

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: B 2301 Strojní inženýrství  
Studijní zaměření: Stavba jaderně energetických zařízení

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Kontrola napjatosti na potrubních dílech – ohybech a kolenech

Autor: **Bc. Martin MÁCHA**

Vedoucí práce: **Ing. Jan ZDEBOR, CSc.**

Akademický rok 2018/2019

## **Prohlášení o autorství**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní 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.

V Plzni dne: 24. 05. 2019

.....

Bc. Martin Mácha

## **Poděkování**

Rád bych tímto poděkoval panu Ing. Janu Zdeborovi, Csc. za odborné vedení práce, panu Ing. Martinu Pulcovi a Ing. Kateřině Bílé, Ph.D. za cenné rady ohledně diplomové práce pomoc při výpočtu a velmi ochotný a trpělivý přístup, panu Ing. Josefu Janoušovi za poskytnutí prostředků k uskutečnění experimentu, panu Petru Němcovi za asistenci při experimentu a dalším lidem, kteří byli daného experimentu součástí.

# ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	Příjmení Bc. Mácha	Jméno Martin		
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	B2301 – Strojní inženýrství			
<b>VEDOUcí PRÁCE</b>	Příjmení (včetně titulů) Ing. Zdebor, CSc.	Jméno Jan		
<b>PRACOVIŠTĚ</b>	ZČU – FST - KKE			
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<del>BAKALÁŘSKÁ</del>	Nehodící se škrtněte	
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Kontrola napjatosti na potrubních dílech – ohybech a kolenech			

<b>FAKULTA</b>	Strojní	<b>KATEDRA</b>	KKE	<b>ROK ODEVZD.</b>	2019
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

## POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	61	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	61	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	---
---------------	----	---------------------	----	----------------------	-----

<p style="text-align: center;"><b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b></p> <p><b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b></p>	<p>Na potrubních soustavách se vyskytují deformace od teplotních dilatací, gravitace, seizmického zatížení, vibrací a především od posuvů v místech připojení k aparátům. Tyto deformace způsobují v jednotlivých potrubních dílech napětí, které je nutné kontrolovat z hlediska jejich přípustnosti při všech provozních režimech. Cílem této diplomové práce je porovnání naměřených výsledků deformací a napětí na skutečném ohybu s výsledky výpočtů.</p>
<p style="text-align: center;"><b>KLÍČOVÁ SLOVA</b></p> <p style="text-align: center;"><b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b></p>	<p>Tenzometr, napětí, odpor, ohyb, koleno, 2D, 3D</p>

## SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname Bc. Mácha	Name Martin	
<b>FIELD OF STUDY</b>	B2301 –Mechanical engineering		
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Zdebor, CSc.	Name Jan	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU – FST - KKE		
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<del><b>BACHELOR</b></del>	<b>Delete when not applicable</b>
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Check the stress on the pipeline parts – bends and knees		

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	KKE	<b>SUBMITTED IN</b>	2019
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	61	<b>TEXT PART</b>	61	<b>GRAPHICAL PART</b>	---
----------------	----	------------------	----	-----------------------	-----

<b>BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	The piping systems are deformed from temperature dilations, gravity, seismicloads, vibrations and especially from displacement at connection points to devices. These deformations cause stress in individual parts of the pipelines which must be checked for their acceptability in all operating modes. The goal of this diploma thesis is to compare the measured results of deformations and stress on the actual bend with the results of the calculations.
<b>KEY WORDS</b>	Strain gauge, strain, resistance, bend, knee, 2D, 3D

## Obsah

Seznam symbolů a zkratek .....	11
1 Úvod.....	12
1.1 Mechanické napětí.....	12
1.1.1 Tah – tlak.....	12
1.1.2 Střih (smyk).....	12
1.1.3 Ohyb .....	13
1.1.4 Krut.....	13
1.2 Závislost mezi deformací a napětím.....	13
1.2.1 Tahový diagram.....	13
1.3 Druhy měřených napjatostí a jejich určování.....	14
1.3.1 Jednoosá napjatost.....	14
1.3.2 Dvouosá (rovinná) napjatost .....	15
1.4 Technologie výroby kolena a ohybu .....	16
1.4.1 Koleno .....	16
1.4.2 Ohyb .....	17
2 Výpočet MKP na 3D konečných prvcích.....	18
2.1 MKP výpočet na ohybu 4D.....	18
2.1.1 Zatížení.....	18
2.1.2 Výsledek.....	19
2.2 Výpočet MKP na kolenní 1,5D .....	22
2.2.1 Zatížení.....	22
2.2.2 Výsledek.....	23
3 Výpočet MKP na 2D prutových potrubních prvcích.....	26
3.1 OHYB 4D.....	26
3.1.1 Namáhání na ohyb.....	26
3.1.2 Namáhání na krut .....	27
3.2 KOLENO 1,5D.....	27
3.2.1 Namáhání na ohyb.....	27
3.2.2 Namáhání na ohyb.....	28
4 Elektrická odporová tenzometrie .....	29
4.1 Princip metody .....	29

4.2 Kovové tenzometry .....	30
4.2.1 Drátkové tenzometry .....	30
4.2.2 Fóliové tenzometry .....	31
4.3 Polovodičové tenzometry .....	31
4.3.1 Deformační součinitel .....	33
4.3.2 Vliv teploty .....	33
4.3.3 Vlastnosti polovodičových tenzometrů .....	33
4.3.4 Použití polovodičových tenzometrů .....	33
4.4 Uspořádání tenzometrů .....	34
4.5 Vlastnosti odporových tenzometrů .....	35
4.5.1 Linearita .....	35
4.5.2 Hystereze .....	36
4.5.3 Relaxace .....	36
4.5.4 Deformační součinitel .....	37
4.5.5 Příčná citlivost .....	37
4.6 Cejchování tenzometrů .....	38
5 Vliv prostředí na tenzometrická měření .....	39
5.1 Vliv změny teploty .....	39
5.1.1 Vyloučení vlivu teploty pomocí kompenzačního tenzometru .....	39
5.1.2 Vyloučení vlivu teploty pomocí samokompenzačního tenzometru .....	39
5.1.3 Kompenzace vlivu teploty korekcí naměřených hodnot .....	41
5.2 Vliv vlhkosti .....	41
5.3 Vliv tlaku .....	41
5.4 Vliv radioaktivního záření .....	42
5.5 Vliv cyklického zatížení .....	42
5.6 Vliv magnetického pole .....	43
6 Praktická část .....	44
6.1 Příprava experimentu .....	44
6.1.1 Příprava součástí .....	44
6.1.2 Měření skutečných rozměrů součástí .....	46
6.1.3 Místa pro nalepení tenzometrů .....	47
6.1.4 Lepení tenzometrů .....	50
6.2 Průběh experimentu .....	52

6.2.1 Použité komponenty .....	53
6.3 Vyhodnocení experimentu .....	54
6.3.1 Výsledky tenzometrického měření (deformace) .....	54
6.3.2 Přepočet deformace na napětí .....	55
6.3.3 Výsledky přepočtu deformace na napětí .....	55
6.3.3 Zhodnocení tenzometrického měření .....	60
7 Závěr.....	61
Seznam literatury a informačních zdrojů .....	62



## Seznam symbolů a zkratek

Symbol	Jednotky	Název
$\varepsilon$	[ - ]	Poměrné prodloužení
$\varepsilon_l$	[ - ]	Poměrné prodloužení ve směru osy tenzometru
$\varepsilon_t$	[ - ]	Poměrné prodloužení v příčném směru tenzometru
R	[ $\Omega$ ]	Elektrický odpor
$R_o$	[ $\Omega$ ]	Původní elektrický odpor
$\Delta R$	[ $\Omega$ ]	Změna elektrického odporu
l	[mm]	Délka vodiče
$\Delta l$	[mm]	Změna délky vodiče
k	[ - ]	Součinitel deformační citlivosti
$k_l$	[ - ]	Deformační součinitel ve směru osy tenzometru
$k_t$	[ - ]	Deformační součinitel v příčném směru
T	[K]	Teplota
$T_o$	[K]	Původní teplota
$\Delta T$	[K]	Změna teploty
$\rho$	[ $\Omega\text{mm}$ ]	Měrný odpor
$\Delta\rho$	[ $\Omega\text{mm}$ ]	Změna měrného odporu
A	[ $\text{mm}^2$ ]	Průřez vodiče
$\pi_i$	[ - ]	Piezorezistentní součinitel
e	[ - ]	Náboj elektronu
$N_i$	[ - ]	Počet nositelů náboje
$v_{stř}$	[m/s]	Střední rychlost nositelů náboje
$\sigma_i$	[MPa]	Normálové napětí
$\tau$	[MPa]	Tečné napětí
$M_o$	[Nmm]	Ohybový moment
$M_k$	[Nmm]	Kroutící moment
$W_o$	[ $\text{mm}^3$ ]	Modul průřezu v ohybu
$W_k$	[ $\text{mm}^3$ ]	Modul průřezu v krutu
P	[MPa]	Tlak
E	[MPa]	Modul pružnosti v tahu
$\mu$	[ - ]	Poissonovo číslo
$\alpha$	[ - ]	Součinitel lineární teplotní roztažnosti
$\beta$	[ - ]	Součinitel teplotního odporu

## 1 Úvod

Jedním ze základních technologických zařízení, u kterých je třeba hodnotit napjatost a životnost - jsou potrubní systémy. Každý potrubní systém je namáhán vnitřním přetlakem, teplotou média a deformacemi způsobenými teplotními dilatacemi, vynucenými posuvy, nebo mechanickými deformacemi například od seizmické události.

Diplomová práce se zabývá porovnáním mechanického napětí na jednoduchém a často používaném potrubním dílu (koleno a ohyb) vlivem mechanického namáhání a to od jednoduchého namáhání krutem a ohybem. Existuje několik možných způsobů určení mechanického namáhání:

- 1) Výpočtem na 3D prvcích pomocí MKP (např. Abaqus, Ansys, Catia apod.)
- 2) Výpočtem na 2D prutových potrubních prvcích (např. AutoPIPE, CaePipe apod.)
- 3) Tenzometrickým měřením na skutečných dílech
- 4) Analytickými výpočty potrubních prvků dle norem (např. NTD A.S.I, ASME Code apod.)

### 1.1 Mechanické napětí

Mechanické napětí popisuje stav tělesa zatíženého vnějším silovým působením, které je vyjádřeno vztahem mezi silou a plochou, na kterou daná síla působí. Lze říci, že napětí je míra vnitřního rozložení sil na jednotku plochy tělesa, způsobených vnějším silovým zatížením. Tato závislost je vyjádřena vztahem

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Složka síly působící kolmo na plochu způsobuje normálové napětí (tak a tlak) a složka síly, která působí ve směru tečny k ploše, způsobuje tečné napětí (smykové). [1]

#### 1.1.1 Tah – tlak

Tlakové/tahové namáhání je to nezákladnější namáhání, s kterým se lze setkat. Pro výpočet namáhání v tahu nebo tlaku platí vztah uvedený v rovnici (1). Tento vzorec platí ale pouze v případě, jestliže působící síly jsou v jedné přímce a zároveň procházejí osou tažného či tlačného tělesa. Dále musí splňovat podmínku, kdy tažné či tlačné těleso má po celé délce konstantní průřez a hodnota napětí je po průřezu rozložena rovnoměrně. [2]

#### 1.1.2 Střih (smyk)

Napětí ve střihu (smyku) vzniká snahou dvou sousedních průřezů tělesa se vzájemně posunout. Toto namáhání je vyvolané silou, která působí kolmo na povrch tělesa (rovnoběžně se sledovaným průřezem). Vzorec pro výpočet je

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (2)$$

kde  $\tau$  je napětí při namáhání ve střihu,  $F$  je síla působící na těleso a  $A$  průřez tělesa rovnoběžný s působící silou. [2]

### 1.1.3 Ohyb

Ohybové napětí vzniká působením ohybového momentu od síly na těleso, který je kolmý k ose tělesa. Nejjednodušší je si představit prut, který je na jednom konci vetknutý. Při namáhání se prut deformuje tak, že vrchní vlákna jsou namáhána na tah a spodní na tlak. Toto popisuje vzorec

$$\sigma = \frac{M_o}{W_o} \quad (3)$$

kde  $\sigma$  je napětí při namáhání v ohybu,  $M_o$  je ohybový moment a  $W_o$  je modul průřezu v ohybu. [2]

### 1.1.4 Krut

Napětí v krutu vzniká v případě, kdy na těleso působí moment síly, který je rovnoběžný s osou tělesa. Během tohoto namáhání mají sousední průřezy tělesa snahu se navzájem natočit kolem společné osy. Hodnota maximálního napětí je přímo závislá na tvaru průřezu kolmého na osu tělesa.

$$\tau = \frac{M_k}{W_k} \quad (4)$$

Kde  $\tau$  je napětí v krutu,  $M_k$  je točivý moment a  $W_k$  modul průřezu v krutu. [2]

## 1.2 Závislost mezi deformací a napětím

Závislost mezi deformací a napětím vyjadřuje Hookův zákon. Tento zákon platí pouze v oblasti elastické (pružné) deformace a vyjadřuje lineární závislost mezi napětím a poměrným prodloužením.

Vzorec Hookova zákona pro tah a tlak je

$$\sigma = E \varepsilon \quad (5)$$

kde  $E$  je modul pružnosti v tahu a  $\varepsilon$  je poměrné prodloužení.

Vzorec Hookova zákona pro smyk je

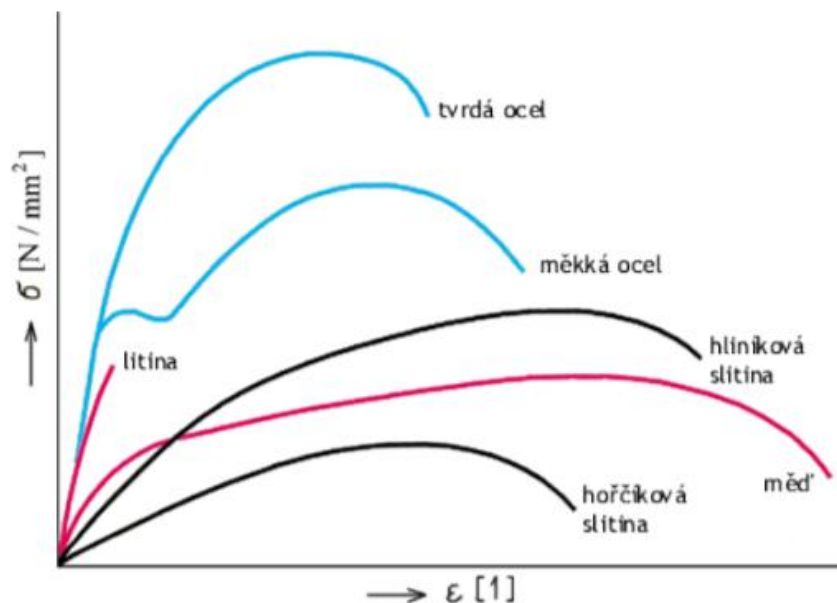
$$\tau = G \varepsilon \quad (6)$$

kde  $G$  je modul pružnosti ve smyku. [3]

### 1.2.1 Tahový diagram

Pro přesnější určení vztahu mezi deformací a napětím slouží tahový diagram. Tento diagram se získává experimentálně tahovou zkouškou, která není omezena oblastí platnosti Hookova

zákona. Tahový diagram je sám o sobě záznam závislosti síly na celkovém prodloužení nebo v častějších případech, závislost napětí na poměrném prodloužení (deformaci).



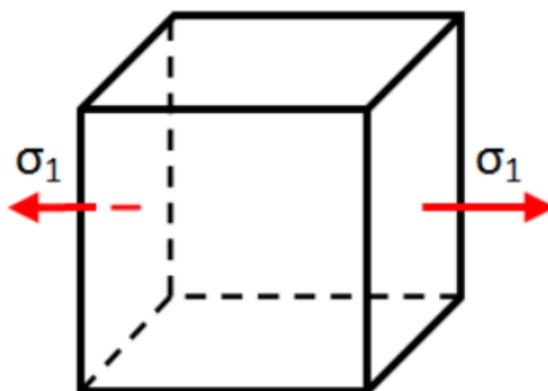
Obrázek 1 – Tahový diagram pro různé druhy materiálu, zdroj [4]

V praxi se zavádí pojmy smluvní tahový diagram a skutečný tahový diagram, kde oba tyto diagramy znázorňují závislost napětí na deformaci. Rozdíl je potom v průřezu, na který je diagram vztahován. U skutečného diagramu je napětí vztahováno ke skutečnému průřezu, který se v průběhu zkoušky mění a u smluvního na výchozí průřez. Z toho vychází, že u smluvního diagramu je napětí spíše zdánlivé ale lépe zjistitelné zatímco u skutečného diagramu je napětí hůře zjistitelné zato přesnější hodnota. [3]

## 1.3 Druhy měřených napjatostí a jejich určování

### 1.3.1 Jednoosá napjatost

O jednoosé napjatosti se dá hovořit jako o přímkové napjatosti. Přímková napjatost je vůbec ta nejzákladnější napjatost, kterou lze u měření deformací očekávat, měřit a počítat s ní. Definována je jako napjatost, kde dvě z hlavních napětí jsou nulová (viz obrázek níže). K této napjatosti dochází např. při tahové zkoušce (při ideálním upnutí vzorku). V tomto případě stačí nalepit jeden tenzometr v jednom směru. Ze změřeného poměrného prodloužení lze ihned určit odpovídající napětí. Toto napětí se určuje z Hookova zákona.

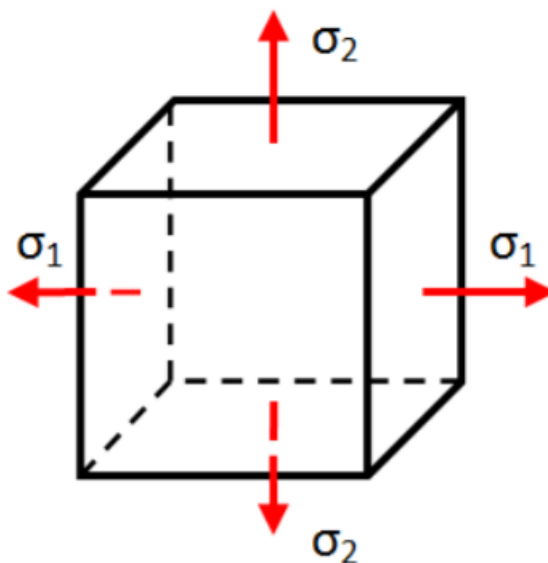


Obrázek 2 – Princip jednoosé (přímkové) napjatosti, zdroj [5]

### 1.3.2 Dvouosá (rovinná) napjatost

Dvouosá napjatost je definována jako napjatost, kde dvě z hlavních napětí jsou nenulové a jedno nulové (viz obrázky níže). Jako příklad rovinné napjatosti lze uvést těleso rovinného tvaru, které má dva rozměry větší než třetí. Dalším příkladem je třeba tenkostěnná tlaková nádoba.

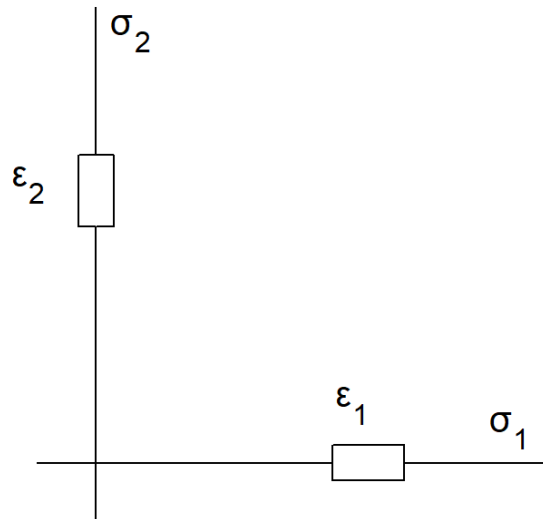
Pro rovinnou napjatost je charakteristické to, že všechny nenulové složky tenzoru napjatosti působí v jedné rovině. Element tělesa tedy lze vyjádřit jako čtverec. [5]



Obrázek 3 - Princip dvouosé (rovinné) napjatosti, zdroj [5]

### **Známé směry hlavních napětí**

Pokud jsou známé směry hlavních napětí, měření je v tom případě jednoduché. Stačí použít tenzometrický kříž – nalepení tenzometrů do směrů hlavních napětí (viz obrázek níže).



Obrázek 4 - Použití tenzometrického kříže, zdroj [6]

### **Neznámé směry hlavních napětí**

Při vyšetřování rovinné napjatosti, kde směry hlavních napětí jsou neznámé, nelze s velkou účinností použít tenzometrický kříž. K tomuto účelu slouží např. tenzometrická růžice. Pro stanovení neznámých hodnot a odchylky snímače od směru hlavních napětí, je nutné znát deformace alespoň ve třech směrech, které jsou odkloněné od směru hlavních napětí o daný úhel. Tyto směry mohou být zvoleny v zásadě libovolně. [7]

## **1.4 Technologie výroby kolena a ohybu**

Protože celá tato diplomová práce pojednává o kolenech a ohybech – a některé jejich vlastnosti mají klíčový vliv na napjatost, tak by bylo dobré zmínit způsob výroby těchto potrubních prvků.

### **1.4.1 Koleno**

Koleno se vyrábí z předem nařezané trubky, která se v peci ohřeje na tvářecí teplotu a metodou protlačování se lisuje na tzv. Poutnické holi. Protože je polotovár tlačeny do ohnuté části lisovacího nástroje, nedochází k tak výraznému zeslabení taženého vlákna. Tlačené vnitřní vlákno je naopak výrazně zesílené, což je pro mechanické vlastnosti hotového potrubního dílu výhodné, protože v místě s větší geometrickou koncentrací napětí je větší tloušťka stěny. [8]

### 1.4.2 Ohyb

Ohyb se vyrábí buď tažením za studena, nebo tlačáním za tepla. U ohýbání za studena dochází zpravidla k vyššímu ztenčení tloušťky stěny na taženém vlákně a ohyb má vyšší ovalitu. Nejlepších výsledků výsledné geometrie ohybů i v porovnání s koleny se dosahuje tvářením za tepla s indukčním ohřevem, kde je indukčně ohřívána velmi úzká tvářená oblast. Trubka je tlačena do volného ramene, které určuje poloměr ohybu. Tato technologie výroby byla vyvinuta a je patentována firmou Modřanské strojírny kolem roku 1950. Patent ještě za doby socialismu převzala holandská firma Cojafex a dodnes vyrábí špičkové ohýbací stroje řízené počítači. [8]

## 2 Výpočet MKP na 3D konečných prvcích

Metoda konečných prvků (MKP) je numerická metoda výpočtu, která umožňuje řešit širokou škálu problémů z oblasti mechaniky, termodynamiky, akustiky a dalších vědních odvětví. Touto metodou lze řešit jak statické, tak dynamické úlohy. Princip spočívá v prostorové diskretizaci vytvořeného modelu (rozdělení modelu na malé části jednoduchých tvarů). Tyto malé části se nazývají prvky a zjišťované parametry jsou určovány v jejich jednotlivých uzlových bodech. Z matematického hlediska tyto prvky mají konečný počet a velikost, z čehož je tato metoda pojmenována. Řešením úlohy MKP hledáme odezvu systému na vnější zatížení (v případě statické úlohy to jsou posunutí a napětí způsobená vnějšími zatíženími). [9]

V tomto případě bylo uvažováno statické úlohy výpočtu MKP. Tento výpočet sloužil jak k určení potřebné síly namáhání, tak ale hlavně k posouzení míst pro nalepení tenzometrů. MKP výpočet byl původně zpracován v programu Ansys. Z důvodu studentské licence programu Ansys nebylo možné detailně vypracovat výpočet v tomto programu (malé množství prvků ve výpočetní síti). Proto se přiklonilo ke zpracování výpočtu v programu Catia s řešičem Abaqus.

V přípravném výpočtu byly obě součásti podrobeny zatížení silou 1 kN a to na ohyb a krut. Byla očekávána tahová a tlaková napětí s maximální hodnotou těsně pod mezí kluzu.

### 2.1 MKP výpočet na ohybu 4D

#### 2.1.1 Zatížení

##### a) Na ohyb

- zatížení bylo provedeno na konci delšího ramene vodorovnou silou 1 kN



Obrázek 5 – OHYB 4D – zatížení na ohyb



**b) Na krut**

- zatížení bylo provedeno na konci delšího ramene vodorovnou silou 1 kN kolmou na osu

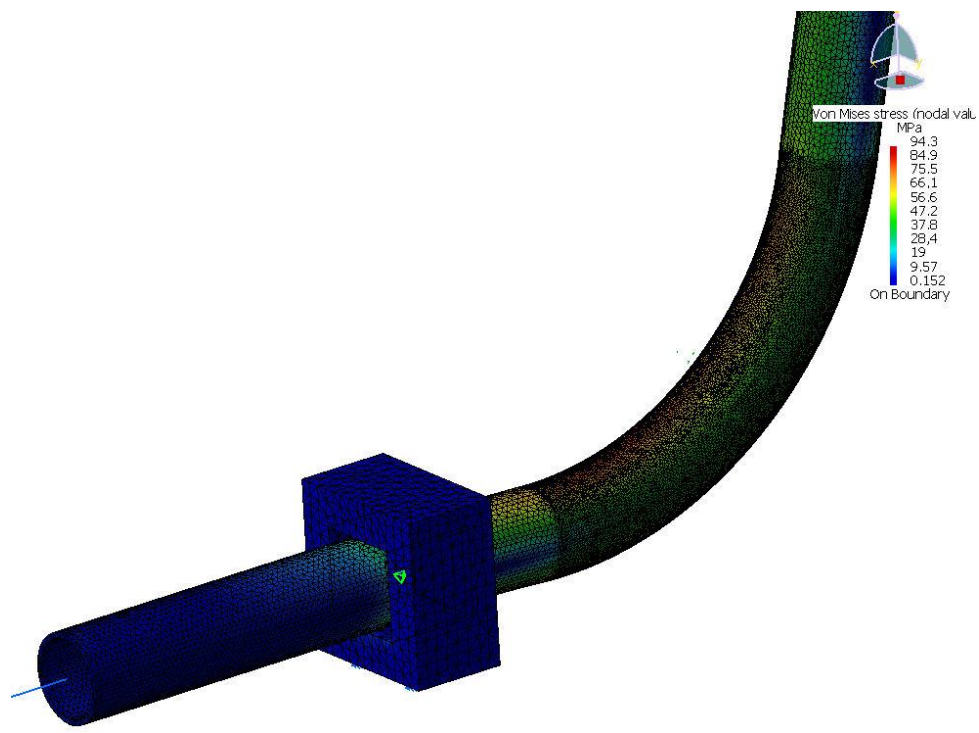


Obrázek 6 – OHYB 4D – zatížení na krut

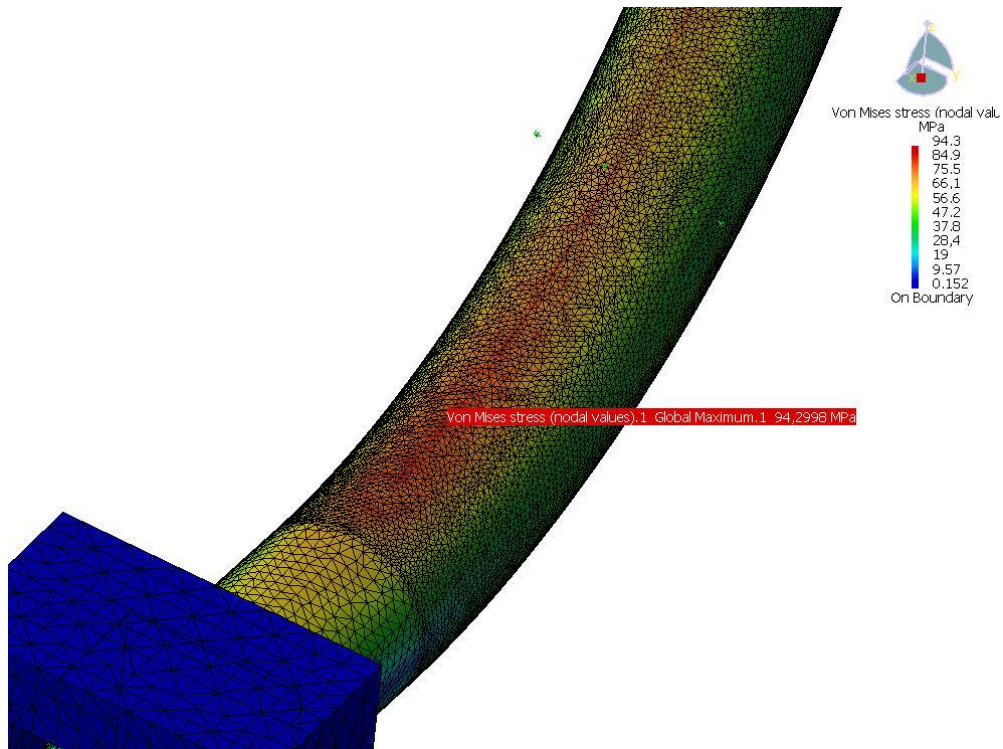
**2.1.2 Výsledek**

**a) Na ohyb**

- největší tahové napětí vzniklo na horní povrchce a to kolem 95 MPa

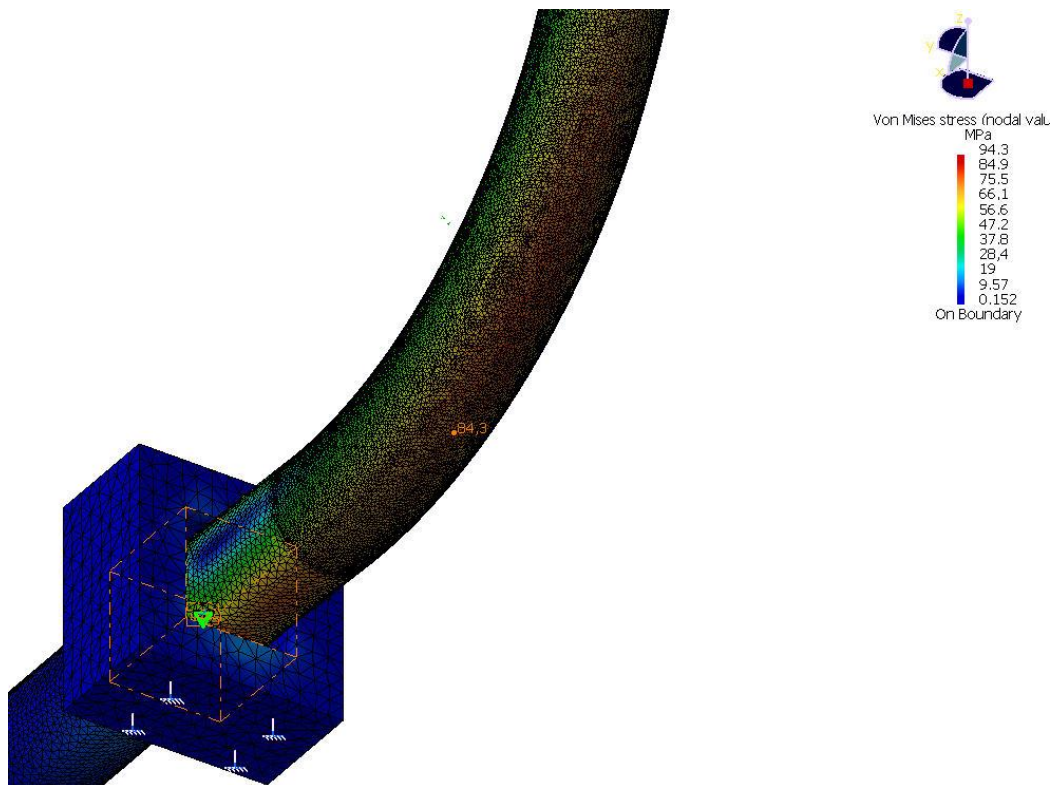


Obrázek 7 – OHYB 4D – OHYB - výsledek



Obrázek 8 – OHYB 4D – OHYB - výsledek – horní pohled (detail)

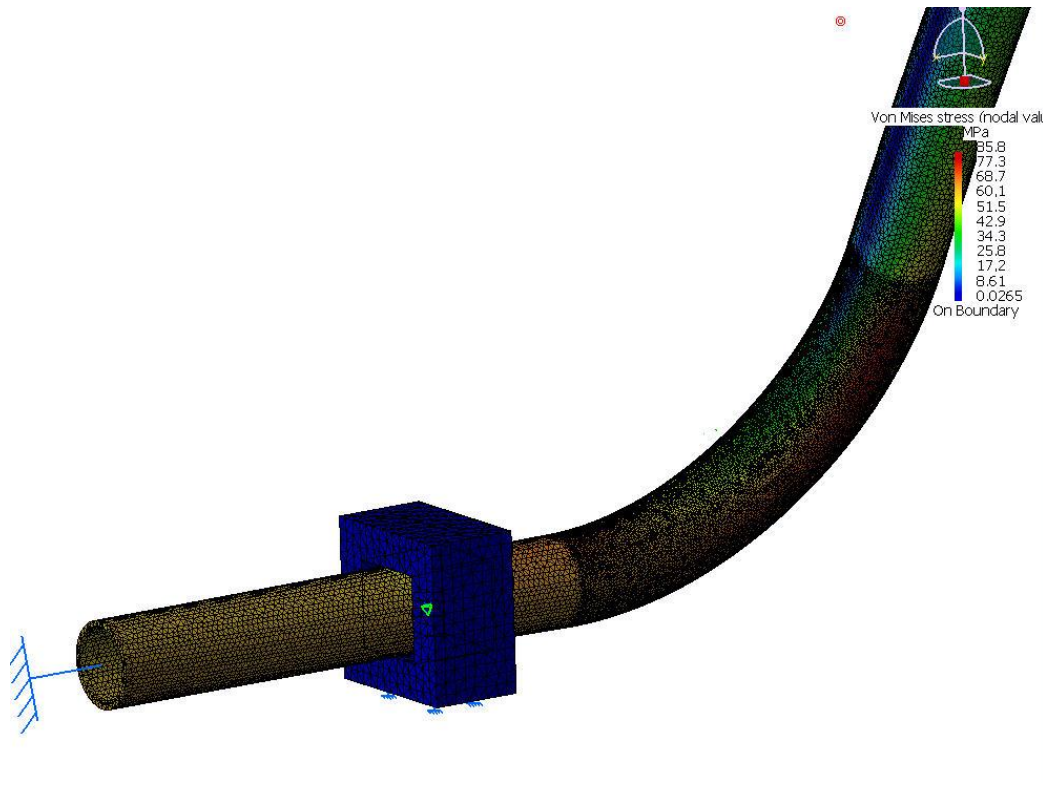
- největší tlakové napětí vzniklo na spodní povrchce a to kolem 85 MPa



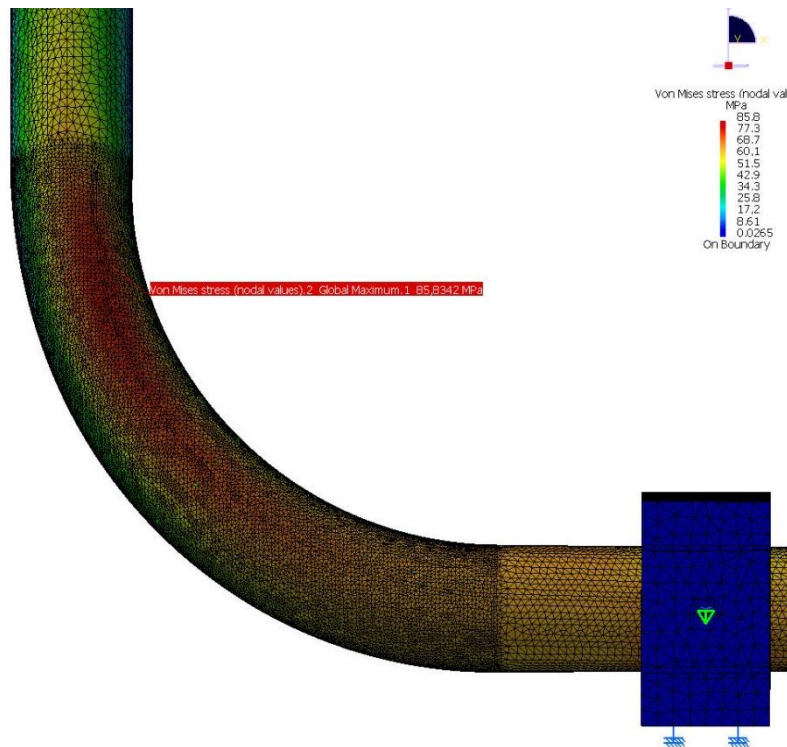
Obrázek 9 – OHYB 4D – OHYB - výsledek – spodní pohled

b) Na krut

- u namáhání na krut vzniklo na jedné boční povrchce tlakové napětí kolem 85 MPa, které je hodnotově stejné, jako tlakové napětí na boční povrchce z druhé strany



Obrázek 10 - OHYB 4D - KRUT – výsledek



Obrázek 11 - OHYB 4D - KRUT - výsledek - boční pohled

## 2.2 Výpočet MKP na koleni 1,5D

### 2.2.1 Zatížení

a) Na ohyb

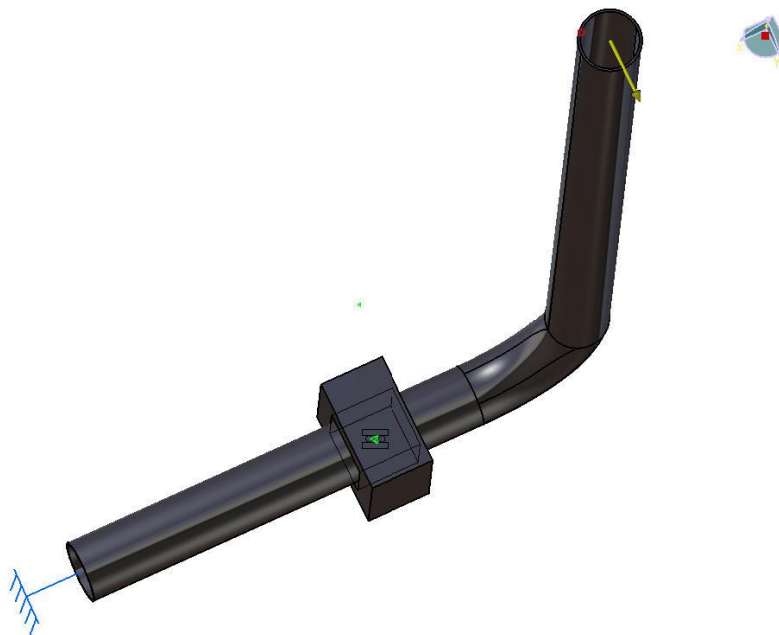
- zatížení bylo provedeno na konci delšího ramene vodorovnou silou 1 kN



Obrázek 12 – KOLENO 1,5D – zatížení na ohyb

b) Na krut

- zatížení bylo provedeno na konci delšího ramene vodorovnou silou 1 kN kolmou na osu

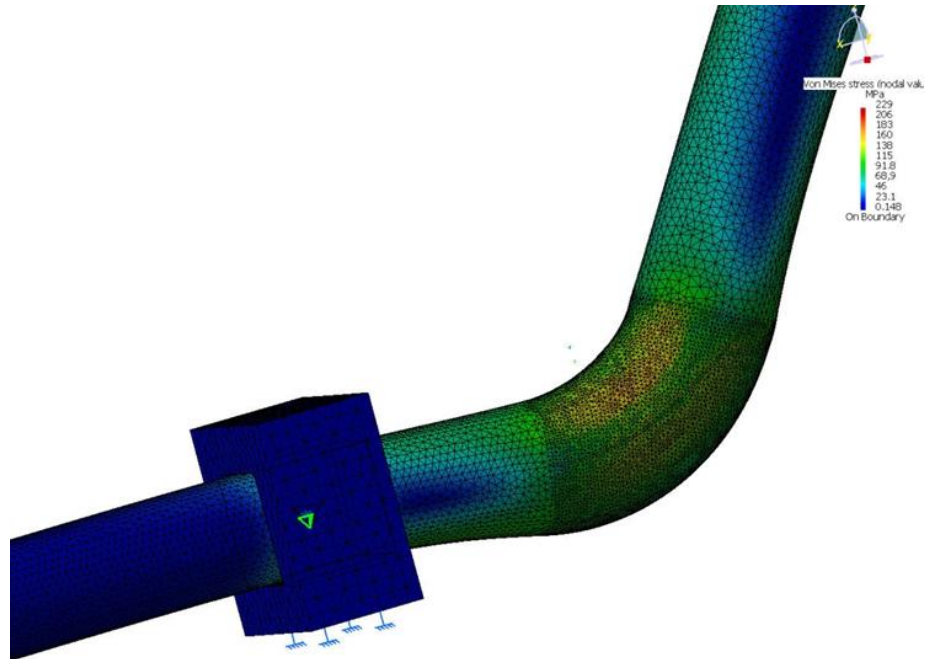


Obrázek 13 – KOLENO 1,5D – zatížení na krut

## 2.2.2 Výsledek

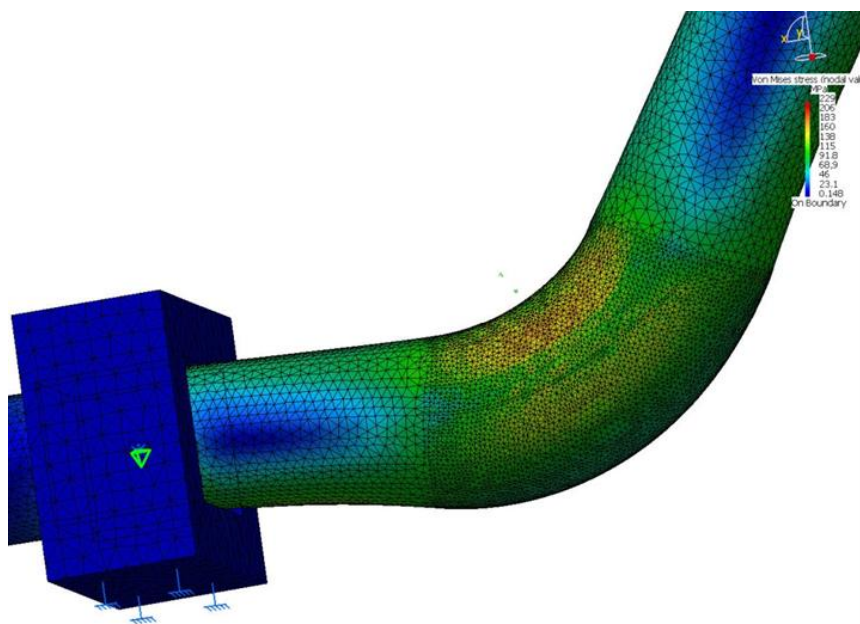
### a) Na ohyb

- při zatěžování kolene 1,5D na ohyb vzniklo tahové napětí na horní povrchce o maximální hodnotě kolem 230 MPa



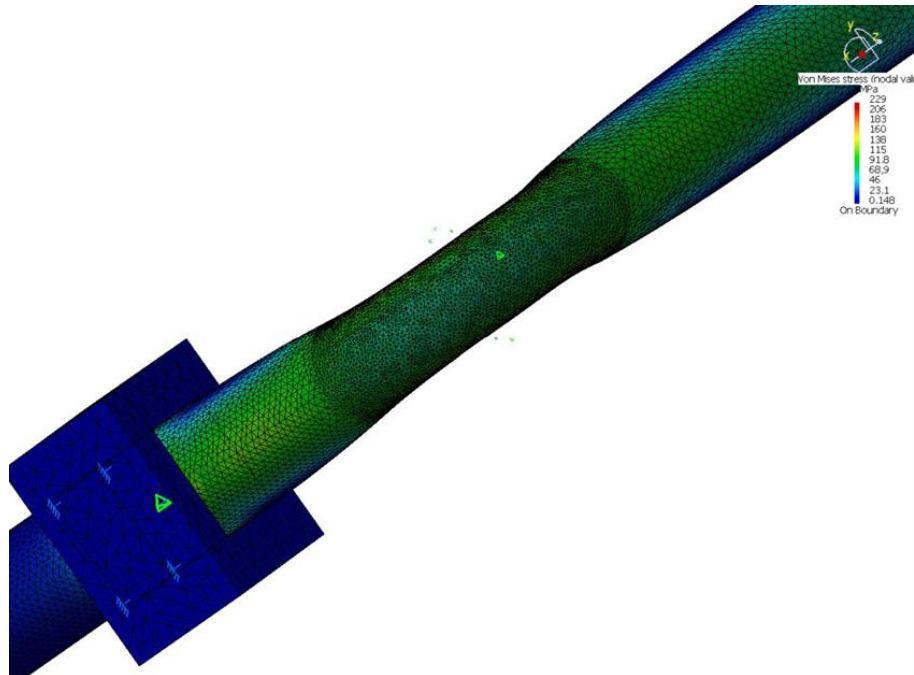
Obrázek 14 – KOLENO 1,5D – OHYB – výsledek

- na bočních povrchkách vzniklo tlakové napětí o přibližných hodnotách kolem 100 MPa



Obrázek 15 - KOLENO 1,5D - OHYB - výsledek - boční pohled

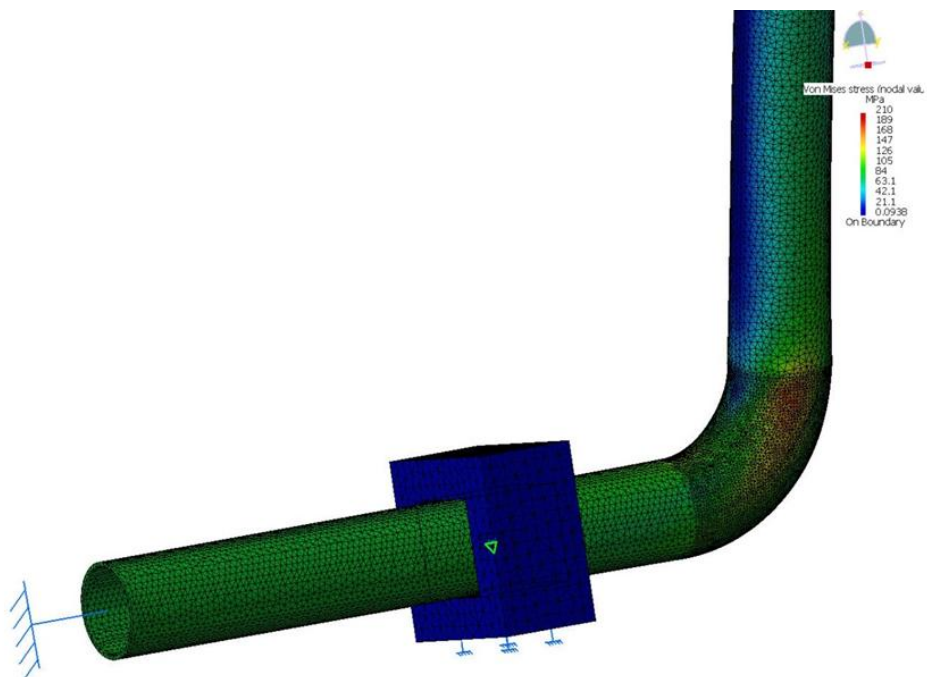
- tlakové napětí vzniklo i na spodní povrchce o přibližných hodnotách mezi 45 a 100MPa



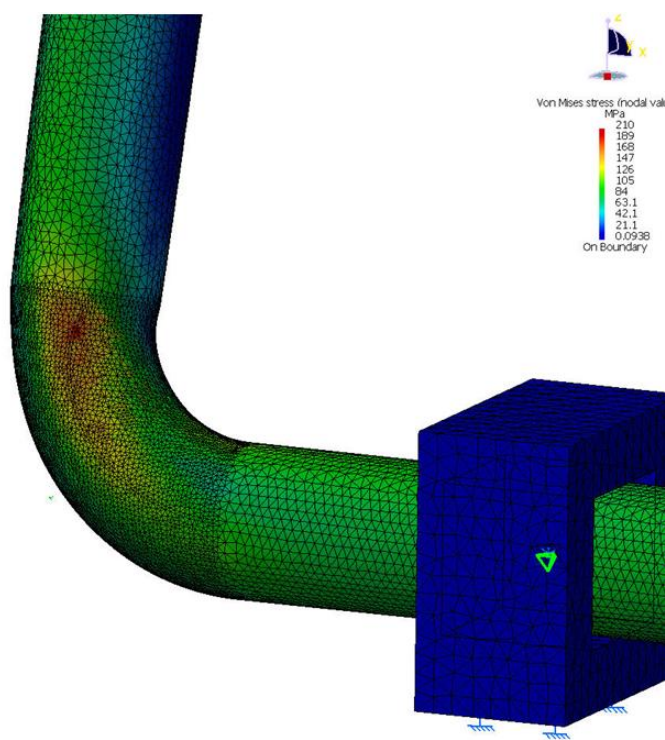
Obrázek 16 - KOLENO 1,5D - OHYB - výsledek - spodní pohled

**b) Na krut**

- namáháním na krut vzniklo na obou bočních povrchkách maximální napětí kolem 210MPa – na jedné povrchce tahové a na druhé tlakové



Obrázek 17 - KOLENO 1,5D - KRUT - výsledek



Obrázek 18 - KOLENO 1,5D - KRUT - výsledek - boční pohled

### 3 Výpočet MKP na 2D prutových potrubních prvcích

V některých případech je možné si celý výpočet zjednodušit a řešit jej jako 2D úlohu za použití rovinných prvků. 2D prvky lze nejen použít pro úlohy rovinné napjatosti, rovinné deformace a pro úlohy s osovou symetrií, ale také pro modelování 3D struktur, kde délka prvku je výrazně větší než průřez. [9]

Výpočet pro tento případ byl zpracován pomocí programu AutoPIPE, verze 8i. Autorem programu je firma Bentley (U. S. A). Program splňuje standardy kvality ISO9001, 10CFR21, NQA-1 a má rovněž jadernou certifikaci NUPIC a NRC. V ČR je program veden pod číslem 512 v seznamu standardizovaných programů pro zpracování průkazné dokumentace jaderných elektráren. ŠKODA JS a.s. je držitelem řádné licence k používání tohoto programu. [10]

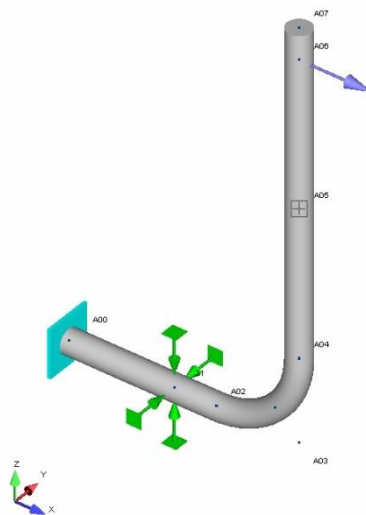
Pro všechna namáhání byly zvoleny stejné okrajové podmínky a hodnota zatěžující síly  $F=1000\text{N}$ .

#### Okrajové podmínky

- 1) Vetknutí konce kratšího ramene v bodě A00 (typ Anchor)
- 2) Třmen v bodě A01 (typ Guide)
- 3) Působící síla v bodě A06 (typ Concentrated Force)

### 3.1 OHYB 4D

#### 3.1.1 Namáhání na ohyb



Obrázek 19 – OHYB 4D – ohyb – výsledek (AutoPIPE)

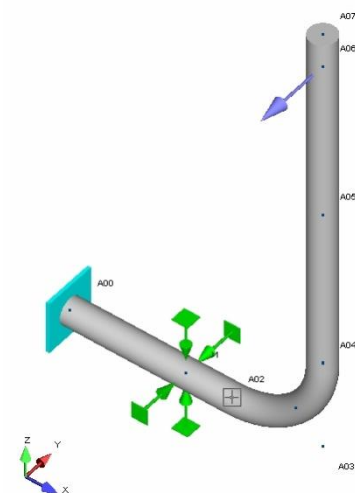
#### Výsledek

Maximální napětí, při působení silou 1 kN ve směru osy x, vzniká v bodě A03 N+.

Hodnota napětí je 96 MPa.



### 3.1.2 Namáhání na krut



Obrázek 20 – OHYB 4D – krut – výsledek (AutoPIPE)

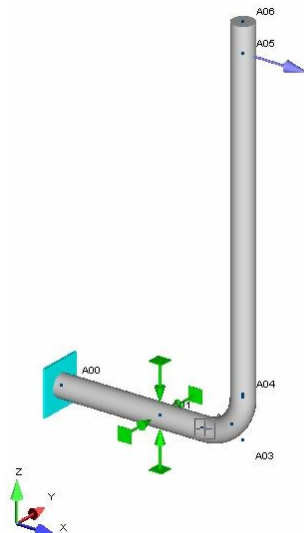
#### Výsledek

Maximální napětí, při působení silou 1 kN v záporném směru osy y, vzniká v bodě A03 N+.

Hodnota napětí je 98 MPa.

### 3.2 KOLENO 1,5D

#### 3.2.1 Namáhání na ohyb



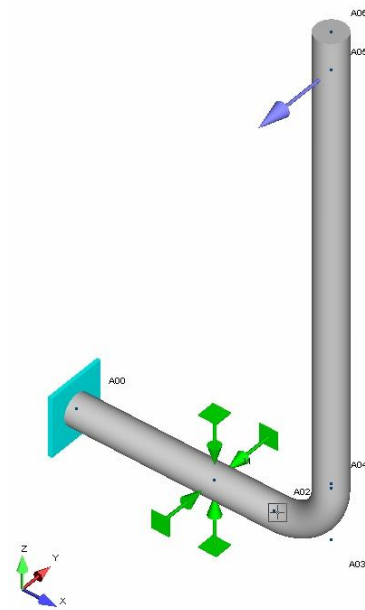
Obrázek 21 – KOLENO 1,5D – ohyb – výsledek (AutoPIPE)

#### Výsledek

Maximální napětí, při působení silou 1 kN ve směru osy x, vzniká v bodě A03 N+.

Hodnota napětí je 272 MPa.

### 3.2.2 Namáhání na ohyb



Obrázek 22 – KOLENO 1,5D – krut – výsledek (AutoPIPE)

#### **Výsledek**

Maximální napětí, při působení silou 1 kN v záporném směru osy y, vzniká v bodě A03 N+.

Hodnota napětí je 274 MPa.

## 4 Elektrická odporová tenzometrie

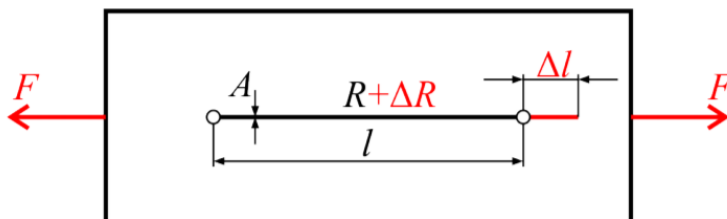
Tato kapitola slouží jako rešeršní část pro přípravu praktické úlohy. Je zde popisován princip metody, druhy jednotlivých tenzometrů, jejich vlastnosti a způsoby zapojení jednotlivých tenzometrů.

### 4.1 Princip metody

Elektrická odporová tenzometrie je nepřímá metoda měření deformace pomocí změny odporu tenzometru. Poměrné prodloužení  $\varepsilon$  je zde určováno na základě poměrné změny elektrického odporu  $\Delta R/R$  tenzometru vlivem jeho deformace. [6]

Obecně pro poměrnou změnu odporu platí:

$$\frac{\Delta R}{R} = f(\varepsilon) \quad (7)$$



Obrázek 23 - Princip metody, zdroj [11]

Na obrázku 23 je na ploché tyči konstantního průřezu vyobrazen princip metody. S danou tyčí je pomocí kolíků z nevodivého materiálu spojen vodič délky  $l$  a průřezu  $A$  o měrném odporu  $\rho$  [ $\Omega mm$ ]. Změní-li se délka prutu o  $\Delta l$ , průřez vodiče  $A$  nebo eventuelně vlivem změny teploty měrný odpor  $\rho$ , změní se odpor  $R$  o  $\Delta R$ . [6]

Odpor tohoto vodiče je potom vyjádřen pomocí vztahu:

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (8)$$

Pokud se uvažuje, že během procesu deformace se mění všechny veličiny, potom pro vyjádření změny odporu  $dR$  se vychází z logaritmické rovnice, která vznikne zlogaritmováním rovnice (2).

Rovnice vypadá takto:

$$\ln R = \ln \rho + \ln l - \ln A \quad (9)$$

Derivací rovnice (3) vyjde rovnice

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{dA}{A} \quad (10)$$

kde  $dl/l = \varepsilon$  je poměrné prodloužení.

Pro určitou konečnou změnu odporu  $R$  a po dílčích úpravách dostáváme základní tenzometrickou rovnici ve tvaru

$$\frac{\Delta R}{R} = k\varepsilon \quad (11)$$

kde  $k$  je součinitel deformační citlivosti. Tento součinitel u většiny kovových tenzometrů nabývá hodnoty  $2 \div 4$ . Experimentálně bylo potvrzeno, že pro většinu kovů a odporových slitin je závislost poměrné změny odporu na délkovém přetvoření lineární v určitém rozsahu deformace. [6] [11]

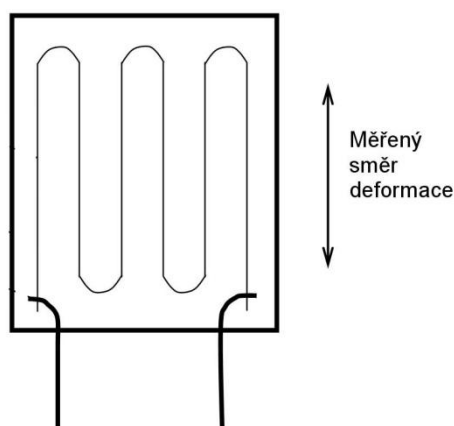
Samotné měření je prováděno pomocí tenzometrů, které jsou lepeny na povrch součásti. Jelikož se při měření u tenzometru projevuje např. přenos deformace z povrchu tělesa přes izolační podložku na vinutí tenzometru, nebo změna odporu vlivem příčné deformace, je hodnota deformačního součinitele určována cejchováním. [6]

## 4.2 Kovové tenzometry

Děleny jsou podle konstrukce na drátkové nebo fóliové.

### 4.2.1 Drátkové tenzometry

Drátkové, neboli vlásenkové tenzometry jsou tenzometry vinuté z drátku o průměru  $0,01 \div 0,03\text{mm}$ . Běžně se používá  $0,025\text{mm}$ .



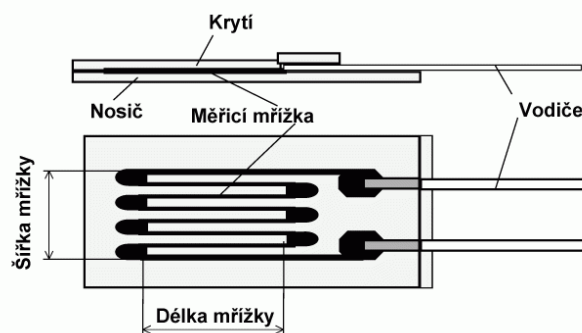
Obrázek 24 - Drátkový tenzometr, zdroj [12]

Nevýhodou těchto tenzometrů je, že při malých délkách vinutí jsou velmi citlivé na příčnou deformaci. Ve snaze zabránit tomu vlivu či tento vliv odstranit, byly vyvinuty tzv. meandrové

nebo mřížkové snímače. Tyto snímače měly zesílené přechody ve smyčkách. Vinutí drátového tenzometru je nalepeno na nosič. Nosičem je destička o tloušťce přibližně 0,07mm. [6]

#### 4.2.2 Fóliové tenzometry

Fóliové tenzometry jsou dnes nejpoužívanější kovové tenzometry. Nejpoužívanější také kvůli tomu, že nejsou citlivé na příčnou deformaci při malých délkách vinutí jaké drátkové tenzometry. Tyto tenzometry jsou ve většině případů ukryty uvnitř zapouzdřených tenzometrických průmyslových snímačů. Nejsou tak skoro vůbec vidět a ven z nich vedou prakticky jen připojovací vodiče. Fóliové tenzometry jsou vyráběny v nejrůznějších skupinách a tvarech pro měření různých tvarových objektů a působících sil v různých směrech. [6] [13]



Obrázek 25 - Fóliový tenzometr, zdroj [13]

Na obrázku 25 je znázorněn fóliový tenzometr. Provedení vinutí je v tomto případě ve tvaru tenkých rovnoběžných pásků, které jsou na koncích spojeny silnější vazbou. Výroba těchto tenzometrů se provádí pomocí fotolitografické techniky z kovových fólií. Materiálem kovové fólie je nejčastěji chromnikl, konstantan nebo karma (slitina chromu a niklu). [13]

Tenzometry fóliového provedení mají řadu vhodnějších vlastností než drátkové. Lépe odvádí teplo, mají menší příčnou citlivost a výhodnější přenos deformace z povrchu součásti do měřicí mřížky. [6]

#### 4.3 Polovodičové tenzometry

Polovodičové tenzometry jsou založeny na piezorezistivním jevu. To je schopnost krystalu generovat elektrické napětí při jeho deformování. Polovodičem je látka (např. křemík nebo germanium), jejíž měrný odpor při pokojové teplotě je menší než u izolantů ale zároveň větší než měrný odpor vodiče.

Piezoresistenci se rozumí vazba mezi poměrnou změnou měrného odporu  $\rho$  a mechanickým napětím  $\sigma$ . Tato závislost je vyjádřena vztahem

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \pi_i \sigma \quad (12)$$

kde  $\pi_i$  je piezorezistentní součinitel a  $\rho$  je specifický odpor polovodiče.

Specifický odpor polovodiče je vyjádřen ze vztahu

$$\rho = \frac{1}{e N_i r_{str}} \quad (13)$$

kde  $e$  je náboj elektronu,  $N_i$  počet nositelů náboje a  $r_{str}$  jejich střední rychlost.

U polovodičů existuje dvojí vodivost:

### a) Vlastní vodivost

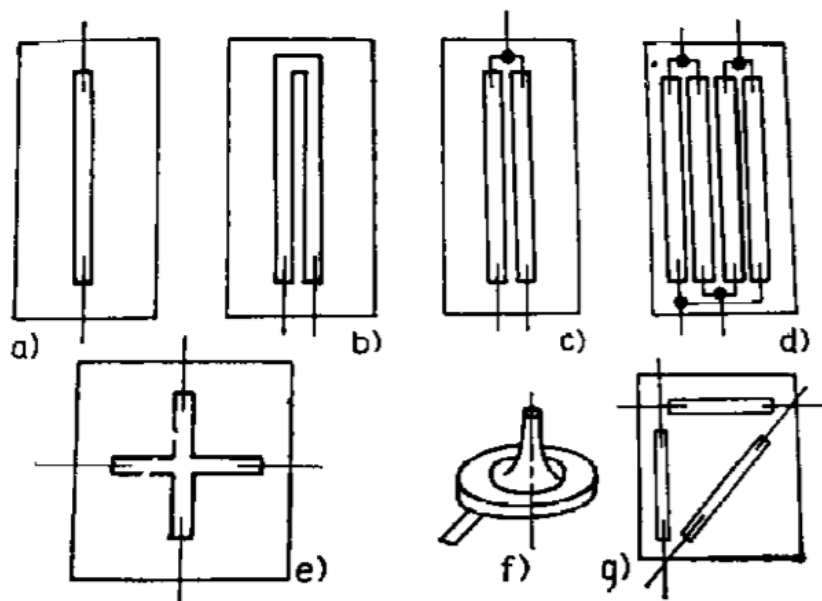
- vodivost, která je způsobena přivedenou energií (např. změna teplotního pole). Pro tuto vodivost je charakteristické, že při ní vždy vzniká dvojice nosičů elektron i díra.

### b) Příměsová vodivost

- tato vodivost vzniká přidáním cizích atomů. Toto má za následek, že v polovodiči se objeví větší počet nosičů jednoho typu (elektronů nebo děr).

Přidáním tzv. *akceptorů* (pro křemík nebo germanium to je bór, galium nebo indium) bude mít uvedený polovodič tzv. „*děrovou příměsovou vodivost*“. Tento polovodič je označován jako polovodič typu P (pozitivní nosič náboje). Přidáním tzv. *donorů* (pro křemík a germanium to je např. arsen nebo antimon) vznikne tzv. „*elektronová příměsová vodivost*“. Polovodiče tohoto typu jsou označovány jako polovodiče typu N (negativní nosiče náboje). [6]

Základní typy polovodičových tenzometrů jsou vyobrazeny na obrázku níže.



Obrázek 26 - Základní typy polovodičových tenzometrů, zdroj [14]

### 4.3.1 Deformační součinitel

U polovodičových tenzometrů je pro hodnotu citlivosti  $k$  rozhodující velikost součinitele piezorezistence. Součinitel citlivosti dosahuje hodnot  $k=45 \div 200$ . Pokud se bere v potaz lineárně pružný stav jednoosé napjatosti a uvážení Hookova zákona, vychází po úpravě rovnice

$$k = \frac{\Delta R}{\varepsilon R} = 1 + 2\mu + \pi_i E \quad (14)$$

kde  $\mu$  je Poissonovo číslo polovodiče a  $E$  je modul pružnosti v tahu. [6]

### 4.3.2 Vliv teploty

Závislost poměrné změny odporu nedeformovaného tenzometru na teplotě je vyjádřena vztahem

$$\frac{\Delta R}{R_0} A_1(T - T_0) + A_2(T - T_0)^2 \quad (15)$$

kde  $A_1$  a  $A_2$  jsou konstanty udávány výrobcem. [6]

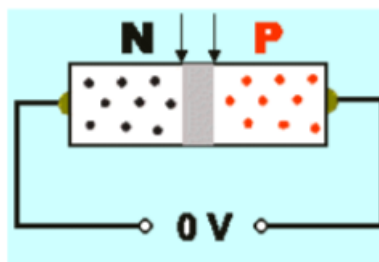
### 4.3.3 Vlastnosti polovodičových tenzometrů

Křemíkové tenzometry prakticky nevykazují žádnou hysterezi. Polovodičové tenzometry lze zatěžovat v oblasti tahových deformací do hodnoty deformace  $\varepsilon = 6 \cdot 10^{-3}$ . V oblasti tlakových namáhání ještě více. Při proměnném namáhání symetrickým cyklem s amplitudou deformace  $2 \cdot 10^{-3}$  je uváděn mezní počet cyklů větší než  $10^7$ . [6]

### 4.3.4 Použití polovodičových tenzometrů

#### a) Bez zdroje napětí

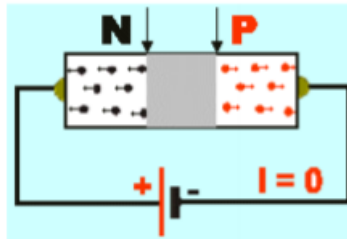
Při styku dvou polovodičů, dochází k přechodu volných elektronů z oblasti N do P a jejich párování s volnými dírami, tím vzniká v oblasti přechodu nevodivá tzv. hradlová vrstva. Tuto vrstvu je možné vidět na obrázku níže (zobrazena šedou barvou).



Obrázek 27 - Zapojení bez zdroje napětí, zdroj [15]

## **b) Závěrný směr**

Polovodič N je připojen na kladný pól a polovodič P na záporný pól. Při tomto zapojení neprochází proud, protože působením elektrických sil se vzdalují volné náboje a hradlová vrstva se rozšiřuje a její odpor roste.



Obrázek 28 - Závěrný směr, zdroj [15]

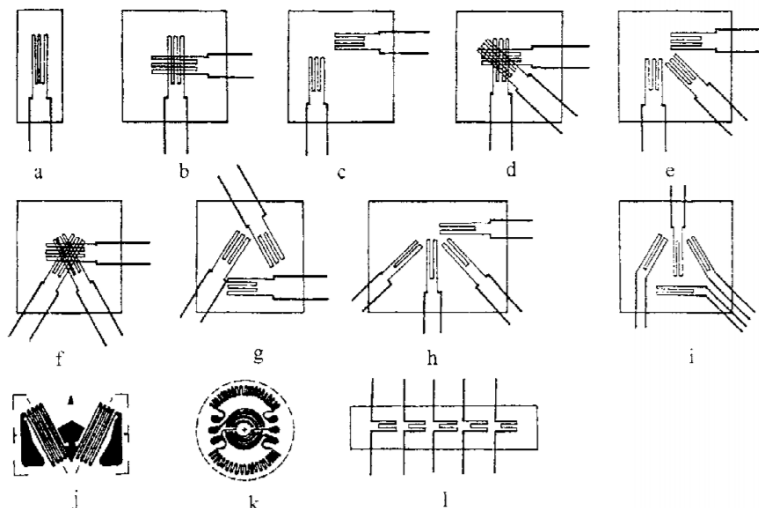
## **4.4 Uspořádání tenzometrů**

Dle účelu tenzometru může být na podložce různé uspořádání jednotlivých tenzometrů. Mohou se lišit vinutím, tvarem či použitým materiálem. Existují ale i další speciální tenzometry, které slouží např. pro měření zbytkových napětí, velkých deformací apod. [6]

Na obrázku níže je možné vidět uspořádání jednotlivých tenzometrů pro měření dané napjatosti. Uspořádání může být následující:

- Jednoduchý tenzometr pro měření napjatosti v jednom směru
- Tenzometrický kříž používaný pro měření rovinné napjatosti (ve dvou směrech)
- Tenzometrická růžice
- Tenzometrický vějíř
- T delta
- Tenzometr používaný pro měření kroutícího momentu na hřídeli kruhového profilu
- Tenzometr pro měření membránových napětí na deskách
- Tenzometr pro měření gradientu poměrného prodloužení





Obrázek 29 - Uspořádání tenzometrů, zdroj [16]

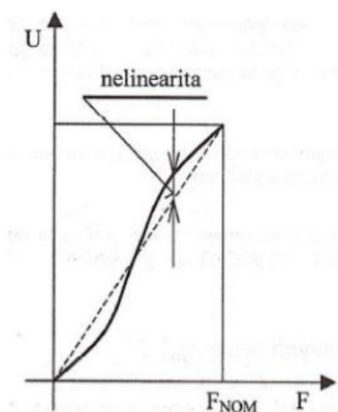
## 4.5 Vlastnosti odporových tenzometrů

Vlastnostmi odporových tenzometrů se rozumí linearita, hysterese, relaxace, příčná citlivost a deformační součinitel. Tyto vlastnosti se u jednotlivých tenzometrů mohou výrazně lišit. Tyto změny mohou být způsobeny jejich rozdílným tepelným zpracováním, kvalitou materiálu a podložky, použitím lepidla apod. Proto při zavádění nového typu tenzometru na trh je nutné provádět různé zkoušky a každou vyrobenou sérii tenzometrů řádně ocejchovat. [6]

### 4.5.1 Linearita

Ideální stav je při lineární závislosti vyjádřen přímkou (na obrázku 30 přerušovanou čarou). V technické praxi se ale s ideálním stavem téměř nejde setkat, proto se musí počítat s různými odchylkami.

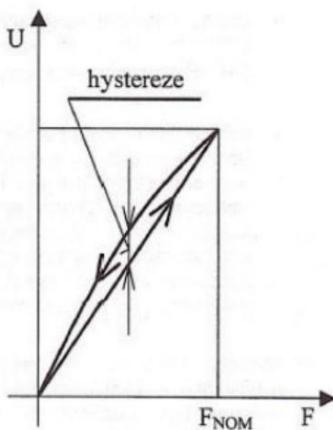
Linearita tedy udává maximální odchylku reálného výstupního signálu od ideálního přímkového průběhu. Tento signál je dán jako spojnice počátku s hodnotou výstupního signálu při jmenovité hodnotě zatěžující síly. [17]



Obrázek 30 - Linearita a nelinearita, zdroj [17]

#### 4.5.2 Hystereze

Hystereze je velmi častý jev, ke kterému dochází při střídavém zatěžování a odlehčování součásti s nalepeným tenzometrem. Definována je jako největší odchylka mezi hodnotou výstupního signálu při zatěžovacím a odlehčovacím cyklu pro danou hodnotu zatížení. Se zvyšujícím se počtem zatěžovacích cyklů se hystereze zmenšuje. Nakonec je ustálena na konstantní hodnotě. [6] [17]

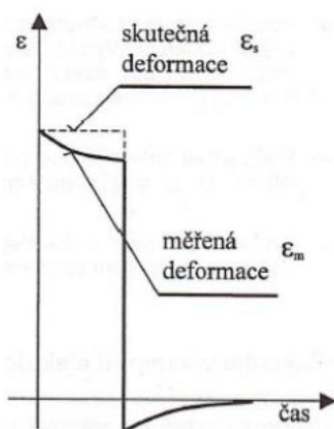


Obrázek 31 - Hysterezní křivka, zdroj [17]

#### 4.5.3 Relaxace

Relaxace vzniká na dlouhodobě zatěžovaných součástech a projevuje se jako pokles změřené deformace a to i přesto, že deformace a napětí na součásti jsou konstantní. Po odlehčení tenzometru se relaxace projevuje jako deformace opačného znaménka. Relaxace je ve většině případů způsobena změnami vlastností podložky tenzometru a lepidla v důsledku dlouhodobého zatížení.

Relaxace ve zkratce charakterizuje změnu poměrné podélné deformace tenzometru vůči poměrné podélné deformaci součásti při statickém zatížení. [6] [17]

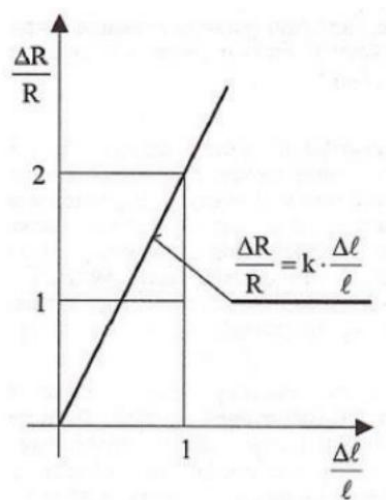


Obrázek 32 - Graf relaxace, zdroj [17]

#### 4.5.4 Deformační součinitel

Deformační součinitel  $k$ , neboli  $K$  - faktor je bezrozměrný proporcionální součinitel, který v sobě zahrnuje jak vliv měřicí mřížky, tak i celé konfigurace tenzometru. Je tedy závislý na konkrétním typu tenzometru. Proto je nutné uvedení  $k$ -faktoru od výrobce na každém balení tenzometrů včetně tolerance. Pro drátkové a fóliové tenzometry je přibližně  $k=2$  a pro polovodičové tenzometry v rozmezí  $k=30\div 200$ .

Závislost mezi přetvořením a změnou odporu není zcela lineární. Reálná závislost je parabolického charakteru. Do určité hodnoty přetvoření lze rozdíl mezi lineární náhradou a reálnou závislostí zanedbat. Tato hodnota je závislá na materiálu mřížky. Dalším parametrem ovlivňující velikost deformačního součinitele je teplota. Proto výrobce doporučuje používat tenzometr při pokojové teplotě. V praxi je deformační součinitel určován na základě cejchování. [17] [18]



Obrázek 33 – Graf lineární závislosti deformačního součinitele, zdroj [17]

#### 4.5.5 Příčná citlivost

Z hlediska měření je důležitá příčná citlivost, která je definována jako:

$$\kappa = \frac{k_t}{k_l} \quad (16)$$

kde  $k_l$  je deformační součinitel tenzometru aktivní délky a je definovaný jako

$$k_l = \frac{\Delta R/R_0}{\varepsilon_l} \quad (17)$$

a  $k_t$  je deformační součinitel v příčném směru na aktivní délku. Definován je jako

$$k_t = \frac{\Delta R/R_0}{\varepsilon_t} \quad (18)$$

K zamezení vlivu příčné citlivosti se v dnešní době nejčastěji dosahuje použitím zesílení na koncích jednotlivých smyček v měřicí mřížce. Tím dochází ke koncentraci příčného přetvoření na malý prostor a nedochází tím k ovlivnění celé aktivní části tenzometru. Dalším vlivem, který souvisí s příčným přetvořením je zúžení v oblasti aktivní délky mřížky vlivem příčné kontrakce materiálu. Tento efekt způsobuje pro kladné přetvoření velmi malou zápornou změnu odporu.

Příčná citlivost tedy ve zkratce charakterizuje citlivost tenzometru na deformaci v kolmém směru na osu snímače. V tabulce jsou uvedeny přibližné hodnoty součinitele příčné citlivosti tenzometru. [6] [17] [18]

Snímač	$\kappa$
Drátkový	0,012 – 0,02
Fóliový	0,008

Tabulka 1 - Hodnoty součinitele příčné citlivosti, zdroj [6]

## 4.6 Cejchování tenzometrů

Cejchování je proces, při kterém výrobce stanovuje hodnotu deformačního součinitele. Tento proces je vždy prováděn na určitém počtu tenzometrů u vyrobené série. Hodnota určená tímto způsobem se následně přiřadí k celé sérii a výrobce ji udává na obalu.

Cejchování tenzometrů je založeno na měření poměrného prodloužení nosníku namáhaného na prostý ohyb. Provádí se pomocí přesné tenzometrické aparatury, na které je nastaven libovolný deformační součinitel  $k_i$ . Při tomto deformačním součiniteli je měřeno odpovídající poměrné prodloužení  $\varepsilon_i$ . Výsledný deformační součinitel je určen z rovnice níže

$$k = k_i \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon} \quad (19)$$

kde  $\varepsilon$  je hodnota poměrného prodloužení určená ze změřeného průhybu nosníku. [6]

## 5 Vliv prostředí na tenzometrická měření

### 5.1 Vliv změny teploty

Vliv teploty se projeví na rozměrech součásti. Změnou teploty dochází ke změně rozměrů součásti a tím i ke změně odporu k povrchu součásti přilepeného tenzometru.

Toto lze vyjádřit ze vztahu:

$$\frac{\Delta R_T}{R} = k\varepsilon_T = k(\alpha_s - \alpha_v)\Delta T \quad (20)$$

kde  $\varepsilon_T$  je zdánlivá deformace,  $\alpha_s$  a  $\alpha_v$  jsou součinitelé lineární teplotní roztažnosti materiálu a mřížky tenzometru a  $\Delta T$  je změna teploty.

Vlivem změny teploty také dochází ke změně odporu materiálu mřížky tenzometru. Tuto změnu lze vyjádřit vztahem:

$$\Delta R_T = \beta R \Delta T \quad (21)$$

kde  $\beta$  je součinitel teplotního odporu materiálu mřížky. Poměrná změna odporu tenzometru vlivem změny teploty se následně vyjádří jako součet obou změn.

Změna odporu tenzometru mnohdy nastává i změnou vlastností lepidla vlivem teploty. Tento vliv změny teploty je nutno při měření eliminovat. [6]

#### 5.1.1 Vyloučení vlivu teploty pomocí kompenzačního tenzometru

Tato metoda spočívá v nalepení tenzometru na kousek jiného materiálu, než je proměřovaná součást. Tento materiál musí být stejných vlastností, jako je proměřovaná součást (stejný odpor  $R$  a součinitel deformace  $k$ ). Jeho uložení je takové, aby sledoval bez setrvačnosti změny teploty součásti v místě aktivního (měřícího) tenzometru. Takovýto tenzometr je nazýván kompenzační tenzometr.

Kompenzační tenzometr lze nalepit na součást vždy, když je možnost analyzovat napjatost v tělese (jednoosá napjatost, krut prutu apod.). Aktivní tenzometr společně s kompenzačním se vhodným způsobem zapojí do měřícího můstku. Vhodnou kombinací těchto dvou tenzometrů lze zvýšit citlivost měření a také vyloučit některé nežádoucí silové účinky (např. přídavný ohyb při prostém tahu). [6]

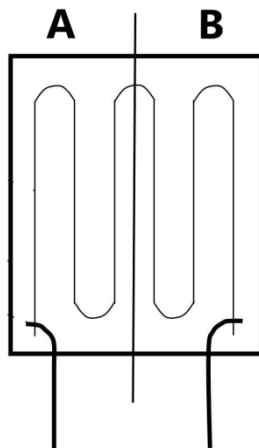
#### 5.1.2 Vyloučení vlivu teploty pomocí samokompenzačního tenzometru

Jsou ale situace, kdy použití kompenzačního tenzometru není možné (rychlé změny teploty, složité teplotní pole součásti). V těchto případech je nutné použít tzv. samokompenzační tenzometr. U tohoto tenzometru je změna odporu při změně teploty nulová. Existují dvě cesty pro splnění tohoto požadavku.

První ze způsobů byl vyvinut už někdy v minulosti. Jedná se o to, že vinutí tenzometru je tvořeno ze dvou částí (A, B). Každá část je z jiného materiálu, např. část A je z konstantanu a

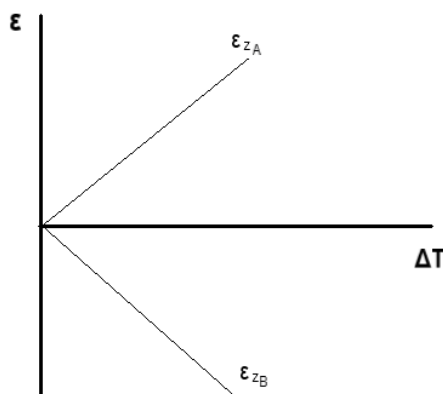
část B z mědi. Oba tyto materiály musí mít opačnou teplotní charakteristiku. Odpovídající veličiny jsou v rovnici níže označeny hvězdičkou.

$$\beta_V + k(\alpha_S - \alpha_V) + \beta^* + k(\alpha_S - \alpha_V^*) = 0 \quad (22)$$



Obrázek 34 - Samokompenzační tenzometr - první způsob, zdroj [6]

Charakteristiky jednotlivých částí jsou zřejmé z následujícího obrázku.



Obrázek 35 - Charakteristiky jednotlivých částí, zdroj [6]

V dnešní době je ale více používán druhý způsob. Ten je založen na dosažení vhodné velikosti teplotního součinitele odporu vinutí  $\beta$ . Toho se dosahuje vhodným technologickým zpracováním materiálu vinutí a vhodným složením slitiny. Hodnoty veličin  $\alpha$  a  $\beta$  jsou velmi citlivé na stupeň protváření za studena a složení slitiny. Ze vztahu níže vyplývá, že takový tenzometr lze použít jen pro měření na součásti z materiálu, pro který je uvažován součinitel lineární teplotní roztažnosti  $\alpha_S$ . Pro materiál s jiným teplotním součinitelem délkové roztažnosti je nutno provést korekci výsledků měření.

$$\beta = -k(\alpha_S - \alpha_V) = k(\alpha_V - \alpha_S) \quad (23)$$

Tuto podmínku lze splnit pouze v určitém rozsahu teplot a to pouze s určitou přibližností. [6]

### 5.1.3 Kompenzace vlivu teploty korekcí naměřených hodnot

Jedná se o univerzální metodu, u které je potřeba při tenzometrickém měření měřit na měřených místech teplotu pomocí termočlánků. Pokud je známá teplotní charakteristika tenzometrů pro materiál měřené součásti, lze zdánlivou deformaci  $\varepsilon_T$  vyloučit. Platí tedy vztah

$$\varepsilon = \varepsilon_m - \varepsilon_T \quad (24)$$

kde  $\varepsilon_m$  je změřená deformace. V dnešní době tyto charakteristiky tenzometrů uvádějí výrobci na obalech daných tenzometrů. Při měření za vysokých teplot se lze této charakteristice vyhnout. [6]

### 5.2 Vliv vlhkosti

Stejně jako teplota, tak také vlhkost může způsobit při měření značné problémy. Je nutno tedy brát potaz na změny vlhkosti v průběhu měření. Tyto změny mohou způsobit nekontrolovatelné výkyvy deformační citlivosti tenzometru nebo změny v nulové hodnotě a tím vznikají poměrně závažné chyby v měření.

Vliv vlhkosti se projeví:

- Snížením izolačního odporu tenzometru proti součásti. Tento odpor by neměl klesnout pod 50 M $\Omega$ , protože i malá změna izolačního odporu pod touto hranicí může vést k výraznému zvýšení nepřesnosti při měření
- Elektrolýzou a s ní spojenou korozí na vinutí, při průtoku proudu při měření
- Změnou objemu, kdy se zvětšují rozměry nosiče s rostoucí vlhkostí
- Prokluz tenzometru (vlhkost se dostane mezi tenzometr a povrch součásti)

K zabránění vlivu vlhkosti při měření není možné použít kompenzační tenzometr. Je proto nutno tenzometry proti vlhkosti chránit různými izolačními nátěry. Tyto nátěry musí mít malý deformační odpor, aby nanesená vrstva různým způsobem neovlivňovala měření. Různé druhy laků a nátěrů je možné ve většině případů pořídit při koupi tenzometrů přímo od daného výrobce. [6] [18]

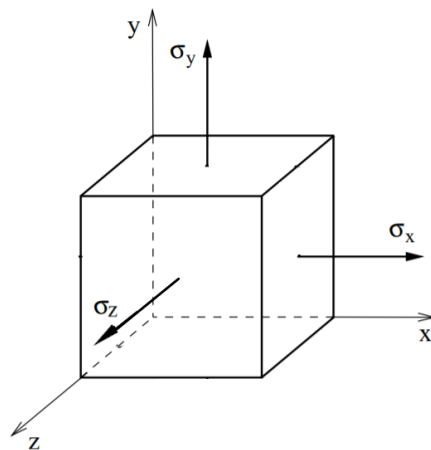
### 5.3 Vliv tlaku

Vliv tlaku se projeví při měření v prostředí se zvýšeným tlakem. Tento tlak na přilepený tenzometr působí ze všech stran (např. na vnitřní stěně tlakové nádoby). Tudíž se jedná o napjatost všestranného tlaku kde

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = -p \quad (25)$$

a také

$$\varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon_z = \varepsilon \quad (26)$$



Obrázek 36 - Napjatost všestranného tlaku, zdroj [6]

Z rozšířeného Hookova zákona se dostane

$$\varepsilon = \frac{1}{E} [\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)] = \frac{-p}{E} (1 - 2\mu) \quad (27)$$

O tuto hodnotu je nutné korigovat poměrné deformace. Při měření lze tento vliv pozorovat na tlakových nádobách s aktivním tenzometrem v prostředí vysokých tlaků. Tento vliv lze samozřejmě vyloučit použitím kompenzačního tenzometru. [6]

#### 5.4 Vliv radioaktivního záření

Radioaktivní záření výrazně ovlivňuje životnost tenzometrů. Převážně lepidla. Ve velké míře samozřejmě závisí na jeho intenzitě. Existuje několik druhů radioaktivního záření –  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  a neutronové záření. Působením záření dochází k ovlivňování organických podložek tenzometrů a lepidel. Použití tenzometrů v poli radiačního záření může být pouze krátkodobé.

Je tedy zřejmé, že pro měření s tenzometry za těchto podmínek je nutno počítat se speciálními druhy tenzometrů a metod jejich aplikace. K významným změnám izolačního odporu dochází v blízkosti letovaných vývodů. Proto jsou vhodnější tenzometry s navařovanými vývody. Třeba keramické materiály jsou dobře odolné proti radioaktivnímu záření. [6] [18]

#### 5.5 Vliv cyklického zatížení

Pro použití tenzometrů v tomto případě je nutné vzít v úvahu:

##### 1) Počáteční posunutí nuly

Toto je nutno brát v potaz při měření amplitudy deformace. Nikoliv při měření deformace odpovídající předpětí. Posunutí nuly ale po určitém počtu cyklů začne narůstat. Tento nárůst závisí na amplitudě deformace. Tento jev ne možno pozorovat na osciloskopu, kdy dochází k postupnému zvětšování amplitudy deformací a tvarovému zkreslení průběhu. Tento jev se nazývá přecitlivění tenzometru.



## 2) Únavovou životnost vinutí tenzometrů

- únavová životnost klesá s rostoucí amplitudou měřené deformace

Dále je nutné brát v potaz konečnou rychlost šíření rozruchu. Ta je příčinou fázového a amplitudového zkreslení tenzometru. To se vyskytuje při měření velmi rychlých změn nebo rázových namáhání.

Deformační vlna se šíří v součásti rychlostí zvuku. Při velmi rychlých změnách deformace, působí ve vinutí mřížky po celé délce rozdílná deformace. K tomu dochází v případě, kdy je délka vlny řádově stejná jako délka měřicí mřížky. Odporový tenzometr je schopen nezkresleně sledovat pouze vysoké frekvence a to se zvyšující se klesající délkou vinutí. Proto se doporučuje používat tenzometry s kratší bází. [6]

## 5.6 Vliv magnetického pole

Při tenzometrickém měření působením magnetického pole dochází k:

- Magnetostrickci materiálu měřicí mřížky použitého tenzometru
- Magnetostrickci zkoušeného tělesa, na kterém jsou tenzometry nalepeny
- Magnetorezistivitě materiálu měřicí mřížky u použitého tenzometru
- Vzniku elektrického napětí v tenzometru a jeho přívodech v důsledku proměnného magnetického pole

Vystavením působení magnetického pole na feromagnetický materiál dochází ke geometrickým změnám daného materiálu. Tento jev se nazývá magnetostricke. V důsledku tohoto jevu může být ovlivněn i samotný tenzometr. Pokud se jedná o změny hodnot elektrického odporu vlivem působením magnetického pole, dochází k jevu, který je označován jako magnetorezistence. Tuto vlastnost má většina feromagnetických materiálů. V dnešní době jsou tenzometry vyráběny většinou ze slitiny Cu-Ni, proto jsou tenzometry na tento jev málo citlivé.

Magnetické (proměnné) pole indukuje v mřížce tenzometru a jeho přívodech elektrické napětí. Toto napětí je považováno jako napětí, které přímo souvisí s měřenou veličinou a způsobuje zkreslení. K zamezení těchto vlivů se používá např. stínění měřicího obvodu nebo neinduktivní snímače. Samozřejmě je nutné zaručit také dostatečné stínění u přívodní kabeláže, protože tento jev jí ovlivňuje také. [18]

## 6 Praktická část

Praktická část zahrnuje reálný experiment měření napětí zatížené součásti pomocí tenzometrů. Pro zatěžování byly vybrány dva potrubní díly typu koleno a ohyb shodném DN65. Ohyb byl ze žárovevního materiálu P91 (X10CrMoVNb91) s rozměry výchozí trubky 76,1x4,5mm a poloměrem ohybu 4D (dále jako ohyb 4D) - tedy  $R=260\text{mm}$ . Koleno bylo z blíže nspecifikovaného uhlíkového materiálu, pravděpodobně z 11 375 (dle ČSN) s rozměrem kolena 76x3,1 ve středním vlákně (zároveň jde o rozměr výchozí trubky k výrobě kolena) a poloměrem ohybu 1,5D – tedy  $R=97,5\text{mm}$  (dále jako koleno 1,5D). Oba dva potrubní díly byly namáhány na ohyb a krut.

### 6.1 Příprava experimentu

Před samotným experimentem bylo nutné udělat spoustu přípravných prací. Od přípravy samotných součástí přivařením opěr, přivařením kolena na obě trubková ramena, přes MKP výpočet až po zarezervování zkušebny a domluvení potřebných pracovníků. Příprava na experiment z toho důvodu trvala několik měsíců.

#### 6.1.1 Příprava součástí

Pro uskutečnění experimentu bylo potřeba najít vhodné koleno, které by se co nejvíce rozměrově podobalo námi experimentu podrobenému ohybu. Z tohoto důvodu bylo vybráno koleno DN65 s vnějším průměrem 76 mm. Na obrázku níže je možné vidět čtyři kolena, z kterých se vybíralo.



Obrázek 37 – Kolena s vnějším průměrem 58 mm, 76 mm, 87 mm, 106 mm

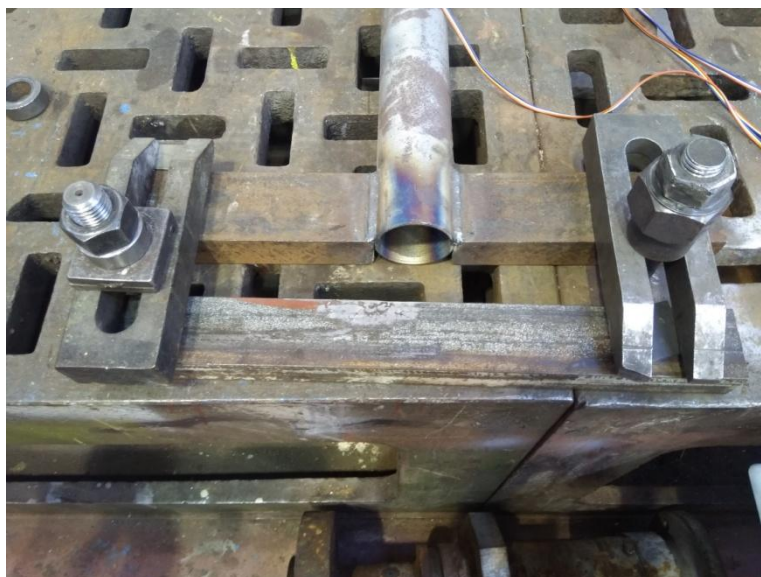
Po vybrání vhodného kolene bylo potřeba vymyslet, jakým způsobem by se docílilo zatěžování jako u ohybu. Nejjednodušší způsob realizace bylo tedy přivaření ocelových

ramen ke kolenu. Jako nejvhodnější řešení se jevílo použití trubky s vnějším průměrem 76 mm (viz obrázek 38). Opět se dbalo na to, aby délka přivařených ramen byla blízká ramenům ohybu.



*Obrázek 38 – Trubka s vnějším průměrem 76 mm*

Následně bylo nutné vymyslet způsob uchycení daných součástí. K tomu posloužily dva krátké ocelové U profily, které byly přivařeny na konec kratších ramen. Na obrázku 39 jsou vidět právě tyto U profily už přivařené a způsob uchycení při experimentu.

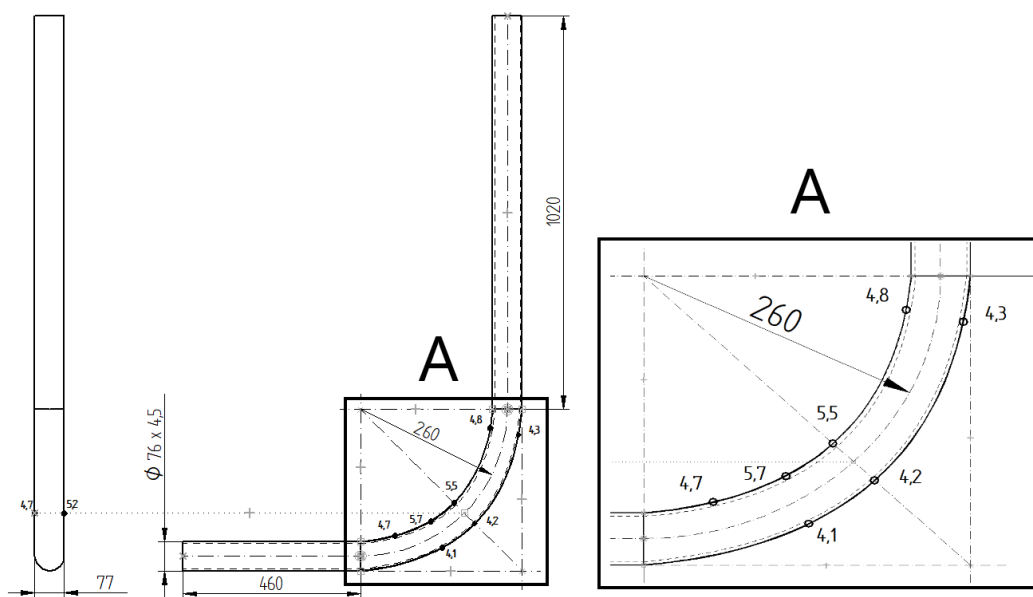


*Obrázek 39 – Způsob uchycení zatěžované součásti v průběhu experimentu*

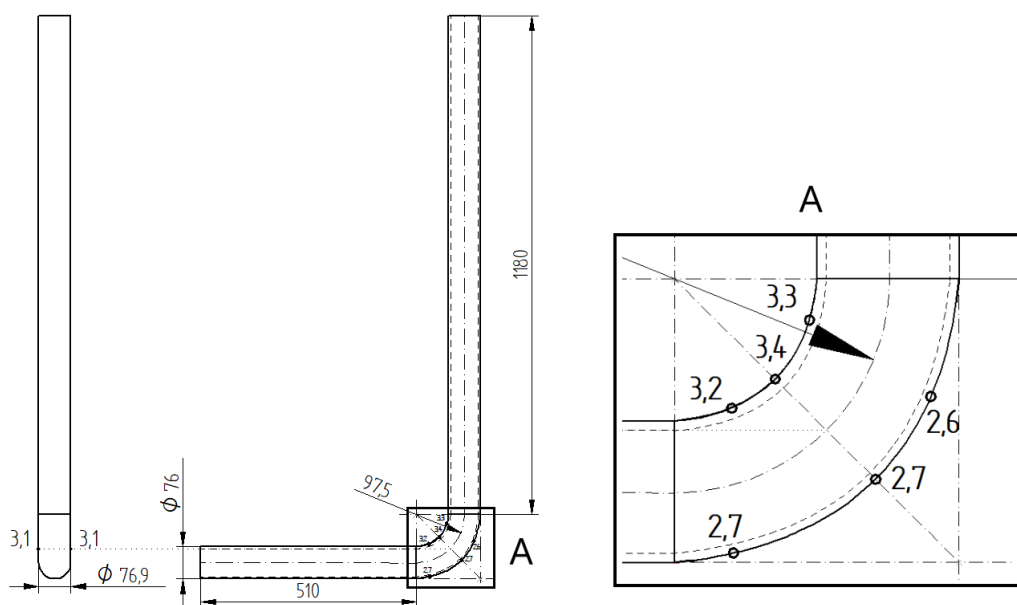
### 6.1.2 Měření skutečných rozměrů součástí

Pro přesnější výsledky a vyhodnocení bylo potřeba změřit přesné rozměry zatěžujících součástí. Obzvláště tloušťky stěn v místě ohybu obou součástí. Vlivem výroby totiž dochází k zeslabení tloušťky stěny na vnějším vlákně a k napěchování na vnitřním vlákně. Na neutrálním vlákně bývá tloušťka stěny přibližně stejná, jako u výchozího polotovaru (trubky).

Tloušťka stěn byla měřena ultrazvukem s přesností  $\pm 0,1$  mm. Skutečné rozměry pro ohyb 4D a koleno 1,5D jsou vyobrazené na obrázku 40 a 41. Tečky v místech ohybu a jejich hodnoty na obrázcích znamenají místo měření a tloušťku stěny v daném místě.



Obrázek 40- OHYB 4D – skutečné rozměry



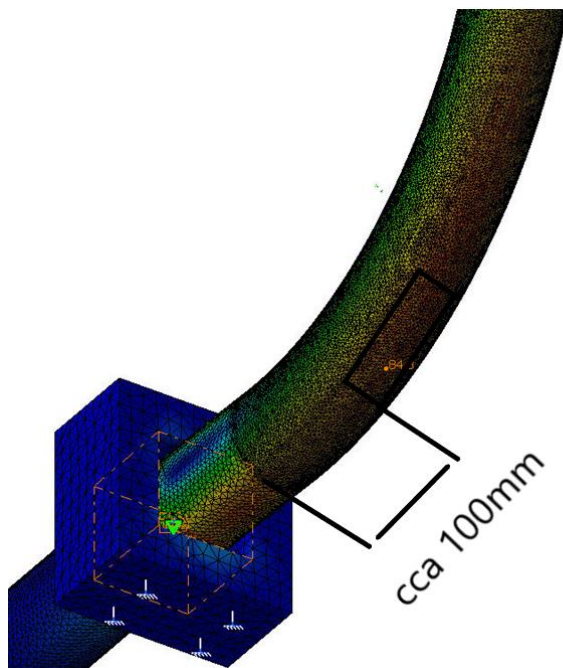
Obrázek 41 – KOLENO 1,5D – skutečné rozměry

### 6.1.3 Místa pro nalepení tenzometrů

Místa pro nalepení tenzometrů byla vybrána na základě MKP výpočtu z kapitoly 2. Byly vybrány takové oblasti, kde byl předpoklad pro dosažení největšího jednoosého napětí při zatěžování.

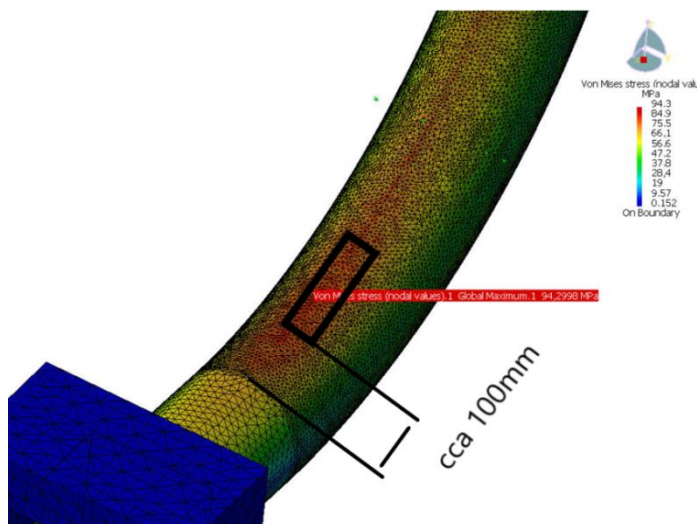
#### **OHYB 4D**

- nalepit cca 100mm od začátku ohybu na spodní povrch – očekávané tlakové napětí



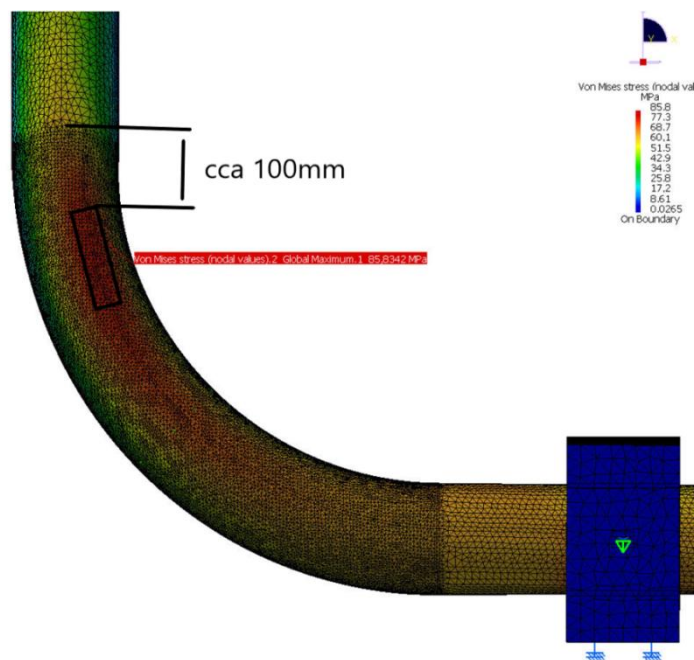
Obrázek 42 – OHYB 4D – místa pro nalepení tenzometru – ze spodu

- nalepit cca 100 mm od začátku ohybu na horní povrch – očekávané tahové napětí



Obrázek 43 - OHYB 4D – místa pro nalepení tenzometru – ze shora

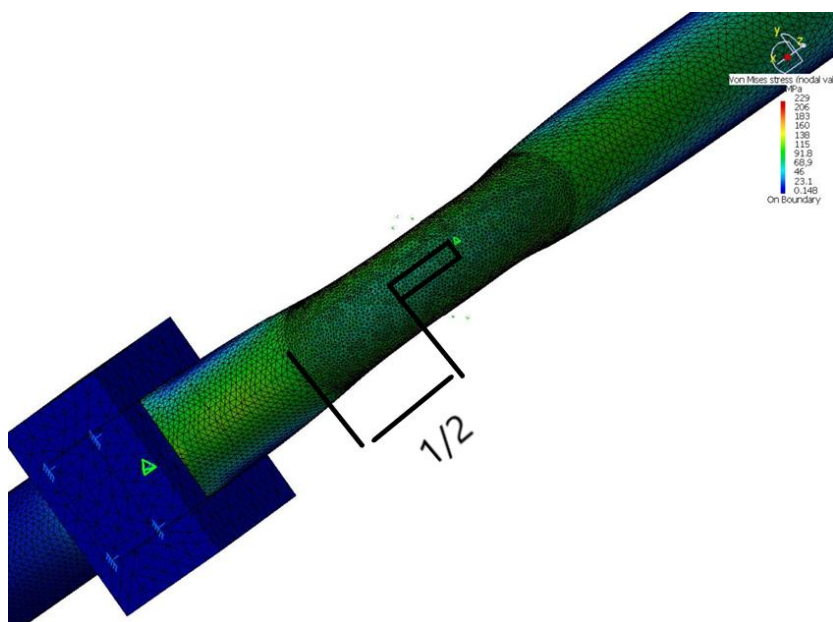
- nalepit cca 100 mm od konce ohybu na boční povrch – očekávané shodné tlakové a tahové namáhání



Obrázek 44 – OHYB 4D – místa pro nalepení tenzometru – z boku

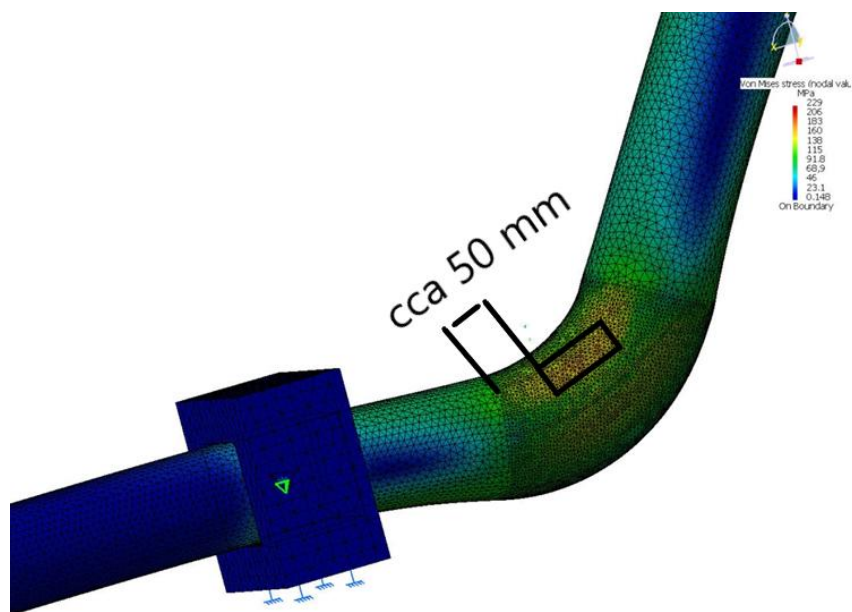
### KOLENO 1,5D

- nalepit přibližně do 1/2 od začátku ohybu na spodní povrch – očekávané tlakové napětí



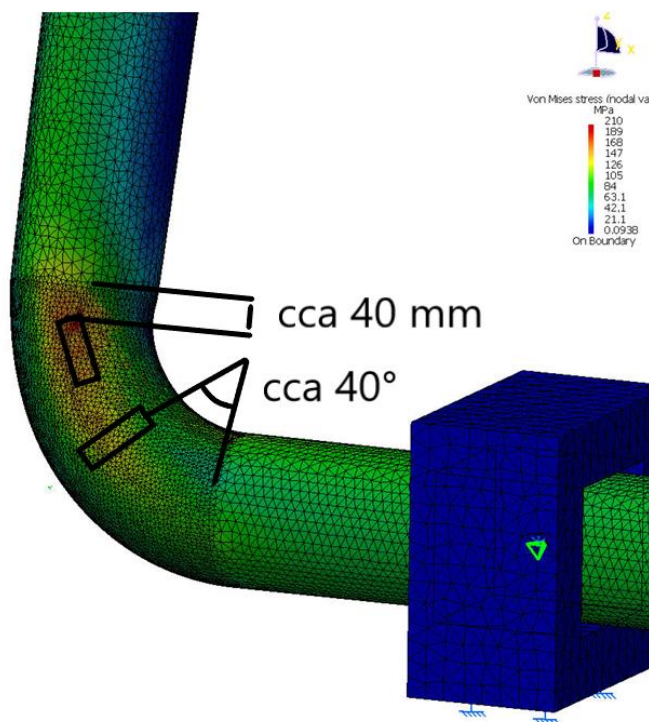
Obrázek 45 – KOLENO 1,5D – místa pro nalepení tenzometru – ze spodu

- nalepit přibližně 50 mm od začátku ohybu na horní povrchce – očekávané tahové napětí



Obrázek 46 - KOLENO 1,5D – místa pro nalepení tenzometru – ze shora

- nalepit jeden tenzometr napříč přibližně 40° od začátku ohybu a druhý cca 40 mm od konce ohybu na boční povrchce



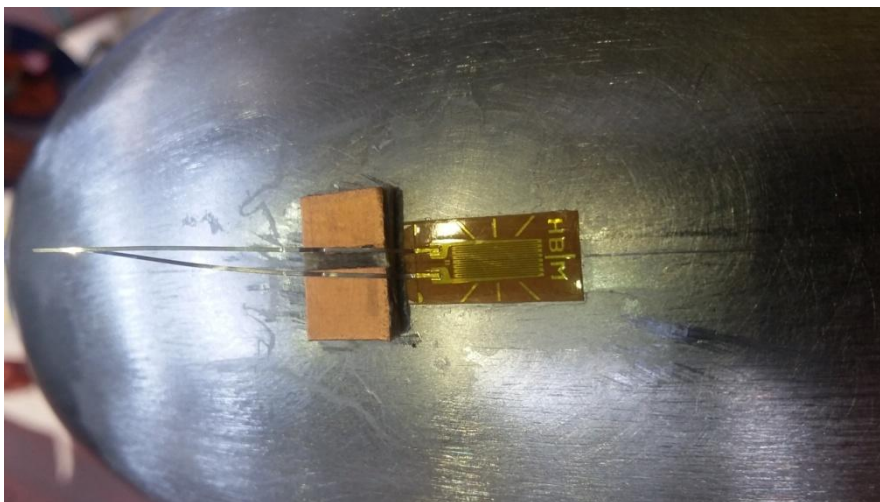
Obrázek 47 - KOLENO 1,5D – místa pro nalepení tenzometru – z boku

#### 6.1.4 Lepení tenzometrů

Pro přesné umístění tenzometrů na námi zvolené pozice bylo potřeba si dané místo orýsovat. K orýsování byla použita ocelová jehla a potřebné měřicí pomůcky. Orýsování bylo provedeno jako dvě na sebe kolmé čáry. Dále před nalepením tenzometrů bylo potřeba plochu dokonale očistit a odmastit. U hladkého kolena bylo potřeba povrch trochu zdrsnit a to smirkovým plátnem o zrnitosti 400. Zdrsnění povrchu se provádělo z důvodu lepšího přilnutí tenzometru, lepidla a povrchu kolene. U ohybu nebylo zdrsnění povrchu nutné.

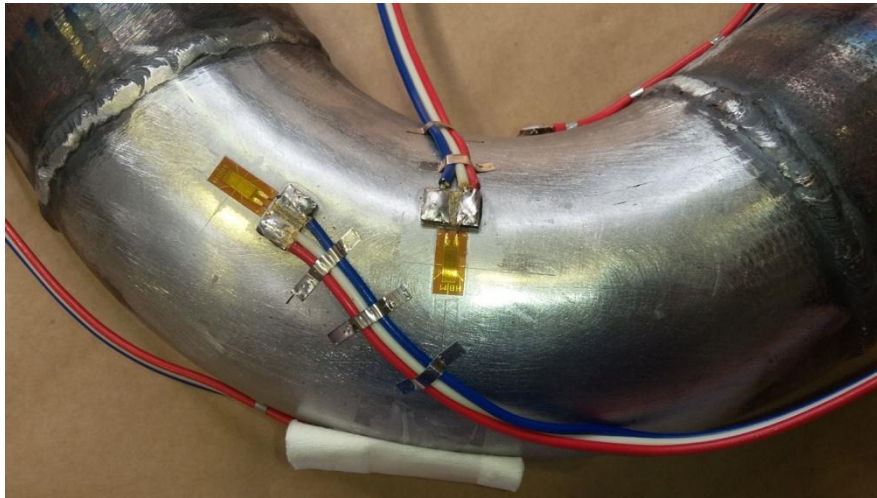
Použité tenzometry byly dodány firmou HBM v plastové fólii. Tenzometry bylo nutné jeden po jednom vyjmout z fólie pinzetou tak, aby nedošlo ke kontaktu s jejich spodní plochou a následně byly položeny na chemicky očištěné sklo. Když byly všechny vyndané z fólie a umístěné na skle, chytli se za vývody a přibližně do poloviny byly přelepeny průhlednou páskou. Následně byla páska i s tenzometrem odtržena od skla a nalepena na povrch součásti. K přesnému nalepení posloužilo předchozí orýsování. Páska se z jedné strany odtrhla a pod tenzometr bylo nanášeno patřičné množství lepidla. Následně byla páska s tenzometrem znovu přilepena k povrchu součásti a palcem se tlačilo na tenzometr po dobu asi jedné minuty. Po této době bylo ještě nutné přilepit k tenzometrům svorkovnice, které slouží jako spojovací element mezi vývody tenzometrů a měřící aparaturou. Tento postup byl aplikován u všech tenzometrů.

Výrobce byla udávána doba tvrdnutí lepidla přibližně jeden týden. Po této době byla ze všech tenzometrů sejmuta průhledná páska a vývody tenzometrů přiletovány ke svornicím. Následně z druhé strany byly ke svornicím přiletovány vodiče k propojení s měřící aparaturou. Ke každému tenzometru vedli tři vodiče z měřící aparatury. Každý soubor těchto vodičů byl svázan k sobě a připevněn k součásti pomocí tenkých plíšků. Důvod by takový, aby se zamezilo vytržení vodičů ze svornic při manipulaci se součástí.



Obrázek 48 – Lepení tenzometrů – nalepený tenzometr (detail)





Obrázek 49 - Lepení tenzometrů - konečný výsledek

<b>Dehnungsmeßstreifen</b> <b>Strain Gauges</b> <b>Jauges d'extensométrie</b>		Typ <b>6/120LY11</b> US-Type		OH4B KOLENO 4/2019	
Stückzahl Quantity	10	mit with	<input type="checkbox"/>	ohne without	<input checked="" type="checkbox"/> Applikationshilfe Application aid
Widerstand Resistance	120 [Ω]	+	0.35 [%]	Temperaturkoeffizient des k-Faktors	
		-	0.35 [%]	Temperature coefficient of gauge factor	104 ± 10 [10 <sup>-6</sup> /°C]
k-Faktor Gauge factor	2,08 ± 1			Coefficient de température du facteur k	(-10 ... +45 °C)
Querempfindlichkeit Transverse Sensitivity				Artikel Nr. Part No.	1-LY11-6/120
				Folienlos Lot	A297/21
				Herstellungslos Batch	834763/03
				Alle technischen Daten nach OIML IR 62, bei Beachtung der abweichenden Toleranzangaben auch nach VDI/VDE 2635. Geben Sie bei Rückfragen bitte DMS-Typ und Herstellungs-Los an. All technical data in accordance with OIML IR 62, also compliant with VDI/VDE 2635 if deviating tolerances are observed. In case of further inquiries please indicate gauge type and batch number. Toutes caractéristiques techniques selon OIML IR 62 et VDI/VDE 2635 pour les indications différentes de tolérance. Pour toutes questions, indiquer le type de la jauge ainsi que le lot de fabrication.	
				Temperaturkompensation: Angepaßt für Temperature Compensation: Compensated for Compensation de température: Compensation pour	
				$\alpha = 10.8 [10^{-6}/^{\circ}\text{C}]$	
<input checked="" type="checkbox"/>	Stahl Steel Acier	<input type="checkbox"/>	Alumi- nium	<input type="checkbox"/>	Sonstige Other Autre

Obrázek 50 - Tenzometr - charakteristika

## 6.2 Průběh experimentu

Příprava experimentu trvala dlouho, ale experiment jako takový v řádech desítek minut. První se zatěžoval ohyb 4D na ohyb a následně na krut. Poté se součást vyměnila za koleno 1,5D a proces zopakoval.

Součásti byly k úchytoým kostkám (dále jen kostky) přichyceny na kratším rameni pomocí distančních vidliček a utaženy šrouby (viz obrázek 39). U zatěžování na krut bylo potřeba ještě u začátku ohybu součásti zabezpečit součást proti posunu. Na delším (zatěžovaném) rameni bylo namotáno tažné lano (déle jen lano). Na konci lana bylo očko, ke kterému byl připojen snímač síly. Na druhém konci snímače byla karabina, která sloužila jako spojovací prvek s ocelovým napínákem. Napínák v tomto případě sloužil jako prostředek ke generování potřebné síly. Na konci kostek byla uchycena ocelová traverza s přivařeným očkem. K tomu očku byl následně přichycen ocelový napínák s pravolevým závitem a zatěžovací obvod byl kompletní.

Jako snímače povrchové deformace byly použity tenzometry. Tři na ohybu 4D a čtyři na kolenu 1,5D. Tenzometry byly pomocí drátů připojeny 1/4 můstkem do snímače signálu, který v tomto případě zároveň zastupoval i funkci zesilovače signálu. Jednalo se o snímač výrobce Dewetron. Do tohoto snímače byl zároveň veden také signál od snímače síly, který byl ještě před vstupem zesílen zesilovačem CLIP AE301. Výstupní signál snímače byl veden do počítače, kde docházelo k vyhodnocení dat v programu DEWEsoft 7.



Obrázek 51 – Průběh experimentu – sestava kompletního zapojení (zatěžování na krut)

## 6.2.1 Použité komponenty

### Snímač síly

Jako snímač síly byl použit snímač od výrobce HBM, typ U9C, nominální kapacity 10 kN. Tento snímač je konstruován pro měření tahové i tlakové síly. Je použitelný pro statické i dynamické aplikace. Snímač je svařen z nerezové oceli, což ho činí velice odolným. [19]



Obrázek 52 - Snímač síly - HBM U9C, zdroj [19]

### Měřicí zesilovač

Měřicí zesilovač byl použit opět od výrobce HBM. Jednalo se o tzv. CLIP typu AE301. Tento zesilovač je určen pro tenzometrické mosty  $\pm 0,2 \dots 10$  mV/V s nosnou frekvencí 600 Hz. Třída 0,1, napěťový výstup  $\pm 10$ V, napájení +15...26VDC, frekvenční rozsah 0...10Hz [20].



Obrázek 53 – Měřicí zesilovač – HBM AE301, zdroj [20]

## Snímač signálů

Univerzální snímač signálů s 8 analogovými vstupy a s 8 čítačovými vstupy. Výrobce toho snímače byl Dewetron a typ výrobku DEWE 43 A. Obsahuje 24-bitový A/D převodník s anti aliasing filtry pro lepší přesnost. Čítače jsou fázově synchronizovány s analogovými vstupy. Lze využít zapojení do plného můstku, polovičního nebo čtvrtinového. [21]



Obrázek 54 – DEWE 43 A, zdroj [21]

## 6.3 Vyhodnocení experimentu

### 6.3.1 Výsledky tenzometrického měření (deformace)

Experiment se skládal ze čtyř částí zatěžování. Každá součást (ohyb 4D a koleno 1,5D) byla zatěžována dvakrát, a to na krut a ohyb. Bylo použito celkově sedm tenzometrů. Tři tenzometry na ohyb 4D a čtyři na koleno 1,5D. U součásti ohyb 4D byly tenzometry nalepeny na nejkratší povrchu (tenzometr číslo 2), nejdelší povrchu (tenzometr číslo 1) a na neutrální povrchu (tenzometr číslo 3). U součásti koleno 1,5D to bylo podobné ale s tím, že jeden tenzometr byl nalepen napříč. Na nejdelší povrchce byl tenzometr číslo 4, na nejkratší tenzometr číslo 5, napříč byl tenzometr číslo 6 a na neutrální povrchce tenzometr číslo 7. Tenzometry byly takto očíslované pro lepší orientaci při experimentu. Tyto čísla byly následně použity pro identifikaci jednotlivých tenzometrů v tabulkách naměřených hodnot níže. Z technických důvodů nebylo možné využít hodnoty naměřené tenzometrem číslo 6. Z tohoto důvodu je tento tenzometr z dalších operací vypuštěn.

Protože místo zatěžování v experimentu nebylo shodné s místem zatěžování u modelu MKP (u MKP to bylo úplně na konci ramene a u experimentu asi 50 mm od konce ramene), bylo nutné provést přepočít přes rovnost momentů, jak velká síla odpovídá momentu od síly na konci ramene v MKP modelu. Jednoduchou rovnicí byla zjištěna hodnota něco málo přes 1,05 kN, proto pro další výpočty je počítáno se silou 1,1 kN.

V tabulkách níže jsou zpracované hodnoty naměřené pomocí tenzometrů. Zatěžující síla je tam zpracována od hodnoty 0,05 kN, a následně po kroku 0,05 kN až do hodnoty 1,1 kN. Ke každé hodnotě zatěžující síly přísluší deformace jednotlivého tenzometru, která je zaznamenána v  $\mu\text{m}/\text{m}$ . Soubory s tabulkami všech naměřených hodnot jsou přiloženy k práci v elektronické podobě ve formátu .xls na přiloženém CD.

### 6.3.2 Přepočítání deformace na napětí

Přepočítání výsledků naměřených tenzometry na výsledné napětí byl docílen pomocí Hookova zákona. Software, který zpracovával data v počítači, už rovnou operoval s koeficientem citlivosti tenzometru  $k$ . Tím byl přepočítání poměrného prodloužení na napětí usnadněn. Poměrné prodloužení naměřené tenzometry v  $\mu\text{m}/\text{m}$  bylo vynásobeno hodnotou  $10^{-6}$ . Tím se docílilo bezrozměrného poměrného prodloužení potřebného pro výpočet napětí. Modul pružnosti v tahu byl pro obě dvě součásti stejný a to 200 000 MPa. Následně stačilo jen dosadit do vzorce. Výpočet byl vyhotoven pouze pro maximální hodnoty poměrného prodloužení.

Níže je vyobrazen postup výpočtu u součásti ohyb 4D, namáhaný na ohyb a hodnota je brána z tenzometru číslo 2 (nejkratší površka).

Maximální hodnota  $\varepsilon = 382,7127 \mu\text{m}/\text{m}$ .

$$\varepsilon = 382,7127 * 10^{-6} [-] \quad (28)$$

Použití Hookova zákona

$$\sigma = E * \varepsilon \quad (29)$$

Dosazení do rovnice (29)

$$\sigma = 200\,000 * 382,7127 * 10^{-6} \quad (30)$$

Výsledek rovnice (30)

$$\sigma = 76,5 \text{ MPa} \quad (31)$$

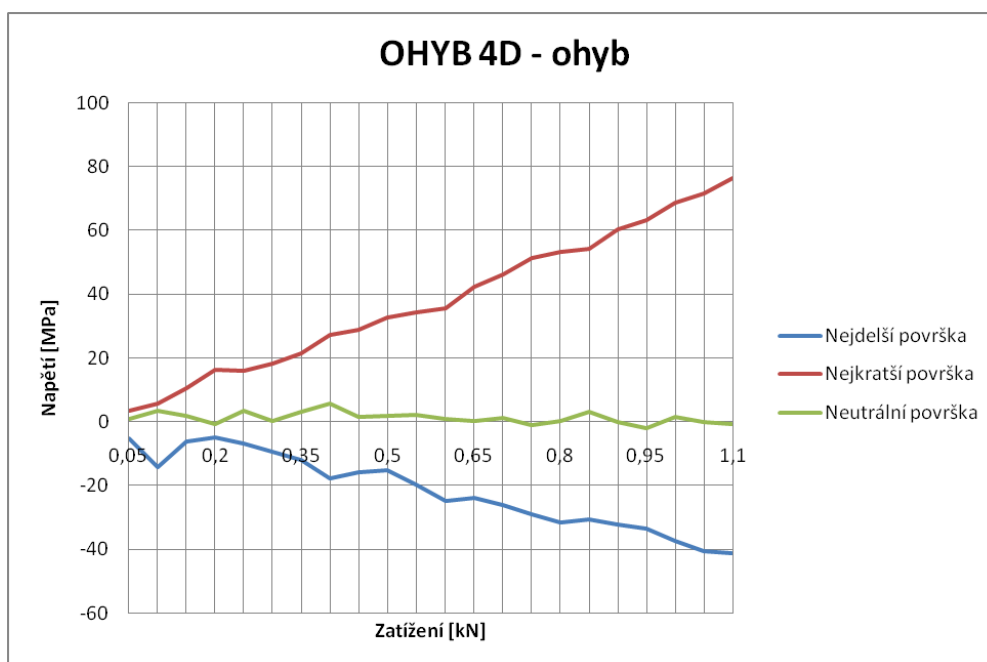
Stejným způsobem byly spočítány i hodnoty pro ostatní tenzometry. Výsledek je zobrazen v tabulce níže.

### 6.3.3 Výsledky přepočítání deformace na napětí

Naměřené a přepočtené hodnoty po jednotlivých krocích jsou zobrazeny v tabulkách níže. Záporná hodnota u napětí představuje tlakové namáhání a kladná tahové. Pod každou tabulkou je znázorněn graf závislosti napětí na zatížení. Z grafů lze lehce poznat, jak každá součást reagovala na dané namáhání.

	Ohyb 4D - ohyb								
	Deformace			Deformace			Napětí		
	4	5	7	4	5	7	4	5	7
F [kN]	[ $\mu\text{m/m}$ ]	[ $\mu\text{m/m}$ ]	[ $\mu\text{m/m}$ ]	[-]	[-]	[-]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
0,05	-26,1398	17,56549	4,540044	-2,6E-05	1,76E-05	4,54E-06	-5,22797	3,513098	0,908009
0,1	-71,6228	28,75282	17,92816	-7,2E-05	2,88E-05	1,79E-05	-14,3246	5,750564	3,585631
0,15	-30,9999	53,60338	9,216707	-3,1E-05	5,36E-05	9,22E-06	-6,19998	10,72068	1,843341
0,2	-25,0395	82,12192	-3,62122	-2,5E-05	8,21E-05	-3,6E-06	-5,00789	16,42438	-0,72424
0,25	-35,4015	80,56301	16,82777	-3,5E-05	8,06E-05	1,68E-05	-7,0803	16,1126	3,365553
0,3	-47,4141	91,56695	1,513959	-4,7E-05	9,16E-05	1,51E-06	-9,48282	18,31339	0,302792
0,35	-60,8939	107,2476	16,36927	-6,1E-05	0,000107	1,64E-05	-12,1788	21,44951	3,273854
0,4	-89,7793	137,325	28,2902	-9E-05	0,000137	2,83E-05	-17,9559	27,465	5,658039
0,45	-79,1421	144,3858	8,391418	-7,9E-05	0,000144	8,39E-06	-15,8284	28,87717	1,678284
0,5	-76,2994	163,1842	8,849916	-7,6E-05	0,000163	8,85E-06	-15,2599	32,63684	1,769983
0,55	-98,0322	171,8957	10,22541	-9,8E-05	0,000172	1,02E-05	-19,6064	34,37914	2,045081
0,6	-124,992	178,4063	4,998541	-0,00012	0,000178	5E-06	-24,9984	35,68127	0,999708
0,65	-119,765	212,4268	0,78036	-0,00012	0,000212	7,8E-07	-23,953	42,48537	0,156072
0,7	-131,411	230,8584	5,548729	-0,00013	0,000231	5,55E-06	-26,2822	46,17169	1,109746
0,75	-144,799	256,9928	-5,1801	-0,00014	0,000257	-5,2E-06	-28,9598	51,39855	-1,03602
0,8	-158,004	266,8046	1,972456	-0,00016	0,000267	1,97E-06	-31,6007	53,36092	0,394491
0,85	-152,777	271,3896	16,00248	-0,00015	0,000271	1,6E-05	-30,5554	54,27792	3,200495
0,9	-161,121	302,1089	-0,13663	-0,00016	0,000302	-1,4E-07	-32,2243	60,42178	-0,02733
0,95	-167,357	316,414	-9,67337	-0,00017	0,000316	-9,7E-06	-33,4714	63,2828	-1,93467
1	-187,256	344,474	8,391418	-0,00019	0,000344	8,39E-06	-37,4512	68,89481	1,678284
1,05	-202,386	358,8709	0,413568	-0,0002	0,000359	4,14E-07	-40,4772	71,77417	0,082714
1,1	-206,054	382,7127	-2,70422	-0,00021	0,000383	-2,7E-06	-41,2108	76,54254	-0,54084

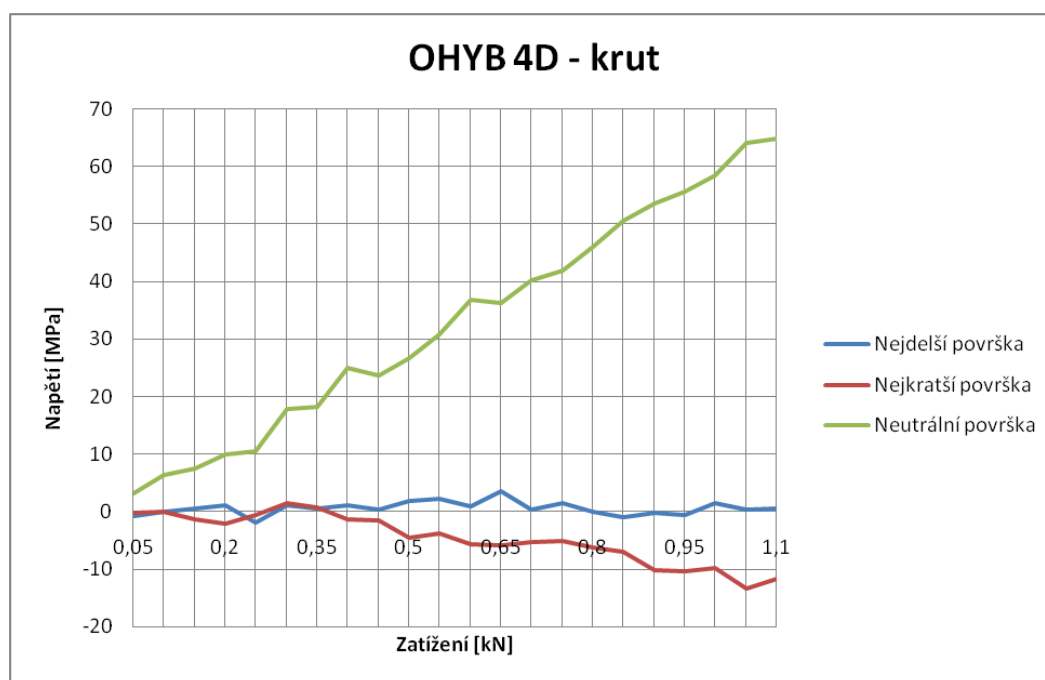
Tabulka 2 – Hodnoty pro OHYB 4D – ohyb



Graf 1 – OHYB 4D – krut – závislost napětí na zatížení

F [kN]	Ohyb 4D - krut								
	Deformace			Deformace			Napětí		
	4	5	7	4	5	7	4	5	7
	[ $\mu\text{m/m}$ ]	[ $\mu\text{m/m}$ ]	[ $\mu\text{m/m}$ ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
0,05	-3,71107	-0,75606	15,38855	-3,7E-06	-7,6E-07	1,54E-05	-0,74221	-0,15121	3,077711
0,1	0,048602	-0,02247	31,71104	4,86E-08	-2,2E-08	3,17E-05	0,00972	-0,00449	6,342209
0,15	2,707888	-6,71652	36,75451	2,71E-06	-6,7E-06	3,68E-05	0,541578	-1,3433	7,350903
0,2	5,367173	-10,843	49,40904	5,37E-06	-1,1E-05	4,94E-05	1,073435	-2,1686	9,881808
0,25	-9,48814	-3,14025	52,16003	-9,5E-06	-3,1E-06	5,22E-05	-1,89763	-0,62805	10,43201
0,3	5,642267	7,40519	88,93151	5,64E-06	7,41E-06	8,89E-05	1,128453	1,481038	17,7863
0,35	2,341088	3,828917	91,13229	2,34E-06	3,83E-06	9,11E-05	0,468218	0,765783	18,22646
0,4	5,092072	-6,53314	124,6943	5,09E-06	-6,5E-06	0,000125	1,018414	-1,30663	24,93886
0,45	1,515792	-7,81693	118,4587	1,52E-06	-7,8E-06	0,000118	0,303158	-1,56339	23,69175
0,5	9,035152	-22,2138	133,5891	9,04E-06	-2,2E-05	0,000134	1,80703	-4,44275	26,71783
0,55	11,41934	-18,9126	153,8547	1,14E-05	-1,9E-05	0,000154	2,283867	-3,78251	30,77094
0,6	4,266776	-28,541	183,8404	4,27E-06	-2,9E-05	0,000184	0,853355	-5,7082	36,76809
0,65	17,6549	-28,8161	181,3646	1,77E-05	-2,9E-05	0,000181	3,53098	-5,76322	36,27291
0,7	1,699195	-26,5236	201,2633	1,7E-06	-2,7E-05	0,000201	0,339839	-5,30472	40,25267
0,75	6,926061	-24,9647	209,3329	6,93E-06	-2,5E-05	0,000209	1,385212	-4,99295	41,86658
0,8	0,1403	-31,1086	230,4238	1,4E-07	-3,1E-05	0,00023	0,02806	-6,22172	46,08475
0,85	-4,44467	-34,96	252,8901	-4,4E-06	-3,5E-05	0,000253	-0,88893	-6,99199	50,57803
0,9	-0,96009	-51,0991	267,562	-9,6E-07	-5,1E-05	0,000268	-0,19202	-10,2198	53,51241
0,95	-2,97748	-51,5576	278,1992	-3E-06	-5,2E-05	0,000278	-0,5955	-10,3115	55,63984
1	7,201162	-48,6232	291,8624	7,2E-06	-4,9E-05	0,000292	1,440232	-9,72464	58,37248
1,05	1,699195	-66,688	320,1058	1,7E-06	-6,7E-05	0,00032	0,339839	-13,3376	64,02117
1,1	2,524492	-58,7101	324,324	2,52E-06	-5,9E-05	0,000324	0,504898	-11,742	64,8648

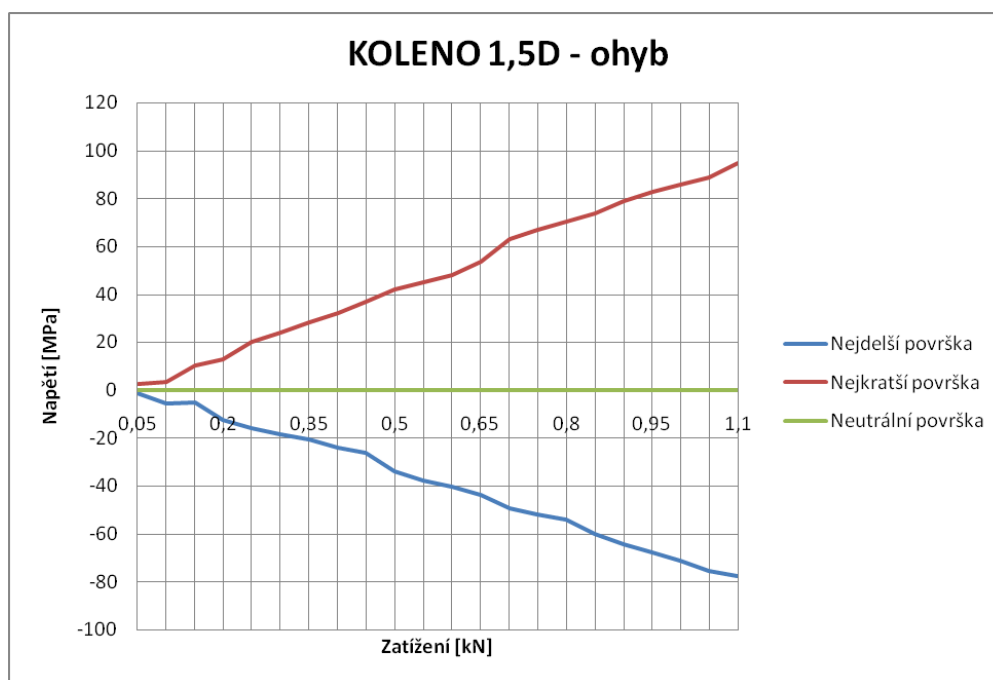
Tabulka 3 - Hodnoty pro OHYB 4D - krut



Graf 2 - OHYB 4D – krut – závislost napětí na zatížení

	Koleno 1,5D - ohyb								
	Deformace			Deformace			Napětí		
	4	5	7	4	5	7	4	5	7
F [kN]	[ $\mu\text{m/m}$ ]	[ $\mu\text{m/m}$ ]	[ $\mu\text{m/m}$ ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
0,05	-7,54914	12,62015	-11,2891	-7,5E-06	1,26E-05	-1,1E-05	-1,50983	2,52403	-2,25782
0,1	-30,0155	17,84703	-21,8346	-3E-05	1,78E-05	-2,2E-05	-6,0031	3,569406	-4,36691
0,15	-27,5396	51,77583	-18,9002	-2,8E-05	5,18E-05	-1,9E-05	-5,50793	10,35517	-3,78003
0,2	-63,0273	63,14653	4,024696	-6,3E-05	6,31E-05	4,02E-06	-12,6055	12,62931	0,804939
0,25	-79,3498	100,1931	1,090302	-7,9E-05	0,0001	1,09E-06	-15,87	20,03862	0,21806
0,3	-94,0217	120,7338	0,631805	-9,4E-05	0,000121	6,32E-07	-18,8043	24,14675	0,126361
0,35	-104,292	140,4492	-5,78716	-0,0001	0,00014	-5,8E-06	-20,8584	28,08983	-1,15743
0,4	-121,348	159,8895	8,609669	-0,00012	0,00016	8,61E-06	-24,2696	31,97789	1,721934
0,45	-132,26	184,0981	21,81438	-0,00013	0,000184	2,18E-05	-26,4521	36,81963	4,362877
0,5	-169,766	210,2325	9,893456	-0,00017	0,00021	9,89E-06	-33,9531	42,04649	1,978691
0,55	-188,747	224,3542	14,93693	-0,00019	0,000224	1,49E-05	-37,7495	44,87083	2,987385
0,6	-201,86	239,3929	19,43021	-0,0002	0,000239	1,94E-05	-40,3721	47,87858	3,886041
0,65	-220,108	267,3612	15,48713	-0,00022	0,000267	1,55E-05	-44,0217	53,47224	3,097425
0,7	-247,985	313,7611	-3,86146	-0,00025	0,000314	-3,9E-06	-49,597	62,75222	-0,77229
0,75	-260,64	332,8347	20,0721	-0,00026	0,000333	2,01E-05	-52,1279	66,56693	4,01442
0,8	-271,644	350,3492	24,19858	-0,00027	0,00035	2,42E-05	-54,3287	70,06984	4,839715
0,85	-300,437	367,7721	14,29503	-0,0003	0,000368	1,43E-05	-60,0874	73,55443	2,859006
0,9	-321,987	394,8235	25,39067	-0,00032	0,000395	2,54E-05	-64,3973	78,96469	5,078134
0,95	-339,226	412,338	21,63099	-0,00034	0,000412	2,16E-05	-67,8452	82,46761	4,326198
1	-355,732	428,0186	26,58277	-0,00036	0,000428	2,66E-05	-71,1464	85,60372	5,316553
1,05	-378,198	442,3238	25,39067	-0,00038	0,000442	2,54E-05	-75,6397	88,46476	5,078134
1,1	-388,927	473,0432	33,18512	-0,00039	0,000473	3,32E-05	-77,7854	94,60863	6,637025

Tabulka 4 – Hodnoty pro KOLENO 1,5D – ohyb

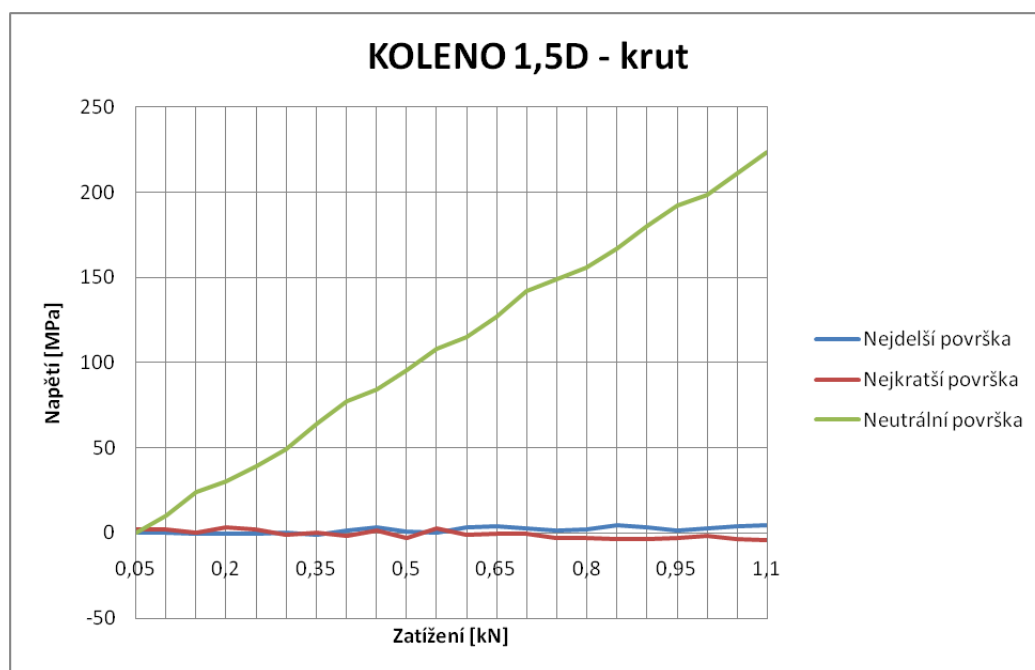


Graf 3 – KOLENO 1,5D – ohyb – závislost napětí na zatížení



F [kN]	Koleno 1,5D - krut								
	Deformace			Deformace			Napětí		
	4	5	7	4	5	7	4	5	7
	[ $\mu\text{m/m}$ ]	[ $\mu\text{m/m}$ ]	[ $\mu\text{m/m}$ ]	[-]	[-]	[-]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
0,05	0,972012	10,12685	0,403032	9,72E-07	1,01E-05	4,03E-07	0,194402	2,025369	0,080606
0,1	3,081116	10,95214	50,37923	3,08E-06	1,1E-05	5,04E-05	0,616223	2,190427	10,07585
0,15	0,60522	0,131583	119,0621	6,05E-07	1,32E-07	0,000119	0,121044	0,026317	23,81242
0,2	-2,32915	16,17899	152,349	-2,3E-06	1,62E-05	0,000152	-0,46583	3,235798	30,4698
0,25	0,421838	10,67702	196,6399	4,22E-07	1,07E-05	0,000197	0,084368	2,135404	39,32797
0,3	3,356203	-4,26998	245,2406	3,36E-06	-4,3E-06	0,000245	0,671241	-0,854	49,04811
0,35	-3,88805	1,59878	321,4428	-3,9E-06	1,6E-06	0,000321	-0,77761	0,319756	64,28856
0,4	7,390974	-9,31345	386,2743	7,39E-06	-9,3E-06	0,000386	1,478195	-1,86269	77,25486
0,45	17,93642	5,908665	419,928	1,79E-05	5,91E-06	0,00042	3,587285	1,181733	83,9856
0,5	4,089816	-13,8984	478,1572	4,09E-06	-1,4E-05	0,000478	0,817963	-2,77968	95,63143
0,55	0,972012	14,52841	539,5041	9,72E-07	1,45E-05	0,00054	0,194402	2,905682	107,9008
0,6	16,28583	-6,28738	575,6337	1,63E-05	-6,3E-06	0,000576	3,257166	-1,25748	115,1267
0,65	21,9712	-2,80278	636,0636	2,2E-05	-2,8E-06	0,000636	4,394239	-0,56056	127,2127
0,7	15,46054	-1,42729	709,0564	1,55E-05	-1,4E-06	0,000709	3,092109	-0,28546	141,8113
0,75	9,224963	-14,632	745,8279	9,22E-06	-1,5E-05	0,000746	1,844993	-2,9264	149,1656
0,8	12,06765	-13,8984	780,1235	1,21E-05	-1,4E-05	0,00078	2,41353	-2,77968	156,0247
0,85	23,80518	-17,4747	837,1605	2,38E-05	-1,7E-05	0,000837	4,761037	-3,49494	167,4321
0,9	16,19413	-17,1079	900,7083	1,62E-05	-1,7E-05	0,000901	3,238825	-3,42158	180,1417
0,95	8,583083	-15,9158	960,0378	8,58E-06	-1,6E-05	0,00096	1,716617	-3,18316	192,0076
1	15,27713	-8,30475	993,0496	1,53E-05	-8,3E-06	0,000993	3,055426	-1,66095	198,6099
1,05	21,3293	-17,1996	1055,955	2,13E-05	-1,7E-05	0,001056	4,26586	-3,43992	211,1911
1,1	23,16329	-21,1427	1118,311	2,32E-05	-2,1E-05	0,001118	4,632658	-4,22853	223,6622

Tabulka 5 - Hodnoty pro KOLENO 1,5D - krut



Graf 4 – KOLENO 1,5D – krut – závislost napětí na zatížení

### **6.3.3 Zhodnocení tenzometrického měření**

Z grafů a tabulky maximálních hodnot napětí lze vypočítat, že koleno a ohyb reaguje na stejná namáhání podobně. Při namáhání na ohyb je u obou součástí patrné, že tahové napětí na nejkratší povrchce je větší, než tlakové napětí na nejdelší povrchce. Neutrální povrchka se vesměs pohybuje kolem nulové hodnoty u obou případů. Při namáhání na krut velkou roli hraje neutrální povrchka, která je namáhána několikanásobně více než nejdelší a nejkratší povrchka. U kolena 1,5D je toto napětí patrnější a výrazně větší než u ohybu 4D.

## 7 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo porovnání výsledků hodnot deformací a napětí, naměřených na skutečných potrubních dílech, s výsledky kontrolních výpočtů. Pro tuto práci bylo nutné provést nejprve teoretickou přípravu, po které následovala fyzická příprava experimentu. Zázemí pro uskutečnění tenzometrického měření poskytla firma Škoda JS, a. s. Fyzická příprava zahrnovala lepení tenzometrů na součásti, přípravu měřicí aparatury apod. Po fyzické přípravě následoval samotný experiment, při kterém byly naměřeny deformace pomocí tenzometrů. Experiment byl proveden pro ohyb 4D z materiálu P91 a koleno 1,5D z uhlíkaté oceli. Obě součásti byly namáhány na ohyb a krut. Ve finální fázi bylo nutné provést vyhodnocení celého experimentu, přepočtení deformací na napětí a porovnání získaných výsledků. Dále byly provedeny výpočty v SW Catia v řešiči Abaqus a v SW AutoPIPE. Výsledky experimentu byly na závěr porovnávány s výsledky výpočtů.

Při porovnávání výsledků byl patrný rozdíl mezi naměřenými a spočítanými výsledky. Zjištěný rozdíl mezi naměřeným a spočítaným napětím metodou MKP je způsobený tím, že na nejdelší a nejkratší povrchu ohybu a kolena byl nalepen jen jeden tenzometr v podélném směru - na základě předpokladu, že půjde především o jednoosou napjatost. Zatímco metoda MKP zohledňuje i další napjatosti metodou redukovaných napětí. Výsledky výpočtů z SW AutoPIPE se zejména v případě kolena 1,5 D výrazně liší (jsou vyšší až o 30%). Odlišnost je způsobena samotnou podstatou výpočtů v SW AutoPIPE. Výpočet v řešiči Abaqus je založen na metodě konečných prvků, zatímco SW AutoPIPE využívá nosníkové prvky, pro které v případě tvarovek (ohyby, T-kusy apod.) ve výpočtu figuruje tzv. součinitel koncentrace napětí (Stress Intensification Factor – *SIF* nebo *i*). *SIF* vyjadřuje poměr efektivního napětí v tvarovce od vnějšího zatížení ke jmenovitému napětí v tvarovce se stejným průřezovým modulem určeným trubkou se stejnými rozměry. *SIF* je stanoven na základě geometrických parametrů prvku (ohybu, kolena apod.), viz např. ASME B 31.3. Hodnota *SIF* se zmenšujícím se poloměrem ohybu roste. Při řešení zadané úlohy byl *SIF* pro ohyb 4D  $i_{4D} = 1,38$ , pro koleno 1,5D  $i_{1,5D} = 1,98$ . Tato hodnota je příčinou konzervatismu výsledků vypočtených v SW AutoPIPE.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Katedra Mechaniky. *Biomechanika*. [Online] [Citace: 22. 5 2019.]  
<https://www.kme.zcu.cz/kmet/bio/mechnapeti.php>.
- [2] Katedra Mechaniky. *Pružnost a Pevnost I*. [Online] [Citace: 22. 5 2019.]  
<https://www.kme.zcu.cz/kmet/pp/>.
- [3] Katedra Mechaniky. *Pružnost a pevnost pro elektrotechniku*. [Online] [Citace: 22. 5 2019.] [https://www.kme.zcu.cz/kmet/ppe/teorie/11\\_zp.pdf](https://www.kme.zcu.cz/kmet/ppe/teorie/11_zp.pdf).
- [4] **MOL, P.** *Konstrukce upínacích čelistí pro tahovou zkoušku tkanin*. Zlín : Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2013.
- [5] **LIČKOVÁ, D.** *Přednáška cvičení k předmětu Vlastnosti a zkoušení materiálu na VŠB*. 2016.
- [6] **KLEMENT, J., PLÁNIČKA, F. a VLK, M.** *Modelová podobnost, elektrická odporová tenzometrie, experimentální určování zbytkových napětí, vyhodnocení experimentálně získaných dat*. Plzeň : Západočeská univerzita v Plzni, 2004.
- [7] Bacula.nti.tul.cz. [Online] [Citace: 22. 5 2019.]  
[https://bacula.nti.tul.cz/~petr.sidlof/vyuka/LA1/Materialy%20k%20prednaskam%20\(cesky\)/5\\_lekce\\_TenzRuzice\\_071104\\_AnP.pdf](https://bacula.nti.tul.cz/~petr.sidlof/vyuka/LA1/Materialy%20k%20prednaskam%20(cesky)/5_lekce_TenzRuzice_071104_AnP.pdf).
- [8] *Technická dokumentace ŠKODA JS a.s.*
- [9] **LAŠOVÁ, V.** *Metoda konečných prvků ve výpočtech obráběcích strojů*. Plzeň : Západočeská univerzita v Plzni, 2011.
- [10] Bentley. [Online] [Citace: 21. 5 2019.] <https://www.bentley.com/cs/products/product-line/pipe-stress-and-vessel-analysis-software/autopipe>.
- [11] **KRYSTEK, J.** *Přednáška z předmětu Experimentální mechanika na ZČU*. 2018.
- [12] **JURÁNEK, M.** *Přednáška na VŠB*. 2006.
- [13] **VOJÁČEK, A.** *automatizace.hw.cz. Odporové tenzometry - princip, provedení, použití, historie*. [Online] 19. březen 2017. [Citace: 22. říjen 2018.]  
<https://automatizace.hw.cz/foliove-odporove-tenzometry-princip-provedeni-pouziti-historie.html>.
- [14] **ZEHNULA, K.** *Snímače neelektrických veličin*. Praha : SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1983.
- [15] **KUSALA, J.** *Polovodiče - fyzikální základy*. CEZ.cz. [Online] 2003. [Citace: 6. listopad 2018.] <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/elektrina/fyz9.htm>.

[16] **CEDIVODOVÁ, M.** *Vlastnosti odporového tenzometru - experimentální ověření.*  
Praha : ČVUT v Praze, 2015.

[17] **ŠOFER, M.** *Přednáška z předmětu Experimentální metody v mechanice na VŠB.* 2016.

[18] **VLK, M., a další.** *Experimentální mechanika.* BRNO : VUT v Brně, 2003.

[19] HBM. [Online] [Citace: 15. 5 2019.] <https://www.hbm.cz/produkty/snimace-sily/u9c/>.

[20] HBM. [Online] [Citace: 15. 5 2019.] <https://www.hbm.cz/produkty/zsilovace-pro-prumyslove-pouziti/clip-ae101-ae301-ae501/>.

[21] DEWESOFT. [Online] [Citace: 15. 5 2019.] <https://dewesoft.com/products/daq-systems/dewe-43>.