

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Aspekty oprav čel vinutí  
velkých točivých elektrických strojů**

**vedoucí práce: prof. Ing. Václav Mentlík, CSc.  
autor: Bc. Michal Rok**

**2012**

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Michal ROK**  
Osobní číslo: **E10N0050P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Název tématu: **Aspekty oprav čel vinutí velkých točivých elektrických strojů**  
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Uveďte aspekty výroby statorových vinutí velkých točivých elektrických strojů
2. Uveďte současné možnosti oprav čel vinutí těchto strojů
3. Uveďte možnosti výroby a fixace mezicívkových vložek čel statorových vinutí těchto strojů
4. Ověřte materiálové možnosti výroby mezicívkových vložek čel vinutí velkých točivých elektrických strojů

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 2006
2. Mentlík, V. a kol.: Diagnostika elektrických zařízení, BEN 2008
3. Elektronické informační zdroje

Vedoucí diplomové práce: **Prof. Ing. Václav Mentlík, CSc.**  
Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: **17. října 2011**  
Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2012**

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



  
Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

## **Anotace**

Předkládaná diplomová práce popisuje aspekty výroby, montáže a oprav statorového vinutí. Zabývá se zejména možnostmi montáže a oprav vložek mezi čela vinutí. Praktická část je zaměřena na ověření elektrických a mechanických vlastností 3D skleněné tkaniny Parabeam a jejího použití právě při opravách mezizávitových vložek v čelech vinutí velkých točivých strojů.

## **Klíčová slova**

Synchronní stroj, tyčová vinutí, VPI, resin-rich, výbojová činnost, opravy statorového vinutí

## **Abstract**

This thesis describes aspects of production, assembly and repair of the stator winding. It deals particularly with the possibilities of mounting and repair of the front pads between windings. The practical part is focused on verifying electrical and mechanical properties of 3D glass fabric Parabeam and its possible use in the repair just-circuit winding ends of inserts in large rotating machines.

## **Key words**

Synchronous machine, rod winding, VPI, resin-rich, discharge activity, stator repair

## **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.

V Plzni dne 4.5.2012

Jméno příjmení

.....

## **Poděkování**

Tímto bych velmi rád poděkoval všem, kteří mi pomáhali při vzniku této diplomové práce.

Zejména vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Václavu Mentlíkovi, Csc. za cenné rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále pak bych chtěl poděkovat doc. Ing. Radku Polanskému, Ph.D., Ing. Petru Vikovi, Ph.D., Ing. Petru Mrázovi, Ing. Ondřeji Veselému a Jaroslavu Bartoňovi za odborné rady a pomoc při měření. Za profesionální rady a poskytnutí informací z praxe děkuji Ing. Petru Novákovi.

## Obsah

<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>1 ELEKTRICKÉ TOČIVÉ STROJE</b> .....	<b>11</b>
<b>2 STATOROVÁ VINUTÍ TOČIVÝCH STROJŮ</b> .....	<b>12</b>
2.1 PROVEDENÍ TYČOVÝCH VINUTÍ.....	13
2.1.1 <i>Permutovaná tyčová vinutí</i> .....	13
2.1.2 <i>Tyčová vinutí s nepřímým chlazením</i> .....	14
2.1.3 <i>Tyčová vinutí s přímým plynovým chlazením</i> .....	15
2.1.4 <i>Tyčová vinutí chlazené kapalinami</i> .....	16
2.2 ZKOUŠKY TYČOVÝCH VINUTÍ .....	16
2.3 IZOLOVÁNÍ TYČOVÝCH VINUTÍ .....	16
2.3.1 <i>Technologie VPI</i> .....	17
2.3.2 <i>Technologie Resin-rich</i> .....	18
2.4 OCHRANA PROTI ČÁSTEČNÝM VÝBOJŮM.....	19
<b>3 MONTÁŽ STATOROVÉHO VINUTÍ</b> .....	<b>22</b>
3.1 MONTÁŽ VINUTÍ DO DRÁŽKY .....	22
3.2 PROVEDENÍ ČEL VINUTÍ .....	23
<b>4 OPRAVY ČEL VINUTÍ</b> .....	<b>26</b>
4.1 VLOŽKY DO ČEL .....	26
4.2 OPRAVY VLOŽEK DO ČEL .....	26
4.3 TESTOVANÝ MATERIÁL NA OPRAVU VLOŽEK .....	27
<b>5 DIAGNOSTICKÝ SYSTÉM</b> .....	<b>28</b>
5.1 SLEDOVANÉ PARAMETRY .....	28
5.2 MĚŘÍCÍ METODY .....	30
5.2.1 <i>Měření částečných výbojů</i> .....	30
5.2.2 <i>Měření ztrátového činitele</i> .....	32
5.2.3 <i>Měření meze pevnosti v ohybu</i> .....	33
5.2.4 <i>Měření meze pevnosti v tlaku</i> .....	33
5.3 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ .....	34
<b>6 VÝSLEDKY MĚŘENÍ</b> .....	<b>35</b>
6.1 ČÁSTEČNÉ VÝBOJE .....	35
6.2 ZTRÁTOVÝ ČINITEL .....	38
6.3 MEZ PEVNOSTI V OHYBU .....	39
6.4 MEZ PEVNOSTI V TLAKU .....	40
<b>7 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ</b> .....	<b>41</b>
<b>8 ZÁVĚR</b> .....	<b>43</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA A INTERNETOVÉ ZDROJE</b> .....	<b>45</b>



---

<b>PŘÍLOHA A: NAMĚŘENÉ HODNOTY.....</b>	<b>47</b>
<b>PŘÍLOHA B: FOTODOKUMENTACE MĚŘENÍ.....</b>	<b>64</b>
<b>PŘÍLOHA C: OPRAVA STATOROVÉHO VINUTÍ.....</b>	<b>66</b>
<b>PŘÍLOHA D: TECHNICKÝ LIST PARABEAM.....</b>	<b>71</b>

## Seznam symbolů

3D	trojrozměrný (three dimension)
$C_a$	testovaný objekt
CC	spojovací stíněný kabel
CD	vazební zařízení
$C_k$	vazební kondenzátor
ELVA	technologie indukční pájení
I	střední proud částečných výbojů [ $\mu\text{A}$ ]
$\bar{I}$	střední hodnota I [ $\mu\text{A}$ ]
MI	detektor
OL	optický kabel
$Q_{iec}$	kvantitativně nejvyšší opakovaně se vyskytující úroveň náboje výbojů [pC]
$\overline{Q_{iec}}$	střední hodnota $Q_{iec}$ [pC]
RLC	obvod vzniklý spojením rezistoru, cívky a kapacitou
$R_{mo}$	mez pevnosti v ohybu [MPa]
$\overline{R_{mo}}$	střední hodnota $R_{mo}$ [MPa]
$R_{mt}$	mez pevnosti v tlaku [MPa]
$\overline{R_{mt}}$	střední hodnota $R_{mt}$ [MPa]
s	směrodatná odchylka
SRS	boční vlnovec pro vyklínování vinutí v drážce (Side Ripple Spring)
$\text{tg } \delta$	ztrátový činitel [-]
$\overline{\text{tg } \delta}$	střední hodnota $\text{tg } \delta$ [-]
TRS	horní vlnovec pro vyklínování vinutí v drážce (Top Ripple Spring)
U	elektrické napětí [V]
$U_i$	zapalovací napětí částečných výbojů [V]
$\bar{U}_i$	střední hodnota zapalovacího napětí částečných výbojů [V]
$U_e$	zhášecí napětí částečných výbojů [V]
$\bar{U}_e$	střední hodnota zhášecího napětí částečných výbojů [V]
v	variační koeficient [%]
VPI	vakuově tlaková impregnace (Vacuum Pressure Impregnation)
Z	filtr rušení
$Z_m$	snímací impedance

## Úvod

Tato práce vznikla ve spolupráci s firmou 1. SERVIS - ENERGO s.r.o., která se zabývá servisními službami pro energetiku, kde vznikl požadavek na nový materiál pro opravy mezizávitových vložek v čelech vinutí. V návaznosti na předchozí práci kolegy Bc. Ondřeje Veselého bylo po neuspokojivých výsledcích vypěňovací epoxidové pryskyřice FOAM 128, především z hlediska tepelného namáhání, rozhodnuto o ověření vlastností dalšího materiálu.

Předkládaná práce se v teoretické části zabývá popisem výroby, montáže a oprav statorového vinutí velkých točivých strojů. Praktická část je zaměřena na možnou aplikaci 3D skleněné tkaniny Parabeam jako vhodné náhrady při opravách mezizávitových vložek v čelech vinutí a ověření jeho elektrických a mechanických vlastností při normální i zvýšené teplotě.

## 1 Elektrické točivé stroje

Při obecném pohledu jsou elektrické točivé stroje založeny na principu přeměny mechanické energie na elektrickou, v tomto případě mluvíme o motorickém režimu, nebo naopak, poté mluvíme o generátorovém režimu. Způsoby, jak přeměny dosáhnout, se liší podle charakteru napájecího napětí. Pokud budeme pracovat se stejnosměrným napětím, máme na výběr pouze jednu možnost – stejnosměrný motor. Při použití střídavého napětí se nabízejí dvě možnosti – asynchronní nebo synchronní motor. Asynchronní motory, stejně jako stejnosměrné motory, nedosahují takových výkonů jako synchronní, proto se jimi v této práci dále nebudeme zabývat.

Synchronní stroje můžeme najít v nejrůznějších elektrotechnických zařízeních, avšak nejčastější uplatnění jsou jako generátory pro výrobu elektrické energie. Z pohledu konstrukce rozlišujeme dva typy synchronních strojů – s válcovým rotorem (turbogenerátor) a s vyniklými póly (hydrogenerátor). Bez ohledu na typ, základem každého synchronního stroje je rotor a stator. Pohyblivá část – rotor, představuje hřídel osazenou magnetickým obvodem s vinutím. Statická část – stator, většinou pevně spojený s okolními konstrukčními prvky, se skládá z magnetického obvodu, v jehož drážkách je uloženo vinutí. Turbogenerátory jsou rychloběžné stroje s dlouhou délkou hřídele a malým průměrem rotoru. Využití nalézají v tepelných nebo jaderných elektrárnách, kde jsou poháněny parními turbínami. V současnosti patří turboalternátory mezi stroje s nejvyšším dosahovaným výkonem, jehož horní hranice přesahuje 1500 MVA. Druhým typem synchronních strojů jsou hydrogenerátory. Z hlediska konstrukce je lze popsat přesně opačně než turbogenerátory. Je pro ně charakteristický široký průměr rotoru na krátké hřídeli. Uplatnění nacházejí ve vodních elektrárnách, kde jsou obvykle poháněny vodními turbínami. Dnešní dosahované výkony hydrogenerátorů se pohybují kolem hranice 800 MW. Přestože se tyto dva druhy generátorů konstrukčně liší, principiálně fungují naprosto stejně. Vinutí umístěné na rotoru nabudíme stejnosměrným proudem, to umožní vytvoření pole. Pokud se rotor točí, indukuje se ve statorovém vinutí napětí. Po připojení zátěže začne procházet statorovým vinutím proud, který vytvoří magnetické pole. Pole rotoru a statoru jsou z pohledu úhlové frekvence stejná, proto generátor nazýváme synchronní. [1, 2, 3, 4]

## 2 Statorová vinutí točivých strojů

Vývoj střídavých elektrických strojů zaznamenal ve svém průběhu různé varianty provedení vinutí ve statoru. Vždy však korespondoval s technologickými postupy výroby elektrického točivého stroje a provedením izolace v té době.

V čem však vývoj zůstal jednoznačný, byla snaha umístit vinutí do co možná neuzavřenější drážky z hlediska elektrických i magnetických vlastností. Vždy ale musíme zohlednit i ekonomickou stránku věci. Tudíž z pohledu nákladů je výhodnější, pokud se cívky před vložením do drážek vytvarují a ideálně i izolují. Následně se umístí do otevřené drážky. Cílem je tedy spojení levné montáže hotových cívek s elektrickými a magnetickými vlastnostmi uzavřených drážek. V zásadě můžeme rozdělit statorové vinutí na dva druhy:

- Prošívané (protahované) vinutí vkládané do drážky v axiálním směru, tzn. použití uzavřené drážky
- Vsypané vinutí vkládané do otevřené drážky, tedy v radiálním směru.

Samotný tvar vinutí lze ještě rozdělit podle tvaru jednotlivých vodičů:

- Vinutí z cívek, jež dostanou svůj konečný tvar až po vložení nebo vtažení do drážky, neboli vinutí s vodiči kruhové průřezu
- Vinutí, jehož tvar mají cívky již před vložением do drážky, tj. cívky z profilových vodičů.

Vinutí vkládané do uzavřené drážky se již dnes prakticky nevyskytuje, snad pouze jen ve výjimečných případech. V současnosti je nejčastější používaný typ u velkých točivých strojů vsypávané vinutí z profilových vodičů do polouzavřených drážek.[6] Vsypaná vinutí se mohou vyskytovat v kombinaci s měkkými cívkami, což znamená omezení průměrů vodičů maximálně do tloušťky 1,8 mm kvůli flexibilitě a umístění v drážce. Stroje s měkkými cívkami se zpravidla vyrábějí u strojů do výkonu 100 kW. Pro vyšší výkony nad 100 kW se používají polotuhé, až tuhé cívky, které jsou již pravoúhlého průřezu, a tvarování probíhá pomocí šablon. Posledním druhem vsypávaného vinutí je tyčové. Tím se budeme zabývat v dalších kapitolách. Jedná se o druh vinutí, které je primárně používané v točivých strojích největších výkonů v řádech MW. Tyčová vinutí můžeme rozdělit na dvě části – drážky a čela. Drážková část je rovná a uložena v magnetickém obvodu statoru. Čelo je část vystupující z drážky a slouží ke spojení s ostatními tyčemi. Z důvodu průchodu proudu v řádech i tisíců ampér se používají měděné vodiče do průřezu 20 mm<sup>2</sup>, složené z několika paralelních vodičů.

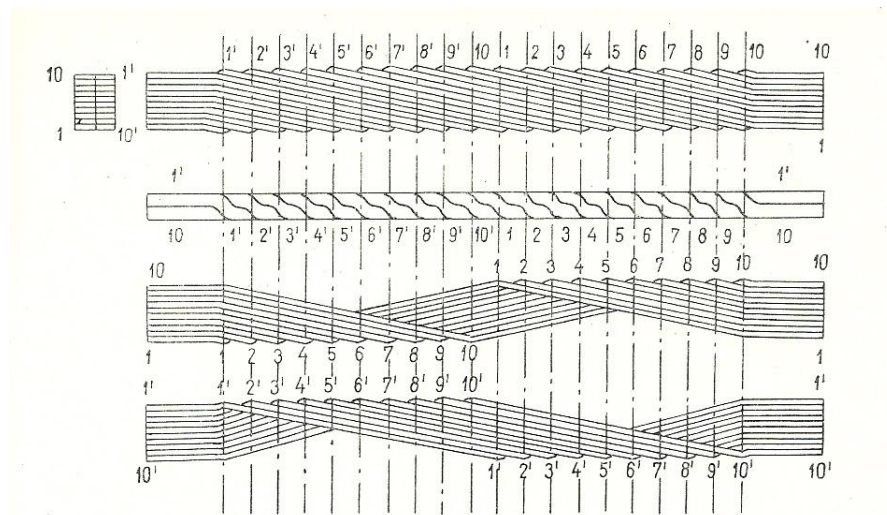
[5]

## 2.1 Provedení tyčových vinutí

### 2.1.1 Permutovaná tyčová vinutí

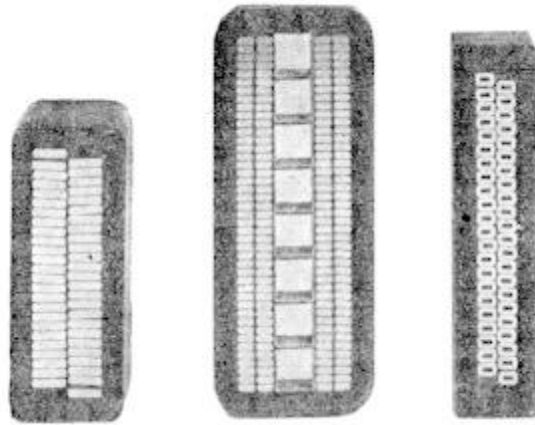
Točivé stroje velkých výkonů bez výjimky pracují s permutovaným tyčovým vinutím. Pod tímto názvem si můžeme představit tyč skládající se z několika dílčích vodičů, které jsou vzájemně izolované. Provedení tyče je vytvořeno tak, že každý dílčí vodič projde všemi polohami výšky. Zabráníme tak vzniku vyrovnávacích proudů, protože všechny vodiče jsou rovnoměrně zatíženy magnetickým tokem. Použitím vodičů malého průřezu místo masivních také výrazně zmenšíme ztráty vířivými proudy. U tyčí s velkou proudovou hustotou je nezbytné opatřit je chlazením, buď kapalinou, nebo stlačeným plynem.

Nejrozšířenější mezi permutovanými druhy provedení tyčových vinutí je Roeblova transpozice. [6]



Obr. 1 Provedení Roeblovy tyče [6]

Provedení Roeblovy transpozice je několik, vždy se liší podle stupňů zkroucení v drážce a čelech vinutí. Základní Roeblova tyč se skládá ze dvou vedle sebe ležících sloupců dílčích vodičů, které jsou v celé délce společně zkrouceny. Každý dílčí vodič provede úplný závit šroubu, tedy  $360^\circ$ . To znamená, že všechny vodiče se vzájemně jednou oběhnou. Pro potlačení přídavných ztrát se kromě základního provedení v drážce Roeblova transpozice objevuje i v čelech vinutí. Takovou tyč vyrobíme, když necháme vodiče provést drážkou se zkroucením  $540^\circ$ , tedy 1,5 závitu šroubu, a následně pak v čelech střídavé zkroucení o  $+180^\circ$  na jedné straně a o  $-180^\circ$  na straně druhé. Touto transpozicí střídající pravotočivé a levotočivé zkroucení lze plně vyrovnat všechna pole, způsobující ztráty ve vinutí. Avšak zmíněná transpozice je možná jen u velkých strojů, kde je dostatek místa pro provedení zkroucení.



*Obr. 2 Příčný řez Roeblovou tyčí,  
zleva nepřímo chlazená, dvojitá Roeblova tyč chlazená plynem  
a tyč z dutých vodičů chlazená kapalinou [6]*

Pro široké drážky u velkých strojů najdeme nejčastěji dvojitou Roeblovu tyč. Dvě jednotlivě zkroucené dvousloupcové tyče jsou uloženy ve společné izolaci. Tyče jsou zkrouceny v poměru  $0^\circ$  v obou čelech a  $360^\circ$  v drážce. Další možností jsou vícesloupcové Roeblovy tyče, u nichž jsou všechny dílčí sloupce zkrouceny společně. Způsobů provedení vícenásobných Roeblových tyčí je mnoho, liší se pouze mírou kompenzace magnetických polí způsobujících ztráty. [1, 6]

### 2.1.2 Tyčová vinutí s nepřímým chlazením

Dnes se k výrobě permutované tyče vinutí používají výhradně izolované měděné ploché vodiče. Ploché vodiče se nastříhají do potřebné délky a pak ohnou do požadovaného tvaru. Izolační systém vodičů tvoří vytvrzené lakové vrstvy. Ty jsou opředené ze skelných, polyesterových vláken nebo jejich směsi a v kombinaci s lakem nebo pryskyřicí plní funkci pojiva. Další možností je ovinutí fólií nebo páskami z plstěné slídy. Izolace vodičů musí být s mědí pevně spojena a musí dostatečně odolávat namáhání v ohybu.

Méně častá je varianta holých měděných vodičů, které se vzájemně izolují izolačními proužky s nebo bez obsahu slídy. Bývají často nasyceny polovytvrzenou pryskyřicí, která přispívá k lepšímu vzájemnému slepení vodičů. Mezi dvě řady vodičů se zasouvá přibližně 0,3 mm silný izolační materiál, zejména slída, také ale i tvrdé tkaniny nebo materiály vhodné pro slepení. Dostatečně vytvrditelné pojivo slouží ke zpevnění zkroucené tyče. Přídavné izolování je důležité v místě zahnutí. Mechanickou pevnost s dostatečnou ohebností, nutnou při namáhání, zajišťují obdélníkové nebo kosočtvercové proužky.

Finální podoba permutované tyče v jeden celek se provádí ve výhřevných lisech za použití polyesterových nebo epoxidových pryskyřic, které při teplotě 130 až 180 °C tvrdnou od několika minut až po jednu hodinu. Pryskyřice se na tyč nanáší natíráním nebo použitím materiálů, které předají potřebné množství polovytvrzelé pryskyřice jednotlivým vodičům a tím je zpevní. Na místech, kde jsou ohyby, se k zaplnění pokládá tvárný materiál z pryskyřice s vhodným plnivem nebo i slídy, který se při vysoké teplotě vytvrdí.

Provedení tyčí složených z několika vodičů můžeme rozdělit podle toho, zda pracují na stejném napětí nebo nikoliv. Konstrukčně jsou obě varianty téměř stejné, jedná se o několik zkroucených permutovaných tyčí nad sebou nebo vedle sebe. V případě stejného napětí se pouze strany tyče, které se slepují k sobě, natrou tvrditelnou pryskyřicí, ta zároveň slouží jako izolace. Pokud mají ale tyče rozdílná napětí, je nezbytná zvláštní závitová izolace s dostatečnou elektrickou pevností. Nejjednodušší řešení je vložení izolační vložky mezi oba vodiče, tím vznikne dostatečná přeskoková vzdálenost. Toto řešení však nelze použít v čelech vinutí, proto se i v drážkové části dává přednost závitové izolaci ve formě slídové pásky s tvrditelnou pryskyřicí nanesenou ze všech stran. Nejobtížnějším místem výroby tyčí s několika vodiči je přechod závitové části izolace z drážky do čel, která se nanáší po tvarování. Nejprve se izolační pásky nanesou kolem všech vodičů jedné tyče a následně se v žádané poloze svážou všechny dohromady. [1, 6]

### **2.1.3 Tyčová vinutí s přímým plynovým chlazením**

Plynové vnitřní chlazení vodičů zamezuje odvod tepla přes velký tepelný odpor drážkové izolace, ale vyžaduje vestavění chladicích kanálů s průřezem, který je větší než průřez dílčích měděných vodičů. Vestavěné kanály, vyrobené z kovu, musí být elektricky izolovány od vodičů mezi sebou, aniž by se výrazně zmenšil přechod tepla. Toho je docíleno opletením skelnou tkaninou, skelnými izolačními hadicemi nebo slídovou izolační páskou. Izolace musí vydržet mechanické ohýbání chladicích kanálů společně s vodiči. Aby se zabránilo potrhání chladicích kanálů, jsou naplněny snadno tavitelnými kovy nebo voskem.

Je-li chlazený vodič složený z dvou úplných permutovaných tyčí a mezi nimi je řada chladicích kanálů, lze permutované tyče ohýbat jednotlivě a následně je v drážce a v čelech současně zpevnit. [1, 6]



### 2.1.4 Tyčová vinutí chlazené kapalinami

Výroba tyčí chlazených kapalinou se technicky neliší od výroby z masivních vodičů. Dílčí měděné vodiče jsou opatřeny průtokovými otvory velmi malých rozměrů čtyřhranného průřezu. I systém izolace je shodný s masivními vodiči. Zvláštní pozornost však vyžaduje práce s dílčími vodiči. Zejména při ohýbání a sestavování je potřeba průběžně kontrolovat průřez dutých vodičů tak, aby byl maximálně zachován nebo aby nevznikla netěsná místa.

Chlazení kapalinami se využívá hlavně u strojů s výkony přes 250 MVA a to z důvodu, že zabezpečuje nejlepší přenos ztrátového tepla z mědi.

Čím se ale odlišuje od ostatních druhů tyčí, jsou přidružené náklady. Zejména zapájení dutých vodičů do vodních komor sloužících pro připojení k chladicí soustavě. Nebo pak elektrické spojení prováděné, buď přes samotné vodní komory, nebo odděleně pomocí zvláštního měděného kontaktu. [1, 6]

## 2.2 Zkoušky tyčových vinutí

Náročnost konstrukce tyčových vinutí velkých točivých strojů, skládající se z několika činností, vyžaduje po každém výrobním kroku provedení mezioperačních zkoušek. Provádějí se při spletení vodičů v tyč a poté při ohýbání čel vinutí nebo po provedení drážkové izolace. Tyto mezioperační zkoušky probíhají se střídavým napětím nižším než je budoucí provozní hodnota. Po zavedení drážkové izolace u tyčových vinutí z několika vodičů provádíme zkoušku plným provozním napětím dodatečné elektrické pevnosti závitové izolace. Předběžné zkoušky dodatečné elektrické pevnosti jsou také však účelné během dílčích operací výroby. Poslední napěťovou zkouškou se prokazuje výskyt zkratů mezi dílčími vodiči.

Duté vodiče pro chlazení kapalinami se zkoušejí na výskyt a odhalování trhlin pomocí vířivého proudu. Na hotové permutované tyči se provádějí zkoušky tlakem přibližně 1,5 MPa a měří se průtokové množství vody. Poslední zkouškou těsnosti je připojení vodních komor a ponořením do vody s následným zvýšením tlaku plynu uvnitř tyče. Nemalý význam má opakovaná kontrola rozměrů tyče. Musíme zajistit, že po uložení tyče do drážky a provedení drážkové izolace, mají vodiče požadovaný tvar a průřez. Následně také zajistíme, že evolventy v čelní části, jsou přesně tvarovány. [6]

## 2.3 Izolování tyčových vinutí

Izolační systém je jednou z nejdůležitějších částí výroby statorového vinutí, protože jsou na něj kladeny nemalé požadavky z hlediska namáhání. Namáhání mohou být elektrického,

mechanického nebo tepelného charakteru. Izolace musí být schopna tomuto namáhání odolávat po celou dobu životnosti stroje, kterou garantuje výrobce.

Hlavním účelem izolování tyčí je oddělení vinutí protékaného proudem od uzemněného svazku plechů statoru.

Nicméně důležitou funkcí izolace je i její odolávání vůči mechanickému namáhání, zejména při vkládání do drážky nebo při provozním chodu odolávání vibrací.

Dalším aspektem namáhání jsou tepelné účinky proudu procházejícího vodičem. Tepelná energie vygenerovaná vodičem do okolí negativně ovlivňuje životnost izolačního systému. [6]

Izolaci velkých točivých strojů můžeme rozdělit do několika druhů. V této části se budeme zabývat principy provedení hlavní izolace, která obaluje tyčová vinutí stroje. V dalších kapitolách bude popsána také drážková izolace, jejímž účelem je ochránit vinutí před poškozením o stěny drážky.

Izolační systém používaný u točivých strojů se skládá ze tří složek. Jedná se o nosič, plnivo a pojivo. Nosič plní v izolačním systému funkci nosného prvku a určuje mechanické vlastnosti. Obvykle se používá v různé formě skelných nebo polyesterových tkanin. Plnivo tvoří izolační vlastnosti systému a je tedy důležité, aby mělo vysokou elektrickou pevnost. Velice často se používá slída v různých formách, např. štípaná ve formě krystalů nebo jako slídový papír, tzv. integrovaná slída. Poslední součástí je pojivo a jak je asi z názvu patrné, slouží ke spojení nosné složky s plnivem. Sekundární funkcí pojiva je izolační schopnost, ale v daleko menší míře než plnivo. Nejčastější podoba plniva jsou epoxidové a polyesterové pryskyřice. [6]

Vzájemným spojením těchto tří složek vznikne izolační páska. Páska se navíjí na tyčové vinutí ručně nebo strojově, v přesně udaném počtu poloh. Výsledná tloušťka izolace je poté dána počtem jednotlivých vrstev pásky. [6]

V současné době se izolační systémy velkých točivých strojů provádějí pomocí dvou technologií. Jedná se o systémy VPI a Resin-rich. [7]

### 2.3.1 Technologie VPI

Vacuum Pressure Impregnation neboli vakuově tlaková impregnace, je název pro technologii izolace, která nám dovoluje udělat dokonale kompaktní vinutí bez nehomogenit. Můžeme ji rozdělit na dva druhy. Global VPI, kde se jedná o celkovou impregnaci statoru, nebo Individual VPI. Při druhém jmenovaném způsobu vytvrzujeme jednotlivé tyče zvlášť. [6, 7]

Základem technologie je páska z nekalcinované slídy, která je díky větším částicím více nasákavá. To je důležité při impregnaci více vrstev izolace. Nosnou část tvoří bavlněná nebo skleněná tkanina, případně i plastová nebo polyamidová fólie. Pojivo je zde použito jen velmi málo, a to pouze 7 až 8 % z důvodu soudržnosti pásky při navíjení. Současně pojivo musí být později kompatibilní s použitým impregnantem. Dnes se používají výhradně bezrozpouštědlové epoxidové, polyesterové nebo silikonové pryskyřice. [6]

Tyč vinutí se po nanesení izolační pásky vloží do pece, kde se vysuší při teplotě přibližně 110 °C. Následně se uloží do vakuově tlakového impregnačního (VPI) zařízení. Výrobní proces lze urychlit, pokud VPI zařízení dovoluje vytápění a zároveň impregnaci tyčí ještě teplých. V další fázi se po dosažení vakua VPI zařízení zaplaví impregnační pryskyřicí. Impregnant se skladuje při snížené teplotě pod přetlakem inertního plynu. Průchodem přes ohřívací zařízení je ve vakuu zbaven plynů. Vinutí se ve VPI zařízení ode dna nechá zaplavit impregnantem a po zrušení vakua se přetlakem až 2,5 MPa dosáhne dokonalého prostoupení impregnantu izolační páskou. Dobu impregnace a velikost tlaku ovlivňují faktory závislé na nasákavosti, tloušťce a počtu vrstev izolační pásky a také na druhu pryskyřice. Zbytky impregnantu jsou pak odčerpány zpět do zásobníků a ochlazeny na skladovací teplotu. Konečnou fází impregnace je vytvrzení za teploty vyšší než 100 °C po dobu přibližně 20 hodin při kontinuálním otáčení tak, aby impregnant nevytekl. Vytvrzování má dvě fáze, nejprve za mírného podtlaku, kvůli urychlení vyprchání těkavých látek, a poté za proudění horkého vzduchu. [5, 6]

Výhoda VPI technologie je zřejmá, při celkové impregnaci statoru je zaručena homogenita, která nemá v porovnání s ostatními technologiemi konkurenci. Zajišťuje kromě celkového zpevnění i ochranu proti vibracím a vlhkosti. Nevýhodné jsou nemožnost opravy jednotlivých tyčí vinutí bez poškození a v případě VPI zařízení pro velké stroje i počáteční obrovská finanční investice. [6, 7, 9]

### 2.3.2 Technologie Resin-rich

Stejně jako VPI i Resin-rich používá tříložkový kompozit v podobě izolační pásky. Izolační složkou neboli plnivem je kalcinovaný slídový papír, který má menší částice a z toho plynoucí menší nasákavost. Nosnou složku tvoří obvykle skleněná nebo bavlněná tkanina, rouno i plastová fólie. Jako pojivo slouží epoxidová pryskyřice. Její obsah se oproti VPI pohybuje v rozmezí 30 – 40 %. Takto vytvořená izolační páska s tloušťkou od 0,15 až 0,2 mm se dodává v tzv. B-stavu, což znamená, že je částečně předtvrzena. [6, 9]

Páska se navijí na tyč vinutí podobně jako při technologii VPI, tedy ručně nebo strojově. Ovíjení může být kontinuální, tedy celá tyč včetně čel jedním typem izolační pásky, nebo diskontinuální, kde drážková část se navijí odlišným typem izolační pásky než čela tyče. Počet vrstev je dán pracovním napětím stroje. Takto vytvořená vrstva se nepatrně naddimenzuje tak, aby po vytvrzení v předem připravené formě měla izolace potřebnou tloušťku. Důležitý stupeň při vytvrzování izolace je tzv. bod gelace. Díky latentním tvrdidlům dochází k vytvrzení izolační pásky až po dosažení určité teploty, typicky 100 °C. Toho se využívá pro její skladování, protože nedochází k samovolnému vytvrzování pásky. Gelace je zjednodušeně chemická reakce, jejíž výsledek je uvolňování plynů z izolace. Proto je třeba provádět odplynění před dosažením gelace, buď předformováním nižším tlakem, nebo zajistit volný odchod plynů z materiálu. Způsob, jakým zajistíme odchod plynů, je významným prvkem, který má vliv na kvalitu a strukturu celé izolace. Může docházet k nežádoucím nehomogenitám, jako jsou prasklinky nebo dutinky. Konečné vytvrzení probíhá při teplotách 160 – 170 °C po dobu, jež je dána typem pryskyřice. Před založením tyče do stroje se ještě aplikuje jedna vrstva polovodivé pásky k zabránění vzniku klouzavých výbojů po povrchu izolace. [6, 9]

I přes vzrůstající výskyt VPI technologie je stále systém Resin-rich osvědčeným způsobem provedení vysokonapěťové izolace u točivých strojů. Při srovnání s VPI hovoří pro výhody technologie Resin-rich o mnoho menší finanční investice a možnost budoucích oprav jednotlivých tyčí vinutí. Proti hovoří nehomogenita izolace a s tím související menší spolehlivost zařízení. Proto se často volí kompromis mezi technologiemi VPI a Resin-rich a využívá se výhod jednotlivých řešení. [6, 9, 11]

## 2.4 Ochrana proti částečným výbojům

Přítomnost částečných výbojů v izolaci točivého stroje významně degraduje její životnost. Částečné výboje se mohou vyskytovat na povrchu nebo uvnitř izolace a vedou ke vzniku elektrického průrazu, a tím k nákladným škodám uvnitř stroje.

Jak již bylo v úvodu naznačeno, existuje několik druhů částečných výbojů, které rozlišujeme podle místa jejich vzniku v izolaci. Existují částečné výboje vnitřní, povrchové a korónové. Vnitřní výboje vznikají v nehomogenitách uvnitř izolace nedokonalým výrobním procesem, vadami materiálů nebo dlouhodobým namáháním. Vznik samotných částečných výbojů je způsoben dostatečně velkým vnějším elektrickým polem, což vede k namáhání plynu v dutinkách. Tento plyn je nejčastěji tvořen vzduchem, jenž má několikrát menší

permitivitu než materiál izolace. Pokud je v dutince dosažena určitá velikost napětí, dochází k přeskoku. Při vyšším působení vnějšího elektrického pole dojde nejen k vnitřní výbojové činnosti, ale i k výbojům na povrchu izolantu. Povrchové částečné výboje dělíme na drážkové a klouzavé. Drážkový výboj vznikne, pokud dojde k uvolnění klínů a drážkové izolace. Tím vznikají místa, nehomogenity, které jsou příčinou vzniku drážkových výbojů. Průchod kapacitního proudu, pro tento typ výbojů typického, skrz izolaci a vysokým napětím mezi vinutím a statorem, vede k tvorbě částečných výbojů. Z dlouhodobého hlediska vede toto působení k úplnému průrazu izolace. Druhou skupinou povrchových výbojů jsou výboje klouzavé. Vznikají na rozhraní dvou prostředí – pevného a plynného v důsledku působení nehomogenit. Pro vznik tohoto druhu výbojů je zapotřebí splnění dvou podmínek. První je existence kolmé složky elektrického pole na rozhraní a na něm rozložené náboje jedné polarity. Zároveň tečná složka intenzity elektrického pole, která odsává nosiče náboje opačné polarity směrem k elektrodě, kolem které dochází ke vzniku klouzavých výbojů. Druhou podmínkou je přiložené časově proměnné elektrické pole. Klouzavé výboje jsou stejně jako jiné druhy částečných výbojů nežádoucí a způsobují degradaci izolace. Poslední skupinou jsou korónové výboje. Pro svůj vznik využívají nehomogenit, avšak ty jsou způsobeny nejčastěji elektrodami s malým poloměrem zakřivení vzhledem k jejich vzájemné vzdálenosti. Právě u elektrod s malým poloměrem zakřivení dochází ke vzniku intenzivního elektrického pole a ke vzniku samostatného částečného výboje. V místech slabého elektrického pole nedochází k lavinám, naopak v prostoru se silným elektrickým polem, tedy oblast elektrody, vzniká neúplný výboj, který přiléhá k elektrodám. Tento jev nazýváme korónou a je často doprovázen akustickými (šum, praskot) a světelnými projevy. [19]

Důvod, proč aplikujeme ochranu proti částečným výbojům, je jejich negativní vliv na izolaci. Degradční projevy částečných výbojů můžeme rozdělit do několika druhů namáhání – rázové, tepelné, chemické a elektrické.

Rázové namáhání vzniká při výbojové činnosti v dutince, kde se tvoří elektrony, fotony, kladné nebo záporné ionty. Tyto vzniklé částice důsledkem výbojové činnosti narážejí na povrch dutinek a způsobují jejich poškození.

Působením částečných výbojů vzniká tepelné namáhání uvnitř dutinky a dochází tak k lokálnímu zvyšování teploty. To může mít negativní dopad na stárnutí izolace.

Z hlediska chemického namáhání dochází při výbojové činnosti ke vzniku vedlejších produktů. Uplatňuje se především reakce vzduchu v dutince s elektrickým výbojem. To má za následek vznik nežádoucích příměsí v izolaci pevných, kapalných nebo plynných formách.

Elektrické namáhání v důsledku výbojové činnosti má za následek zvýšení počtu a rychlosti částic, způsobujících zvýšení velikosti ztrát a lokálního namáhání izolace.

Ochranu proti výbojům můžeme tedy rozdělit podle místa výskytu výbojů na vnitřní, povrchové a vnější – korónové. [6]

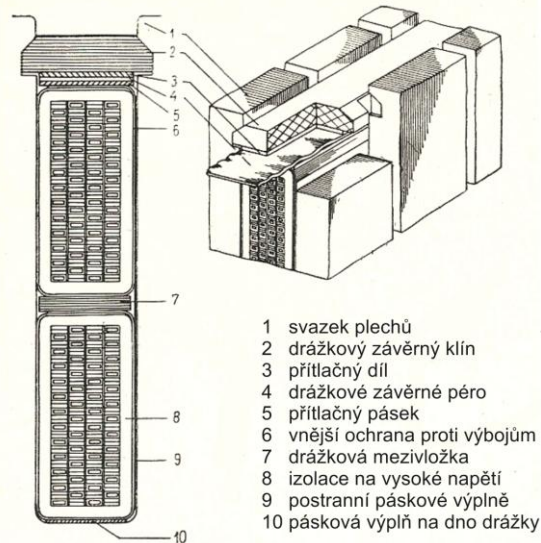
Vnitřní výboje vznikaly, docházelo-li během provozu k oddělování jednotlivých vrstev izolace a ke vzniku vzduchových bublinek. Tento jev při dnešních moderních způsobech provedení izolace nevzniká, tudíž se ochrana redukuje pouze na homogenizaci elektrického pole na hranách a propadlých místech. Místa se vyplní pryskyřicí s obsahem sazí a po vytvrzení se vyhladí. [6]

Povrchové částečné výboje dělíme, jak již bylo zmíněno, na klouzavé a drážkové výboje. Ochrana proti tomuto druhu částečných výbojů se v rovné části uložené v drážce provádí u vysokonapěťové izolace polovodivou fólií, nažehlenou již během výroby izolace, nebo nanesením vodivého laku. Vodivost vrstev musí být dostatečně velká, aby zajistila spolehlivé vyrovnání potenciálu po celé délce i obvodu tyče, ale nesmí překročit určitou velikost. Jinak by mohlo docházet ke vzniku proudů vyvolaných napětím indukovaným po délce drážky a příčným polem drážky, které by mohly porušit nátěry a ovlivnit tak izolaci. Předepisované povrchové odpory by mely být podle [6] v rozsahu 1 až 25 k $\Omega$ .

V návaznosti na ochranu proti vnějším výbojům se na výstupu z drážky u strojů se jmenovitým napětím nad 6 kV izolace opatřuje ještě koncovou ochranou proti doutnavým výbojům. Tím by mělo být zajištěno rovnoměrné zmenšení potenciálu vodiče proti uzemněnému svazku plechů, aniž by vznikly plazivé a doutnavé výboje. [6]

### 3 Montáž statorového vinutí

#### 3.1 Montáž vinutí do drážky



Obr. 3 Průřez drážkou statoru [6]

Schéma statorové drážky je rozkresleno na obr. 3. Prvním krokem při montáži (vzhledem k uspořádání) je založení vložky na dno. Tato vložka pomáhá vyrovnávat nerovnosti a případně i působení hran magnetického obvodu při výstupu z drážky. Může sloužit i k vyrovnání rozměrových odchylek vzniklých při výrobě magnetického obvodu nebo statorového vinutí. Jako materiál vložky se používá polovodivá hmota na bázi silikonu nebo pásek s polovytvrzenou pryskyřicí. [1, 6]

Dolní a horní polohu vyplňuje vinutí opatřené hlavní izolací. Při vkládání vinutí do drážky je bezprostředně nutné zabránit vzniku jakéhokoliv tlaku, který by vedl k poškození hlavní izolace vinutí. Proto mezi stěnu drážky a vinutí se vkládá drážková izolace. Používají se materiály jako drážková lepenka nebo Nomex. Na materiál jsou kladeny vysoké požadavky z hlediska elektrických, mechanických, tepelných i chemických vlastností. Starší drážkovou lepenku ze sulfátové buničiny postupně nahrazuje syntetický aramid pod názvem Nomex, který vyniká ve všech zmíněných požadavcích. Při zakládání do drážky můžeme vinutí zaklepávat kladivem přes pomocnou lištu, jež rozdělí tlak rovnoměrně po celé délce drážky, nebo použít tlakového montážního zařízení. U velkých strojů si nemůžeme dovolit poškození, a proto se vůle mezi vinutím a drážkou pohybuje i v řádu několika milimetrů. Vinutí ochráníme před jakýmkoliv poškozením tím, že ho jednoduše založíme do drážky bez použití síly. Vzniklé spáry mezi vinutím a drážkou je ovšem potřeba následně vyplnit. K tomu

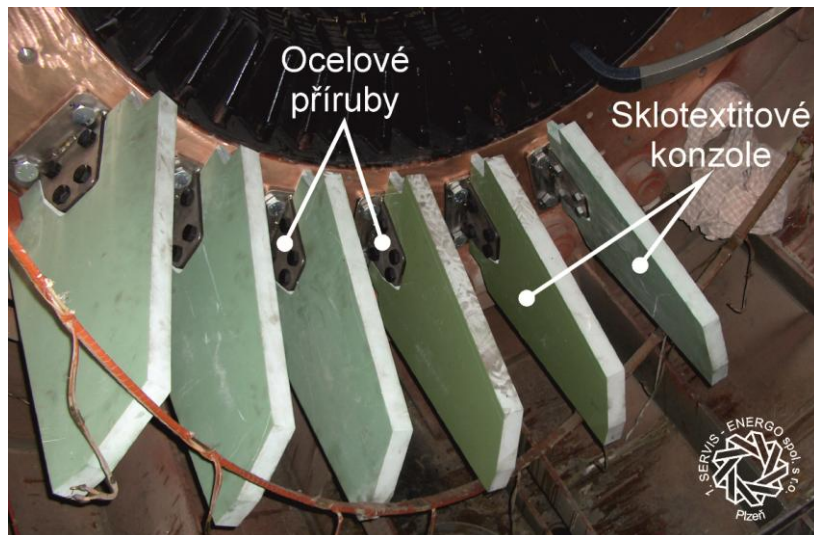
se využívá vodivého nebo polovodivého vlnově tvarovaného materiálu označovaného SRS (Side Ripple Spring). [1, 6, 10]

Po osazení dolního vinutí a jeho bočním upevnění následuje mezipolohová izolace. Tato sklotextitová vložka je vysoká 5 – 7 mm a do prostoru, který vyplňuje, se instalují čidla pro on-line diagnostiku. Následně se založí vrchní poloha vinutí a drážka se vyplní sklolaminátovým vlnovcem horní TRS (Top Ripple Spring) tloušťky 0,9 mm. Z podobného materiálu jako dno drážky, tedy textilie obsahující laminát, grafit a skleněná vlákna napuštěná epoxidovou pryskyřicí. [10, 12]

Finální operací je zasunutí sklolaminátového závěrného klínu, typicky lichoběžníkového tvaru. Klín se zasouvá s montážní vůlí (volně), která se následně vymezí vložení další vložky mezi závěrný klín a horní vložku. [1]

### 3.2 Provedení čel vinutí

V čelní části statoru dochází k propojení vinutí spodní a horní polohy. Při provozu stroje jsou právě na čela vinutí kladeny nemalé požadavky na mechanickou pevnost. Proto je důležité kompaktní spojení v jeden celek, zajišťující odolávání vibrací během provozu stroje. Podle druhu instalovaného chlazení lze zde nalézt vstupy a rozvody chladících segmentů.

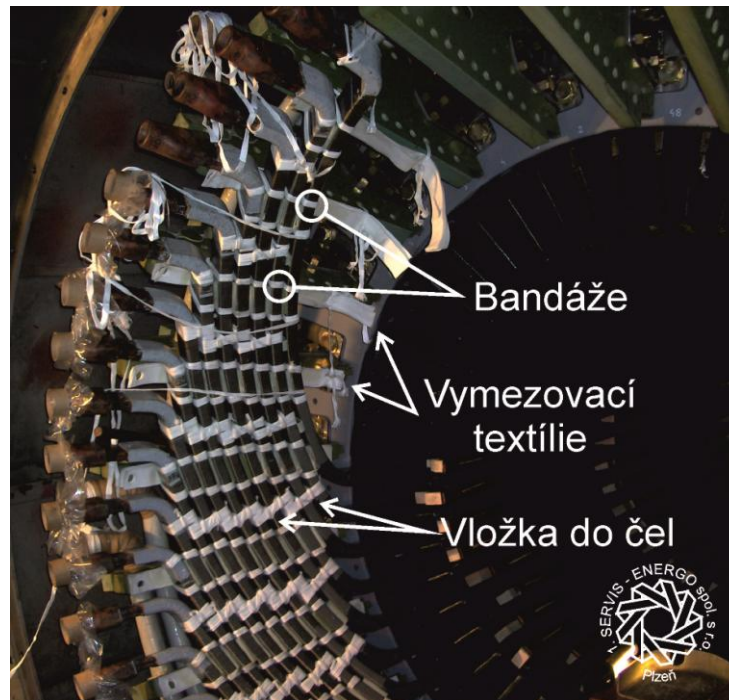


Obr. 4 Provedení ocelových přírub a konzol (Turbogenerátor Mělník 500 MW) [13]

Základem zpevnění čel vinutí jsou sklotextitové konzole. Konzole jsou přišroubovány na ocelové držáky, které jsou buďto také přišroubovány nebo navařeny na stahovací desky

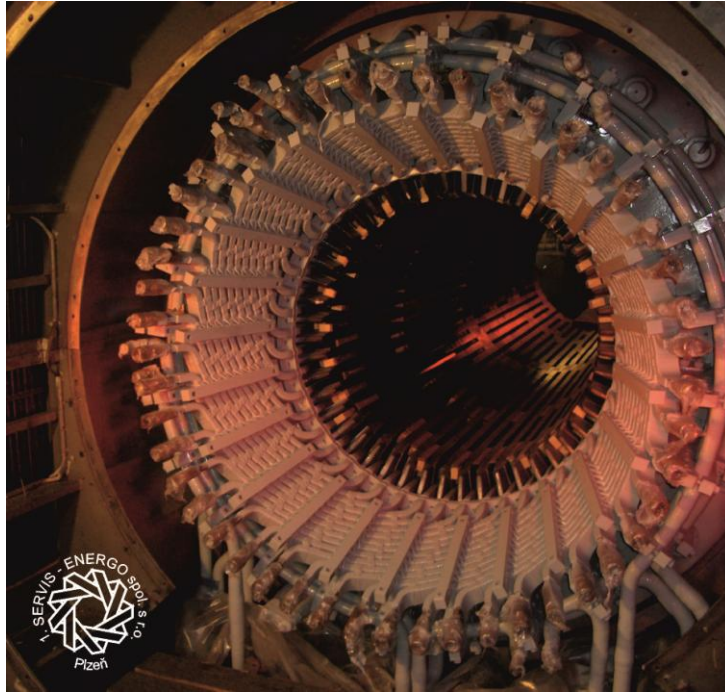


magnetického obvodu statoru. Následně se začnou zakládat tyčová vinutí podle postupu popsaného již dříve.



Obr. 5 Částečně založená spodní poloha (Turbogenerátor Mělník 500 MW) [13]

Pro dokonalý styk čela dolní polohy vinutí s vrchní hranou konzole se používá vložka z textilie napuštěné pryskyřicí. Spolu s přibývajícím počtem instalovaných tyčí jsou sousední čela zpevněna rozpěrnými sklolaminátovými vložkami, obalenými v plsti prosycené epoxidovým lakem. Tyto izolační vložky se vyrábějí na přesný rozměr, aby úplně vyplnily prostor mezi čelami vinutí. Zafixování probíhá bandážemi ze smršťovací dutinky. Po kompletním založení spodní polohy se na čela položí sklolaminátový mezipolohový rozpěrný segment, na který dosedá horní poloha čel vinutí. Segment je provázán bandážemi ke spodní poloze čela vinutí. Před začátkem zakládání horní polohy vinutí se provede ochranný nástřik izolačním lakem. Mezipolohový segment je poté opatřen stejně jako konzole spodní polohy textilií pro dokonalý styk. Zakládání a vyvazování horní polohy probíhá identicky, jako poloha spodní.



*Obr. 6 Hotová spodní poloha vinutí ošetřená šedým izolačním lakem (Turbogenerátor Mělník 500 MW) [13]*

Po dokončení horní polohy se pro ještě lepší zpevnění čel velkých turbogenerátorů na ni umísťuje lešení pro instalaci rozpěrného kruhu. Kruh musí být vyroben z nevodivého materiálu, obvykle se používá vytvrzený sklotextit. Následuje elektrické propojení mezi horní a dolní polohou. To se liší podle konstrukčního provedení stroje. Pro stroje s chladivem mimo tyč vinutí se jednotlivé vodiče v tyči ohnou a spojí. U tyčí s cirkulujícím chladivem uvnitř tyče se používají čelní spojky, které mohou být zároveň vstupem chladiva, ale i elektrickým propojením. Spojování vodičů v tyči, nebo čelních spojek s tyčí vinutí, probíhá pomocí technologie indukčního pájení, označovaného podle [12] ELVA. Při pájení je nutné sledovat teplotu a zabránit ohřevu izolace u konců tyčí vinutí. Toho docílíme obalením konců mokrou tepelně izolační tkaninou SIBRAL. Správná funkce spojení vodičů se ověřuje měřením přechodového odporu a případně se opraví. Takto holá čela je potřeba ještě opatřit izolací. To se provádí umístěním izolačních pouzder, nebo častěji nasazením forem na zapájené konce vinutí a následným zalitím izolační hmotou. Příkladem dle [12] se může použít zalévací epoxidový tmel MICARES 850, vytvrzující 8 hodin při teplotě 120°C, respektive 24 hodin při 100°C. Vytvrzovací doba je ovšem již úlohou závěrečného technologického ohřevu pro finální sušení. Stator je kompletně zakryt proti unikání tepla. Samotný ohřev probíhá průchodem proudu ve vinutí, jehož jednotlivé fáze jsou spojeny do série. Při najíždění na teplotu, interval 8 – 12 hodin, se kontroluje jak teplota vinutí, tak i magnetického obvodu. Rozdíl těchto teplot nesmí být větší než 15°C. Samotný technologický ohřev probíhá při

teplotě cca 110°C na čelech vinutí a trvá po dobu 15 – 16 hodin. Po vytvrzení následuje začištění v podobě odstranění zalitých forem z čel a zaoblení izolačních pouzder. Demontují se pomocné segmenty, klíny nebo fólie. Finální prací je povrchová úprava vinutí a vnitřního průměru izolačním lakem, podle [12] např. S 2352. [1, 6, 12]

## 4 Opravy čel vinutí

### 4.1 Vložky do čel

V části provedení čel vinutí bylo napsáno, že jednou z klíčových vlastností čel je v souvislosti s drážkovou částí celkové zpevnění vinutí. Toho dosahujeme mimo konzolí, mezipolohových rozpěr a bandáží i vložkami do čel. K jejich výrobě je použit materiál, na který jsou kladeny nemalé požadavky, zejména v odolnosti vůči mechanickému i elektrickému namáhání. Z mechanického hlediska dochází během provozu stroje k namáhání čel vibracemi, způsobenými točivým elektromagnetickým polem. To má negativní vliv na životnost vložek do čel, které se mohou nepřetržitým chodem stroje uvolnit a vypadnout. Právě i pouhé uvolnění jedné vložky způsobuje snížení mechanické odolnosti celku, a tak výrazný nárůst mechanických sil vede k poškození ochranných polovodivých vrstev nebo narušení hlavní izolace. Mimo mechanické odolnosti musí materiál být i dobrým izolantem, protože je aplikován v místech s vysokonapěťovým namáháním. Při prvovýrobě se vložky vyrábějí ze sklotextitu. Ten je možno vyrobít na přesný rozměr nebo s určitou vůlí, která je pak následně vyplněna impregnovanou tkaninou, jež díky své poddajnosti dokonale splyne s okolními tyčemi vinutí.

### 4.2 Opravy vložek do čel

Uvolněním vložky vzniká poškození, které je nutno bezodkladně opravit, protože i když nedojde k úplnému porušení izolace, dochází k výraznému zhoršení celkového izolačního stavu stroje. Opravit horní polohu lze poměrně snadno, neboť k místu opravy je dobrý přístup. Poškozená vložka se nahradí novou a následně vyváže. Komplikace nastávají u dolní polohy, která se nachází pod horní polohou a mezipolohovými vložkami a přístup je zde velmi omezen. Oprava dolní polohy ve srovnání s horní vyžaduje podstatně delší odstavení stroje z důvodu částečné demontáže horní polohy, což ve výsledku způsobuje výrazné prodloužení a prodražení opravy. [1]

Fotodokumentaci opravy poškozené izolace v čelech vinutí z důvodu nadměrných vibrací můžete najít v Příloze C.

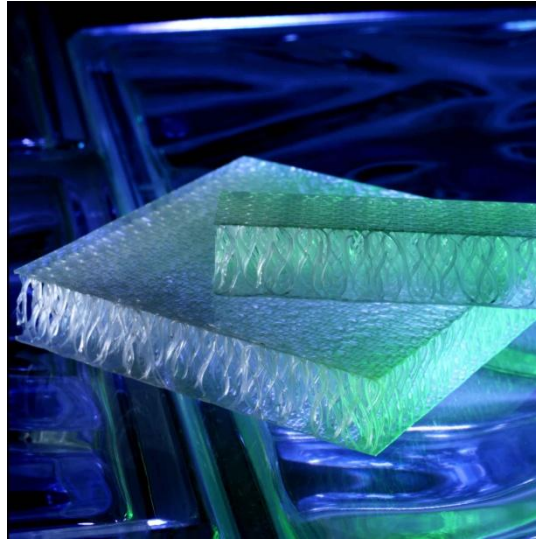
### 4.3 Testovaný materiál na opravu vložek

1. SERVIS – ENERGO spol. s r.o. je specializovanou společností, zabývající se montážní, opravárenskou a servisní činností v oblasti generátorů se sídlem v Plzni. Provádí jejich opravy a revize všech výkonů a typů včetně jejich příslušenství, tj. olejového, vodního a vodíkového hospodářství. Pro tyto opravy zpracovává vlastní projektovou dokumentaci a technologickou přípravu. Kromě těchto činností se zabývá také opravami elektrických částí, tj. navíjením, opravou a renovací průchodek. [14]

Po předchozích zkouškách vypěňovací epoxidové pryskyřice Foam 128, která se neukázala jako vhodná, především z hlediska mechanických vlastností za zvýšené teploty, byl na základě nového požadavku otestován další materiál pro opravy.

Ověřovaný materiál, který je k vidění na obr. 7, vhodný pro použití jako vložky do čel, se nazývá 3D skleněná tkanina Parabeam a do České republiky je dodávána společností Havel Composites CZ spol. s r.o. Tyto sendvičové kompozitní materiály jsou zvláštní třída kompozitních materiálů, skládají se ze dvou tenkých vrstev skelné tkaniny, které jsou vzájemně propleteny s jádrem ve tvaru číslice 8. Materiál vyniká zejména odolností proti delaminaci a pevností v ohybu, která roste exponenciálně s jeho tloušťkou, při zachování malé hustoty. Výhody materiálu lze nalézt i v podobě urychlení procesu výroby, snížení váhy nebo nákladů na výrobu. [14]

Předpokládané způsoby aplikace by mohly být dva, prosycení skelné tkaniny pryskyřicí a její složení pomocí přehybů nebo poskládání nastříhaných pásů na potřebnou tloušťku tak, aby následné vložení do prostoru vymezilo místo po uvolněné vložce. Po vytvrzení pryskyřice by bylo možné opětovně zafixování bandáží a nanesení izolačního laku. Tento způsob aplikace by byl možný i pro spodní polohu vinutí, bez nutnosti náročné demontáže horní polohy. Nejednalo by se ovšem o finální podobu opravy, nýbrž pouze o dočasnou, do doby větší odstávky stroje, kdy by byla provedena plnohodnotná náhrada vložky. Tento postup by výrazně snížil náklady na opravu a umožnil poměrně rychlé uvedení stroje do provozu. Pro danou aplikaci je nutné, aby materiál vyhověl z hlediska požadavků na elektrické a mechanické parametry. Cílem měření je určit, zda je materiál vhodný pro danou aplikaci a případně, která tloušťka je nejvhodnější. [1]



Obr. 7 3D skleněná tkanina Parabeam [20]

## 5 Diagnostický systém

### 5.1 Sledované parametry

#### Zdánlivý náboj $q$ částečných výbojů (Apparent charge)

Zdánlivý náboj částečných výbojů  $q_{cv}$  je základním diagnostickým parametrem pro měření a vyhodnocování částečných výbojů. Jedná se o unipolární náboj, vstříknutý mezi elektrody měřeného vzorku, který způsobí stejnou výchylku měřicího přístroje jako vlastní proudový impulz částečného výboje. Vyjadřuje se obvykle v pikocoloumbech [ $pC$ ]. [17]

#### Střední proud částečných výbojů (Average discharge current)

Je veličina představující součet absolutních hodnot zdánlivého náboje  $q_{cv}$  během zvoleného časového intervalu a dělená tímto intervalem. Hodnota je obvykle vyjádřena v mikroampérech [ $\mu A$ ]. [17]

$$I = \frac{1}{T_{ref}} (|q_1| + |q_2| + \dots + |q_n|) = \frac{1}{T_{ref}} \sum_{i=1}^m q_i \quad (1)$$

#### Zapalovací napětí částečných výbojů (Partial discharge inception voltage)

Zapalovací napětí částečných výbojů  $U_i$  je nejnižší hodnota napětí, při kterém dojde k zachycení stabilních částečných výbojů. Testovací napětí je pomalu zvyšováno od určité počáteční nízké hodnoty do chvíle výskytu alespoň dvou stabilních výbojů. Hodnota se udává v kilovoltech [ $kV$ ]. [15]

### Zhášecí napětí částečných výbojů (Partial discharge extinction voltage)

Zhášecí napětí částečných výbojů  $U_e$  je napětí, při kterém už nelze měřicím přístrojem zjistit stabilní výbojovou činnost. Testovací napětí je plynule snižováno z hodnoty se stabilním výskytem výbojů do hodnoty, kdy jsou výboje nezachytitelné. Hodnota se udává v kilovoltech [kV]. [15]

### Ztrátový činitel

Tento činitel vyjadřuje, kolik elektrické energie se díky dějům, odehrávajícím se ve struktuře dielektrika, změní na jinou, především tepelnou energii. Tyto přeměny označujeme jako dielektrické ztráty, jež vyjádřené na základě tangenty ztrátového úhlu, jsou ztrátovým činitelem  $\tan \delta$  [-]. [9]

### Mez pevnosti v ohybu

Zkouška se užívá pro hodnocení křehkých materiálů. Hlavním parametrem mechanické zkoušky ohybem je zjištění meze pevnosti v ohybu  $R_{mo}$  [MPa]. Jedná se o maximální sílu, která působí na zkušební vzorek během zkoušky, dokud nedojde k porušení. Mez pevnosti v ohybu dle [16] vypočteme ze vztahu:

$$R_{mo} = \frac{M_{o \max}}{W_o} \quad (2)$$

kde  $W_o$  je modul průřezu (pro kruhový je  $W_o = \pi \cdot d^3 / 32 \text{ mm}^3$ , pro obdélníkový  $W_o = b \cdot h^2 / 6 \text{ mm}^3$ ),

$M_o$  - ohybový moment. Maximální ohybový moment

$$M_{o \max} = F_{\max} \cdot L / 4 \text{ N}\cdot\text{mm}.$$

Přítom

$d$  je průměr kruhové zkušební tyče [mm],

$b$  - šířka [mm],

$h$  - výška tyče obdélníkového průřezu [mm],

$F_{\max}$  - maximální dosažená zátěžná síla [N],

$L$  - vzdálenost podpěr [mm].

### Mez pevnosti v tlaku

Zkouška se užívá především u křehkých materiálů, které jsou namáhány na tlak. Hlavním parametrem zkoušky je zjištění meze pevnosti v tlaku [MPa], která může nastat po dosažení určité deformace nebo až do úplného rozdrčení. Mez pevnosti v tlaku určujeme dle [16] ze vztahu:

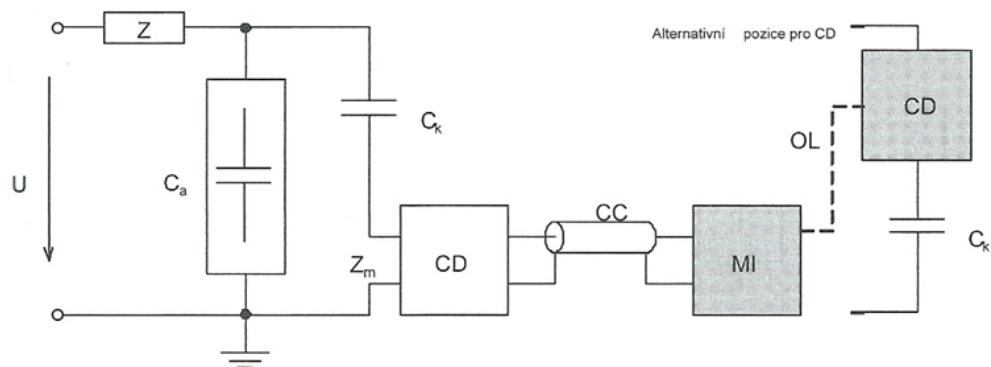
$$R_{mt} = \frac{F_{max}}{S_o} \quad (3)$$

Kde  $F_{max}$  je maximální zátěžná síla,  
 $S_o$  průřez tělesa před zkouškou.

## 5.2 Měřicí metody

### 5.2.1 Měření částečných výbojů

Globální galvanická metoda patří mezi jednu z nejrozšířenějších metod pro detekci částečných výbojů. Pomocí snímací impedance jsou sledovány impulzy částečných výbojů. Ta bývá realizována většinou jako RLC člen s ochrannými prvky proti přepětí a slouží mimo jiné k odfiltrování superponovaných pulzů částečných výbojů od napájecí frekvence. Norma ČSN EN 60270 specifikuje několik možných zapojení pro přímé měření částečných výbojů. V našem schématu zapojení se pro měření uzemněných objektů používá měřicí obvod se zapojením impedance do větve vazebního kondenzátoru, jak je možné vidět na obr. 7.



U	napájecí napětí,	CD	vazební zařízení,
Z	filtr rušení,	CC	spojovací stíněný kabel,
$C_a$	testovaný objekt,	MI	detektor,
$C_k$	vazební kondenzátor,	OL	optický kabel,
$Z_m$	snímací impedance.		

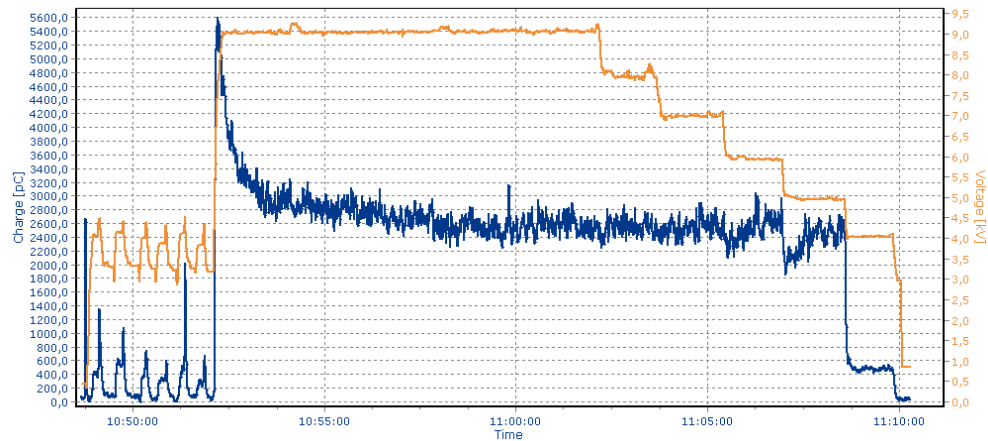
Obr. 8 Schéma zapojení pro detekci částečných výbojů [15]



Především vazební kondenzátor  $C_k$  je důležitou součástí, neboť dodává zkušebnímu obvodu potřebný náboj na kompenzaci přechodné změny napětí způsobené částečným výbojem. Proto musí mít nízkou indukčnost, vysokou kapacitu v porovnání s rozptylovou kapacitou obvodu a nesmí vykazovat významné částečné výboje v rozsahu měřicího napětí. Změny napětí způsobené částečným výbojem jsou detekovány na snímací impedanci a pomocí optického kabelu převáděny do detektoru. Pro vyhodnocování byl použit měřicí systém od společnosti Doble Lemke GmbH, skládající se z detektoru PD-Analyzer a softwaru PD-Smart. Galvanické oddělení měření má několik nesporných výhod, především vysokou citlivost, velkou výpovědischopnost a použitelnost metody za chodu zařízení (on-line). Existuje ale i několik nevýhod, jako citlivost na okolní rušivé vlivy, apod.

Po zapojení podle schématu na obr. 7 byl celý měřicí systém kalibrován pomocí přístroje LDIC LDC-5/S3 na náboj s hodnotou 500 pC. Testované vzorky materiálu byly vloženy do modelu vinutí mezi dvě tyčová vinutí v horní a současně i dolní poloze. Pro porovnání bylo měření prováděné i bez vzorku. Po předchozích zkušenostech s materiálem FOAM 128, kde materiál neměl téměř žádný vliv na výskyt částečných výbojů, byla četnost měření stanovena na 3, protože i zde nebyl předpokládán žádný vliv testovaného materiálu na výskyt částečných výbojů. Postup měření je dobře vidět na obr. 8. Prvním krokem bylo zjištění zapalovacího a zhášecího napětí. Toto měření bylo prováděno s četností 6. Zapalovací napětí bylo zjištěno tak, že se plynule zvyšovalo napětí až do chvíle, kdy se objevily alespoň 2 stálé výboje – zde byla odečtena hodnota zapalovacího napětí. Následně bylo zvýšeno napětí asi o 20 %, abychom zajistili stabilní výbojovou činnost. Potom bylo zkušební napětí snižováno do hodnoty, kdy všechny výboje uhasly – zde byla odečtena hodnota pro zhášecí napětí. Dalším krokem bylo zvýšení napětí na horní mez 9 kV s časovou prodlevou 10 minut pro samozhášecí jev. Po uplynutí této doby bylo snižováno napětí od 9 kV do 4 kV s krokem 1 kV a pravidelným záznamem hodnoty  $Q_{iec}$ . Následně byla stanovena spodní hranice podle hodnot zhášecího napětí. [15]

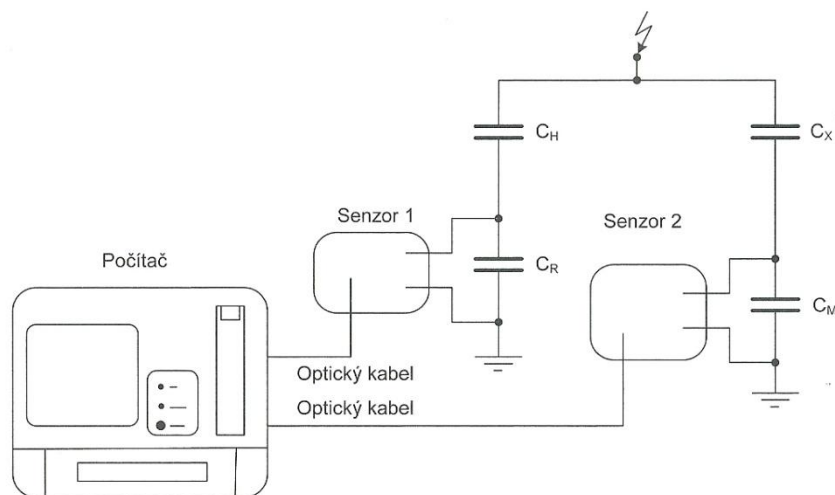




Obr. 9 Časový průběh zkušební napětí a velikosti zdánlivého náboje, záznam z programu PD-Smart

### 5.2.2 Měření ztrátového činitele

Problematikou měření ztrátového činitele a relativní permitivity se zabývá norma ČSN IEC 250. Nejpoužívanějším principem metod pro měření ztrátového činitele je zapojení Scheringova můstku. Dalším rozvíjením tohoto zapojení s důrazem na přesnost během vyvažování, vznikly automatické můstky. Automatický můstek uvedený na obr. 12 vychází z klasického principu Scheringova můstku a slouží k automatickému vyhodnocení  $tg \delta$ ,  $C_x$ . Větve můstku se skládají ze dvou kapacitních děličů – vysokonapěťový  $C_X$  a  $C_N$  a nízkonapěťový  $C_M$  a  $C_R$ . V porovnání s klasickými můstky nemusí být tento úplně vyvážen, neboť se měří vlastně fázový úhel mezi dílčími napětími na obou nízkonapěťových impedancích. Nízkonapěťová větev s kondenzátory  $C_M$  a  $C_R$  je hrubě nastavena tak, že dělicí poměry větví jsou stejného řádu. Ztrátový činitel se určuje z fázového úhlu mezi napětími na nízkonapěťových kondenzátorech  $C_M$  a  $C_R$ . Tato napětí jsou snímána a digitalizována senzory 1 a 2. Následně jsou digitalizované signály přenášeny optickými kabely do počítače, kde jsou analyzovány pomocí rychlé Fourierovy transformace a je určen  $tg \delta$ . Z dělicího poměru měřicí větve je pak určena i hodnota  $C_x$ . [15]



Obr. 10 Automatický můstek pro měření dielektrických ztrát [15]

Vlastní měření probíhalo na měřícím systému společnosti LDIC Lemke Diagnostic GmbH model LDV-5. Na základě zkušeností z předcházejícího měření bylo upuštěno od měření testovaného materiálu v laboratorním modelu vinutí z důvodu jeho téměř nulového vlivu na výsledky bez a s materiálem. Měření dielektrických ztrát tedy probíhalo pomocí systému dvou měděných deskových elektrod, mezi něž byl testovaný materiál vložen. Pro jednotlivé druhy testovaného materiálu bylo provedeno měření s četností 10.

### 5.2.3 Měření meze pevnosti v ohybu

Zkušební těleso je během zkoušky podepřeno na krajích dvěma podpěrnými segmenty. Proti nosníkům působí uprostřed umístěný fixní segment. Testovaný materiál je ohýbán konstantní silou. Nosníky jsou pohyblivé a působí na těleso tak dlouho, dokud není dosažena deformace materiálu nebo jeho částí, popřípadě vrstev. Průběh měření je automaticky zaznamenáván počítačem a podle způsobu vyhodnocení a parametrů zkoušky, je získána nejvyšší hodnota síly. Z této hodnoty je pomocí vztahu (2) vypočtena mezní pevnost v ohybu.

Zkouška meze pevnosti v ohybu byla prováděna na měřícím zařízení Labtech – Labtest 3030 při normální 20°C a zvýšené 70°C teplotě. Vzdálenost podpěr byla nastavena na 140 mm a poloměr podpěrným segmentů na 0,5 mm. Testované vzorky byly zkráceny na velikost 210 x 50 x 25 mm. Měření probíhalo s četností 10 od každého druhu materiálu.

### 5.2.4 Měření meze pevnosti v tlaku

Zkušební těleso je vloženo před začátkem zkoušky mezi dvě desky. Desky působí proti sobě. Jedna z desek je fixní a druhá pohyblivá a stlačuje testovaný materiál konstantní silou.

Zkouška je ukončena úplnou deformací tělesa nebo zborcením jeho vrstev. Průběh je zaznamenáván do počítače a na základě vyhodnocujících kritérií je získána nejvyšší hodnota síly. Z hodnoty síly je pomocí vztahu (3) určena mez pevnosti v tlaku.

Zkouška meze pevnosti v tlaku byla prováděna na měřicím zařízení Labtech – Labtest 3030 při normální 20°C a zvýšené 70°C teplotě. Testované vzorky byly upraveny na velikost 50 x 50 x 25 mm. Měření probíhalo s četností 10 u každého druhu materiálu.

### 5.3 Výroba zkušebních vzorků

Zkušební vzorky byly vyrobeny ve společnosti Trident Plzeň spol. s r.o. zabývající se zakázkovou výrobou především v oblasti zpracování kompozitních materiálů apod.

Celý kompozit se skládá ze sendvičové skelné tkaniny nazývané Parabeam a je vyplněn epoxidovou pryskyřicí Larit L-385 s tužidlem Larit 385. Nejprve bylo pryskyřici nutno smíchat s tužidlem v poměru daném výrobcem. Po tomto kroku je při teplotě 20 °C pryskyřici nutno zpracovat do 20 minut. Alternativně lze použít tužidlo Larit 386, které má dobu zpracovatelnosti prodlouženou na 2 hodiny. Samozřejmě při vyšších teplotách se doba výrazně zkracuje. Pro vzorky byla vyrobena kovová forma s rozměry 300 x 50 x 25,4 mm. První pokusy probíhaly tak, že tkanina se nastříhala na požadovaný rozměr, aby pomocí přehybů vyplnila formu do potřebné tloušťky. Následně byla prosycena pryskyřicí s tužidlem, jejíž množství přibližně odpovídá ploše zpracované tkaniny. Asi 40 % množství pryskyřice bylo rozlito na pomocnou pracovní desku, na kterou byla následně položena skleněná tkanina. Aby byla prosycena spodní polovina vláken, bylo nutné tkaninu přejíždět válečkem, který způsobil výškovou deformaci a tím nasycení vláken. Zbytek, tedy asi 60 % pryskyřice bylo nanášeno na horní stranu tkaniny, která byla opět stlačena válečkem, v tomto okamžiku došlo k prosycení horní poloviny a tedy celistvému prosycení tkaniny. Ta byla následně pomocí přehybů vložena do formy a uzavřena. Doba vytvrzení se pohybuje kolem 24 hodin. Tento způsob zpracování se ovšem neukázal jako funkční, neboť během vytvrzování došlo z důvodu přehybů ke zborcení vláken uvnitř tkaniny a žádný ze vzorků tedy nedosáhl potřebné tloušťky.

Alternativou bylo tedy tkaninu rozstříhat na pruhy, odpovídající kovové formě, jejich prosycení stejným způsobem uvedeným výše a poskládání do formy. Tento způsob se ukázal jako realizovatelný, i když dochází k výrazně většímu roztřepení krajů tkaniny než u způsobu s přehyby. U některých vyrobených vzorků lze pozorovat slabší prosycení horních vrstev, což je způsobeno dlouhou dobou vytvrzování, kdy pryskyřice pomalu proteče na dno formy. To

lze odstranit pravidelným otáčením formy, aby tím nedocházelo ke vzniku nehomogenit, ovlivňujících konečné vlastnosti.

Pro potřeby otestování vlastností materiálu Parabeam bylo celkem vyrobeno 75 kusů vzorků o výše zmíněných rozměrech. Na 25 kusů bylo použito 6 vrstev skelné tkaniny s tloušťkou 4,5 mm, v dalším textu označované jako vzorek 6x4,5 mm, na dalších 25 kusů byly použity 4 vrstvy skelné tkaniny s tloušťkou 8 mm (vzorek 4x8 mm) a na posledních 25 kusů 3 vrstvy skelné tkaniny s tloušťkou 10 mm (vzorek 3x10 mm).

## 6 Výsledky měření

### 6.1 Částečné výboje

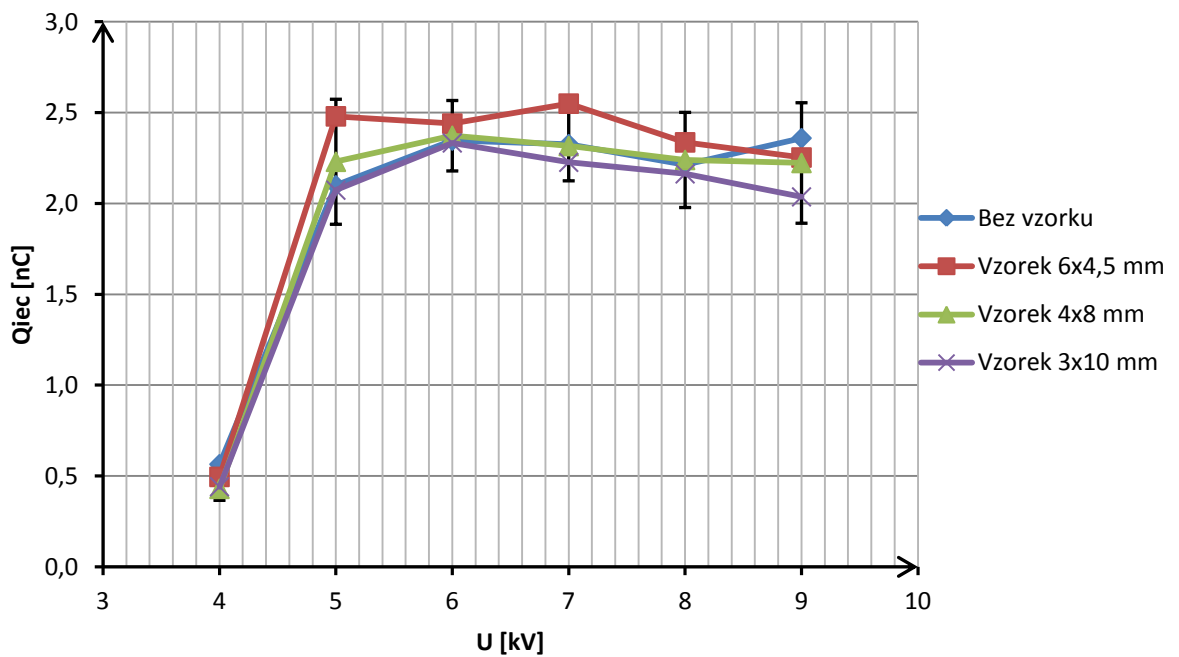
V *Tab. 1* a *Tab. 2* můžeme nalézt střední hodnoty kvantitativně největší opakovaně se vyskytující úroveň náboje  $\overline{Q_{iec}}$  a středního proudu částečných výbojů  $\bar{I}$  naměřených mezi dvěma tyčovými vinutími v laboratorním modelu. Pro účely porovnání byl ověřován vliv materiálu v modelu vinutí, proto měření probíhalo bez vloženého materiálu i s vloženým materiálem. Tabulky obsahují také příslušné směrodatné odchylky a variační koeficienty. Grafy na *Obr. 11* a *Obr. 12* zobrazují vývoj střední hodnoty  $\overline{Q_{iec}}$  a  $\bar{I}$  v závislosti na velikosti zkušebního napětí  $U$  [kV], včetně zobrazení příslušných směrodatných odchylek. Všechny naměřené a vypočítané hodnoty, včetně statistických parametrů, lze dohledat v tabulkách v *Příloze A*.

*Tab. 1* Hodnoty náboje  $\overline{Q_{iec}}$ , včetně směrodatných odchylek a variačních koeficientů

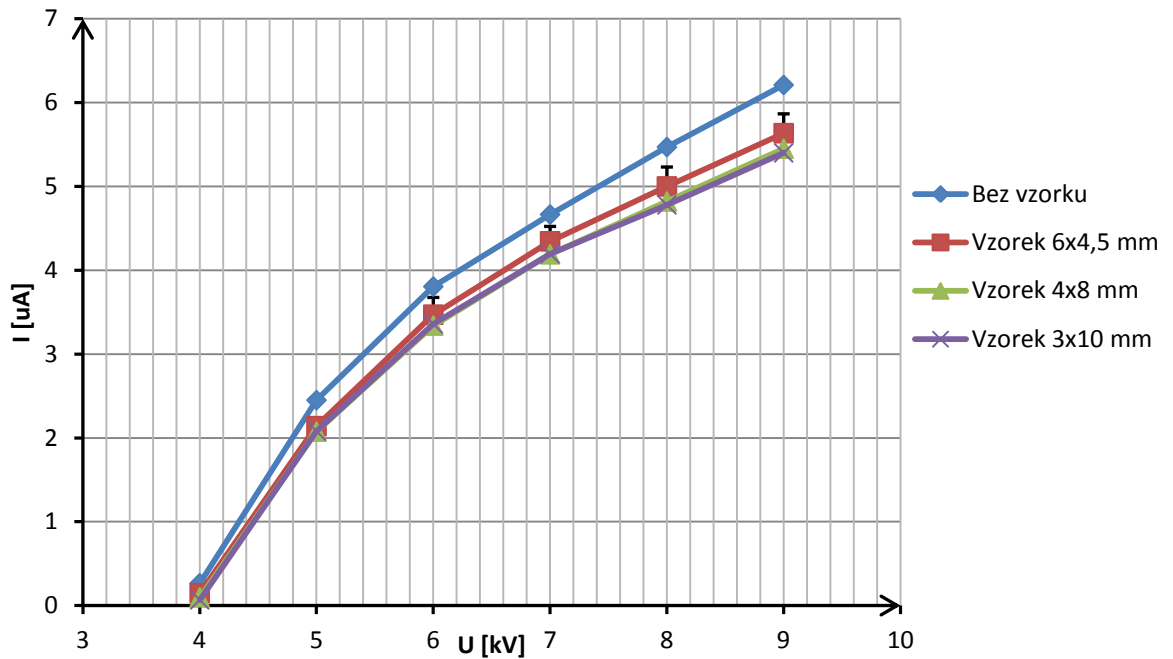
U [kV]	Bez vzorku			Vzorek 4,5 mm			Vzorek 8 mm			Vzorek 10 mm		
	$\overline{Q_{iec}}$ [nC]	s [nC]	v [%]	$\overline{Q_{iec}}$ [nC]	s [nC]	v [%]	$\overline{Q_{iec}}$ [nC]	s [nC]	v [%]	$\overline{Q_{iec}}$ [nC]	s [nC]	v [%]
9	2,360	0,369	15,642	2,253	0,429	19,041	2,223	0,332	14,919	2,037	5,400	9,145
8	2,213	0,317	14,332	2,337	0,285	12,212	2,240	0,262	11,693	2,163	4,780	4,174
7	2,327	0,229	9,828	2,550	0,248	9,717	2,317	0,192	8,268	2,227	4,195	10,018
6	2,347	0,229	9,744	2,440	0,217	8,910	2,373	0,194	8,173	2,333	3,360	15,390
5	2,100	0,349	16,637	2,480	0,276	11,121	2,230	0,344	15,430	2,073	2,080	10,816
4	0,565	0,207	36,727	0,495	0,057	11,439	0,429	0,063	14,733	0,441	0,067	6,448

Tab 2. Hodnoty středního proudu částečných výbojů  $\bar{I}$ , včetně směrodatných odchylek a variačních koeficientů

U [kV]	Bez vzorku			Vzorek 6x4,5 mm			Vzorek 4x8 mm			Vzorek 3x10 mm		
	$\bar{I}$ [uA]	s [uA]	v [%]	$\bar{I}$ [uA]	s [uA]	v [%]	$\bar{I}$ [uA]	s [uA]	v [%]	$\bar{I}$ [uA]	s [uA]	v [%]
9	6,210	0,844	13,589	5,635	0,231	4,099	5,450	0,198	3,625	0,071	0,844	1,318
8	5,470	0,698	12,769	5,000	0,232	4,631	4,820	0,189	3,927	0,115	0,698	2,400
7	4,665	0,544	11,668	4,345	0,178	4,096	4,190	0,176	4,199	0,118	0,544	2,823
6	3,805	0,438	11,522	3,470	0,205	5,922	3,340	0,175	5,228	0,108	0,438	3,227
5	2,450	0,332	13,566	2,140	0,042	1,983	2,075	0,117	5,652	0,100	0,332	4,797
4	0,266	0,149	56,242	0,147	0,068	46,529	0,099	0,050	50,383	0,012	0,149	17,642



Obr. 11 Závislost napětí na velikosti náboje  $Q_{iec}$



Obr. 12 Závislost napětí na velikosti středního proudu částečných výbojů  $I$

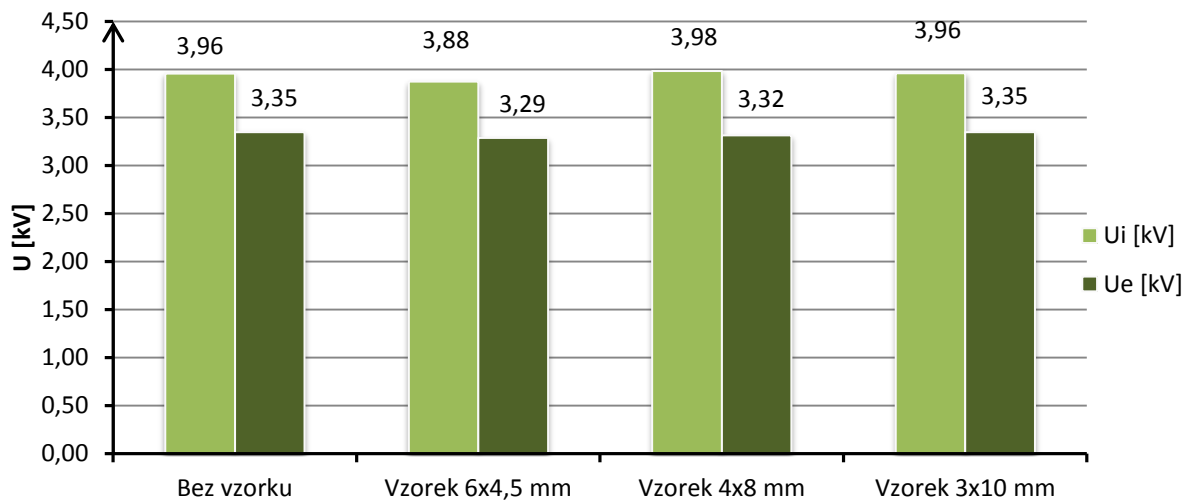
V Tab. 3 můžeme vidět vypočítané střední hodnoty zapalovacího napětí  $\bar{U}_i$  [kV] a zhášecího napětí  $\bar{U}_e$  [kV] pro jednotlivé druhy materiálů. Tabulka dále obsahuje příslušné směrodatné odchylky a variační koeficienty. V grafu na obr. 13 můžeme vzájemně porovnat výsledky pro jednotlivé druhy materiálů. Kompletní naměřené a vypočítané hodnoty včetně statistických parametrů lze nalézt v Příloze A.

Tab. 3 Hodnoty zapalovacích a zhášecích napětí

	Bez vzorku	Vzorek 6x4,5 mm	Vzorek 4x8 mm	Vzorek 3x10 mm
$\bar{U}_i$ [kV]	3,959	3,875	3,984	3,963
s [kV]	0,060	0,087	0,048	0,046
v [%]	1,507	2,236	1,198	1,152

	Bez vzorku	Vzorek 6x4,5 mm	Vzorek 4x8 mm	Vzorek 3x10 mm
$\bar{U}_e$ [kV]	3,349	3,289	3,316	3,347
s [kV]	0,036	0,173	0,078	0,068
v [%]	1,087	5,247	2,358	2,035



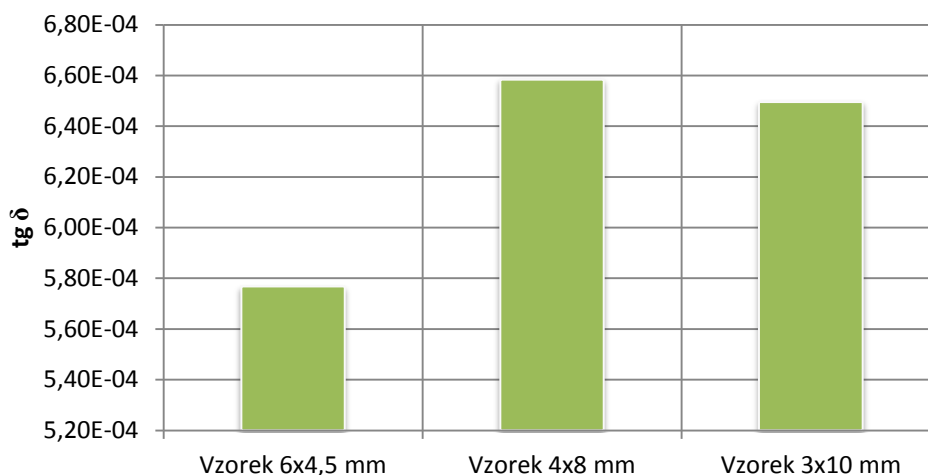
Obr. 13 Porovnání středních hodnot zapalovacích  $\bar{U}_i$  a zhašecích  $\bar{U}_e$  napětí

## 6.2 Ztrátový činitel

Výsledné střední hodnoty ztrátového činitele samostatných vzorků můžeme vidět v Tab. 3, včetně statistických parametrů. Jejich vzájemné porovnání je vidět v grafu na Obr. 13. Všechny naměřené hodnoty můžeme najít v Příloze A.

Tab. 3 Vypočítané hodnoty ztrátového činitele  $\overline{\text{tg } \delta}$  [-], včetně statistických parametrů

	Vzorek 6x4,5 mm	Vzorek 4x8 mm	Vzorek 3x10 mm
$\overline{\text{tg } \delta}$ [-]	5,768E-04	6,583E-04	6,495E-04
s [-]	6,915E-05	2,451E-04	1,693E-04
v [%]	11,989	37,238	26,061
Min	4,67E-04	3,71E-04	4,99E-04
Max	7,24E-04	1,01E-03	9,44E-04
Medián	5,61E-04	5,90E-04	5,53E-04



Obr. 14 Porovnání středních hodnoty ztrátového činitele  $\overline{\text{tg } \delta}$

### 6.3 Mez pevnosti v ohybu

Výsledky síly dosažené při zkoušce přepočítané na pevnost v ohybu v tlaku podle vzorce (1) můžeme vidět v *Tab. 4* pro normální teplotu 20 °C a v *Tab. 5* pro zvýšenou teplotu 70 °C. Odečítaná hodnota síly byla vždy po viditelném zborcení první vrstvy. Graf na *Obr. 15* znázorňuje vzájemné porovnání jednotlivých tloušťek materiálů mezi sebou. Všechny naměřené hodnoty je možné nalézt v *Příloze A*.

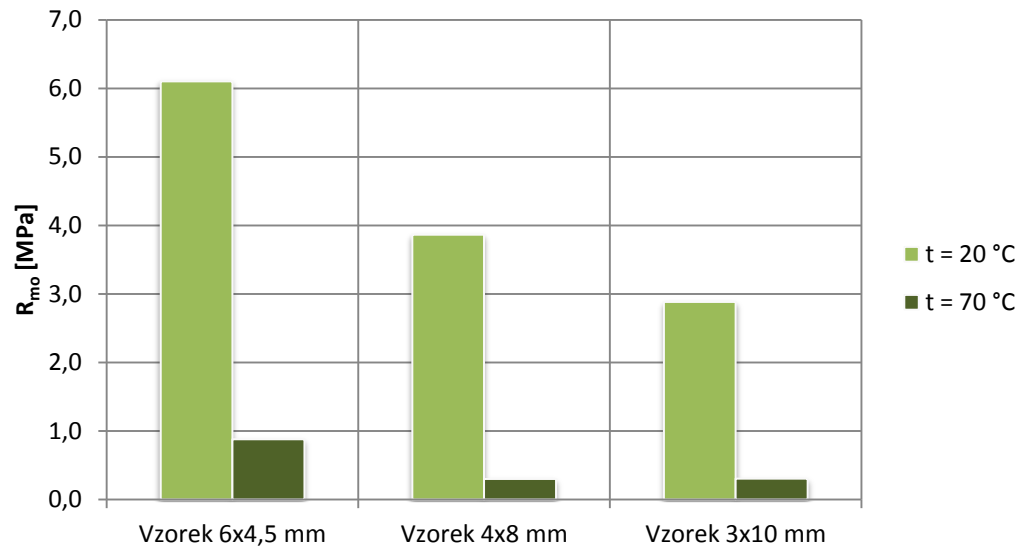
Tab. 4 Vypočítané hodnoty mezi pevnosti v ohybu pro teplotu 20 °C, včetně statistických parametrů

	Vzorek 6x4,5 mm	Vzorek 4x8 mm	Vzorek 3x10 mm
$\overline{R_{m0}}$ [MPa]	6,102	3,865	2,885
s [MPa]	0,915	0,790	0,202
v [%]	14,991	20,451	6,989
Min	4,582	3,121	2,509
Max	7,363	5,228	3,224
Medián	6,272	3,473	2,838

Tab. 5 Vypočítané hodnoty mezi pevnosti v ohybu pro teplotu 70 °C, včetně statistických parametrů

	Vzorek 6x4,5 mm	Vzorek 4x8 mm	Vzorek 3x10 mm
$\overline{R_{m0}}$ [MPa]	0,879	0,299	0,304
s [MPa]	0,189	0,162	0,059
v [%]	21,483	54,095	19,481
Min	0,560	0,084	0,239
Max	1,092	0,642	0,446
Medián	0,953	0,276	0,284





Obr. 15 Porovnání střední hodnoty mezi pevnosti v ohybu pro normální 20 °C a zvýšenou teplotu 70 °C

#### 6.4 Mez pevnosti v tlaku

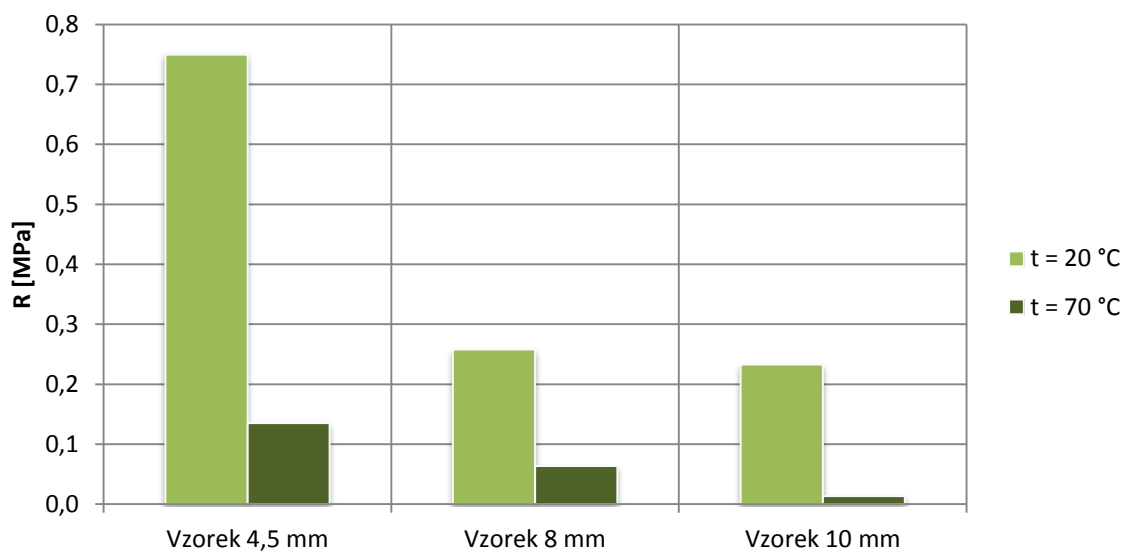
Podobně jako u pevnosti v ohybu i v tomto měření jsou výsledky síly dosažené při zkoušce přepočítané na pevnost v tlaku podle vzorce (2). V Tab. 6 můžeme vidět průměrnou hodnotu  $\overline{R_{mt}}$  [MPa] pro normální teplotu 20 °C a v Tab. 7 pro zvýšenou teplotu 70 °C. Odečítaná hodnota síly byla vždy po viditelném zborcení první vrstvy. Graf na Obr. 15 znázorňuje vzájemné porovnání jednotlivých tloušťek materiálů mezi sebou. Všechny naměřené hodnoty je možné nalézt v Příloze A.

Tab. 6 Vypočítané hodnoty mezi pevnosti v tlaku pro teplotu 20 °C, včetně statistických parametrů

	Vzorek 6x4,5 mm	Vzorek 4x8 mm	Vzorek 3x10 mm
$\overline{R_{mt}}$ [Mpa]	0,750	0,258	0,233
s [Mpa]	0,107	0,044	0,045
v [%]	14,286	16,873	19,356
Min	0,576	0,188	0,193
Max	0,941	0,318	0,325
Medián	0,717	0,249	0,218

Tab. 7 Vypočítané hodnoty mezi pevnosti v tlaku pro teplotu 70 °C, včetně statistických parametrů

	Vzorek 6x4,5 mm	Vzorek 4x8 mm	Vzorek 3x10 mm
R [Mpa]	0,135	0,064	0,013
s [Mpa]	0,018	0,032	0,004
v [%]	13,262	49,576	32,186
Min	0,110	0,014	0,007
Max	0,159	0,105	0,021
Medián	0,138	0,074	0,014



Obr. 16 Porovnání středních hodnot mezi pevnosti v tlaku pro normální 20 °C a zvýšenou teplotu 70 °C

## 7 Vyhodnocení výsledků měření

Na základě prvního měření byl zjišťován vliv materiálu ve vinutí stroje z hlediska částečných výbojů. Výsledky měření jsou založeny na hodnocení kvantitativně nejvyšší opakovaně se vyskytující úrovně náboje  $Q_{iec}$ , která je popsána v normě ČSN EN 60270. Avšak za výpovědnou hodnotu, lze považovat i střední proud částečných výbojů  $I$ . Použití testovaného materiálu v čelech laboratorního modelu vinutí nemá žádný vliv na výskyt částečných výbojů z hlediska velikosti hodnoty náboje  $Q_{iec}$ , jak vypovídá graf na Obr. 11. Podle grafu na Obr. 12, který ukazuje závislosti středního proudu částečných výbojů, lze pozorovat mírný pokles hodnoty proudu  $I$  nad rámec směrodatné odchylky u všech materiálů. Vysoké rozptyly hodnot středního proudu ČV u hodnoty 4 kV a tím i velkých variačních

koeficientů jsou způsobeny tím, že zde již zaniká proud částečných výbojů. Z grafu na *Obr. 13*, zobrazujícím hodnoty zapalovacích a zhašecích napětí částečných výbojů, je vidět, že vložený materiál téměř nezpůsobí jejich významné ovlivnění. Při detailnějším pohledu můžeme malý pokles zapalovacího napětí pozorovat pouze u materiálu 6x4,5 mm.

Výsledky měření dielektrických ztrát samostatných vzorků mezi deskovými elektrodami můžeme vidět na *Obr. 14*. Je vidět, že nejmenší hodnoty ztrátového činitele dosáhneme použitím materiálu složeného ze 6 vrstev s tloušťkou 4,5 mm. Měření bylo prováděno při konstantní hodnotě napětí 500 V, protože i při následném snižování nebo zvyšování zkušebního napětí zůstala hodnota ztrátového činitele stejná. Je potřeba zdůraznit, že z důvodu velikosti vzorků zkušebního materiálu nebylo možno měření provádět podle normy, což ve výsledku znamená vznik chyby, ovlivňující výsledky měření.

Při použití jako vložky do čel jsou rozhodující především mechanické vlastnosti. První takovou zkouškou bylo zjištění meze pevnosti v ohybu. Obecně lze říci, že u materiálů složených z více vrstev, je komplikované vyhodnotit jejich mezní sílu. Vždy je nutno přihlížet ke konkrétní aplikaci. V tomto případě jsme se rozhodli jako mezní sílu vyhodnocovat deformaci jedné z vrstev, které v případě vzorku 6x4,5 mm sice ještě nevede k výraznému zhoršení mechanických vlastností, ale u vzorku 3x10 mm má deformace jedné z vrstev zásadní dopad na pevnosti v ohybu. Pokud se zaměříme na výsledky, z grafu na *Obr. 15* zjistíme, že počet vrstev ovlivňuje výslednou pevnost. Proto jako nejpevnější vychází vzorek 6x4,5 mm. Toto platí za normální teploty. Pokud zvýšíme teplotu na 70 °C, dojde u všech tloušťek materiálu k výraznému poklesu pevnosti z důvodu změknutí použité pryskyřice. Hodnoty při zvýšené teplotě jsou ovšem hodně rozptýlené.

Pro naši aplikaci materiálu jako vložek do čel, je právě zjištění meze pevnosti v tlaku jednou z nejdůležitějších parametrů. Podobně jako u zkoušky pevnosti v ohybu se při mechanické zkoušce pevnosti v tlaku zjišťovala mezní hodnota síly po deformaci jedné z vrstev. Z grafu na *Obr. 16* je vidět, že výrazně se projevuje opět počet vrstev, a tedy nejpevnější se jeví vzorek 6x4,5 mm. Opět při měření za zvýšené teploty se projevila malá teplotní odolnost pryskyřice. Měření bylo prováděno stejným postupem jako při normální teplotě, ovšem opět byly získány hodnoty s velkým rozptylem.

## 8 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo ověřit možnosti aplikovat 3D skleněnou tkaninu Parabeam jako možnou náhradu sklotextitových vložek při opravách čel vinutí. Jednalo by se o dočasnou opravu poškozených vložek vlivem provozu elektrického stroje tak, aby se minimalizovaly ztráty způsobené jeho odstavením. Tento způsob by chtěli uplatnit ve společnosti 1. SERVIS - ENERGO do doby plnohodnotné opravy. Materiál Parabeam se vyrábí v několika tloušťkách a podle výrobce vyniká v jednoduchosti výroby a mechanických vlastnostech.

Pro účely ověření elektrických a mechanických vlastností byly zhotoveny 3 varianty materiálu Parabeam, které se lišily tloušťkou (4,5 , 8, 10 mm) a počtem vrstev (6, 4, 3). Při výrobě vzorků bylo nutno ustoupit od přehybů ke skladbě potřebné tloušťky z nařezaných vrstev materiálu. Tím se ovšem výrazně snížily mechanické vlastnosti, navíc materiál by mohl být díky otevřené boční struktuře náchylný k možným vnikům cizích částic v budoucí zmíněné aplikaci. Částice prachu vzniklé při provozu točivého stroje můžou uvnitř struktury vést ke zhoršení izolačních vlastností. Tento problém by bylo možné odstranit kompletním prosycením boků vložky, a tím zamezit vniku prachu a současně také zlepšit až 3x pevnost v tlaku. Ovšem vzorků s bočním vyplněním pryskyřicí nebylo dostatečné množství, tudíž zlepšení mechanických vlastností bylo zjištěno jen experimentálně.

Vypěňovací epoxidová pryskyřice FOAM 128, která byla předmětem zkoumání diplomové práce Bc. Ondřeje Veselého a předcházela zkoumání materiálu Parabeam, se ukázala jako nevyhovující z důvodu ztráty mechanických vlastností při zvýšené teplotě. Při porovnání obou materiálů vyplývají pro Parabeam výhody především z podoby vnitřní struktury materiálu. Není potřeba vyplňovat celý prostor v čelu vinutí, jako v případě FOAM 128, ale pouze prosytit strukturu materiálu a případně i boky. S tím souvisí i výsledná hmotnost celého kompozitu, která je výrazně menší než FOAM 128. Naopak jako nevýhodu vidím dobu vytvrzení, která se v případě FOAM 128 pohybuje maximálně do 3 hodin. Naproti tomu vytvrzení vzorků z Parabeamu se podle spol. Trident s.r.o. pohybovalo kolem 24 hodin.

Vzorky byly otestovány v laboratorním modelu čela vinutí na výskyt výbojové činnosti, dále pak v elektrodovém systému na dielektrické ztráty. Mechanické zkoušky za normální a zvýšené teploty ověřily materiál v pevnosti v ohybu a tlaku. Na základě těchto měření je patrné, že počet vrstev pozitivně ovlivňuje výsledky zkoušek. Vzorek složený z 6 vrstev tloušťky 4,5 mm vykazoval oproti ostatním vzorkům snížení výbojové činnosti a nejmenší dielektrické ztráty, ale především výrazně lepší pevnosti v ohybu a tlaku za normální teploty.

Co je pro všechny vzorky materiálu společné, je ztráta mechanických vlastností v obou zkouškách za zvýšené teploty 70 °C, kdy se pryskyřice změní v gel. Protože se jedná o kompozit, na konečných mechanických vlastnostech se z větší části podílí struktura materiálu, ale také použitá pryskyřice, protože vložky v čelech mohou být díky okolí namáhány až teplotou 70 °C, je nutné použít tepelně odolnou pryskyřici. V našem případě byla použita epoxidová pryskyřice Larit L-385, která ovšem podle výrobce není tepelně odolná, pokud není před použitím temperovaná při teplotě min. 60 °C [20], což je pro budoucí aplikaci v čelech vinutí naprosto nevhodné. Jak již bylo zmíněno, vzorky vyrobené ve spol. Trident s.r.o. byly vytvrzovány při pokojové teplotě 24 hodin a nemuselo tedy dojít k jejich úplnému vytvrzení, jak by bylo podle výrobce pryskyřice potřeba. Navíc výsledky mechanických zkoušek, kde bylo dosahováno velkých variačních koeficientů, naznačují, že materiál není homogenní a velmi záleží na technologickém postupu výroby. Proto tedy tuto pryskyřici nelze doporučit v dané aplikaci za vhodnou, jako alternativa by mohlo být použití např. pryskyřic vytvrditelných za pomoci UV záření, jejíž vytvrzování není závislé na teplotě, a tedy by nebránilo aplikaci v čelech vinutí točivého stroje.

Použití jiného druhu pryskyřice by mohlo být předmětem dalšího zkoumání vlastností materiálu Parabeam, pro použití jako vložek v čelech vinutí. V testovaném provedení a zjištěných vlastnostech proto nelze materiál Parabeam v kombinaci s epoxidovou pryskyřicí Larit L-385 doporučit.

## Použitá literatura a internetové zdroje

- [1] VESELÝ, Bc. Ondřej. Aspekty technologie oprav čel vinutí velkých točivých strojů. Plzeň, 2011. 79 s. Diplomová práce. Západočeská univerzita, Fakulta elektrotechnická, KET.
- [2] BARTOŠ, CSC., Prof. Ing. Václav. Elektrické stroje. Plzeň : Západočeská univerzita v Plzni, 2004. 222 s.
- [3] Točivý elektrický stroj. In Wikipedia : the free encyclopedia [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 2006, last modified on 2006 [cit. 2011-11-07]. Dostupné z WWW: <[http://sk.wikipedia.org/wiki/Točivý\\_elektrický\\_stroj](http://sk.wikipedia.org/wiki/Točivý_elektrický_stroj)>.
- [4] Alternátor. In Wikipedia : the free encyclopedia [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 2005, last modified on 2011 [cit. 2011-11-07]. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Alternátor>>.
- [5] MRÁZ, Bc. Petr. Posouzení stárnutí izolačních systémů sledováním výbojové činnosti. Plzeň, 2010. 48 s. Diplomová práce. Západočeská univerzita. Fakulta elektrotechnická, KET.
- [6] SEQUENZ, Heinrich, et al. Technologie vinutí elektrických strojů točivých. Praha : SNTL, 1980. 312 s.
- [7] STONE, Greg, et al. Electrical Insulation for Rotating Machines - Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair [online]. USA : John Wiley & Sons, Inc., 2004 [cit. 2011-11-26]. Dostupné z WWW: <[http://books.google.com/books?id=nxfiqMblF34C&printsec=frontcover&hl=cs&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](http://books.google.com/books?id=nxfiqMblF34C&printsec=frontcover&hl=cs&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false)>.
- [8] BESEDA, Jan. Vytvrzovací postupy hlavní izolace velkých točivých strojů. Plzeň, 2009. 42 s. Bakalářská práce. Západočeská univerzita. Fakulta elektrotechnická, KET.
- [9] MENTLÍK, Václav. Dielektrické prvky a systémy. 2006. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-189-6.
- [10] Material Data Sheets. THE GUND COMPANY. [online]. 2007 [cit. 2012-01-04]. Dostupné z WWW: <http://thegundcompany.com/files/index.cfm?pdfpath=Side Ripple Spring.pdf>
- [11] Resin rich insulation systems for High-Voltage rotating machines. VON ROLL. [online]. 2007 [cit. 2012-01-04]. Dostupné z WWW: [http://www.vonroll.com/downloads/brochures/RESIN\\_RICH\\_LoRes\\_E.pdf](http://www.vonroll.com/downloads/brochures/RESIN_RICH_LoRes_E.pdf)
- [12] LÁBADI, J.; KŘELOVEC, Z. Technologický postup – výměna vinutí. Plzeň: 1. SERVIS - ENERGO, s.r.o.

- 
- [13] fotodokumentace spol. 1. SERVIS-ENERGO s.r.o.
- [14] 1. SERVIS-ENERGO, s.r.o. [online]. © 2012 [cit. 2012-02-13].  
Dostupné z: <http://www.servisenergo.cz/>
- [15] MENTLÍK, Václav, Josef PIHERA, Radek POLANSKÝ, Pavel PROSR a Pavel TRNKA. Diagnostika elektrických zařízení. 2008. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2008. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [16] PLUHAŘ A KOLEKTIV, Prof. Ing. Dr. Jaroslav. Nauka o materiálech. 1989. vyd. Praha: SNTL, 1989.
- [17] Havel Composites [online]. © 2010, 8. 12. 2011 [cit. 2012-03-04].  
Dostupné z: <http://www.havel-composites.com/>
- [18] Skolil Kompozit s.r.o. [online]. © 2010 [cit. 2012-03-04].  
Dostupné z: <http://www.skolil.cz/>
- [19] HAVLÍČEK, Ing. Tomáš. Částečné výboje v elektronických zařízeních pracujících na vyšších kmitočtech. Brno, 2009. Dostupné z: [http://www.vutbr.cz/studium/zaverecne-prace?zp\\_id=24853](http://www.vutbr.cz/studium/zaverecne-prace?zp_id=24853). Disertační práce. VUT Brno, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [20] Lange+Ritter GmbH: Faserverstärkte Kunststoffe. Lange+Ritter GmbH: Faserverstärkte Kunststoffe [online]. 2012, 2012 [cit. 2012-04-09]. Dostupné z: <http://www.lange-ritter.de/content/index.php>
- [21] Parabeam 3D Glass Fabric [online]. 2011 [cit. 2012-04-09]. Dostupné z: <http://www.parabeam.nl/>

## Příloha A: Naměřené hodnoty

### Částečné výboje

#### Bez vzorku

Q <sub>iec</sub> [nC]	Číslo měření									
U [kV]	1	2	3	$\bar{Q}_{iec}$ [nC]	s [nC]	v [%]	u <sub>a</sub> [nC]	Med [nC]	Min [nC]	Max [nC]
9	2,86	1,98	2,24	2,36	0,37	15,64	0,45	2,24	1,98	2,86
8	2,64	1,88	2,12	2,21	0,32	14,33	0,39	2,12	1,88	2,64
7	2,65	2,17	2,16	2,33	0,23	9,83	0,28	2,17	2,16	2,65
6	2,63	2,07	2,34	2,35	0,23	9,74	0,28	2,34	2,07	2,63
5	2,59	1,80	1,91	2,10	0,35	16,64	0,43	1,91	1,80	2,59
4	0,84	0,53	0,33	0,56	0,21	36,73	0,25	0,53	0,33	0,84

I [uA]	Číslo měření									
U [kV]	1	2	3	$\bar{I}$ [uA]	s [uA]	v [%]	u <sub>a</sub> [uA]	Med [uA]	Min [uA]	Max [uA]
9	7,10	5,32	5,30	5,91	0,84	14,29	1,03	5,32	5,30	7,10
8	6,19	4,75	4,67	5,20	0,70	13,42	0,86	4,75	4,67	6,19
7	5,21	4,12	4,00	4,44	0,54	12,25	0,67	4,12	4,00	5,21
6	4,27	3,34	3,34	3,65	0,44	12,01	0,54	3,34	3,34	4,27
5	2,80	2,10	2,09	2,33	0,33	14,26	0,41	2,10	2,09	2,80
4	0,40	0,13	0,05	0,19	0,15	77,24	0,18	0,13	0,05	0,40

#### Vzorek 6x4,5 mm

Q <sub>iec</sub> [nC]	Číslo měření									
U [kV]	1	2	3	$\bar{Q}_{iec}$ [nC]	s [nC]	v [%]	u <sub>a</sub> [nC]	Med [nC]	Min [nC]	Max [nC]
9	1,96	1,94	2,86	2,25	0,43	19,04	0,53	1,96	1,94	2,86
8	2,43	1,95	2,63	2,34	0,29	12,21	0,35	2,43	1,95	2,63
7	2,36	2,39	2,90	2,55	0,25	9,72	0,30	2,39	2,36	2,90
6	2,41	2,19	2,72	2,44	0,22	8,91	0,27	2,41	2,19	2,72
5	2,53	2,12	2,79	2,48	0,28	11,12	0,34	2,53	2,12	2,79
4	0,50	0,42	0,56	0,50	0,06	11,44	0,07	0,50	0,42	0,56

I [uA]	Číslo měření									
U [kV]	1	2	3	$\bar{I}$ [uA]	s [uA]	v [%]	u <sub>a</sub> [uA]	Med [uA]	Min [uA]	Max [uA]
9	5,88	5,39	5,88	5,72	0,23	4,04	0,28	5,88	5,39	5,88
8	5,22	4,78	5,31	5,10	0,23	4,54	0,28	5,22	4,78	5,31
7	4,52	4,17	4,57	4,42	0,18	4,03	0,22	4,52	4,17	4,57
6	3,62	3,32	3,82	3,59	0,21	5,73	0,25	3,62	3,32	3,82
5	2,14	2,14	2,23	2,17	0,04	1,96	0,05	2,14	2,14	2,23
4	0,23	0,07	0,11	0,13	0,07	50,79	0,08	0,11	0,07	0,23



**Vzorek 6x8 mm**

Q <sub>iec</sub> [nC]	Číslo měření			U [kV]	Q <sub>iec</sub> [nC]	s [nC]	v [%]	u <sub>a</sub> [nC]	Med [nC]	Min [nC]	Max [nC]
	1	2	3								
9	2,26	1,80	2,61	2,22	0,33	14,92	0,41	2,26	1,80	2,61	
8	2,07	2,04	2,61	2,24	0,26	11,69	0,32	2,07	2,04	2,61	
7	2,37	2,06	2,52	2,32	0,19	8,27	0,23	2,37	2,06	2,52	
6	2,49	2,10	2,53	2,37	0,19	8,17	0,24	2,49	2,10	2,53	
5	2,27	1,79	2,63	2,23	0,34	15,43	0,42	2,27	1,79	2,63	
4	0,48	0,34	0,47	0,43	0,06	14,73	0,08	0,47	0,34	0,48	

I [uA]	Číslo měření			U [kV]	I [uA]	s [uA]	v [%]	u <sub>a</sub> [uA]	Med [uA]	Min [uA]	Max [uA]
	1	2	3								
9	5,68	5,22	5,58	5,49	0,20	3,60	0,24	5,58	5,22	5,68	
8	5,01	4,63	5,05	4,90	0,19	3,87	0,23	5,01	4,63	5,05	
7	4,35	4,03	4,44	4,27	0,18	4,12	0,22	4,35	4,03	4,44	
6	3,52	3,16	3,54	3,41	0,17	5,13	0,21	3,52	3,16	3,54	
5	2,21	1,94	2,16	2,10	0,12	5,58	0,14	2,16	1,94	2,21	
4	0,16	0,04	0,12	0,11	0,05	46,97	0,06	0,12	0,04	0,16	

**Vzorek 3x10 mm**

Q <sub>iec</sub> [nC]	Číslo měření			U [kV]	Q <sub>iec</sub> [nC]	s [nC]	v [%]	u <sub>a</sub> [nC]	Med [nC]	Min [nC]	Max [nC]
	1	2	3								
9	1,90	1,91	2,30	2,04	0,19	9,14	0,23	1,91	1,90	2,30	
8	2,15	2,06	2,28	2,16	0,09	4,17	0,11	2,15	2,06	2,28	
7	2,00	2,15	2,53	2,23	0,22	10,02	0,27	2,15	2,00	2,53	
6	2,05	2,11	2,84	2,33	0,36	15,39	0,44	2,11	2,05	2,84	
5	1,90	1,93	2,39	2,07	0,22	10,82	0,27	1,93	1,90	2,39	
4	0,41	0,43	0,48	0,44	0,03	6,45	0,03	0,43	0,41	0,48	

I [uA]	Číslo měření			U [kV]	I [uA]	s [uA]	v [%]	u <sub>a</sub> [uA]	Med [uA]	Min [uA]	Max [uA]
	1	2	3								
9	5,41	5,39	5,55	5,45	0,07	1,31	0,09	5,41	5,39	5,55	
8	4,86	4,70	4,98	4,85	0,11	2,37	0,14	4,86	4,70	4,98	
7	4,27	4,12	4,41	4,27	0,12	2,78	0,15	4,27	4,12	4,41	
6	3,36	3,36	3,59	3,44	0,11	3,15	0,13	3,36	3,36	3,59	
5	2,00	2,16	2,24	2,13	0,10	4,68	0,12	2,16	2,00	2,24	
4	0,06	0,07	0,09	0,07	0,01	15,86	0,01	0,07	0,06	0,09	

## Zapalovací a zhášecí napětí

### Bez vzorku

			Počet měření						Aritmetický průměr
			1	2	3	4	5	6	
Číslo měření	1	U <sub>i</sub> [kV]	3,82	4,10	3,85	3,98	4,05	3,89	3,95
		U <sub>e</sub> [kV]	3,42	3,28	3,40	3,53	3,34	3,35	3,39
	2	U <sub>i</sub> [kV]	3,97	3,86	3,94	4,07	3,71	3,80	3,89
		U <sub>e</sub> [kV]	3,36	3,35	3,27	3,33	3,22	3,27	3,30
	3	U <sub>i</sub> [kV]	4,05	4,09	3,97	4,10	4,00	4,01	4,04
		U <sub>e</sub> [kV]	3,37	3,32	3,21	3,46	3,42	3,39	3,36

	Aritmetický průměr	s [kV]	v [%]	u <sub>a</sub> [kV]
U <sub>i</sub> [kV]	3,96	0,0597	1,51	0,07
U <sub>e</sub> [kV]	3,35	0,0364	1,09	0,04

### Vzorek 6x4,5 mm

			Počet měření						Aritmetický průměr
			1	2	3	4	5	6	
Číslo měření	1	U <sub>i</sub> [kV]	3,94	3,52	3,63	3,78	3,86	3,79	3,75
		U <sub>e</sub> [kV]	3,10	3,07	3,02	3,07	3,06	3,04	3,06
	2	U <sub>i</sub> [kV]	4,02	3,86	3,82	4,00	3,95	4,04	3,95
		U <sub>e</sub> [kV]	3,32	3,39	3,31	3,41	3,34	3,21	3,33
	3	U <sub>i</sub> [kV]	3,87	3,87	3,93	4,03	3,99	3,85	3,92
		U <sub>e</sub> [kV]	3,45	3,49	3,37	3,50	3,49	3,56	3,48

	Aritmetický průměr	s [kV]	v [%]	u <sub>a</sub> [kV]
U <sub>i</sub> [kV]	3,88	0,0866	2,24	0,11
U <sub>e</sub> [kV]	3,29	0,1726	5,25	0,21

### Vzorek 4x8 mm

			Počet měření						Aritmetický průměr
			1	2	3	4	5	6	
Číslo měření	1	U <sub>i</sub> [kV]	4,04	4,03	3,85	3,95	3,80	3,87	3,92
		U <sub>e</sub> [kV]	3,32	3,20	3,24	3,36	3,18	3,26	3,26
	2	U <sub>i</sub> [kV]	4,07	4,12	3,89	4,09	4,09	3,98	4,04
		U <sub>e</sub> [kV]	3,42	3,41	3,38	3,45	3,46	3,44	3,43
	3	U <sub>i</sub> [kV]	4,10	4,13	3,96	3,88	4,04	3,82	3,99
		U <sub>e</sub> [kV]	3,32	3,33	3,25	3,23	3,26	3,18	3,26

	Aritmetický průměr	s [kV]	v [%]	u <sub>a</sub> [kV]
U <sub>i</sub> [kV]	3,98	0,0477	1,20	0,06
U <sub>e</sub> [kV]	3,32	0,0782	2,36	0,10

**Vzorek 3x10 mm**

			Počet měření						Aritmetický průměr
			1	2	3	4	5	6	
Číslo měření	1	U <sub>i</sub> [kV]	3,98	3,80	3,89	3,96	3,97	3,90	3,92
		U <sub>e</sub> [kV]	3,37	3,21	3,30	3,36	3,22	3,21	3,28
	2	U <sub>i</sub> [kV]	4,04	4,08	3,93	4,01	3,99	4,10	4,03
		U <sub>e</sub> [kV]	3,41	3,42	3,54	3,42	3,44	3,41	3,44
	3	U <sub>i</sub> [kV]	3,98	3,90	3,82	3,90	4,05	4,03	3,95
		U <sub>e</sub> [kV]	3,32	3,25	3,36	3,35	3,28	3,38	3,32

	Aritmetický průměr	s [kV]	v [%]	u <sub>a</sub> [kV]
U <sub>i</sub> [kV]	3,96	0,0457	1,15	0,06
U <sub>e</sub> [kV]	3,35	0,0681	2,04	0,08

**Dielektrické ztráty****Vzorek 6x4,5 mm**

Vrms [V]	tgδ [-]
502,4	6,26E-04
505,0	6,15E-04
501,1	7,24E-04
505,1	5,39E-04
502,6	4,67E-04
502,0	5,40E-04
502,7	5,82E-04
502,7	5,13E-04
503,8	5,41E-04
503,4	6,21E-04

tgδ [-]	5,77E-04
s [-]	6,915E-05
v [%]	11,99
u <sub>a</sub> [-]	7,29E-05
Min	4,67E-04
Max	7,24E-04
Medián	5,61E-04

**Vzorek 4x8 mm**

Vrms [V]	tgδ [-]
502,7	8,76E-04
503,9	9,07E-04
504,5	6,50E-04
505,8	4,58E-04
507,7	9,77E-04
503,4	1,01E-03
505,2	3,71E-04
502,9	3,98E-04
502,4	4,10E-04
504,6	5,29E-04

tgδ [-]	6,58E-04
s [-]	2,45E-04
v [%]	37,24
u <sub>a</sub> [-]	2,58E-04
Min	3,71E-04
Max	1,01E-03
Medián	5,90E-04

**Vzorek 3x10 mm**

Vrms [V]	tgδ [-]
500,7	9,44E-04
504,7	5,20E-04
503,1	9,02E-04
499,9	5,52E-04
503,1	8,66E-04
497,8	5,99E-04
502,2	5,32E-04
505,9	5,53E-04
502,0	5,28E-04
502,0	4,99E-04

tgδ [-]	6,49E-04
s [-]	1,69E-04
v [%]	26,06
u <sub>a</sub> [-]	1,78E-04
Min	4,99E-04
Max	9,44E-04
Medián	5,53E-04

## Mez pevnosti v ohybu

### Vzorek 6x4,5 mm – normální teplota 20°C

Číslo vzorku	Šířka vzorku b [mm]			Tloušťka vzorku h [mm]			Aritmetický průměr		Průřez A [mm <sup>2</sup> ]	Mezní síla F [N]	R [Mpa]
	1.	2.	3.	1.	2.	3.	b [mm]	h [mm]			
1	48,86	49,25	49,99	25,75	25,69	25,73	49,37	25,72	1269,88	734,25	4,72
2	49,07	49,22	49,38	25,67	25,59	25,65	49,22	25,64	1261,92	1029,94	6,69
3	50,31	50,38	50,58	25,16	25,10	25,41	50,42	25,22	1271,84	1099,71	7,20
4	49,51	49,47	49,75	25,74	25,66	25,68	49,58	25,69	1273,79	1020,72	6,55
5	49,41	48,90	48,50	25,83	25,58	25,54	48,94	25,65	1255,23	845,81	5,52
6	48,77	48,74	49,11	25,38	25,38	25,55	48,87	25,44	1243,17	902,75	6,00
7	48,77	49,04	48,72	25,26	25,04	25,29	48,84	25,20	1230,69	985,08	6,67
8	49,46	49,20	49,72	25,89	25,80	26,02	49,46	25,90	1281,18	906,34	5,74
9	49,80	49,51	49,51	25,79	25,60	25,64	49,61	25,68	1273,73	1146,70	7,36
10	49,29	49,29	49,16	25,78	25,73	25,99	49,25	25,83	1272,21	717,02	4,58

Aritmetický průměr	938,83	6,10
Směrodatná odchylka	137,22	0,91
Variační koeficient	14,62	14,99
Min	717,02	4,58
Max	1146,70	7,36
Median	945,71	6,27
Nejistota typu A	144,65	0,96

### Vzorek 6x4,5 mm – zvýšená teplota 70°C

Číslo vzorku	Šířka vzorku b [mm]			Tloušťka vzorku h [mm]			Aritmetický průměr		Průřez A [mm <sup>2</sup> ]	Mezní síla F [N]	R [Mpa]
	1.	2.	3.	1.	2.	3.	b [mm]	h [mm]			
11	48,37	48,95	49,76	25,98	26,06	26,35	49,03	26,13	1281,07	89,21	0,56
12	50,44	50,85	50,37	25,97	25,74	25,79	50,55	25,83	1305,96	90,28	0,56
13	49,07	49,24	49,61	25,15	25,17	25,30	49,31	25,21	1242,86	109,25	0,73
14	50,48	49,38	49,25	26,22	26,05	26,10	49,70	26,12	1298,42	150,44	0,93
15	50,17	50,30	49,25	25,74	25,61	25,71	49,91	25,69	1281,94	157,88	1,01
16	50,52	50,73	50,22	25,54	25,49	25,72	50,49	25,58	1291,70	132,97	0,85
17	49,57	49,59	49,98	26,01	25,74	25,63	49,71	25,79	1282,27	153,38	0,97
18	53,00	53,76	51,81	25,60	25,59	25,61	52,86	25,60	1353,13	179,56	1,09
19	48,87	49,01	49,46	25,58	25,37	25,28	49,11	25,41	1247,97	164,94	1,09
20	50,17	50,96	50,88	25,36	25,38	25,54	50,67	25,43	1288,37	155,43	1,00

Aritmetický průměr	138,33	0,88
Směrodatná odchylka	30,09	0,19
Variační koeficient	21,75	21,48
Min	89,21	0,56
Max	179,56	1,09
Median	151,91	0,95
Nejistota typu A	31,71	0,20

**Vzorek 4x8 mm – normální teplota 20°C**

Číslo vzorku	Šířka vzorku b [mm]			Tloušťka vzorku h [mm]			Aritmetický průměr		Průřez A [mm <sup>2</sup> ]	Mezní síla F [N]	R [Mpa]
	1.	2.	3.	1.	2.	3.	b [mm]	h [mm]			
1	48,96	48,62	48,74	25,28	24,85	25,29	48,77	25,14	1226,16	663,17	4,52
2	48,81	49,90	49,05	25,51	25,39	25,36	49,25	25,42	1252,02	626,51	4,13
3	49,12	48,48	49,47	25,17	25,15	25,33	49,02	25,22	1236,21	761,27	5,13
4	49,81	49,34	49,93	26,25	25,93	25,91	49,69	26,03	1293,52	517,32	3,23
5	50,17	51,05	50,52	26,04	25,86	25,87	50,58	25,92	1311,20	505,22	3,12
6	50,24	50,13	49,80	25,53	25,46	25,55	50,06	25,51	1277,11	485,57	3,13
7	50,11	50,55	50,25	25,29	25,04	25,26	50,30	25,20	1267,48	795,13	5,23
8	50,10	49,87	49,79	25,66	25,48	25,74	49,92	25,63	1279,28	570,16	3,65
9	49,27	49,15	48,63	25,88	25,60	25,64	49,02	25,71	1260,06	508,09	3,29
10	49,23	49,65	49,93	25,56	25,27	25,28	49,60	25,37	1258,44	488,99	3,22

Aritmetický průměr	592,14	3,86
Směrodatná odchylka	108,96	0,79
Variační koeficient	18,40	20,45
Min	485,57	3,12
Max	795,13	5,23
Median	543,74	3,47
Nejistota typu A	114,86	0,83

**Vzorek 4x8 mm – zvýšená teplota 70°C**

Číslo vzorku	Šířka vzorku b [mm]			Tloušťka vzorku h [mm]			Aritmetický průměr		Průřez A [mm <sup>2</sup> ]	Mezní síla F [N]	R [Mpa]
	1.	2.	3.	1.	2.	3.	b [mm]	h [mm]			
11	50,04	48,67	48,94	25,63	25,52	25,64	49,22	25,60	1259,78	33,75	0,22
12	52,29	53,39	52,51	25,02	24,56	25,25	52,73	24,94	1315,26	16,27	0,10
13	51,77	50,70	51,07	25,46	25,51	25,45	51,18	25,47	1303,73	13,35	0,08
14	49,17	49,28	49,42	25,36	25,45	25,56	49,29	25,46	1254,76	40,35	0,27
15	48,66	48,76	48,66	25,67	25,56	25,59	48,69	25,61	1246,87	97,67	0,64
16	52,90	52,58	50,95	25,53	25,40	25,21	52,14	25,38	1323,40	47,19	0,30
17	49,66	49,45	49,57	24,54	25,37	25,47	49,56	25,13	1245,28	42,84	0,29
18	51,24	50,55	50,57	25,81	25,57	25,67	50,79	25,68	1304,37	41,52	0,26
19	49,30	48,88	49,36	25,29	25,38	25,40	49,18	25,36	1247,04	46,15	0,31
20	49,09	49,11	50,01	25,65	25,45	25,57	49,40	25,56	1262,58	80,42	0,52

Aritmetický průměr	45,95	0,30
Směrodatná odchylka	24,53	0,16
Variační koeficient	53,38	54,09
Min	13,35	0,08
Max	97,67	0,64
Median	42,18	0,28
Nejistota typu A	25,86	0,17

**Vzorek 3x10 mm – normální teplota 20°C**

Číslo vzorku	Šířka vzorku b [mm]			Tloušťka vzorku h [mm]			Aritmetický průměr		Průřez A [mm <sup>2</sup> ]	Mezní síla F [N]	R [Mpa]
	1.	2.	3.	1.	2.	3.	b [mm]	h [mm]			
1	49,54	49,42	48,43	25,49	25,54	25,54	49,13	25,52	1253,96	464,37	3,05
2	49,73	49,83	49,80	25,89	25,76	25,53	49,79	25,73	1280,84	497,26	3,17
3	49,45	49,53	51,27	25,38	25,40	25,38	50,08	25,39	1271,45	495,57	3,22
4	48,91	48,51	49,13	26,29	26,11	26,10	48,85	26,17	1278,24	433,97	2,72
5	49,80	48,97	48,82	25,23	25,30	25,49	49,20	25,34	1246,64	434,42	2,89
6	49,17	49,06	48,45	26,02	25,89	25,76	48,89	25,89	1265,85	439,80	2,82
7	49,42	49,55	49,58	25,45	25,35	25,41	49,52	25,40	1257,89	427,14	2,81
8	49,26	49,52	49,30	25,53	25,51	25,58	49,36	25,54	1260,65	438,15	2,86
9	48,88	48,94	48,76	25,97	25,76	25,73	48,86	25,82	1261,57	389,11	2,51
10	49,83	49,60	49,06	25,65	25,62	25,99	49,50	25,75	1274,70	438,92	2,81

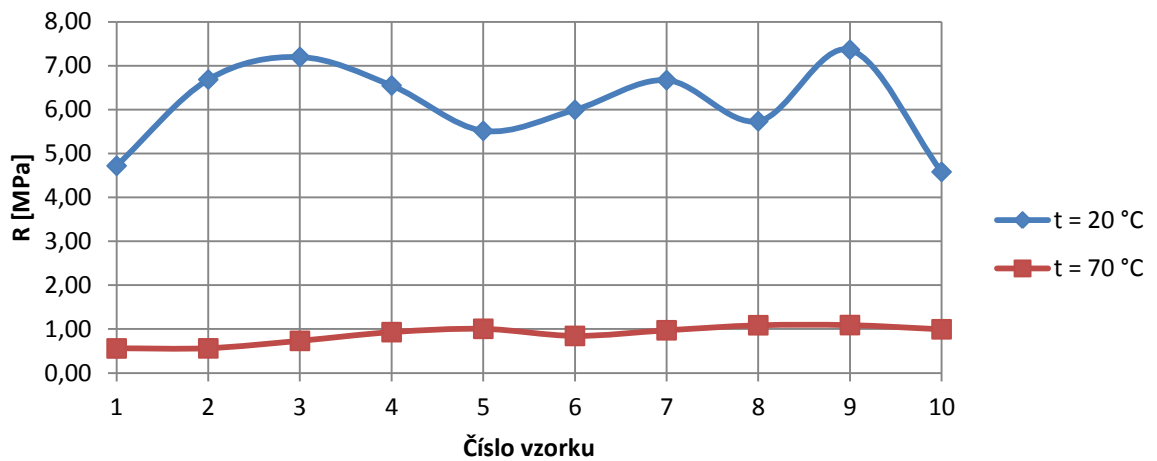
Aritmetický průměr	445,87	2,89
Směrodatná odchylka	30,73	0,20
Variační koeficient	6,89	6,99
Min	389,11	2,51
Max	497,26	3,22
Median	438,53	2,84
Nejistota typu A	32,39	0,21

**Vzorek 3x10 mm – zvýšená teplota 70°C**

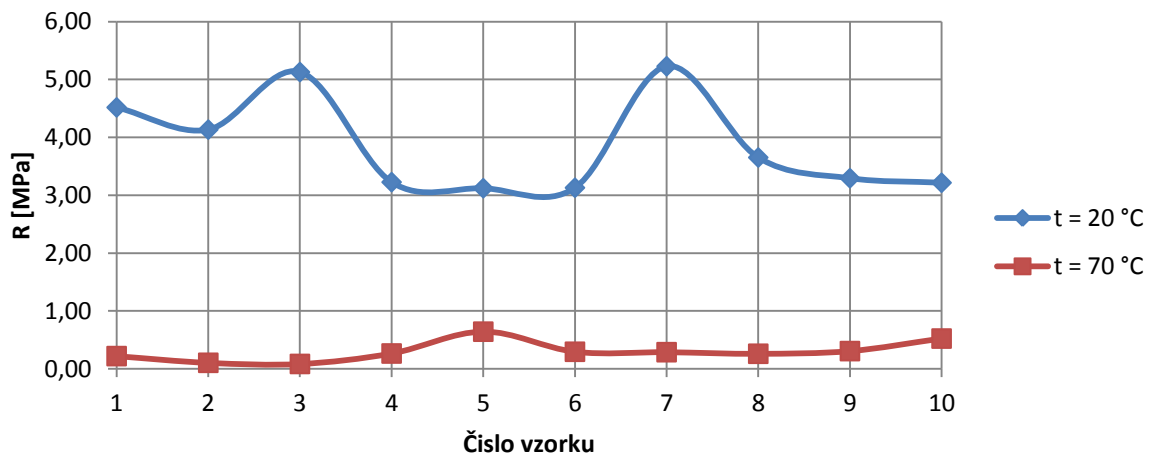
Číslo vzorku	Šířka vzorku b [mm]			Tloušťka vzorku h [mm]			Aritmetický průměr		Průřez A [mm <sup>2</sup> ]	Mezní síla F [N]	R [Mpa]
	1.	2.	3.	1.	2.	3.	b [mm]	h [mm]			
11	48,81	49,17	49,34	25,33	25,31	25,48	49,11	25,37	1246,00	67,17	0,45
12	49,43	50,12	49,41	25,74	25,80	26,12	49,65	25,89	1285,36	42,26	0,27
13	50,27	49,43	49,51	25,93	25,78	25,89	49,74	25,87	1286,52	37,80	0,24
14	49,21	48,71	48,66	25,97	25,76	25,90	48,86	25,88	1264,33	45,14	0,29
15	49,58	49,79	50,01	26,23	26,71	26,54	49,79	26,49	1319,19	44,05	0,26
16	50,09	50,37	50,80	26,02	26,01	25,96	50,42	26,00	1310,75	55,65	0,34
17	51,79	53,14	53,09	25,52	25,49	25,63	52,67	25,55	1345,63	58,91	0,36
18	53,70	56,01	54,15	26,09	26,24	26,15	54,62	26,16	1428,86	46,27	0,26
19	49,73	48,73	49,35	26,22	26,02	26,23	49,27	26,16	1288,74	46,37	0,29
20	48,98	50,08	49,07	26,22	26,03	26,10	49,38	26,12	1289,55	44,92	0,28

Aritmetický průměr	48,85	0,30
Směrodatná odchylka	8,45	0,06
Variační koeficient	17,29	19,48
Min	37,80	0,24
Max	67,17	0,45
Median	45,71	0,28
Nejistota typu A	8,90	0,06

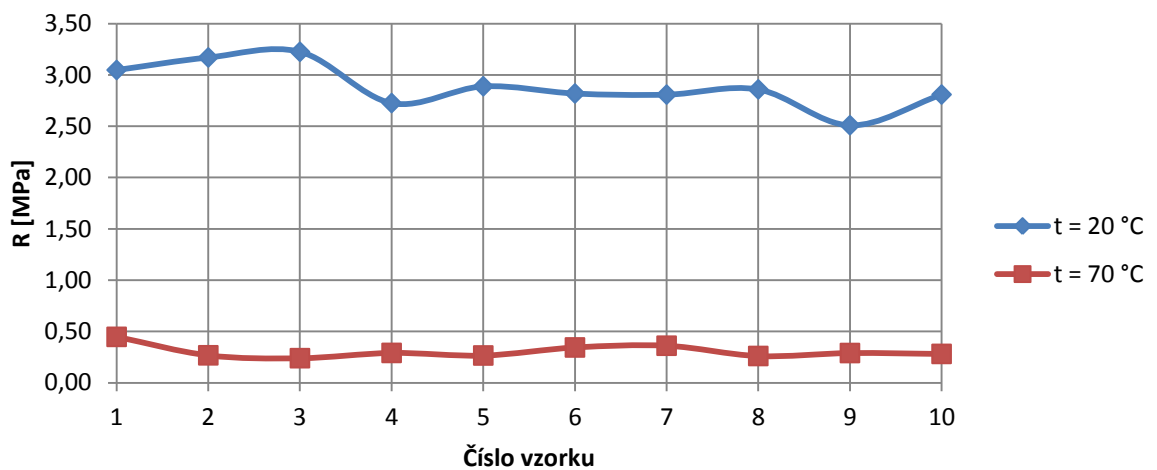
## Porovnání vlivu teploty na mez pevnosti v ohybu



Obr. 17 Vzorek 6x4,5 mm



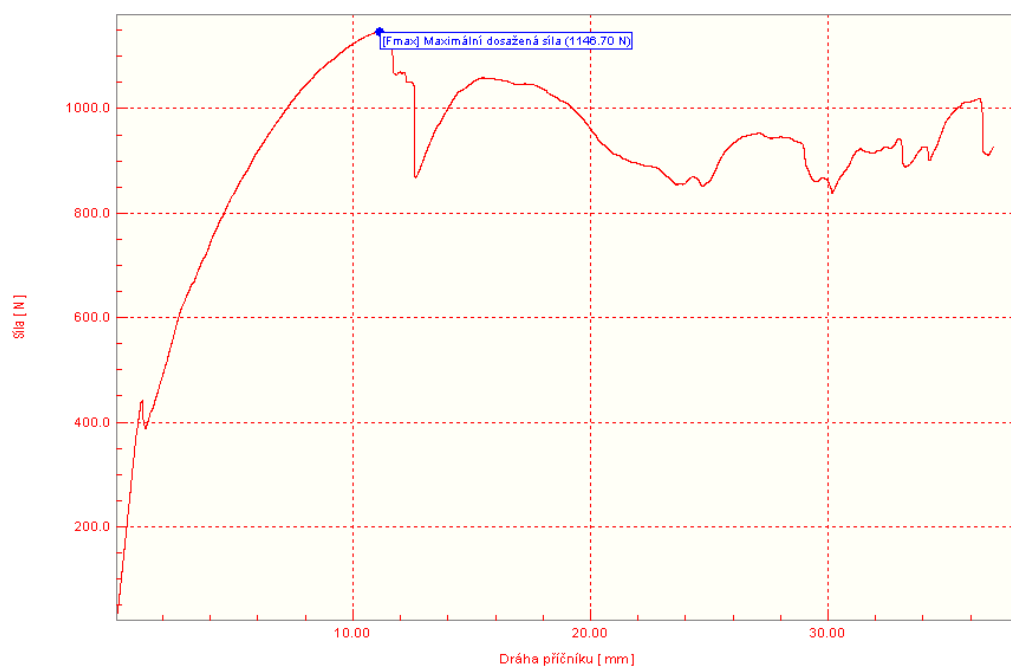
Obr. 18 Vzorek 4x6 mm



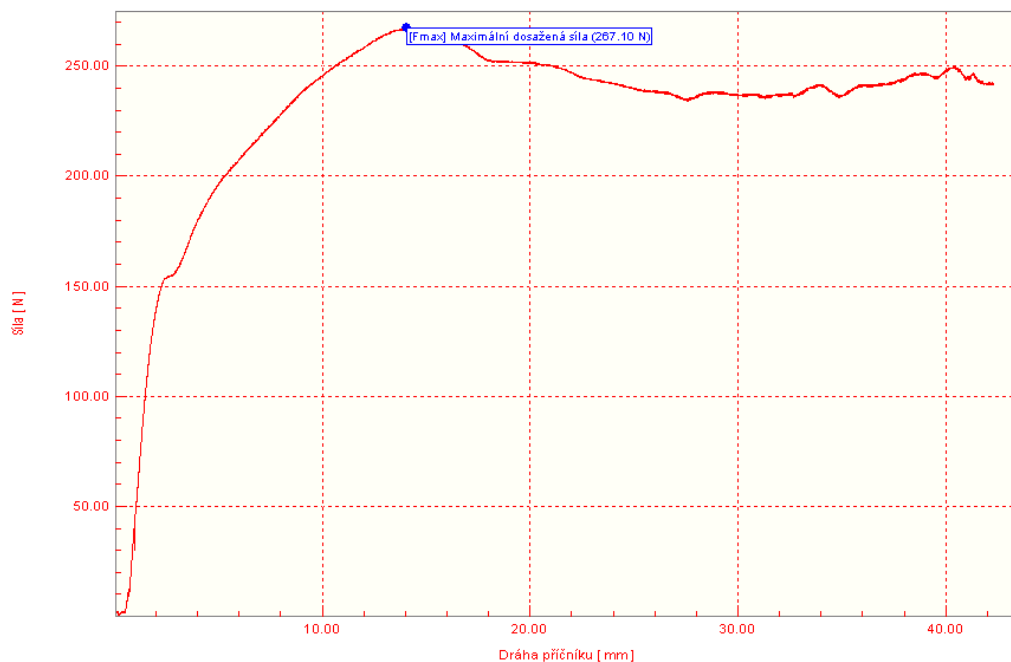
Obr. 19 Vzorek 3x10 mm

## Průběhy měření meze pevnosti v ohybu

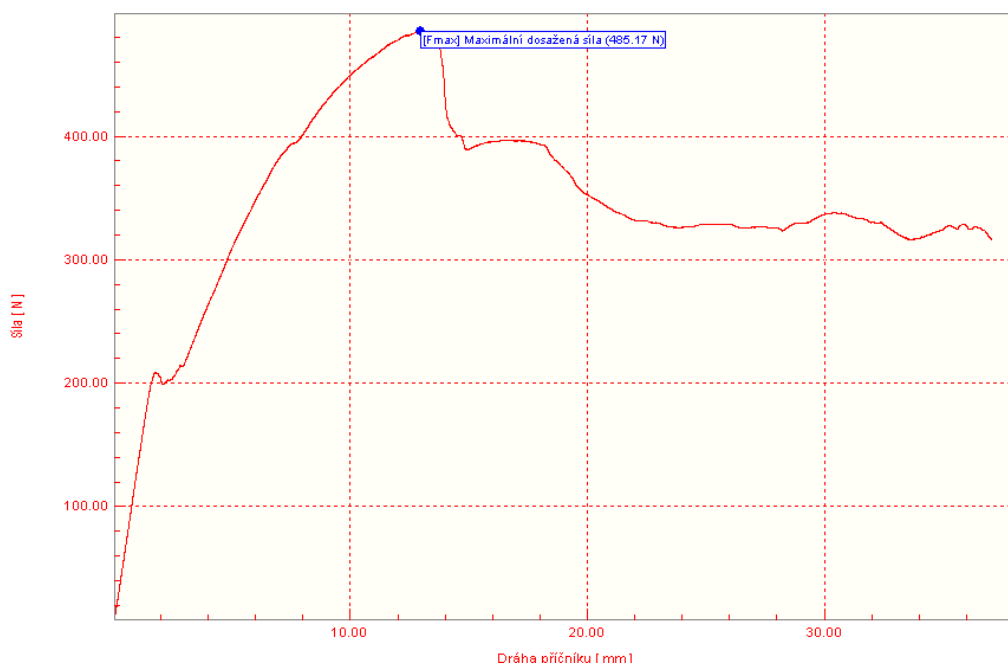
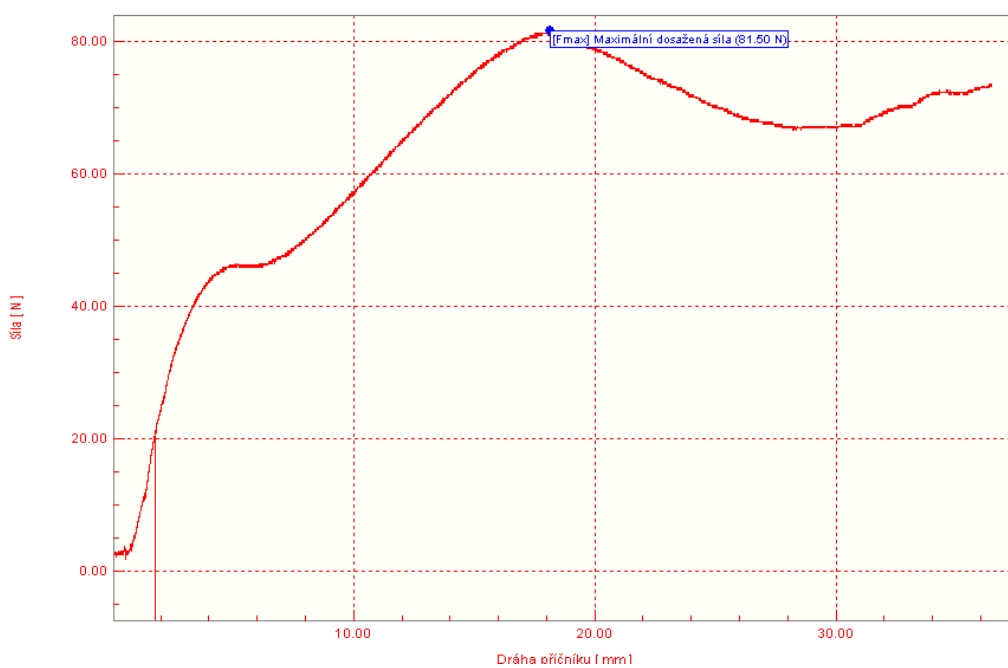
Vzorek 6x4,5 mm – normální teplota 20°C

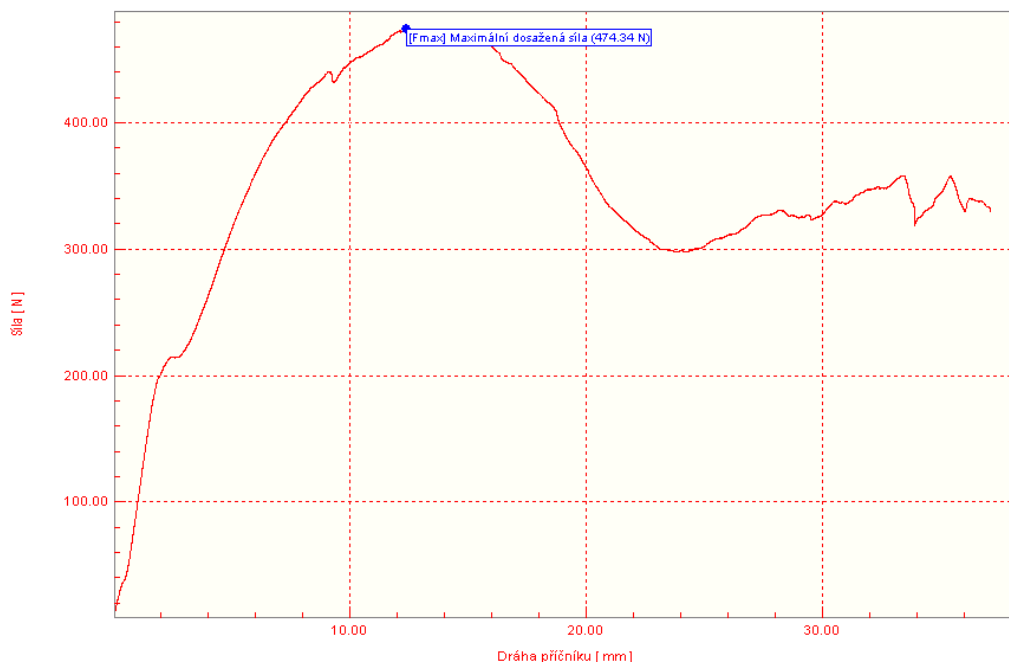
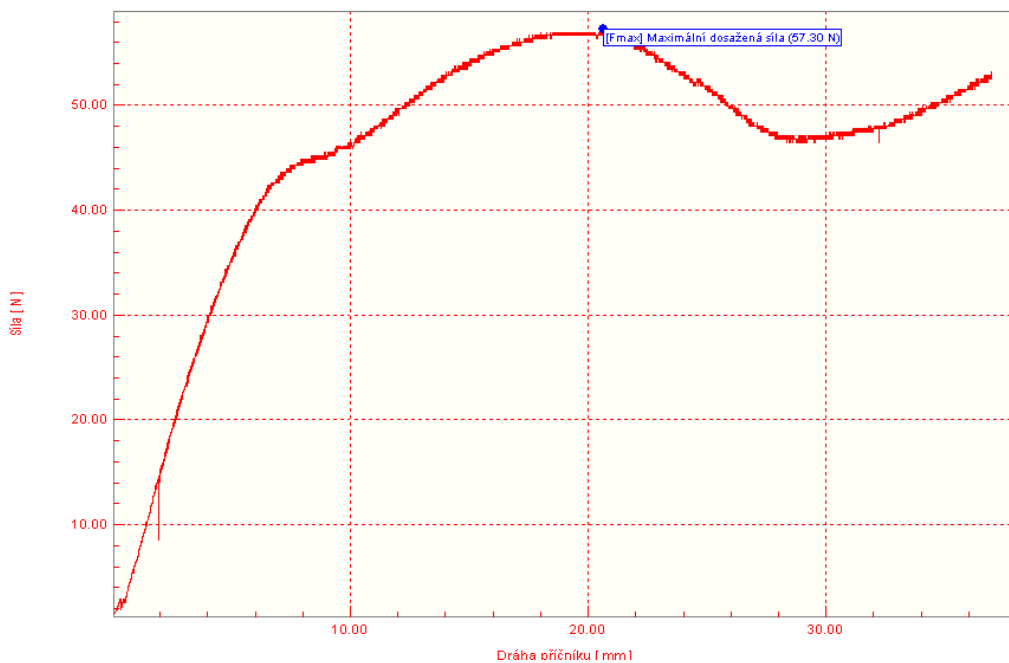


Vzorek 6x4,5 mm – zvýšená teplota 70°C





**Vzorek 4x8 mm – normální teplota 20°C****Vzorek 4x8 mm – zvýšená teplota 70°C**

**Vzorek 3x10 mm – normální teplota 20°C****Vzorek 3x10 mm – zvýšená teplota 70°C**

## Mez pevnosti v tlaku

### Vzorek 6x4,5 mm – při normální teplotě 20°C a zvýšené teplotě 70°C

Vzorek 6x4,5 mm, t = 20 °C				
Číslo měření	Rozměr vzorku		F [N]	R [Mpa]
	a [mm]	b [mm]		
1	50,06	50,19	1446,54	0,58
2	49,90	49,32	2066,73	0,84
3	50,10	50,27	1813,23	0,72
4	50,22	48,39	1692,23	0,70
5	50,06	49,77	2217,92	0,89
6	49,77	49,14	1747,51	0,71
7	50,30	48,95	1569,06	0,64
8	49,97	49,68	1759,10	0,71
9	49,97	49,27	2317,87	0,94
10	49,67	49,07	1880,37	0,77

Vzorek 6x4,5 mm, t = 70 °C				
Číslo měření	Rozměr vzorku		F [N]	R [Mpa]
	a [mm]	b [mm]		
11	50,49	49,88	343,34	0,14
12	49,77	50,32	312,85	0,12
13	50,45	48,65	384,27	0,16
14	49,90	49,72	348,35	0,14
15	49,95	49,66	380,00	0,15
16	50,51	50,40	290,82	0,11
17	50,10	50,07	275,84	0,11
18	50,35	50,21	363,70	0,14
19	50,40	49,44	396,08	0,16
20	50,94	50,83	288,02	0,11

Aritmetický průměr	1851,06	0,75
Směrodatná odchylka	262,46	0,11
Variační koeficient	14,18	14,29
Min	1446,54	0,58
Max	2317,87	0,94
Median	1786,17	0,72
Nejistota typu A	276,66	0,11

Aritmetický průměr	338,33	0,13
Směrodatná odchylka	41,59	0,02
Variační koeficient	12,29	13,26
Min	275,84	0,11
Max	396,08	0,16
Median	345,85	0,14
Nejistota typu A	43,84	0,02

### Vzorek 6x8 mm – při normální teplotě 20°C a zvýšené teplotě 70°C

Vzorek 4x8 mm, t = 20 °C				
Číslo měření	Rozměr vzorku		F [N]	R [Mpa]
	a [mm]	b [mm]		
1	50,02	48,49	751,74	0,310
2	49,54	48,29	761,67	0,318
3	50,32	49,04	728,96	0,295
4	49,86	49,34	495,97	0,202
5	49,91	50,64	595,57	0,236
6	49,96	50,41	598,71	0,238
7	50,17	50,38	753,46	0,298
8	50,06	49,90	583,21	0,233
9	50,03	48,89	635,78	0,260
10	49,83	49,64	465,38	0,188

Vzorek 4x8 mm, t = 70 °C				
Číslo měření	Rozměr vzorku		F [N]	R [Mpa]
	a [mm]	b [mm]		
11	50,17	50,31	34,91	0,014
12	50,64	52,81	78,03	0,029
13	50,13	51,24	95,82	0,037
14	49,97	49,30	72,63	0,029
15	50,53	48,90	200,41	0,081
16	49,93	52,34	176,35	0,067
17	50,48	49,95	217,18	0,086
18	49,95	50,41	265,19	0,105
19	50,71	49,42	250,60	0,100
20	50,17	49,11	215,66	0,088

Aritmetický průměr	637,05	0,26
Směrodatná odchylka	103,03	0,04
Variační koeficient	16,17	16,87
Min	465,38	0,19
Max	761,67	0,32
Median	617,25	0,25
Nejistota typu A	108,60	0,05

Aritmetický průměr	160,68	0,06
Směrodatná odchylka	78,52	0,03
Variační koeficient	48,87	49,58
Min	34,91	0,01
Max	265,19	0,11
Median	188,38	0,07
Nejistota typu A	82,77	0,03

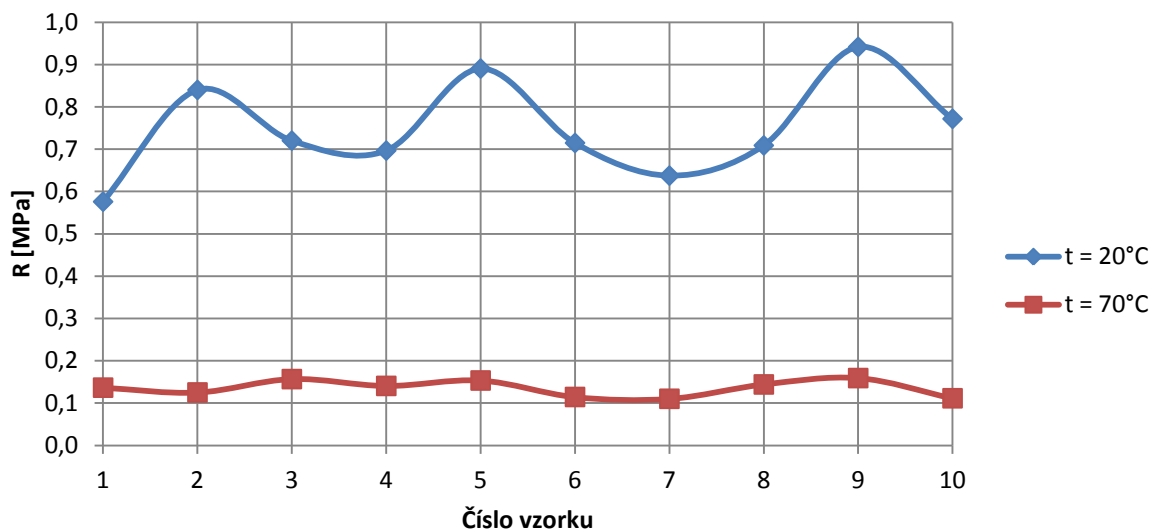
**Vzorek 3x10 mm – při normální teplotě 20°C a zvýšené teplotě 70°C**

Vzorek 3x10 mm, t = 20 °C				
Číslo měření	Rozměr vzorku		F [N]	R [Mpa]
	a [mm]	b [mm]		
1	50,61	47,87	787,10	0,325
2	50,18	49,35	552,87	0,223
3	50,24	51,25	803,67	0,312
4	50,34	49,23	597,68	0,241
5	50,22	49,27	492,10	0,199
6	50,42	48,61	552,03	0,225
7	50,21	49,37	479,60	0,193
8	50,58	49,43	497,19	0,199
9	49,96	48,92	487,68	0,200
10	49,86	49,30	523,12	0,213

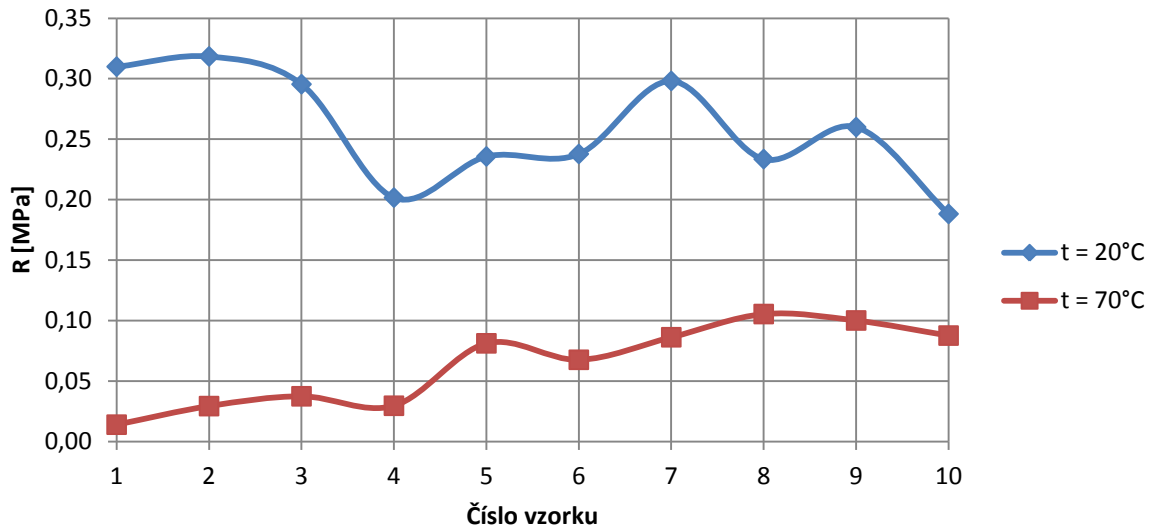
Vzorek 3x10 mm, t = 70 °C				
Číslo měření	Rozměr vzorku		F [N]	R [Mpa]
	a [mm]	b [mm]		
11	51,08	51,50	19,00	0,007
12	49,80	49,27	20,00	0,008
13	50,11	49,99	33,00	0,013
14	49,91	49,33	45,00	0,018
15	50,07	49,91	28,00	0,011
16	49,30	50,93	37,00	0,015
17	50,15	52,40	39,00	0,015
18	49,76	51,44	53,00	0,021
19	49,81	49,45	22,00	0,009
20	49,28	48,83	42,00	0,017

Aritmetický průměr	577,30	0,23
Směrodatná odchylka	114,50	0,05
Variační koeficient	19,83	19,36
Min	479,60	0,19
Max	803,67	0,32
Median	537,58	0,22
Nejistota typu A	120,69	0,05

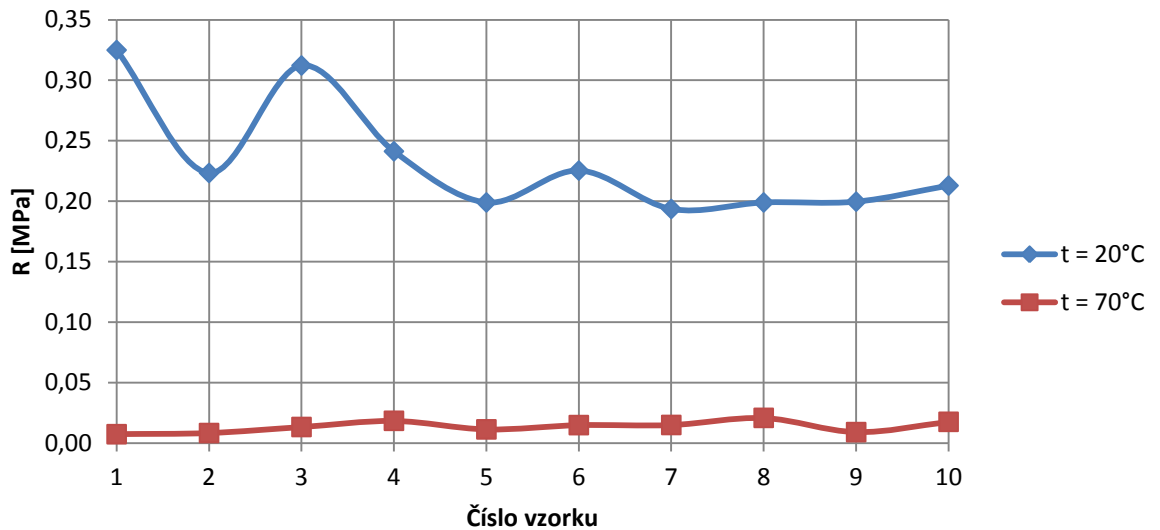
Aritmetický průměr	33,80	0,01
Směrodatná odchylka	10,87	0,00
Variační koeficient	32,16	32,19
Min	19,00	0,01
Max	53,00	0,02
Median	35,00	0,01
Nejistota typu A	11,46	0,00

**Porovnání vlivu teploty na mez pevnosti v tlaku**

Obr. 20 Vzorek 6x4,5 mm



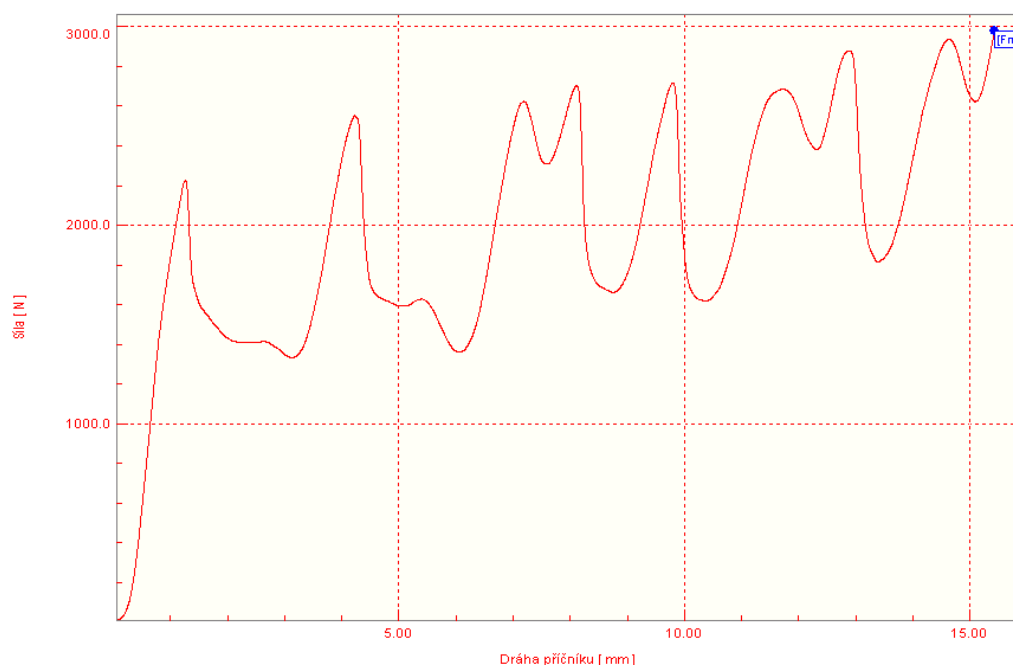
Obr. 21 Vzorek 4x8 mm



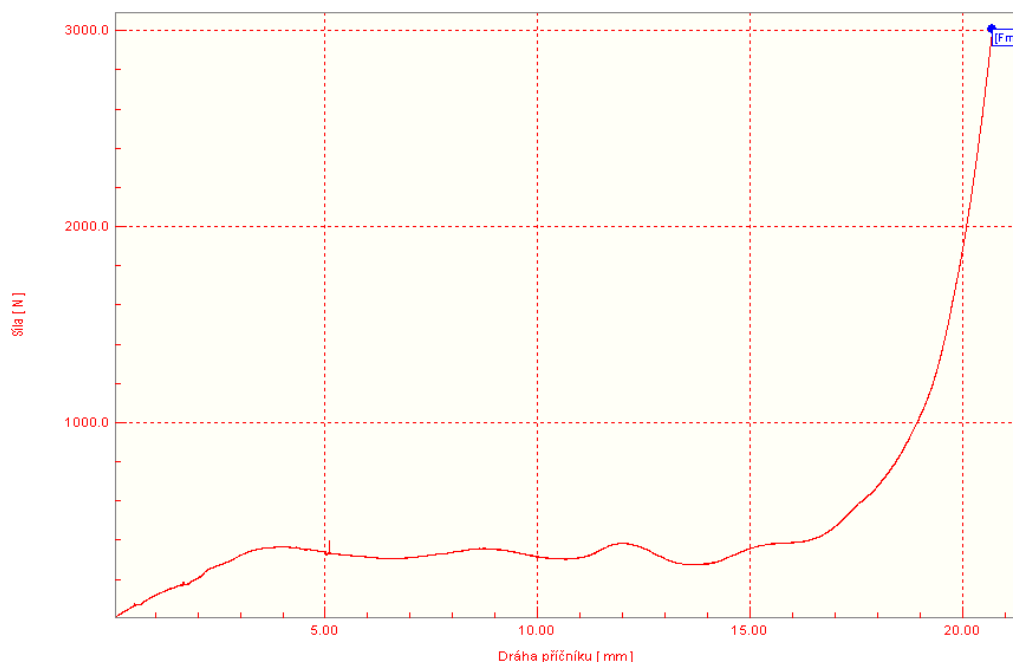
Obr. 22 Vzorek 3x10 mm

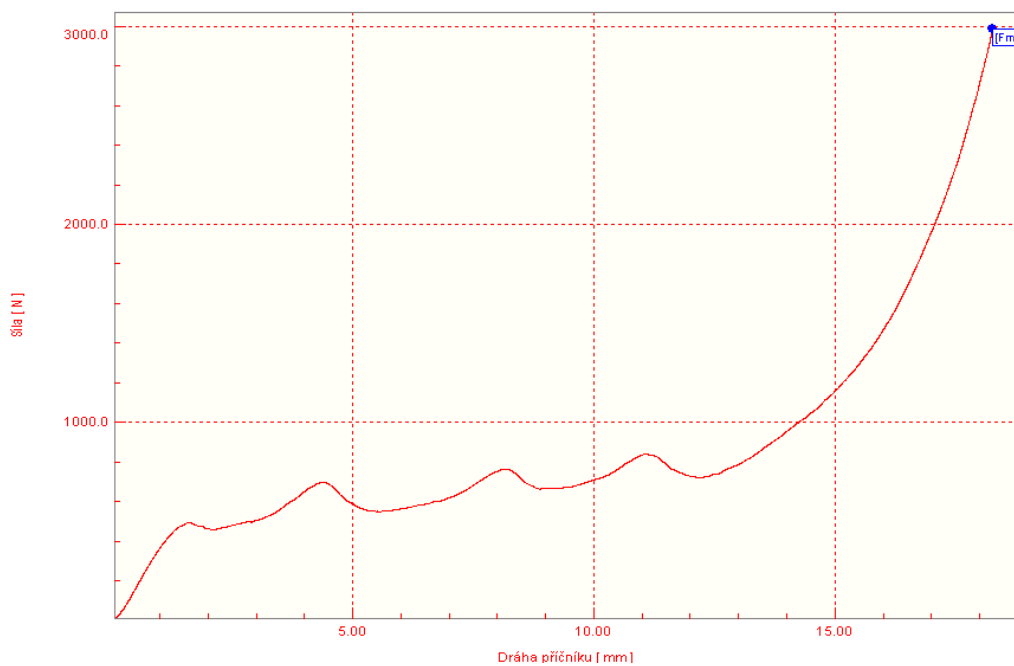
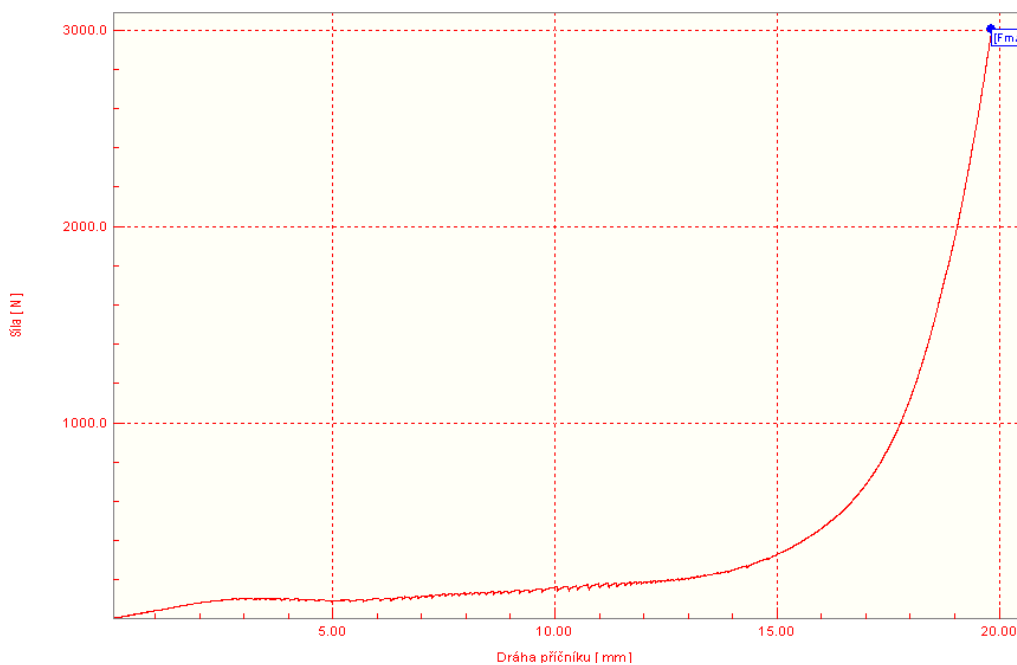
## Průběhy měření meze pevnosti v tlaku

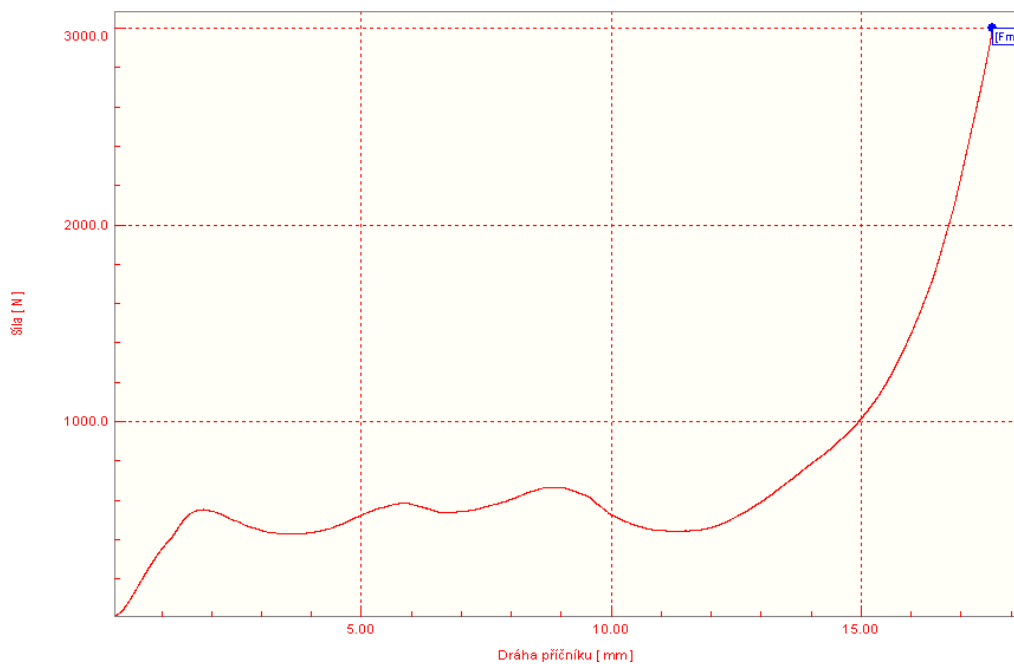
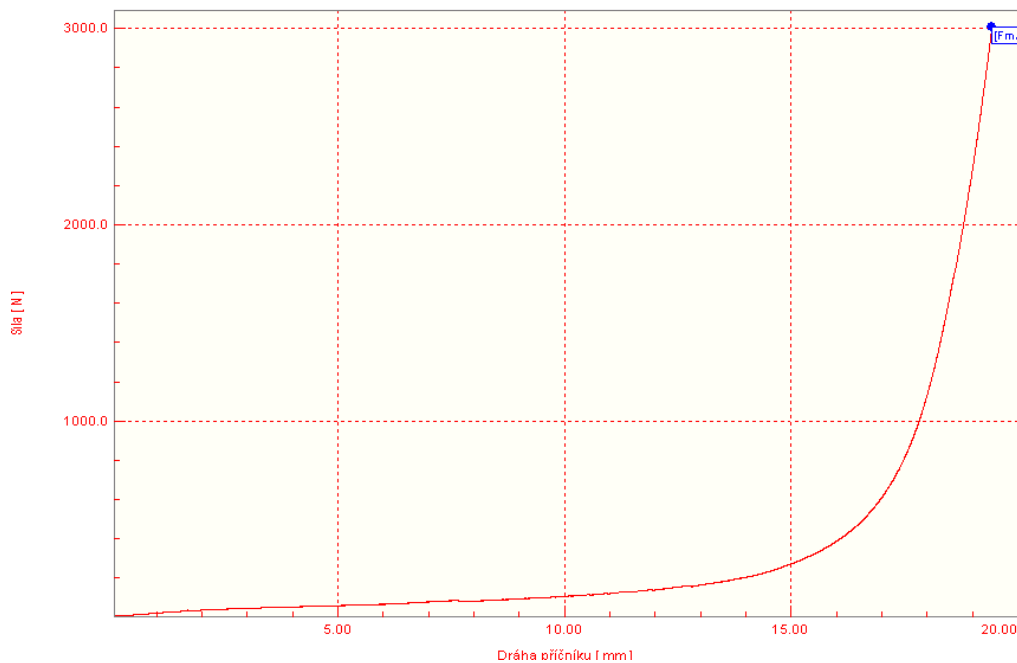
Vzorek 6x4,5 mm – normální teplota 20°C



Vzorek 6x4,5 mm – zvýšená teplota 70°C

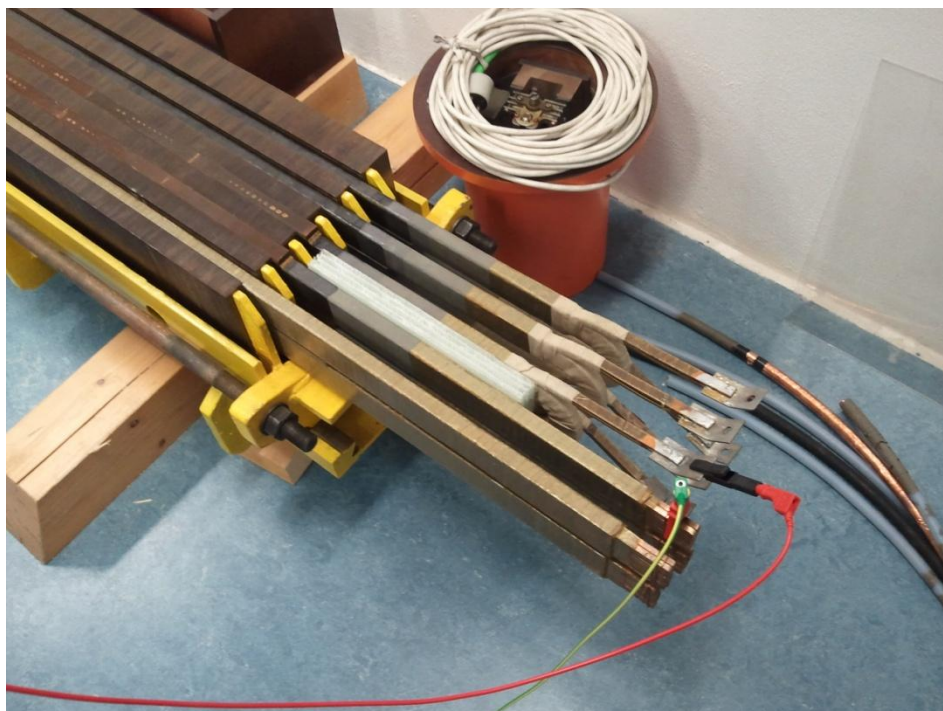


**Vzorek 4x8 mm – normální teplota 20°C****Vzorek 4x8 mm – zvýšená teplota 70°C**

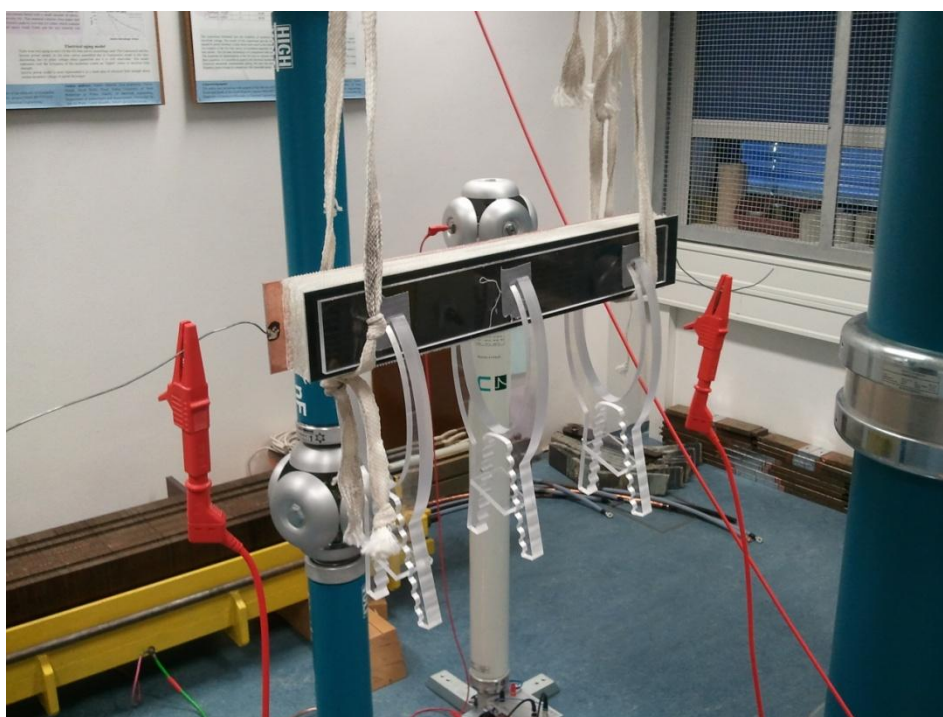
**Vzorek 3x10 mm – normální teplota 20°C****Vzorek 3x10 mm – zvýšená teplota 70°C**



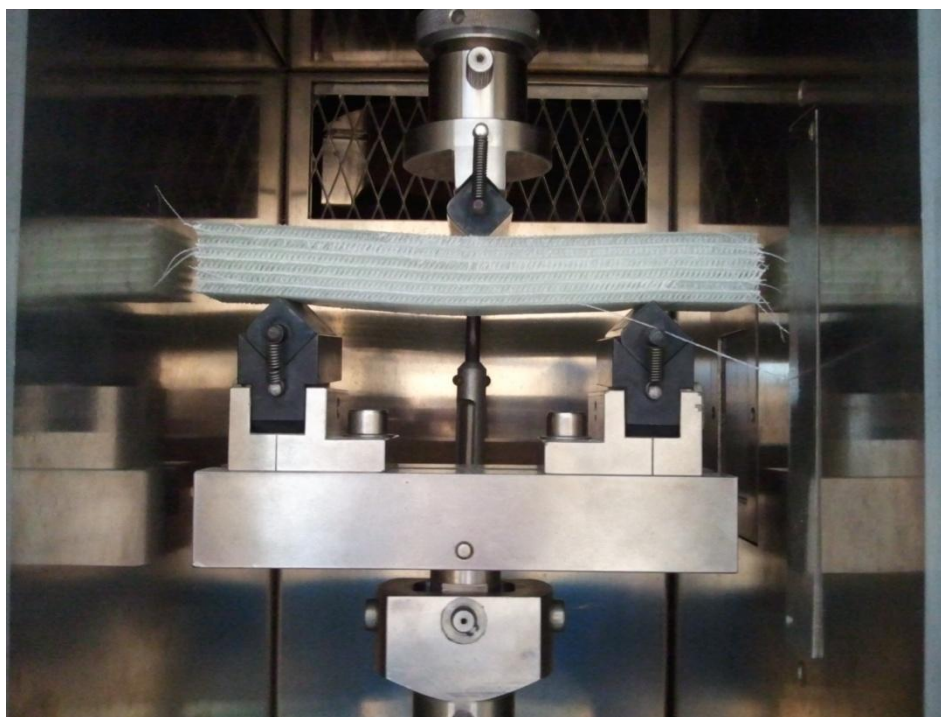
## Příloha B: Fotodokumentace měření



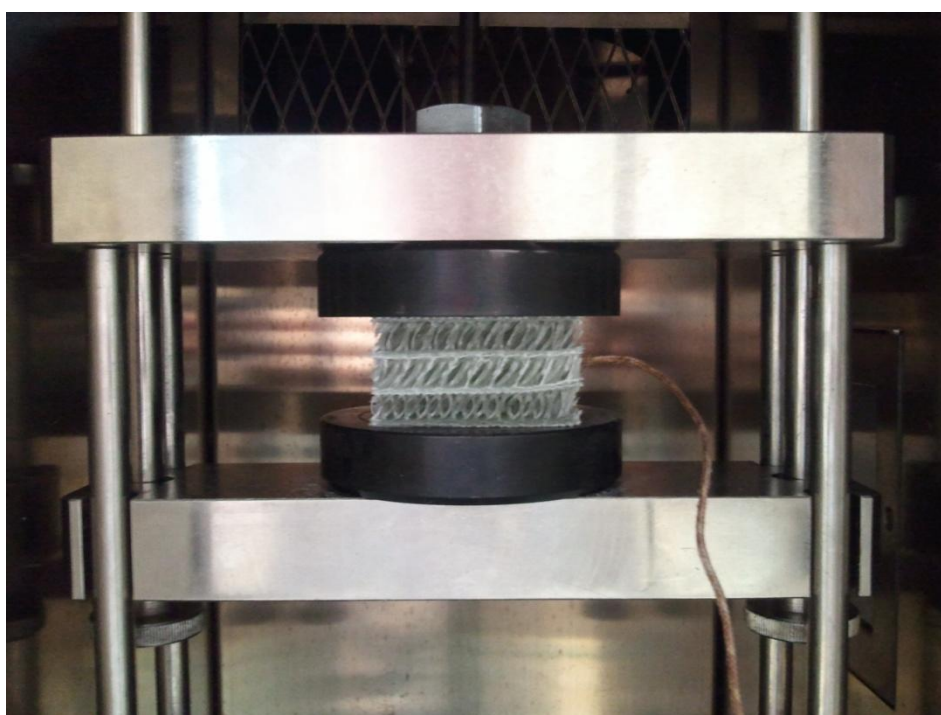
*Obr. 23 Vzorek vložený v laboratorním modelu vinutí při měření částečných výbojů*



*Obr. 24 Přípravek z polykarbonátu pro měření dielektrických ztrát*



*Obr. 25 Uspořádání při měření mezi pevnosti v ohybu*



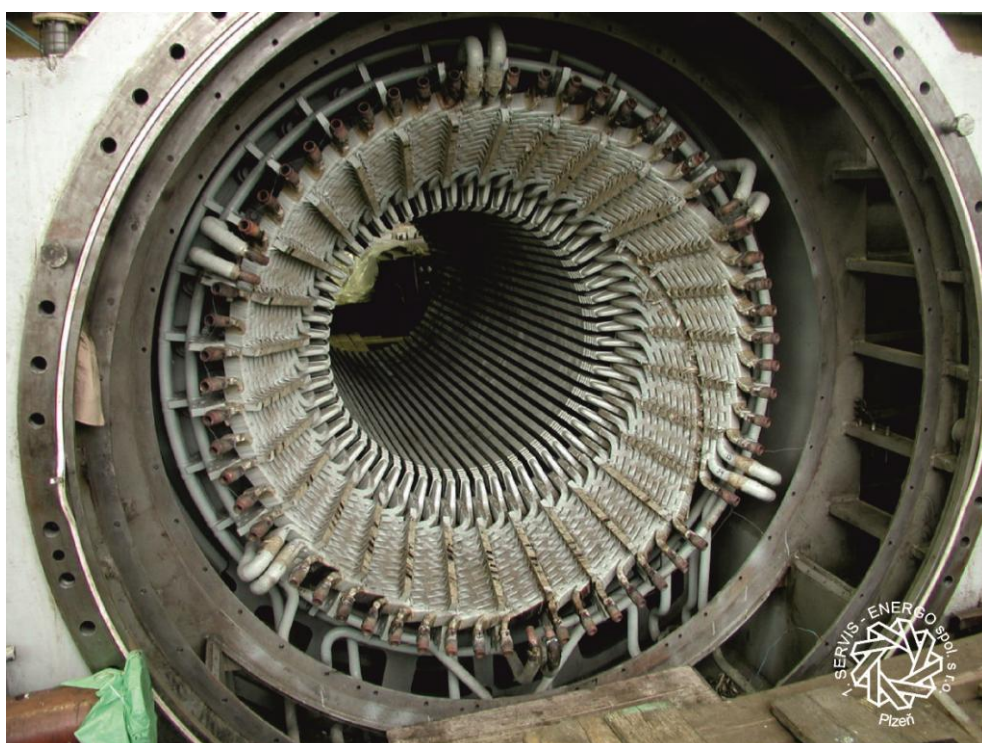
*Obr. 26 Uspořádání při měření mezi pevnosti v tlaku*



## Příloha C: Oprava statorového vinutí

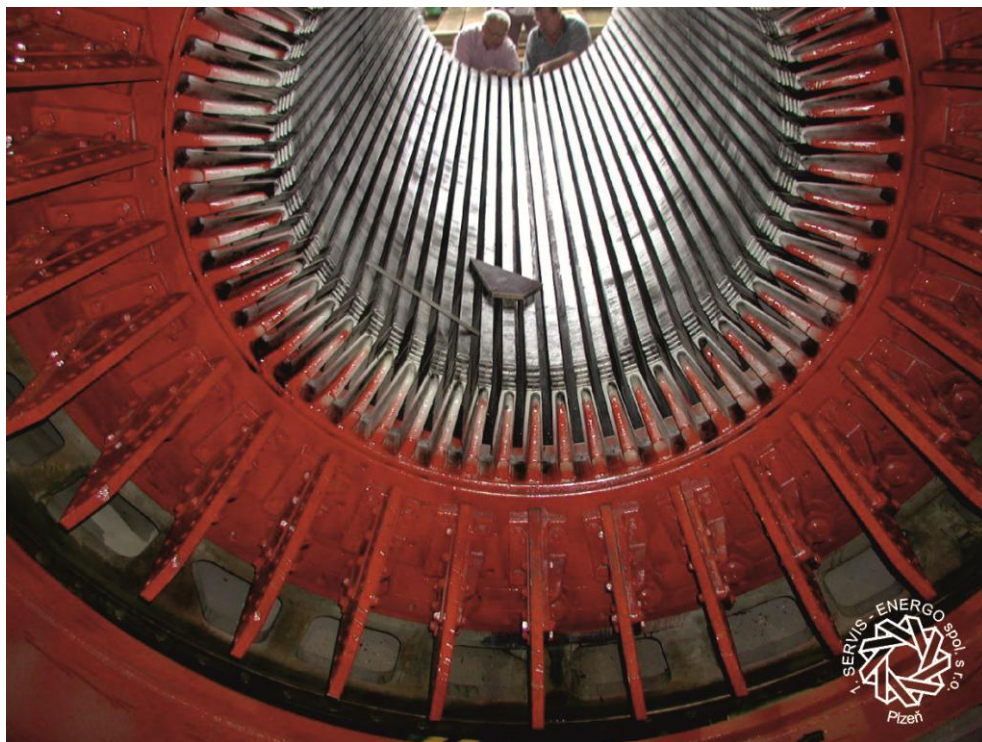


Obr. 27 Poškozené části izolace v čele vinutí, Tušimice 200 MW [13]

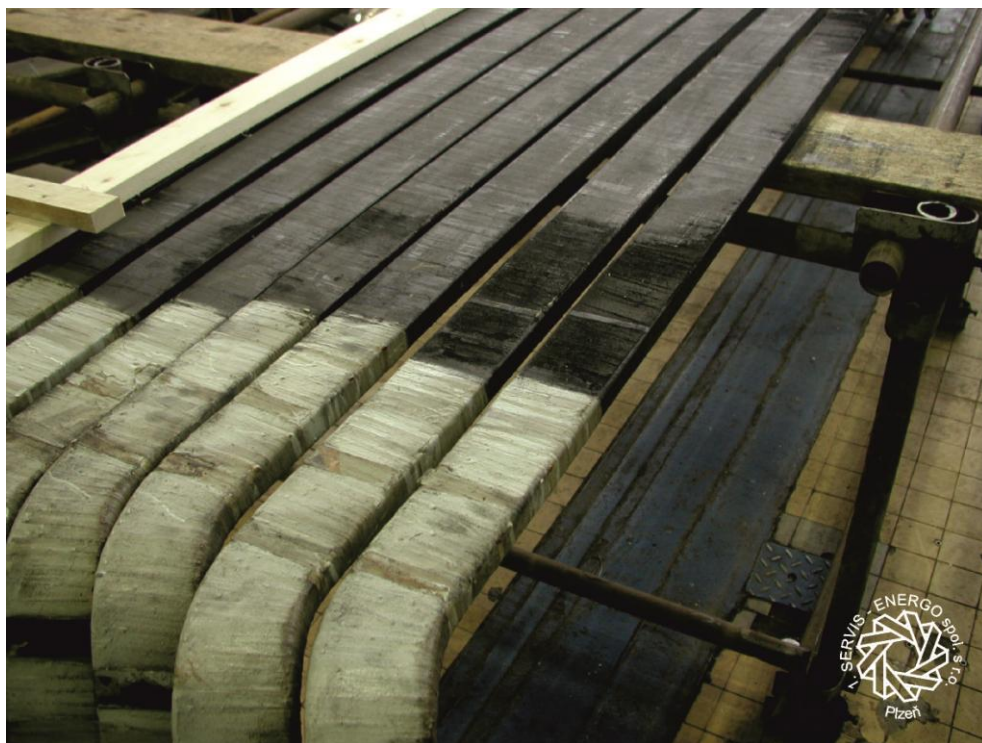


Obr. 28 Demontovaná horní poloha vinutí, Tušimice 200 MW [13]





*Obr. 29 Kompletně demontované vinutí, podpěrné konzole opatřeny ochranným lakem, Tušimice 200 MW [13]*

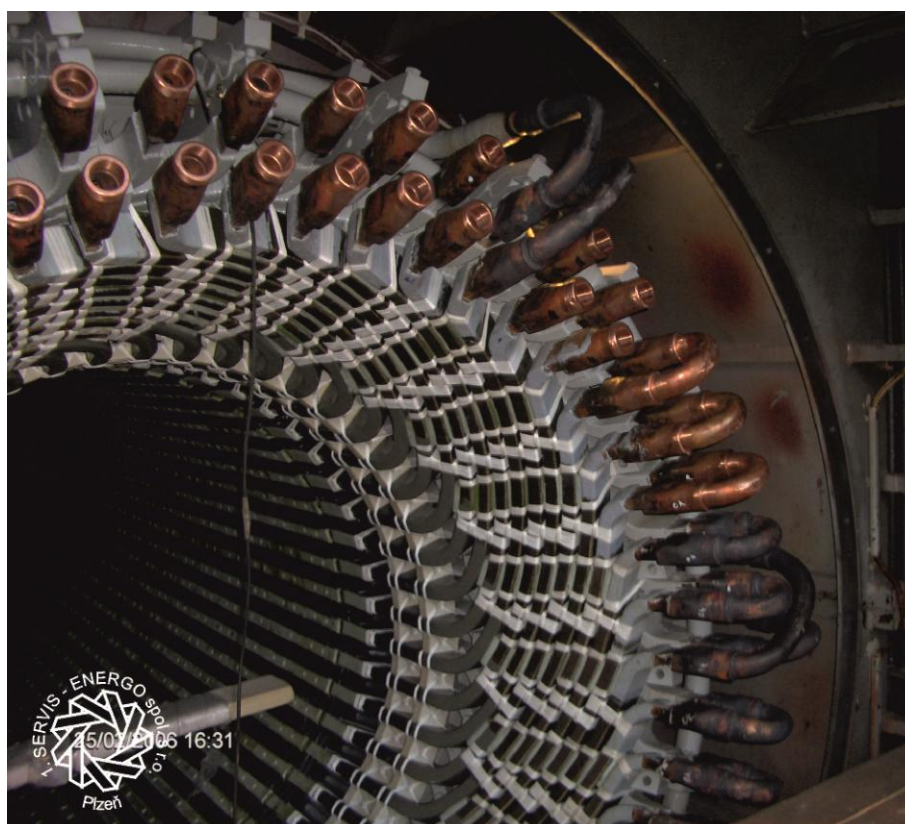


*Obr. 30 Poškozená polovodivá vrstva z důvodu poškození izolace v čelech vinutí, Tušimice 200 MW [13]*





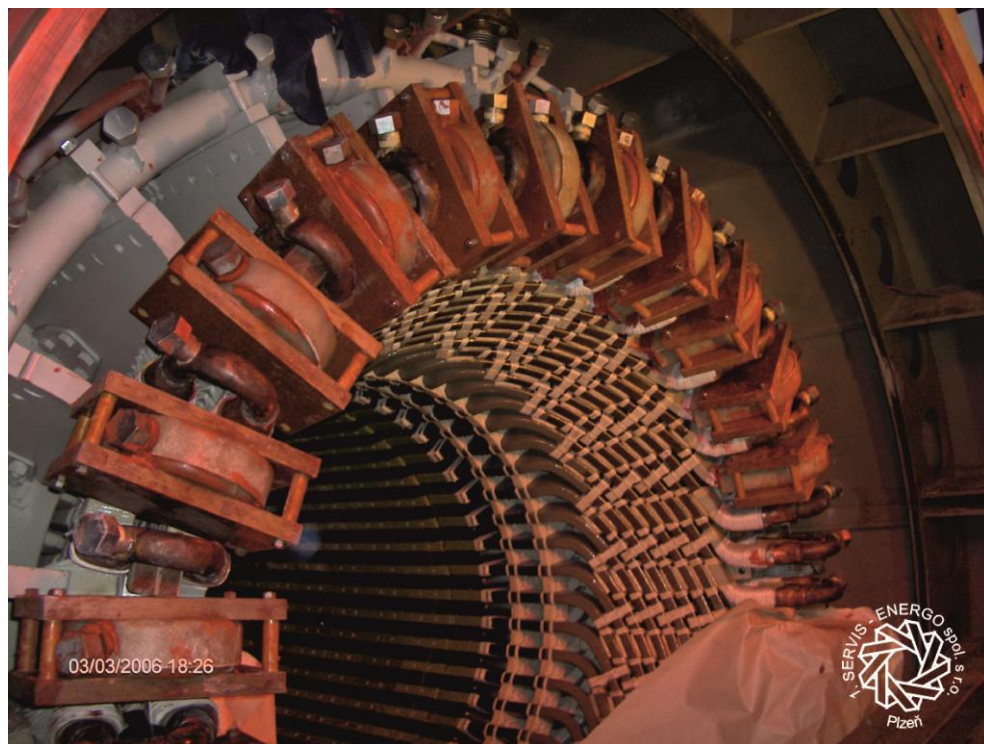
*Obr. 31 Zakládání a vyvazování spodní polohy vinutí, Tušimice 200 MW [13]*



*Obr. 32 Propojování horní a spodní polohy pomocí dutých měděných propojek, Mělník 500 MW [13]*



*Obr. 33 Detailní pohled na propojky spodní a horní polohy, uprostřed vstup pro chlazení, Tušimice 200 MW [13]*

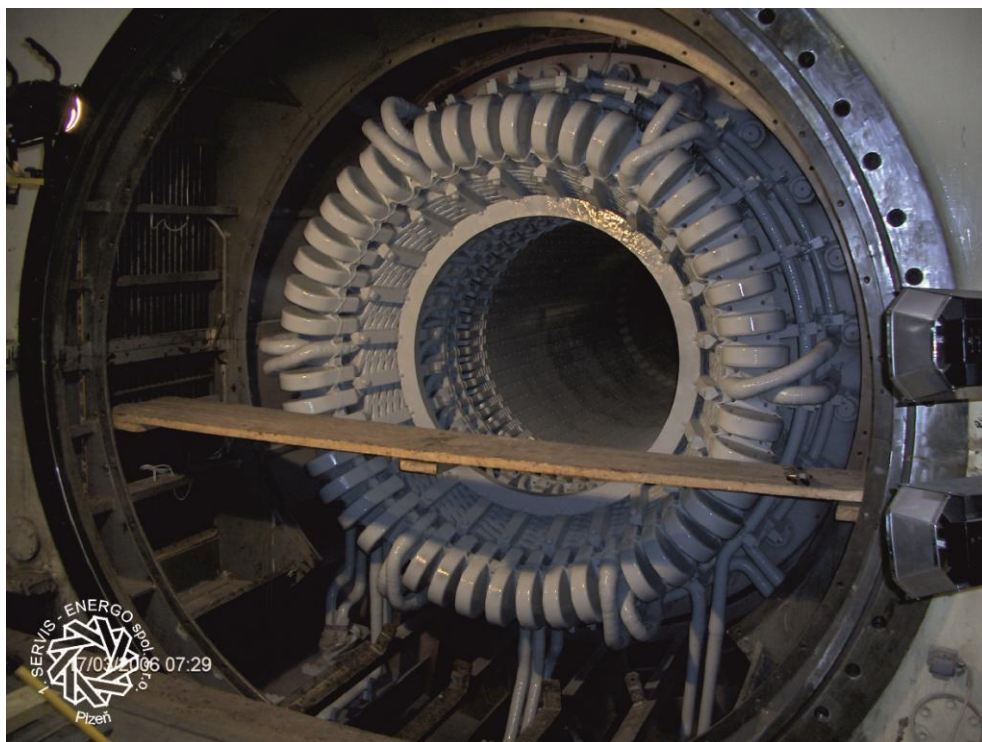


*Obr. 34 Vytvrzování pryskyřicí naplněných krytů propojek vinutí, Mělník 500 MW [13]*





*Obr. 35 Zabandážované zpevňující vložky mezi propojky vinutí, Mělník 500 MW [13]*



*Obr. 36 Finální podoba opraveného statoru, včetně připojeného chlazení a rozpěrného kruhu, Mělník 500 MW [13]*

## Příloha D: Technický list Parabeam

Technical Data Sheet		Parabeam® 3D Glass Fabrics											
		PARAGLASS						PARATANK					
Fabric Type		3	5	8	10	12	15	18	22	3	4,5	6	
<b>For laminated thickness*</b>													
Laminate	mm	3.0	5.0	8.0	10.0	12.0	15.0	18.0	22.0				
Face	mm	0.4	0.4	0.4	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.4	0.4	0.4	
<b>Weight†</b>													
Fabric	kg/m <sup>2</sup>	0.78	0.84	0.93	1.43	1.50	1.60	1.72	1.68	0.75	0.85	0.90	
Laminate	kg/m <sup>2</sup>	1.64	1.76	1.95	3.01	3.15	3.36	3.61	3.53	1.80	2.05	2.20	
<b>Thermal Properties</b>													
Thermal Conductivity	λ DIN 52616 W/mK	0.06	0.06	0.06	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.06	0.06	0.06	
Thermal Resistance	R m <sup>2</sup> /KW	0.05	0.09	0.13	0.13	0.16	0.19	0.22	0.28	0.05	0.07	0.11	
<b>Mechanical Properties</b>													
Compressive strength	σ <sub>c</sub> ASTM 365 N/mm <sup>2</sup>	typ	8.8	4.8	2.7	1.5	1.1	1.0	0.9	0.4	8.0	7.0	4.0
		min	7.8	3.7	2.0	1.4	1.0	0.9	0.7	0.3	7.1	5.4	4.0
Shear strength	τ ASTM 273 N/mm <sup>2</sup>	typ	1.0	0.8	0.5	0.3	0.2	0.2	0.1	0.1	1.5	2.9	2.3
		min	0.9	0.7	0.3	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.7	1.3	1.0
Shear modulus	G <sub>c</sub> ASTM 273 N/mm <sup>2</sup>	typ	5.7	9.5	13.4	7.3	6.9	2.0	1.8	0.8	80.0	70.0	60.0
		min	4.2	7.6	10.3	1.8	1.7	1.2	0.8	0.6	12.0	45.0	20.0
Bending stiffness	EI ASTM 393 Nm <sup>2</sup>	typ	0.9	3.2	7.5	18.1	26.2	38.0	55.9	44.0	1.0	1.9	4.1
		min	0.5	2.8	6.8	13.6	21.6	25.6	31.3	32.8	0.8	1.6	3.0

Note: All mechanical and thermal properties are obtained on laminates prepared according to the Application Instruction. The mechanical properties are classified in two categories: typical) and min(maximum). A typical value is the mean average of a number of test values and a minimum value is the minimum property. The values differ with the direction of the fabric. Weft direction results in better mechanical properties than warp direction.

Legend:

- \* Standard polyester resin with average mechanical properties
- † For laminates with a pile angle of 70°/80°
- ‡ Glass/resin ratio according to Resin consumption table