

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Diagnostický systém pro hodnocení  
teflonových trubek**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2012/2013

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jan ŠMÍDL**  
Osobní číslo: **E11N0169P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Název tématu: **Diagnostický systém pro hodnocení teflonových trubek**  
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

### Zásady pro vypracování:

1. Uveďte aspekty použití teflonových trubek v technologii elektrických strojů
2. Prostudujte a uveďte způsoby a technologické aspekty výroby těchto trubek
3. Stanovte, které vlastnosti a v jakých hladinách a tolerancích jsou rozhodující pro použití teflonových trubek v technologii elektrických strojů
4. Stanovte diagnostický systém pro ověřování elektrických a mechanických vlastností teflonových trubek
5. Porovnejte mechanické a elektrické vlastnosti teflonových trubek vyráběných technologií pístového vytlačování a vytlačováním z pasty



V Plzni dne 15. října 2012

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Mentlík, V.: Dielektrické prvky a systémy, BEN Praha 2006
2. Mentlík, V. et al: Diagnostika elektrických zařízení, BEN Praha 2008
3. Mentlík, V. et al: Spolehlivostní aspekty elektrotechnologie, BEN Praha 2011

Vedoucí diplomové práce: **Prof. Ing. Václav Mentlík, CSc.**

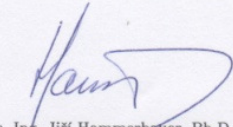
Katedra technologií a měření

Konzultant diplomové práce: **Ing. Petr Novák**

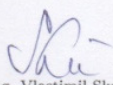
1. SERVIS ENERGO, s.r.o., Plzeň

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2012**

Termín odevzdání diplomové práce: **9. května 2013**

  
Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



  
Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

## **Anotace**

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na problematiku teflonových trubek pro použití k přivedení chladící vody do statoru velkých elektrických strojů. Tyto trubky jsou vyráběny dvěma technologiemi a tato práce porovnává jejich elektrické a mechanické vlastnosti. Práce také popisuje výrobu jednotlivými technologiemi a vlastnosti samotného PTFE.

## **Klíčová slova**

PTFE, chlazení elektrických strojů, mechanické zkoušky

## **Abstract**

Set up these is focused on issue of PTFE tubes for using in powerful electric machines for getting cooling water to this. These tubes are made two technologies and this thesis compare their electric and mechanic properties. Thesis also describes production individually technologies and properties of PTFE.

## **Key words**

PTFE, cooling of electric machines, mechanic exams

## **Prohlášení**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 6.5.2013

Jan Šmídl

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Václavu Mentlíkovi, CSc. za cenné rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále bych rád poděkoval Jaroslavu Bartoňovi za přípravu vzorků k měření.

## Obsah

<b>SEZNAM SYMBOLŮ .....</b>	<b>10</b>
<b>ÚVOD.....</b>	<b>11</b>
<b>1 CHLAZENÍ ELEKTRICKÝCH STROJŮ TOČIVÝCH.....</b>	<b>12</b>
1.1 NORMA ČSN EN 60 034 – 6.....	12
1.2 KAPALINOVÉ CHLAZENÍ .....	14
1.3 ROZVOD CHLADICÍ KAPALINY .....	14
<b>2 VÝROBA PTFE TRUBEK .....</b>	<b>16</b>
2.1 TECHNOLOGIE VYTLAČOVÁNÍ Z PASTY.....	16
2.2 TECHNOLOGIE PÍSTOVÉHO VYTLAČOVÁNÍ .....	17
<b>3 PTFE (POLYTETRAFLUORETHYLÉN) .....</b>	<b>20</b>
3.1 ELEKTRICKÉ VLASTNOSTI.....	21
3.2 MECHANICKÉ VLASTNOSTI.....	21
3.3 TEPELNÉ VLASTNOSTI.....	22
<b>4 DIAGNOSTIKA MATERIÁLU.....</b>	<b>23</b>
<b>5 STANDARDNÍ PODMÍNKY PRO ZKOUŠENÍ.....</b>	<b>24</b>
<b>6 MECHANICKÉ VLASTNOSTI.....</b>	<b>25</b>
6.1 TAHOVÉ VLASTNOSTI .....	25
6.2 OHYBOVÉ VLASTNOSTI.....	28
<b>7 ELEKTRICKÉ VLASTNOSTI.....</b>	<b>32</b>
7.1 IZOLAČNÍ ODPOR .....	32
<b>8 ZKOUŠENÍ VZORKŮ .....</b>	<b>34</b>
8.1 TAHOVÉ ZKOUŠKY .....	34
8.1.1 Popis zkoušky.....	34
8.1.2 Vyhodnocení naměřených hodnot.....	35
8.1.3 Naměřené hodnoty: vytlačování z pasty – normalizované vzorky .....	36
8.1.4 Naměřené hodnoty: pístové vytlačování – normalizované vzorky.....	41



8.1.5	Naměřené hodnoty: vytlačování z pasty – technologické vzorky.....	45
8.1.6	Naměřené hodnoty: pístové vytlačování – technologické vzorky .....	48
8.2	OHYBOVÉ ZKOUŠKY .....	51
8.2.1	Popis zkoušky.....	51
8.2.2	Vyhodnocení naměřených hodnot.....	52
8.2.3	Naměřené hodnoty: vytlačování z pasty .....	53
8.2.4	Naměřené hodnoty: pístové vytlačování.....	55
8.3	ELEKTRICKÉ ZKOUŠKY .....	57
8.3.1	Popis zkoušky.....	57
8.3.2	Vyhodnocení naměřených hodnot.....	57
8.3.3	Naměřené hodnoty: vytlačování z pasty .....	58
8.3.4	Naměřené hodnoty: pístové vytlačování.....	59
<b>9</b>	<b>ZHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT.....</b>	<b>61</b>
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>63</b>
	<b>LITERATURA.....</b>	<b>64</b>

## Seznam symbolů

Symbol	Veličina	Jednotky
A	Plocha	mm <sup>2</sup>
a	Vrubová houževnatost	J·m <sup>-2</sup>
b	Šířka zkušebního tělesa	mm
E( )	Střední hodnota	-
E <sub>p</sub>	Elektrická pevnost	kV/mm
E <sub>t</sub>	Modul pružnosti v tahu	MPa
F	Síla	N
f <sub>0</sub>	Statický součinitel tření	-
G	Elektrická vodivost	S
h	Tloušťka zkušebního tělesa	mm
i	Elektrický proud	A
l	Délka	mm
L	Rozpětí podpěr	mm
Me	Medián	-
p	Tlak	Pa
P	Výkon	W
p <sub>il</sub>	Polarizační index	-
R	Elektrický odpor	Ω
s	Průhyb	mm
T	Teplota	°C
tgδ	Ztrátový činitel	-
u	elektrické napětí	V
u <sub>A</sub>	Nejistota typu A	-
v	Rychlost	m/s
ε	Poměrné prodloužení	-;%
ε <sub>f</sub>	Deformace ohybem	%
ε <sub>r</sub>	Relativní permitivita	F/m
ε <sub>t</sub>	Jmenovité poměrné prodloužení	-
μ	Poissonův poměr	-
ν	Variační koeficient	-
ρ	Hustota	kg/m <sup>3</sup>
ρ <sub>vn</sub>	Vnitřní rezistivita	Ω·mm
σ	Směrodatná odchylka	-
σ <sub>f</sub>	Napětí v ohybu	MPa
σ <sub>fM</sub>	Pevnost v ohybu	MPa
σ <sub>M</sub>	Mez pevnosti v tahu	MPa
σ <sub>t</sub>	Napětí v tahu	MPa
χ	Elektronegativita	-

## Úvod

V této diplomové práci se zabývám diagnostikou teflonových (PTFE) trubek (hadic) využívaných v točivých strojích velkých výkonů. Hadice se používají pro přívod kapalného chladicího média do statorového vinutí, případně i do rotorového vinutí.

Vlivem ztrát v elektrických strojích vzniká teplo, které snižuje účinnost stroje. Z tohoto důvodu je potřeba přebytečné teplo odvádět. U kapalinou chlazených strojů se využívá dutých statorových vodičů, v nichž proudí chladící médium (voda nebo olej). Teflonové hadice se používají pro přívod média od zdroje (např. chladič) k statorovým vodičům. Rotor může být v takto velkých strojích chlazen vodíkem, potom se chlazení stroje nazývá kombinované. Druhá možnost chlazení je kapalinové, v tomto případě má stroj pouze kapalinové chlazení. Při montáži teflonových hadic je potřeba připojit je na určitá místa na čelech vinutí, a proto je nutné hadice tvarovat. Teflon je termoplast, a proto se snáze tvaruje za zvýšené teploty a při následném vychladnutí drží požadovaný tvar.

Teflonové hadice se vyrábějí dvěma technologiemi. Vytlačováním z pasty, což je náročnější způsob výroby. A druhá technologie je pístové vytlačování, tato technologie probíhá plně automaticky na speciálních strojích.

Cílem této práce je ověřit mechanické a elektrické vlastnosti teflonových hadic a zjistit, které z hadic mají lepší mechanické vlastnosti.

# 1 Chlazení elektrických strojů točivých

V elektrických točivých strojích vznikají ztráty (Jouleovy, hysterezní), které způsobují oteplení jednotlivých částí stroje. Proto je pro točivé stroje velice důležitý správný typ chlazení, aby při jmenovitém zatížení stroje oteplení nepřekročilo dovolené oteplení a zároveň aby stroje mohly dosahovat vysoké účinnosti. Pro stroje nižších výkonů se používá chlazení plynem (vzduch). Vzduch ve stroji může proudit pasivně, tzn. samovolným pohybem v atmosféře, nebo může být urychlován ventilátorem, který je upevněn na rotoru stroje. U strojů velkých výkonů již vzduch nestačí stroj dostatečně uchladit, pro tyto stroje se využívá kapalinové chlazení. To je možné realizovat chladící vodou nebo olejem. Většinou se kapalinové chlazení používá pouze pro chlazení statorového vinutí, ale lze použít i pro chlazení rotoru.[1]

V této kapitole uvedu používanou normu pro značení chlazení elektrických točivých strojů a blíže popíši kapalinové chlazení, které je ve většině případů zprostředkováno vodou. Pro toto chlazení je využíváno teflonových trubek (hadic).[2]

## 1.1 Norma ČSN EN 60 034 – 6

Tato norma uvádí jednotné značení provedení chlazení daného stroje. Popisuje použitý systém chlazení a ventilace, umístění ventilátoru a způsob nasávání chladiva.[3]

Označení chlazení strojů tedy začíná dvěma velkými písmeny IC a následuje písmeno s číselným kódem. Formát značení chlazení:

$$IC \ x \ ay \ bz,$$

kde skupiny ‚ay‘ a ‚bz‘ označují jednotlivé chladící okruhy. V případě jednoho chladícího okruhu se skupina ‚bz‘ neuvádí. Na pozici ‚x‘ se zadává číslice, jež značí způsob proudění chladiva, které je společné pro oba chladící okruhy. Pozice ‚y‘ a ‚z‘ se obsazují číslicemi, které pro jednotlivé chladící okruhy označují zdroj tlaku pro protlačení chladícího média. Na poslední volné pozice ‚a‘ a ‚b‘ se dosazují písmena označující chladící médium v jednotlivých chladících okruzích. Jednotlivé číslice a písmena pro označování chlazení jsou uvedena níže v tabulkách (Tab. 1, Tab. 2, Tab. 3).[3]

Tab. 1: Číslice pro označování způsobu proudění chladiva [3]

0	volný okruh (chladicí médium se nasává z okolního prostředí a tam se i vyfukuje)
1	přívod média z prostředí mimo umístění stroje a výfuk do prostředí, kde je stroj umístěn
2	odvod chladiva mimo prostředí stroje
3	přívod i odvod chladiva
4	povrchové chlazení
5	vestavěný výměník tepla (chlazeno médiem okolního prostředí)
6	nástavbový výměník tepla (chlazeno médiem okolního prostředí)
7	vestavěný výměník tepla (jiné chladicí médium nejčastěji voda)
8	nástavbový výměník (jiné chladicí médium nejčastěji voda)
9	obdélníkový výměník (vodní chlazení s odděleným tepelným výměníkem)

Tab. 2: Číslice pro označování zdroje tlaku pro protlačení chladicího média [3]

0	přirozená ventilace – teplo se odvádí přirozeným prouděním vzduchu a sáláním, bez použití ventilátoru
1	vlastní ventilace – vzduch je uváděn do pohybu ventilátorem, ten je buď na přímo na rotoru, nebo je rotorem stroje poháněn
2, 3, 4	dosud neurčeno
5	vestavěný ventilátor se samostatným elektrickým pohonem
6	nástavbový ventilátor se samostatným elektrickým pohonem
7	oddělená chladicí jednotka, s přívodem chladiva od jednoho nebo více zdrojů
8	náporové chlazení v důsledku relativního pohybu stroje (trakce)
9	proudění v důsledku jiného pohybu

Tab. 3: Písmena označující chladicí média [3]

A	vzduch
W	voda
H	vodík
U	olej
C	oxid uhličitý
N	dusík
F	freon
S	ostatní média

## 1.2 Kapalinové chlazení

Kapalinové chlazení se používá u velkých točivých strojů, kde již nestačí vzduchové chlazení. Kapalina dokáže navázat mnohonásobně více tepla než vzduch nebo vodík. Výkony strojů pro využití kapalinového chlazení se pohybují od 150MW výše. Obvykle se kombinuje s vodíkovým chlazením rotoru.[1]

Jedná se o přímé chlazení, což znamená, že kapalina se dostává co nejbližší ke zdroji tepla (ztrátám) a ochlazuje ho. Tento typ se používá zejména pro chlazení statorových vinutí. Ve statoru se nachází duté vodiče a k nim je od zdroje přivedena kapalina teflonovými hadicemi.[3]

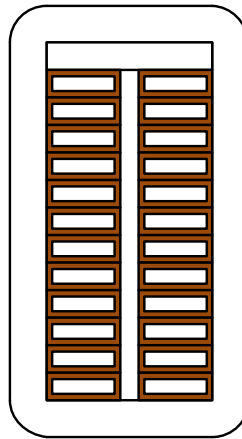
Pro točivé stroje velkých výkonů se používá kapalinového chlazení i pro rotorové vinutí. Toto provedení je konstrukčně složitější a problémem je přívod vody.[2]

Pro toto chlazení lze používat olej s nízkou viskozitou nebo upravenou vodu. Jedná se buď o destilovanou vodu, nebo chemicky upravenou vodu, která má vodivost 0,2 až 1  $\mu\text{S}$ . Použitím této vody se zabráňuje zanesení vodních kanálů rozmístěných ve vinutí a vytváření nánosů solí na jejich stěnách. Voda má oproti oleji lepší chladicí účinek a při rychlostech vody 1,5 až 2 m/s nehrozí žádné nebezpečí pro duté vodiče ani pro přívodní potrubí. Naopak olej má lepší izolační vlastnosti.[1, 2]

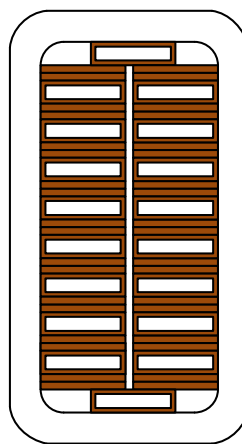
## 1.3 Rozvod chladicí kapaliny

Chladicí kapalina je od zdroje (chladiče) přiváděna k čelu statorového vinutí, odkud je teflonovými hadicemi připojena k vinutí. Vinutí je složeno z dutých vodičů, které jsou znázorněny na obr. 1 a obr. 2. Volba daného typu vodiče závisí na potřebě odvést dostatečné množství tepla, tzn. zvýšit účinnost ovlivněnou teplem do nejvyšší možné míry. Přívod a odvod chladicí kapaliny může být speciálně pro každou tyč nebo může být napájeno několik tyčí v sérii. Celý systém kapalinového chlazení statoru je znázorněn na obr. 3.[3, 4]

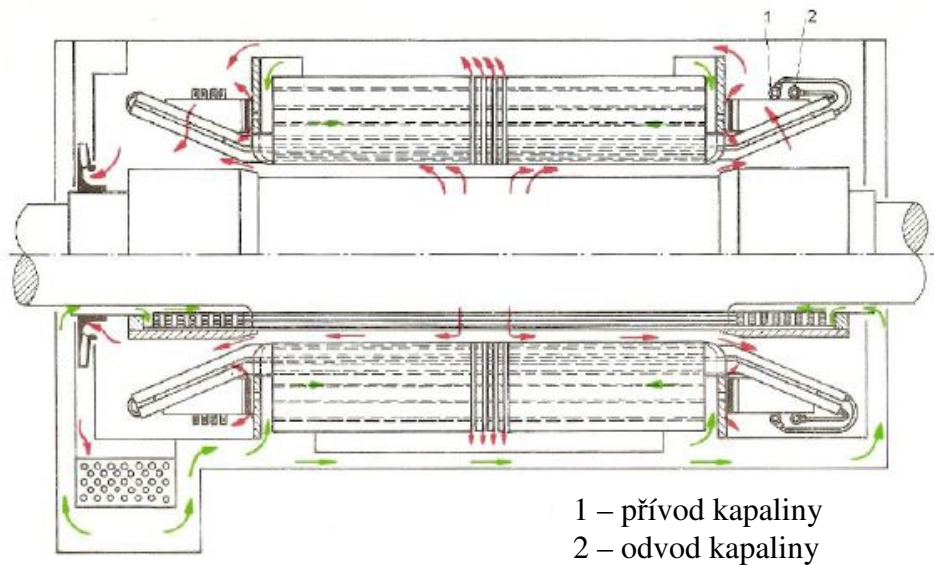
Po přivedení kapaliny do vinutí na sebe voda nebo olej naváže přebytečné teplo a následně ho odvádí z vinutí stroje. Při odvodu teplé kapaliny z vinutí je opět využíváno teflonových hadic, které mají vysokou teplotní a mechanickou odolnost. Následně je kapalina přiváděna do chladiče a v něm je ochlazována, aby mohla být následně použita pro další ochlazování stroje.[3, 4]



Obr. 1: Tyč se všemi vodiči dutými [3]



Obr. 2: Tyč s každým třetím vodičem dutým [3]



Obr. 3: Systém kombinovaného chladicího systému turboalternátoru s přívodem a odvodem kapaliny na stejné straně stroje (převzato z [3])

## 2 Výroba PTFE trubek

PTFE je velmi obtížné zpracovávat, důvodem je malá tekutost polymeru. Za vysokých teplot (nad 320°C) je omezena jeho tvárnost. V těchto teplotách se už PTFE blíží k bodu rozkladu. Z tohoto důvodu se ke zpracování PTFE používá některých způsobů zpracování známých z práškové metalurgie. Trubky se vyrábí z prášku vytlačováním na upravených vytlačovacích strojích.[4]

Plasty je možno zpracovat poměrně velkým množstvím různých technologií. Teflon se pro využití v točivých strojích zpracovává s využitím přímého tlaku.[5]

V mé diplomové práci testuji dva druhy zpracování teflonu. Prvním druhem technologie je vytlačování z pasty a druhým je pístové vytlačování. V dnešní době se již více využívá technologie pístového vytlačování, ale technologie vytlačování z pasty se v minimálním množství stále zachovala, kvůli vlastnostem trubek vyrobených touto technologií.[5]

Základním principem technologické operace vytlačování je kontinuální vytlačování taveniny plastu profilovacím zařízením (vytlačovací hlavou) do volného prostoru pro výrobky. Technologií vytlačování se mohou vyrábět konečné výrobky i polotovary různých tvarů. Já níže popisuji výrobu konečných výrobků – trubek.[6]

Trubky se vyrábějí z teflonu (PTFE) z důvodu jeho velice dobrých vlastností. Více o teflonu jako materiálu uvádím v další kapitole.

### 2.1 Technologie vytlačování z pasty

Výrobku vyrobenému touto technologií se také říká emulzní typ.

Základem této technologie je PTFE ve formě extraktu, který se v poměru smísí s denaturovaným lihem a vznikne emulze. Poměr PTFE a lihu je přibližně 60 ku 40 procentům. Po důkladném smísení těchto dvou složek následuje proces částečného vysušení a lisování vzniklé hmoty do podoby válcových tablet. Takto vzniklé tablety se vkládají do zařízení na výrobu teflonových trubek (obr. 4). Na stroji se zvolí dané průměry trubky. Po vložení tablety se stroj zahřeje na teplotu tavení PTFE (cca 300°C) a pomocí vytlačování tablety do profilovacího zařízení (tvar trychtýře) a pomocí vystředěného trnu vzniká trubka požadovaných rozměrů. Tímto postupem se ze stroje „vytlačí“ požadované trubky, ty musí určitou dobu ležet volně na vzduchu, aby z nich vyprchaly lihové výpary, které mohly výrobou vzniknout (doba je přibližně 5 dní). Následně se vyrobené trubky vkládají do pece a



za určité teploty se „vypékají“, aby získaly požadované vlastnosti.[7]

U tohoto způsobu výroby trubek by měly být lepší mechanické vlastnosti, které budou ověřovat v této diplomové práci.[7]

Z ekonomického hlediska je tato technologie náročnější. Je zapotřebí více času na výrobu trubky v důsledku přípravy materiálu a samotného procesu vytlačování. Proces není automatizovaný, je tedy více pracný než druhá uváděná technologie, a proto je optimálně zapotřebí dvoučlenná obsluha stroje. V neposlední řadě rozhoduje také technologicky nutný výměr<sup>1</sup>, který se dále zpracovává pro jiné využití (např. příměsi do olejů). Tato technologie má technologicky nutný výměr cca 25% - 50%. Tento výměr vzniká například při napojování tablet ve stroji, kdy nemusí vzniknout naprosto přesný spoj a případná „trhlina“ (porušená struktura) může následně v peci prasknout a tím dojde ke znehodnocení trubky.[7]



Obr. 4: Stroj pro technologii vytlačování z pasty [7]

## 2.2 Technologie pístového vytlačování

Výrobku vyrobenému touto technologií se také říká suspenzní typ.

Pracovní prostor se u zařízení pro tuto technologii skládá z pístu (hydraulický nebo mechanický pohon) a profilovací (vytlačovací) hlavy. Při výrobě pístovým vytlačováním je hlavním mechanismem vytlačování píst, který po zahřátí a spečení materiálu posune tlakem

---

<sup>1</sup> Jedná se o množství PTFE, které není možné zpracovat na výrobu trubky, ale má následně jiné využití. Tento termín jsem převzal po domluvě s Ing. Michalem Majchrákem, fa INTERNATIONAL TRADE & PRODUCT, s.r.o.

trubku o určitou vzdálenost. Na trubkách vyrobených touto metodou je vidět, že se skládají z malých prstýnků. Prstýnky mají výšku přesně takovou, o kterou je píst v jednotlivých krocích zatlačí.[7]

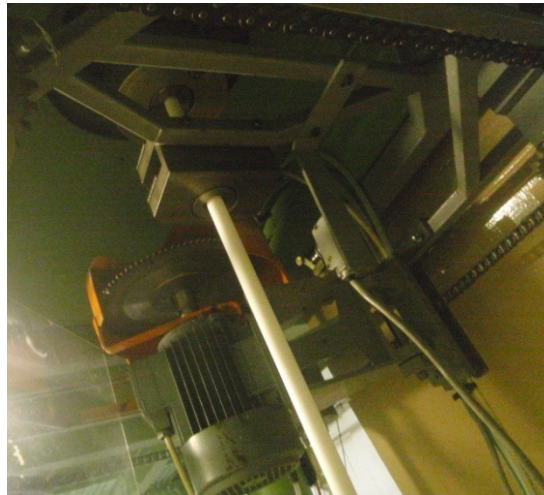
Do násypky materiálu, která je umístěna přímo na stroji, je vkládán suspenzní granulovaný předsintrovaný polytetrafluorethylén. Pomocí dávkovače je určité množství v jednotlivých cyklech uvolněno do pracovního prostoru. Tam je následně polytetrafluorethylén, za pomoci zahřívacích těles, zahřán na teplotu cca 315°C a následně spečen a vytlačen pístem o danou vzdálenost k vytlačovací hlavě. U vytlačovací hlavy má polytetrafluorethylén stále teplotu cca 315°C a je profilován do požadovaného tvaru. Z vytlačovací hlavy následně vyjíždí hotová trubka, která je dle stroje (plnoautomatický nebo poloautomatický) odebírána buď ručně, nebo je tlačena na přímo určené místo bez zásahu lidské pomoci.[7]

U vertikálně umístěných výrob pístovým vytlačováním polytetrafluorethylénu není na pístu potřeba vysoký tlak. Tlak je téměř nulový. To je zapříčiněno tím, že polytetrafluorethylén je jeden z nejtěžších plastů a tlak pístu nahrazuje zemská přitažlivost.[7]

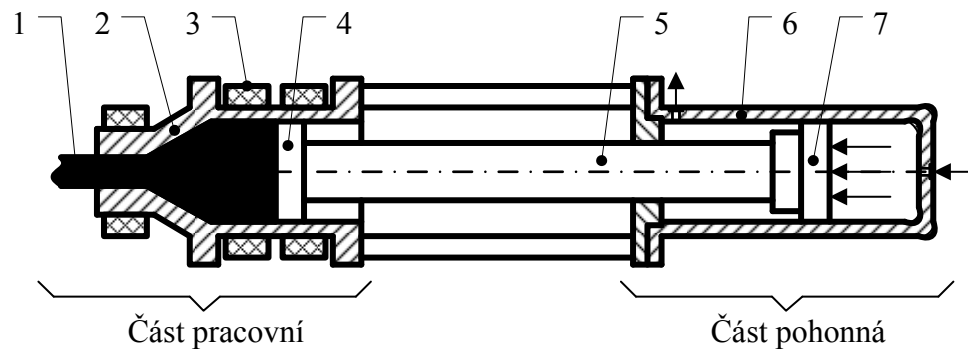
Výhodou této technologie oproti technologii vytlačování z pasty není potřeba nechat vytlačené trubky odležet a následně vypékat. Ze stroje vyjíždí hotové trubky, které jsou připraveny k použití. Další výhodou je velikost technologicky nutného výměru, ten u této technologie činí 10% - 15%. Tím odpadá i nutnost většího množství vstupního materiálu. Tato technologie se pro teflonové trubky používá ve většině případů a je téměř všude zprostředkována poloautomatickými, nebo dokonce plně automatickými stroji, čímž k obsluze tohoto stroje stačí jeden člověk. V případě plně automatického stroje je například ten samý člověk schopen zvládnout více strojů najednou, z čehož plyne mimo jiné ekonomická úspora.[7]



Obr. 5: Horní část stroje pro pístové vytlačování [7]



Obr. 6: Spodní část stroje pro pístové vytlačování (řezačka) [7]



Obr. 7: Schéma pístového vytlačování [8]

1 – vytlačovaný materiál, 2 – vytlačovací hlava, 3 – topný pás, 4 – pracovní píst, 5 - pístnice,  
6 – hydraulický válec, 7 – píst

### 3 PTFE (Polytetrafluorethylén)

Polytetrafluorethylén byl poprvé objeven v roce 1938 vlastně náhodou. Výzkumný chemik Dr. Roy Plunkett se zabýval vývojem netoxického a nehořlavého chladiva pro strojní zařízení. Při prohlížení válce kompresoru si všiml, že u sedla ventilu se nachází podivný bílý prášek. Následně zjistil, že se jedná o zpolymerovaný tetrafluorethylén, tj. polytetrafluorethylén. Tato bílá látka voskovitého vzhledu se začala dále rozšiřovat do průmyslu, domácností, televizní techniky. Později Dr. Plunkett získal na polytetrafluorethylén patent. A po dalších deseti letech výzkumu si polytetrafluorethylén zaregistrovala firma Du Pont (USA) pod obchodním názvem Teflon. V dnešní době se můžeme setkat s různými názvy např.: Hostaflon, Algoflon.[9, 10]

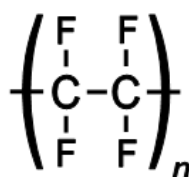
PTFE se vyrábí z chloroformu ( $\text{CHCl}_3$ ) částečnou fluorací a jako meziprodukty vznikají difluorchlormethan a tetrafluorethylén. Jako katalyzátor je v této reakci používán flourid – tetrachlorid antimoničný ( $\text{SbCl}_4\text{F}$ ).[11]



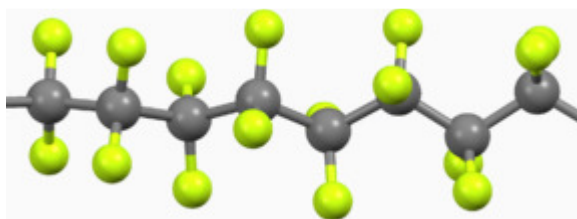
Tetrafluorethylén se ihned po vzniku podrobuje radikálové polymeraci při vysokém tlaku (cca 6 MPa). Dle podmínek při reakci vznikají molekuly PTFE rozdílné délky.[4, 11]



Celá polymerace se provádí v emulzi, která se chladí, z důvodu bezpečnosti. Reakce je velmi exotermická a monomer je při vysokých teplotách výbušný. Výsledná struktura vzniklého PTFE je na obrázku obr. 8 a obr. 9.[4]



Obr. 8: Vzorec PTFE [13]



Obr. 9: 3D struktura PTFE [převzato z 13]

Následně je PTFE téměř nereaktivní, nereaguje ani například se silnou kyselinou

jako je např. lučavka královská, důvodem jsou velmi silné vazby mezi atomy uhlíku a fluóru. Fluór je prvek s nejvyšší elektronegativitou ( $\chi = 4$ ) a uhlík má elektronegativitu  $\chi = 2,5$ . Oba prvky společně vytváří velmi stabilní polární vazbu. Do dnešní doby je známo minimálně sloučenin, které jsou schopny PTFE alespoň chemicky narušit. Příkladem může být roztavený sodík nebo fluór.[11, 12]

PTFE má největší měrnou hmotnost ze všech polymerů, hustotou se téměř vyrovná hliníku. Jeho výhodou je minimální absorpce vody (max. 0,01%) a nízká nasákavost i odolnost proti rozpouštědlům. Dále má velmi dobrou odolnost proti stárnutí, odolává povětrnostním vlivům i mikroorganismům. Je fyziologicky nezávadný při implantaci do živé tkáně, ale při větší dávce radioaktivního záření degraduje.[11, 12]

### 3.1 Elektrické vlastnosti

PTFE má velmi dobré elektroizolační vlastnosti, ty téměř nejsou závislé na teplotě a frekvenci. Elektrickou pevnost má vyšší než 10 kV/mm a měrný povrchový odpor dosahuje řádově vyšších hodnot než 1010  $\Omega$ . Vnitřní rezistivita dosahuje hodnot vyšších jak 1013  $\Omega \cdot \text{cm}$ . Permittivita u PTFE dosahuje nízkých hodnot, uvádí se, že  $\epsilon_r = 2,1$  F/m. a ztrátový činitel  $\text{tg}\delta$  dosahuje hodnot nižších než  $10^{-2}$ . [4, 12]

### 3.2 Mechanické vlastnosti

V porovnání s ostatními plasty má PTFE dobrou pevnost za vyšších teplot a dostatečnou pružnost při velmi nízkých teplotách. V širokém rozpětí teplot má velmi dobrou vrubovou a rázovou houževnatost. Vrubová houževnatost dosahuje hodnot 1,89 J/cm<sup>2</sup>. Při tlakovém zatížení se nedrtí, ale má sklon k tečení. Stupeň deformace je časově závislý na době působení zatěžujícího tlaku, proto se nedoporučuje, aby trvalé zatížení přesahovalo 10% ze zjištěné pevnosti při dané teplotě.[4, 12]

Hustota je 2150 – 2250 kg/m<sup>3</sup>. Pevnost v tahu je vyšší než 5 MPa, může dosahovat hodnot až 34,5 MPa. Tažnost je vyšší než 150%. Statický součinitel tření PTFE na oceli je 0,07 až 0,11. Má velmi nízkou nasákavost, ani při dlouhodobém uložení ve vodě nemění své rozměry.[4, 11]

### **3.3 Tepelné vlastnosti**

PTFE je teplotně stabilní ve velkém rozsahu teplot (od  $-170^{\circ}\text{C}$  až do  $+270^{\circ}\text{C}$ ). V celém rozsahu je ale potřeba respektovat vlastnosti v závislosti na teplotě. Při vyšších teplotách dochází k rozkladu a hmotnostnímu úbytku, ten je cca do  $380^{\circ}\text{C}$  nepatrný, ale při dalším zahřívání intenzita rozkladu roste a uvolňují se plynné rozkladné produkty, které ve styku se vzduchem a vzdušnou vlhkostí tvoří další sloučeniny. Takto vzniká například: fluorovodík, tetrafluorethylén atd.. Nevýhodou je, že skoro všechny takto vzniklé látky jsou toxické a mohou způsobit následně vážné problémy.[4, 12]

PTFE je jeden z nejméně hořlavých plastů, při zahřívání přímým plamenem se vznítí v důsledku plynných rozkladných produktů a po odstavení přímého plamene se hoření zastaví. Při zahřívání bez přímého plamene nezačne na vzduchu hořet až do teploty blížíící se  $575^{\circ}\text{C}$ .[4,12]

## 4 Diagnostika materiálu

V dnešní době je velký důraz v oblasti techniky kladen především na přesnost, kvalitu a spolehlivost jednotlivých elementů. To vše za odpovídající cenu a přijatelnou šetrnost k životnímu prostředí. Aby výrobci veškeré požadavky plnili, je nutné získávání informací během životního cyklu každého objektu. Získávání informací v současné elektrotechnice je natolik rozsáhlé, že se jím zabývá samostatná disciplína nazývaná diagnostika (z řeckého diagnosis – rozpoznání, určení).[14, 15]

V oblasti elektrotechniky jsou elektrická zařízení chápána jako sériové spolehlivostní řetězce, o jejichž spolehlivosti nejvíce vypovídá nejcitlivější místo v systému. V elektrickém zařízení se jedná o izolační systém. Ztráta provozuschopnosti tohoto místa může znamenat vyřazení celého zařízení. Z toho plyne, že se při projektování nových elektrických zařízení musí věnovat dostatečná pozornost použitým izolantům. Oblast izolantů je součástí tzv. materiálového inženýrství, které zajišťuje důležitý výběr materiálů, případně úpravu základních látek tak, aby plnily požadovanou vlastnost pro danou funkci.[14]

Elektrotechnická diagnostika využívá dva základní přístupy k diagnostikovanému objektu, jsou to přístupy fenomenologický a strukturální. Fenomenologický přístup se zabývá reakcemi zkoumaného objektu na vstupní diagnostické signály a strukturální přístup zkoumá děje přímo ve struktuře diagnostikovaného objektu. Z předešlé věty lze konstatovat, že větší výpovědischopnost má strukturální přístup, jehož šetření mají menší rozptyl hodnot. Naopak mezi výhody fenomenologického přístupu lze uvažovat jednoduchost, větší zkušenosti s přístupem (již je dlouho využíván) a z ekonomického hlediska je méně nákladný.[14]

K volbě přístupu také patří problematika výběru prováděných zkoušek a to buď nedestruktivní zkoušky, nebo destruktivní zkoušky. Větší výpovědischopnost mají destruktivní zkoušky, ale s destruktivním pojetím zkoušky je spojena nevýhoda v podobě velké spotřeby zkoušeného materiálu. V případě nedestruktivní zkoušky je zkoušený prvek po zkoušce nepoškozen a lze ten samý prvek použít opakovaně.[14]

Při diagnostice izolantů se využívá off – line postup. Při tomto postupu je zkoušený objekt ve zkušebním provozu, tím na něj nepůsobí pracovní zatížení. Druhý možný postup je on – line postup, kdy je zkoušený objekt v plném pracovním režimu. Tento postup s ohledem na bezpečnost nepřichází při diagnostice izolantů v úvahu.[14]

## 5 Standardní podmínky pro zkoušení

*Pro tuto kapitolu jsem čerpal informace z [14] a [16].*

Vlastnosti izolantů jsou určitou mírou ovlivnitelné podmínkami prostředí, v němž se izolant nachází. Z tohoto důvodu je důležité věnovat pozornost vlastnostem prostředí, ve kterém se zkoušený materiál nachází před zkouškou a během zkoušky. Příprava vzorku na zkoušku má dvě fáze. První fáze se nazývá předkondicionování a v ní dochází k odstranění minulých vlivů (např. teplota, vlhkost), kterým byl vzorek vystaven. Následuje fáze dvě, tzv. kondicionování, při této fázi se vzorek vystavuje působení prostředí o dané vlhkosti a teplotě na stanovenou dobu. V případě, že fáze jedna i dvě mají stejné podmínky, lze je sloučit do jedné operace.

Podmínky pro předkondicionování a kondicionování vzorků jsou doporučeny normou ČSN EN 60212 – „Standardní podmínky používané před zkoušením a během zkoušení elektroizolačních materiálů“.

Zkušební podmínky jsou dány teplotou, vlhkostí a atmosférickým tlakem, vše v době zkoušení. Podmínky pro standardní referenční prostředí jsou stanoveny takto: teplota 20°C, relativní vlhkost 65 % a tlak 1013 mbar.

Standardní zápis podmínek pro zkoušení odděluje podmínky přípravy vzorku matematickým znaménkem plus a podmínky při samotné zkoušce jsou dále odděleny středníkem. Pro příklad, když by předkondicionování probíhalo 63 hodin při teplotě 55°C a relativní vlhkosti 20 %, kondicionování 82 hodin při 23°C a při 65 % relativní vlhkosti a zkouška by probíhala za stejných podmínek, by zápisový kód vypadal takto:

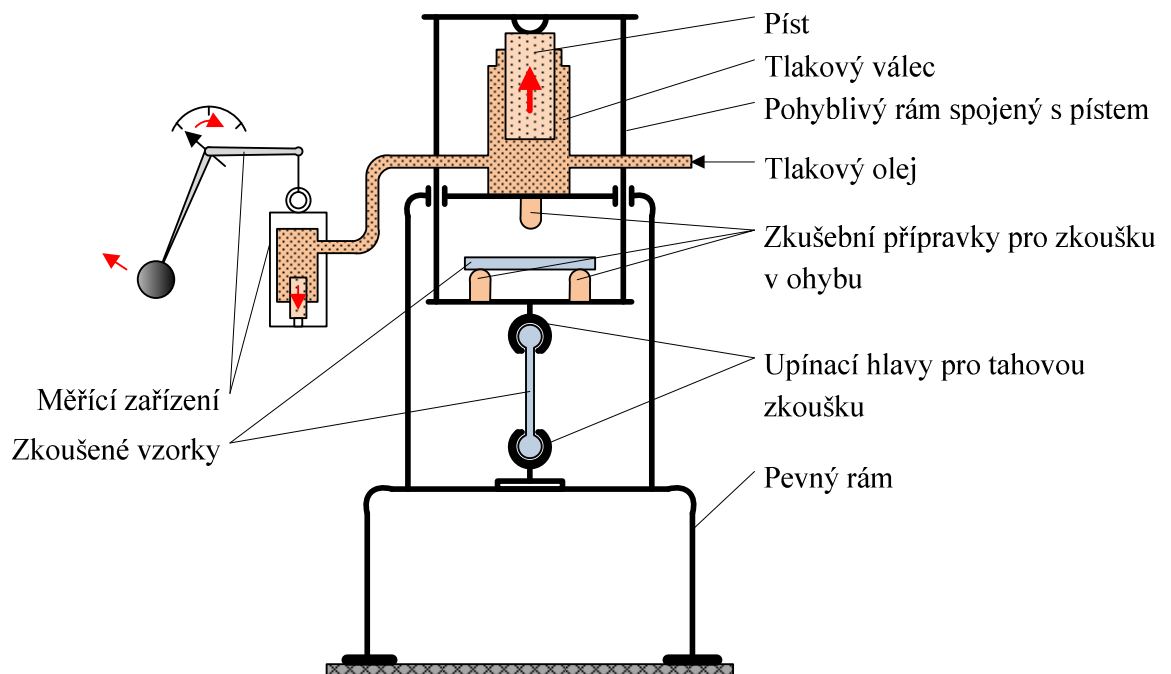
63h/55C/20%+82h/23C/65%;M/23C/65

Při spojení obou fází přípravy vzorku se první část kódu (před „+“) vynechá, tudíž je zápis oddělen pouze středníkem.



## 6 Mechanické vlastnosti

Izolanty jsou při výrobě a provozu kromě elektrického namáhání, namáhány i ostatními vlivy. Nejdůležitější z ostatních vlivů je mechanické namáhání izolantů, ke kterému může například docházet při změně teploty a následným vznikem sil způsobených dilatací materiálu, nebo se může jednat o namáhání vibracemi, atd. Mechanické namáhání může mít za následek až poškození materiálu do takové míry, kdy materiál ztratí i své charakteristické elektrické vlastnosti. Z tohoto důvodu mají mechanické vlastnosti při diagnostice izolantů důležité výpovědní informace. Z důvodu rozdílného působení namáhání na izolanty se u nich mechanická odolnost zjišťuje zkoušením základních vlastností, jako jsou pevnost v tahu, ohybu atd.[14]



Obr. 10: Schéma víceúčelového hydraulického zkoušecího zařízení pro tahovou a ohybovou zkoušku[17]

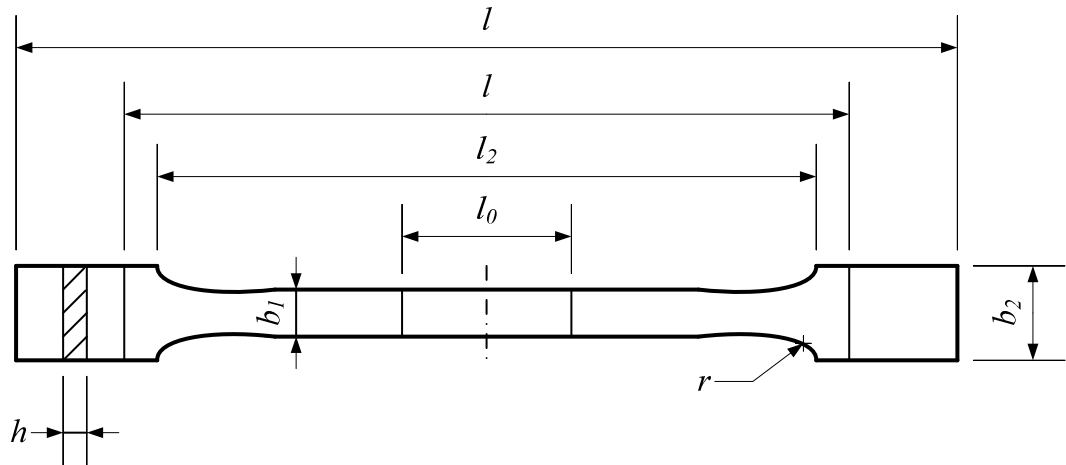
### 6.1 Tahové vlastnosti

*Pro tuto kapitolu jsem čerpal informace z [14] a [18].*

Postup pro měření tahových vlastností izolantů popisuje norma ČSN EN ISO 527 „Plasty – Stanovení tahových vlastností“. Tato norma se skládá z pěti částí, v nichž jsou popsány základní principy zkoušek, a v dalších částech jsou popsány zkušební postupy pro různé typy plastů.

Pro různé typy materiálů (fólie a tenké desky s vysokým poměrným prodloužením;

neohebné desky atd.) jsou charakterizovány různé tvary zkušebních těles. Při měření v této diplomové práci budu používat tvar zkušebního tělesa viz. obr 11, který se používá pro ostatní plasty. Nelze využít tvary těles pro tenké fólie a desky, protože tloušťka překračuje hodnotu 1 mm. Nutností je u každého vzorku vyznačit ve střední části počáteční měřenou délku. Tato vzdálenost je vyznačena rovnoběžnými čarami, jejichž vzdálenost se rovná 50 mm.



Obr. 11: Zkušební těleso pro tahovou zkoušku

Tab. 4: Rozměry zkušebního tělesa pro tahovou zkoušku

Rozměr	Vzorky zhotovené vstřikováním	Mechanicky obrobené vzorky
$b_1$	$10 \pm 0,2$	
$b_2$	$20 \pm 0,2$	
$h$	$4 \pm 0,2$	
$l_0$	$50 \pm 0,5$	
$l$	$115 \pm 1$	$l_2 + 5$
$l_2$	104 - 113	106 - 120
$l_3$	$\geq 150$	
$r$	20 - 25	> 60

Měření rozměrů vzorků se provádí s přesností na 0,02 mm nebo lepší, k tomuto měření se využívá mikrometr, nebo jiné měřicí zařízení, které umožňuje měřit s uvedenou přesností. U ohebných materiálů se k měření rozměrů využívají tloušťkoměry, které měří se stejnou přesností, ale za využití tlaku  $20 \pm 3$  kPa.

Před započítím měření se provádí kondicionování vzorků. To se provádí dle příslušné materiálové normy, nebo jsou vzorky uloženy minimálně 24 hodin při standardních

podmínkách ( $23 \pm 2^\circ\text{C}$  a  $50 \pm 5\%$  relativní vlhkosti).

Následně jsou vzorky upnuty do čelistí zkušebního stroje. Upnutí musíme věnovat zvýšenou pozornost, při měření nesmí dojít k vyklouznutí vzorku a podélná osa vzorku se musí shodovat s osou stroje. Zároveň také nesmí docházet k předčasnému lomu materiálu v čelistech. Rychlost zkoušení je popsána v příslušné materiálové normě a proto postupujeme dle normy v souladu s příslušnými tolerancemi. Stroj pro tahové zkoušky by měl vyvíjet rychlosti zkoušení pro 1, 2, 5, 10  $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$  s tolerancí  $\pm 20\%$ , pro 20, 50, 100, 200, 500  $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1} \pm 10\%$ . Siloměrový snímač má za úkol vyloučit vliv setrvačnosti působící síly a velikost působící síly musí udávat s vyšší přesností než 1 % měřené hodnoty síly. Průtahoměr nesmí měřené těleso kroutit nebo snad deformovat a musí umožňovat stanovení relativní změny počáteční měřené délky vzorku během celé zkoušky. Také musí vyloučit vliv setrvačnosti způsobované zkušební rychlostí a měřit s přesností na 1 % hodnot případně lepší.

Z výsledků měření lze zjistit **mez pevnosti v tahu**  $\sigma_M$  [MPa], která je definována jako maximální napětí v tahu působící na zkušební těleso během zkoušky. **Napětí v tahu**  $\sigma_t$  [MPa] se vypočítá dle vzorce 6.1 a vyjadřuje působící sílu vztaženou na jednotku plochy.

$$\sigma_t = \frac{F}{A} \quad (6.1)$$

$F$  naměřená hodnota síly [N]

$A$  plocha počátečního příčného průřezu zkušebního tělesa [ $\text{mm}^2$ ]

Dalším výpovědihodným parametrem o vlastnostech materiálu je **poměrné prodloužení**  $\varepsilon$  [%], které se vypočítá na základě počáteční měřené délky:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l_0 \cdot 100}{l_0} \quad (6.2)$$

$l_0$  počáteční měřená délka zkušebního tělesa [mm],

$\Delta l_0$  zvětšení délky zkušebního tělesa [mm].

Z počáteční vzdálenosti mezi čelistmi a zvětšením vzdálenosti mezi čelistmi lze jejich poměrem vypočítat **jmenovité poměrné prodloužení**  $\varepsilon_t$  [%] (stejný vzorec jako 6.2 jen se dosazují odlišné vzdálenosti).

Následně z poměrného prodloužení  $\varepsilon$  a napětí v tahu  $\sigma$  lze vypočítat **modul pružnosti v tahu**  $E_t$  [MPa]. Modul pružnosti v tahu vychází ze dvou daných hodnot poměrného prodloužení  $\varepsilon_1 = 0,05\%$  a  $\varepsilon_2 = 0,25\%$ .

$$E_t = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (6.3)$$

$\sigma_1$  napětí [MPa], při  $\varepsilon_1$

$\sigma_2$  napětí [MPa], při  $\varepsilon_2$

Pro vyjádření poměrného zúžení  $\varepsilon_n$  (v jednom ze dvou normálových rozměrů)

v začáteční pracovní části zkušebního tělesa k odpovídajícímu poměrnému prodloužení  $\varepsilon$  (ve směru tahu) slouží **Poissonův poměr**  $\mu$  [-].

$$\mu_n = - \frac{\varepsilon_n}{\varepsilon} \quad (6.4)$$

$\mu_n$  Poissonův poměr [-],  $n = b$  (šířka) nebo  $h$  (tloušťka), dle normálového směru

$\varepsilon_n$  deformace v normálovém směru [-],  $n = b$  (šířka) nebo  $h$  (tloušťka)

$\varepsilon$  poměrné prodloužení [-]

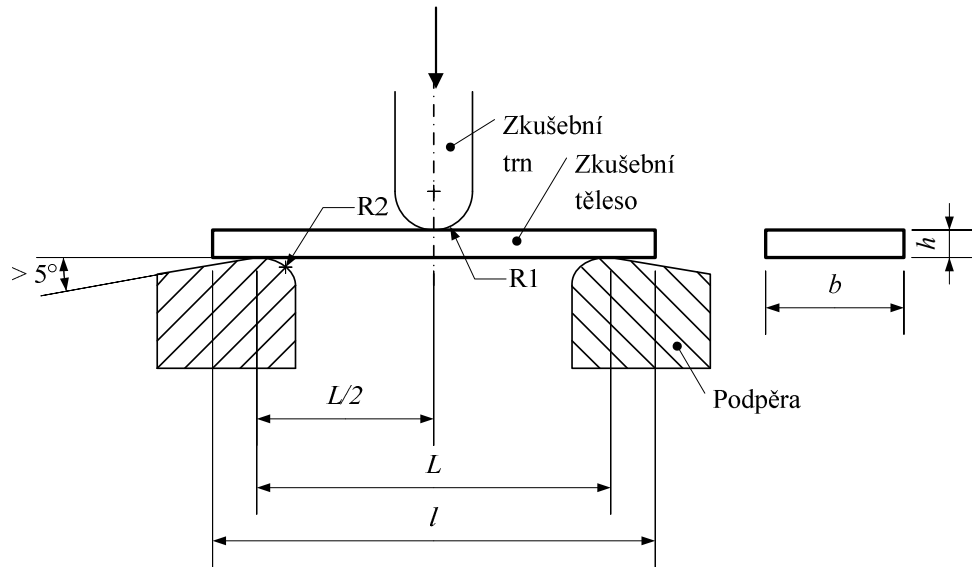
Výsledky zkoušek se zpracovávají statisticky, tzn. pomocí aritmetického průměru, směrodatné odchylky atd. hodnoty napětí v tahu a modulu pružnosti se zaokrouhlují na tři platná desetinná čísla a poměrné prodloužení i Poissonův poměr na dvě platná desetinná čísla.

## 6.2 Ohybové vlastnosti

*Pro tuto kapitolu jsem čerpal informace z [14] a [19].*

Zjištění ohybových vlastností, jako je pevnost v ohybu nebo průhyb atp., je důležité pro využití daného materiálu pro určité účely. Pro stanovení ohybových vlastností plastů je vedena norma ČSN EN ISO 178, kterou doplňují další normy, jenž popisují detaily pro specifické materiály (např. ČSN EN ISO 14125 „Vlákny vyztužené plastové kompozity - Stanovení ohybových vlastností“).

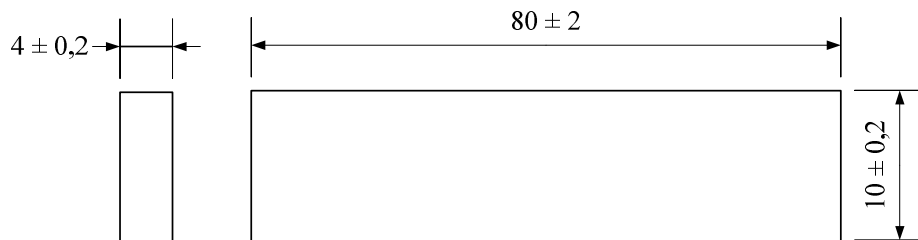
Před zkoušením je zkušební těleso uloženo do zkoušecího stroje jako nosník, tzn. je podloženo pouze na krajích (viz obr. 12). Při zkoušení je na zkoušené těleso vyvíjen tlak zkoušecím trnem přesně v polovině mezi podpěrami. Trn se za pomoci vyvíjené síly pohybuje konstantní rychlostí, síla je zároveň po celou dobu zkoušky měřena. Zkouška je prováděna do doby dokud se zkušební těleso neporuší nebo deformace nepřekročí předem stanovené hodnoty.



Obr. 12: Ohybová zkouška

Kondicionování vzorků se provádí dle příslušné normy, která je popsána v kapitole 5. Za předpokladu, že by vlhkost mohla ovlivňovat ohybové vlastnosti materiálu, je nutné ji při průběhu zkoušky měřit.

Rozměry přednostního zkušební tělesa jsou uvedeny na obr. 13. v případě, že nelze využít rozměr přednostního zkušební tělesa, musí být zachován poměr délky a tloušťky zkušební tělesa  $l/h = 20 \pm 1$ . A poměr tloušťky a šířky dle tab. 5.



Obr. 13: Rozměry přednostního zkušební tělesa pro ohybovou zkoušku

Tab. 5: Poměr tloušťky a šířky zkušební tělesa pro ohybovou zkoušku

Jmenovitá tloušťka $h$ [mm]	Šířka $b$ [mm]
$1 < h \leq 3$	$25,0 \pm 0,5$
$3 < h \leq 5$	$10,0 \pm 0,5$
$5 < h \leq 10$	$15,0 \pm 0,5$
$10 < h \leq 20$	$20,0 \pm 0,5$
$20 < h \leq 35$	$35,0 \pm 0,5$
$35 < h \leq 50$	$50,0 \pm 0,5$

Minimální počet zkoušených těles musí být pět, pro vyšší přesnost může být použito pro zkoušení více těles. Zlomí-li se vzorek během zkoušky mimo střední třetinu rozpětí podpěr, nelze tento vzorek brát v úvahu a je nutné místo něj měřit nový vzorek.

Pro nastavení rozpětí podpěr je nutné před zkouškou změřit tloušťku  $h$  ve střední části vzorků a následně stanovit aritmetický průměr tloušťky  $\bar{h}$ . Rozpětí podpěr se určí dle vztahu  $L = (16 \pm 1) \cdot \bar{h}$  a měří se s přesností na nejbližších 0,5%. Rychlost působení síly při zkoušce je na přednostní zkušební těleso  $2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ . Určí-li materiálová norma jinak, rychlost se může lišit. Během zkoušky je zaznamenávána působící síla a odpovídající průhyb. Rychlost zkoušení musí být ve stejných tolerancích jako u zkoušky tahem. Při měření musí ukazatel zatížení zaručit, že chyba indikované síly a indikovaného průhybu nepřekročí 1 % skutečné hodnoty.

Po měření je možné určit **pevnost v ohybu**  $\sigma_{fM}$  [MPa], což je maximální napětí v ohybu jaké zkušební těleso snese během zkoušky. **Napětí v ohybu**  $\sigma_f$  [MPa] se vypočítá podle vzorce (6.5).

$$\sigma_f = \frac{3 \cdot F \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (6.5)$$

$\sigma_f$  příslušné napětí v ohybu [MPa]

$F$  použitá síla [N]

$L$  rozpětí podpěr [mm]

$b$  šířka zkušební tělesa [mm]

$h$  tloušťka zkušební tělesa [mm]

Důležitým parametrem pro ohybovou zkoušku je **průhyb**  $s$  [mm]. Jedná se o vzdálenost mezi původní polohou horní nebo spodní hrany zkušební tělesa a maximálně vychýlenou horní nebo spodní hranou vzorku.

Když je znám průhyb, lze vypočítat **deformaci ohybem**  $\varepsilon_f$  [%].

$$\varepsilon_f = \frac{s \cdot h}{L^2} \cdot 100 \quad (6.6)$$

$\varepsilon_f$  příslušná deformace ohybem [%]

$s$  průhyb [mm]

$h$  tloušťka zkušební tělesa [mm]

$L$  rozpětí podpěr [mm]

**Modul pružnosti v ohybu**  $E_f$  [MPa] se vypočítá podle vzorce 6.8, ale nejprve se musí vypočítat průhyby  $s_1$  a  $s_2$  (6.7) při deformaci ohybem  $\varepsilon_{f1} = 0,05\%$  a  $\varepsilon_{f2} = 0,025\%$ .

Pro tyto průhyby se následně změří  $F_1$  a  $F_2$  a vypočítá  $\sigma_{f1}$  a  $\sigma_{f2}$  (6.5).

$$s_i = \frac{\varepsilon_{fi} \cdot L^2}{600h}, (i = 1,2) \quad (6.7)$$

$s_i$  jeden z průhybů [mm]

$\varepsilon_{fi}$  odpovídající deformace ohybem [%]

$$E_f = \frac{\sigma_{f2} - \sigma_{f1}}{\varepsilon_{f2} - \varepsilon_{f1}} \quad (6.8)$$

$E_f$  modul pružnosti v ohybu [MPa]

$\sigma_{f1}$  napětí v ohybu [MPa] při průhybu  $s_1$

$\sigma_{f2}$  napětí v ohybu [MPa] při průhybu  $s_2$

## 7 Elektrické vlastnosti

Pro tuto kapitolu jsem čerpal informace z [14] a [15].

Pro dielektrické systémy zařízení jsou důležité jejich absorpční a resorpční charakteristiky. Tyto charakteristiky poskytují velice cenné informace o stavu dielektrického systému. Absorpční charakteristika vzniká v důsledku působení stejnosměrného elektrického pole na dielektrikum. V důsledku polarizace se začne proud v dielektriku zvyšovat na hodnotu nabíjecího proudu  $i_0$ . Velikost nabíjecího  $i_0$  proudu závisí na stavu izolace a přiloženém napětí. Po dosažení špičky nabíjecího proudu  $i_0$  začíná dobíjecí proud  $i_d(t)$  klesat na hodnotu vodivostního proudu  $i_v(t)$ , která je následně po dobu působení vnějšího elektrického pole konstantní. V době mezi špičkou nabíjecího proudu  $i_0$  a ustálením na vodivostní proud  $i_v(t)$  lze v dielektriku naměřit absorpční proud  $i_a(t)$ . Absorpční proud  $i_a(t)$  se rovná rozdílu nabíjecího proudu  $i_0$  a vodivostního proudu  $i_v(t)$  v daném okamžiku. Pro resorpční charakteristiky, vyskytují se při odebrání vnějšího elektrického pole, platí, že vybíjecí proud  $i_k$  skokově vzroste a následně se asymptoticky resorpční proud  $i_r(t)$  přibližuje k nulové hodnotě, až ji dosáhne.

U suché nebo jinak nepoškozené izolace je absorpční proud převládající a je mnohem větší než proud vodivostní. Naopak u vlhké nebo jinak poškozené izolace není rozdíl mezi absorpčním a vodivostním proudem tak znatelný.

Pro velmi významnou výpovědní schopnost o dielektrickém systému se používá tzv. polarizačních indexů.

$$p_i = \frac{i_a(15)}{i_a(60)} \quad (7.1)$$

Polarizační index je podíl hodnot absorpčního proudu v patnácté a šedesáté vteřině od připojení působícího napětí. Pro diagnostiku izolace v elektrických strojích se využívá výpočtu desetiminutového polarizačního indexu. Zde se dosazují hodnoty absorpčního proudu v první a desáté minutě od přiložení napětí. Pro suchou izolaci je polarizační index několikanásobně větší než jedna, naopak u vlhké izolace se polarizační index blíží jedné.

Další významné veličiny měřené u dielektrických systémů jsou izolační odpor, vnitřní a povrchová rezistivita.

### 7.1 Izolační odpor

Izolační odpor zkoušeného materiálu se měří mezi dvěma elektrodami. Jedná se o poměr stejnosměrného napětí na elektrodách k celkovému proudu mezi elektrodami v daném čase po připojení napětí. Většinou se určuje jednu minutu po připojení napětí

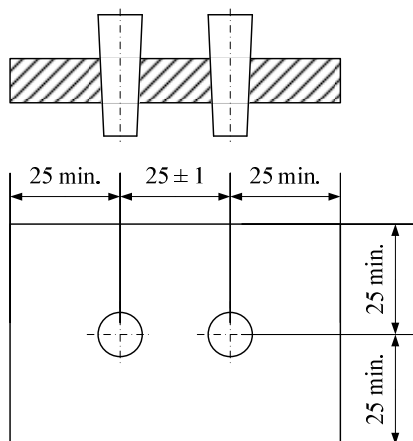


na elektrody.

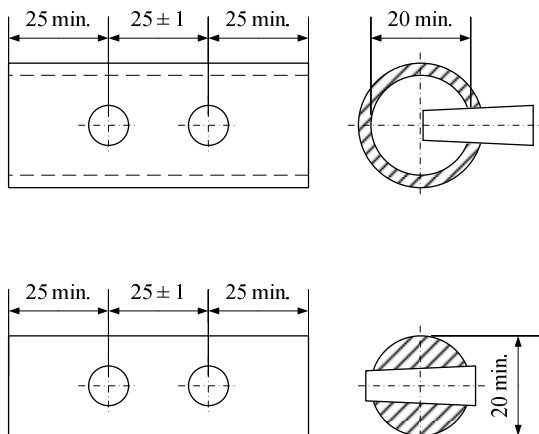
Pro měření izolačního odporu se využívá kolíčkových elektrod. Elektrody jsou vyrobeny z mosazi nebo oceli. Průměr je 5 mm a kuželovitost 1/50. Délka není pevně stanovena, závisí na vlastnostech zkoušeného tělesa, kde elektrody musí procházet celou tloušťkou zkoušeného tělesa. Elektrody se vkládají do paralelních otvorů, jejichž rozteč je  $25 \pm 1$  mm a musí s otvory přesně lícovat. Schematicky je zapojení zobrazeno na obr. 14 a obr. 15.

Kolíčkové elektrody se dají využít pro zkušební tělesa ve tvaru desek (min.  $50 \times 75$  mm) nebo pro trubky či tyče o minimální délce 75 mm.

Po sestavení elektrodového systému do zkušební tělesa se na elektrody přivede požadované napětí. Zdroj napětí musí být pro toto měření dostatečně stabilní. Doporučované napěťové hladiny jsou: 100, 250, 500, 1000, 2500, 5000, 10000, 15000 V. Nejčastěji využívané hodnoty jsou 100, 500, 1000 V. Následně se v určitém časovém intervalu po připojení napětí odečte z ampermetru proud, který bude mezi elektrodami. U kvalitních izolantů bude velikost proudu v řádech pikoAmper.



Obr. 14: Uspořádání elektrod pro desky dle normy



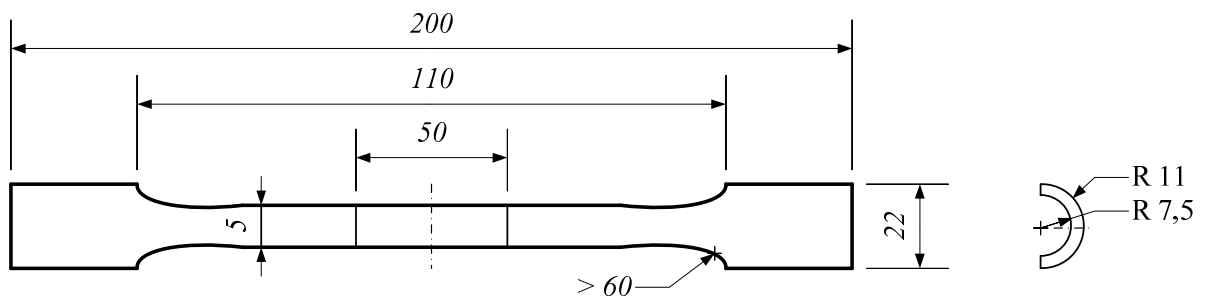
Obr. 15: Uspořádání elektrod pro trubky a tyče dle normy

## 8 Zkoušení vzorků

### 8.1 Tahové zkoušky

#### 8.1.1 Popis zkoušky

Pro tahovou zkoušku byly použity dva typy zkoušených vzorků. První typ byl vyroben z trubky  $22 \times 3,5$  mm rozměrově dle příslušné normy. Trubka byla obrobena pouze rozměrově, tzn. půlkruhový profil zůstal. Z důvodů vysokého poměrného prodloužení, a tím nemožnosti přetřhnout vzorky v použitém stroji, byla pracovní část vzorků *b1* zúžena na 5 mm. Tato změna byla učiněna na základě rozměrových doporučení pro zkoušení vzorků s vysokým poměrným prodloužením z normy ISO 527. Plocha příčného řezu byla  $17,73 \text{ mm}^2$ .



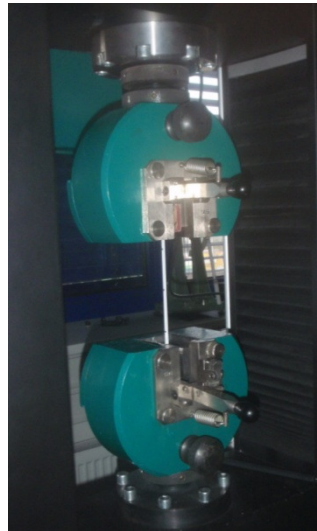
Obr. 16: Použité rozměry testovaného vzorku

Druhým typem zkušební vzorku byly přímo teflonové hadice. Hadice byly zkoušeny v délce 200 mm a byly do stroje upevněny pomocí speciálně vyrobených upínacích pomůcek.

Měření se provádělo při dvou teplotách zkoušených vzorků. První teplota byla  $21,5^\circ\text{C}$ , jednalo se o teplotu přímo ve zkušební místnosti. Druhá teplota byla  $70^\circ\text{C}$ . Na tuto teplotu byly vzorky temperovány v sušičce a následně při zkoušení zahřívány, aby nedocházelo k výraznému ochlazení. Tlak při měření byl 851,93 mbar a relativní vlhkost 63%.

Ke zkoušení bylo využito univerzálního zkoušecího stroje Lab test 3.100 (r. v. 2003, v. č. 028/03) připojeného pomocí převodníku k PC, ze kterého se stroj obsluhoval (SW: LabTest). K temperování vzorků byla využita sušička Salvis lab.

U normalizovaných vzorků bylo měření provedeno s četností 20 ks při každé teplotě a u technologických vzorků (hadice) byla četnost pět vzorků.



Obr. 17: Tahová zkouška normalizovaného vzorku



Obr. 18: Tahová zkouška technologického vzorku

### 8.1.2 Vyhodnocení naměřených hodnot

Z naměřených hodnot bylo vypočteno tahové napětí, poměrné prodloužení, jmenovité poměrné prodloužení a Poissonův poměr u každého měření. Modul pružnosti v tahu není spočten, protože nelze z naměřených hodnot přesně určit napětí při předepsaném prodloužení.

Z jednotlivých vypočtených hodnot byly vždy spočteny tyto statistické hodnoty:

a) střední hodnota:

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (8.1)$$

b) směrodatná odchylka.

$$\sigma(X_i) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - E)^2} \quad (8.2)$$

c) Variační koeficient

$$v = \frac{\sigma}{E} \quad (8.3)$$

d) Nejistota typu A

$$u_{AX} = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \sum_{i=1}^n (X_i - E)^2} \cdot k_s \quad (8.4)$$

e) Medián

$$\text{Med}(x) = \frac{x_{n+1}}{2} \quad (8.5)$$

$$\text{Med}(x) = \frac{\frac{x_n + x_{(n+2)}}{2}}{2} \quad (8.6)$$

Pro vypočtení nejistoty typu A (vzorec 8.4) u technologických vzorků bylo nutné počítat s koeficientem  $k_s = 1,4$ , jelikož počet měření byl menší než 10 ( $k_s = 1,4$  právě pro pět měření). V ostatních případech, kdy je počet měření větší než deset, se  $k_s$  rovná jedné.

Vzorec 8.5 pro výpočet mediánu je pro lichý počet naměřených hodnot a vzorec 8.6 pro sudý počet hodnot.

### 8.1.3 Naměřené hodnoty: vytlačování z pasty – normalizované vzorky

Normální teplota,  $T = 21,5^\circ\text{C}$

Tab. 6: Tahové napětí

Č. měření	1	3	6	7	12	14	15	16	17	18
F [N]	574,1	606,5	622,7	572,8	622,7	515,7	600	570,8	814,1	557,8
$\sigma_t$ [MPa]	32,378	34,207	35,122	32,307	35,122	29,085	33,841	32,195	45,914	31,463

$$E(\sigma_t) = 33,622 \text{ MPa}$$

$$\sigma(\sigma_t) = 3,620 \text{ MPa}$$

$$v = 0,108$$

$$u_{A\sigma} = 1,174 \text{ MPa}$$

$$\text{Med}(\sigma_t) = 32,400 \text{ MPa}$$

Tab. 7: Poměrné prodloužení

Č. měření	1	3	6	7	12	14	15	16	17	18
$\Delta l_0$ [mm]	156	93	87	195	194	158	196	209	105	193
$l_0$ [mm]	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
$\varepsilon$ [%]	312,00	186,00	174,00	390,00	388,00	316,00	392,00	418,00	210,00	386,00

$$E(\varepsilon) = 317,20 \%$$

$$\sigma(\varepsilon) = 89,47 \%$$

$$\nu = 0,28$$

$$u_{A\varepsilon} = 29,82 \%$$

$$\text{Med}(\varepsilon) = 351,00 \%$$

Tab. 8: Jmenovité poměrné prodloužení

Č. měření	1	3	6	7	12	14	15	16	17	18
$\Delta l_0$ [mm]	241,9	228,4	455	482	455	344,8	468,3	493,9	318,7	481,7
$l_0$ [mm]	118	67	67	67	53	53	53	53	53	53
$\varepsilon_t$ [%]	205,00	340,50	678,44	718,64	861,31	652,56	886,41	934,90	603,27	911,83

$$E(\varepsilon_t) = 679,29 \%$$

$$\sigma(\varepsilon_t) = 233,07 \%$$

$$\nu = 0,34$$

$$u_{A\varepsilon_t} = 98,12 \%$$

$$\text{Med}(\varepsilon_t) = 698,54 \%$$

Tab. 9: Poissonův poměr

Č. měření	1	3	6	7	12	14	15	16	17	18
$\varepsilon$ [%]	312,00	186,00	174,00	390,00	388,00	316,00	392,00	418,00	210,00	386,00
$\Delta b_0$ [mm]	2,4	2	2	2,8	2,7	2,5	2,6	2,9	2,2	2,8
$b_0$ [mm]	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
$\varepsilon_b$ [%]	48	40	40	56	54	50	52	58	44	56
$\mu_b$	-0,15	-0,22	-0,23	-0,14	-0,14	-0,16	-0,13	-0,14	-0,21	-0,15

$$E(\mu) = -0,17$$

$$\sigma(\mu) = 0,03$$

$$\nu = 0,21$$

$$u_{A\mu} = 0,01$$

$$\text{Med}(\mu) = -0,15$$

Níže uvedu vzorky, u nichž nedošlo k přetržení při normální teplotě z důvodu krátké pracovní dráhy stroje.

Tab. 10: Tahové napětí u neroztržených vzorků

Č. měření	2	4	5	8	9	10	11	13	19	20
F [N]	574,8	556,5	544,9	574,1	664,2	518,4	642,2	534,8	622,9	632,4
$\sigma_t$ [MPa]	32,420	31,387	30,733	32,380	37,462	29,239	36,221	30,164	35,133	35,668

$$E(\sigma_t) = 33,081 \text{ MPa}$$

$$\sigma(\sigma_t) = 2,693 \text{ MPa}$$

$$\nu = 0,081$$

$$u_{A\sigma_t} = 0.898 \text{ MPa}$$

$$\text{Med}(\sigma_t) = 32,400 \text{ MPa}$$

Tab. 11: Poměrné prodloužení u neroztržených vzorků

Č. měření	2	4	5	8	9	10	11	13	19	20
$\Delta l_0$ [mm]	186	205	204	226	224	223	224	239	231	236
$l_0$ [mm]	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
$\varepsilon$ [%]	372,00	410,00	408,00	452,00	448,00	446,00	448,00	478,00	462,00	472,00

$$E(\varepsilon) = 399,64 \%$$

$$\sigma(\varepsilon) = 129,86 \%$$

$$\nu = 0,32$$

$$u_{A\varepsilon} = 43,07 \%$$

$$\text{Med}(\varepsilon) = 448,00 \%$$

Tab. 12: Jmenovité poměrné prodloužení u neroztržených vzorků

Č. měření	2	4	5	8	9	10	11	13	19	20
$\Delta l_0$ [mm]	472,4	460,5	463,5	490,3	482,9	485,2	497	508,4	510,97	513,61
$l_0$ [mm]	113	67	67	67	67	67	67	53	53	53
$\varepsilon_t$ [%]	419,54	686,58	691,13	731,06	720,02	723,41	740,94	962,39	967,20	972,19

$$E(\varepsilon_t) = 692,22 \%$$

$$\sigma(\varepsilon_t) = 267,34 \%$$

$$\nu = 0,39$$

$$u_{A\varepsilon_t} = 88,67 \%$$

$$\text{Med}(\varepsilon_t) = 723,41 \%$$

Tab. 13: Poissonův poměr u neroztržených vzorků

Č. měření	2	4	5	8	9	10	11	13	19	20
$\varepsilon$ [%]	372,00	410,00	408,00	452,00	448,00	446,00	448,00	478,00	462,00	472,00
$\Delta b_0$ [mm]	2,6	2,7	2,7	2,8	2,7	2,8	2,7	2,8	2,7	2,9
$b_0$ [mm]	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
$\varepsilon_b$ [%]	52	54	54	56	54	56	54	56	54	58
$\mu_b$	-0,14	-0,13	-0,13	-0,12	-0,12	-0,13	-0,12	-0,12	-0,12	-0,12

$$E(\mu) = -0,11$$

$$\sigma(\mu) = 0,04$$

$$\nu = 0,32$$

$$u_{A\mu} = 0,01$$

$$\text{Med}(\mu) = -0,12$$

### Zvýšená teplota, T = 70°C

Tab. 14: Tahové napětí

Č. měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
F [N]	285,4	230,3	269,2	616,2	292,6	311,4	386	762,2	762,2	324,3
$\sigma_t$ [MPa]	16,098	12,988	15,183	34,756	16,503	17,561	21,768	42,988	42,988	18,293

11	12	13	14	15	16	18	19	20
386	343,8	321,1	356,8	638,9	817,3	379,5	561,1	424,9
21,768	19,390	18,109	20,122	36,036	46,097	21,402	31,646	23,963

$$E(\sigma_t) = 23,957 \text{ MPa}$$

$$\sigma(\sigma_t) = 10,590 \text{ MPa}$$

$$\nu = 0,442$$

$$u_{A\sigma_t} = 2,548 \text{ MPa}$$

$$\text{Med}(\sigma_t) = 18,293 \text{ MPa}$$

Tab. 15: Poměrné prodloužení

Č. měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\Delta l_0$ [mm]	207	182	184	183	263	142	215	204	129	190
$l_0$ [mm]	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
$\varepsilon$ [%]	414,00	364,00	368,00	366,00	526,00	284,00	430,00	408,00	258,00	380,00

11	12	13	14	15	16	18	19	20
179	234	206	200	132	136	202	126	232
50	50	50	50	50	50	50	50	50
358,00	468,00	412,00	400,00	264,00	272,00	404,00	252,00	464,00

$$E(\varepsilon) = 373,26 \%$$

$$\sigma(\varepsilon) = 75,53 \%$$

$$\nu = 0,20$$

$$u_{A\varepsilon} = 17,80 \%$$

$$\text{Med}(\varepsilon) = 380,00 \%$$

Tab. 16: Jmenovité poměrné prodloužení

Č. měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\Delta l_0$ [mm]	371	364,9	378,6	417	509,4	436,5	443,3	407,1	407,1	392,1
$l_0$ [mm]	53	53	53	53	53	62	62	62	62	62
$\varepsilon_t$ [%]	702,27	690,72	716,56	789,25	964,24	704,10	715,00	656,61	656,61	632,44

11	12	13	14	15	16	18	19	20
136,5	470,6	415,1	425,4	396,5	424,2	423,9	323,4	466,4
62	62	62	62	62	62	62	62	62
220,21	759,02	669,53	686,19	639,53	684,16	683,76	521,55	752,32

$$E(\varepsilon_t) = 676,00 \%$$

$$\sigma(\varepsilon_t) = 135,60 \%$$

$$\nu = 0,20$$

$$u_{A\varepsilon_t} = 31,96 \%$$

$$\text{Med}(\varepsilon_t) = 686,19 \%$$



Tab. 17: Poissonův poměr

Č. měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\varepsilon$ [%]	414,00	364,00	368,00	366,00	526,00	284,00	430,00	408,00	258,00	380,00
$\Delta b_0$ [mm]	2,8	3	3,2	3,1	3,2	2,6	3,3	3,2	2,4	2,9
$b_0$ [mm]	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
$\varepsilon_b$ [%]	56	60	64	62	64	52	66	64	48	58
$\mu_b$	-0,14	-0,16	-0,17	-0,17	-0,12	-0,18	-0,15	-0,16	-0,19	-0,15

11	12	13	14	15	16	18	19	20
358,00	468,00	412,00	400,00	264,00	272,00	404,00	252,00	464,00
2,8	3,1	2,9	2,9	2,3	2,5	2,8	2,3	3,1
5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
56	62	58	58	46	50	56	46	62
-0,16	-0,13	-0,14	-0,15	-0,17	-0,18	-0,14	-0,18	-0,13

$$E(\mu) = -0,16$$

$$\sigma(\mu) = 0,02$$

$$\nu = 0,13$$

$$u_{A\mu} = 0,01$$

$$\text{Med}(\mu) = -0,16$$

U měření číslo 17 nedošlo k přetržení vzorku, ale jelikož se jednalo pouze o jeden vzorek, neuvádím naměřené hodnoty.

#### 8.1.4 Naměřené hodnoty: pístové vytlačování – normalizované vzorky

Normální teplota,  $T = 21,5^\circ\text{C}$

Tab. 18: Tahové napětí

Č. měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
F [N]	421,6	398,9	405,4	405,4	398,9	415,1	386	395,7	389,2	389,2
$\sigma_t$ [MPa]	23,780	22,500	22,866	22,866	22,500	23,415	21,768	22,317	21,951	21,951

11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
382,7	424,9	408,7	389,2	395,7	408,7	402,2	389,2	402,2	411,9
21,585	23,963	23,049	21,951	22,317	23,049	22,683	21,951	22,683	23,231

$$E(\sigma_t) = 22,619 \text{ MPa}$$

$$\sigma(\sigma_t) = 0,650 \text{ MPa}$$

$$\nu = 0,029$$

$$u_{A\sigma_t} = 0,149 \text{ MPa}$$

$$\text{Med}(\sigma_t) = 22,591 \text{ MPa}$$

Tab. 19: Poměrné prodloužení

Č. měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\Delta l_0$ [mm]	18	22	24	23	17	17	16	12	16	18
$l_0$ [mm]	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
$\varepsilon$ [%]	36,00	44,00	48,00	46,00	34,00	34,00	32,00	24,00	32,00	36,00

11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
13	27	22	18	20	20	22	15	21	15
50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
26,00	54,00	44,00	36,00	40,00	40,00	44,00	30,00	42,00	30,00

$$E(\varepsilon) = 37,60 \%$$

$$\sigma(\varepsilon) = 7,53 \%$$

$$\nu = 0,20$$

$$u_{A\varepsilon} = 1,73 \%$$

$$\text{Med}(\varepsilon) = 36,00 \%$$

Tab. 20: Jmenovité poměrné prodloužení

Č. měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\Delta l_0$ [mm]	101,7	103	107,4	88,46	101,8	86,79	68,83	101,2	95,3	95,3
$l_0$ [mm]	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156
$\varepsilon_t$ [%]	65,17	66,01	68,83	56,71	65,24	55,63	44,12	64,85	61,09	61,09

11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
84,03	118,9	102,7	94,88	98,68	102	101,4	89,69	109,4	97,75
156	156	156	156	156	156	156	156	156	156
53,87	76,19	65,81	60,82	63,26	65,40	64,99	57,49	70,12	62,66

$$E(\varepsilon_t) = 62,47 \%$$

$$\sigma(\varepsilon_t) = 6,59 \%$$

$$\nu = 0,11$$

$$u_{A\varepsilon_t} = 1,51 \%$$

$$\text{Med}(\varepsilon_t) = 64,05 \%$$

Tab. 21: Poissonův poměr

Č. měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\varepsilon$ [%]	36,00	44,00	48,00	46,00	34,00	34,00	32,00	24,00	32,00	36,00
$\Delta b_0$ [mm]	0,7	0,8	1,05	0,95	0,6	0,8	0,7	0,45	0,5	0,8
$b_0$ [mm]	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
$\varepsilon_b$ [%]	14	16	21	19	12	16	14	9	10	16
$\mu_b$	-0,39	-0,36	-0,44	-0,41	-0,35	-0,47	-0,44	-0,38	-0,31	-0,44

11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
26,00	54,00	44,00	36,00	40,00	40,00	44,00	30,00	42,00	30,00
0,5	0,85	0,7	0,7	0,75	0,8	0,8	0,55	0,75	0,55
5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
10	17	14	14	15	16	16	11	15	11
-0,38	-0,31	-0,32	-0,39	-0,38	-0,40	-0,36	-0,37	-0,36	-0,37

$$E(\mu) = -0,38$$

$$\sigma(\mu) = 0,04$$

$$\nu = 0,11$$

$$u_{A\mu} = 0,01$$

$$\text{Med}(\mu) = -0,38$$

**Zvýšená teplota, T = 70°C**

Tab. 22: Tahové napětí

Č. měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
F [N]	223,8	236,8	220,5	217,3	217,3	217,3	207,6	188,1	201,1	201,1
$\sigma_t$ [MPa]	12,622	13,354	12,439	12,256	12,256	12,256	11,707	10,610	11,341	11,341

11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
188,1	178,4	204,3	227	197,8	227	214,1	214,1	197,8	207,6
10,610	10,061	11,525	12,805	11,158	12,805	12,073	12,073	11,158	11,707

$$E(\sigma_t) = 11,808 \text{ MPa}$$

$$\sigma(\sigma_t) = 0,821 \text{ MPa}$$

$$\nu = 0,070$$

$$u_{A\sigma_t} = 0,188 \text{ MPa}$$

$$\text{Med}(\sigma_t) = 11,890 \text{ MPa}$$

Tab. 23: Poměrné prodloužení

Č. měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\Delta l_0$ [mm]	64	69	64	70	73	60	64	56	65	66
$l_0$ [mm]	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
$\varepsilon$ [%]	128,00	138,00	128,00	140,00	146,00	120,00	128,00	112,00	130,00	132,00

11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
60	61	68	63	70	65	71	67	62	71
50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
120,00	122,00	136,00	126,00	140,00	130,00	142,00	134,00	124,00	142,00

$$E(\varepsilon) = 130,90 \%$$

$$\sigma(\varepsilon) = 8,66 \%$$

$$\nu = 0,07$$

$$u_{A\varepsilon} = 1,99 \%$$

$$\text{Med}(\varepsilon) = 130,00 \%$$

Tab. 24: Jmenovité poměrné prodloužení

Č. měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\Delta l_0$ [mm]	167,6	184	145,1	161,3	161,3	161,3	150,1	122,9	88,62	150,7
$l_0$ [mm]	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156
$\varepsilon_t$ [%]	107,41	117,92	93,01	103,39	103,41	103,41	96,22	78,77	56,81	96,62

11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
161,1	102,5	101,2	172,2	140,6	178,4	164,3	164,3	158	168,8
156	156	156	156	156	156	156	156	156	156
103,26	65,69	64,89	110,39	90,13	114,36	105,30	105,30	101,30	108,19

$$E(\varepsilon_t) = 96,29 \%$$

$$\sigma(\varepsilon_t) = 16,56 \%$$

$$\nu = 0,17$$

$$u_{A\varepsilon_t} = 3,80 \%$$

$$\text{Med}(\varepsilon_t) = 103,32 \%$$

Tab. 25: Poissonův poměr

Č. měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\varepsilon$ [%]	128,00	138,00	128,00	140,00	146,00	120,00	128,00	112,00	130,00	132,00
$\Delta b_0$ [mm]	1,65	1,7	1,6	1,6	1,7	1,6	1,65	1,85	1,75	1,65
$b_0$ [mm]	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
$\varepsilon_b$ [%]	33	34	32	32	34	32	33	37	35	33
$\mu_b$	-0,26	-0,25	-0,25	-0,23	-0,23	-0,27	-0,26	-0,33	-0,27	-0,25

11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
120,00	122,00	136,00	126,00	140,00	130,00	142,00	134,00	124,00	142,00
1,7	1,7	1,85	1,65	1,9	1,75	1,65	1,7	1,65	1,7
5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
34	34	37	33	38	35	33	34	33	34
-0,28	-0,28	-0,27	-0,26	-0,27	-0,27	-0,23	-0,25	-0,27	-0,24

$$E(\mu) = -0,26$$

$$\sigma(\mu) = 0,02$$

$$\nu = 0,08$$

$$u_{A\mu} = 0,01$$

$$\text{Med}(\mu) = -0,26$$

### 8.1.5 Naměřené hodnoty: vytlačování z pasty – technologické vzorky

Normální teplota,  $T = 21,5^\circ\text{C}$

Tab. 26: Tahové napětí

Č. měření	1	2	3	4	5
$F$ [N]	2549	2298	1380	2887	2799
$\sigma_t$ [MPa]	28,576	24,190	14,987	27,034	29,465

$$E(\sigma_t) = 20,709 \text{ MPa}$$

$$\sigma(\sigma_t) = 10,427 \text{ MPa}$$

$$\nu = 0,503$$

$$u_{A\sigma_t} = 7,151 \text{ MPa}$$

$$\text{Med}(\sigma_t) = 25,612 \text{ MPa}$$

Tab. 27: Poměrné prodloužení

Č. měření	1	2	3	4	5
$\Delta l_0$ [mm]	96	83	24	91	90
$l_0$ [mm]	50	50	50	50	50
$\varepsilon$ [%]	192,00	166,00	48,00	182,00	180,00

$$E(\varepsilon) = 128,00 \%$$

$$\sigma(\varepsilon) = 75,22 \%$$

$$\nu = 0,59$$

$$u_{A\varepsilon} = 51,59 \%$$

$$\text{Med}(\varepsilon) = 173,00 \%$$

Tab. 28: Jmenovité poměrné prodloužení

Č. měření	1	2	3	4	5
$\Delta l_0$ [mm]	233,7	193,9	61,3	219,7	230,1
$l_0$ [mm]	266	266	266	266	266
$\varepsilon_t$ [%]	87,81	72,88	23,04	82,55	86,48

$$E(\varepsilon_t) = 58,79 \%$$

$$\sigma(\varepsilon_t) = 34,42 \%$$

$$\nu = 0,59$$

$$u_{A\varepsilon_t} = 23,60 \%$$

$$\text{Med}(\varepsilon_t) = 77,71 \%$$

Tab. 29: Poissonův poměr

Č. měření	1	2	3	4	5
$\varepsilon$ [%]	192,00	166,00	48,00	182,00	180,00
$\Delta b_0$ [mm]	6,7	6,7	3,2	8,1	7,3
$b_0$ [mm]	18,40	18,60	18,50	19,00	18,60
$\varepsilon_b$ [%]	36,41	36,02	17,3	42,63	39,25
$\mu_b$	-0,19	-0,22	-0,36	-0,23	-0,22

$$E(\mu) = -0,24$$

$$\sigma(\mu) = 0,06$$

$$\nu = 0,25$$

$$u_{A\mu} = 0,07$$

$$\text{Med}(\mu) = -0,22$$

### Zvýšená teplota, T = 70°C

U měření tohoto typu výroby teflonových hadic při teplotě 70°C nedošlo z důvodu dosažení maximální délky stroje k přetržení vzorků. Proto uvádím hodnoty, které byly na vzorku v mezním napnutí dovoleném strojem.

Tab. 30: Tahové napětí

Č. měření	1	2	3	4	5
F [N]	1726	2138	1767	2070	1686
$\sigma_t$ [MPa]	19,347	22,505	19,188	22,478	18,310

$$E(\sigma_t) = 16,972 \text{ MPa}$$

$$\sigma(\sigma_t) = 7,760 \text{ MPa}$$

$$\nu = 0,457$$

$$u_{A\sigma_t} = 5,322 \text{ MPa}$$

$$\text{Med}(\sigma_t) = 19,268 \text{ MPa}$$

Tab. 31: Poměrné prodloužení

Č. měření	1	2	3	4	5
$\Delta l_0$ [mm]	176	112	173	101	168
$l_0$ [mm]	50	50	50	50	50
$\varepsilon$ [%]	352,00	224,00	346,00	202,00	336,00

$$E(\varepsilon) = 243,33 \%$$

$$\sigma(\varepsilon) = 123,98 \%$$

$$\nu = 0,51$$

$$u_{A\varepsilon} = 85,03 \%$$

$$\text{Med}(\varepsilon) = 280,00 \%$$

Tab. 32: Jmenovité poměrné prodloužení

Č. měření	1	2	3	4	5
$\Delta l_0$ [mm]	320,9	323,2	326,2	292,6	303
$l_0$ [mm]	266	266	266	266	266
$\varepsilon_t$ [%]	120,60	121,44	122,57	109,96	113,87

$$E(\varepsilon_t) = 98,07 \%$$

$$\sigma(\varepsilon_t) = 44,09 \%$$

$$\nu = 0,45$$

$$u_{A\varepsilon_t} = 30,24 \%$$

$$\text{Med}(\varepsilon_t) = 117,23 \%$$

Tab. 33: Poissonův poměr

Č. měření	1	2	3	4	5
$\varepsilon$ [%]	352,00	224,00	346,00	202,00	336,00
$\Delta b_0$ [mm]	9,2	7,7	9,4	8,3	9,3
$b_0$ [mm]	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00
$\varepsilon_b$ [%]	51,11	42,78	52,22	46,11	51,67
$\mu_b$	-0,15	-0,19	-0,15	-0,23	-0,15

$$E(\mu) = -0,17$$

$$\sigma(\mu) = 0,03$$

$$\nu = 0,18$$

$$u_{A\mu} = 0,05$$

$$\text{Med}(\mu) = -0,15$$

### 8.1.6 Naměřené hodnoty: pístové vytlačování – technologické vzorky

Normální teplota,  $T = 21,5^\circ\text{C}$

Tab. 34: Tahové napětí

Č. měření	1	2	3	4	5
$F$ [N]	1615	1507	1676	1517	1537
$\sigma_t$ [MPa]	20,766	19,385	21,560	19,511	19,762

$$E(\sigma_t) = 16,831 \text{ MPa}$$

$$\sigma(\sigma_t) = 7,566 \text{ MPa}$$

$$\nu = 0,450$$

$$u_{A\sigma_t} = 5,189 \text{ MPa}$$

$$\text{Med}(\sigma_t) = 19,637 \text{ MPa}$$



Tab. 35: Poměrné prodloužení

Č. měření	1	2	3	4	5
$\Delta l_0$ [mm]	23	17	18	16	18
$l_0$ [mm]	50	50	50	50	50
$\varepsilon$ [%]	46,00	34,00	36,00	32,00	36,00

$$E(\varepsilon) = 30,67 \%$$

$$\sigma(\varepsilon) = 14,41 \%$$

$$\nu = 0,47$$

$$u_{A\varepsilon} = 9,88 \%$$

$$\text{Med}(\varepsilon) = 35,00 \%$$

Tab. 36: Jmenovité poměrné prodloužení

Č. měření	1	2	3	4	5
$\Delta l_0$ [mm]	76,01	73,12	76,87	69,82	73,04
$l_0$ [mm]	245	253	253	253	253
$\varepsilon_t$ [%]	31,02	28,95	30,44	27,65	28,92

$$E(\varepsilon_t) = 24,50 \%$$

$$\sigma(\varepsilon_t) = 11,01 \%$$

$$\nu = 0,45$$

$$u_{A\varepsilon_t} = 7,55 \%$$

$$\text{Med}(\varepsilon_t) = 28,94 \%$$

Tab. 37: Poissonův poměr

Č. měření	1	2	3	4	5
$\varepsilon$ [%]	46,00	34,00	36,00	32,00	36,00
$\Delta b_0$ [mm]	2,9	2	2,8	2,2	2,2
$b_0$ [mm]	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00
$\varepsilon_b$ [%]	16,11	11,11	15,56	12,22	12,22
$\mu_b$	-0,35	-0,33	-0,43	-0,38	-0,34

$$E(\mu) = -0,37$$

$$\sigma(\mu) = 0,04$$

$$\nu = 0,10$$

$$u_{A\mu} = 0,10$$

$$\text{Med}(\mu) = -0,35$$

**Zvýšená teplota, T = 70°C**

Tab. 38: Tahové napětí

Č. měření	1	2	3	4	5
F [N]	1074	1165	1025	1130	918
$\sigma_t$ [MPa]	13,817	14,989	13,189	14,528	11,807

$$E(\sigma_t) = 11,388 \text{ MPa}$$

$$\sigma(\sigma_t) = 5,193 \text{ MPa}$$

$$v = 0,456$$

$$u_{A\sigma_t} = 3,562 \text{ MPa}$$

$$\text{Med}(\sigma_t) = 13,503 \text{ MPa}$$

Tab. 39: Poměrné prodloužení

Č. měření	1	2	3	4	5
$\Delta l_0$ [mm]	64	68	60	67	50
$l_0$ [mm]	50	50	50	50	50
$\varepsilon$ [%]	128,00	136,00	120,00	134,00	100,00

$$E(\varepsilon) = 103,00 \%$$

$$\sigma(\varepsilon) = 47,58 \%$$

$$v = 0,46$$

$$u_{A\varepsilon} = 32,63 \%$$

$$\text{Med}(\varepsilon) = 124,00 \%$$

Tab. 40: Jmenovité poměrné prodloužení

Č. měření	1	2	3	4	5
$\Delta l_0$ [mm]	128,8	142,2	122,4	138,5	105,4
$l_0$ [mm]	266	266	266	266	266
$\varepsilon_t$ [%]	48,40	53,43	45,98	52,04	39,63

$$E(\varepsilon_t) = 39,91 \%$$

$$\sigma(\varepsilon_t) = 18,40 \%$$

$$\nu = 0,46$$

$$u_{A\varepsilon_t} = 12,62 \%$$

$$\text{Med}(\varepsilon_t) = 47,19 \%$$

Tab. 41: Poissonův poměr

Č. měření	1	2	3	4	5
$\varepsilon$ [%]	128,00	136,00	120,00	134,00	100,00
$\Delta b_0$ [mm]	5,5	5,9	5,4	5,8	5,0
$b_0$ [mm]	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00
$\varepsilon_b$ [%]	30,56	32,78	30	32,22	27,78
$\mu_b$	-0,24	-0,24	-0,25	-0,24	-0,28

$$E(\mu) = -0,25$$

$$\sigma(\mu) = 0,01$$

$$\nu = 0,06$$

$$u_{A\mu} = 0,06$$

$$\text{Med}(\mu) = -0,24$$

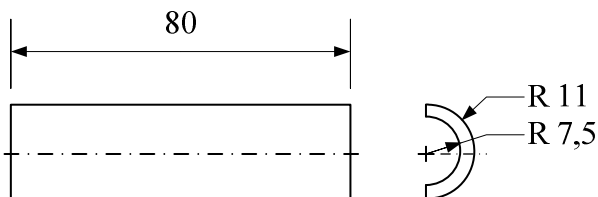
## 8.2 Ohybové zkoušky

### 8.2.1 Popis zkoušky

Pro ohybové zkoušky byly použity vzorky vyrobené mechanickým obrobením hadic. Zkušební tělesa i s rozměry jsou zobrazeny na obr. 19.

Zkoušení probíhalo při stejných podmínkách okolí (teplota, tlak, vlhkost) jako u tahových zkoušek. Pro testování za zvýšené teploty byly vzorky nejdříve temperovány v sušičce a následně zkoušeny v peci, ve které bylo 70°C.

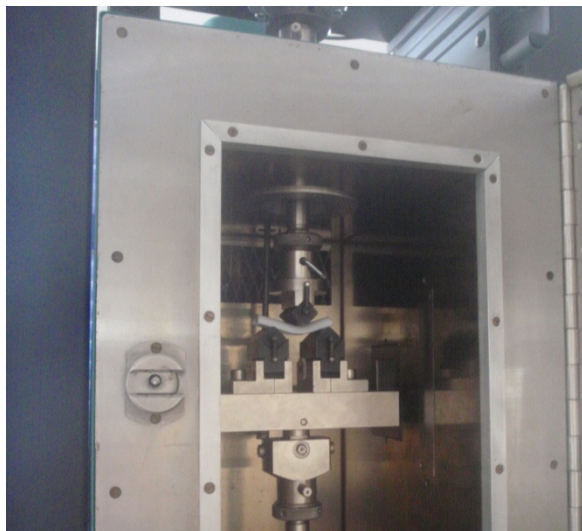
Rozpětí podpěr bylo dle vztahu z příslušné normy vypočítáno na  $L = 56$  mm



Obr. 19: Zkušební těleso pro ohybovou zkoušku

Bylo použito stejné vybavení jako u tahové zkoušky. Jen univerzální zkoušecí stroj byl přestaven pro ohybovou zkoušku.

Měření bylo provedeno na dvaceti vzorcích pro každou technologii a pro jednotlivé teploty okolí.



Obr. 20: Ohybová zkouška

### 8.2.2 Vyhodnocení naměřených hodnot

Z naměřených hodnot bylo vypočítáno napětí v ohybu a deformace ohybem. Modul pružnosti v ohybu nebyl spočten ze stejného důvodu jako u tahové zkoušky.

Z jednotlivých vypočtených hodnot byly vždy spočteny tyto statistické hodnoty:

a) střední hodnota:

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (8.7)$$

b) směrodatná odchylka.

$$\sigma(X_i) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - E)^2} \quad (8.8)$$

c) Variační koeficient

$$v = \frac{\sigma}{E} \quad (8.9)$$

d) Nejistota typu A

$$u_{AX} = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \sum_{i=1}^n (X_i - E)^2} \quad (8.10)$$

e) Medián

$$\text{Med}(x) = \frac{\frac{x_n}{2} + \frac{x_{(n+2)}}{2}}{2} \quad (8.11)$$

### 8.2.3 Naměřené hodnoty: vytlačování z pasty

Normální teplota,  $T = 21,5^{\circ}\text{C}$

Tab. 42: Napětí v ohybu

Č. měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
F [N]	282,70	270,28	259,45	267,10	246,09	287,47	297,66	276,33	307,84	243,54
$\sigma_f$ [MPa]	88,114	84,243	80,868	83,252	76,703	89,601	92,777	86,129	95,950	75,909

11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
257,86	264,23	272,51	288,42	262,32	281,10	281,10	283,01	283,01	269,64
80,372	82,357	84,938	89,897	81,762	87,616	87,616	88,211	88,211	84,044

$$E(\sigma_f) = 85,428 \text{ MPa}$$

$$\sigma(\sigma_f) = 4,895 \text{ MPa}$$

$$\nu = 0,057$$

$$u_{\Delta\sigma_f} = 1,123 \text{ MPa}$$

$$\text{Med}(\sigma_f) = 85,534 \text{ MPa}$$

Tab. 43: Deformace ohybem

Č. měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
s [mm]	7,41	7,07	7,30	5,54	5,77	6,92	6,99	6,73	6,80	5,81
$\varepsilon_f$ [%]	4,96	4,73	4,89	3,71	3,86	4,63	4,68	4,51	4,55	3,89

11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
5,73	5,92	6,38	6,84	6,15	6,88	6,88	6,38	6,65	5,12
3,84	3,96	4,27	4,58	4,12	4,61	4,61	4,27	4,45	3,43

$$E(\varepsilon_f) = 4,33 \%$$

$$\sigma(\varepsilon_f) = 0,41 \%$$

$$\nu = 0,10$$

$$u_{\Delta\varepsilon_f} = 0,10 \%$$

$$\text{Med}(\varepsilon_f) = 4,48 \%$$

**Zvýšená teplota, T = 70°C**

Tab. 44: Napětí v ohybu

Č. měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
F [N]	152,81	152,81	146,44	137,85	153,45	139,76	158,22	146,76	153,76	143,89
$\sigma_f$ [MPa]	47,629	47,629	45,644	42,966	47,829	43,562	49,315	45,743	47,925	44,849

11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
161,72	152,49	156,63	155,04	147,71	152,17	140,39	139,76	151,22	160,45
50,406	47,529	48,820	48,324	46,039	47,430	43,758	43,562	47,134	50,010

$$E(\sigma_f) = 46,805 \text{ MPa}$$

$$\sigma(\sigma_f) = 2,151 \text{ MPa}$$

$$\nu = 0,046$$

$$u_{A\sigma_f} = 0,493 \text{ MPa}$$

$$\text{Med}(\sigma_f) = 47,479 \text{ MPa}$$

Tab. 45: Deformace ohybem

Č. měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
s [mm]	7,60	7,60	6,11	7,80	6,34	7,61	9,48	6,00	6,57	6,46
$\varepsilon_f$ [%]	5,09	5,09	4,09	5,22	4,25	5,10	6,35	4,02	4,40	4,33

11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
6,96	8,03	7,34	7,15	8,26	7,03	7,11	7,07	5,96	8,64
4,66	5,38	4,92	4,79	5,53	4,71	4,76	4,73	3,99	5,79

$$E(\varepsilon_f) = 4,86 \%$$

$$\sigma(\varepsilon_f) = 0,60 \%$$

$$\nu = 0,12$$

$$u_{A\varepsilon_f} = 0,14 \%$$

$$\text{Med}(\varepsilon_f) = 4,77 \%$$

### 8.2.4 Naměřené hodnoty: pístové vytlačování

Normální teplota,  $T = 21,5^{\circ}\text{C}$

Tab. 46: Napětí v ohybu

Č. měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
F [N]	187,2	167,1	168,4	197,4	203,7	197,7	180,8	182,7	195,8	180,8
$\sigma_f$ [MPa]	58,345	52,092	52,491	61,521	63,503	61,621	56,359	56,955	61,025	56,359

11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
196,7	203,4	181,5	185,6	184	181,5	185	207,9	206,3	197,7
61,322	63,407	56,559	57,849	57,354	56,559	57,650	64,794	64,298	61,621

$$E(\sigma_f) = 59,084 \text{ MPa}$$

$$\sigma(\sigma_f) = 3,586 \text{ MPa}$$

$$\nu = 0,061$$

$$u_{A\sigma_f} = 0,823 \text{ MPa}$$

$$\text{Med}(\sigma_f) = 58,097 \text{ MPa}$$

Tab. 47: Deformace ohybem

Č. měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
s [mm]	9,4	7,95	7,11	7,37	6,59	6,65	7,31	8	7,21	7,47
$\varepsilon_f$ [%]	6,29	5,32	4,76	4,94	4,41	4,45	4,90	5,36	4,83	5,00

11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
7,05	7,13	7,24	7,25	6,91	7,13	8,35	6,91	7,25	7,06
4,72	4,77	4,85	4,85	4,63	4,77	5,59	4,63	4,85	4,73

$$E(\varepsilon_f) = 4,93 \%$$

$$\sigma(\varepsilon_f) = 0,42 \%$$

$$\nu = 0,08$$

$$u_{A\varepsilon_f} = 0,10 \%$$

$$\text{Med}(\varepsilon_f) = 4,84 \%$$

**Zvýšená teplota, T = 70°C**

Tab. 48: Napětí v ohybu

Č. měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
F [N]	113,7	123,8	114	116,5	114	63,99	111,4	98,05	118,1	114,3
$\sigma_f$ [MPa]	35,423	38,599	35,523	36,318	35,523	19,945	34,728	30,561	36,814	35,623

11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
126,4	114,3	119,4	128	123,5	115,9	107,9	127	121	121
39,394	35,623	37,209	39,890	38,500	36,118	33,637	39,591	37,705	37,705

$$E(\sigma_f) = 35,722 \text{ MPa}$$

$$\sigma(\sigma_f) = 4,211 \text{ MPa}$$

$$\nu = 0,118$$

$$u_{A\sigma_f} = 0,966 \text{ MPa}$$

$$\text{Med}(\sigma_f) = 36,218 \text{ MPa}$$

Tab. 49: Deformace ohybem

Č. měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
s [mm]	10,82	8,24	10,2	9,34	8,82	7,34	9,2	7,91	11,6	8,09
$\varepsilon_f$ [%]	7,25	5,52	6,83	6,25	5,91	4,92	6,16	5,30	7,77	5,42

11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
9,55	12,18	11,45	11,06	9,95	12,58	11,24	11,29	10,71	12,1
6,40	8,16	7,67	7,41	6,66	8,42	7,53	7,56	7,17	8,10

$$E(\varepsilon_f) = 6,82 \%$$

$$\sigma(\varepsilon_f) = 1,02 \%$$

$$\nu = 0,15$$

$$u_{A\varepsilon_f} = 0,23 \%$$

$$\text{Med}(\varepsilon_f) = 7,00 \%$$



## 8.3 Elektrické zkoušky

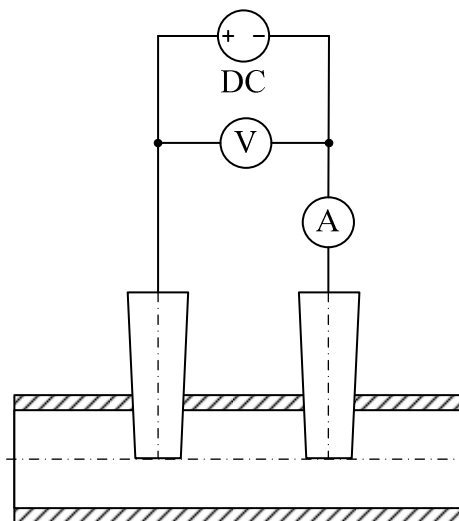
### 8.3.1 Popis zkoušky

Při elektrických zkouškách byl měřen izolační odpor a polarizační index zkušebních vzorků. Zkoušky byly prováděny na trubkách z obou typů výrob.

Měřilo se pomocí kolíčkových elektrod, jež byly zasunuty v předem připravených otvorech v trubce. Na elektrody bylo přiváděno stejnosměrné napětí 500V (přístroj: Keithley 248, high voltage supply) a byl odečítán protékající proud (přístroj: Keithley 6514, system electrometer).

Parametry prostředí při zkoušení byly následující: teplota  $T = 23^{\circ}\text{C}$ , tlak  $p = 964 \text{ mbar}$  a relativní vlhkost 56%.

U obou typů trubky bylo měřeno na patnácti zkušebních vzorcích při standardní teplotě ve zkušební místnosti.



Obr. 21: Schéma zapojení

### 8.3.2 Vyhodnocení naměřených hodnot

Z naměřených hodnot a z vědomosti, že se používalo stejnosměrné napětí 500V, byl vypočten izolační odpor teflonu (8.12). Dále byl z poměru absorpčních proudů spočten polarizační index (7.1).

$$R = \frac{u}{i_{60}} \quad (8.12)$$

Ze všech vypočtených hodnot byly spočteny tyto statistické hodnoty:

a) střední hodnota:

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (8.13)$$

b) směrodatná odchylka.

$$\sigma(X_i) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - E)^2} \quad (8.14)$$

c) Variační koeficient

$$v = \frac{\sigma}{E} \quad (8.15)$$

d) Nejistota typu A

$$u_{AX} = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \sum_{i=1}^n (X_i - E)^2} \quad (8.16)$$

e) Medián

$$\text{Med}(x) = x_{\frac{n+1}{2}} \quad (8.17)$$

### 8.3.3 Naměřené hodnoty: vytlačování z pasty

Tab. 50: Izolační odpor

Č. měření	1	2	3	4	5	6	7	8
$i_{60}$ [pA]	28	23	37	22	16	25	20	24
R [ $\Omega$ ]	1,79E+13	2,17E+13	1,35E+13	2,27E+13	3,13E+13	2,00E+13	2,50E+13	2,08E+13

9	10	11	12	13	14	15
21	19	23	35	28	32	26
2,38E+13	2,63E+13	2,17E+13	1,43E+13	1,79E+13	1,56E+13	1,92E+13

$$E_{(R)} = 2,01 \cdot 10^{13} \Omega$$

$$\sigma_{(R)} = 4,55 \cdot 10^{12} \Omega$$

$$v = 0,23$$

$$u_{AR} = 1,22 \cdot 10^{12} \Omega$$

$$\text{Med}_{(R)} = 2,00 \cdot 10^{13} \Omega$$

Tab. 51: Polarizační index

Č. měření	1	2	3	4	5	6	7	8
$i_{15}$ [pA]	157	122	192	148	82	94	83	128
$i_{60}$ [pA]	28	23	37	22	16	25	20	24
$p_{il}$ [-]	5,61	5,30	5,19	6,73	5,13	3,76	4,15	5,33

9	10	11	12	13	14	15
117	143	92	223	135	166	158
21	19	23	35	28	32	26
5,57	7,53	4,00	6,37	4,82	5,19	6,08

$$E(p_{il}) = 5,15$$

$$\sigma(p_{il}) = 0,84$$

$$v = 0,16$$

$$u_{A p_{il}} = 0,23$$

$$\text{Med}(p_{il}) = 5,25$$

### 8.3.4 Naměřené hodnoty: píستové vytlačování

Tab. 52: Izolační odpor

Č. měření	1	2	3	4	5	6	7	8
$i_{60}$ [pA]	62	48	92	35	37	34	36	58
R [ $\Omega$ ]	8,06E+12	1,04E+13	5,43E+12	1,43E+13	1,35E+13	1,47E+13	1,39E+13	8,62E+12

9	10	11	12	13	14	15
76	98	64	89	110	64	70
6,58E+12	5,10E+12	7,81E+12	5,62E+12	4,55E+12	7,81E+12	7,14E+12

$$E(R) = 9,37 \cdot 10^{12} \Omega$$

$$\sigma(R) = 3,47 \cdot 10^{12} \Omega$$

$$v = 0,37$$

$$u_{AR} = 5,93 \cdot 10^{11} \Omega$$

$$\text{Med}(R) = 8,06 \cdot 10^{12} \Omega$$

Tab. 53: Polarizační index

Č. měření	1	2	3	4	5	6	7	8
$i_{15}$ [pA]	363	163	605	161	261	217	208	352
$i_{60}$ [pA]	62	48	92	35	37	34	36	58
$p_{i1}$ [-]	5,85	3,40	6,58	4,60	7,05	6,38	5,78	6,07

9	10	11	12	13	14	15
287	569	362	524	395	371	358
76	98	64	89	110	64	70
3,78	5,81	5,66	5,89	3,59	5,80	5,11

$$E(p_{i1}) = 5,52$$

$$\sigma(p_{i1}) = 1,04$$

$$v = 0,19$$

$$u_{A p_{i1}} = 0,28$$

$$\text{Med}(p_{i1}) = 5,80$$

## 9 Zhodnocení naměřených hodnot

V tabulce 54 jsem názorně uvedl naměřené hodnoty u normalizovaných vzorků pro jejich snadné porovnání.

Tab. 54: Porovnání mechanických vlastností normalizovaných vzorků

Měření		Tah 20°C							
		$\sigma_t$ [Mpa]	$\nu(\sigma_t)$ [-]	$\varepsilon$ [%]	$\nu(\varepsilon)$ [-]	$\varepsilon_t$ [%]	$\nu(\varepsilon_t)$ [-]	$\mu$ [-]	$\nu(\mu)$ [-]
Typ výroby									
vytlačování z pasty		33,622	0,108	317,20	0,28	679,29	0,34	-0,17	0,21
pístové vytlačování		22,619	0,029	37,60	0,20	62,47	0,11	-0,38	0,11
Měření		Tah 70°C							
		$\sigma_t$ [Mpa]	$\nu(\sigma_t)$ [-]	$\varepsilon$ [%]	$\nu(\varepsilon)$ [-]	$\varepsilon_t$ [%]	$\nu(\varepsilon_t)$ [-]	$\mu$ [-]	$\nu(\mu)$ [-]
Typ výroby									
vytlačování z pasty		23,957	0,442	373,26	0,20	676,00	0,20	-0,16	0,13
pístové vytlačování		11,808	0,070	130,90	0,07	96,29	0,17	-0,26	0,08
Měření		Ohyb 20°C				Ohyb 70°C			
		$\sigma_f$ [Mpa]	$\nu(\sigma_f)$ [-]	$\varepsilon_f$ [%]	$\nu(\varepsilon_f)$ [-]	$\sigma_f$ [Mpa]	$\nu(\sigma_f)$ [-]	$\varepsilon_f$ [%]	$\nu(\varepsilon_f)$ [-]
Typ výroby									
vytlačování z pasty		85,428	0,057	4,33	0,10	46,805	0,046	4,86	0,12
pístové vytlačování		59,084	0,061	4,93	0,08	35,722	0,118	6,82	0,15

Z hodnot lze vyčíst, že výroba trubek technologií vytlačování z pasty má vyšší hodnoty tahového i ohybového napětí. Dále je větší její poměrné i jmenovité poměrné prodloužení v tahu. Naopak při ohybových zkouškách se ukázalo, že deformace ohybem je u technologie pístovým vytlačováním nepatrně větší.

Tabulka 55 obsahuje porovnání naměřených hodnot u technologických vzorků. Hodnoty u vytlačování z pasty 70°C jsou hodnoty na maximální délce stroje (nedošlo k roztržení vzorků), lze tedy usuzovat, že hodnoty při přetržení by byly větší. Ale i ze zmíněných hodnot je vidět vyšší tahové napětí i prodloužení. Stejně měření dopadlo i při teplotě 20°C, kde technologie vytlačováním z pasty má také vyšší hodnoty napětí v tahu i prodloužení.

Tab. 55: Porovnání mechanických vlastností technologických vzorků

Měření Typ výroby		Tah 20°C							
		$\sigma_t$ [Mpa]	$\nu(\sigma_t)$ [-]	$\varepsilon$ [%]	$\nu(\varepsilon)$ [-]	$\varepsilon_t$ [%]	$\nu(\varepsilon_t)$ [-]	$\mu$ [-]	$\nu(\mu)$ [-]
vytlačování z pasty		20,709	0,503	128,00	0,59	58,79	0,59	-0,24	0,25
pístové vytlačování		16,831	0,450	30,67	0,47	24,50	0,45	-0,37	0,10
Měření Typ výroby		Tah 70°C							
		$\sigma_t$ [Mpa]	$\nu(\sigma_t)$ [-]	$\varepsilon$ [%]	$\nu(\varepsilon)$ [-]	$\varepsilon_t$ [%]	$\nu(\varepsilon_t)$ [-]	$\mu$ [-]	$\nu(\mu)$ [-]
vytlačování z pasty		16,972	0,457	243,33	0,51	98,07	0,45	-0,17	0,18
pístové vytlačování		11,388	0,456	103,00	0,46	39,91	0,46	-0,25	0,06

Při měření elektrických vlastností a jejich následném vyhodnocení vyšly hodnoty izolačního odporu u technologie vytlačování z pasty vyšší než u pístového vytlačování. Při měření byly v trubkách vyrobených pístovým vytlačováním měřeny nepatrně vyšší proudy. To může být způsobeno mísením čistého teflonu a denaturovaného lihu při výrobě trubek vytlačovaných z pasty.

Tab. 56: Porovnání elektrických vlastností

Typ výroby	R [ $\Omega$ ]	$\nu(R)$ [-]
vytlačování z pasty	2,01E+13	0,23
pístové vytlačování	9,37E+12	0,37

## **Závěr**

Z hodnot získaných měření a vyhodnocením je vidět poměrně velký rozdíl v mechanických vlastnostech z jednotlivých typů výrob hadic. U vytlačování z pasty jsou hodnoty tahového i ohybového napětí přibližně 1,5x vyšší než u pístového vytlačování. Hodnoty prodloužení mají trubky vyrobené z pasty cca 2,5x vyšší. U elektrických vlastností zaostávají trubky z pístového vytlačování cca o 10 TΩ.

Změřené vlastnosti koresponduje také pořizovací cena, která je u vytlačování z pasty 3x vyšší než u pístového vytlačování.

Mechanické i elektrické vlastnosti má lepší technologie vytlačování z pasty. Vlastnosti jsou přibližně 2,5x vyšší než u pístového vytlačování, ale i cena trubek vyrobených vytlačováním z pasty je přibližně 3x vyšší.

## Literatura

- [1] BENDA, B., K. PÁCAL, D. ZDENĚK a E. ONDRUŠKA. *Konstrukce elektrických strojů*. Praha: SNTL, 1967. ISBN L25-B3-IV-41/52124/XII.
- [2] PETROV, G.N. *Elektrické stroje 2*. Praha: Academia, 1982.
- [3] *Způsoby chlazení elektrických strojů točivých*. Plzeň, 2010. Bakalářská práce. ZČU v Plzni.
- [4] *Expertní systém identifikace polymerů* [online]. [cit. 2012-12-17]. Dostupné z: <http://fyzika.ft.utb.cz/klic/index.php?lang=cz&char=PTFE&menu=4&act=2>
- [5] KUČEROVÁ, Eva. *Elektrotechnické materiály*. 1. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2002, 174 s. ISBN 80-708-2940-0.
- [6] LENFELD, Petr. TECHNICKÁ UNIVERZITA LIBEREC. *Katedra tváření kovů a plastů - skripta* [online]. [cit. 2012-12-10]. Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce\\_plasty/06.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/06.htm)
- [7] Osobní konzultace s Ing. Michalem Majchrákem, fa INTERNATIONAL TRADE & PRODUCT, s.r.o.; 27.11.2012; Chropyně
- [8] UNIVERZITA TOMÁŠE BATI. *Vytlačování*. Dostupné z: [http://web.ft.utb.cz/cs/docs/3.\\_Vytla\\_\\_ov\\_\\_n\\_\\_.pdf](http://web.ft.utb.cz/cs/docs/3._Vytla__ov__n__.pdf)
- [9] Materiál PTFE. *TECHSEAL s.r.o., průmyslové těsnění* [online]. 2012 [cit. 2012-12-18]. Dostupné z: <http://www.techseal.cz/files/sortiment/ptfe/ptfe2.pdf>
- [10] Teflon. *Q-klub Příbram* [online]. [cit. 2012-12-18]. Dostupné z: <http://www.quido.cz/objevy/teflon.htm>
- [11] POLLÁK, V. Polytetrafluórethylén (TEFLON). MATNET SLOVENSKO. [online]. [cit. 2012-12-17]. Dostupné z: <http://www.matnet.sav.sk/index.php?ID=551&pg=3>
- [12] Teflon. SITTECH.CZ. Těsnění SITTECH CZ [online]. [cit. 2012-12-18]. Dostupné z: [http://www.sittech.cz/ptfe/teflon\\_informace.htm](http://www.sittech.cz/ptfe/teflon_informace.htm)
- [13] Polytetrafluoroethylene. *Wikipedia* [online]. 2012 [cit. 2012-12-18]. Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/Polytetrafluoroethylene>
- [14] MENTLÍK. *Dielektrické prvky a systémy*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-189-6. Dostupné z: <http://shop.ben.cz/121267>
- [15] MENTLÍK, Václav, Josef PIHERA, Radek POLANSKY, Pavel PROSR a Pavel TRNKA. *Diagnostika elektrických zařízení*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2008, 439 s. ISBN 978-80-7300-232-9.



- [16] ČSN EN 60212. *Standardní podmínky používané před zkoušením a během zkoušení elektroizolačních materiálů*. 2011.
- [17] ING. DRIML, Bohuslav. *Základní vlastnosti materiálů a jejich zkoušení* [online]. [cit. 2013-03-05]. Dostupné z: [http://chemikalie.upol.cz/skripta/mvm/zkousky\\_mat.pdf](http://chemikalie.upol.cz/skripta/mvm/zkousky_mat.pdf)
- [18] ČSN EN ISO 527. *Plasty – Stanovení tahových vlastností*. 2012.
- [19] ČSN EN ISO 178. *Plasty - Stanovení ohybových vlastností*. 2011.
- [20] TŮMOVÁ, Olga. *Elektrická měření: měřicí metody*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2005, 216 s. ISBN 80-704-3412-0