konkrétně Studentovo  $t$  rozdělení. Tento test prokázal existenci závislosti mezi jednotlivými průměrnými hodnotami měrné elektrické vodivosti a absorbovanou dávkou iradiace, tato závislost byla popsána lineárním modelem.

## 8 ZDROJE

- [1] POJER, S. *Vliv solí na vlastnosti aprotických elektrolytů*. Brno, 2013. 63s. Diplomová práce na Vysokém učení technickém v Brně, Fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústavu elektrotechnologie. Vedoucí diplomové práce Josef Máca.
- [2] MALIŇÁKOVÁ, L. *Elektrická vodivost elektrolytů a její aplikace ve výuce chemie*. Plzeň 2014. 123s. Diplomová práce na Západočeské univerzitě v Plzni, Fakultě pedagogické, Katedře chemie. Vedoucí diplomové práce Jitka Štrofová.
- [3] MAŠLÁŇ, S. *Měření vodivosti kapalin*. Brno, 2010. 100s. Diplomová práce na Vysokém učení technickém v Brně, Fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústavu automatizace a měřicí techniky. Vedoucí diplomové práce Petr Beneš.
- [4] IC CONTROLS. *Technical notes, Conductivity theory and measurement*. 2005 [online] [Cit. 15.8.2016] Dostupné z URL <http://www.iccontrols.com/files/4-1.pdf>
- [5] WEBSTER, G. John. *The measurement, instrumentation and sensors handbook*. CRC ve spolupráci s IEEE press 1999. ISBN 0-8493-8347-1.
- [6] GÖPEL, W. HESSE, J. ZEMEL, J. *Sensor a comprehensive survey, vol. 2 – Chemical and biological sensors*. VCH Verlagsgesellschaft mBH, D-6940 Weinheim (Federal Republic of Germany) 1991. ISBN 3-527-26768-9
- [7] BARRON John, ASHTON Colin. *The effect of Temperature on Conductivity Measurement*. [online] [Cit. 15.8.2016] Dostupné z URL [www.reagecon.com](http://www.reagecon.com)
- [8] MACEŠKA, R. *Měření vodivosti kapalin*. Brno, 2009. 75s. Bakalářská práce na Vysokém učení technickém v Brně, Fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústavu automatizace a měřicí techniky. Vedoucí diplomové práce Petr Beneš.
- [9] RADIOMETER ANALYTICAL. *Conductivity Theory and Practice*. 2005 [online] [Cit. 15.8.2016] Dostupné z URL: [http://www.analytical-chemistry.uoc.gr/files/items/6/618/agwgimometria\\_2.pdf](http://www.analytical-chemistry.uoc.gr/files/items/6/618/agwgimometria_2.pdf)
- [10] KEYSIGHT TECHNOLOGIES. *Data sheet 2013* [online] [Cit. 16.8.2016] Dostupné z URL: <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5989-4435EN.pdf?id=776077>

## 9 PŘÍLOHY

**Příloha 1:** Graf 3 - Závislost konduktivity  $\kappa$  na frekvenci  $\log f$  pro dávku 0 Gy

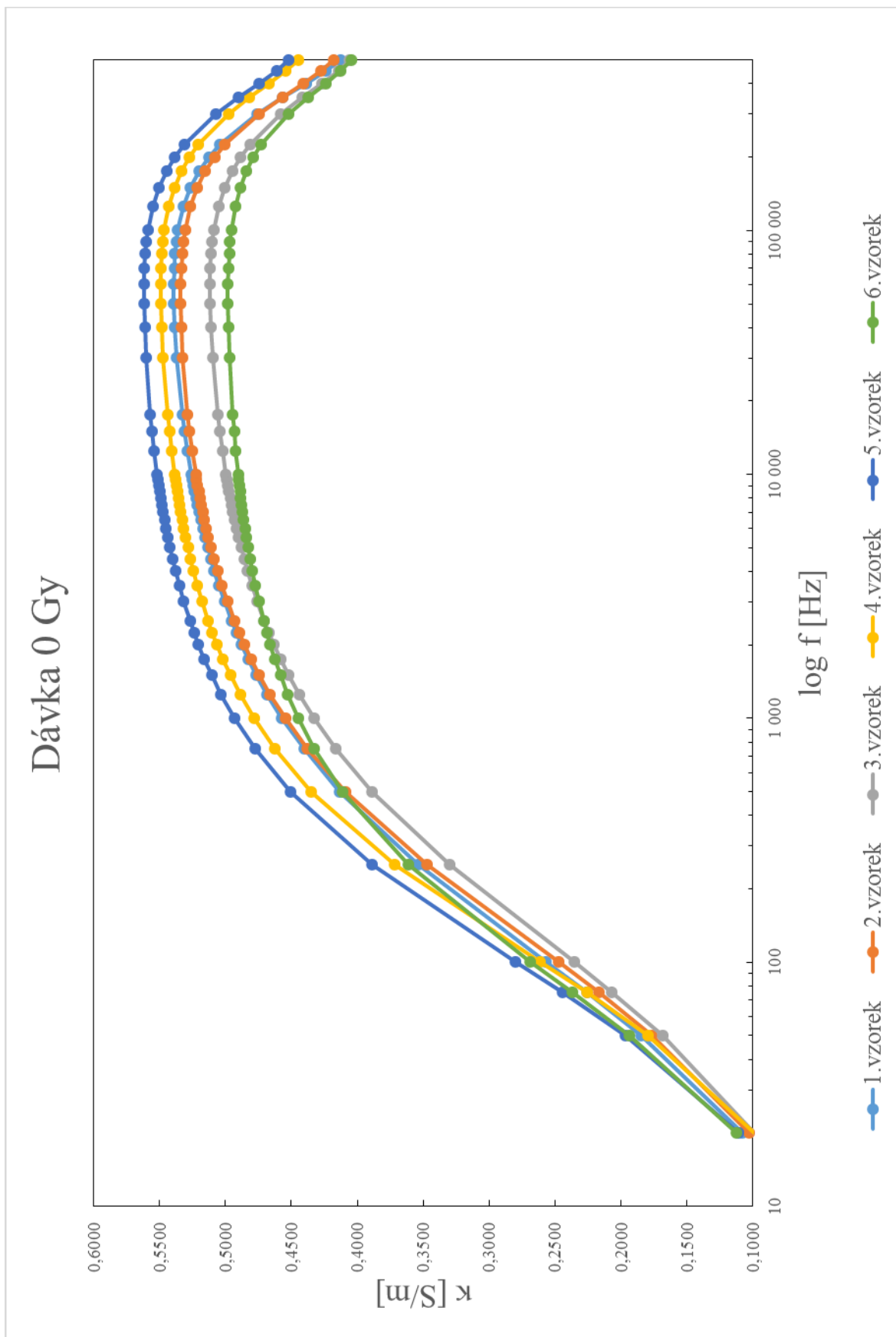
**Příloha 2:** Graf 4 - Závislost konduktivity  $\kappa$  na frekvenci  $\log f$  pro dávku 250 Gy

**Příloha 3:** Graf 5 - Závislost konduktivity  $\kappa$  na frekvenci  $\log f$  pro dávku 330 Gy

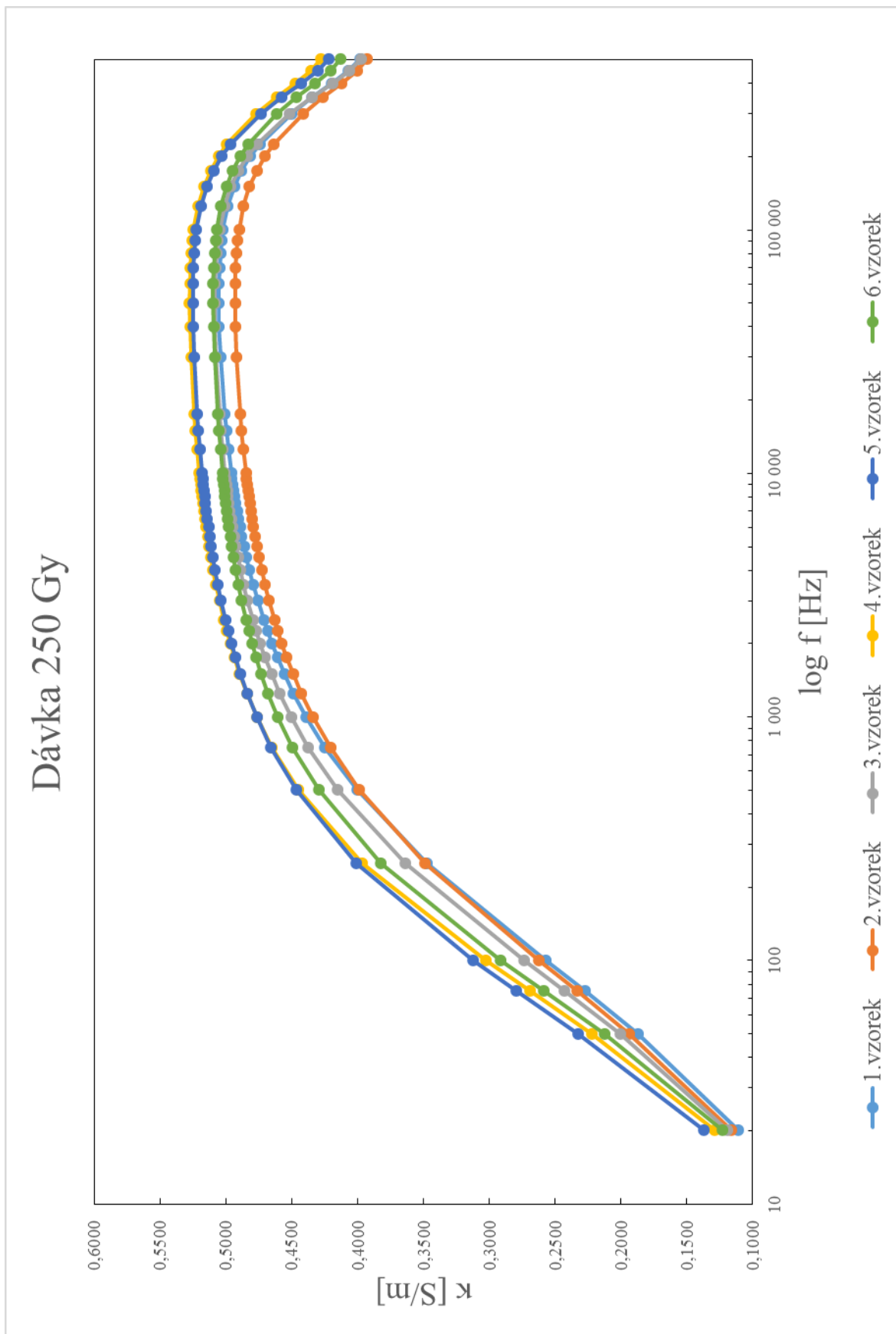
**Příloha 4:** Graf 6 - Závislost konduktivity  $\kappa$  na frekvenci  $\log f$  pro dávku 400 Gy

**Příloha 5:** Graf 7 - Závislost konduktivity  $\kappa$  na frekvenci  $\log f$  pro dávku 500 Gy

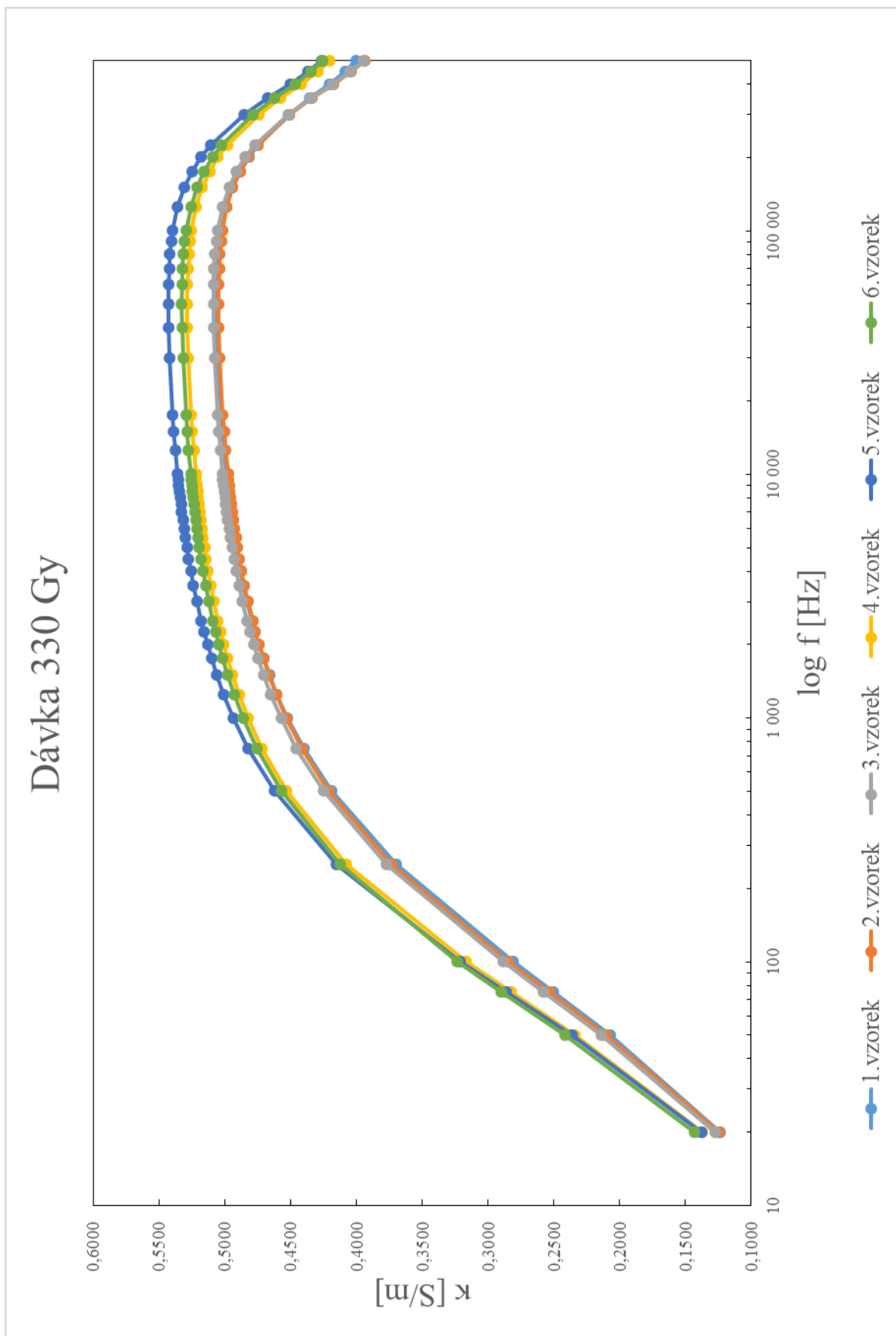
**Příloha 6:** CD s elektronickou podobou bakalářské práce a naměřenými daty.



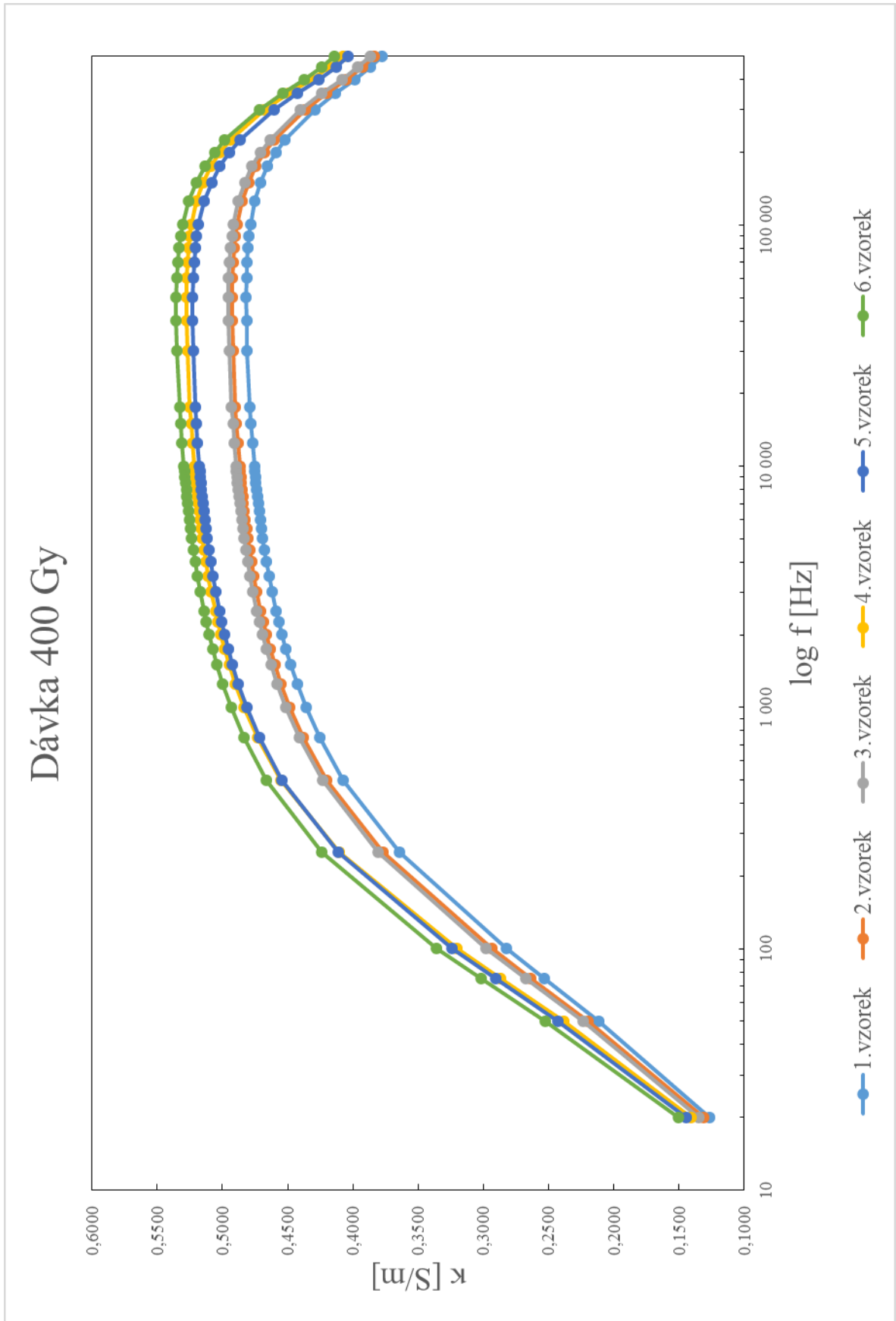
Obr. 14 Graf 3 - Závislost konduktivity  $\kappa$  na frekvenci  $\log f$  pro 0 Gy



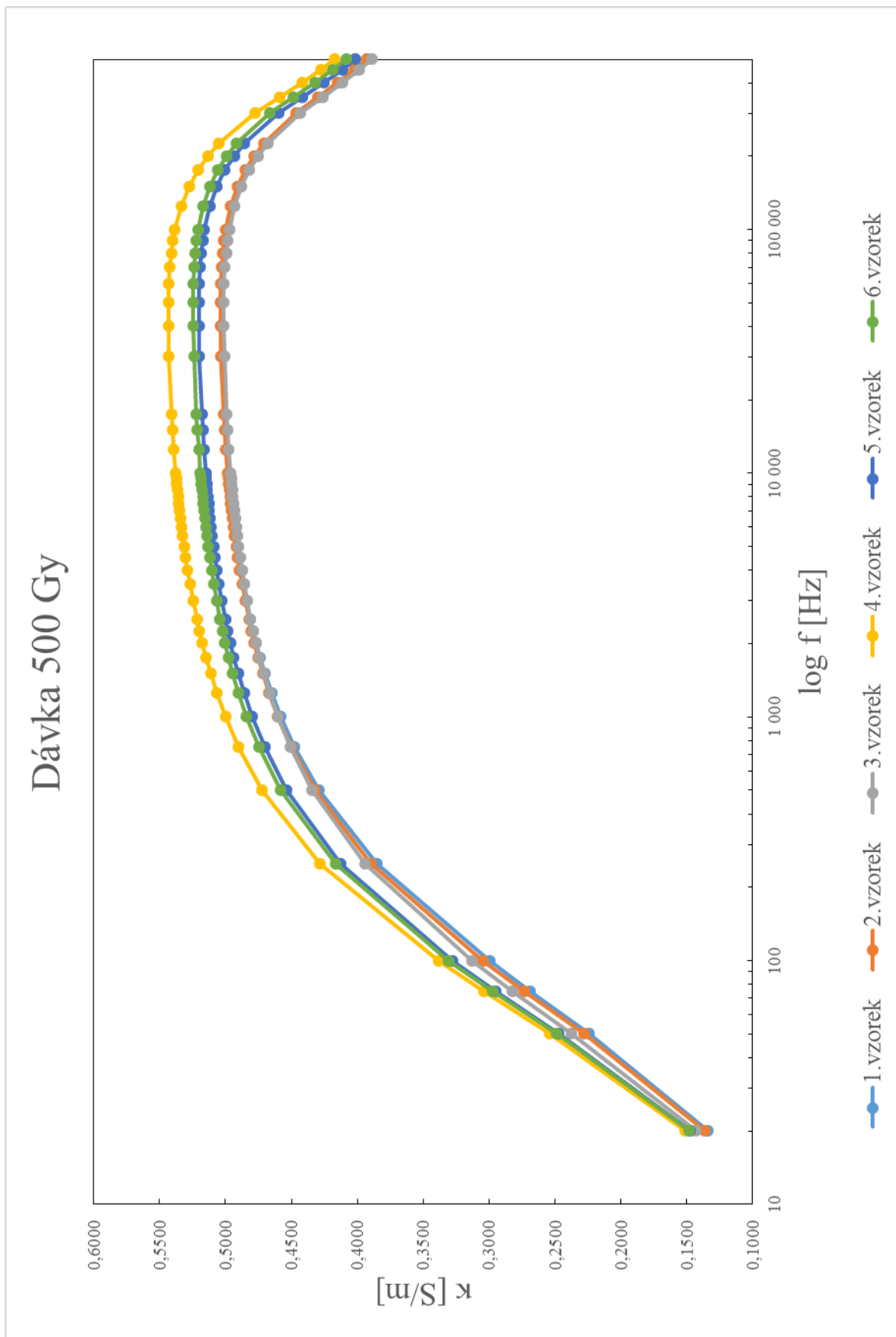
**Obr. 15** Graf 4 - Závislost konduktivity  $\kappa$  na frekvenci  $\log f$  pro 250 Gy



Obr. 16 Graf 5 - Závislost konduktivity  $\kappa$  na frekvenci  $\log f$  pro 330 Gy



**Obr. 17** Graf 6 - Závislost konduktivity  $\kappa$  na frekvenci  $\log f$  pro 400 Gy



Obr. 18 Graf 7 - Závislost konduktivity  $\kappa$  na frekvenci  $\log f$  pro 500 Gy



## 10 SEZNAM SYMBOLŮ

$G$	[S]	Elektrická vodivost (konduktance)
$I$	[A]	Elektrický proud
$U$	[V]	Napětí
$R$	[ $\Omega$ ]	Elektrický odpor
$\kappa$ ( $\sigma$ )	[S/m]	Měrná elektrická vodivost (konduktivita)
$c$ (k)	[1/m]	Konstanta elektrody
$l$	[m]	Vzdálenost mezi elektrodami
$S$	[m <sup>2</sup> ]	Aktivní povrch elektrod
$c$	[mol/l]	Molová koncentrace
$m$	[g]	Hmotnost
$M$	[g/mol]	Molární hmotnost
$V$	[l]	Objem
$c_m$	[-]	Hmotnostní zlomek
$\Lambda_0$	[S · cm <sup>2</sup> · mol <sup>-1</sup> ]	Molární vodivost
$\lambda_i^+$	[S · cm <sup>2</sup> · mol <sup>-1</sup> ]	Iontová vodivost kationtů
$\lambda_i^-$	[S · cm <sup>2</sup> · mol <sup>-1</sup> ]	Iontová vodivost aniontů
$\beta$	[-]	Koeficient teplotní závislosti
$t$	[°C]	Teplota
$\alpha_{x,25}$	[-]	Teplotní variační koeficient
$C$	[F]	Elektrická kapacita
$\omega$	[1/s]	Úhlová frekvence
$d$	[m]	Průměr
$f$	[Hz]	Frekvence
$\bar{\kappa}$	[S/m]	Aritmetický průměr měrné elektrické vodivosti (konduktivity)
$s$	[-]	Výběrová směrodatná odchylka
$s_x$	[-]	Střední chyba průměru
$n$	[-]	Počet měření
$t$	[-]	Studentovo rozdělení
$I$	[-]	Interval pokrytí
Dávka	[Gy]	Absorbovaná dávka iradiace

## 11 SEZNAM ZKRATEK

NaCl	Chlorid sodný
KCl	Chlorid draselný
PVC	Polyvinylchlorid
TiC	Karbid titanu
316ss	Označení oceli ČSN 10088-1 1.4404 dle normy AISI
PA 66	Polyamid 6.6
USA	United States of America
CD	Compact Disk