



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

## TERMICKÁ DEGRADACE IZOLAČNÍCH MATERIÁLŮ Z KABELOVÉHO PRŮMYSLU

THERMAL DEGRADATION OF INSULATION MATERIALS FROM THE CABLE INDUSTRY

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Filip Kučera

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Luděk Pelikán

BRNO 2022

# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

**Student:** Filip Kučera

**ID:** 220768

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2021/22

**NÁZEV TÉMATU:**

## **Termická degradace izolačních materiálů z kabelového průmyslu**

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

1. Seznámení se s vlastnostmi a základními parametry izolačních materiálů kabelů
2. Teoretický rozbor stárnutí izolačních materiálů kabelů včetně možností jejich vyhodnocení
3. Navržení postupu pro tvorbu teplotní degradace PVC izolačních materiálů kabelů a postup pro její vyhodnocení
4. Provedení degračních procesů podle zvoleného postupu a následná diagnostika uměle zestárých vzorků
5. Vhodné zpracování naměřených výsledků

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

podle pokynů vedoucího závěrečné práce

**Termín zadání:** 7.2.2022

**Termín odevzdání:** 31.5.2022

**Vedoucí práce:** Ing. Luděk Pelikán

**prof. Ing. Petr Toman, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

**UPOZORNĚNÍ:**

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



## **Abstrakt**

Cílem této bakalářské práce je seznámit se s vlastnostmi a parametry izolačních materiálů různých druhů (PVC, PE). Změřit tyto vlastnosti pomocí zařízení Tettex 2830/2831. Provést teoretický rozbor stárnutí izolačních materiálů a navrhnout postup pro tvorbu termické degradace. Na závěr zjistit, jak se změni vlastnosti izolačních materiálů, elektrická pevnost a mechanické vlastnosti vlivem provedené termické degradace.

## **Klíčová slova**

Termická degradace, termické stárnutí, PVC, ongrovil, polanvil, izolační materiál, elektrická pevnost, mechanická pevnost v tahu.

## **Abstract**

The aim of this bachelor thesis is to get acquainted with the properties and parameters of insulation materials of various types (PVC, PE). Measure these properties with a Tettex 2830/2831. Perform a theoretical analysis of the aging of insulating materials and propose a procedure for the formation of thermal degradation. Finally, find out how the properties of insulating materials, electrical strength and mechanical properties change due to thermal degradation.

## **Keywords**

Thermal degradation, thermal aging, PVC, ongrovil, polanvil, insulation material, electrical strength, mechanical tensile strength.

## **Bibliografická citace**

KUČERA, Filip. Termická degradace izolačních materiálů z kabelového průmyslu. Brno, 2022. Dostupné také: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/142368>.  
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce Luděk Pelikán.

# Prohlášení autora o původnosti díla

<b>Jméno a příjmení studenta:</b>	<i>Filip Kučera</i>
<b>VUT ID studenta:</b>	220768
<b>Typ práce:</b>	<i>Bakalářská práce</i>
<b>Akademický rok:</b>	2021/22
<b>Téma závěrečné práce:</b>	<i>Termická degradace izolačních materiálů z kabelového průmyslu</i>

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne: 31. května 2022

-----  
podpis autora

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval vedoucímu Ing. Luďkovi Pelikánovi za vedení bakalářské práce a poskytnutí cenných rad. Dále děkuji vyučujícím z ústavu elektroenergetiky za připomínky a rady k této bakalářské práci. Také bych chtěl poděkovat rodině, přítelkyni a kamarádům za podporu při tvorbě této práce.

V Brně dne: 31. května 2022

-----  
podpis autora

# Obsah

<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>8</b>
<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>10</b>
<b>ÚVOD .....</b>	<b>11</b>
<b>1. DIELEKTRICKÉ MATERIÁLY A JEJICH VLASTNOSTI .....</b>	<b>12</b>
1.1 DIELEKTRIKA A IZOLANTY .....	12
1.1.1 Rozdělení dielektrik podle polárnosti.....	12
1.2 CHARAKTERISTICKÉ MĚRITELNÉ VLASTNOSTI DIELEKTRIK .....	14
1.2.1 Relativní permitivita.....	14
1.2.2 Objemová a povrchová rezistivita.....	14
1.2.3 Elektrická pevnost.....	15
1.2.4 Dielektrické ztráty.....	16
1.2.5 Ztrátový činitel.....	16
1.2.6 Ekvivalentní náhradní obvody.....	17
1.3 DIELEKTRIKA POUŽÍVANÉ V KABELOVÉM PRŮMYSLU .....	19
1.3.1 Polyethylen PE.....	19
1.3.2 Zesítěný polyethylen XLPE .....	20
1.3.3 Polyvinylchlorid PVC .....	21
<b>2. TEORETICKÝ PROCES STÁRNUTÍ.....</b>	<b>23</b>
2.1 MODEL STÁRNUTÍ .....	23
2.1.1 Model tepelného stárnutí .....	23
<b>3. ZPŮSOBY MĚŘENÍ PARAMETRŮ DIELEKTRIK .....</b>	<b>25</b>
3.1 MĚŘÍCÍ PŘÍSTROJ .....	25
3.2 MĚŘENÍ NA MŮSTKU .....	26
3.3 MĚŘENÍ OBJEMOVÉ REZISTIVITY .....	28
<b>4. NÁVRH TERMICKÉ DEGRADACE .....</b>	<b>29</b>
4.1 PODMÍNKY PRO TERMICKOU DEGRADACI .....	29
4.1.1 Teplotní a časové podmínky pro PVC.....	29
4.2 NÁVRH TEPLoty A DOBY STÁRNUTÍ.....	30
4.3 NÁVRH ULOŽENÍ V PEČI .....	30
4.4 NÁVRH MATERIÁLŮ PRO TERMICKOU DEGRADACI .....	31
<b>5. TERMICKÁ DEGRADACE.....</b>	<b>32</b>
5.1 POUŽITÉ PŘÍSTROJE .....	32
5.1.1 Horkovzdušná pec použitá pro termickou degradaci.....	32
5.1.2 Teploměr pro měření průběžné teploty .....	34
5.2 PŘÍPRAVA PŘED TERMICKOU DEGRADACÍ.....	35
5.2.1 Příprava měřených vzorků .....	35
5.2.2 Kondicionování vzorků .....	35
5.3 PRAKTICKÉ PROVEDENÍ TERMICKÉ DEGRADACE .....	37
5.3.1 Měření dielektrických parametrů před termickou degradací.....	37
5.3.2 Průběh termické degradace .....	38

5.3.3	Měření dielektrických parametrů po termické degradaci .....	39
5.3.4	Grafické výsledky termické degradace.....	40
<b>6.</b>	<b>ELEKTRICKÁ PEVNOST .....</b>	<b>43</b>
6.1	ZKOUŠKY ELEKTRICKÉ PEVNOSTI.....	43
6.1.1	Zkušební vzorky.....	43
6.1.2	Typy zkušebních elektrod .....	44
6.1.3	Typy okolního prostředí .....	44
6.1.4	Napájecí napětí a jeho zdroj .....	45
6.1.5	Způsoby zkoušek.....	46
6.1.6	Elektrický průraz.....	47
6.1.7	Postup měření .....	47
6.2	PRAKTICKÉ MĚŘENÍ ELEKTRICKÉ PEVNOSTI .....	48
6.2.1	Příprava před zkouškou .....	48
6.2.2	Zhotovení elektrických průrazů.....	48
6.3	VÝSLEDKY ELEKTRICKÝCH ZKOUŠEK .....	51
<b>7.</b>	<b>MECHANICKÁ PEVNOST V TAHU .....</b>	<b>54</b>
7.1	MECHANICKÉ ZKOUŠKY V TAHU .....	54
7.1.1	Zkušební vzorky.....	54
7.1.2	Postup zkoušky.....	54
7.2	PRAKTICKÉ PROVEDENÍ MECHANICKÝCH ZKOUŠEK .....	55
7.3	VÝSLEDKY MECHANICKÝCH ZKOUŠEK V TAHU .....	56
<b>8.</b>	<b>VÝSLEDNÉ ZPRACOVÁNÍ DAT.....</b>	<b>58</b>
<b>9.</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>59</b>
	LITERATURA.....	61
	SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	65
	SEZNAM PŘÍLOH.....	67

## SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Schéma polárního dielektrika před a po vložení do elektrického pole [4] .....	13
1.2	Schéma nepolárního dielektrika před a po vložení do elektrického pole [4].....	13
1.3	Paralelní ekvivalentní zapojení a vektorový diagram ztrátového činitele [10].....	17
1.4	Sériové ekvivalentní zapojení a vektorový diagram ztrátového činitele [10].....	18
1.5	Granulát polyethylenu [22] .....	20
1.6	Granulát polyvinylchloridu [31].....	22
3.1	Zařízení Tettex 2830/2831 .....	25
3.2	Scheringův můstek [42] .....	26
3.3	Měřící můstek Tettex 2830/2831 [12] .....	27
3.4	Schéma pro měření rezistivity [12] .....	28
4.1	System zavěšení vzorků .....	31
4.2	System zavěšení vzorků, pohled z boku pece.....	31
5.1	Štítkové hodnoty pece .....	32
5.2	Vnitřek horkovzdušné pece .....	33

5.3	Teploměr Lutron .....	34
5.4	Vzorky připravené pro měření .....	35
5.5	Třídy standartního prostředí s dovolenými odchylkami [32][34].....	36
5.6	Uložení vzorků v prostředí pro kondicionování .....	36
5.7	Zavěšení vzorků v peci.....	38
5.8	Rozdíl teplot uvnitř pece .....	39
5.9	Změna ztrátového činitele vlivem degradace .....	40
5.10	Změna permitivity vlivem degradace .....	41
5.11	Změna rezistivity vlivem degradace.....	41
6.1	Zkušební vzorky bez (vlevo) a po (vpravo) degradaci .....	48
6.2	Testovaný vzorek umístěný mezi elektrodami v silikonové lázni.....	49
6.3	Průběh napětí při krátkodobé zkoušce.....	50
6.4	Vzorek po elektrickém průrazu .....	50
6.5	Graf průrazného napětí v závislosti na době stárnutí u vzorku polanvil.....	51
6.6	Graf průrazného napětí v závislosti na době stárnutí u vzorku ongrovil .....	51
6.7	Graf elektrické pevnost v závislosti na době stárnutí u vzorku polanvil .....	52
6.8	Graf elektrické pevnost v závislosti na době stárnutí u vzorku ongrovil.....	52
7.1	Vyražený zkušební vzorek ve tvaru lopatky .....	55
7.2	Graf prodloužení vzorku polanvil bez degradace .....	56
7.3	Graf prodloužení vzorku polanvil po 336h degradaci .....	56

## SEZNAM TABULEK

4.1	Udávané maximální provozní teploty pro různé použití materiálu PVC [36] .....	29
4.2	Požadavky na zkoušky PVC [36] .....	30
5.1	Teploty při různých polohách regulátoru pece .....	33
5.2	Změřené hodnoty před teplotní degradací u vzorků polanvil .....	37
5.3	Změřené hodnoty po degradaci u vzorku polanvil .....	40
5.4	Změřené hodnoty po degradaci u vzorku ongrovil .....	40
7.1	Průměrné hodnoty zkoušek v tahu u vzorku polanvil .....	57
7.2	Průměrné hodnoty zkoušek v tahu u vzorku ongrovil .....	57
8.1	Celkové výsledky vzorku polanvil .....	58
8.2	Celkové výsledky vzorku ongrovil .....	58



# ÚVOD

V praxi se přenos elektrické energie mezi dvěma místy uskutečňuje pomocí distribuční a přenosové sítě. Pro přenos se používá elektrické vedení, které se dělí podle uložení vodičů a typu izolace na venkovní a kabelové vedení. U těchto vedení musí být dodržena spolehlivost a bezpečnost přenosu. Z bezpečnostního hlediska je jeden z důležitých faktorů izolace vodičů, která musí splňovat dané požadavky.

Dále se vodiče dělí na holé a izolované, přičemž každý má své specifické výhody a nevýhody. Holé vodiče se používají na místech, kde za běžných podmínek nehrozí zkrat, ohrožení lidského života nebo na místech, kde jsou holé vodiče potřeba. Převážně se používají jako elektrické vedení VN, VVN nebo například jako trolejové dráty. Oproti tomu izolované vodiče mají využití na místech, kde hrozí ohrožení lidského života, zkrat nebo působení okolních vlivů (vlhkost, voda, teplota) na vodič. Další důvod využití izolace je z hlediska prodloužení životnosti vodiče.

Jako izolace se dříve používal lak, ovinutý papír nebo pryž. V dnešní době se převážně používají termoplasty, jako jsou polyvinylchlorid, polyetylen, zesílený polyetylen a další. Izolace u vedení NN jsou z velké části tvořeny pouze izolační a plášťovou vrstvou. U vedení VN je izolace tvořena vícero izolačními vrstvami, stíněním a plášťovou izolací.

V kabelovém průmyslu plní izolace funkci oddělení elektrického potenciálu od země, čímž brání před úrazem elektrickým proudem. Izolační materiály musí mít tedy vhodné vlastnosti a musí zabránit průchodu elektrického proudu. Proto je důležité, aby měly vysokou teplotní, elektrickou, chemickou a mechanickou odolnost a zároveň měly vysokou životnost. Hlavní faktory, které ovlivňují izolační materiály jsou převážně teplota, vlhkost, napětí, frekvence a čas.

V reálném provozu probíhá u izolačních materiálů degradační proces, který značně ovlivňuje jeho vlastnosti (ztrátový činitel, permitivita, kapacita) a tím zkracuje jeho životnost. Právě proto se životnost izolačních materiálů ověřuje pomocí metody zrychleného stárnutí, která dokáže nasimulovat reálné stárnutí izolace v provozu ve zkráceném čase. V praxi se stárnutí provádí například uložením ve vodní lázni, ozařováním izolace nebo uložením v peci při zvýšené teplotě. Typ stárnutí se vybírá podle toho, v jakých podmínkách má být kabel v provozu.

Cílem bakalářské práce je seznámit se s vlastnostmi a základními parametry izolačních materiálů kabelů. Dále popsat teoretický rozbor stárnutí izolačních materiálů kabelů. Další cíl bude navrhnout postup pro tvorbu termické degradace PVC izolačních materiálů kabelů. Podle zvoleného postupu provést termickou degradaci izolačních materiálů a vyhodnotit jejich degradační změny. Dalším cílem bude provést zkoušky elektrické pevnosti na nových a zdegradovaných zkušebních vzorcích a následně je porovnat a stanovit, zda měla degradace vliv na elektrickou pevnost. Obdobným způsobem budou provedeny mechanické zkoušky pevnosti v tahu.

# 1. DIELEKTRICKÉ MATERIÁLY A JEJICH VLASTNOSTI

Tato kapitola se zabývá dielektriky a izolanty a jejich rozdělením podle polárnosti. Dále jsou zde uvedeny charakteristické měřitelné vlastnosti dielektrik. V poslední části této kapitoly jsou popsány běžně používaná dielektrika v kabelovém průmyslu.

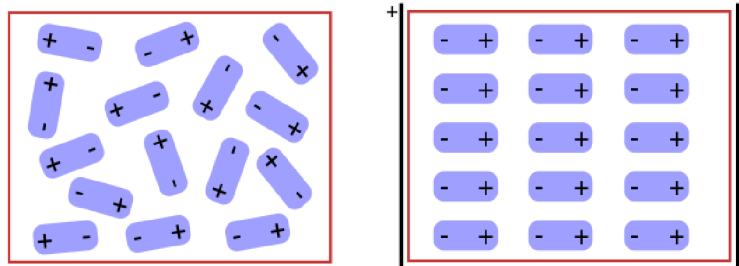
## 1.1 Dielektrika a izolanty

Dielektrikum je látka, která obsahuje pevně vázané nosiče náboje v krystalické mřížce daného materiálu. Jelikož dielektrikum neobsahuje téměř žádné volné nosiče náboje, nedochází při působení vnějšího elektrického pole k průchodu elektrického náboje, ale místo toho dochází k natočení pevně vázaných nosičů (polarizace). Při polarizaci se z atomů či molekul vytvoří elektrické dipóly. Dipóly se orientují tak, aby byl kladný a záporný pól opačně orientovaný ke vnějšímu elektrickému poli. Při uspořádání těchto dipólů vzniká vlastní, opačně orientované elektrické pole v dielektriku. Většina dielektrik se využívá jako izolační materiál. Jejich základní rozdělení podle skupenství je na pevné, plynné a kapalné. Tato práce se bude zabývat pevnými látkami. [1]

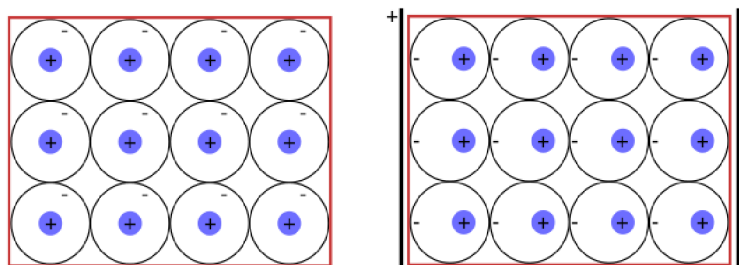
Ideální izolanty neobsahují žádné volné částice s elektrickým nábojem, a proto mají nekonečně velkou objemovou rezistivitu. Reálný izolant obsahuje malé množství volných nosičů elektrického náboje. U tohoto izolantu lze měřit objemovou rezistivitu. Při působení velkého elektrického pole dojde k pohybu těchto částic, a tím se stane izolant vodivým. V praxi je tento jev nežádoucí, a proto se mu snaží vyvarovat například využitím ochranných či správným dimenzováním. [2][3]

### 1.1.1 Rozdělení dielektrik podle polárnosti

Dielektrika se dělí na polární a nepolární. V případě nepolárních dielektrik má kladný a záporný náboj uvnitř atomu stejné těžiště. Pokud bude na látku působit vnější elektrické pole, dojde k vytvoření nesymetricky uloženým dipólům uvnitř atomů. Polární dielektrika mají stálé dipólové momenty. Když na látku nepůsobí vnější elektrické pole, jsou atomy chaoticky umístěny a působí na sebe silami, které se navzájem ruší. Při působení elektrického pole vzniká torzní síla, která dipóly pootočí ve směru působení tohoto pole. [3]



Obrázek 1.1 Schéma polárního dielektrika před a po vložení do elektrického pole [4]



Obrázek 1.2 Schéma nepolárního dielektrika před a po vložení do elektrického pole [4]

## 1.2 Charakteristické měřitelné vlastnosti dielektrik

### 1.2.1 Relativní permitivita

Relativní permitivita je hlavní vlastnost dielektrika. Udává, kolikrát je schopnost polarizace daného dielektrika vyšší než polarizace vakua. Je to poměr mezi permitivitou dielektrika a permitivitou vakua. Její velikost se liší podle skupenství dielektrika. Obvykle nabývá permitivita hodnoty od 2 do 300. Speciálním typem dielektrika bývají feroelektrika, které jsou typické svou velkou permitivitou od  $10^3$  až  $10^6$ . Relativní permitivitu je možné vyjádřit vztahem: [3]

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}, \quad (1.1)$$

přičemž permitivita vakua je  $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$ ,  $\varepsilon_r$  je relativní permitivita a  $\varepsilon$  je absolutní permitivita.

Relativní permitivitu lze též vyjádřit z poměru mezi elektrickou indukcí  $D$  a intenzitou elektrického pole  $E$ . Lze vyjádřit ze vztahu: [3]

$$D = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot E. \quad (1.2)$$

Nebo lze vyjádřit ze vztahu pro výpočet kapacity deskového kondenzátoru:

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{S}{l}, \quad (1.3)$$

kde  $S$  je plocha elektrod a  $l$  je tloušťka elektrod.

### 1.2.2 Objemová a povrchová rezistivita

Elektrická rezistivita, nazývána také měrný elektrický odpor, je vlastnost materiálu, který definuje, jak dobře povede materiál elektrický proud. Nízká rezistivita označuje materiál, ve kterém snadno dochází k pohybu elektrického náboje. Odpor je podle Ohmova zákona zjišťován pomocí známého napětí a následného měření proudu. Rezistivita se následně vypočítá podle rozměrů vzorku a elektrod.

Rezistivita je velmi citlivá na změny teploty, proto je důležité mít při měření dostatečně přesné teplotní podmínky. Zároveň má vliv na odpor také velikost a změna napětí, proto se měření vzorků provádí při stejné velikosti napětí a polaritě. Rezistivita je dále závislá na době přiloženého stejnosměrného napětí. [5]

Pro porovnání dielektrik je potřeba znát povrchovou a vnitřní rezistivitu. Ta se přepočítá z izolačního odporu materiálu  $R_x$ , který se vypočítá pomocí vztahu:

$$R_x = \frac{U}{I_x}, \quad (1.4)$$

kde  $U$  je napětí stejnosměrného zdroje a  $I_x$  je proud protékající izolačním materiálem.

**Povrchová rezistivita** představuje odpor povrchu na izolačním materiálu. Je definována jako poměr intenzity elektrického pole a hustoty stejnosměrného proudu uvnitř materiálu. Při tomto měření je potřeba brát ohled na okolní prostředí, které má na něj velký vliv. Rezistivitu lze vyjádřit vztahem:

$$\rho_s = R_x \frac{l}{h}, \quad (1.5)$$

kde  $l$  je délka měřící elektrody a  $h$  je tloušťka vzorku.

**Objemová rezistivita** představuje odpor procházející krychlí izolačního materiálu. Je definována jako poměr intenzity elektrického pole a hustoty stejnosměrného proudu na povrchu materiálu. Při měření je potřeba brát v potaz průchod malého proudu, proto je potřeba změřit více vzorků a vypočítat jejich průměrnou hodnotu. Vyjadřuje se vztahem:

$$\rho_v = R_x \frac{S}{h}, \quad (1.6)$$

kde  $S$  je efektivní plocha elektrody.

Na měření se používá přímá a nepřímá metoda. Přímá metoda měření na zařízení Tettex spočívá v uložení vzorku mezi elektrody. Vestavěný zdroj nabije měřený vzorek a začne jím procházet proud, který je měřený ampérmetrem. Pro měření je důležité znát tloušťku vzorku, napájecí napětí a plochu měřící elektrody. [2][5][6][7]

### 1.2.3 Elektrická pevnost

Elektrická pevnost slouží pro určení odolnosti dielektrika (izolantu) proti elektrickému průrazu. Průraz vzniká po působení průrazného napětí, což je minimální hodnota napětí, která jej způsobí. Po průrazu může být pevný izolant částečně vodivý. Intenzita elektrického pole, příslušející tomuto napětí, je označována jako elektrická pevnost a značí se  $E_p$ , přičemž jednotka je V/m nebo častěji používaná kV/mm a MV/mm. Obecně lze napsat, že elektrická pevnost je poměr mezi průrazným napětím  $U_p$  a tloušťkou izolačního materiálu  $d$ . Z tohoto vyplývá vztah: [3][8]

$$E_p = \frac{U_p}{d}, \quad (1.7)$$

kde  $E_p$  je elektrická pevnost,  $U_p$  je průrazné napětí a  $d$  je tloušťka izolačního materiálu.

Velikost elektrické pevnosti závisí na povrchovém namáhání, povrchové čistotě, stáří materiálu, okolnímu tlaku a také na tvaru napětí. Dalším důležitým faktorem je teplota a vlhkost s jejichž vzrůstem klesá pevnost. Dále elektrická pevnost závisí na tloušťce izolačního materiálu (s rostoucí tloušťkou roste, ale pro většinu materiálů však nelze uvažovat přímou úměru). Elektrická pevnost klesá se zvětšujícím se nábojem. [9]

#### 1.2.4 Dielektrické ztráty

Ztráty jsou důležitá vlastnost pro zjištění chování dielektrika při působení elektrického pole. Dielektrické ztráty lze popsat jako změnu energie v dielektriku. Vyskytují se ve stejnosměrných i střídavých elektrických polích. Vlivem vysoké vodivosti dochází k průchodu značně většího proudu, a tím se dielektrikum ohřívá. Tento ohřev způsobí degradaci dielektrika, což může vést k tepelnému průrazu nebo jeho zničení. Kvůli tomu je nutné zařídit účinný odvod tepla do okolí. Mezi základní ztráty v dielektriku patří: [13][14]

- **Vodivostní ztráty**

Tyto ztráty se vyskytují u všech dielektrik a jsou způsobeny vlivem průtoku vodivostního proudu uvnitř dielektrika nebo po povrchu u pevných dielektrik. Velikost ztrát závisí na konduktivitě, což vyjadřuje schopnost vést elektrický proud. Pokud je konduktivita vysoká, prochází větší proud, čímž vzrostou vodivostní ztráty. [13][14][15]

- **Polarizační ztráty**

Polarizační ztráty jsou způsobené například při typu relaxační polarizace, kdy dochází ke ztrátám ve střídavém elektrickém poli. Při polarizaci dochází k natočení molekul ve směru působení elektrického pole. Tyto molekuly se pohybují chaoticky a na jejich otočení je vynaložena určitá energie vyjádřena ve formě ztrát. Tyto ztráty závisí na teplotě, jelikož na ní závisí velikost tepelného pohybu slabě vázaných nosičů. V praxi existují tři druhy závislosti ztrát na intenzitě střídavého elektrického pole. První typ je lineární, který je u bezztrátových dielektrik. Další je tvaru elipsy a vzniká u dielektrik s relaxačními i deformačními polarizacemi. Posledním typem je tvaru hysterezní smyčky, která vzniká u feroelektrik v teplotě pod Curieovo bodem. [13][14][15]

- **Ionizační ztráty**

Ionizační ztráty se vyskytují u plyných nebo tuhých dielektrik, které obsahují malé plynové dutinky. Ztráty vznikají v důsledku výbojové činnosti v těchto dutinkách. Tyto výboje jsou způsobeny vzrůstem ionizace v dutinkách. Častými výboji vzniká nárůst teploty v okolí dutinek v dielektriku a způsobuje degradaci dielektrických vlastností. [13][14][15]

#### 1.2.5 Ztrátový činitel

Ztrátový činitel vyjadřuje poměr mezi ztrátami dielektrickými v kondenzátoru, jež jsou závislé na kmitočtu a ztrátami odporovými. Dielektrické ztráty představují kapacitu kabelu a ztráty odporové představují izolační odpor. U ideálního kondenzátoru (dielektrika), který je tedy bezztrátový dochází k předbíhání proudu před napětím o  $\varphi=90^\circ$ . U reálného kondenzátoru je tento úhel menší, jelikož zde působí odporové

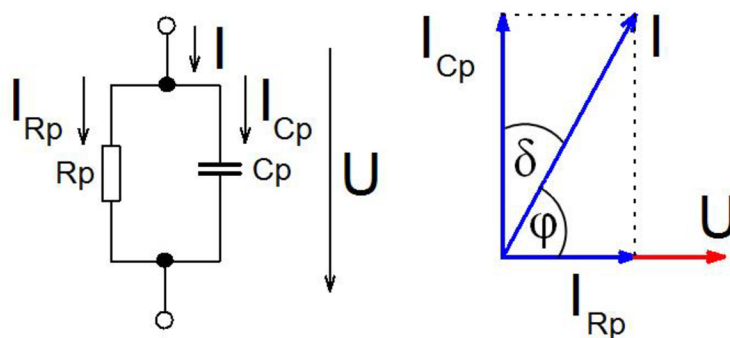
ztráty, a to ve formě přeměny na teplo. Obecně lze napsat tyto ztráty jako úhel  $\delta$  a lze je vyjádřit pomocí vztahu:

$$\delta = \frac{\pi}{2} - \varphi . \quad (1.8)$$

Ztrátový činitel se potom vyznačuje jako tangens úhlu  $\delta$  ( $tg\delta$ ). Tento parametr se používá ke zjištění stavu izolačního materiálu. Menší hodnota ztrátového činitele znázorňuje větší kvalitu kondenzátoru. Jestliže je hodnota ztrátového činitele menší než  $10^{-3}$ , jde o dobrý izolační materiál. [10][11]

### 1.2.6 Ekvivalentní náhradní obvody

Pro výpočet ztrátového činitele se reálná dielektrika nahrazují ekvivalentními obvody. Jedná se o paralelní nebo sériové zapojení ideálního kondenzátoru a rezistoru, který nahrazuje reálné ztráty.

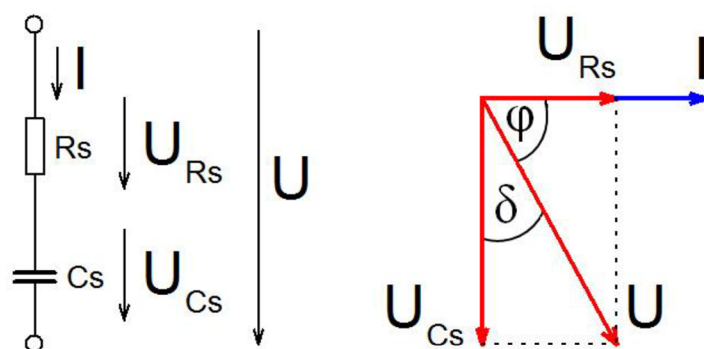


Obrázek 1.3 Paralelní ekvivalentní zapojení a vektorový diagram ztrátového činitele [10]

Pro určení ztrátového činitele z paralelního zapojení lze použít vztah:

$$tg\delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{1}{\omega \cdot R_p \cdot C_p} , \quad (1.9)$$

kde  $I_R$  je velikost proudu procházejícího přes odpor a  $I_C$  je velikost proudu procházejícího přes kondenzátor,  $R_p$  představuje odpor paralelní větve a  $C_p$  představuje kapacitu paralelní větve. [10]



Obrázek 1.4 Sériové ekvivalentní zapojení a vektorový diagram ztrátového činitele [10]

Pro určení ztrátového činitele ze sériového zapojení lze použít vztah:

$$\operatorname{tg} \delta = \omega \cdot R_s \cdot C_s, \quad (1.10)$$

kde  $R_s$  představuje sériový odpor a  $C_s$  sériovou kapacitu. [10]

Pro měření tohoto činitele pomocí zařízení Tettex je potřeba brát testovaný objekt jako kondenzátor. Ten je vytvořen pomocí elektrod a izolačního materiálu vloženého mezi nimi. Elektrody se dělí na vysokonapěťovou a měřicí. [12]



## 1.3 Dielektrika používané v kabelovém průmyslu

Existují 3 druhy používaných dielektrik v elektrotechnice. Jedná se o plynné, kapalné a pevné. V kabelovém průmyslu se používají pevná dielektrika, což je nejrozšířenější typ dielektrika. Do pevných dielektrik lze zařadit materiály jako pryž, papír, polyetylén (PE), zesítený polyetylén (XLPE), polyvinylchlorid (PVC), polypropylén (PP). Tyto materiály se používají jako izolace kabelů ve všech napěťových úrovních. Dále se v kabelovém průmyslu používají pouze zřídka izolace z papíru naimpregnovaným olejem. [2]

### 1.3.1 Polyethylen PE

Jedná se o jeden z nejpoužívanějších termoplastů\* nepolárního charakteru. Polyetylen (PE), vzniká polymerací\* plynného etylénu  $C_2H_4$ . Je to pevný, houževnatý a zároveň pružný materiál. Jeho pevnost v tahu je při okolní teplotě 18 MPa – 33 MPa. Z hlediska využití jako izolantu dosahuje velmi vysokých dielektrických hodnot, které jsou závislé na teplotě, vlhkosti a frekvenci a dalších. Relativní permitivita je okolo 2,2 a mění se s frekvencí vyšší než 100 GHz. Ztrátový činitel se pohybuje v rozmezí od  $1 \cdot 10^{-4}$  do  $5 \cdot 10^{-4}$ . Průrazné napětí se udává 30 kV/mm – 40 kV/mm a objemová rezistivita  $10^{15} - 10^{17} \Omega \cdot \text{cm}$ . Jeho zásadní výhodou je nízká výrobní cena, zdravotní nezávadnost a vysoká chemická odolnost. Odolává především proti kyselinám, zásadám a ostatním rozpouštědlům. Dále vykazuje velkou odolnost proti vodě a má malou propustnost vodních par. [16][17][18]

V běžných atmosférických podmínkách se životnost polyethylenu udává 2 až 3 roky, přičemž v místech, kde jsou trvale větší teploty je životnost značně menší. Kvůli tomu se používají přídatné materiály (saze), které životnost zvyšují až na 20 let. Mezi nevýhody patří nízká teplotní odolnost, hořlavost a malá odolnost vůči mechanickému poškození. Tyto špatné mechanické vlastnosti se zlepšují zesíťováním. Tímto vznikl zesíťovaný polyetylen značící se XLPE. Podle normy PNE 34 7625 (kabely do 34 kV) je jmenovitá tloušťka pláště větší než 2,5 mm. V žádném místě pláště nesmí být tloušťka menší než 2 mm. [19][20]

Současná výroba polyethylenu se rozděluje na vysokotlaké, středotlaké a nízkotlaké. Dále se rozlišují na dva typy a to nízkohustotní (PE-LD) a vysokohustotní (PE-HD). Od roku 1939 byl používán nízkohustotní, který odolává teplotě do 70 °C. Od roku 1953 se začal používat vysokohustotní s teplotní odolností do 85 °C. [21]

Polyetylen je kvůli vlastnostem používán v kabelovém průmyslu jako izolace všech typů kabelů. Dále je používán v místech, kde je voda nebo vysoká vlhkost jako je například podmorský kabel. Z větší části se používá u silových kabelů do 35 kV nebo výjimečně do 70 kV. [16]



Obrázek 1.5 Granulát polyethylenu [22]

\*Termoplast je plast vyrobený z polymerních pryskyřic, který se po zahřátí stává měkkým materiálem a po ochlazení ztvrdne. Při teplotě tání se stává materiál kapalným. Po zmrazení termoplastu se stává skelným a může se zlomit. Při neustále změně teploty zahříváním a ochlazováním nemá téměř žádné degradace chemických vlastností. [23]

\*Polymerizace je chemická reakce mnohopočetných molekul monomeru, při které vznikají dlouhé makromolekuly polymeru. Výsledkem toho potom je makromolekulární řetězec. Řetězec má určitou konečnou délku, které dosáhne v rychlosti závislé na rychlosti reakce, jejího růstu a končením. [24]

### 1.3.2 Zesítěný polyethylen XLPE

Hlavní změnou a zároveň výhodou zesítěného polyethylenu jsou jeho mechanické vlastnosti. Zlepšila se pevnost a tažnost při teplotách u bodu tavení. Díky tomuto se zvětší provozní teplotní hranice izolace a je možno jej používat na místech s větší teplotou okolí. Zlepšila se také odolnost proti povrchovému praskání. Zesíťování nemá vliv na odolnost vůči tepelnému stárnutí.

Pro zesíťování polyethylenu se vyvinulo několik technik. Provádí se buď přidáním malého množství peroxidu nebo ozařováním (ionizační záření) nebo přidáním silanu. Ozařovací a peroxidové zesíťování se dnes moc nepoužívá, jelikož jsou tyto procesy velmi nákladné. Metoda pomocí ionizačního záření je výhodná z toho hlediska, že není potřeba přidávat přídatný materiál. [16][25]

Podle normy ČSN IEC 605502-2 je maximální teplota jádra za normálního provozu 90 °C. Pokud je při normálním provozu kabel uložený přímo v zemi a je trvale zatížený při maximální teplotě jádra, může dojít k nárůstu tepelné rezistivity zeminy okolo něj. Následkem toho může teplota překročit maximální teplotu udávanou normou. Pro tyto

případy se provádí určitá opatření. Při zkratu (maximální doba 5 s) je maximální teplota 250 °C. Mezi hlavní parametr pro zjištění stavu a degradace izolace patří ztrátový činitel. Podle podnikové normy PNE 347625 se uvádí různé hodnoty ztrátového činitele u XLPE izolace do 35 kV. Při okolní teplotě musí být menší než  $40 \cdot 10^{-4}$ . Při zvýšené teplotě, než je maximální teplota jádra (95 °C až 100 °C) při běžném provozu musí, být menší než  $80 \cdot 10^{-4}$ . Jmenovitá tloušťka izolačního materiálu se udává podle napětí. Pro jmenovitou hodnotu napětí 30 kV se uvádí tloušťka izolace 8 mm. Následující parametry se vztahují pro maximální teploty jádra. Zkušební požadavky pro mechanické vlastnosti izolace se měří před a po stárnutí. Před stárnutím se udává minimální pevnost v tahu  $12,5 \text{ N/mm}^2$  a minimální prodloužení 200 %. [25][27]

### 1.3.3 Polyvinylchlorid PVC

Polyvinylchlorid (PVC) je společně s polyetylenem jeden z nejčastěji používaných termoplastických polymerů na světě. Má velice široké využití i mimo kabelový průmysl. Jako izolace se převážně používá pro kabely nízkého napětí. Je snadno dostupný, má nízkou výrobní cenu a je snadno zpracovatelný. V základním stavu je velice tvrdý, netvárný a křehký materiál, proto se do výroby přidávají různé přísady, jakou jsou například plniva, maziva nebo změkčovadla. Tyto přísady jsou většinou polárního charakteru, a proto mají negativní vliv na dielektrické vlastnosti. Ztrátový činitel je ztelně větší u měkčeného PVC materiálu než u čistého PVC a to  $\text{tg}\delta = 3 \cdot 10^{-2}$ . U pružného materiálu je také ztelně menší měrná objemová rezistivita a to  $10^{12}$  až  $10^{15} \Omega \cdot \text{m}$ , zatímco u pevného materiálu je  $10^{16} \Omega \cdot \text{m}$ . Pokud se při výrobě správně zvolí poměr změkčovadel a základního materiálu PVC je možné ho používat jako izolaci na kabely. Jeho použití jako dielektrikum je výhodné z důvodu nižší hodnoty ztrátového činitele a vysoké relativní permitivity (3,2 až 3,6). Chemicky je PVC velice odolný proti hydroxidům a kyselinám. Ve srovnání s ostatními plasty má větší hustotu ( $1,38 \text{ g/cm}^3$ ). Odolnosti proti průraznému napětí je 40 MV/m. Polyvinylchlorid má vysokou pevnost v tahu, podle podnikové normy PNE 34 7625 se uvádí minimální hodnota 12,5 MPa. Komplikace s PVC nastávají při jeho hoření, kdy se začíná uvolňovat chlorovodík, který je zdraví nebezpečný. Pokud dojde ke smíchání uvolněného chlorovodíku s vodní párou působí tato směs korozivně na vodič a okolní materiály. [16][28]

## Výroba PVC

Oproti ostatním termoplastům, které jsou vyrobené pouze z ropy se u PVC na výrobu potřebují dvě základní suroviny, a to kuchyňská sůl a ropa. V některých oblastech výroby se nahrazují uhlovodíky odvozené z ropy uhlovodíky odvozenými z biologického původu (cukrové plodiny). Výroba spočívá v elektrolýze slané vody, ve které vzniká chlór. Tento chlór se spojuje s ethylenem, který byl získán z ropy nebo cukrových plodin a vzniká tak vinylchloridový monomer (VCM). Následuje polymerace VCM za vzniku polyvinylchloridu (PVC). V poslední fázi dochází ke smíchání s různými aditivami pro požadované fyzikální vlastnosti. [29]

Mezi hlavní polymerační metody patří suspenzní, emulzní a objemová. Nejčastěji používaná metoda, a to až v 80 % výroby je suspenzní. Ta spočívá v natlakování a zkapalnění VCM a následném přivádění do polymeračního reaktoru. V reaktoru jsou obsažena suspenzační činidla a voda, která slouží pro řízení tepla uvolněného při polymeraci. Dále se přivede iniciátor a pod určitým tlakem se při 40–60 °C vyrábí polyvinylchlorid ve formě bílého prášku (PVC pryskyřice). [29][30]



Obrázek 1.6 Granulát polyvinylchloridu [31]

## 2. TEORETICKÝ PROCES STÁRNUTÍ

Izolační materiály jsou v provozu vystaveny klimatickým vlivům jako jsou teplota, vlhkost, tlak, světlo a další. Působením těchto vlivů dochází v materiálu k chemickým a fyzickým změnám, čímž dochází k jeho stárnutí.

Norma ČSN EN 60216-1 ed. 2 vysvětluje vznik procesu stárnutí jako: „*Seznamy tepelných schopností elektroizolačních materiálů, založené na zkušenostech z provozu, se ukázaly jako nepraktické vinou rychlého rozvoje technologií výroby polymerů a izolací a dlouhého času potřebného k získání patřičných zkušeností z provozu. K získání nezbytných informací proto byly třeba procesy zrychleného stárnutí a zkušební postupy.*“ [33]

### 2.1 Model stárnutí

Účinky tepelného stárnutí poprvé uvedl Montsinger, který zjistil, že při každém navýšení teploty o 5-8 °C u transformátoru klesne jeho životnost na polovinu. Ve svém tvrzení také popisoval, že při tepelném stárnutí dochází k mechanické poruše dielektrika ve formě trhlin, které vedou elektrický výboj. [38]

Pro zjištění procesu stárnutí se používají různé modely stárnutí, které popisují životnost materiálu. Mezi hlavní modely stárnutí patří tepelné, mechanické, elektrické či kombinované. Tato práce se bude zabývat modelem tepelného stárnutí. Pro správné vytvoření matematického nebo fyzikálního modelu je zapotřebí znát fyzikálně chemické vlastnosti zkušebního materiálu jako jsou aktivační energie, teplota skelného přechodu, rychlost pohybu náboje a další. Je také zapotřebí znát vnější projevy jako jsou doba do průrazu, průrazné napětí a izolační odpor. Pomocí matematického popisu stárnutí se dokážou předpovědět fyzikální procesy, které vznikají uvnitř materiálu. [38]

#### 2.1.1 Model tepelného stárnutí

Rychlost stárnutí izolačních materiálů závisí na mnoha faktorech, ale z největší části právě na teplotě. Při zvýšené teplotě dochází k dodání energie do materiálu, a to vede ke zvýšení rychlosti chemických procesů, které jej trvale poškozují. Tyto procesy způsobují chemické reakce jako jsou polymerace, polykondenzace, oxidace či zesíťování molekul.

Při působení kyslíku z ovzduší na izolační materiál dochází při zvýšené teplotě k oxidaci. Ta má za následek vznik zplodin, které značně působí na materiál. Dále dochází ke zvýšení elektrické vodivosti a ztrátového činitele. Případně může docházet k trhání makromolekul, čímž klesá mechanická odolnost nebo se zhoršují dielektrické vlastnosti.

Pomocí výsledků zrychleného stárnutí se izolační materiály řadí do tepelných tříd. Závisí na tepelné odolnosti izolačního materiálu. Pro výpočet souvislosti mezi délkou experimentu a teplotou materiálu se používá empirické Montsingerovo pravidlo:

$$\tau_T = A \cdot e^{-BT}, \quad (2.1)$$

kde  $\tau_T$  je životnost izolace,  $A$  a  $B$  jsou konstanty materiálu, jež se zjistí z experimentu a  $T$  je teplota stárnutí.

Pro výpočet délky života materiálu se také používá Arrheniova rovnice:

$$\tau_T = a \cdot e^{\frac{E_a}{RT}}, \quad (2.2)$$

kde  $a$  je konstanta závislá na koncentraci vzniklých aktivních molekul, to je, vyjadřuje pravděpodobnost srážky reagujících molekul.  $E_a$  je aktivační energie, což vyjadřuje minimální potřebnou energii pro zahájení chemické reakce. Parametr  $R$  je univerzální plynovou konstantu a  $T$  je absolutní teplota. [38][39]

### 3. ZPŮSOBY MĚŘENÍ PARAMETRŮ DIELEKTRIK

Měření parametrů jsou prováděna za účelem zjištění stavu dielektrik a následným porovnáním těchto parametrů s parametry po provedených degračních zkouškách. Tato kapitola popisuje měřicí přístroj a princip měření jednotlivých veličin.

#### 3.1 Měřicí přístroj

Měření bude probíhat na přístroji Tettex 2830/2831 od firmy Haefely. K přístroji je možno připojit buňky Tettex 2914 a Tettex 2903 pro měření pevných a kapalných dielektrik. V této práci se bude používat buňka pro měření pevných dielektrik. Měřicí zařízení je složeno ze zdroje Tettex 2831 a procesní jednotky Tettex 2830, která slouží k vyhodnocování a zobrazování naměřených dat. Přístroj pracuje na principu můstek-vektor-metr, který je schopný analyzovat kapacitní, rozptylové faktory a stejnosměrnou rezistivitu. Zařízení má vestavěný dotykový LED displej pro ovládání. Na výběr je automatický nebo ruční režim. Vestavěný počítač dokáže naměřit a vypočítat až 13 parametrů. Obsahuje možnost ohřívání vzorků nebo výběr mezi AC/DC napájením. Rozsah DC napětí je 250 V–2,5 kV. Pro AC napětí je rozsah 40 V – 2,5 kV při možnosti změně frekvence v rozsahu 40 Hz–65 Hz. [12]



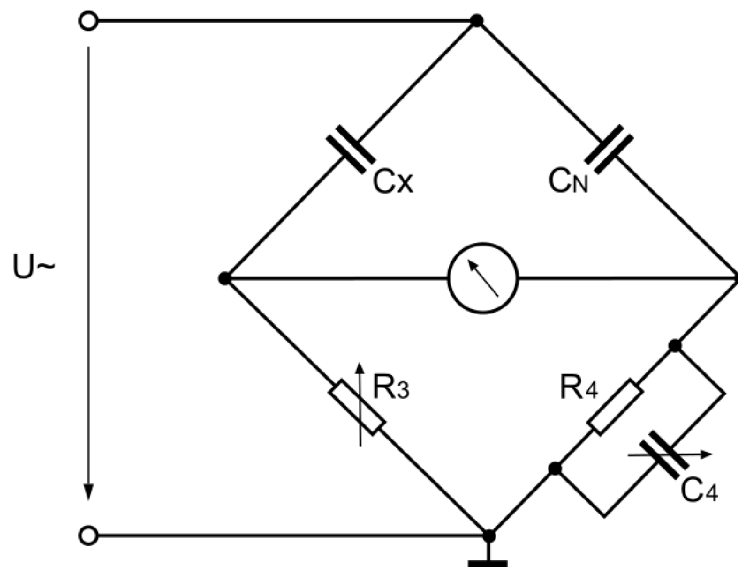
Obrázek 3.1 Zařízení Tettex 2830/2831



### 3.2 Měření na můstku

Pro měření se používá Scheringův můstek, což je přístroj určený k měření dielektrických ztrát a permitivity. Používá se pro síťové kmitočty až do hodnot 100 kHz. Jedná se o obvod složený ze čtyř větví, přičemž jsou po dvou větvích rozděleny na kapacitní a odporovou (měřicí) část. V kapacitní části se nachází referenční kapacita  $C_n$  a neznámá kapacita  $C_x$ , která představuje měřený materiál. V odporové části se nachází regulovatelný odpor  $R_3$  a odpor  $R_4$ , který je zapojen proti neznámé kapacitě  $C_x$ . Pokud se neznámá kapacita nahradí sériovým náhradním obvodem s odporem  $R_s$  a kapacitou  $C_s$ , pak vyvážený můstek splňuje podmínku: [41]

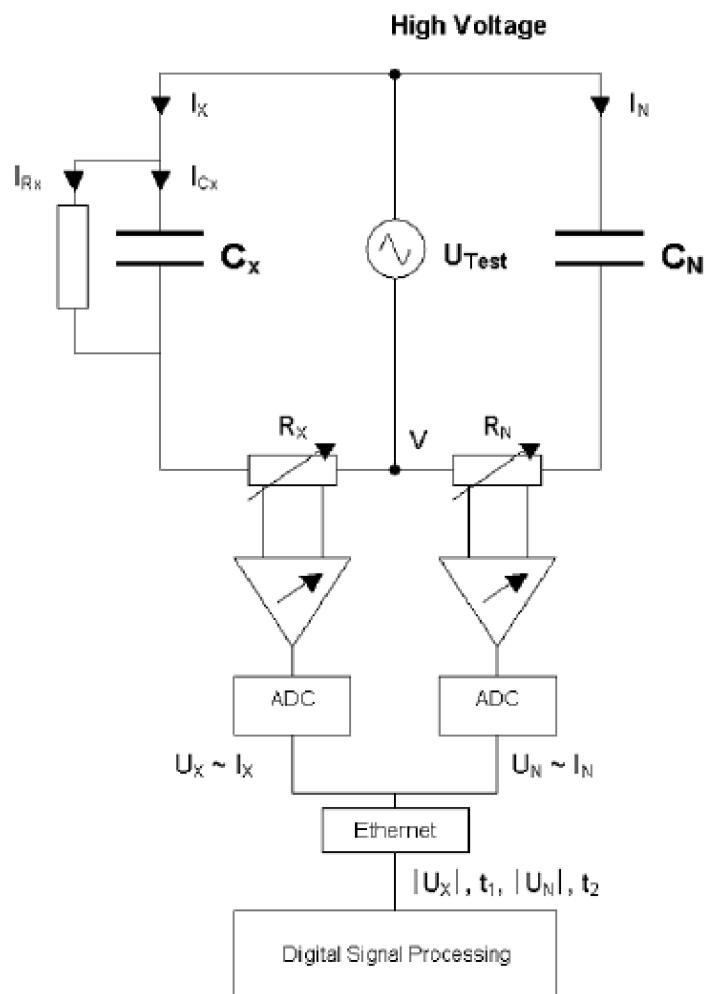
$$C_s = C_n \cdot \frac{R_4}{R_3}. \quad (3.1)$$



Obrázek 3.2 Scheringův můstek [42]

Měření na můstku v laboratoři pomocí zařízení Tettex 2830 je založeno na metodě dvojitého vektor-metru, kde se měří protékající proud  $I_n$  referenčním kondenzátorem  $C_n$  a proud  $I_x$  protékající neznámým testovacím objektem  $C_x$ . Tyto větve jsou zapojeny paralelně a jsou napájeny střídavým napětím z vysokonapěťového zdroje, vestavěným v Tettex 2831. Proudy v obou větvích jsou měřeny a regulovány nastavitelnými odpory  $R_x$  a  $R_n$ . Tyto hodnoty odporů jsou následně digitalizovány a společně s vzorkovací frekvencí se zjistí časové údaje jakou jsou například fázový posun mezi  $I_n$  a  $I_x$ . Tyto změřené hodnoty jsou přiváděny do PC obsaženého v Tettex 2830 a následně jsou dopočítány parametry testovaného kondenzátoru. Schéma zapojení můstku je na obrázku 3.3. [12]





Obrázek 3.3 Měřicí můstek Tettex 2830/2831 [12]

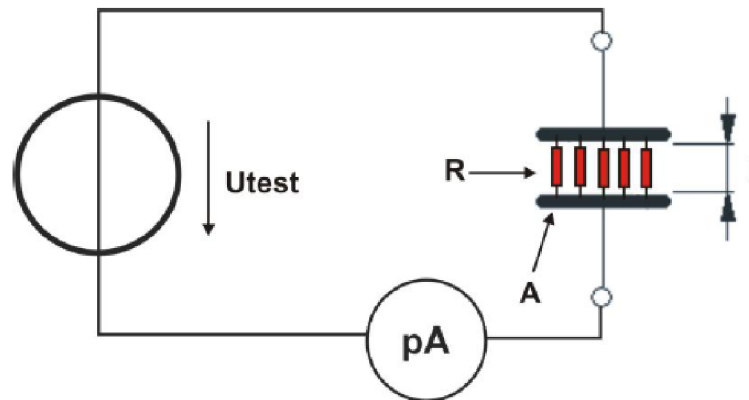
, kde  $I_X$  je proud testovacím objektem,  $I_{R_X}$  jsou ztráty testovacího objektu,  $I_N$  je proud normálovým kondenzátorem,  $C_X$  je kapacita testovacího objektu,  $C_N$  představuje kapacitu referenčního kondenzátoru,  $R_X$  a  $R_N$  jsou měřicí potenciometry a  $ADC$  je převodník z analogové hodnoty na digitální hodnotu. [12]

### 3.3 Měření objemové rezistivity

Stejnosečná objemová rezistivita se měří pomocí pikoampérmetru, který měří procházející proud skrz testovaný vzorek. Testovací buňka je napájena stejnosměrným vysokonapěťovým zdrojem umístěným společně s pikoampérmetrem v Tettex 2831. Schéma zapojení je na obrázku 3.4. Hodnoty napětí a změřeného proudu jsou převedeny na digitální hodnoty pro výpočty v PC umístěném v Tettex 2830. Výsledná objemová rezistivita se potom vypočítá:

$$\rho = \frac{A}{l} \cdot \frac{U}{I}, \quad (3.2)$$

kde  $A$  je plocha měřicí elektrody,  $l$  je šířka testovaného vzorku,  $U$  je stejnosměrné použité napětí, a  $I$  je proud procházející vzorkem. [12]



Obrázek 3.4 Schéma pro měření rezistivity [12]

## 4. NÁVRH TERMICKÉ DEGRADACE

Tato kapitola se zabývá návrhem uskutečnění termické degradace podle stanovených norem. Jsou zde popsány teplotní a časové podmínky termické degradace a vybraný postup pro uložení vzorků v peci.

### 4.1 Podmínky pro termickou degradaci

Zrychlený proces teplotního stárnutí simuluje životnost materiálu v reálném čase. K jeho určení je potřeba určit parametry a čas strávený v peci. Proces stárnutí se dá realizovat pomocí horkovzdušné pece. Tato horkovzdušná pec využívá přirozeného průtoku vzduchu nebo nuceného průtoku. Podle normy ČSN EN 60811-401 (norma pro měření mechanických vlastností materiálu ve tvaru trubičky nebo oboustranné lopatky) musí vzduch do pece vstupovat tak, aby obtékal měřené vzorky materiálů a vystupoval z pece z horní části. Přesný počet úplných výměn vzduchu v peci při určité teplotě se uvádí od 8 do 20 za hodinu. [35]

V peci se smí zkoušet pouze směsi stejného složení. Pět měřených vzorků, které vyhovují dané normě se podle normy ČSN EN 60811-401 zavěsí ve svislé poloze do středu horkovzdušné pece. Zkušební vzorky musí být od sebe vzdáleny minimálně 20 mm pro lepší proudění teplého vzduchu. Vzorky v peci nesmí zaujímat více než 2 % objemu prostoru uvnitř pece.

Po ukončení procesu stárnutí se vzorky ihned vyjmou z horkovzdušné pece a po dobu minimálně 16 hodin se ponechají vystavené pokojové teplotě bez přímého slunečního svitu. [35]

#### 4.1.1 Teplotní a časové podmínky pro PVC

Jednotlivé materiály mají svojí předepsanou teplotu a předepsanou délku pro uložení v horkovzdušné peci. Podle normy ČSN EN 50363-3 se uvádí teploty a doby procesu stárnutí v peci pro izolační směsi materiálu PVC v různých typech použití. Tyto teploty jsou uvedené v tabulce 4.1. Označení TI určuje obsažené směsi ve vzorku. [36]

Tabulka 4.1 Udávané maximální provozní teploty pro různé použití materiálu PVC [36]

Typ	Maximální provozní teplota materiálu [°C]	Všeobecné použití
TI1	70	Běžné účely
TI2	70	Ohebné
TI3	90	Tepelně odolné
TI4	70	Pro instalaci při nízké teplotě
TI5	70	Ohebné pro použití při nízké teplotě

Proces stárnutí se udává pro vzorky materiálu, u kterých bude probíhat měření mechanických vlastností nebo zkouška úbytku napětí. Hodnoty teplot a časů pro proces teplotního stárnutí jsou vypsány v tabulce 4.2.

Tabulka 4.2 Požadavky na zkoušky PVC [36]

Číslo	Zkouška	Jednotka	Typ směsi PVC				
			TI1	TI2	TI3	TI4	TI5
1	Mechanické vlastnosti	-	TI1	TI2	TI3	TI4	TI5
	Podmínky stárnutí						
	Teplota	°C	80±2	80±2	135±2	80±2	80±2
	Doba	h	7x24	7x24	14x24	7x24	7x24
2	Zkouška úbytku hmotnosti	-	TI1	TI2	TI3	TI4	TI5
	Podmínky stárnutí						
	Teplota	°C	80±2	80±2	115±2	80±2	80±2
	Doba	h	7x24	7x24	14x24	7x24	7x24

## 4.2 Návrh teploty a doby stárnutí

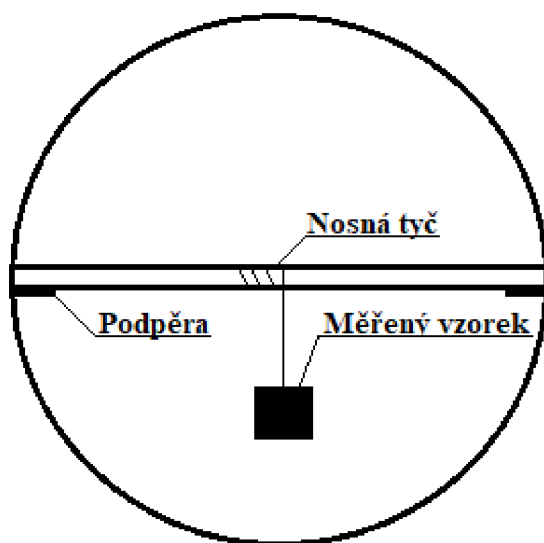
Proces tepelného stárnutí bude probíhat v horkovzdušné peci v laboratoři VVN. Pro stárnutí budeme uvažovat vzorek TI1 z tabulky 4.1 jako pro běžné použití. Podle normy ČSN EN 50363-3 se stanovuje proces stárnutí při teplotě  $80 \pm 2$  °C po dobu 7 x 24 hodin.

Při měření teploty nebude zajištěna žádná metoda pro měření průtoku vzduchu v horkovzdušné peci, jelikož to pec ani jiné prostředky v laboratoři neumožňuje. [36]

## 4.3 Návrh uložení v peci

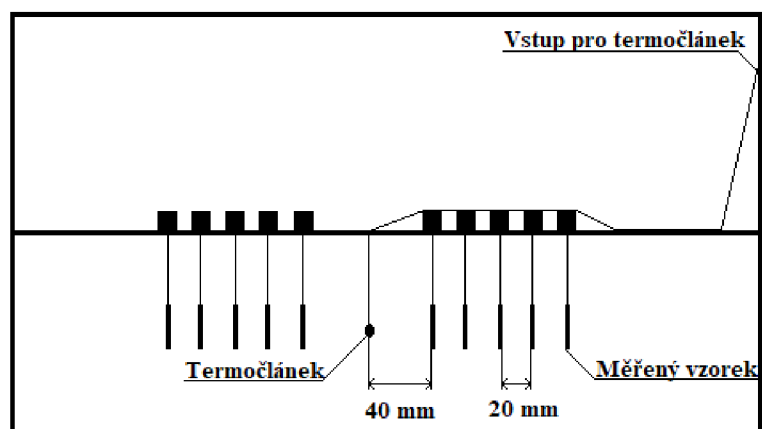
Měřené vzorky izolačních materiálů mají být zavěšené již podle zmíněné normy ČSN EN 60811-401 ve středu pece minimálně 20 mm vzdálené od sebe. Horkovzdušná pec umístěná v laboratoři VVN neumožňuje zavěsit měřený vzorek, jelikož pro to není vybavená. Proto se zvolí systém, kde bude na podpěrách položena tyč o délce rovnající se vnitřní šířce pece. Na uložené tyči bude zachycen drát, na jehož druhém konci bude zavěšen zkušební vzorek. Pro tento případ bude potřeba ve vzorcích udělat potřebné otvory pro uvázání. Otvor bude umístěn v rohu vzorku. Jednotlivé tyče budou od sebe položeny v takové vzdálenosti, aby bylo dosaženo vzdálenosti 20 mm mezi měřenými vzorky.

Zavěšený vzorek nebude tímto způsobem umístěn ve středu pece, ale bude převážně ve spodní části pece. Tento vzorek bude vystaven vyšší teplotě, jelikož bude blíž k topné spirále. Kvůli tomu bude potřeba zregulovat teplotu v daném místě tak, aby zde byla požadovaná hodnota. Systém zavěšení lze vidět na obrázcích 4.1 a 4.2.



Obrázek 4.1 Systém zavěšení vzorků

Termočlánek určený k měření teploty v peci je v podobě odporového drátu. Tento drát bude omotán okolo další tyče uložené na podpěrách, která bude umístěná ve středu pece na její šířku. Okolo termočlánu bude prostor o velikosti alespoň 40 mm, aby nedošlo k ovlivnění teploty od okolních vzorků.



Obrázek 4.2 Systém zavěšení vzorků, pohled z boku pece

#### 4.4 Návrh materiálů pro termickou degradaci

Pro zavěšení vzorků bude potřeba použít tyče z materiálu, který odolá teplotě okolo 80 °C. Proto budou použity tyče z kovového materiálu. Materiál potřebný k pověšení vzorků bude muset rovněž odolávat vysoké teplotě, proto bude použit měděný vodič o průměru 1,5mm<sup>2</sup>. Pokud tak nebude umožněno z důvodu jeho nedostatku v laboratořích, bude použita jiná varianta materiálu.

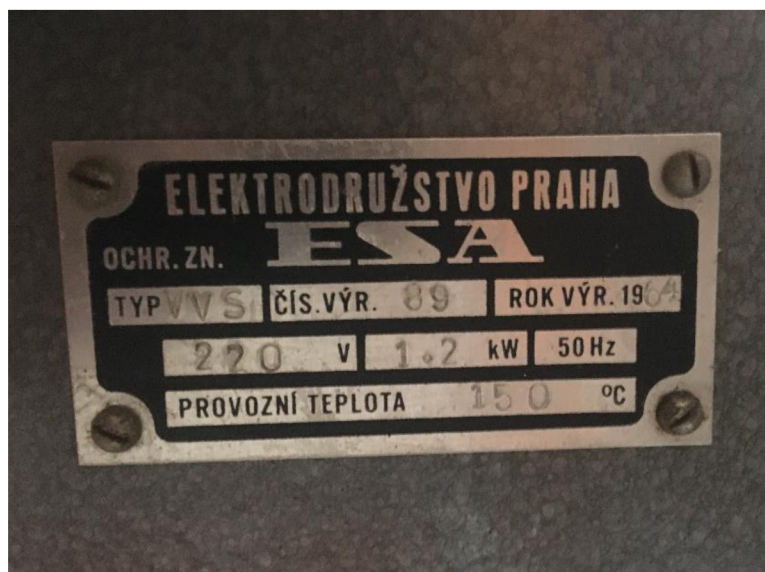
## 5. TERMICKÁ DEGRADACE

Tato kapitola obsahuje popis použitého teploměru a horkovzdušné pece, ve které probíhal samotný proces stárnutí. Poté obsahuje popis přípravy vzorků před termickou degradací a měření dielektrických parametrů u vzorků. Dále je zde uvedeno praktické provedení termické degradace podle výše uvedeného návrhu. V závěru kapitoly jsou zobrazeny tabulkové a grafické výsledky změn dielektrických parametrů vlivem degradace.

### 5.1 Použité přístroje

#### 5.1.1 Horkovzdušná pec použitá pro termickou degradaci

Pro termické stárnutí bude používána pec označení ESA od firmy Elektrodružstvo Praha. Tato pec nesplňuje požadavky pro použití jako horkovzdušná pec, jelikož není vybavena ventilátorem, který by vytvářel nucenou konvekci vzduchu. Přenos tepelné energie uvnitř pece bude prostřednictvím sálání. Napájecí napětí je 220 V o frekvenci 50 Hz. Příkon pece je 1,2 kW a provozní teplota se udává 150 °C. Na obrázku 5.1 jsou uvedeny štítkové hodnoty horkovzdušné pece.



Obrázek 5.1 Štítkové hodnoty pece

Pec je trubicového tvaru s uloženými topnými spirálami po obvodu. Topné spirály jsou zakryty keramikou. Do pece je možné položit plech pro následné položení měřených objektů. Ve výstupním otvoru pro odvod vzduchu na horní části je vložen tlakoměr pro měření tlaku uvnitř pece. Ze zadní strany pece je otvor pro regulaci odvodu vzduchu. Tento otvor byl využit pro přivedení termočlánku do pece. Pec lze vidět na obrázku 5.2.



Obrázek 5.2 Vnitřek horkovzdušné pece

Horkovzdušná pec je vybavena osmi polohovým regulátorem, díky kterému je možné docílit požadované teploty uvnitř pece. Tyto stupně natočení jsou uvedeny v tabulce 5.1.

Tabulka 5.1 Teploty při různých polohách regulátoru pece

Poloha regulátoru	Minimální teplota	Teplota při vypnutí pece	Maximální teplota dosažená po vypnutí	Rozdíl teplot
	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
1	44,5	65	71	26,5
2	59	82	90	31
3	88	95	105	17
4	105	122	130	25
5	130	131	138	8
6	138	157	160	22
7	160	163	167	7
8	167	182	186	19

### 5.1.2 Teploměr pro měření průběžné teploty

Teplota bude měřena dvanáctikanálovým teploměrem od firmy Lutron. Přístroj s označením BTM-4208SD je schopen měřit teploty od -100 °C od 1300 °C. Teploměr dokáže měřit teploty s přesností  $0,4 \% \pm 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$  a má nastavitelný interval, kdy zapisuje data, které poté dokáže ukládat společně s časovou značkou na SD kartu ve formátu CSV. Teploměr ve stavu měření lze vidět na obrázku 5.3.



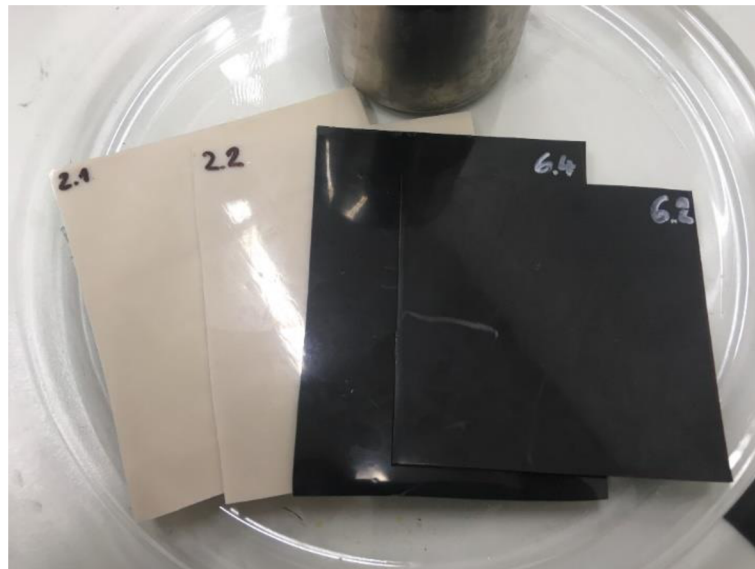
Obrázek 5.3 Teploměr Lutron



## 5.2 Příprava před termickou degradací

### 5.2.1 Příprava měřených vzorků

Pro přesné měření se používají normou stanovené vzorky, které mají přesné rozměry. Norma ČSN EN 60811-501 stanovuje měření 5 vzorků materiálů, bez jakýchkoliv známek mechanického poškození. Norma dále uvádí, že by bylo vhodné mít pro měření nachystaných vícero vzorků nebo zajistit rezervní část z původní dávky materiálu, ze které se dají případně tyto vzorky vyrobit. Více vzorků slouží pro případy komplikace nebo špatného změření. Na toto měření bylo nachystáno pro každý typ izolace více než 7 vzorků. Dále norma uvádí velikost měřeného vzorku 100 x 100 mm. Z důvodu použití menších měřících elektrod byly použity vzorky zhruba o velikosti 50 x 50 mm. K měření se používaly vzorky PVC typu PS9-609 ADBEB (Polanvil) černé barvy, což je plášťový vzorek a IS9-610 BDBE (Ongrovil) přírodní barvy, což je izolační vzorek. Každý měřený vzorek byl popsán daným číslem pro přehled. Výsledné vzorky lze vidět na obrázku 5.4. [32]



Obrázek 5.4 Vzorky připravené pro měření

### 5.2.2 Kondicionování vzorků

Před zahájením měření musely být vzorky podle normy ČSN EN ISO 291 uloženy ve standardním prostředí. Standardní prostředí pro měření mimo tropické země je dle normy uváděno při okolní teplotě 23 °C a relativní vlhkosti 50 %. Tyto hodnoty jsou udávány pro použití v nadmořských výškách s atmosférickým tlakem od 86 kPa do 106 kPa. Norma uvádí podle rozdělení do tříd maximální dovolené odchylky viz obrázek 5.5. [34]

Třída	Dovolená odchylka teploty °C	Dovolená odchylka relativní vlhkosti %	
		23/50	27/65
1	±1	±5	±5
2	±2	±10	±10

Obrázek 5.5 Třídy standartního prostředí s dovolenými odchylkami [32][34]

Pokud není prostředí, kde se vzorky nachází shodné se standartním prostředím, které udává norma je potřeba tyto vzorky kondicionovat. Kondicionování znamená uvedení vzorku do rovnovážného stavu ve vztahu k teplotě, vlhkosti a tlaku. Stav jednotlivých vzorků se nemění ihned po vložení do takového prostředí, ale v průběhu doby. Specifikovaná doba uložení vzorku v tomto prostředí se volí minimální, a to 88 hodin. Námí zvolené vzorky izolačních materiálů byly uloženy v nádobě, ve které byly po dobu 7 dnů při teplotě 19 °C a relativní vlhkosti 43 %. Tyto hodnoty nebylo možné zařídit, jelikož v místnosti, kde byly vzorky uloženy kolísala teplota. Na obrázku 5.6 lze vidět uložení vzorků v nádobě při kondicionování. Společně se vzorky je v nádobě uložen i teploměr vybavený funkcí měření vlhkosti.



Obrázek 5.6 Uložení vzorků v prostředí pro kondicionování

## 5.3 Praktické provedení termické degradace

### 5.3.1 Měření dielektrických parametrů před termickou degradací

Měření probíhalo u všech vzorků od obou typů materiálu izolace. Nejprve se pomocí mikrometru změřila tloušťka materiálů na pěti místech. Následně se vypočítala průměrná hodnota šířky pomocí vztahu pro aritmetický průměr. Příklad měření je uveden v rovnici (5.1).

$$d_{\emptyset} = \frac{1}{n} \cdot (d_1 + d_2 + d_3 + d_4 + d_5) = \frac{1}{5} \cdot (2,31 + 2,33 + 2,38 + 2,38 + 2,39 + 2,33) = 2,353 \text{ mm} , \quad (5.1)$$

kde  $d_{\emptyset}$  je průměrná šířka,  $d$  je šířka aktuálního měření,  $n$  je počet měření.

Po změření průměrné šířky se vzorky vložily mezi buňky Tettex 2914 s přtlakem  $4 \text{ N/cm}^2$ , přikryly se ochranným krytem a zahájilo se měření. Jako první byla do programu zadána vypočítaná průměrná tloušťka vzorku a bylo zapnuto vyhřívání vzorku na teplotu  $23^\circ\text{C}$ . Na vysokonapěťové elektrodě bylo nastaveno střídavé napětí na  $500 \text{ V}$  a zahájilo se měření. Program následně změřil a vypočítal ztrátový činitel, testovací kapacitu objektu, permitivitu, vlhkost, teplotu vzorku a okolí. Měření se opakovalo pro střídavé napětí  $1000 \text{ V}$ , aby se zjistilo, které parametry jsou ovlivněny změnou napětí. Všechny měření probíhaly při síťové frekvenci  $50 \text{ Hz}$ , okolní teplotě  $22,5 \pm 1^\circ\text{C}$  a relativní vlhkosti  $25 \pm 1\%$ . Na závěr byla při stejnosměrném napětí změřena rezistivita testovaného vzorku. Výsledky reprezentativního vzorku jsou uvedeny v tabulce 5.2. Změřené hodnoty ostatních vzorků jsou uvedeny v Příloha A -.

Tabulka 5.2 Změřené hodnoty před teplotní degradací u vzorků polanvil

Vzorek 6.2 – Polanvil (černý)				
Průměrná tloušťka vzorku	$U_{\text{rms}}$	$DF (\tan \delta)$	$\rho_v$	$\epsilon_r$
[mm]	[V]	[-]	[GΩm]	[-]
2,353	499,9	0,06006	70,91	6,101
2,353	999,7	0,0601	68,10	6,102

Z výsledků měření je patrné, že ztrátový činitel označený jako  $DF$ , kapacita testovaného objektu  $C_x$ , rezistivita a permitivita nepatrně změní své hodnoty při zkoušce při vyšším napětí. Tyto změny však nejsou dostačující ani u jednoho typu vzorků, aby bylo prováděno měření pro obě napětí, proto se v této práci budou dále používat pouze hodnoty změřené při napětí  $500 \text{ V}$ .

### 5.3.2 Průběh termické degradace

Před zahájením termické degradace byly vzorky v jednom místě provrtány pro následné uchycení v peci. Jednotlivé vzorky nebyly v peci umístěny podle prvotního návrhu, jelikož byl nedostatek tyčí pro uchycení a zároveň by nebyla dodržena minimální vzdálenost vzorků od sebe. Z tohoto důvodu byly na jedné tyči umístěny 2 vzorky vedle sebe v dostatečné vzdálenosti. Samotné tyče byly od sebe umístěny na vzdálenost tak, aby se rovnoměrně využil prostor v peci. Systém uložení lze vidět na obrázku 5.7.



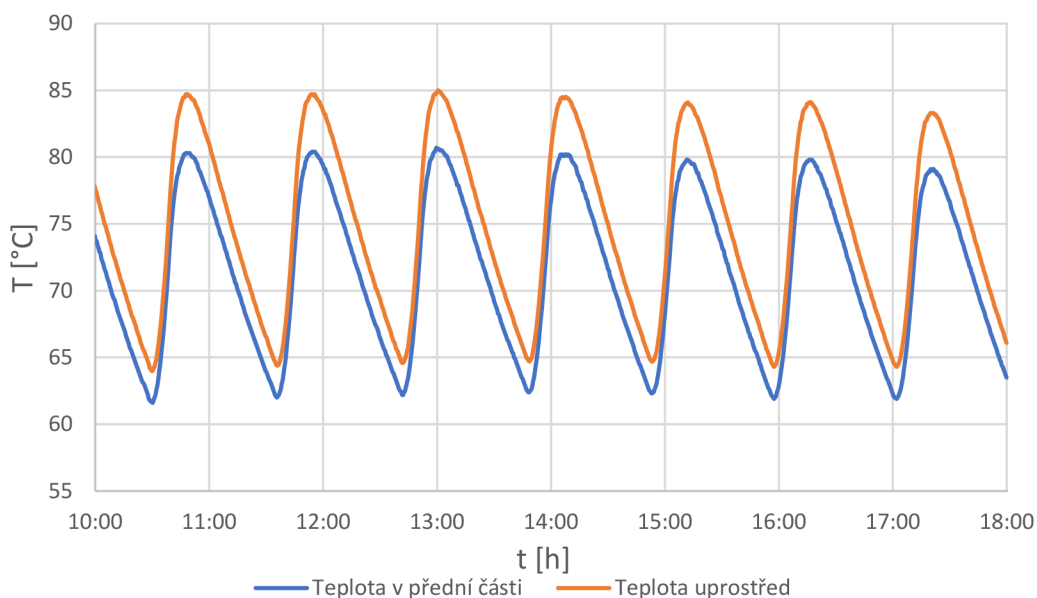
Obrázek 5.7 Zavěšení vzorků v peci

Jelikož bylo možno připojit na měřící teploměr více vstupů, byly do pece vloženy 2 termočlánky, z toho jeden byl umístěny podle návrhu uprostřed pece mezi vzorky a druhý v přední části pece u náhledového okna. Přidání druhého termočlánku mělo sloužit k porovnání rozdílů teplot uvnitř pece.

Poté následovala teplotní degradace po dobu 7x24 hodin při průměrné teplotě 70 °C. Rozmezí teplot 80±2 °C uvnitř pece, jež bylo stanoveno v návrhu, nebylo dosaženo, jelikož pec nedokázala tuto teplotu udržovat.

Z přečtených hodnot z teploměru se ukázalo, že v obou místech byla rozdílná teplota, a to až o 6 °C. Tento rozdíl byl způsobený tím, že nebyla v peci zajištěna nucená cirkulace vzduchu podle normy pro práci s horkovzdušnou pecí. Lze tedy říct, že byl každý vzorek vystaven rozdílné teplotě, při které degradoval, a proto se mohly výsledky degradace u jednotlivých vzorků lišit.

Na obrázku 5.8 lze vidět graf s průběhy obou teplot v peci. Teplota nebyla stálá, ale docházelo k téměř sinusovému průběhu. Střední hodnota po celou dobu měření byla 73,5 °C uprostřed pece a 70 °C v přední části. Rozptyl v 8hodinovém intervalu vycházel uprostřed pece 53,6 °C a v přední části 35 °C. Nejvyšší zaznamenaná teplota v peci byla 86,8 °C.



Obrázek 5.8 Rozdíl teplot uvnitř pece

Po dokončení této degradace byly podle normy ČSN EN 60811-401 vzorky vystaveny pokojové teplotě bez slunečního záření. V další fázi proběhlo opětovné změření tloušťky vzorků, zda nedošlo k její změně a následně byly znovu změřeny dielektrické vlastnosti. Po tomto změření byly první 3 vzorky od obou typů materiálů opět vloženy do horkovzdušné pece, kde probíhala další termická degradace. Zbylé vzorky byly ponechány pro zkoušky mechanické a elektrické pevnosti. Po ukončení procesu stárnutí byly vzorky opět vystaveny výše uvedeným podmínkám a následovalo poslední změření dielektrických parametrů.

### 5.3.3 Měření dielektrických parametrů po termické degradaci

Měření parametrů probíhalo opět při střídavém napětí 500 V, frekvenci 50 Hz a relativní vlhkosti 25 %. Tyto výsledky jsou v tabulce 5.3 a 5.4, kde jsou uvedeny data reprezentativních vzorků. Další změřené data jsou uvedena v Příloha A -. Hodnoty při 336 hodinách stárnutí jsou vypočítané pomocí mediánu pouze ze 3 měřených vzorků, proto mohou být některé hodnoty ovlivněny malým počtem vzorků.

Tabulka 5.3 Změřené hodnoty po degradaci u vzorku polanvil

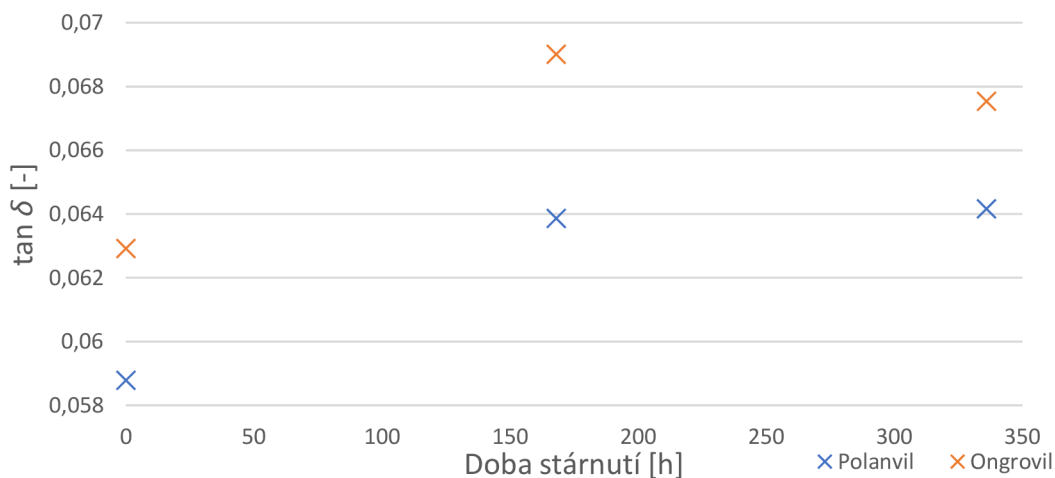
Vzorek 6.2 - Polanvil (černý)			
Doba stárnutí	$DF (\tan \delta)$	$\rho_v$	$\varepsilon_r$
[h]	[-]	[G $\Omega$ m]	[-]
0	0,06006	70,91	6,101
168	0,06522	59,75	6,204
336	0,06429	44,22	6,205

Tabulka 5.4 Změřené hodnoty po degradaci u vzorku ongrovil

Vzorek 2.3 – Ongrovil (přírodní)			
Doba stárnutí	$DF (\tan \delta)$	$\rho_v$	$\varepsilon_r$
[h]	[-]	[G $\Omega$ m]	[-]
0	0,06292	123,66	5,702
168	0,06787	125,55	5,692
336	0,06753	109,7	6,088

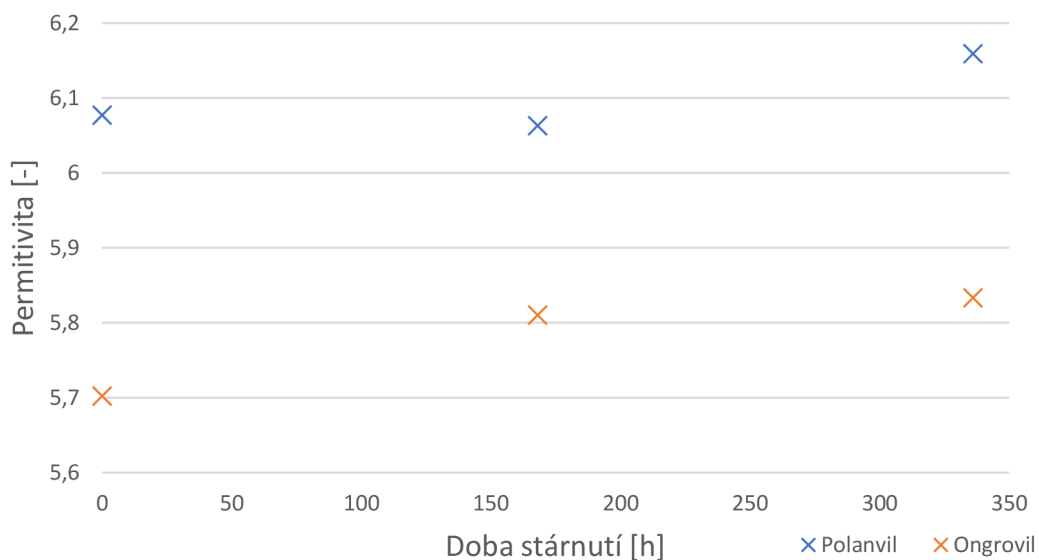
### 5.3.4 Grafické výsledky termické degradace

Pro grafické zpracování byly použity data ze všech vzorků. Tyto data jsou uvedené v Příloha A -. Pro správné vypracování grafů se použil pro výsledky medián místo aritmetického průměru. Ten byl použit z důvodu předejití ovlivnění výsledku špatnými vzorky. Medián se počítal z pěti hodnot před první degradací a z pěti hodnot po první degradaci. Pro poslední degradaci se medián použil pouze pro 3 výsledky. Z uvedených tabulek a grafů je patrné, že se vlivem termické degradaci parametry změnily.



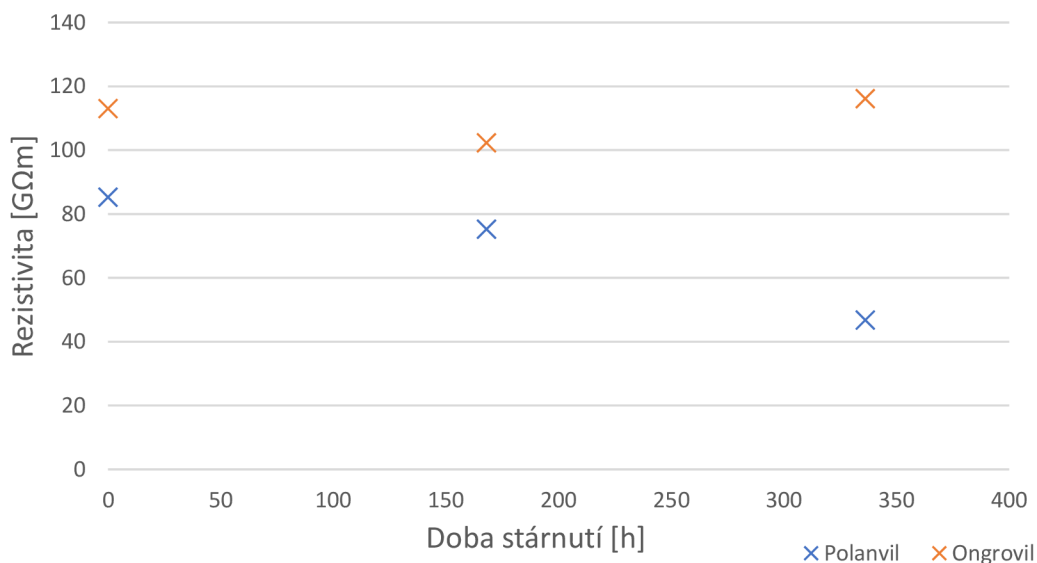
Obrázek 5.9 Změna ztrátového činitele vlivem degradace

U obou typů izolačních materiálů se ztrátový činitel po 168 h degradace zvýšil. Dalších 168 h degradace už neměla tak velký vliv a jeho hodnota se téměř nezměnila. Ztrátový činitel je závislý na frekvenci, proto byla při zkouškách použita pouze jedna hodnota frekvence. U této hodnoty je možné říct, že se kvalita izolace zhoršila.



Obrázek 5.10 Změna permitivity vlivem degradace

Relativní permitivita u obou typů vzorků vzrostla s dobou degradace. U vzorku polanvil při 168 h degradace relativní permitivita poklesla, což může být způsobeno chybou měření nebo ovlivnění vícero špatnými vzorky.



Obrázek 5.11 Změna rezistivity vlivem degradace

Mezi nejvíce pozorovatelnou změnu patří pokles rezistivity u vzorku polanvil, která nejvíc vypovídá o zhoršení materiálu. U vzorku ongrovil došlo po 366 h degradace k nárůstu rezistivity u všech zkoušených vzorků, což může být způsobeno chybou měření nebo nedostatečným počtem změřených vzorků. Výsledné grafy nejsou propojeny křivkou, jelikož nebylo dosaženo tolika měření, aby se dalo tvrdit, že takto přesně probíhaly změny vlastností.

Z grafů si lze všimnout, že mají oba typy vzorků jiné počáteční dielektrické vlastnosti a jiný průběh při degradaci.



## 6. ELEKTRICKÁ PEVNOST

Tato kapitola obsahuje teoretický popis zkoušek elektrické pevnosti, jež jsou stanovené normou a následně praktické provedení těchto zkoušek v laboratořích VVN. V závěru jsou uvedené grafické výsledky vzorků před a po degradaci.

### 6.1 Zkoušky elektrické pevnosti

Elektrická pevnost je z hlediska bezpečnosti a spolehlivosti elektrického zařízení důležitý parametr. Zamezuje vzniku průrazu elektrickým napětím. Některé materiály s vysokou elektrickou pevností nemusí dobře odolávat dlouhodobým degradačním procesům, jako jsou teplo, chemické znehodnocování kvůli častým výbojům a další. Podle normy ČSN EN 60243-1 je potřeba znát před zahájením zkoušky tyto základní parametry:

- frekvence
- tvar vlny a rychlost nárůstu nebo čas aplikovaného napětí
- okolní teplota, tlak a vlhkost
- rozměry a tepelná vodivost zkušebních elektrod
- elektrické a tepelné charakteristiky okolního média (vzduch, olej)

Norma uvádí faktory, které ovlivňují výsledky měření elektrické pevnosti:

- tloušťka
- homogenita vzorku
- přítomnost mechanického pnutí
- předchozí aklimatizace vzorků
- přítomnost plynových inkluzí, vlhkosti a nečistot

Pro měření se používá více zkušebních metod, přičemž jejich výsledky nejsou přímo porovnatelné, ale dostačující, aby vypověděly informace o elektrické pevnosti. Ta se u většiny materiálů snižuje se vzrůstající tloušťkou vzorku a vzrůstajícím časem aplikovaného napětí. [40]

#### 6.1.1 Zkušební vzorky

Při zkoušce kolmo na povrch musí být vzorky dostatečně velké, aby byl zajištěn dobrý kontakt s elektrodami. V opačném případě by mohlo dojít k přeskoku. Povrch materiálu musí být co nejvíce hladký, rovný a rovnoběžně uložený s elektrodami.

Izolační materiály jsou z hlediska elektrické pevnosti závislé na teplotě a vlhkosti. Proto musí být podle normy IEC 60212 vzorky aklimatizovány 24 h před zahájením zkoušky při teplotě  $23 \pm 2$  °C a vlhkosti  $50 \pm 2$  %.

Vzdálenost mezi elektrodami se určí jako jmenovitá tloušťka nebo jako průměrná tloušťka zkušebního vzorku.

Norma ČSN EN 6043-1 ed.2 uvádí pět zkoušek. Pro určení elektrické pevnosti je potřeba znát medián. Pokud se naměřená hodnota liší více než o 15 % od mediánu musí se zkouška opakovat opět s pěti vzorky. Poté se počítá medián z deseti vzorků. [40]

### **6.1.2 Typy zkušebních elektrod**

Z hlediska zkoušek elektrické pevnosti je zapotřebí použít určitý typ zkušebních elektrod. Podle normy je potřeba elektrody udržovat hladké, čisté a bez závad, jelikož by mohlo dojít například k poškození samotných elektrod. Přívodní vodiče k elektrodám nesmí nijak působit na elektrody, například v podobě zvýšeného tlaku na zkoušený materiál. [40]

#### **Nestejně elektrody**

Jedná se o dvě sousední elektrody vyrobeny z kovu ve tvaru válce se zaoblenými okraji a umístěnými ve vzdálenosti 2 mm, přičemž má první elektroda průměr i výšku 25 mm a druhá elektroda má průměr  $75 \pm 1$  mm a výšku  $15 \pm 1$  mm. Tento typ se používá pro zkoušené objekty do 3 mm. [40]

#### **Elektrody stejného průměru**

Tento typ elektrod je možné použít pouze pokud je zajištěno, že jsou obě elektrody zarovnané s přesností na 1 mm a zároveň jsou průměry elektrod stejné a to  $25 \pm 1$  mm s přesností na 0,2mm. [40]

#### **Kulové a deskové elektrody**

Vrchní elektroda je ve tvaru koule o průměru 20 mm a spodní elektroda je tvaru desky o průměru  $25 \pm 1$  mm se zaoblenými okraji o poloměru 2,5 mm. [40]

### **6.1.3 Typy okolního prostředí**

Okolní médium se volí tak, aby se co nejvíce v průběhu zkoušky zabránilo přeskokům, ale zároveň by nemělo jakkoli působit na zkušební materiál nebo jej poškodit. Velký vliv má okolní médium v případě nasákavých vzorků, proto je potřeba upravit pracovní postup pro takovou zkoušku.

Jako okolní prostředí se používá vzduch, transformátorový olej, silikonová a esterová kapalina nebo zalévací hmota. Všechny tyto typy je potřeba použít podle normy uzpůsobenou pro práci s nimi.

Před zkouškou je potřeba zajistit dostatečné ohřátí elektrod a samotného vzorku na požadovanou teplotu. Ovšem některé materiály při vystavení vysoké teplotě po delší dobu mění své vlastnosti. S rostoucí teplotou klesá elektrická pevnost.

Elektrická pevnost dále závisí na mechanickém zatížení, jelikož při něm vznikají vnitřní trhliny. Ty projevují nejmenší odporovou cestu, tudíž přes ně může snadněji procházet elektrický proud. [40]

### **Zkoušky ve vzduchu při zvýšené teplotě**

Tyto zkoušky se provádí ve vhodné sušárně nebo horkovzdušné peci, do které je možné umístit elektrody se zkušebním vzorkem. Horkovzdušná pec musí mít zajištěnou cirkulaci vzduchu, aby nedocházelo k velkým teplotním změnám v okolí vzorku. Změna teploty nesmí být více než  $\pm 2$  K od nastavené teploty. Pro změření teploty je potřeba dovnitř pece umístit teploměr nebo termočlánek. [40]

### **Zkoušky v kapalinách**

Při zkoušce v izolační kapalině, je nutné zajistit dostatečnou elektrickou pevnost kapaliny, aby nedocházelo k přeskokům. U vzorků s relativní permitivitou vyšší, než transformátorový olej umístěnými v jiné kapalině může vycházet větší dielektrická pevnost než u vzorek zkoušeném v transformátorovém oleji. Jakékoliv znečištění kapaliny může snížit jeho elektrickou pevnost nebo naopak zvýšit změřenou elektrickou pevnost vzorku.

Zkouška se provádí ve speciální lázni nebo kontejneru naplněnou izolační kapalinou, ve kterém je umístěn termostat pro regulaci teploty. Samotná kapalina slouží k přenosu tepla. Stejně jako u zkoušky v kapalinách je potřeba zajistit cirkulaci kapaliny, aby byla teplota v okolí vzorku v rozmezí  $\pm 2$  K od nastavené teploty. [40]

### **Zkoušky v pevných materiálech**

Při této zkoušce se používá zalévací hmota, která dokáže ztvrdnout při pokojové teplotě a jeho permitivita se blíží ke zkoušenému vzorku. Při zalévání nesmí vznikat dutiny mezi elektrodou a zkoušeným vzorkem. Zalévací hmota musí mít zajištěnou dostatečnou přilnavost na elektrody a vzorek. [40]

#### **6.1.4 Napájecí napětí a jeho zdroj**

Napětí potřebné pro zhotovení zkoušky se získává z VN transformátoru napájeného proměnlivým sinusovým napětím z nízkonapěťového zdroje. U transformátoru musí být zajištěny určité parametry.

Poměr mezi efektivní a maximální hodnotou zkušebního napětí musí být  $\sqrt{2} \pm 5\%$  pro všechna napětí. Aby byly zajištěny tyto požadavky až do průrazného napětí musí být zvolen dostatečný výkon zdroje. Pro většinu zkoušek se příkon pohybuje v rozmezí od 0,5 kVA pro vzorky s nízkou kapacitou při napětí do 10 kV až do 5 kVA pro napětí do 100 kV.

Na nízkonapěťové straně transformátoru musí být zajištěna pomocí regulace jemná změna napětí bez překmitů. U průrazného napětí nesmí požadovaná hodnota překročit 2 %.

Pokud dojde k průrazu zkoušeného materiálu, musí dojít k odpojení od napájení v několika málo periodách napětí, aby se předešlo poškození. Pro zajištění této podmínky je napájecí zdroj vybaven odpojovacím zařízením. To se skládá z proudového snímače na

vysokonapěťové straně. Pro zmenšení účinku rázové vlny proudu se k elektrodám do série připojuje ochranný rezistor. Při použití vyšší hodnoty odporu bude potřeba vyšší napětí k dosažení elektrického průrazu.

Napájecí napětí se uvádí v efektivních hodnotách. Norma doporučuje použít voltmetr pro měření maximální hodnoty napětí a tuto hodnotu přepočítat na efektivní hodnotu, a to vydělením  $\sqrt{2}$ . Voltmetr se připojí do obvodu přímo, pomocí děliče napětí nebo přes převodní transformátor. Dále je potřeba, aby tento voltmetr uložil nejvyšší hodnotu napětí, při které došlo k průrazu. Celková chyba voltmetru nesmí překročit 5% měřené hodnoty. [40]

### **6.1.5 Způsoby zkoušek**

#### **Krátkodobá zkouška**

Při této zkoušce se napájecí napětí zvyšuje rovnoměrně od nuly až po napětí, kdy nastane průraz. Napětí se zvyšuje tak, aby došlo k průrazu mezi 10 až 20 s. Rychlosti navyšování zkušebního napětí se volí 100 V/s, 200 V/s, 500 V/s, 1000 V/s, 2000 V/s, 5000 V/s a další. Jiné rychlosti nárůstu napětí se mohou použít, pokud splňují časové kritérium průrazu. [40]

#### **Zkouška s pomalým náběhem napětí**

Na začátku měření se začíná na 40 % napětí pravděpodobného krátkodobého průrazu. Pokud není tato hodnota napětí známá, musí se zjistit pomocí metody krátkodobé zkoušky. Zvyšování se provádí tak, aby nastal průraz mezi 120 s až 240 s. Některé materiály mají větší elektrickou pevnost, a proto může nastat průraz mimo tento čas. V tomto případě je dostačující, pokud většina průrazu na daném materiálu nastane v zadaném rozmezí. Rychlost navyšování napětí začíná už od menších hodnot, a to 2 V/s, 5 V/s, 10 V/s, 20 V/s, 50 V/s, 100 V/s a další. [40]

#### **Zkouška se stupňovitým zvyšováním napětí s 20ti vteřinovými stupni**

Měření začíná na 40 % napětí pravděpodobného krátkodobého průrazu. Pokud měřený vzorek tuto hodnotu napětí vydrží po dobu 20 s začne se napětí krokově zvyšovat o přírůstky napětí podle tabulky uvedené v normě ČSN EN 60243-1 ed.2. Jednotlivé přírůstky se ponechají opět 20 s. Průraz vzorku nesmí nastat dříve než za 120 s zkoušky. Zvýšení napětí musí být zajištěno v co nejrychlejším čase a zahrnuje se do 20 s dalšího stupně napětí. Pokud nastane průraz do 120 s od začátku zkoušky, je potřeba při dalším měření zmenšit počáteční hodnotu napětí. Elektrická pevnost materiálu se určuje z nejvyšší hodnoty napětí, kterou vzorek zvládnul po 20 s. [40]

### **6.1.6 Elektrický průraz**

V momentě, kdy nastane průraz zkoušeným materiálem, dojde k nárůstu elektrického proudu a v závislosti na to poklesne napětí. Větší hodnota proudu může způsobit vypnutí jističe nebo poruchu. Vypnutí jističe může způsobit i samotný přeskok v médiu, nabíjení vzorků a další. Z tohoto důvodu je potřeba jistič správně navrhnout, aby vypnul až ve správný okamžik, to je po průrazu vzorku. Pokud nastane předčasný průraz v médiu je potřeba tento údaj uvést ve výsledku. [40]

### **6.1.7 Postup měření**

Před zahájením zkoušky je potřeba znát všechny informace o vzorku, zkoušce a předepsané normě ČSN EN 60243-1 ed.2. Postup pro zhotovení zkoušky je následující: [40]

- Zajištění zkušebního vzorku
- Nachystání pěti zkušebních vzorků
- Změření tloušťky vzorku
- Aklimatizace před zkouškou
- Měřit teplotu při zkoušce
- Vybrat okolní médium a zajistit o něm dostatek informací
- Vybrat typ elektrod
- Vybrat způsob náběhu napětí a jeho kmitočet
- Indikovat druh a místo průrazu
- Zaznamenat výsledky elektrické pevnosti materiálu případně průrazné napětí

## 6.2 Praktické měření elektrické pevnosti

### 6.2.1 Příprava před zkouškou

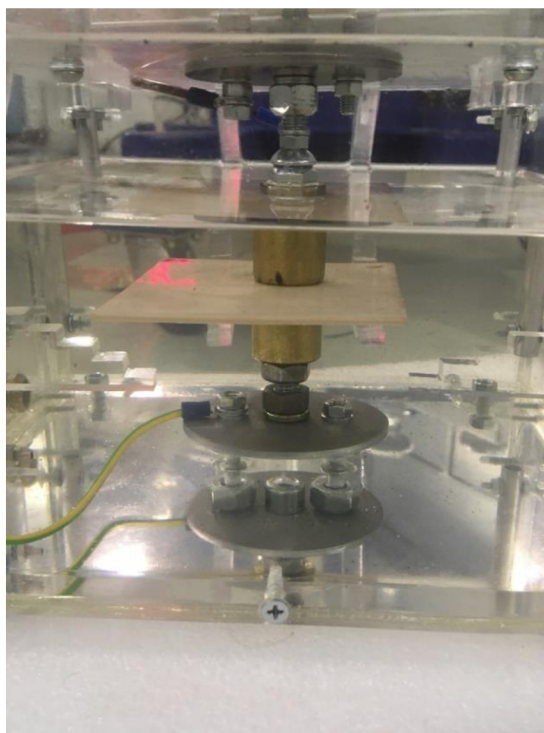
Zkoušky elektrické pevnosti probíhaly podle postupu uvedeného v normě ČSN EN 60243-1 ed.2 v laboratořích VVN za přítomnosti vedoucího bakalářské práce. Norma stanovuje pět zkoušek jako minimální počet, proto bylo před zahájením zkoušky připraveno dohromady 20 vzorků, z toho bylo 10 vzorků typu ongrovil a 10 vzorků typu polanvil. Z obou těchto 10ti vzorků bylo právě 5 bez termické degradace a 5 po termické degradaci. Tři z pěti degradovaných vzorků byly vystaveny teplotnímu stárnutí o 168 h déle. Takto připravené vzorky lze vidět na obrázku 6.1. Všechny vzorky byly před zahájením zkoušek podle normy IEC 60212 aklimatizovány po dobu 24 h při teplotě  $23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  a vlhkosti  $50 \pm 2 \%$  a před začátkem zkoušky byla u všech změřena tloušťka.



Obrázek 6.1 Zkušební vzorky bez (vlevo) a po (vpravo) degradaci

### 6.2.2 Zhotovení elektrických průrazů

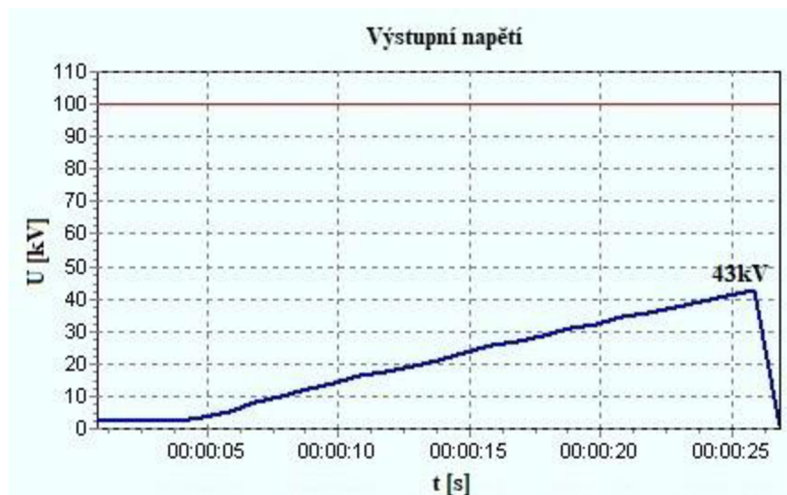
Podle normy ČSN EN 60243-1 ed.2 byly zvoleny válcové elektrody stejného průměru umístěné uvnitř nádoby ve tvaru krychle, ve které zkouška probíhala. Jako okolní médium se zvolil 100 % čistý silikonový olej s dielektrickými, separačními a vodoodpudivými účinky. Do takto připravené silikonové lázně se mezi elektrody vložily testované vzorky. Ty musely být dostatečně přitlačené a vycentrované na středu, aby se zamezilo přeskokům v okolním médiu. Umístění v silikonové lázni lze vidět na obrázku 6.2.



Obrázek 6.2 Testovaný vzorek umístěný mezi elektrodami v silikonové lázni

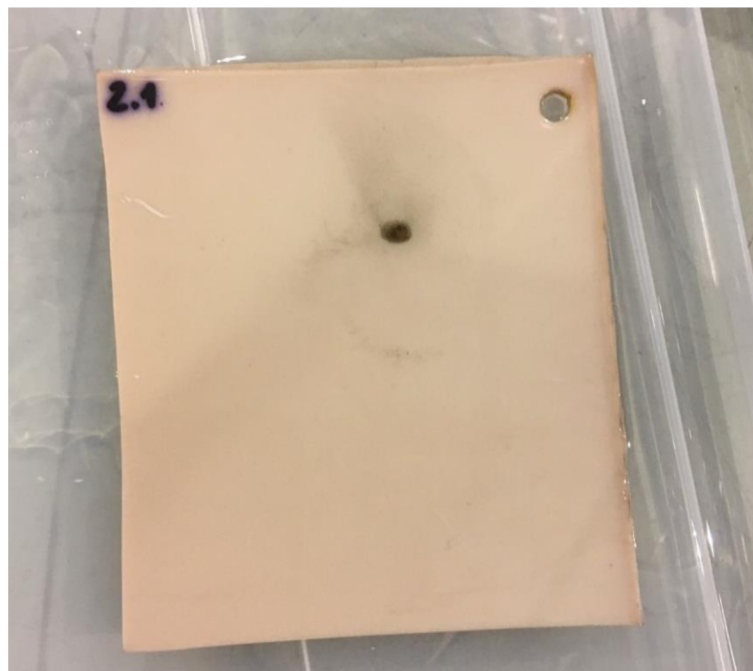
Napájení elektrod bylo zajištěno ze zdroje bez automatické kompenzace s možným napájením až do 300 kV a s nastaveným maximálním výstupním proudem 450 mA. Zdroj je vybaven automatickým odpináním napětí při vzniku průrazu. Při tomto odpojení dokázal zaznamenat poslední nejvyšší hodnotu napětí.

Pro zjištění elektrické pevnosti byla zvolena podle normy ČSN EN 6043-1 ed.2 krátkodobá zkouška, která představuje nárůst napětí od nuly až po hodnotu napětí, při které nastal průraz. Norma dále uvádí zvyšování napětí tak, aby došlo k průrazu mezi 10 s až 20 s, což bylo téměř u všech vzorků splněno. Doba náběhu napětí byla zaznamenávána přístrojem, který následně vytvořil grafy. Názorný graf pro jeden změřený vzorek je zobrazen v obrázku 6.3.



Obrázek 6.3 Průběh napětí při krátkodobé zkoušce

Na obrázku 6.4 lze vidět, že roste napětí zdroje a v momentě, kdy nastane průraz, začne mezi elektrodami přes zkušební vzorek téct elektrický proud a napětí rapidně poklesne. V tento okamžik odpíná zdroj napájecí napětí. U všech provedených zkoušek nastal průraz přes vzorky, nikoliv v okolním médiu. Průraz udělal ve vzorcích otvor o velikosti menší než 1 mm a v jeho okolí byl materiál opálený. Vzorek po elektrickém průrazu lze vidět na obrázku 6.4.

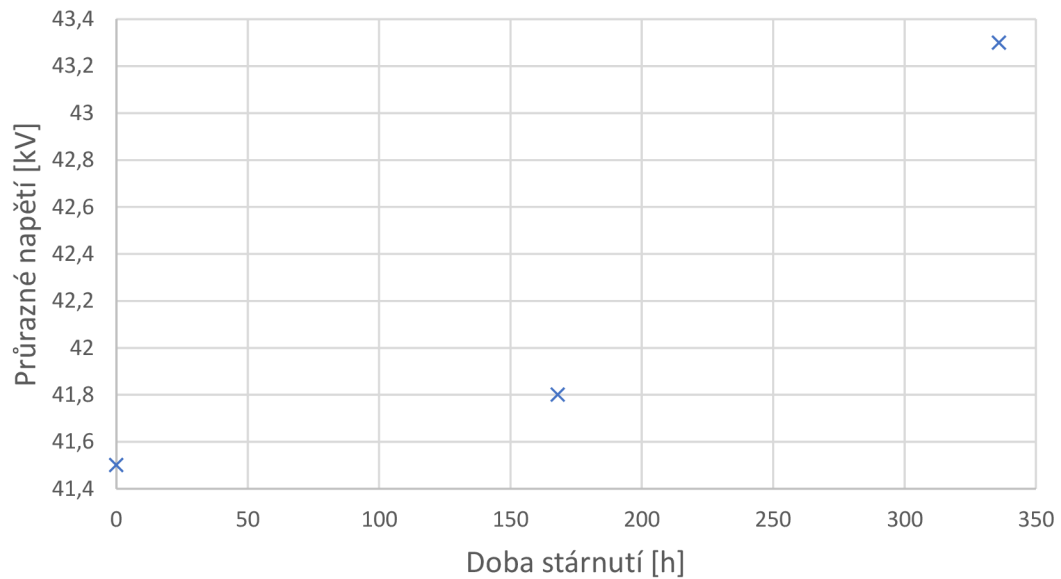


Obrázek 6.4 Vzorek po elektrickém průrazu

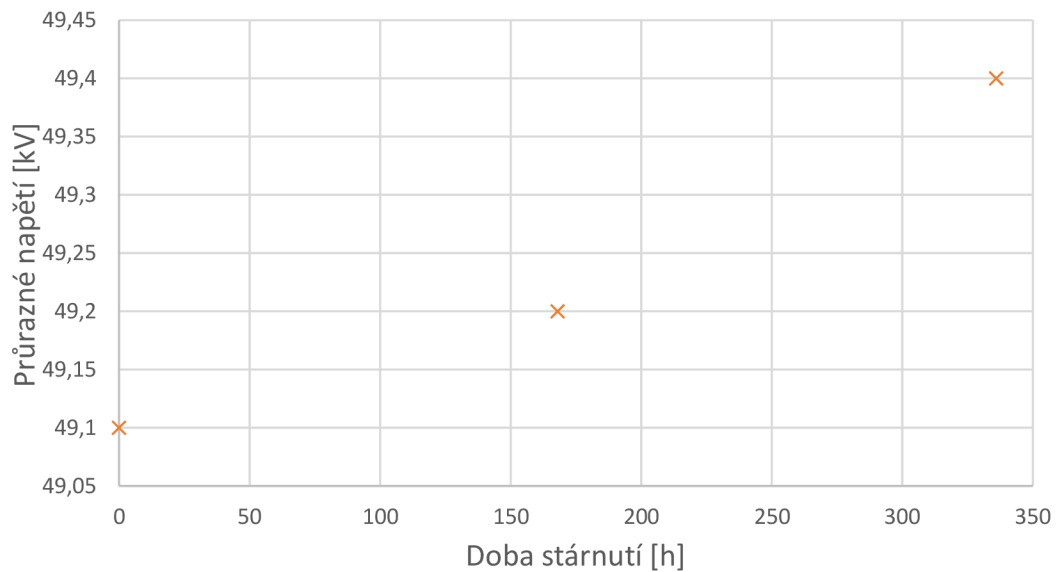


### 6.3 Výsledky elektrických zkoušek

Všechny změřené hodnoty, při kterých nastal elektrický průraz, byly zapsány do tabulek (viz Příloha B -) a podle normy byl z těchto hodnot vypočítán medián ze všech vzorků dané degradace, viz příloha 0 a B.8. Hodnoty všech průrazů byly v toleranci 15 % od mediánu, tudíž nebyla potřeba opakovat měření. Na obrázku 6.5 a 6.6 jsou zobrazeny grafy průrazného napětí v závislosti na termické degradaci pro oba typy vzorků.

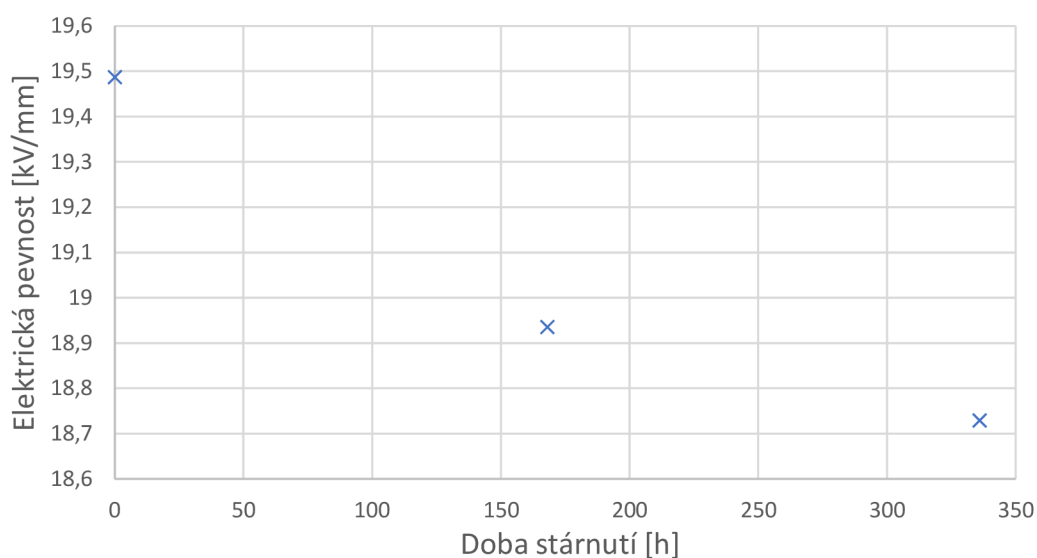


Obrázek 6.5 Graf průrazného napětí v závislosti na době stárnutí u vzorku polanvil

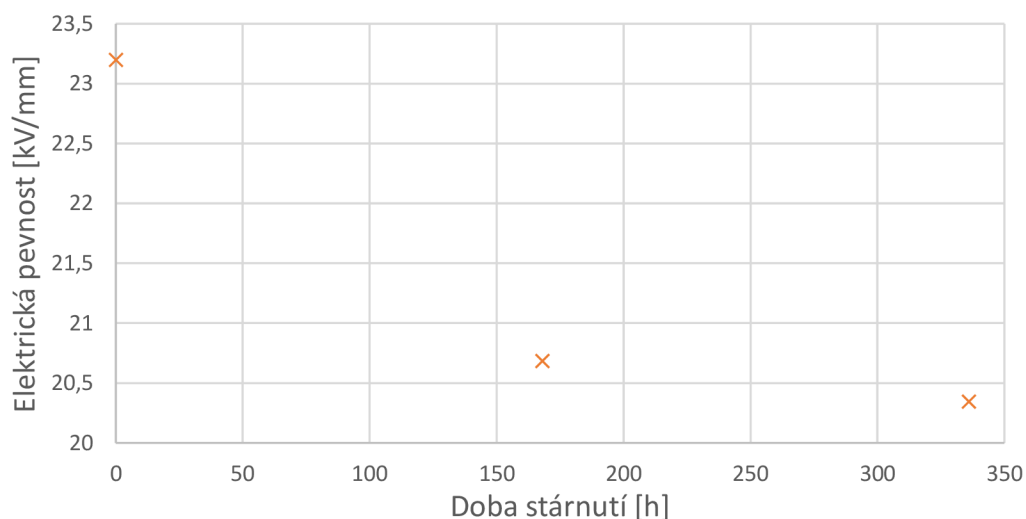


Obrázek 6.6 Graf průrazného napětí v závislosti na době stárnutí u vzorku ongrovil

Z grafů je patrné, že u vzorků po termické degradaci nastal elektrický průraz při vyšších hodnotách, což mohlo být způsobeno odlišnou tloušťkou testovaných vzorků. Z tohoto důvodu se u všech vzorků vydělilo průrazné napětí jejich průměrnou tloušťkou, jež byla změřena před začátkem měření. Touto úpravou se získá hodnota elektrického napětí na milimetr vzorku, což vyjadřuje elektrickou pevnost materiálu. Z hodnot elektrických pevností se opět vypočítaly mediány a následně byly vytvořeny nové grafy, které zobrazují průběh elektrické pevnosti v závislosti na době degradace, viz obrázek 6.7 a 6.8.



Obrázek 6.7 Graf elektrické pevnost v závislosti na době stárnutí u vzorku polanvil



Obrázek 6.8 Graf elektrické pevnost v závislosti na době stárnutí u vzorku ongrovil

Z výše uvedených grafů lze vyčíst, že se elektrická pevnost u zdegradovaných vzorků snížila, což značí zhoršení dielektrických vlastností materiálů.

Při měření je potřeba brát v potaz to, že pokud nastane průraz u materiálu a změřenou hodnotu elektrického napětí přepočítáme na elektrickou pevnost (např. napětí na 1 milimetr vzorku), nebude tato hodnota stejná jako kdyby byly změřena elektrická pevnost přímo 1 milimetru vzorku. Toto je způsobeno odlišným působením elektrického pole na širší materiál. Výsledné grafy nejsou opět propojeny křivkou kvůli nedostatečnému počtu měření.

## 7. MECHANICKÁ PEVNOST V TAHU

### 7.1 Mechanické zkoušky v tahu

Tyto zkoušky slouží pro stanovení pevnosti v tahu u izolačních materiálů, které jsou po teplotní degradaci. Norma ČSN EN 60811-501 stanovuje odebrání vzorků z materiálu z míst, které spolu sousedí. Mechanická zkouška u vzorků po teplotním stárnutí musí následovat po zkoušce vzorků bez teplotního stárnutí. [32]

#### 7.1.1 Zkušební vzorky

Pro přípravu vzorků je potřeba zajistit jeden dostatečně velký vzorek, aby bylo možno z něj vytvořit 5 zkušebních tělísek pro zkoušku v tahu. Zkušební tělíska musí být odebrána ze vzorků před a po teplotním stárnutí, přičemž musí mít délku aspoň 100 mm. [32]

#### Temperování vzorků

První způsob je temperování za zvýšené teploty, který se použije pouze pokud to stanovuje norma pro daný typ kabelu nebo pokud jsou pochybnosti o výsledcích. Další způsob je temperování při teplotě místnosti, kdy jsou všechny zkušební vzorky chráněny před slunečním zářením a udržují se nejméně 3 h při teplotě  $23 \pm 3$  °C. [32]

#### Tvorba vzorků

Pro zkoušky se nejběžněji používají vzorky ve tvaru lopatky. Tyto lopatky jsou vyseknuty z připraveného proužku izolace. Pokud je to možné, je potřeba vyseknout lopatky vedle sebe. Pro spolehlivé vyseknutí vzorků je potřeba použít raznici a na spodní části podložka. Raznice musí být dostatečně ostrá, aby nedošlo k poškození zkušebního vzorku. Dále by měl být na podložce obrys raznice, což značí důkaz kvalitně vyseknutého vzorku.

Při zkušebních vzorcích ve tvaru lopatky je průřez vypočítán pomocí společné šířky a minimální tloušťky vzorku. Společná šířka se vypočítá jako nejmenší šířka ze tří náhodně vypočítaných vzorků. Tloušťka se vypočítá jako nejmenší hodnota na střední části lopatky ze tří náhodně měřených vzorků. [32]

#### 7.1.2 Postup zkoušky

Zkouška musí probíhat při teplotě  $25 \pm 5$  °C. Pro zkoušku je potřeba nastavit vzdálenost čelistí a rychlost prodlužování. Vzdálenost čelistí je odlišná podle typu vyražené lopatky. Pro menší lopatky je určená vzdálenost 34 mm. Rychlost prodlužování se liší pro různé materiály. Obecně se uvádí rychlost  $250 \pm 5$  mm/min, ale pro vzorky vytvořené z PE nebo PP je  $25 \pm 5$  mm/min.

V průběhu zkoušky se zaznamenává největší síla v tahu a vzdálenost referenčních značek, pro výpočet prodloužení. Vzorky poškozené uchopením čelisti se vyloučí, ale musí být zajištěny minimálně čtyři platné výsledky. [32]

## 7.2 Praktické provedení mechanických zkoušek

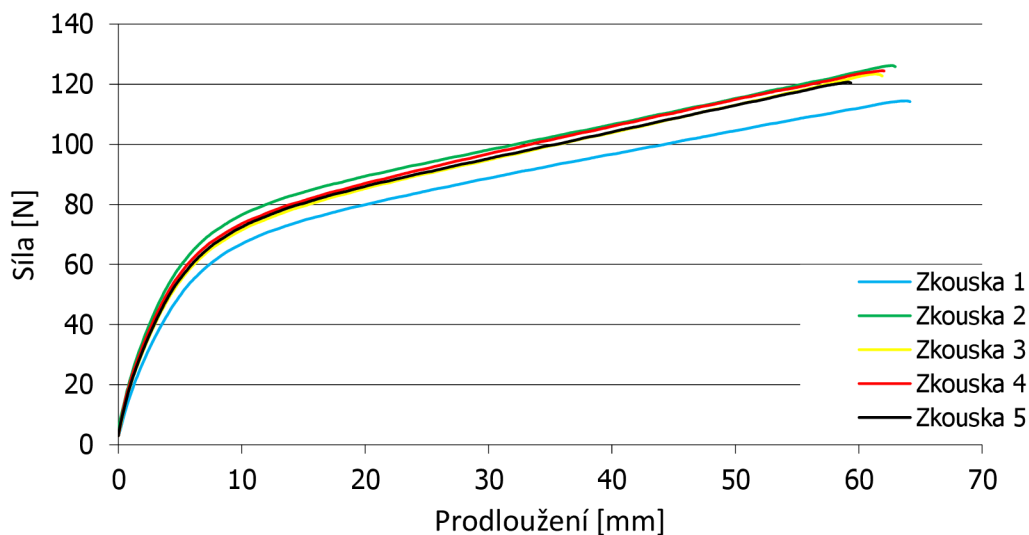
Mechanické zkoušky v tahu probíhaly v kabelovně NKT s. r. o. ve Velkém Meziříčí. Před zahájením zkoušky byly vzorky temperovány podle výše stanovené normy ČSN EN 60811-501. Zkoušky probíhaly na vzorcích bez degradace a vzorcích po 168 h a 336 h degradace. Od každého typu vzorku bylo vyraženo 5 zkušebních lopatek s délkou 20 mm a šířkou ve středu 4,12 mm (viz obrázek 7.1). Dále byla u všech vzorků změřena jejich tloušťka pro následný výpočet prodloužení. Rychlost prodlužování byla nastavena podle normy na 250 mm/min.



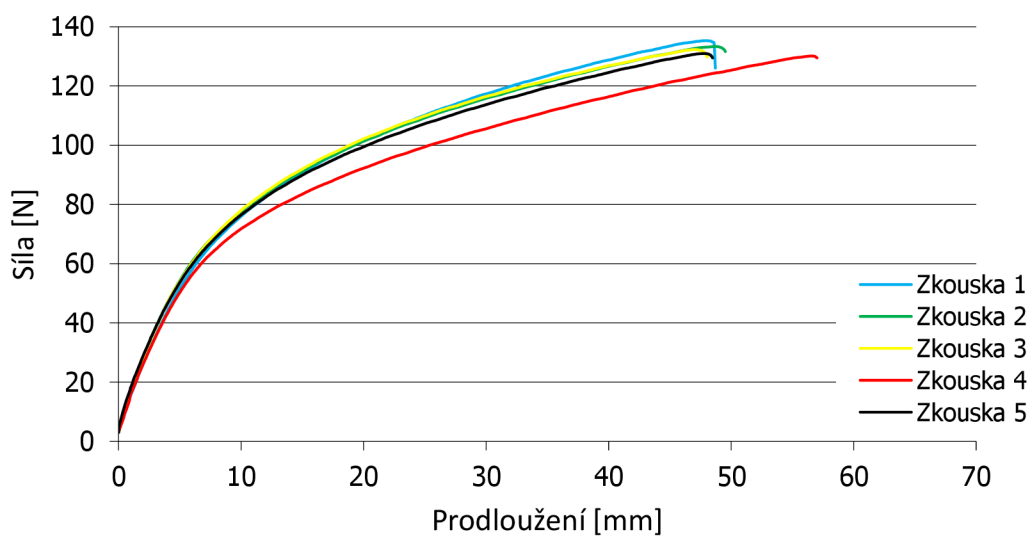
Obrázek 7.1 Vyražený zkušební vzorek ve tvaru lopatky

### 7.3 Výsledky mechanických zkoušek v tahu

Hodnoty dosažených sil a prodloužení byly zapisovány do tabulek, viz Příloha C -. Následně z nich byly vytvořeny grafy, které vyjadřují prodloužení lopatky v závislosti na působící síle. Názorné grafy prodloužení vzorků polanvil před a po 336 h degradace lze vidět na obrázku 7.2 a 7.3.



Obrázek 7.2 Graf prodloužení vzorku polanvil bez degradace



Obrázek 7.3 Graf prodloužení vzorku polanvil po 336h degradaci

Z grafů lze vidět, že se jedná o logaritmický průběh, kde u vzorků bez degradace docházelo k přetržení lopatek při průměrné hodnotě 60 mm prodloužení, zatímco u vzorků vystavených termické degradaci docházelo k přetržení při průměrné hodnotě 50 mm prodloužení. Tento rozdíl značí zhoršení mechanické pevnosti materiálu v tahu vlivem degradace.

Jelikož se při měření prodloužení nevyskytovala žádná extrémní hodnota, spočítal se ze změřených hodnot aritmetický průměr. Velikost prodloužení závisí na tloušťce materiálu, proto se průměrné hodnoty prodloužení přepočítaly na stejný průřez materiálu, viz příloha C.4 a C.8. Tyto hodnoty prodloužení jsou zaznačeny v tabulce 7.1 a 7.2, kde je možné vidět porovnání výsledků pro vzorky před a po degradaci. V tabulkách jsou zároveň uvedeny nejvyšší hodnoty napětí materiálů.

Tabulka 7.1 Průměrné hodnoty zkoušek v tahu u vzorku polanvil

Doba stárnutí	Prodloužení	Nejvyšší dosažené napětí
[h]	[%]	[N/mm <sup>2</sup> ]
0	317,74	14,65
168	285,50	14,49
336	235,58	14,12

Tabulka 7.2 Průměrné hodnoty zkoušek v tahu u vzorku ongrovil

Doba stárnutí	Prodloužení	Nejvyšší dosažené napětí
[h]	[%]	[N/mm <sup>2</sup> ]
0	269,49	16,13
168	255,53	15,87
336	284,33	16,02

U vzorků polanvil lze říct, že zdegradované vzorky měly horší mechanické vlastnosti než vzorky bez degradace. Nejvyšší dosažené napětí bylo u všech vzorků téměř stejné, ale změnily se hodnoty prodloužení. Vzorky, které nebyly degradovány měly značně větší prodloužení než vzorky po degradaci. U vzorků s delší dobou degradace kleslo jejich prodloužení o 50 % původní délky oproti vzorku s menší dobou degradace. U vzorků ongrovil měly vzorky bez degradace a vzorky po 168 h degradace menší prodloužení než nejdéle zdegradovaný vzorek. Tento rozdíl může být způsoben mechanickým poškozením vzorků před zahájením zkoušek nebo špatnými vzorky. Ostatní změřené hodnoty jsou uvedeny v Příloha C -.

## 8. VÝSLEDNÉ ZPRACOVÁNÍ DAT

Výsledná data dielektrických parametrů před a po termické degradaci byly společně s daty získané při zkouškách elektrické pevnosti a mechanických zkouškách v tahu vloženy do výsledné tabulky 8.1 a 8.2 pro větší přehlednost. Výsledné tabulky jsou zpracovány pro vzorky polanvil a ongrovil. Data uváděná v tabulce jsou průměrné hodnoty a mediány ze všech zkušebních vzorků daného typu materiálu.

Tabulka 8.1 Celkové výsledky vzorku polanvil

Doba stárnutí	DF ( $\tan \delta$ )	$\rho_v$	$\epsilon_r$	Elektrická pevnost	Nejvyšší dosažené napětí	Prodloužení před přetržením
[h]	[-]	[G $\Omega$ m]	[-]	[kV/mm]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]
0	0,0588	85,32	6,077	19,487	14,65	317,74
168	0,0639	75,26	6,063	18,930	14,49	285,50
336	0,0642	46,79	6,159	18,440	14,12	235,58

Tabulka 8.2 Celkové výsledky vzorku ongrovil

Doba stárnutí	DF ( $\tan \delta$ )	$\rho_v$	$\epsilon_r$	Elektrická pevnost	Nejvyšší dosažené napětí	Prodloužení před přetržením
[h]	[-]	[G $\Omega$ m]	[-]	[kV/mm]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]
0	0,0629	113,03	5,702	23,197	16,13	269,49
168	0,0690	102,31	5,810	20,683	15,87	255,53
336	0,0675	116,18	5,833	20,343	16,02	284,33



## 9. ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo provést termickou degradaci na izolačních PVC materiálech a zjistit jejich dielektrické a mechanické změny.

První část této bakalářské práce je zaměřena na popis měřitelných dielektrických vlastností a seznámení se samotnými izolačními materiály používanými v kabelovém průmyslu.

V další části práce byl popsán teoretický proces stárnutí podle Montsingerova modelu tepelného stárnutí.

Třetí část vysvětluje obecný princip měření dielektrických parametrů pomocí Scheringova můstku na zařízení Tettex 2830/2831 v laboratořích VVN.

Ve čtvrté části bakalářské práce je popsán návrh postupu pro tvorbu termické degradace PVC izolačních materiálů. Jsou zde vypsány podmínky pro uložení v horkovzdušné peci a teplotní a časové podmínky pro degradaci izolačních materiálů. Dále je popsán samotný návrh pro uskutečnění termické degradace, který je vytvořen podle stanovených norem.

V páté části bakalářské práce dochází k praktickému řešení termické degradace, kde byly zvoleny dva druhy testovaných materiálu, a sice polanvil a ongrovil. Před začátkem degradace byly změřeny dielektrické parametry zkušebních vzorků, přičemž mezi nejdůležitější parametry patřily rezistivita, permitivita a ztrátový činitel. Parametry byly změřeny při střídavém napětí 500 V a 1000 V, pro zjištění závislosti na napětí. Při porovnání těchto výsledků nedošlo k žádné výrazné změně, proto se dále počítalo s hodnotami změřenými při napětí 500 V. Poté probíhala podle zvoleného návrhu termická degradace zkušebních vzorků po dobu 7x24 h při průměrné teplotě 70 °C. Po dokončení degradace následovalo opětovné změření dielektrických parametrů pro zjištění jejich stavu. Z těchto zdegradovaných vzorků byly vybrány tři vzorky od obou materiálů, které byly vystaveny další termické degradaci. Po dokončení degradace proběhlo opětovné změření jejich dielektrických vlastností. Všechny změřené hodnoty byly přepočítány přes medián a byly z nich vytvořeny grafy zobrazující změny dielektrických vlastností vlivem degradace. Největší změna se projevila velkým poklesem rezistivity a nárůstem ztrátového činitele u vzorků polanvil. Tyto změny vypovídají o snížení kvality izolačního materiálu. Výsledné grafy nejsou propojeny křivkou, jelikož nebylo dosaženo tolika měření, aby se dalo tvrdit, že takto přesně probíhaly změny vlastností.

V další části bakalářské práce je podle norem popsán postup a podmínky pro provedení zkoušek elektrické pevnosti. Podle této teorie byly provedeny zkoušky v laboratořích VVN. Pro tyto zkoušky byly vytvořeny nové vzorky izolačních materiálů pro porovnání elektrické pevnosti u těchto a zdegradovaných vzorků. Tyto nové a zdegradované vzorky byly následně po aklimatizaci vloženy mezi elektrody do silikonové lázně, kde probíhaly zkoušky elektrických průrazů. Výsledné průrazné

napětí byly vyděleny jejich průměrnou tloušťkou, čímž byla zjištěna hodnota elektrické pevnosti vzorků (elektrické napětí na 1 milimetr tloušťky). Při tomto měření bylo potřeba brát v potaz to, že pokud by byla změřena elektrická pevnost u vzorku s tloušťkou přesně 1 mm, byla by jeho elektrická pevnost jiná než u výše zmíněného postupu. Toto je způsobeno odlišným působením elektrického pole na materiály s větší tloušťkou. Výsledné grafy nejsou opět propojeny křivkou kvůli nedostatku změřených dat.

V další části práce je dle norem popsán postup pro zkoušky mechanické pevnosti v tahu. Podle tohoto postupu byly zhotoveny zkoušky za pomoci kabelovny NKT s. r. o. ve Velkém Meziříčí. Pro zkoušky byly použity vzorky, u kterých neproběhla degradace a vzorky po degradaci, právě pro následné porovnání změn vlivem degradace. Zkušební vzorky byly umístěny mezi čelisti a byla nastavena rychlost prodlužování. Po dokončení zkoušek byly z výsledných dat zpracovány grafy zobrazující prodloužení vzorků. Z těchto grafů bylo patrné, že u vzorků polanvil došlo ke snížení prodloužení vlivem degradace. U vzorků ongrovil naopak došlo ke zvýšení prodloužení vlivem degradace, což mohlo být způsobeno mechanickým poškozením vzorků před degradací.

Na závěr bakalářské práce byly vytvořeny tabulky, které zobrazují všechny naměřené výsledky u vzorků polanvil a ongrovil. Všechny uvedené hodnoty jsou průměrné hodnoty nebo medián.

V příloze bakalářské práce jsou uvedeny všechna změřená data, se kterými se pracovalo a byly z nich vytvořeny výsledné grafy a tabulky.

## LITERATURA

- [1] ELUC, 2021. ELUC. Kr-olomoucky.cz [online] [cit. 2021-12-05]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/447>
- [2] KUMIČÁK, I. Měření elektrických parametrů vysokonapěťových komponentů pomocí elektronického můstku. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2019. 90s. Vedoucí semestrální práce Ing. Michal Krbal, Ph.D.
- [3] PUBLI, 2012. Izolanty a dielektrika. *Publi.cz* [online] [cit. 2021-12-05]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/353/06.html>
- [4] WIKIWAND, 2021. Dielektrikum | Wikiwand. *Wikiwand* [online] [cit. 2021-12-20]. Dostupné z: <https://www.wikiwand.com/cs/Dielektrikum>
- [5] TEKTRONIX, 2021. Volume and Surface Resistivity Measurements of Insulating Materials Using the 6517B Electrometer/High Resistance Meter | Tektronix. *Tek.com* [online] [cit. 2021-12-30]. Dostupné z: <https://www.tek.com/en/document/application-note/volume-and-surface-resistivity-measurements-insulating-materials-using-651>
- [6] NTS, 2019. Volume and Surface Resistivity | NTS Materials Testing. *National Technical Systems* [online] [cit. 2021-12-30]. Dostupné z: <https://nts.com/services/testing/materials/volume-and-surface-resistivity/>
- [7] AXIOMET, 2021. Měření objemové a povrchové rezistivity vzorků - axiomet.eu. *Axiomet.eu* [online] [cit. 2021-12-05]. Dostupné z: <https://axiomet.eu/cz/cz/page/3566/Jak-se-meri-objemova-a-povrchova-rezistivita-vzorku-elektricke-izolace/>
- [8] ELEKTRIKA.CZ, SPOL. S R.O, 2021. Elektrická pevnost — ElektriKa.cz, reportážní portál instalační elektrotechniky, vyhlášky, schémata zapojení. *ElektriKa.cz* [online] [cit. 2021-12-05]. Dostupné z: <https://elektriKa.cz/terminolog/eterminolog2definition.2006-04-22.5895106704>
- [9] PUBLI, 2021. Elektrické vlastnosti polymerů. *Publi.cz* [online] [cit. 2021-12-05]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/14.html>
- [10] ELUC, 2021. ELUC. *Kr-olomoucky.cz* [online] [cit. 2021-12-05]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/558>
- [11] RESIDIT S.R.O, 2021. Měření ztrátového činitele izolace silových kabelů – Časopis Elektro - Odborné časopisy. *Odbornecasopisy.cz* [online] [cit. 2021-12-05]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/mereni-ztratoveho-cinitele-izolace-silovych-kabelu--15092>
- [12] HAEFELY, 2013. Operating Instructions: 2830/2831 Precision Oil and Solid Dielectric Analyzer. Verze 2.0. Switzerland.
- [13] KUČEROVÁ, Eva. Elektrotechnické materiály. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2002, 174 s. ISBN 80-7082-940-0.
- [14] MENTLÍK, Václav. Dielektrické prvky a systémy. Praha: BEN-technická literatura, 2006, 235 s. ISBN 80-7300-189-6.

- [15] ULRYCH, Jiří, 2012. Dielektrická spektroskopie v elektrotechnologické diagnostice. *Theses.cz* [online] [cit. 2021-12-30]. Dostupné z: <https://theses.cz/id/hzpqsl/?lang=cs>
- [16] ARTBAUER, Ján, Juraj ŠEDOVIČ a Vladimír ADAMEC. *IZOLANTY A IZOLÁCIE*. Bratislava: ALFA, 1969.
- [17] Mleziva, Josef. *Polymery – výroba, struktura, vlastnosti a použití*. Praha: Sobotáles, 2000. ISBN 80-859-2072-7.
- [18] OKÁLI, Daniel. A KOLEKTIV. *Technologie výroby kabelů: pro I.,II. a III. ročník*. Praha: Práce, 19363. Učební texty pro odborná učiliště a učňovské školy.
- [19] DLUHOŠ, Jindřich. *Materiály a technologie: Plasty a vybrané nekovové materiály*. 1. vyd. Ostrava: Ostravská univerzita, 1993, 119 s. ISBN 80-704-2052-9.
- [20] MILOŠ OSTEN. *Sborník plastických látek*. první. Praha: Průmyslové vydavatelství, Spálená 51, Praha II, 1952. Knižnice kovoprůmyslu, 103.
- [21] OENERGETICE, 2016. Nejdůležitější izolanty používané v kabelové technice - 1. díl: Plasty. *oEnergetice.cz* [online] [cit. 2021-12-05]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/nejdulezitejsi-izolanty-pouzivane-v-kabelove-technice-1-dil-plasty>
- [22] JBERGER GMBH, 2021. Granulat Füllmaterial Füllgranulat, 10 kg Karton aus Polyethylen. *Jberger.ch* [online] [cit. 2021-12-30]. Dostupné z: <https://www.jberger.ch/Fuellmaterialien/Granulat/Granulat-3-5-mm-10-kg-Karton::194.html>
- [23] CORROSIONPEDIA, 2016. Thermoplastic. *Corrosionpedia* [online] [cit. 2021-12-13]. Dostupné z: <https://www.corrosionpedia.com/definition/2396/thermoplastic>
- [24] BRITANNICA, 2021. polymerization | Definition, Classes, & Examples | Britannica [online]. [cit. 2021-12-13]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/polymerization>
- [25] HEDENQVIST, Mikael S., 2012. Barrier Packaging Materials. *Handbook of Environmental Degradation of Materials* [online]. 833–862 [cit. 2021-12-13]. Dostupné z: doi:10.1016/b978-1-4377-3455-3.00027-4
- [26] ČSN IEC 60502-2. *Kabely s výtlačně lisovanou izolací a jejich příslušenství pro jmenovitá napětí od 1 kV (Um=1,2 kV) do 30 kV (Um=36 kV) - Část 2: Kabely pro jmenovitá napětí od 6 kV (Um=7,2 kV) do 30 kV (Um=36 kV)*. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2004.
- [27] PNE 34 7625 ed. 4. VN Kabely se zesíťenou PE izolací pro distribuční sítě do 35 kV, 2011.
- [28] CREATIVE MECHANISMS STAFF, 2016. Everything You Need To Know About PVC Plastic. *Creativemechanisms.com* [online] [cit. 2021-12-13]. Dostupné z: <https://www.creativemechanisms.com/blog/everything-you-need-to-know-about-pvc-plastic>

- [29] BPF, 2021. Polyvinyl Chloride PVC: Properties, Benefits & Applications. *Bpf.co.uk* [online] [cit. 2021-12-30]. Dostupné z: <https://www.bpf.co.uk/plastipedia/polymers/pvc.aspx#Production>
- [30] GUICHON, 2019. PVC – Polyvinyl chloride – Manufacturing process of Polyvinyl chloride (PVC) : *Guichon-valves.com* [online] [cit. 2021-12-30]. Dostupné z: <https://guichon-valves.com/faqs/pvc-polyvinyl-chloride-manufacturing-process-of-polyvinyl-chloride-pvc/>
- [31] KOMPASS, 2018. Granulát PVC (Fatra, a.s.). *Kompass.com* [online] [cit. 2021-12-30]. Dostupné z: <https://cz.kompass.com/p/granulat-pvc/ee5de4e4-c7e8-4775-8f77-0fdd04dc295d/>
- [32] ČSN EN 60811-501. Elektrické a optické kabely – Zkušební metody pro nekovové materiály – Část 501: Mechanické zkoušky pro určení mechanických vlastností izolačních a plášťových směsí. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [33] ČSN EN 60216-1 ed.2. Elektroizolační materiály – Vlastnosti tepelné odolnosti: Část 1: Proces stárnutí a vyhodnocení výsledků zkoušky. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [34] ČSN EN ISO 291. Plasty – Standardní prostředí pro kondicionování a zkoušení. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [35] ČSN EN 60811-401. Elektrické a optické kabely – Zkušební metody pro nekovové materiály: Část 401: Ostatní zkoušky – Metody tepelného stárnutí - Stárnutí v horkovzdušné peci. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [36] ČSN EN 50363-3. Izolační, plášťové a povrchové materiály pro kabely nízkého napětí: Část 3: PVC izolační směsi. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2006.
- [37] TOMMASINI, D, GENEVA and SWITZERLAND, no date. *Dielectric insulation and high-voltage issues* [online]. [cit. 2022-03-16]. Dostupné z: <https://cds.cern.ch/record/1342701/files/335.pdf>
- [38] TRNKA, P, Katedra TECHNOLOGIÍ and Fakulta ELEKTROTECHNICKÁ, ZČU V PLZNI, no date. *Elektrické a kombinované stárnutí izolačních materiálů* [online]. [cit. 2022-03-16]. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/394/1/r0c1c2.pdf>
- [39] KUČERA, M. *Účinky vícefaktorového namáhání na elektroizolační materiály*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 56 s.
- [40] ČSN EN 60243-1 ed.2. Elektrická pevnost izolačních materiálů – Zkušební metody: Část 1: Zkoušky při průmyslových kmitočtech. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.

- [41] ČSN IEC 250. Doporučené postupy ke stanovení permitivity a ztrátového činitele elektroizolačních materiálů při průmyslových, akustických a rozhlasových kmitočtech včetně metrových vlnových délek. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 1998.
- [42] WIKIWAND, 2022. Scheringův můstek | Wikiwand. *Wikiwand* [online] [cit. 2022-05-16]. Dostupné z:  
[https://www.wikiwand.com/cs/Schering%C5%AFv\\_m%C5%AFstek](https://www.wikiwand.com/cs/Schering%C5%AFv_m%C5%AFstek)

# SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

## Zkratky:

FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
VUT	Vysoké učení technické v Brně
PE	Polyethylen
PE-LD	Nízkohustotní polyethylen
PE-HD	Vysokohustotní polyethylen
XPLE	Zesíťovaný polyethylen
PVC	Polyvinylchlorid
PP	Polypropylen
VCM	Vinylchloridový monomer
DC	Střenosměrné napětí
AC	Střídavé napětí
DF	Ztrátový faktor
NN	Nízké napětí
VN	Vysoké napětí
VVN	Velmi vysoké napětí
LED	Světelná dioda

## Symboly:

$U$	napětí	(V)
$I$	proud	(A)
$R$	odpor	( $\Omega$ )
$U_{rms}$	efektivní hodnota napětí	(V)
$\varepsilon$	permitivita	(-)
$\varepsilon_r$	relativní permitivita	(-)
$\varepsilon_0$	permitivita vakua	(-)
$D$	elektrická indukce	(C/m <sup>2</sup> )
$E$	intenzita elektrického pole	(V/m)
$C$	kapacita	(F)
$S$	plocha	(m <sup>2</sup> )
$l$	délka elektrod	(m)
$A$	plocha měřící elektrody	(m <sup>2</sup> )
$\rho_s$	povrchová rezistivita	( $\Omega$ )
$\rho_v$	objemová rezistivita	( $\Omega \cdot m$ )
$h$	tloušťka vzorku	(m)
$G$	vodivost	(S)
$\gamma_s$	měrná povrchová vodivost	(S/m)

$\gamma_v$	měrná objemová vodivost	(S/m)
$E_p$	elektrická pevnost	(V/m)
$d$	tloušťka materiálu	(m)
$\delta$	ztrátový úhel	(rad)
$\varphi$	úhel	(rad)
$tg\delta$	ztrátový činitel	(-)
$I_R$	proud před odpor	(A)
$I_C$	proud přes kapacitu	(A)
$R_p$	paralelní odpor	( $\Omega$ )
$C_p$	paralelní kapacita	(F)
$R_s$	sériový odpor	( $\Omega$ )
$C_s$	sériová kapacita	(F)
$\omega$	úhlová frekvence	(rad/s)
$\tau_T$	životnost izolace	(r)
$A$	konstanta materiálu	(-)
$B$	konstanta materiálu	(-)
$T$	teplota stárnutí	( $^{\circ}$ C)
$a$	konstanta závislá na koncentraci molekul	(-)
$E_a$	aktivační energie	(kJ/mol)
$R$	univerzální plynová konstanta	(J/K·m)
$e$	eulerovo číslo	(-)
$C_N$	referenční kapacita	(pF)
$C_X$	neznámá kapacita	(pF)
$R_S$	sériový odpor	( $\Omega$ )
$C_S$	sériová kapacita	(pF)
$I_X$	proud neznámým kondenzátorem	(pA)
$I_N$	proud referenčním kondenzátorem	(pA)
$R_X$	neznámý odpor	( $\Omega$ )
$R_N$	referenční odpor	( $\Omega$ )



## **SEZNAM PŘÍLOH**

<b>PŘÍLOHA A - NAMĚŘENÉ HODNOTY – TERMICKÁ DEGRADACE .....</b>	<b>68</b>
<b>PŘÍLOHA B - NAMĚŘENÉ HODNOTY – ZKOUŠKA ELEKTRICKÉ PEVNOSTI .....</b>	<b>78</b>
<b>PŘÍLOHA C - NAMĚŘENÉ HODNOTY – MECHANICKÉ ZKOUŠKY .....</b>	<b>85</b>

# Příloha A - Naměřené hodnoty – Termická degradace

## A.1 Tabulky naměřených hodnot před degradací pro vzorky polanvil

Vzorek 6.1 (PS9-609 ADBEB (Polanvil), černý)									
Měření tloušťky	d	d <sub>průměr</sub>	Průměrná tloušťka	Urms střídavé	f	DF (tan δ)	Cx	El. stress	Permitivita
	[mm]	[mm]	[mm]	[V]	[Hz]	[-]	[pF]	[kV/mm]	[-]
1	2,30	2,488	2,488	499,8	50	0,0591	45,346	0,201	6,362
2	2,44		2,488	999,7	50,1	0,0591	45,394	0,402	6,369
3	3,10		Průměrná tloušťka	DC U	DC I	DC Resistivity	Teplota izolace	Teplota okolí	Relativní vlhkost
4	2,44		[mm]	[V]	[nA]	[GΩm]	[°C]	[°C]	[%]
5	2,32		2,488	557	5	85,32	23,1	22,6	26
6	2,33		2,488	1093	11	83,72	23,1	22,5	25,8

Vzorek 6.2 (PS9-609 ADBEB (Polanvil), černý)									
Měření tloušťky	d	d <sub>průměr</sub>	Průměrná tloušťka	Urms střídavé	f	DF (tan δ)	Cx	El. stress	Permitivita
	[mm]	[mm]	[mm]	[V]	[Hz]	[-]	[pF]	[kV/mm]	[-]
1	2,31	2,353	2,353	499,9	50,1	0,06006	45,981	0,212	6,101
2	2,33		2,353	999,9	50,1	0,0601	45,987	0,425	6,102
3	2,38		Průměrná tloušťka	DC U	DC I	DC Resistivity	Teplota izolace	Teplota okolí	Relativní vlhkost
4	2,38		[mm]	[V]	[nA]	[GΩm]	[°C]	[°C]	[%]
5	2,39		2,353	557	7	70,91	23	22,5	25,7
6	2,33		2,353	1093	14	68,1	23,1	22,5	26

Vzorek 6.3 (PS9-609 ADBEB (Polanvil), černý)									
Měření tloušťky	d	d <sub>průměr</sub>	Průměrná tloušťka	Urms střídavé	f	DF (tan δ)	Cx	El. stress	Permitivita
	[mm]	[mm]	[mm]	[V]	[Hz]	[-]	[pF]	[kV/mm]	[-]
1	2,26	2,290	2,29	499,9	50	0,05878	47,061	0,218	6,077
2	2,30		2,29	999,7	50,1	0,05884	47,121	0,437	6,085
3	2,32		Průměrná tloušťka	DC U	DC I	DC Resistivity	Teplota izolace	Teplota okolí	Relativní vlhkost
4	2,30		[mm]	[V]	[nA]	[GΩm]	[°C]	[°C]	[%]
5	2,26		2,29	557	6	82,04	23	22,4	25,8
6	2,3		2,29	1093	13	76,36	23,1	22,4	25,8

Vzorek 6.4 (PS9-609 ADBEB (Polanvil), černý)									
Měření tloušťky	d	d <sub>průměr</sub>	Průměrná tloušťka	Urms střídavé	f	DF (tan δ)	Cx	El. stress	Permitivita
	[mm]	[mm]							
1	2,12	2,137	2,137	500,1	50	0,05819	49,835	0,234	6,004
2	2,19		2,137	999,7	50,1	0,05824	49,849	0,468	6,006
3	2,16		Průměrná tloušťka	DC U	DC I	DC Resistivity	Teplota izolace	Teplota okolí	Relativní vlhkost
4	2,09		[mm]	[V]	[nA]	[GΩm]	[°C]	[°C]	[%]
5	2,16		2,137	557	6	88,77	23,1	22,4	26
6	2,1		2,137	1093	12	82,02	23,1	22,4	25,8

Vzorek 6.5 (PS9-609 ADBEB (Polanvil), černý)									
Měření tloušťky	d	d <sub>průměr</sub>	Průměrná tloušťka	Urms střídavé	f	DF (tan δ)	Cx	El. stress	Permitivita
	[mm]	[mm]							
1	2,12	2,212	2,212	499,9	50,1	0,05866	48,285	0,226	6,023
2	2,19		2,212	999,7	50,1	0,05868	48,293	0,452	6,024
3	2,26		Průměrná tloušťka	DC U	DC I	DC Resistivity	Teplota izolace	Teplota okolí	Relativní vlhkost
4	2,31		[mm]	[V]	[nA]	[GΩm]	[°C]	[°C]	[%]
5	2,18		2,212	557	6	91,46	23,1	23,1	26
6			2,212	1093	11	88,74	23,1	23,2	25,8

## A.2 Tabulky naměřených hodnot po 168 hodinách degradace-polanvil

Vzorek 6.1 (PS9-609 ADBEB (Polanvil), černý)									
Měření tloušťky	d	d <sub>průměr</sub>	Průměrná tloušťka	Urms střídavé	f	DF (tan δ)	Cx	El. stress	Permitivita
	[mm]	[mm]							
1	2,44	2,495	2,495	500	50,1	0,06371	46,434	0,2	6,533
2	2,23		2,495	999,6	50,1	0,06374	46,427	0,401	6,532
3	2,43		Průměrná tloušťka	DC U	DC I	DC Resistivity	Teplota izolace	Teplota okolí	Relativní vlhkost
4	3,10		[mm]	[V]	[nA]	[GΩm]	[°C]	[°C]	[%]
5	2,42		2,495	557	6	72,89	22,7	22,7	26
6	2,35		2,495	1094	12	71,61	22,7	22,7	25,8

Vzorek 6.2 (PS9-609 ADBEB (Polanvil), černý)									
Měření tloušťky	d	d <sub>průměr</sub>	Průměrná tloušťka	Urms střídavé	f	DF (tan δ)	Cx	El. stress	Permitivita
	[mm]	[mm]							
1	2,34	2,360	2,36	499,8	50,1	0,06522	46,625	0,212	6,204
2	2,34		2,36	999,9	50,1	0,06525	46,640	0,424	6,207
3	2,38		Průměrná tloušťka	DC U	DC I	DC Resistivity	Teplota izolace	Teplota okolí	Relativní vlhkost
4	2,38		[mm]	[V]	[nA]	[GΩm]	[°C]	[°C]	[%]
5	2,38		2,36	557	8	59,75	22,7	22,7	25,7
6	2,34		2,36	1094	16	58,73	22,7	22,7	26

Vzorek 6.3 (PS9-609 ADBEB (Polanvil), černý)									
Měření tloušťky	d	d <sub>průměr</sub>	Průměrná tloušťka	Urms střídavé	f	DF (tan δ)	Cx	El. stress	Permitivita
	[mm]	[mm]							
1	2,25	2,260	2,26	500,1	50,1	0,06387	47,580	0,221	6,063
2	2,23		2,26	999,7	50,1	0,06389	47,600	0,442	6,066
3	2,31		Průměrná tloušťka	DC U	DC I	DC Resistivity	Teplota izolace	Teplota okolí	Relativní vlhkost
4	2,29		[mm]	[V]	[nA]	[GΩm]	[°C]	[°C]	[%]
5	2,23		2,26	557	6	83,75	22,7	22,7	25,8
6	2,25		2,26	1093	12	78,97	22,7	22,7	25,8

Vzorek 6.4 (PS9-609 ADBEB (Polanvil), černý)									
Měření tloušťky	d	d <sub>průměr</sub>	Průměrná tloušťka	Urms střídavé	f	DF (tan δ)	Cx	El. stress	Permitivita
	[mm]	[mm]	[mm]	[V]	[Hz]	[-]	[pF]	[kV/mm]	[-]
1	2,14	2,135	2,14	500	50,1	0,06386	49,950	0,234	6,013
2	2,09		2,14	999,7	50	0,06388	49,966	0,468	6,015
3	2,08		Průměrná tloušťka	DC U	DC I	DC Resistivity	Teplota izolace	Teplota okolí	Relativní vlhkost
4	2,13		[mm]	[V]	[nA]	[GΩm]	[°C]	[°C]	[%]
5	2,19		2,14	557	7	78,81	23,3	22,6	23,9
6	2,18		2,14	1094	14	71,96	23,1	22,6	24,1

Vzorek 6.5 (PS9-609 ADBEB (Polanvil), černý)									
Měření tloušťky	d	d <sub>průměr</sub>	Průměrná tloušťka	Urms střídavé	f	DF (tan δ)	Cx	El. stress	Permitivita
	[mm]	[mm]	[mm]	[V]	[Hz]	[-]	[pF]	[kV/mm]	[-]
1	2,25	2,286	2,29	499,9	50,1	0,0517	38,518	0,219	4,965
2	2,21		2,29	999,7	50,1	0,05219	38,955	0,437	5,021
3	2,23		Průměrná tloušťka	DC U	DC I	DC Resistivity	Teplota izolace	Teplota okolí	Relativní vlhkost
4	2,35		[mm]	[V]	[nA]	[GΩm]	[°C]	[°C]	[%]
5	2,39		2,29	558	6	75,26	23,1	22,6	24,1
			2,29	1097	13	71,41	23,1	22,6	24,1

### A.3 Tabulky naměřených hodnot po 336 hodinách degradace-polanvil

Vzorek 6.1 (PS9-609 ADBEB (Polanvil), černý)									
Měření tloušťky	d	d <sub>průměr</sub>	Průměrná tloušťka	Urms střídavé	f	DF (tan δ)	Cx	El. stress	Permitivita
	[mm]	[mm]	[mm]	[V]	[Hz]	[-]	[pF]	[kV/mm]	[-]
1	2,40	2,380	2,38	500	50,1	0,06416	45,893	0,21	6,159
2	2,34		2,38	999,6	50,1	0,06417	45,955	0,42	6,167
3	2,36		Průměrná tloušťka	DC U	DC I	DC Resistivity	Teplota izolace	Teplota okolí	Relativní vlhkost
4	2,36		[mm]	[V]	[nA]	[GΩm]	[°C]	[°C]	[%]
5	2,41		2,38	557	10	46,79	23	23,1	14,8
6	2,41		2,38	1094	21	44,69	23	23,1	14,8

Vzorek 6.2 (PS9-609 ADBEB (Polanvil), černý)									
Měření tloušťky	d	d <sub>průměr</sub>	Průměrná tloušťka	Urms střídavé	f	DF (tan δ)	Cx	El. stress	Permitivita
	[mm]	[mm]	[mm]	[V]	[Hz]	[-]	[pF]	[kV/mm]	[-]
1	2,35	2,360	2,36	500,2	50,1	0,06429	46,626	0,212	6,205
2	2,34		2,36	999,6	50,1	0,06432	46,651	0,424	6,208
3	2,35		Průměrná tloušťka	DC U	DC I	DC Resistivity	Teplota izolace	Teplota okolí	Relativní vlhkost
4	2,38		[mm]	[V]	[nA]	[GΩm]	[°C]	[°C]	[%]
5	2,38		2,36	557	11	44,22	23	23	15
6	2,36		2,36	1094	22	42,35	23	23	14,8

Vzorek 6.3 (PS9-609 ADBEB (Polanvil), černý)									
Měření tloušťky	d	d <sub>průměr</sub>	Průměrná tloušťka	Urms střídavé	f	DF (tan δ)	Cx	El. stress	Permitivita
	[mm]	[mm]	[mm]	[V]	[Hz]	[-]	[pF]	[kV/mm]	[-]
1	2,26	2,275	2,275	500,1	50,1	0,05303	39,536	0,221	5,072
2	2,25		2,275	999,7	50,1	0,05323	39,733	0,442	5,097
3	2,27		Průměrná tloušťka	DC U	DC I	DC Resistivity	Teplota izolace	Teplota okolí	Relativní vlhkost
4	2,28		[mm]	[V]	[nA]	[GΩm]	[°C]	[°C]	[%]
5	2,29		2,275	557	7	66,03	23	23	15
6	2,3		2,275	1093	19	51,68	23	23	14,8

## A.4 Tabulka medián hodnot pro grafy-polanvil

Doba degradace	DF (tan δ)	Cx	ε <sub>r</sub>	ρ <sub>v</sub>
[h]	[-]	[pF]	[-]	[GΩm]
0	0,0588	47,06	6,077	85,320
168	0,0639	46,62	6,063	75,260
336	0,0642	45,89	6,159	46,790

## A.5 Tabulky naměřených hodnot před degradací pro vzorky ongrovil

Vzorek 2.1 (IS9-610 BDBE (Ongrovil), přírodní)									
Měření tloušťky	d	d <sub>průměr</sub>	Průměrná tloušťka	Urms střídavé	f	DF (tan δ)	Cx	El. stress	Permitivita
	[mm]	[mm]	[mm]	[V]	[Hz]	[-]	[pF]	[kV/mm]	[-]
1	2,22	2,215	2,215	500	50,1	0,06301	45,902	0,226	5,733
2	2,22		2,215	999,7	50,1	0,06305	45,913	0,451	5,734
3	2,21		Průměrná tloušťka	DC U	DC I	DC Resistivity	Teplota izolace	Teplota okolí	Relativní vlhkost
4	2,21		[mm]	[V]	[nA]	[GΩm]	[°C]	[°C]	[%]
5	2,21		2,215	560	4	113,03	23,1	22,3	26
6	2,22		2,215	1094	9	107,61	23,1	22,3	26

Vzorek 2.2 (IS9-610 BDBE (Ongrovil), přírodní)									
Měření tloušťky	d	d <sub>průměr</sub>	Průměrná tloušťka	Urms střídavé	f	DF (tan δ)	Cx	El. stress	Permitivita
	[mm]	[mm]	[mm]	[V]	[Hz]	[-]	[pF]	[kV/mm]	[-]
1	2,10	2,137	2,137	499,7	50	0,06319	47,724	0,234	5,75
2	2,14		2,137	999,7	50	0,06322	47,730	0,468	5,751
3	2,16		Průměrná tloušťka	DC U	DC I	DC Resistivity	Teplota izolace	Teplota okolí	Relativní vlhkost
4	2,17		[mm]	[V]	[nA]	[GΩm]	[°C]	[°C]	[%]
5	2,10		2,137	557	5	100,3	23,1	22,3	26
6	2,15		2,137	1093	10	101,24	23,1	22,3	26

Vzorek 2.3 (IS9-610 BDBE (Ongrovil), přírodní)									
Měření tloušťky	d	d <sub>průměr</sub>	Průměrná tloušťka	Urms střídavé	f	DF (tan δ)	Cx	El. stress	Permitivita
	[mm]	[mm]	[mm]	[V]	[Hz]	[-]	[pF]	[kV/mm]	[-]
1	2,28	2,300	2,3	500,1	50,1	0,06292	43,967	0,217	5,702
2	2,25		2,3	999,7	50,1	0,06296	43,979	0,435	5,704
3	2,31		Průměrná tloušťka	DC U	DC I	DC Resistivity	Teplota izolace	Teplota okolí	Relativní vlhkost
4	2,40		[mm]	[V]	[nA]	[GΩm]	[°C]	[°C]	[%]
5	2,31		2,3	560	4	123,66	23,1	22,3	26
6	2,25		2,3	1093	8	120,18	23	22,3	25,9

Vzorek 2.4 (IS9-610 BDBE (Ongrovil), přírodní)									
Měření tloušťky	d	d <sub>průměr</sub>	Průměrná tloušťka	Urms střídavé	f	DF (tan δ)	Cx	El. stress	Permitivita
	[mm]	[mm]							
1	2,22	2,234	2,234	499,9	50	0,06282	45,216	0,224	5,696
2	2,21		2,234	999,8	50,1	0,06284	45,221	0,468	5,696
3	2,24		Průměrná tloušťka	DC U	DC I	DC Resistivity	Teplota izolace	Teplota okolí	Relativní vlhkost
4	2,25		[mm]	[V]	[nA]	[GΩm]	[°C]	[°C]	[%]
5	2,25		2,234	560	5	110,28	23,1	22,3	26
6	-		2,234	1093	9	105,8	23,1	22,3	26

Vzorek 2.5 (IS9-610 BDBE (Ongrovil), přírodní)									
Měření tloušťky	d	d <sub>průměr</sub>	Průměrná tloušťka	Urms střídavé	f	DF (tan δ)	Cx	El. stress	Permitivita
	[mm]	[mm]							
1	2,39	2,316	2,234	500	50,1	0,06232	43,593	0,216	5,693
2	2,29		2,234	999,6	50,1	0,06233	43,605	0,432	5,694
3	2,28		Průměrná tloušťka	DC U	DC I	DC Resistivity	Teplota izolace	Teplota okolí	Relativní vlhkost
4	2,34		[mm]	[V]	[nA]	[GΩm]	[°C]	[°C]	[%]
5	2,28		2,234	560	3	142,7	23,1	22,3	26
6	-		2,234	1093	7	128,86	23,1	22,3	26

## A.6 Tabulky naměřených hodnot po 168 hodinách degradace-ongrovil

Vzorek 2.1 (IS9-610 BDBE (Ongrovil), přírodní)									
Měření tloušťky	d	d <sub>průměr</sub>	Průměrná tloušťka	Urms střídavé	f	DF (tan δ)	Cx	El. stress	Permitivita
	[mm]	[mm]							
1	2,26	2,245	2,245	500,2	50	0,06842	45,895	0,223	5,81
2	2,23		2,245	999,7	50,1	0,06847	45,924	0,445	5,813
3	2,24		Průměrná tloušťka	DC U	DC I	DC Resistivity	Teplota izolace	Teplota okolí	Relativní vlhkost
4	2,25		[mm]	[V]	[nA]	[GΩm]	[°C]	[°C]	[%]
5	2,25		2,245	560	5	109,74	23,1	22,6	24,2
6	2,24		2,245	1094	10	101,71	23,1	22,6	24,2



Vzorek 2.2 (IS9-610 BDBE (Ongrovil), přírodní)									
Měření tloušťky	d	d <sub>průměr</sub>	Průměrná tloušťka	Urms střídavé	f	DF (tan δ)	Cx	El. stress	Permitivita
	[mm]	[mm]							
1	2,11	2,155	2,155	499,9	50,1	0,06928	47,965	0,232	5,828
2	2,14		2,155	999,8	50,1	0,06932	48,016	0,464	5,835
3	2,16		Průměrná tloušťka	DC U	DC I	DC Resistivity	Teplota izolace	Teplota okolí	Relativní vlhkost
4	2,18		[mm]	[V]	[nA]	[GΩm]	[°C]	[°C]	[%]
5	2,18		2,155	557	5	95,73	23,1	22,5	24,1
6	2,16		2,155	1093	11	94,8	23,1	22,5	24,1

Vzorek 2.3 (IS9-610 BDBE (Ongrovil), přírodní)									
Měření tloušťky	d	d <sub>průměr</sub>	Průměrná tloušťka	Urms střídavé	f	DF (tan δ)	Cx	El. stress	Permitivita
	[mm]	[mm]							
1	2,27	2,313	2,313	499,8	50,1	0,06787	43,639	0,216	5,692
2	2,33		2,313	999,7	50,1	0,0679	43,688	0,432	5,699
3	2,41		Průměrná tloušťka	DC U	DC I	DC Resistivity	Teplota izolace	Teplota okolí	Relativní vlhkost
4	2,32		[mm]	[V]	[nA]	[GΩm]	[°C]	[°C]	[%]
5	2,26		2,313	559	4	125,55	23,1	22,5	24,1
6	2,29		2,313	1093	8	118,62	23	22,5	24,1

Vzorek 2.4 (IS9-610 BDBE (Ongrovil), přírodní)									
Měření tloušťky	d	d <sub>průměr</sub>	Průměrná tloušťka	Urms střídavé	f	DF (tan δ)	Cx	El. stress	Permitivita
	[mm]	[mm]							
1	2,27	2,258	2,258	499,4	50	0,06901	45,342	0,221	5,773
2	2,25		2,258	999,8	50,1	0,06905	45,391	0,433	5,779
3	2,25		Průměrná tloušťka	DC U	DC I	DC Resistivity	Teplota izolace	Teplota okolí	Relativní vlhkost
4	2,25		[mm]	[V]	[nA]	[GΩm]	[°C]	[°C]	[%]
5	2,27		2,258	557	5	100,24	23,1	22,5	24,1
6			2,258	1094	10	98,46	23	22,5	24,1

Vzorek 2.5 (IS9-610 BDBE (Ongrovil), přírodní)									
Měření tloušťky	d	d <sub>průměr</sub>	Průměrná tloušťka	Urms střídavé	f	DF (tan δ)	Cx	El. stress	Permitivita
	[mm]	[mm]	[mm]	[V]	[Hz]	[-]	[pF]	[kV/mm]	[-]
1	2,33	2,506	2,506	499,8	50,1	0,06908	42,921	0,199	6,065
2	2,42		2,506	999,6	50,1	0,06909	42,945	0,399	6,068
3	3,00		Průměrná tloušťka	DC U	DC I	DC Resistivity	Teplota izolace	Teplota okolí	Relativní vlhkost
4	2,47		[mm]	[V]	[nA]	[GΩm]	[°C]	[°C]	[%]
5	2,31		2,506	560	4	102,31	23,1	22,5	24,2
6			2,506	1094	9	98,31	23,1	22,5	24,2

## A.7 Tabulky naměřených hodnot po 336 hodinách degradace-ongrovil

Vzorek 2.1 (IS9-610 BDBE (Ongrovil), přírodní)									
Měření tloušťky	d	d <sub>průměr</sub>	Průměrná tloušťka	Urms střídavé	f	DF (tan δ)	Cx	El. stress	Permitivita
	[mm]	[mm]	[mm]	[V]	[Hz]	[-]	[pF]	[kV/mm]	[-]
1	2,25	2,248	2,248	500,2	50	0,06713	45,621	0,223	5,783
2	2,26		2,248	999,7	50,1	0,0672	45,651	0,445	5,787
3	2,23		Průměrná tloušťka	DC U	DC I	DC Resistivity	Teplota izolace	Teplota okolí	Relativní vlhkost
4	2,25		[mm]	[V]	[nA]	[GΩm]	[°C]	[°C]	[%]
5	2,25		2,248	560	4	130,09	23,1	23	15
6	2,25		2,248	1094	8	124,74	23,1	23	15

Vzorek 2.2 (IS9-610 BDBE (Ongrovil), přírodní)									
Měření tloušťky	d	d <sub>průměr</sub>	Průměrná tloušťka	Urms střídavé	f	DF (tan δ)	Cx	El. stress	Permitivita
	[mm]	[mm]	[mm]	[V]	[Hz]	[-]	[pF]	[kV/mm]	[-]
1	2,11	2,155	2,155	499,9	50,1	0,06772	48,002	0,232	5,833
2	2,14		2,155	999,8	50,1	0,6772	48,008	0,464	5,834
3	2,17		Průměrná tloušťka	DC U	DC I	DC Resistivity	Teplota izolace	Teplota okolí	Relativní vlhkost
4	2,20		[mm]	[V]	[nA]	[GΩm]	[°C]	[°C]	[%]
5	2,16		2,155	557	4	116,18	23,1	23	15
6	2,15		2,155	1093	9	112,46	23,1	23	15

Vzorek 2.3 (IS9-610 BDBE (Ongrovil), přírodní)									
Měření tloušťky	d	d <sub>průměr</sub>	Průměrná tloušťka	Urms střídavé	f	DF (tan δ)	Cx	El. stress	Permitivita
	[mm]	[mm]	[mm]	[V]	[Hz]	[-]	[pF]	[kV/mm]	[-]
1	2,26	2,428	2,428	499,8	50,1	0,06753	44,462	0,206	6,088
2	2,32		2,428	999,7	50,1	0,06755	44,475	0,412	6,09
3	2,38		Průměrná tloušťka	DC U	DC I	DC Resistivity	Teplota izolace	Teplota okolí	Relativní vlhkost
4	2,40		[mm]	[V]	[nA]	[GΩm]	[°C]	[°C]	[%]
5	2,31		2,428	559	4	109,7	23,1	23	15
6	2,9		2,428	1093	8	106,4	23,1	23	15

## A.8 Tabulka medián hodnot pro grafy-ongrovil

Doba degradace	DF (tan δ)	Cx	εr	ρv
[h]	[-]	[pF]	[-]	[GΩm]
0	0,0629	45,22	5,702	113
168	0,0690	45,34	5,810	102,3
336	0,0675	45,62	5,833	116,2

## Příloha B - Naměřené hodnoty – Zkouška elektrické pevnosti

### B.1 Tabulky hodnot elektrických průrazů pro vzorky polanvil bez degradace

Vzorek 6.6 (PS9-609 ADBEB (Polanvil), č.			
Měření tloušťky	d	d <sub>průměr</sub>	Průrazné napětí
	[mm]	[mm]	[kV]
1	2,03	2,113	40,40
2	2,14		
3	2,16		Elektrická pevnost vzorku
4	2,20		[kV/mm]
5	2,14		19,12
6	2,01		

Vzorek 6.7 (PS9-609 ADBEB (Polanvil), č.			
Měření tloušťky	d	d <sub>průměr</sub>	Průrazné napětí
	[mm]	[mm]	[kV]
1	2,25	2,275	44,70
2	2,21		
3	2,24		Elektrická pevnost vzorku
4	2,31		[kV/mm]
5	2,33		19,65
6	2,31		

Vzorek 6.8 (PS9-609 ADBEB (Polanvil), černý			
Měření tloušťky	d	d <sub>průměr</sub>	Průrazné napětí
	[mm]	[mm]	[kV]
1	2,05	2,095	41,50
2	2,15		
3	2,17		Elektrická pevnost vzorku
4	2,14		[kV/mm]
5	2,06		19,81
6	2		

Vzorek 6.9 (PS9-609 ADBEB (Polanvil), č.			
Měření tloušťky	d	d <sub>průměr</sub>	Průrazné napětí
	[mm]	[mm]	[kV]
1	2,07	2,188	40,40
2	2,13		
3	2,20		Elektrická pevnost vzorku
4	2,29		[kV/mm]
5	2,25		18,46
6	2,19		

Vzorek 6.10 (PS9-609 ADBEB (Polanvil), č.			
Měření tloušťky	d	d <sub>průměr</sub>	Průrazné napětí
	[mm]	[mm]	[kV]
1	2,22	2,273	44,3
2	2,24		
3	2,31		Elektrická pevnost vzorku
4	2,20		[kV/mm]
5	2,35		19,49
6	2,32		

## B.2 Tabulky hodnot elektrických průrazů pro vzorky polanvil po 168 hodinách degradace

Vzorek 6.4 (PS9-609 ADBEB (Polanvil), černý			
Měření tloušťky	d	d <sub>průměr</sub>	Průrazné napětí
	[mm]	[mm]	[kV]
1	2,14	2,135	42,00
2	2,09		
3	2,08		Elektrická pevnost vzorku
4	2,13		[kV/mm]
5	2,19		19,67
6	2,18		

Vzorek 6.5 (PS9-609 ADBEB (Polanvil), č.			
Měření tloušťky	d	d <sub>průměr</sub>	Průrazné napětí
	[mm]	[mm]	[kV]
1	2,25	2,286	41,60
2	2,21		
3	2,23		Elektrická pevnost vzorku
4	2,35		[kV/mm]
5	2,39		18,20
6	-		

### B.3 Tabulky hodnot elektrických průrazů pro vzorky polanvil po 336 hodinách degradace

Vzorek 6.1 (PS9-609 ADBEB (Polanvil), černý)			
Měření tloušťky	d	d <sub>průměr</sub>	Průrazné napětí [kV]
	[mm]	[mm]	
1	2,4	2,38	41,8
2	2,34		
3	2,36		Elektrická pevnost vzorku
4	2,36		[kV/mm]
5	2,41		17,56
6	2,41		

Vzorek 6.2 (PS9-609 ADBEB (Polanvil), černý)			
Měření tloušťky	d	d <sub>průměr</sub>	Průrazné napětí [kV]
	[mm]	[mm]	
1	2,35	2,36	44,2
2	2,34		
3	2,35		Elektrická pevnost vzorku
4	2,38		[kV/mm]
5	2,38		18,73
6	2,36		

Vzorek 6.3 (PS9-609 ADBEB (Polanvil), černý)			
Měření tloušťky	d	d <sub>průměr</sub>	Průrazné napětí [kV]
	[mm]	[mm]	
1	2,26	2,275	43,3
2	2,25		
3	2,27		Elektrická pevnost vzorku
4	2,28		[kV/mm]
5	2,29		19,03
6	2,3		

### B.4 Tabulka medián hodnot pro grafy-polanvil

Doba degradace [h]	Medián průrazných napětí [kV]	Medián elektrické pevnost vzorků [kV/mm]
0	41,5	19,49
168	41,8	18,93
336	43,3	18,73

## B.5 Tabulky hodnot elektrických průrazů pro vzorky ongrovil bez degradace

Příloha A - Vzorek 2.6 (IS9-610 BDBE (Ongrovil), přír.			
Měření tloušťky	d	d <sub>průměr</sub>	Průrazné napětí
	[mm]	[mm]	[kV]
1	2,21	2,252	49,30
2	2,27		
3	2,29		Elektrická pevnost vzorku
4	2,26		[kV/mm]
5	2,28		21,89
6	2,2		

Vzorek 2.7 (IS9-610 BDBE (Ongrovil), přír.			
Měření tloušťky	d	d <sub>průměr</sub>	Průrazné napětí
	[mm]	[mm]	[kV]
1	2,16	2,165	42,70
2	2,15		
3	2,17		Elektrická pevnost vzorku
4	2,20		[kV/mm]
5	2,16		19,72
6	2,15		

Vzorek 2.8 (IS9-610 BDBE (Ongrovil), přír.			
Měření tloušťky	d	d <sub>průměr</sub>	Průrazné napětí
	[mm]	[mm]	[kV]
1	2,13	2,110	49,30
2	2,07		
3	2,10		Elektrická pevnost vzorku
4	2,14		[kV/mm]
5	2,10		23,36
6	2,12		

Vzorek 2.9 (IS9-610 BDBE (Ongrovil), přír.			
Měření tloušťky	d	d <sub>průměr</sub>	Průrazné napětí
	[mm]	[mm]	[kV]
1	2,22	2,117	49,10
2	2,18		
3	2,12		Elektrická pevnost vzorku
4	2,02		[kV/mm]
5	2,05		23,20
6	2,11		

Vzorek 2.10 (IS9-610 BDBE (Ongrovil), přír.			
Měření tloušťky	d	d <sub>průměr</sub>	Průrazné napětí
	[mm]	[mm]	[kV]
1	2,09	1,742	46,90
2	2,00		
3	1,45		Elektrická pevnost vzorku
4	1,40		[kV/mm]
5	1,45		26,93
6	2,06		

## B.6 Tabulky hodnot elektrických průrazů pro vzorky ongrovil po 168 hodinách degradace

Vzorek 2.4 (IS9-610 BDBE (Ongrovil), přírodní)			
Měření tloušťky	d	d <sub>průměr</sub>	Průrazné napětí
	[mm]	[mm]	[kV]
1	2,27	2,258	47,90
2	2,25		
3	2,25		Elektrická pevnost vzorku
4	2,25		[kV/mm]
5	2,27		21,21
6	-		

Vzorek 2.5 (IS9-610 BDBE (Ongrovil), přírodní)			
Měření tloušťky	d	d <sub>průměr</sub>	Průrazné napětí
	[mm]	[mm]	[kV]
1	2,33	2,506	50,50
2	2,42		
3	3,00		Elektrická pevnost vzorku
4	2,47		[kV/mm]
5	2,31		20,15
6	-		



## B.7 Tabulky hodnot elektrických průrazů pro vzorky ongrovil po 336 hodinách degradace

Vzorek 2.1 (IS9-610 BDBE (Ongrovil), přírodní)			
Měření tloušťky	d	d <sub>průměr</sub>	Průrazné napětí
	[mm]	[mm]	[kV]
1	2,25	2,248	44,50
2	2,26		
3	2,23		Elektrická pevnost vzorku
4	2,25		[kV/mm]
5	2,25		19,78
6	2,25		

Vzorek 2.2 (IS9-610 BDBE (Ongrovil), přírodní)			
Měření tloušťky	d	d <sub>průměr</sub>	Průrazné napětí
	[mm]	[mm]	[kV]
1	2,11	2,155	49,80
2	2,14		
3	2,17		Elektrická pevnost vzorku
4	2,20		[kV/mm]
5	2,16		23,11
6	2,15		

Vzorek 2.3 (IS9-610 BDBE (Ongrovil), přírodní)			
Měření tloušťky	d	d <sub>průměr</sub>	Průrazné napětí
	[mm]	[mm]	[kV]
1	2,26	2,428	49,40
2	2,32		
3	2,38		Elektrická pevnost vzorku
4	2,40		[kV/mm]
5	2,31		20,34
6	2,9		

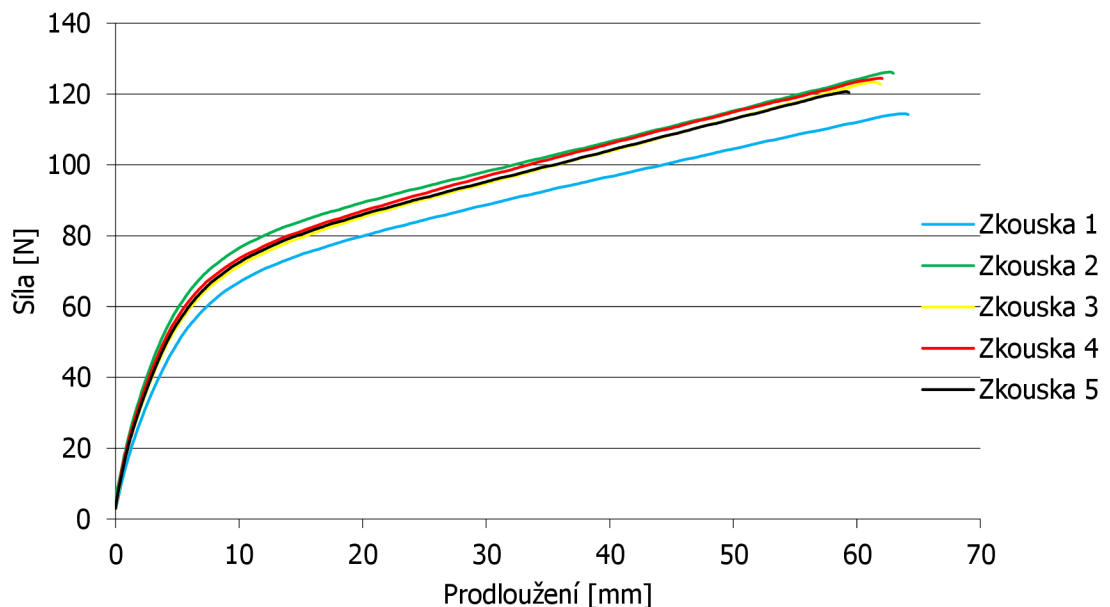
## B.8 Tabulka medián hodnot pro graf-ongrovil

Doba degradace	Medián průrazných napětí	Medián elektrické pevnost vzorků
[h]	[kV]	[kV/mm]
0	49,1	23,28
168	49,2	20,68
336	49,4	20,34

## Příloha C - Naměřené hodnoty – Mechanické zkoušky

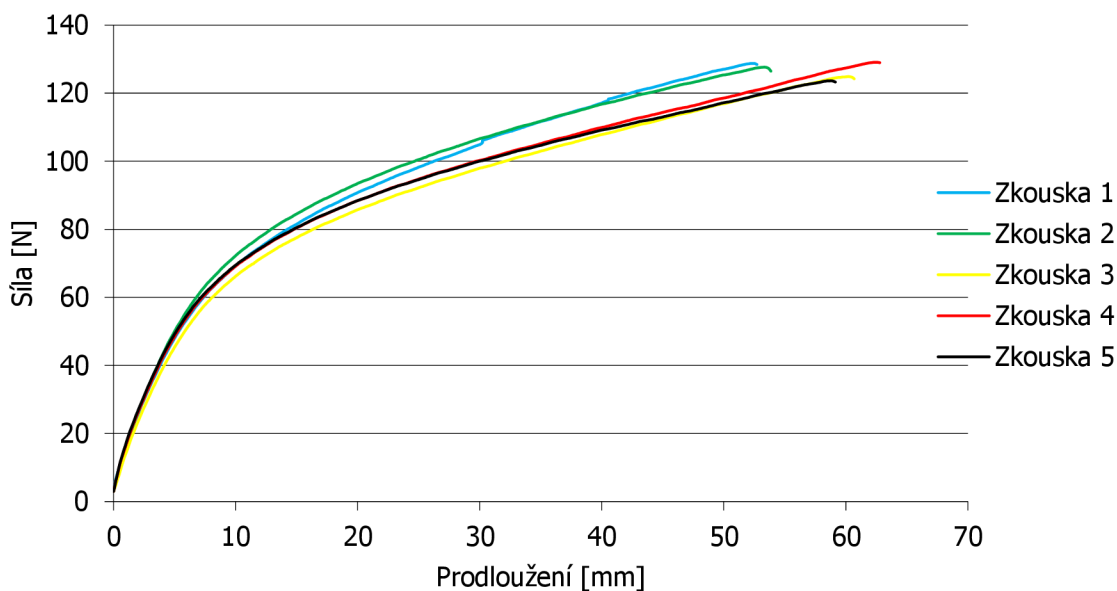
### C.1 Tabulka hodnot a graf mechanických zkoušek pro vzorky polanvil bez degradace

Zkouška	Šířka [mm]	Tloušťka [mm]	Obsah [mm <sup>2</sup> ]	Nejvyšší pevnost [N]	Napětí při nejvyšší síle [N/mm <sup>2</sup> ]	Tažnost při přetrhu [%]
1	4,12	2,00	8,23	114,43	13,91	316,21
2	4,12	2,09	8,62	126,19	14,65	314,87
3	4,12	2,18	9,00	123,37	13,71	305,50
4	4,12	2,20	9,05	124,47	13,76	309,15
5	4,12	2,13	8,76	120,67	13,78	295,15
Min	4,12	2,00	8,23	114,43	13,71	295,15
Průměr	4,12	2,12	8,73	121,83	13,96	308,17
Max	4,12	2,20	9,05	126,19	14,65	316,21
S.O.	-	0,08	0,33	4,60	0,39	8,47
VK	-	3,80	3,80	3,77	2,80	2,75
D.H.D	4,12	2,02	8,32	116,12	13,47	297,66
H.H.D.	4,12	2,22	9,14	127,53	14,45	318,69



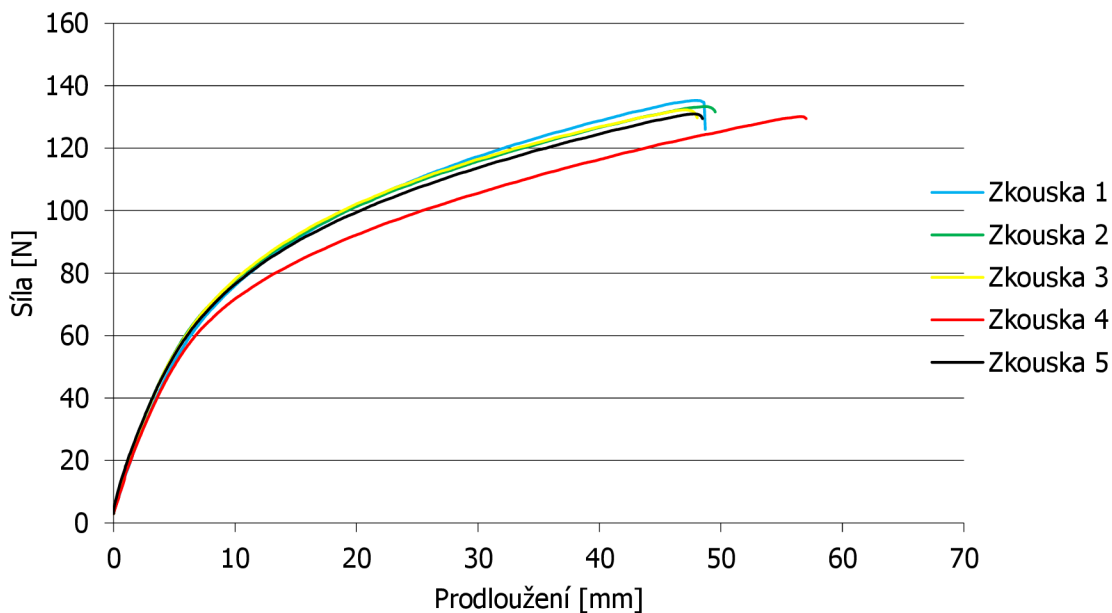
## C.2 Tabulka hodnot a graf mechanických zkoušek pro vzorky polanvil po 168 hodinách degradace

Zkouška	Šířka	Tloušťka	Obsah	Nejvyšší pevnost	Napětí při nejvyšší síle	Tažnost při přetrhu
	[mm]	[mm]	[mm <sup>2</sup> ]	[N]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]
1	4,12	2,20	9,06	128,72	14,21	260,46
2	4,12	2,28	9,38	127,64	13,61	267,43
3	4,12	2,11	8,68	124,87	14,39	298,52
4	4,12	2,16	8,91	129,06	14,49	309,92
5	4,12	2,19	9,03	123,63	13,69	292,90
Min	4,12	2,11	8,68	123,63	13,61	260,46
Průměr	4,12	2,19	9,01	126,78	14,08	285,85
Max	4,12	2,28	9,38	129,06	14,49	309,92
S.O.	-	0,06	0,25	2,41	0,40	21,06
VK	-	2,81	2,81	1,90	2,86	7,37
D.H.D	4,12	2,11	8,70	123,79	13,58	259,70
H.H.D.	4,12	2,26	9,33	129,78	14,58	311,99



### C.3 Tabulka hodnot a graf mechanických zkoušek pro vzorky polanvil po 336 hodinách degradace

Zkouška	Šířka	Tloušťka	Obsah	Nejvyšší pevnost	Napětí při nejvyšší síle	Tažnost při přetrhu
	[mm]	[mm]	[mm <sup>2</sup> ]	[N]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]
1	4,12	2,35	9,70	135,28	13,95	241,86
2	4,12	2,37	9,78	133,34	13,63	245,84
3	4,12	2,27	9,37	132,27	14,12	239,34
4	4,12	2,33	9,58	130,11	13,58	282,59
5	4,12	2,26	9,30	130,95	14,08	239,87
Min	4,12	2,26	9,30	130,11	13,58	239,34
Průměr	4,12	2,32	9,55	132,39	13,87	249,90
Max	4,12	2,37	9,78	135,28	14,12	282,59
S.O.	-	0,05	0,21	2,03	0,25	18,45
VK	-	2,16	2,16	1,54	1,81	7,38
D.H.D	4,12	2,26	9,29	129,87	13,56	226,99
H.H.D.	4,12	2,38	9,80	134,92	14,18	272,81

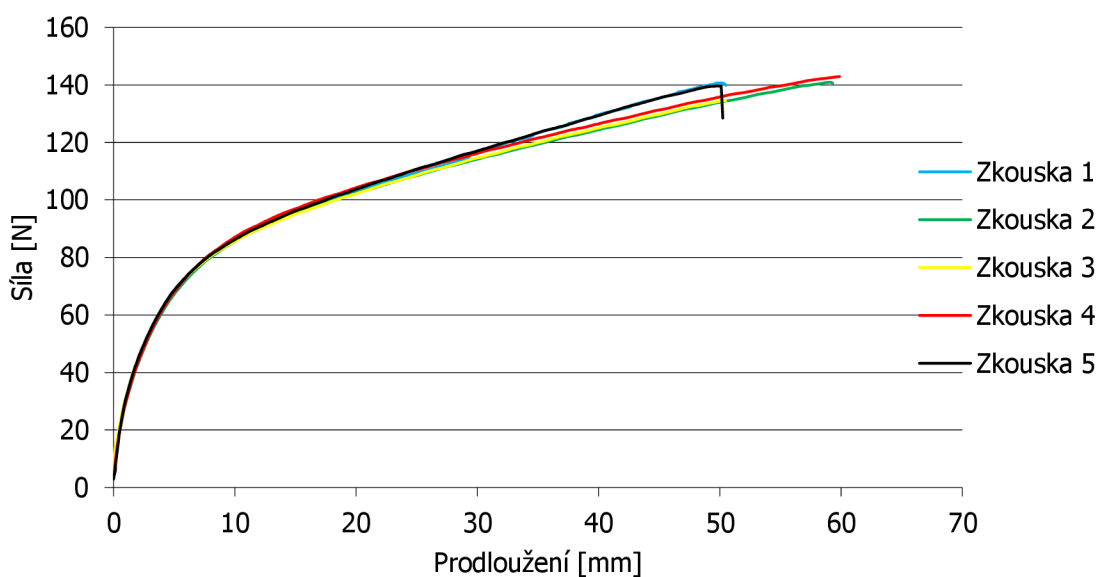


## C.4 Tabulka přepočteného prodloužení- polanvil

Doba stárnutí	Průřez	Prodloužení	Přepočítané prodloužení na průřez 9 mm <sup>2</sup>
[h]	[mm <sup>2</sup> ]	[%]	[%]
0	8,729	308,174	317,74
168	9,011	285,846	285,50
336	9,547	249,901	235,58

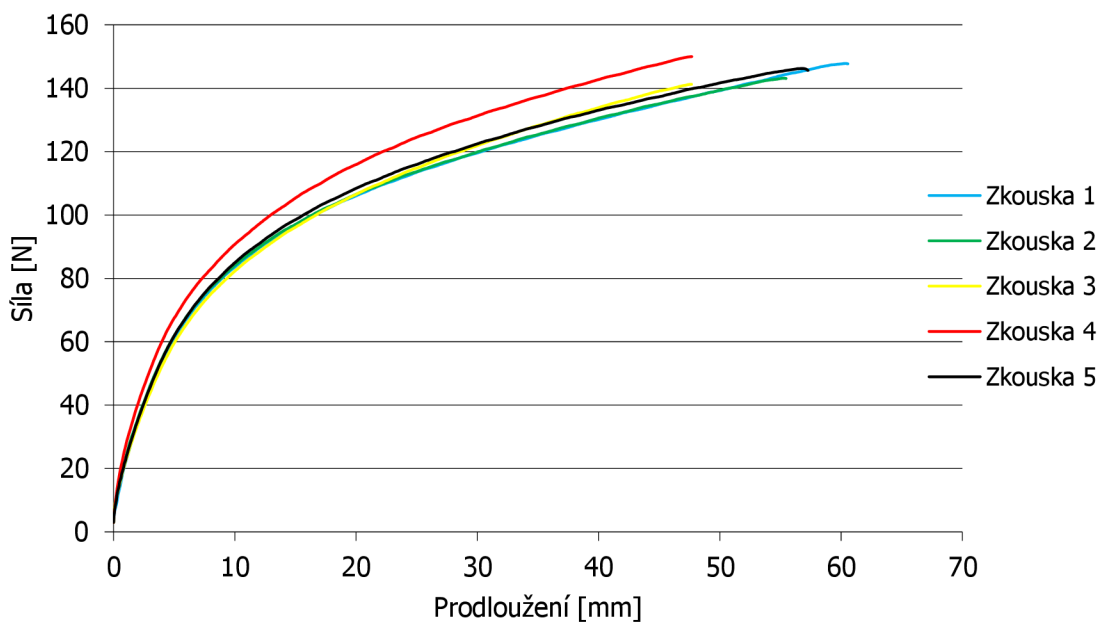
## C.5 Tabulka hodnot a graf mechanických zkoušek pro vzorky ongrovil bez degradace

Zkouška	Šířka	Tloušťka	Obsah	Nejvyšší pevnost	Napětí při nejvyšší síle	Tažnost při přetrhu
	[mm]	[mm]	[mm <sup>2</sup> ]	[N]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]
1	4,12	2,167	8,928	140,67	15,756	251,901
2	4,12	2,129	8,771	140,9	16,063	296,409
3	4,12	2,223	9,159	134,5	14,685	251,922
4	4,12	2,15	8,858	142,89	16,131	297,763
5	4,12	2,25	9,27	139,62	15,061	248,997
Min	4,12	2,129	8,771	134,5	14,685	248,997
Průměr	4,12	2,184	8,997	139,716	15,539	269,398
Max	4,12	2,25	9,27	142,89	16,131	297,763
S.O.	-	0,051	0,21	3,147	0,638	25,308
VK	-	2,329	2,329	2,252	4,107	9,394
D.H.D	4,12	2,121	8,737	135,809	14,747	237,975
H.H.D.	4,12	2,247	9,257	143,623	16,332	300,822



## C.6 Tabulka hodnot a graf mechanických zkoušek pro vzorky ongrovil po 168 hodinách degradace

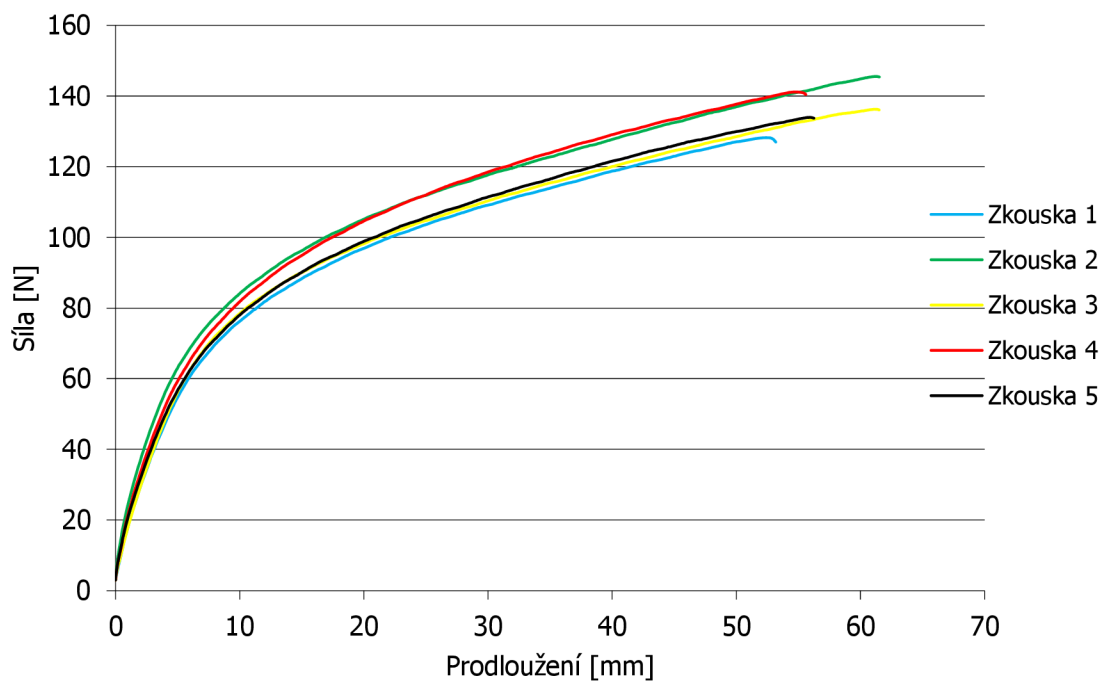
Zkouška	Šířka	Tloušťka	Obsah	Nejvyšší pevnost	Napětí při nejvyšší síle	Tažnost při přetrhu
	[mm]	[mm]	[mm <sup>2</sup> ]	[N]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]
1	4,12	2,26	9,311	147,79	15,872	301,732
2	4,12	2,275	9,373	143,14	15,272	277,104
3	4,12	2,324	9,575	141,23	14,75	237,914
4	4,12	2,331	9,604	149,97	15,616	238,315
5	4,12	2,28	9,394	146,21	15,565	286,614
Min	4,12	2,26	9,311	141,23	14,75	237,914
Průměr	4,12	2,294	9,451	145,668	15,415	268,336
Max	4,12	2,331	9,604	149,97	15,872	301,732
S.O.	-	0,032	0,13	3,514	0,429	28,953
VK	-	1,375	1,375	2,412	2,78	10,79
D.H.D	4,12	2,255	9,29	141,305	14,883	232,387
H.H.D.	4,12	2,333	9,613	150,031	15,947	304,285





## C.7 Tabulka hodnot a graf mechanických zkoušek pro vzorky ongrovil po 336 hodinách degradace

Zkouška	Šířka	Tloušťka	Obsah	Nejvyšší pevnost	Napětí při nejvyšší síle	Tažnost při přetrhu
	[mm]	[mm]	[mm <sup>2</sup> ]	[N]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]
1	4,12	2,12	8,73	128,20	14,69	264,55
2	4,12	2,21	9,09	145,53	16,02	306,56
3	4,12	2,31	9,50	136,25	14,35	305,36
4	4,12	2,24	9,23	141,12	15,30	276,75
5	4,12	2,15	8,85	133,96	15,13	280,58
Min	4,12	2,12	8,73	128,20	14,35	264,55
Průměr	4,12	2,20	9,08	137,01	15,10	286,76
Max	4,12	2,31	9,50	145,53	16,02	306,56
S.O.	-	0,07	0,30	6,65	0,64	18,50
VK	-	3,35	3,35	4,86	4,21	6,45
D.H.D	4,12	2,11	8,70	128,75	14,31	263,79
H.H.D.	4,12	2,30	9,46	145,27	15,89	309,73



## C.8 Tabulka přepočteného prodloužení- ongrovil

Doba stárnutí	Průřez	Prodloužení	Přepočítané prodloužení na průřez 9 mm <sup>2</sup>
[h]	[mm <sup>2</sup> ]	[%]	[%]
0	8,997	269,398	269,49
168	9,451	268,336	255,53
336	9,077	286,760	284,33