



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav konstruování a částí strojů

Návrh senzoru pro in-time monitorování parametrů jádrového vrtání

Design of a sensor for in-time monitoring of the core drilling parameters

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2018

Bc. Michael Dvořák

Studijní program: N2301 STROJNÍ INŽENÝRSTVÍ

Studijní obor: 2301T047 Dopravní letadlová a transportní technika

Vedoucí práce: Ing. Martin Dub, Ph.D.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem: „Návrh senzoru pro in-time monitorování parametrů jádrového vrtání“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Martina Duba, Ph.D., s použitím literatury uvedené na konci mé diplomové práce v seznamu použité literatury.

V Praze dne 28. června 2018

.....

Bc. Michael Dvořák

Poděkování:

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Martinu Dubovi, Ph.D., za cenné rady, připomínky a ochotu, kterou projevoval po celou dobu vzniku této práce. Dále bych rád poděkoval své rodině, která mě během celé doby mého studia podporovala.

Anotační list

Jméno autora: Bc. Michael Dvořák
Název DP: Návrh senzoru pro in-time monitorování parametrů jádrového vrtání
Anglický název: Design of a sensor for in-time monitoring of the core drilling parameters
Studijní program: N2301 STROJNÍ INŽENÝRSTVÍ
Obor studia: 2301T047 Dopravní letadlová a transportní technika
Ústav: Ústav konstruování a částí strojů
Vedoucí DP: Ing. Martin Dub, Ph.D.
Bibliografické údaje: počet stránek 75
počet obrázků 87
počet tabulek 15
počet příloh 1

Klíčová slova: jádrové vrtání, tenzometrie, krouticí moment, ochranné pouzdro
Key words: core drilling, strain gauge, torque, protective case

Anotace: Diplomová práce se zabývá návrhem senzoru pro in-time jádrového vrtání. Práce obsahuje rešerši z oblasti tenzometrie a jádrového vrtání. Je podrobně popsána konstrukce senzoru a ochranného pouzdra. V poslední řadě jsou provedena dvě měření na krut zkušebního vzorku různou měřicí aparaturou.

Abstract: The diploma thesis deals with Design of a sensor for in-time monitoring of the core drilling parameters. The diploma thesis includes research from the area of strain gauge and core drilling. It is described in more detail construction of sensor and protective case. In the last part of the thesis is performed two measurements to torsion of test sample differently measurement equipments.

Obsah

1	Úvod, cíle	1
1.1	Cíle	2
2	Přehled problematiky	4
2.1	Tenzometrie	4
2.1.1	Druhy tenzometrů a jejich vlastnosti	4
2.1.1.1	Mechanické tenzometry	4
2.1.1.2	Strunové tenzometry	5
2.1.1.3	Pneumatické tenzometry	5
2.1.1.4	Elektrické tenzometry	6
2.1.2	Odporové tenzometry	7
2.1.2.1	Funkce a zapojení odporových snímačů	7
2.1.2.2	Druhy odporových snímačů	11
2.1.2.3	Typy tenzometrů pro měření různých kombinací napjatostí	12
2.1.3	Polovodičové tenzometry	14
2.1.4	Indukčnostní tenzometry	16
2.1.5	Kapacitní tenzometry	17
2.2	Přípravy před měřením tenzometry	18
2.2.1	Instalace tenzometrů	18
2.2.2	Zapojování tenzometrů pro krouticí moment	21
2.3	Jádrové vrtání	23
2.3.1	Typy vrtů	24
2.3.2	Vrtné soupravy	26
2.3.3	Nástroje pro jádrové vrtání	29
3	Návrh senzoru - konstrukce	32
3.1	Deformační člen senzoru	34
3.2	Ochranné pouzdro	35
3.3	Datalogger LPDR	36
3.4	Koncepční návrhy ochranného pouzdra	38
3.4.1	Koncepční návrh č.1	38

3.4.2	Koncepční návrh č.2	41
3.4.3	Vícekriteriální rozhodování	44
3.4.4	Vhodnější koncepční návrh	47
4	Experimentální zkoušení	53
4.1	1. Kalibrační měření	57
4.2	2. Kalibrační měření	62
4.3	MKP ověření měření	65
5	Závěr	66
6	Seznam použité literatury a zdrojů	67
7	Seznam obrázků a tabulek	69
8	Seznam použitých značek a symbolů	73
9	Seznam příloh	75

1 Úvod, cíle

Pojmem vrtání se označuje činnost, při které dochází k oddělování materiálu pomocí rotačního pohybu nástroje, vrtáku. Ten je na konci zakončen břitem pro snadné vnikání do materiálů.

Jádrové vrtání je dnes nedílnou součástí stavebních prací. Přednost této technologie je především v přesnosti vrtů do veškerých stavebních materiálů (beton, železobeton, kámen atd.). Lze vytvářet vrty od menších průměrů obvykle od 10-20 mm až po velké průměry, které se mohou pohybovat okolo 500 mm.

Neméně podstatnou úlohu tvoří v geologickém odvětví. Důležitým přínosem je zjištění složení a skladby navrtávaných hornin. Při vrtání hornin se dosahuje větších délek a průměrů vrtů než je tomu u stavebních činností. Samozřejmě tímto se také dosahuje daleko většího zatížení vrtného soustrojí. Z tohoto důvodu je důležité sledovat aktuální zatížení vrtání a následně upravovat parametry tak, aby nedocházelo k přetížení vrtné konstrukce a následným defektům.

Postupem času je snaha vše plně digitalizovat a zvyšovat tím efektivitu vrtání. Dochází k prolínání v oblastech měřících senzorů a prostředím vrtných prací. Snahou této modernizace je předcházet haváriím vrtných kolon a zvýšení bezpečnosti práce na vrtné soupravě.

1.1 Cíle

V této podkapitole jsou rozebrány hlavní body diplomové práce. Jsou zde vytyčeny hlavní cíle práce, které jsou řešeny v dalších kapitolách.

- **Vytvořit senzor pro měření aktuálního stavu krouticího momentu, přítlaku a otáček**

Cílem je vyvinout senzor (měřicí zařízení), který bude snímat parametry jádrového vrtání. Rozhodujícími faktory vrtného procesu jsou krouticí moment, otáčky a přítlak. Sledování těchto parametrů in-time (aktuálního stavu) mezi rotační hlavou a vrtným zařízením umožní optimalizovat technologii vrtání přímo během jeho provádění. Výsledkem je shromáždit reálná data pro efektivní plánování režimu vrtání v daných geologických podmínkách a tím i ekonomické ocenění vrtatelnosti hornin.

Na deformační člen senzoru budou nainstalovány tenzometry pro měření aktuálního krouticího momentu, přítlaku a Hallova sonda na měření otáček při vrtném procesu. Data budou přenášena a zpracovávána přes datalogger. Ten bude naměřené hodnoty přenášet in-time do snímacího zařízení například tabletu, kde se budou zobrazovat aktuální parametry již výše zmiňovaných veličin.

- **Vytvořit ochranné pouzdro**

Ochranné pouzdro musí být navrženo tak, aby nedocházelo k pronikání prachových částic či prosakům vody dovnitř k akumulátorům a dataloggeru. Datalogger je zařízení pro sběr a ukládání informací, které snímá napětí na tenzometrických mostech. Naměřená data jsou posílána bezdrátovým spojením do spuštěného softwaru v kterém se naměřená data vyhodnocují. Dále je podstatné umístit do pouzdra akumulátory, které během vrtání napájí datalogger. Hlavním požadavkem pouzdra je snadná přístupnost k akumulátorům a dataloggeru. Rozměry ochranného pouzdra jsou omezeny zástavbovým prostorem. (více viz kap. 3)

- **Provést ověřovací měření na prototypu senzoru**

Poslední částí této práce bude provedení ověřovacího měření na prototypu deformačního členu senzoru. Měření bude probíhat v laboratoři na testovacím standu. Měřenou veličinou bude krouticí moment při různých zátěžích. Po získání dat je nutné vypočítat a zavést kalibrační konstantu z důvodu optimalizace mezi analytickým výpočtem a reálným měření (více podrobností v kap. 4).

2 Přehled problematiky

2.1 Tenzometrie

Pojmem tenzometry lze označit veškeré snímače, které měří změny vzdálenosti dvou bodů těles. Lze je například rozlišovat podle fyzikálního principu přenosu a zvětšování měřené deformace.[1]

2.1.1 Druhy tenzometrů a jejich vlastnosti

2.1.1.1 Mechanické tenzometry

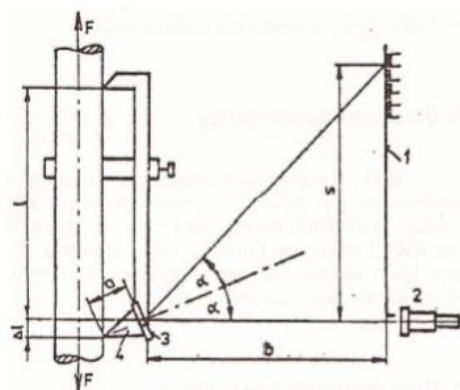
U mechanických tenzometrů dochází k přenosu měřené deformace pomocí břitů, hrotů nebo kuličkových dotyků. Jejich předností je jednoduchá obsluha a není zapotřebí připojení žádného dalšího přístroje. Praktickou výhodou těchto tenzometrů je lineární zvětšení deformace v celém rozsahu stupnice, jenž lze využít k měření velkých deformací tzn. měření i v plastických oblastech materiálu.[1]



Obr. 1: Huggenbergerův tenzometr [2]

Nejrozšířenějšími druhy jsou:

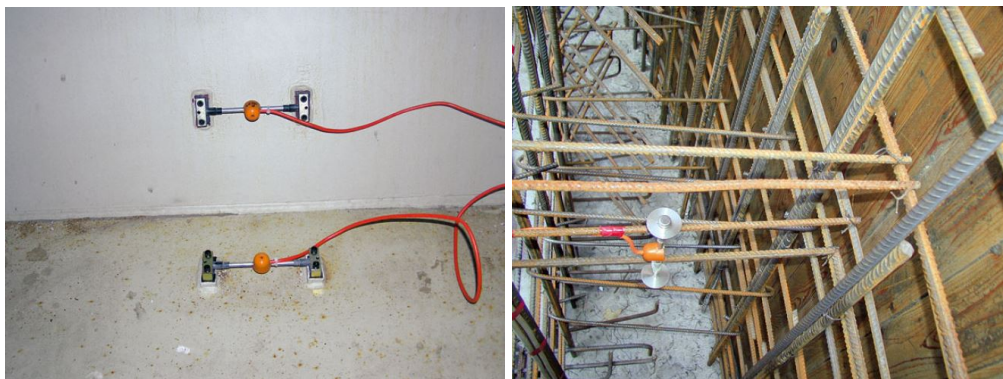
- a) **Huggenbergerův** - pracuje na principu pákového převodu viz obr. 1
- b) **Martensův** - deformace se měří na zrcátku, na kterém se zobrazuje vychýlení dvou břitů viz obr. 2
- c) **Johansonův** - využívá změny tahové síly, která vyvolává zkrucování tenkého kovového pásku [1]



Obr. 2: Schéma Martensova tenzometru [3]

2.1.1.2 Strunové tenzometry

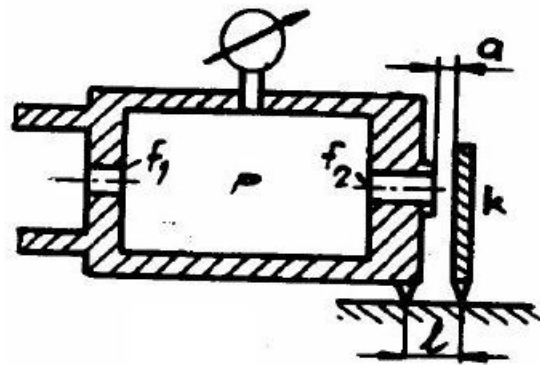
Princip je založen na kmitající struně, která mění svoji vlastní frekvenci podle velikosti deformace měřeného tělesa (obr. 3). Měřicí struna se elektromagneticky rozkmitá, poté se porovnává s cejchovní strunou, která se ladí napínacím šroubem. Využití zejména ve stavebnictví, nejvíce však při měření napjatosti přehradních hrází, kde lze měřit sedání (změny tvaru v příčném směru) nebo průhyb (měření ve svislém směru) hráze a jiné. [3]



Obr. 3: Strunové tenzometry [3]

2.1.1.3 Pneumatické tenzometry

Pneumatické tenzometry reagují na změny tlaku v závislosti na poloze klapky K (obr. 4). Potrubím se přivádí vzduch o známém tlaku do komory, kde je umístěn snímač. Vzduch postupně prochází vstupní tryskou o ploše f_1 a vychází výstupní tryskou o ploše f_2 . Tlak lze upravovat i pomocí vzdálenosti mezi výstupní tryskou a stěnou, která je umístěna před výstupní tryskou. Stěna je připevněna na pohyblivé hroty, kterými lze pohybovat. Zesílení signálu u Leirisova tenzometru se základnou $a = 2$ mm je až $1 : 200000$. [1]



Obr. 4: Pneumatický tenzometr [2]

2.1.1.4 Elektrické tenzometry

Jedná se o tenzometry, které měří elektrické změny snímače způsobené jeho deformací. Jednodušeji řečeno, chová se jako elektricko-mechanický převodník. Regulaci ovlivňují, jak magnetické změny pole, elektrické náboje nebo změny elektrického obvodu jako je elektrický odpor R , indukčnost L a kapacita C . Tenzometry se pojmenovávají podle toho, který parametr je ovlivňován.



Obr. 5: Tenzometrický snímač [4]

V dnešní době jsou nejvíce rozšířené kvůli jeho výhodám, kterými převyšují ostatní typy tenzometrů. Například možnost dálkového přenosu a následného odečítání měřených hodnot, měření ve velmi těžce dostupných místech nebo měření dynamických jevů. Elektrické tenzometry lze rozřadit do čtyř skupin.[1]

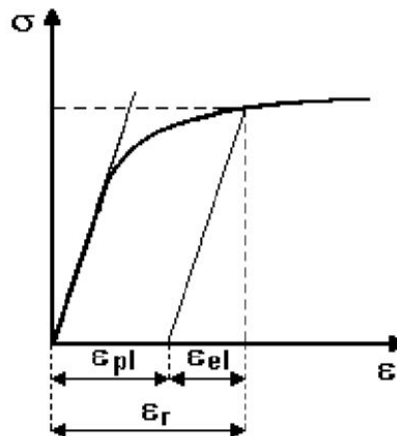
- a) **Odporové** - patří mezi nejrozšířenější, změna délky snímače způsobuje změnu ohmického odporu (podrobněji viz kap. 2.1.2)
- b) **Polovodičové** - princip založen na piezorezistentním jevu (podrobněji viz kap.2.1.3)
- c) **Indukčnostní** - změna délky snímače způsobuje změnu impedance cívky v které protéká proud (podrobněji viz kap.2.1.4)
- d) **Kapacitní** - změna délky snímače způsobuje změnu kapacity kondenzátoru (podrobněji viz kap.2.1.5) [1]

2.1.2 Odporové tenzometry

Základním prvkem je snímač nebo-li převodník, který mění mechanickou deformaci na ohmický odpor. Častým typem snímače bývá uhlíková vrstva, kovový drátek nebo pásek (drátkové, fóliové snímače) nebo slabá kovová vrstva nanesená na povrch. [1]

2.1.2.1 Funkce a zapojení odporových snímačů

Funkcí odporových snímačů je, že při změně délky namáhaného vodiče se mění jeho elektrický odpor R . Při natahování nebo naopak při stlačování v elastické oblasti ϵ_{el} platí Hookův zákon pružné deformace viz obr. 6. [5]



Obr. 6: Deformační křivka [5]

Hookův zákon popisuje mechanické napětí σ , které lze vyjádřit pomocí Youngova modulu pružnosti E a relativního prodloužení ϵ

$$\sigma = E \cdot \epsilon, \quad (1)$$

uvažuje-li se poměrná deformace

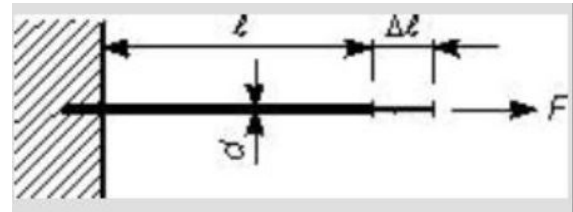
$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0}, \quad (2)$$

kde Δl je prodloužení vodiče a l_0 je původní délka vodiče.

Princip odporových tenzometrů lze snadno demonstrovat na jednoduchém příkladě viz obr. 7. Pro odpor vodiče platí

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (3)$$

kde ρ je měrný odpor, l délka odporového drátku a S průřez drátku. Působící síla F způsobí, že snímač se prodlouží (zkrátí) o Δl . Vlivem strukturálních změn se změní i měrný odpor ρ , průřez S . V důsledku těchto malých změn platí



Obr. 7: Princip tenzometru [6]

$$\delta R = \delta \rho \frac{l_0}{S} + \delta l \frac{\rho}{S} - \frac{\delta S}{S^2} \cdot \rho \cdot l \quad (4)$$

Pro poměrnou změnu $\frac{\delta R}{R}$ pak dosazením vztahů 1 do 4 lze vyjádřit

$$\frac{\delta R}{R} = \frac{\delta \rho}{\rho} + \frac{\delta l}{l_0} - \frac{\delta S}{S} \quad (5)$$

Následně pomocí Poissonova čísla μ platí

$$\frac{\delta S}{S} = -2\mu \frac{\delta l}{l_0} \quad (6)$$

Pro Poissonovo číslo μ je vyjádřeno

$$\mu = \frac{\psi}{\epsilon}, \quad (7)$$

kde ψ poměrná deformace v příčném směru a ϵ poměrná deformace v podélném směru.

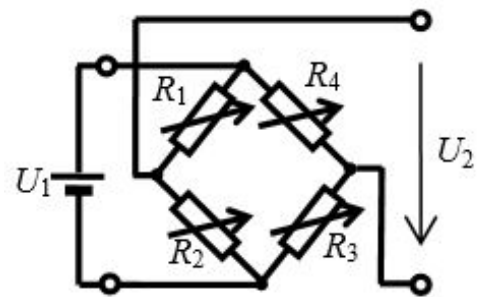
Relativní změnu odporu po dosazení 5 a 6 úpravě lze vyjádřit

$$\frac{\delta R}{R} = \epsilon \left(\frac{\delta \rho}{\rho} \cdot \frac{l}{\epsilon} + 1 + 2\mu \right) \quad (8)$$

Po úpravě (vztahu 8 v závorce) lze nahradit součinitelem deformační citlivosti k (k-faktorem), protože u pružného přetvoření je konstanta závislá na změně délky. Pro výsledný vztah platí [5]

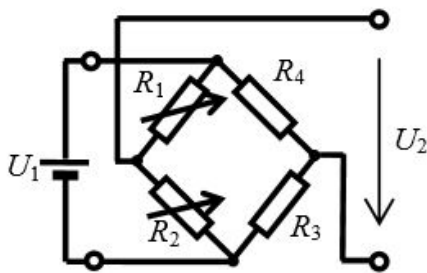
$$\frac{\Delta R}{R} = \epsilon \cdot k \quad (9)$$

Změna odporu tenzometrů je velmi malá, běžným ohmmetrem obtížně měřitelná. Z tohoto důvodu je nutné k vyhodnocování využívat tzv. **můstková zapojení**. V můstkovém zapojení se neměří absolutní velikost odporu, ale pouze její změna. Existuje několik typů zapojení, tím nejčastějším je tzv. Wheatstoneův můstek viz obr. 8. Dochází-li měřenou veličinou k ovlivňování všech odporů v můstku jedná se o tzv. plný (celý) můstek. Jsou-li ovlivňovány pouze dva odpory, jde o poloviční můstek (obr. 9). V případě ovlivnění pouze jedním odporem je můstek čtrtinový (obr. 10). [8]



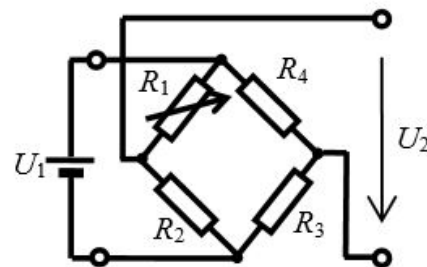
$$U_2 = U_1 \cdot \frac{\Delta R}{R}$$

Obr. 8: Wheatstoneův můstek [8]



$$U_2 = U_1 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta R}{R}$$

Obr. 9: Poloviční můstek [8]



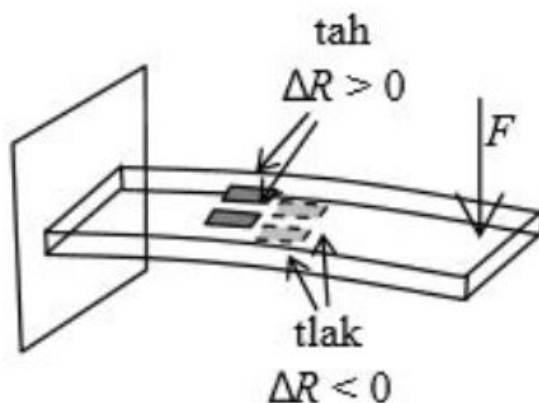
$$U_2 = U_1 \cdot \frac{1}{4} \cdot \frac{\Delta R}{R}$$

Obr. 10: Čtrtinový můstek [8]

Pro výstupní napětí v můstku U_2 platí, jsou-li odpory všechny stejné a při měření se od sebou budou nepatrně lišit řádově do 1%, pak lze psát [8]

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (10)$$

Ideálním případem je, když se všechny odpory v můstku mění v závislosti na měřené veličině, nejlépe tak, že odpor R_1 a R_3 se mění jedním směrem například roste a odpor R_2 a R_4 klesá. Při této modifikaci je citlivost můstku největší. Bohužel tento stav nenastává vždy, nejčastěji se s tímto případem lze setkat u ohybu nosníku, kde se horní plocha natahuje a dolní naopak stlačuje obr. 11 . Toho nelze využít například při měření teploty, kde odpor pouze roste.[8]



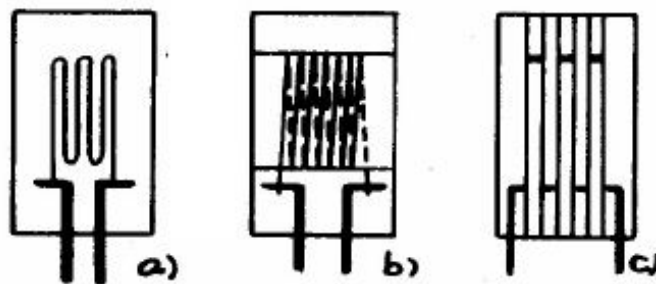
Obr. 11: Změny odporů při ohybu [8]

2.1.2.2 Druhy odporových snímačů

Drátkové snímače

Základním prvkem je tenký odporový drát (průměr od 0,01 - 0,03 mm) obvykle z konstantu, což je slitina mědi (60%) a niklu (40%). Vyniká dobrou linearitou mezi poměrným přetvořením a odporovou změnou. Podle uložení vinutí a způsobu zhotovení lze dělit na tyto typy (obr. 12)[1]

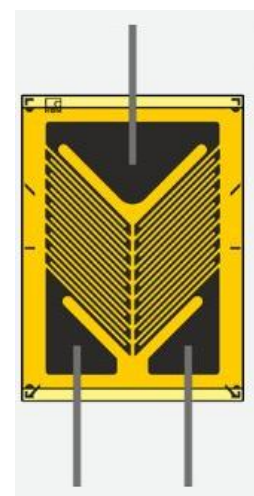
- a) Měrný drátek ve smyčkách
- b) Vinutý
- c) S mřížkovým vinutím



Obr. 12: Drátkové tenzometry [1]

Fóliové snímače

Postup výroby fotochemickým způsobem je obdobný jako při výrobě plošných spojů či integrovaných obvodů. Fólie jsou nejčastěji vyráběny opět z konstantanu nebo z chromniklu o tloušťce 12-15 μm (obr. 13). Je možné vytvářet tímto způsobem složitější měřicí mřížky. Výhodou oproti drátkovým snímačům je ten, že díky lepšímu odvodu tepla mohou být více elektricky zatěžovány. [1]



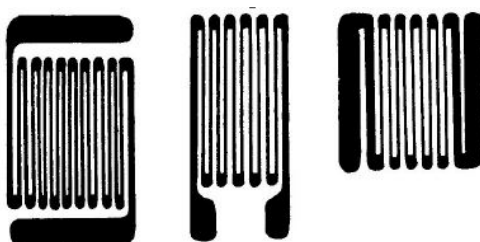
Obr. 13: Fóliový tenzometr [7]

2.1.2.3 Typy tenzometrů pro měření různých kombinací napjatostí

V současnosti existuje široký výběr odporových tenzometrů pro měření různých kombinací napjatostí, deformace a velikosti vlivu teploty. Volba tenzometrů je velmi důležitá z hlediska správnosti a spolehlivosti měření. Snímače použité na povrchu tělesa mohou měřit deformace pouze na tomto povrchu. Vyšetřuje se napjatost jednoosá, víceosá či prostorová, kde prostorový stav vzniká při působení na povrch plošné síly nejčastěji měrným tlakem. Typy jednotlivých odporových tenzometrů se dají rozdělit na jednotlivé kategorie. [1]

Pro jednoosou napjatost:

Napjatost je určena jedním hlavním napětím působící v hlavním směru. Je-li znám tento směr, pak k určení napětí σ stačí měřit deformaci v tomto směru jednoosým snímačem viz obr. 14 [1]



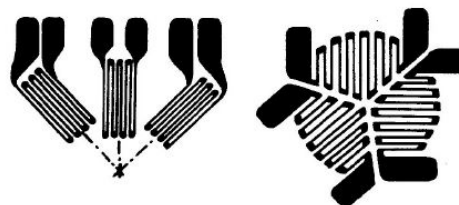
Obr. 14: Drátové tenzometry [1]

Pro rovinnou napjatost:

Napjatost je určena dvěma nenulovými a vzájemně kolmými hlavními napětími jedním hlavním směrem. Tento druh napjatosti lze měřit pomocí tenzometrického kříže viz obr. 15. Při neznalosti směrů hlavních napětí, musí se měřit deformace ve třech směrech k tomu se využívá tzv. tenzometrická růžice viz obr. 16 [1]



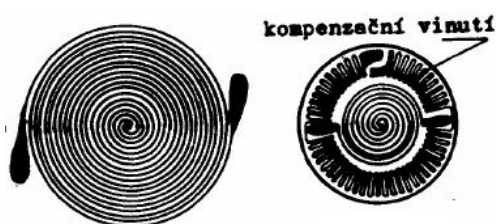
Obr. 15: Tenzometrický kříž [1]



Obr. 16: Tenzometrická růžice [1]

Pro měření na membránách:

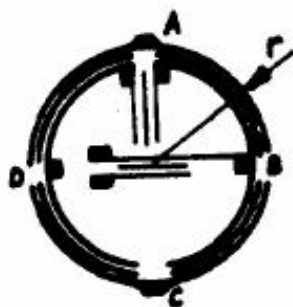
Po obvodě vetknuté kruhové desky, které vytváří membrány se nejčastěji využívá k měření malých a středních tlaků. Měření deformací se provádí pomocí tzv. membránových růžicí viz obr. 17 Optimální je využít fóliové snímače ve tvaru spirály s kompenzačním vnutím na okraji v oblasti tlakového namáhání. [1]



Obr. 17: Membránová růžice [1]

Pro měření smykových napětí:

Lze stanovit dle tenzometrické růžice viz výše. Snímače viz obr. 18 vhodné pro získávání signálu přímo úměrné smykovému napětí. [1]



Obr. 18: Smykový snímač [1]

2.1.3 Polovodičové tenzometry

Principem polovodičových tenzometrů je, že při změně elektrického proudu se deformuje monokrystal z křemíku nebo germania. Tento jev se nazývá **piezorezistentní jev**. Polovodiče dokáží měnit svoji vodivost ve velmi širokém rozsahu, což je jejich největší výhoda. Měrný odpor polovodiče při pokojové teplotě je větší než měrný odpor vodiče, ale zároveň je menší než měrný odpor izolantu.

Působí-li na polovodič napětí σ vyvozené vnějším zatížením, poté lze napsat

- a) změnu množství nositele
- b) změnu střední pohyblivosti, která je závislá na vlastnostech materiálů, koncentraci nositelů nebo orientaci směru napětí σ .

Piezorezistenci je možné popsat vztahem

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \pi_i\sigma, \quad (11)$$

kde π_i je piezorezistentní součinitel.

Je známa dvojí vodivost:

a) Vlastní

Je způsobena přivedenou energií, vzniká dvojice nosičů - díra, elektron

b) Příměsové

Vzniká přidáním jiných atomů. Tím se v atomu zvětší počet nosičů jednoho typu buď to elektronů nebo děr.

Je možné rozlišit dva typy polovodičů, jestliže se přidá do základního prvku tzv. akceptory (pro křemík je to například bor, galium ...) bude mít vodič děrovou příměsovou vodivost. Tento typ lze nazvat **polovodič typu P** (pozitivní nosič náboje). [1]

U druhého typu polovodiče se přidávají tzv. donory (například arzén, antimon ...), poté vzniká elektronová příměsová vodivost. Jedná se o **polovodič typu N** (negativní nosič náboje).

Srovnají-li se metalické a polovodičové tenzometry, lze je porovnat pomocí **k-faktoru**, který je dán vztahem viz vztah 12. U metalických tenzometrů je hodnota určena geometrickou změnou délky a průřezu měrného vinutí.

$$k = 2 \div 4$$

U polovodičových tenzometrů se hodnota určuje podle velikosti piezorezistentního součinitele. [1]

$$k = 45 \div 200$$

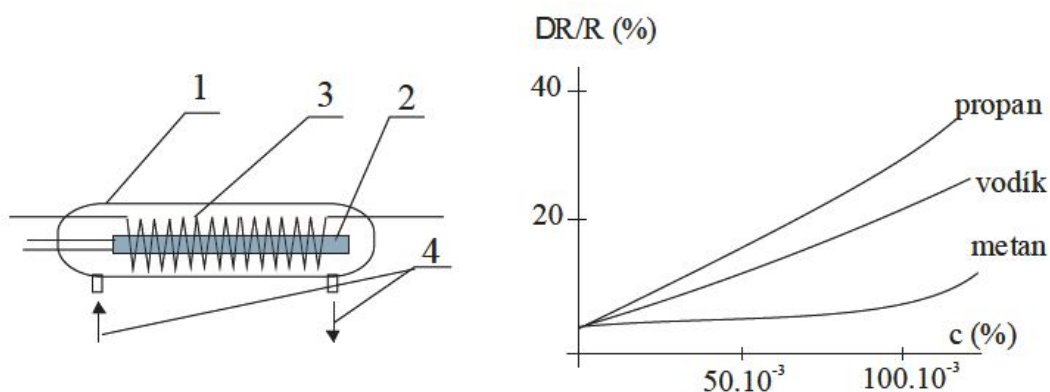
$$k = \frac{\Delta R}{R\epsilon} = 1 + 2\mu + \pi_i E, \quad (12)$$

kde μ a E jsou elastické konstanty

Polovodičové tenzometry jsou vhodné pro snímače sil, zrychlení a tlaků. Proto se používají z několika podstatných důvodů.

- a) Nízká hmotnost a malé rozměry
- b) Vysoká hodnota výstupního elektrického signálu
- c) Vysoká přesnost, dlouhodobě nezávislé na čase a prostředí [1]

Názorné schéma polovodičového senzoru je možné shlédnout na obr. 19, kde 1- těleso, 2- senzor, 3- žhavené vlákno a 4- směs plynu. [9]



Obr. 19: Schéma polovodičového senzoru a jeho charakteristika pro různé plyny [9]

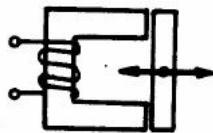
2.1.4 Indukčnostní tenzometry

Tento typ tenzometrů není tak rozšířený jako tenzometry elektrické (kap. 2.1.2) a polovodičové (kap.2.1.3). Princip indukčnostních tenzometrů spočívá v tom, že změna délky snímače způsobí změnu impedance cívky, ve které protéká proud. Toho lze dosáhnout těmito způsoby.[1]

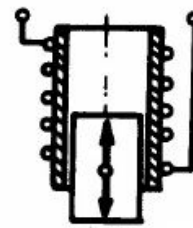


Obr. 20: Indukčnostní tenzometr [10]

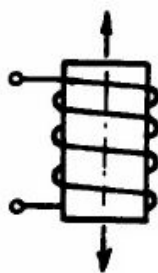
- a) Změnou velikostí vzduchové mezery v magnetickém obvodu (obr. 21)
- b) Změnou polohy železného jádra (obr. 22)
- c) Změnou magnetické permeability jádra (obr. 23)



Obr. 21: Změna vzduchové mezery [1]



Obr. 22: Změna polohy [1]



Obr. 23: Změna permeability [1]

Hlavní předností těchto tenzometrů je velký výstupní signál, avšak nevýhodou je velká hmotnost. Jsou vhodné pro snímače sil, tlaků a vybrací. [1]

2.1.5 Kapacitní tenzometry

Obdobně jako u tenzometrů indukčních tak i kapacitní mění svoji kapacitu kondenzátoru vlivem změny velikosti snímače. Lze tedy napsat vztah ve tvaru

$$C = \frac{\epsilon_c S}{\delta}, \quad (13)$$

kde ϵ_c je dielektrická konstanta prostředí, S plocha polepu, C je kapacita a δ je vzdálenost polepů.

Změnou kapacity snímače lze dosáhnout například těmito způsoby:

- Změnou vzdálenosti polepů (závislost je hyperbolická) (obr. 24)
- Změnou velikosti plochy kondenzátoru, každá změna kapacity přívodních drátů se jeví jako deformace (závislost je lineární) (obr. 25) [1]



Obr. 24: Změna vzdálenosti polepů [1]



Obr. 25: Změna velikosti plochy kondenzátoru [1]

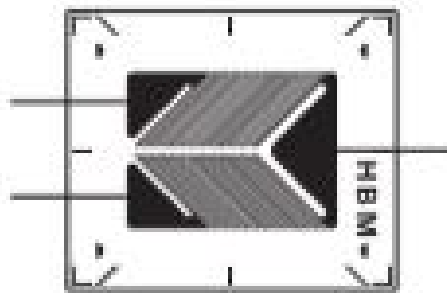
Kapacitní tenzometry mají vysoký činitel jakosti s malými rozměry, hmotností i jednoduchou konstrukcí. Je přihlíženo k nežádoucím vlivům jako je teplota, vlhkost dielektrika či kapacita a indukčnost přívodů. Používají se na měření geometrických rozměrů, polohy, tlakové síly, krouticího momentu, výšky hladiny, vlhkosti materiálů a jiné. Kondenzátor je většinou tvořen křemíkovým substrátem. [9]



Obr. 26: Kapacitní snímač [11]

2.2 Přípravy před měřením tenzometry

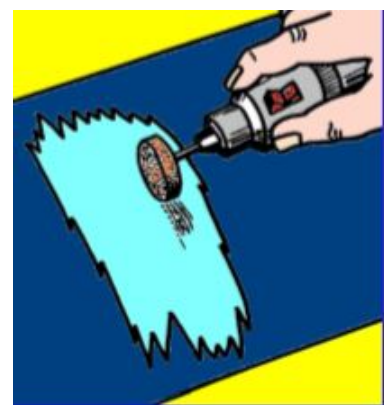
Důležitým faktorem je vhodně vybrat tenzometry, existuje mnoho typů na měření různých zatížení například na osově namáhání, ohybu, krutu atd. (více viz v podkap.2.1.2.3). Jelikož se provede měření na kroucení trubky, jsou vybrány tenzometry od firmy HBM - měřící technika, které mají měřící mřížku ve tvaru písmene V pod úhlem 45° od neutrální osy viz obr. 27. Nominální odpor je 120 Ω a k-faktorem rovným 2,03.



Obr. 27: Tenzometr na měření krutu (smyku) [7]

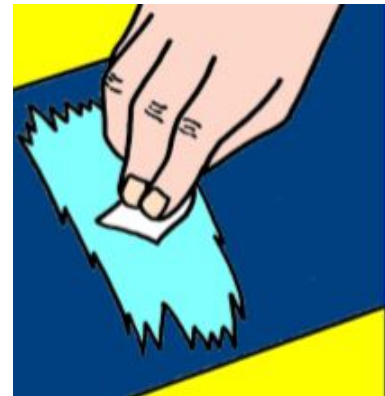
2.2.1 Instalace tenzometrů

První fází při instalaci tenzometrů je správně připravit a očistit objekt v místě měření a nejbližšího okolí. Nejhrubší nečistoty vzniklé například korozí nebo silnou vrstvou ochranného nátěru lze odstranit brusku s hrubým brusným kotoučem nebo ocelovými kartáči obr. 28. Po zbroušení je vhodné očistit zbroušenou plochu acetonem či jiným odmašťovacím prostředkem. [19]



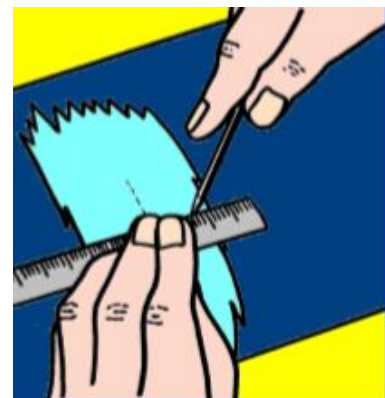
Obr. 28: Hrubé čištění povrchu [19]

Od této chvíle je důležité dbát na čistotu, protože jakákoli nečistota může ovlivnit celkové měření. Například je vhodné očistit nástroje, ale i čistota rukou tu hraje důležitou roli. Dalším krokem je po hrubém broušení jemně vyhladit povrch od korozních nečistot či zbytků ochranného nátěru obr. 29. Doporučené je použít smirkový papír popřípadě jemné brusné kotoučky. Brousíme pouze plochu, která je už broušená a to proto abychom nenanášeli hrubé nečistoty z neobroušeného povrchu. [19]



Obr. 29: Jemné čištění povrchu [19]

Dalším krokem je správné rozmyslet si, kam se tenzometry budou lepit. Existuje více možností jedna z nich je, že pomocí ostré jehly narýsují jemně středové polohy obr. 30. Poté je nutné naposledy pořádně odmastit povrch odmašťovacím prostředkem, který doporučuje výrobce. Odmašťovat nejlépe pomocí tampónků, které nepouštějí jemné částice a nedojde k ovlivnění měření. [19]

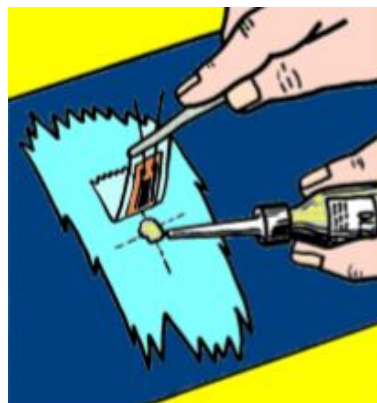


Obr. 30: Označení polohy [19]

Pro následné lepení si lze usnadnit práci pomocí lepicí pásky. Ta se přilepí na horní stranu tenzometru a následně přilepí k měřenému objektu do vyznačených míst z předchozí operace ale pouze jen ta část jak je tomu na obr. 31. Při následném lepení je dobré jeden konec lepicí pásky si přidržet například pinzetou. Poté lze nanést na povrch tenkou vrstvu lepidla, která se musí rozetřít po celé ploše tenzometru, aby nevznikly vzduchové bubliny. Po nanesení se tenzometr přiklopí k povrchu. Je nutné prstem (přes nějakou tenkou fólii, aby nedošlo k přilepení prstu) přitlačit tenzometr k povrchu než lepidlo vytvrdne obvykle kolem 1 minuty [19].



Obr. 31: Přilepení lepicí páskou [19]



Obr. 32: Lepení tenzometru [19]

Po nalepení lze opatrně odlepit lepicí pásku. U tenzometrů s vývody se musí napájet pomocnou svorkovnicí, na kterou se připojí přívodní vodiče obr. 33. Důležitá je pak kontrola zda je přilepení a následné pájení svorkovnice v pořádku. To se zjistí kontrolou pomocí ohmmetru, kde se proměří nominální odpor, který udává výrobce v tomto případě je roven 120Ω . Tímto se zkontroluje zda je elektricky funkční obr. 34. V poslední řadě lze pomocí silikonové gumy nebo tmelu zakrýt tenzometr, aby byl chráněn proti mechanickému poškození, vzdušnou vlhkostí a jinými nežádoucími faktory. [19].



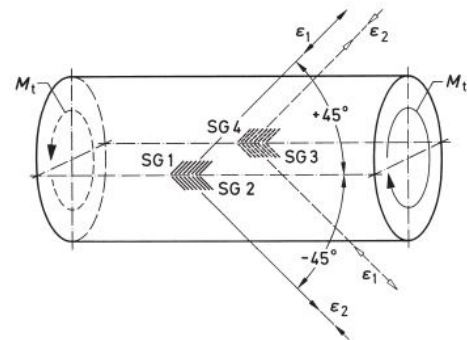
Obr. 33: Připojení vodičů [19]



Obr. 34: Kontrola elektrické funkčnosti [19]

2.2.2 Zapojování tenzometrů pro krouticí moment

Při měření krouticího momentu trubky se používá čtveřice tenzometrů (znázorněny na obr. 36, kde T_1 až T_4 jsou jednotlivé tenzometry) zapojených do plného můstku jak je již zmíněno v podkapitole 2.1.2.1. Aby byly eliminovány ohybové síly musejí být umístěny přesně pod úhlem 45° vzhledem k neutrální ose

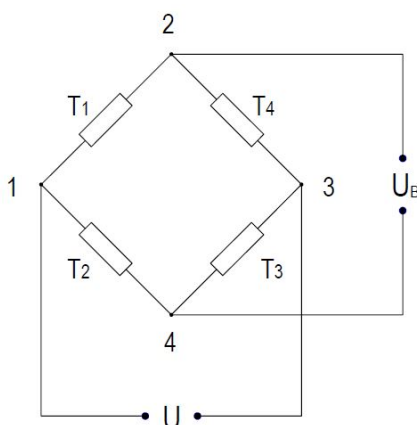


Obr. 35: Znázornění tenzometrů na trubce [7]

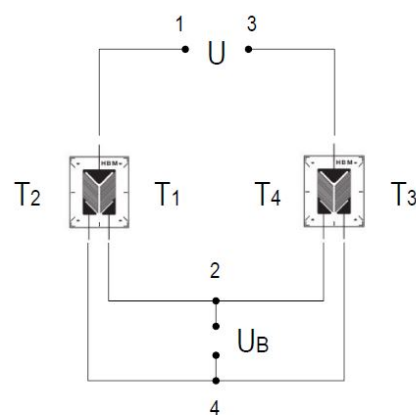
obr. 35. Toto schéma převedené do rovinného případu zobrazuje obr. 38, kde si lze všimnout propojení všech tenzometrů s výstupním napětím U a napájecím U_B .



Obr. 36: Zapojení tenzometrů



Obr. 37: Schéma plného můstku



Obr. 38: Propojení tenzometrů

Poměr výstupního napětí U a napájecího U_B popisuje vztah 14 (podrobnější odvození viz dřívější podkapitola 2.1.2.1).

$$\frac{U}{U_B} = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (14)$$

Po dosazení vzorce 9 do 14 a následných úprav lze vyjádřit

$$\frac{U}{U_B} = \epsilon \cdot k \Rightarrow \epsilon = \frac{U}{U_B \cdot k} \quad (15)$$

2.3 Jádrové vrtání

Jádrové vrtání má zásadní význam, jak v geologických oborech především jako průzkumné vrtání, tak i v oboru stavebnictví. Nejčastěji se s tímto odvětvím průzkumného vrtání lze setkat při hornických činnostech například při průzkumu ložisek nerostných surovin. Další velkou oblastí do které zasahuje jádrové vrtání je stavebnictví. Lze vrtat betonové, ale i železobetonové konstrukce, do kamene, cihel a do jiných stavebních materiálů. Z malé části lze využít i pro hlubinné vrty na vodu. V současnosti jádrové vrtání směřuje spíše ke zmíněnému oboru stavebnictví, z důvodu nárustu vrtných prací jak kvantitativních tak i kvalitativních jako jsou práce při zakládání staveb, aplikování kotev, demoličních prací a tak podobně.[12]



Obr. 39: Vrtná souprava MVS 1 [12]



Obr. 40: Jádrové vrtání [12]

Vrtání se doporučuje provádět za přítomnosti výplachové vody (obr. 41). Hlavním důvodem je výrazné prodloužení životnosti diamantové korunky (podrobněji v kap. 2.3.3). Důležitým faktorem je správné použití odpovídající množství vody. Při větším průtoku vodního průplachu může dojít k přílišnému obnažování diamantových zrn tzn. diamantová korunka se může brzy otupit. Proto je vhodné aby výplachová voda, která vystupuje z řezu, měla lehce krémovou barvu a konzistenci. V tomto případě dojde k tomu, že diamantová zrna vrtací korunky budou v kontaktu s brusným materiálem a nebude docházet k otupování nástroje. [13]



Obr. 41: Jádrové vrtání do betonu s použitím vodního výplachu [13]

2.3.1 Typy vrtů

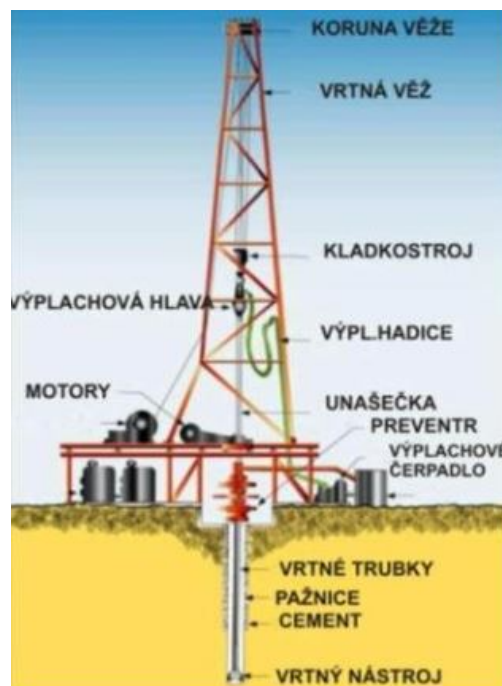
Vrty jsou nejčastěji hloubeny ve směru svislém, ale není žádnou překážkou vrtat i ve směru vodorovném, kolmém, šikmém nebo i do stropu jedná-li se o stavební práce. Na vrt jsou kladeny různé požadavky, jeden z hlavních požadavků při vrtání je, aby poměr (délka/průměr) měl maximální velikost. Vrty se provádí buď to geologicko-průzkumné nebo provozně-technické. [12]



Obr. 42: Dělník při práci [14]

a) Vrty geologicko-průzkumné

Snahou je získat geologické a geotechnické informace. Tento typ vrtu slouží pouze po dobu vrtání, po ukončení se musí likvidovat (může být i škodlivý). Do této skupiny patří vrty mapovací, strukturní, opěrné, parametrické, vyhledávací a tak podobně. V hornictví se například využívají vrty vyhledávací, orientační, ložiskové a jiné. [12]



Obr. 43: Schéma vrtu a vrtné kolony [12]

b) Vrty provozně-technické

Funkce těchto vrtů zpočívá v tom, že plní svůj účel až po dokončení vrtu. Jedná se zejména o vrty těžební, větrací, zmrazovací, jámové, odvodňovací, trhací, které se používají v hornictví. Dalším oborem ve kterém se lze setkat s tímto typem vrtů je obor stavebnictví. Patří sem vrty pilotové, mikropilotové, monitorovací, injektážní, sanační, vrty pro kotvy a jiné. Dalé se lze s tím setkat v energetice, kde jsou to vrty například pro tepelná čerpadla, pro využívání geotermální energie.

2.3.2 Vrtné soupravy

V inženýrské geologii v rotačním vrtání na sucho se používají kombinované technologie například hydrogeologie. Soupravy mají kompaktní konstrukci, malé rozměry i hmotnost, což je vhodné i pro důlní průzkum. V dnešní době se vyrábí velké množství vrtných souprav různého konstrukčního uspořádání, s tím souvisí i různé technické parametry. [12]

Soupravy dle konstrukce vrtného zařízení, lze dělit na tyto typy:

- a) vřetenové vrtné soupravy
- b) s plně hydraulickou otočnou hlavou (lafetové, vysokootáčkové soupravy)
- c) s rotačním stolem [12]



Obr. 44: Ruční vrtná souprava HILTI [12]

a) Vřetenové vrtné soupravy

Tyto vrtné soupravy se vyznačují dnes již klasickou konstrukcí jádrových vrtných souprav. Mezi přední výrobce této technologie lze zařadit ruské soupravy (typu ZIF, SBA), soupravami ze Švédska (výrobce Atlas Copco) či USA (výrobce Longyear). Do této kategorie sem patří ruské soupravy ZIF 650-M a ZIF 1200-MR (obr. 45), které mají hydraulický posuv rotační hlavy. Upínání vrtné trubky do rotační hlavy je prováděno mechanicky a otáčky jsou omezené z důvodu technologie diamantového vrtání (podrobněji v kap. 2.3.3). [12]



Obr. 45: Vrtná souprava ZIF 1200-MR [15]

b) Vysokootáčkové lafetové vrtné soupravy

Vývoj lafetových vrtných souprav začal značně spolupracovat s rozvojem hydraulických prvků. Aplikování hydraulických pohonů zjednodušuje přenos energie s malými ztrátami. Umožňuje plynulou regulaci jednotlivých parametrů a je lehce adaptabilní pro automatizaci. Důležitá změna v konstrukci je délka posunu rotační hlavy. Lafetový systém umožňuje větší přesnost a stabilitu vrtu a tím využít i větší výsuvy rotační hlavy až 6-8 metrů. Soupravy se opět vyrábí ve Švédsku (firma Atlas Copco - DIAMEC 250 (obr. 46), v USA (firma Longyear) a jiné. [12]



Obr. 46: Vrtná souprava DIAMEC 250 [12]

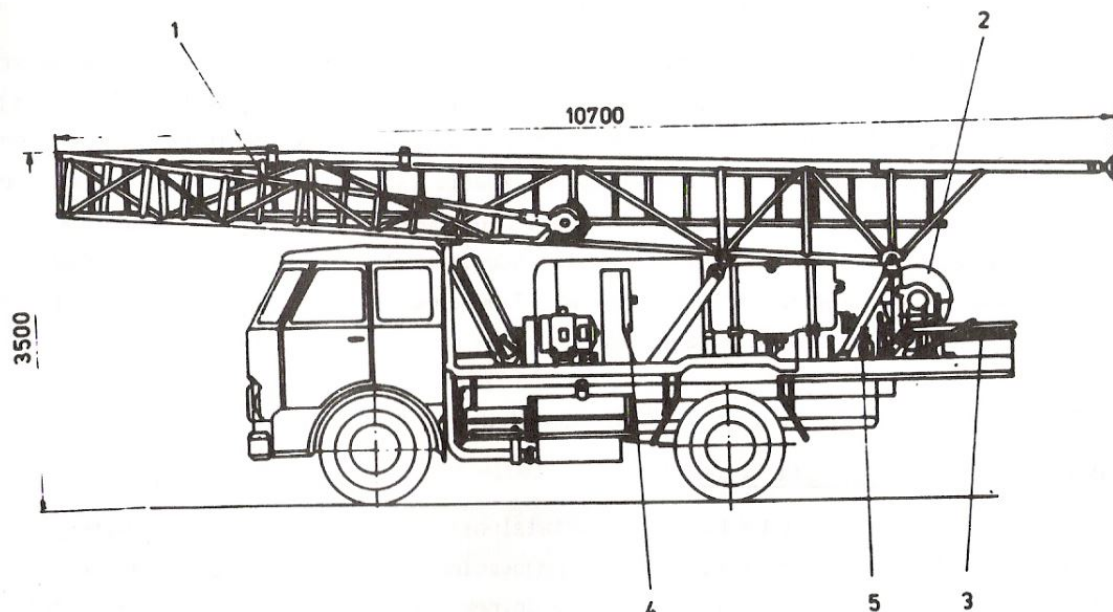
c) Vrtné soustavy s rotačním stolem - s manipulací nad a pod rotačním stolem

Soupravy manipulující nad rotačním stolem jsou velmi lehce pojízdné. Nejčastější využití bývá v ložiskovém průzkumu, v průzkumném jádrovém vrtání nebo v inženýrské geologii a hydrogeologii. Výhodou je průzkum uložených ložisek například černého uhlí, kde lze projít i bez odběru vrtného jádra.



Obr. 47: Vrtná souprava URB-3AM [16]

Je zachována sestava klasické vrtné soupravy, což zahrnuje pohonnou jednotku, rotační stůl, vrtnou věž atd. Nejčastěji používané vrtné soupravy jsou z Ruska řady URB (obr. 47). Schématické uspořádání lze vidět detailněji na obr. 48. Soupravy s manipulací pod rotačním stolem se vyskytují jen velmi zřídka. [12]



Obr. 48: Schéma ruské soupravy URB, popis jednotlivých částí: 1 - sklopná věž, 2 - vrátek, 3 - rotační stůl, 4 - motor, 5 - ovládací zařízení [12]

2.3.3 Nástroje pro jádrové vrtání

Od počátku je snaha provádět vrty z důvodu získání celistvého horninového vzorku. Nejsnáze toho lze dosáhnout v měkkých horninách, kde stačilo využít různé lžicové vrtáky (obr. 49). Naopak při vrtání do tvrdších podloží bylo zapotřebí použít tzv. zubové korunky, což je trubka s vyřezanými zuby. Avšak zásadní zlepšení přišlo až s používáním slinutých karbidů (tvrdokovů). Nanášely se na zuby nejprve navařováním, později se karbidové destičky staly součástí zubové korunky. Ve velmi tvrdých horninách se používají korunky osazené diamanty viz obr. 50. Nástroje pro jádrové vrtání obecně nesou název *korunky*. [12]



Obr. 49: Lžicový vrták [17]



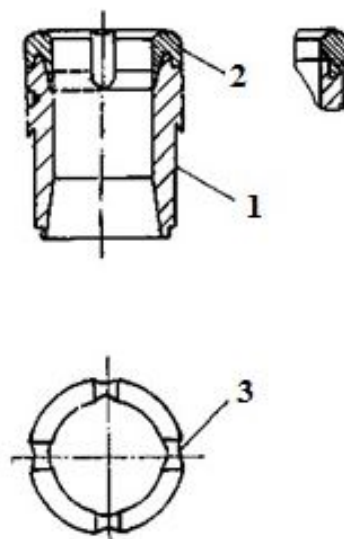
Obr. 50: Vrtací korunky diamantové [18]

Rozdělení nástrojů:

- a) Vrtné korunky diamantové
- b) Vrtné korunky s tvrdokovy
- c) Vrtné korunky valivé

a) Vrtné korunky diamantové

Dříveji byly diamantové korunky osazovány velkými kameny, s postupem času byla snaha o drobnější diamanty až na jemnou stmelenu drť v korunce. Základní otázkou je jejich použitelnost a hospodárnost. Jedná se totiž o diamantové suroviny, které jsou velice drahé a tím stoupá i náročnost technologie vrtání při práci s nimi. Avšak z hlediska použitelnosti je tento typ nástroje téměř bez jakéhokoli omezení. [12]



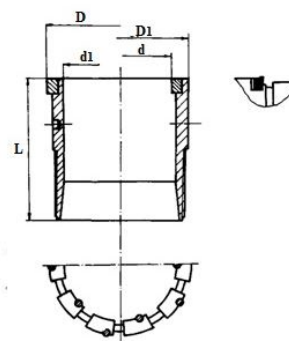
Obr. 51: Schéma diamantové korunky, popis: 1 Tělo - spojovací článek vrtné kolony a pracovní částí nástroje, 2 Pracovní část - tvořena diamanty a nosnou maticí, 3 Výplachové kanálky [12]

Významnou část z ohledu pracovní způsobilosti je pracovní část diamantové korunky. Diamanty i nosná matrice tvoří jeden celek. Podle způsobu umístění diamantů v matici dělíme korunky na:

- a) **vsazené** - matrice povrchově osázena řeznými diamantovými kameny
- b) **impregnované** - matrice tvořena směsí drobných kamenů, diamantového prachu nebo práškového tvrdokovu. [12]

b) Vrtné korunky s tvrdokovy

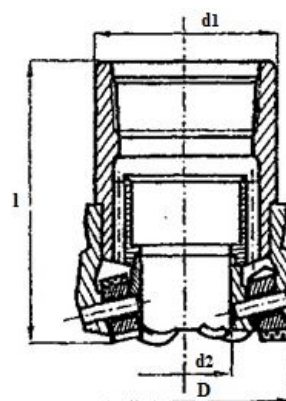
Tvrdokovy se vyrábí práškovou metalurgií a umožnily v jádrovém vrtání částečné nahrazení drahého diamantu. Jsou to směsi ze slinovaných karbidů a čistých kovů. Základní vlastností tvrdokovů je vysoká tvrdost, odolnost proti opotřebení a vysoká teplota tavení. Základním materiálem je většinou karbid wolframu, popř. titanu s čistým práškovým kobaltem.

**Obr. 52:** Schéma roubíkové korunky [12]

Nejrozšířenějším typem tvrdokovových korunek je korunka roubíková (obr. 52). Jsou to tělesa ze slinutého karbidu mající tvar válečku, čtyřhranu, šestihranu nebo osmihranu. Roubík bývá symetrický podle čela korunky tzn. úhlová vzdálenost je stejná.[12]

c) Vrtné korunky valivé

Při vrtání hlubších vrtů vrtaných převážně rotarovým způsobem plnoprofilově s valivými dláty je provrtávání hornin předepisováno tzv. intervalovým jádrováním. K tomuto účelu jsou vhodné jednak diamantové korunky větších průměrů, pro středně pevné a měkké horniny se používají nejčastěji valivé vrtné korunky (obr. 53). Mají přizpůsobenou konstrukci tak, že zvětšený střední otvor dovoluje vnikání jádra do jádrovnice. Valivé korunky se vyrábějí podle počtu ozubených válečků buď čtyřválečkové nebo šestiválečkové. [12]

**Obr. 53:** Schéma valivé korunky [12]

3 Návrh senzoru - konstrukce

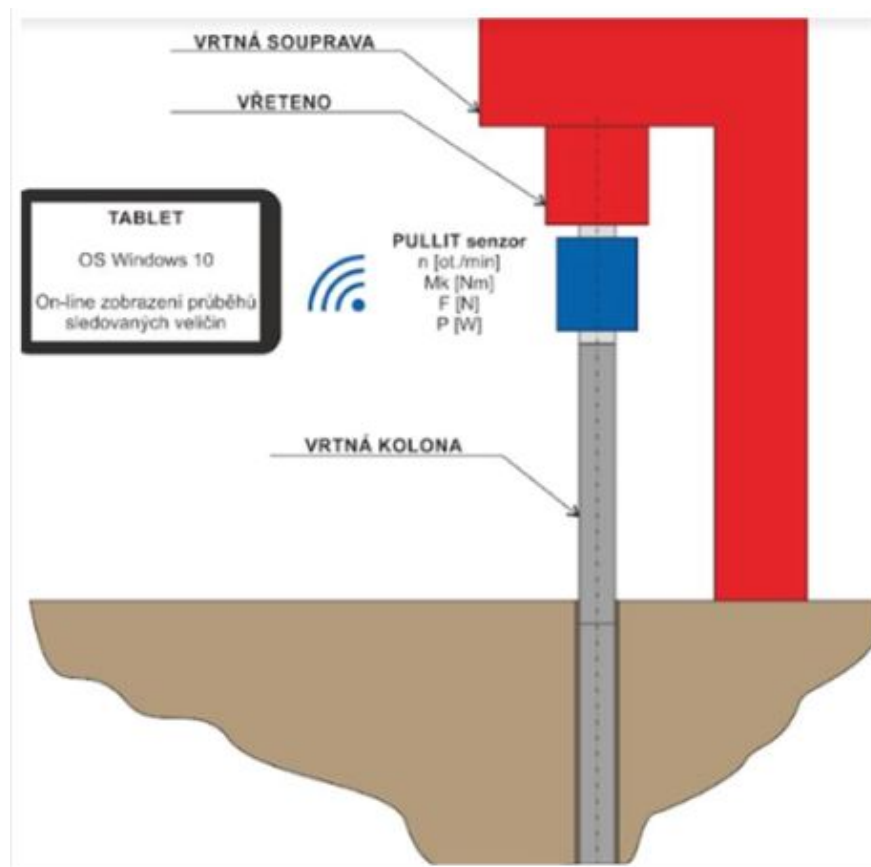
Důvodem vytvoření senzoru je měření parametrů (veličin) jádrového vrtání konkrétně krouticího momentu, přítlaku a otáček vřeten. Důležitou podmínkou je bezdrátový přenos mezi senzorem a přijímacím zařízením, kde se jednotlivé parametry budou zobrazovat v závislosti na vrtném procesu. Záznam naměřených dat bude dále zaznamenáván na paměťovou kartu. To umožní sledování aktuálních parametrů vrtání, následné analýzy a hodnocení po dlouhodobém sběru dat. Těmito údaji bude možné optimalizovat proces jádrového vrtání a následně může přispět při návrhu nových vrtacích zařízení. Senzor je umístěn pod vřetenem vrtné hlavy viz obr. 55 z důvodu nejnižšího ovlivnění pevnosti a tuhosti (axiální, torzní) vrtání. Na senzor jsou samozřejmě kladeny požadavky na bezpečný, spolehlivý a zároveň efektivní provoz.

Nejdříve je vhodné si analyzovat typy vrtacích strojů, na které se bude senzor aplikovat. Stroje jsou dány spolupracující firmou, ale může být snadno rozšířitelné i pro jiné typy vrtacích systémů. Tyto stroje jsou určeny k jádrovému vrtání. Mechanismus spočívá ve spojení několika tyčí. Výstup vrtací hlavy je obvykle dutý hřídel s vnitřním šestihranem. Na vnitřní šestihran se nasadí vnější a zajistí se axiálně pomocí kolíku viz obr. 54. Šestihranný spoj je typický pro jádrové vrtání. Snahou je navrhnout nový senzor kompatibilní s tímto typem spoje.



Obr. 54: Vrtací tyče - spojení pomocí vnějšího a vnitřního šestihranu

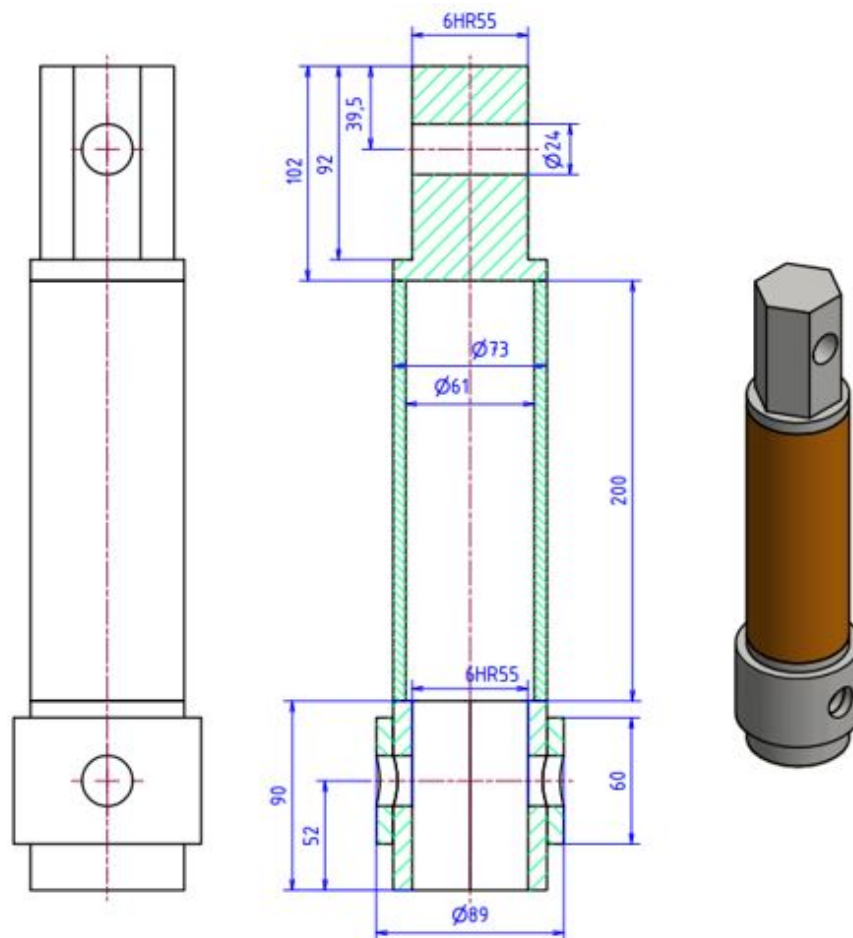
Senzor obsahuje deformační člen (obr. 56) a ochranné pouzdro, které je omezeno rozměry týkající se především maximální délky (v axiálním směru) $l = 200$ mm, tak aby se nezkracovala využitelná délka zdvihu vrtné soupravy a maximálního průměru (v radiálním směru) $D = 160$ mm.



Obr. 55: Schéma vrtné sestavy osazené senzorem zajišťujícím on-line bezdrátový přenos dat

3.1 Deformační člen senzoru

Deformační člen (obr. 56) je svařenec ze 4 dílců, kde je svařená dutá trubka s vnitřním a vnějším šestihrannem, který je propojen s vrtací hlavou a zbytkem vrtací kolony. Deformační člen je navržen s důrazem na maximální jednoduchost a robustnost díky náročným podmínkám při jádrovém vrtání. Materiály jednotlivých dílců jsou výkovky a jakostní konstrukční ocel dle dřívějšího značení ČSN 11 523 a nyní 1.0553 (S355J0), mez pevnosti se pohybuje okolo $\sigma_{pt} = 520 \text{ N/mm}^2$. Mez kluzu pak okolo $\sigma_{kt} = 355 \text{ N/mm}^2$. Na deformační člen budou nalepeny tenzometry pro měření krouticího momentu a přítláčné síly. Dále bude navrženo ochranné pouzdro v oblasti bezešvé trubky (hnědá barva). Vnější průměr trubky je $D = 76 \text{ mm}$, tloušťka stěny $t = 6 \text{ mm}$ a délka $l = 200 \text{ mm}$.



Obr. 56: Návrh deformačního členu

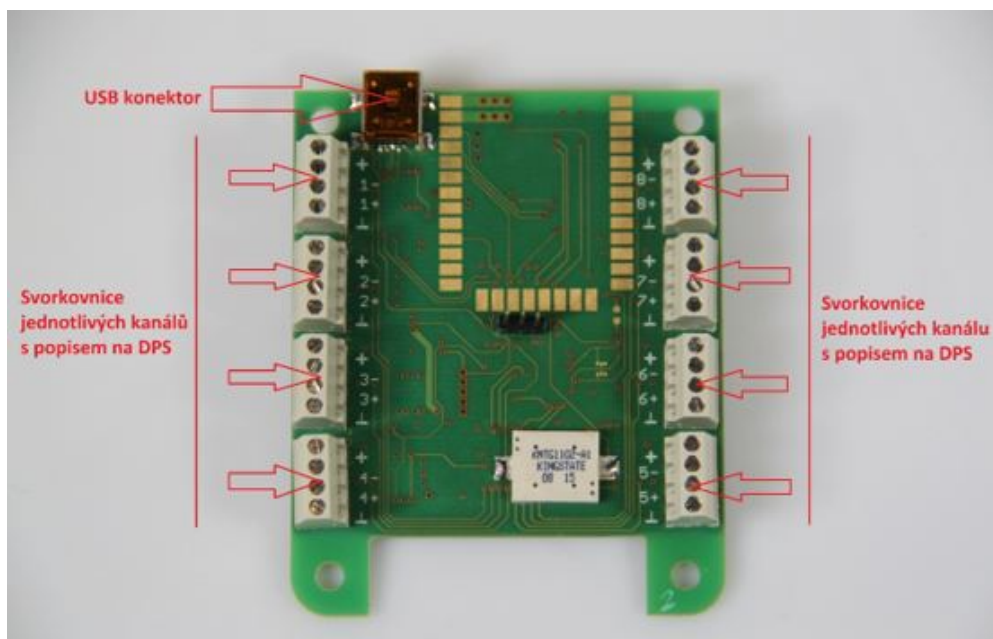
3.2 Ochranné pouzdro

Cílem je navrhnout ochranné pouzdro z elektricky nevodivého a zároveň lehkého materiálu, do kterého lze snadno umístit komponenty potřebné pro funkci požadovaného snímače (senzoru). Vhodným materiálem se jeví plast. Pro správnou funkci snímače je důležité do pouzdra umístit Li-Pol (Lithium - polymerové) akumulátory a datalogger. Při jádrovém vrtání se lze setkat s řadou nečistot jako je prach, stříkající voda a jiné. Z toho důvodu pouzdro musí být velmi dobře utěsněno.

Dále je důležité zajistit snadnou přístupnost k akumulátorům z důvodu výměny za nové nebo k dataloggeru při jakékoli poruše. Tento problém je vyřešen pomocí utěsněných víček, které se zašroubují do závitových vložek nebo vyřezaných závitů v pouzdře. V práci jsou navrženy 2 varianty ochranných pouzder, které budou uvedeny a podrobně rozebrány v další kapitole, viz níže 3.4.

3.3 Datalogger LPDR

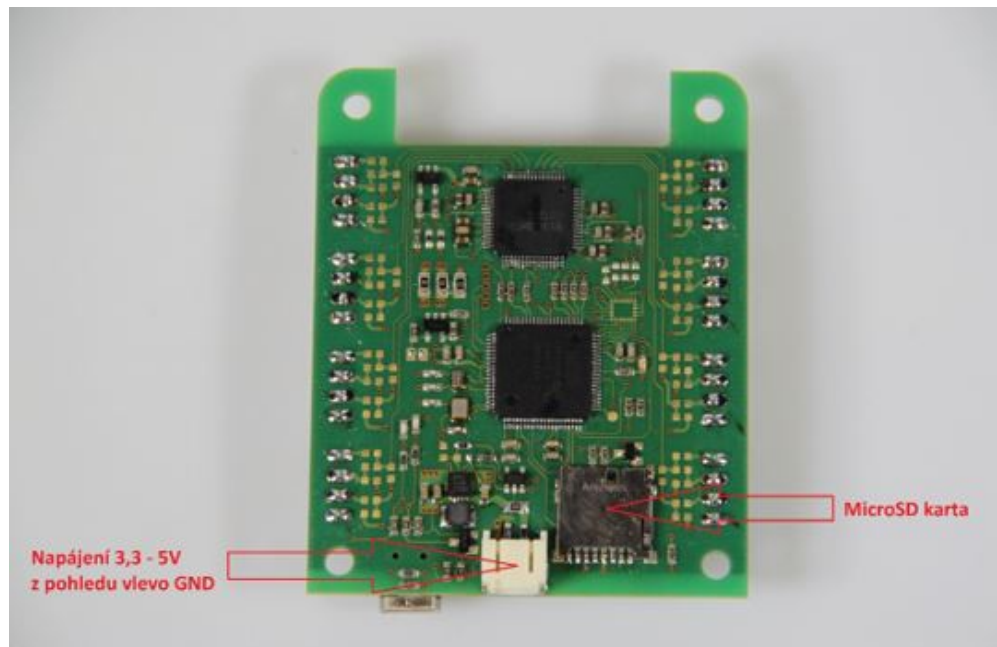
Naměřená data z tenzometrického měření musí být zpracována, bezdrátově přenášena a také ukládána. Pro splnění těchto cílů byl vyvinut speciální datalogger s označením LPDR ve spolupráci s firmou CleverTech. Je to varianta dataloggeru s telemetrickým přenosem, což znamená bezdrátový přenos dat na dálku. Datalogger je až 5 kanálový určený pro snímání napětí na tenzometrických mostech. Vzorkovací frekvence je nastavena na hodnotu 1 kHz/kanál. Měřicí část zajišťuje 24bitový A/D převodník (ADS1298). Řídícím procesorem je LPC1759 s jádrem Cortex M3. Buzení mostů je realizováno pomocí LDO regulátoru s napětím +3V. Použité rádiové rozhraní pro telemetrii a dálkové ovládání je Digi XBee. Dosah rozhraní v otevřeném prostoru je max. 100 m. Napájení zajišťují dva LiPol (lithium-polymerové) akumulátory, které vydrží na jedno nabití 8 hodin provozu.



Obr. 57: Hardware LPDR strana svorkovnic
[21]

System dataloggeru je připraven pro měření plných tenzometrických mostů. Možností je i měření tzv. půl-mostu nebo čtvrt mostů, ale je třeba vytvořit doplnění do plného mostu. Jednotlivé mosty propojíme se svorkovnicí jednotlivých měřících kanálů dle popisků na plošném spoji viz obr. 57.

Pro spuštění LPDR stačí připojit napájení v požadovaném rozsahu napětí na napájecí konektor dle obr. 58. Logger začne automaticky odesílat data přes bezdrátové rozhraní a ukládat data na microSD kartu.



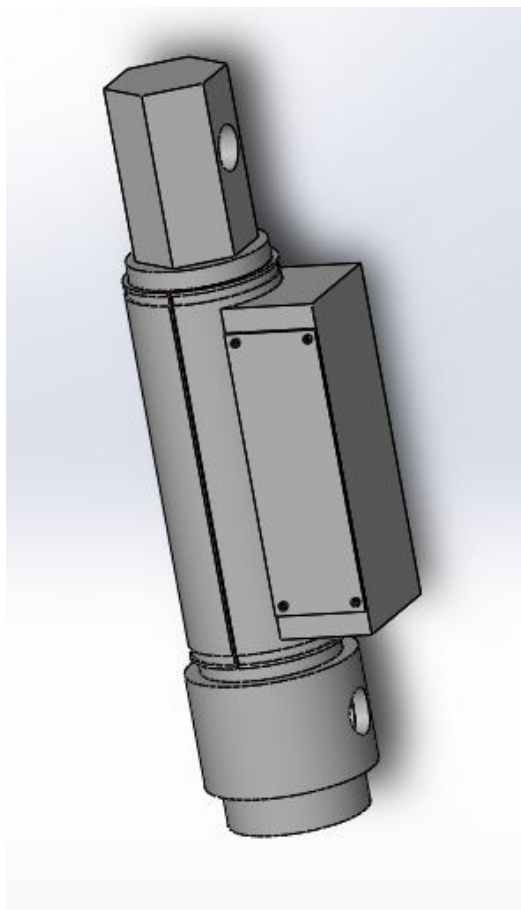
Obr. 58: Hardware LPDR strana součástek
[21]

Pro off-line zpracování dat slouží microSD karta, kam jsou ukládána veškerá měřená data ve formě .csv souborů. Formát souborů je optimalizován pro otevření a rychlý náhled v programu Microsoft Excel, nicméně ho lze samozřejmě snadno bez úprav importovat do programů jako Matlab aj. Data z microSD karty je třeba vyčíst po jejím vyjmutí z hardwaru a vložení do příslušné čtečky. [21]

3.4 Koncepční návrhy ochranného pouzdra

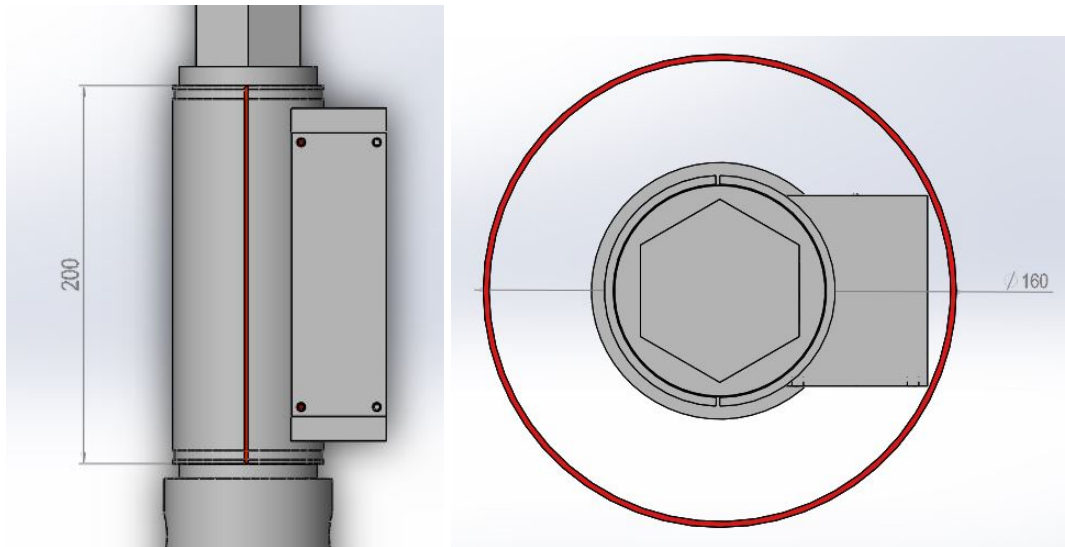
V rámci této diplomové práce jsou nakonstruovány dva typy ochranných pouzder, kde vhodnější typ bude doveden až do finální verze. Snaha byla o co možná nejjednodušší a nejlevnější tvar senzoru. Výroba bude uskutečněna nejspíše 3D tiskem nebo frézováním či jinou technologií, kterou lze vyrobit danou konstrukci. Koncepční návrhy jsou navrženy tak, aby splňovaly limitující podmínky (obr. 60) týkající se maximálního možného průměru $D = 160$ mm a maximální délky $l = 200$ mm (sepsány v kap. 3).

3.4.1 Koncepční návrh č.1



Obr. 59: Koncepční návrh č.1

Ochranné pouzdro (obr. 59) se skládá ze dvou částí. Horní a spodní části pouzdra jsou staženy kovovými utahovacími sponami, které se používají při stahování hadic. Hlavní problém tkví v tom, že nelze vyloučit pootočení deformačního členu vzhledem k pouzdru při vrtání a posléze přetrhání veškeré kabeláže spojující měřicí techniku.

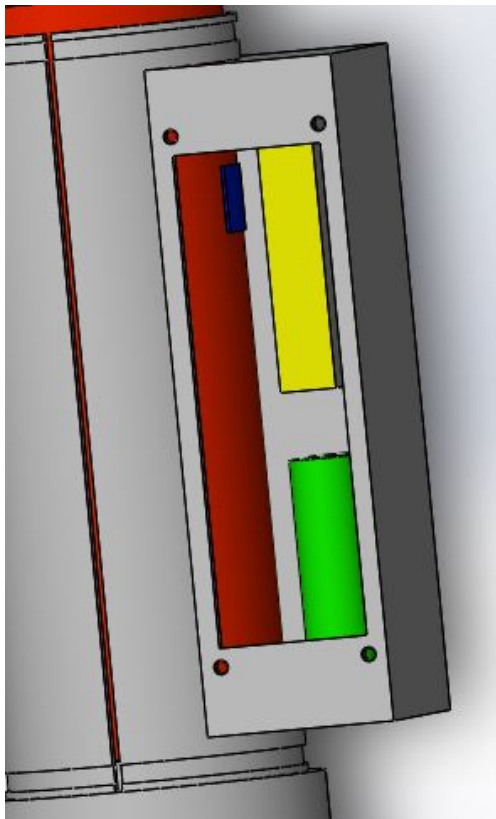


Obr. 60: Omezující rozměry

Umístění komponent je z hlediska přístupu uloženo na jedné straně obr. 62, což se jeví jako vhodné řešení. Modrou barvou je značen tenzometr, zelenou barvou akumulátory a datalogger barvou žlutou. Ten je přichycen na boční stěnu pouzdra pomocí lišty na tenké karty (PCB) viz obr. 61. Prostor je utěsněn pomocí jednoho víčka, které je přichyceno k pouzdru šrouby M4. Z tohoto důvodu je velice snadné propojení akumulátorů s dataloggerem a s tím související snadná montáž a demontáž.



Obr. 61: Lišta na tenké karty[20]



Obr. 62: Rozmístění komponent

Při omezujících podmínkách (délkových i průměrových) je i prostor pro komponenty a manipulací s nimi značně omezen, což není vhodné při častých zásazích do úložného prostoru senzoru například při výměně akumulátorů. Z důvodu uložení komponent na jedné straně bude docházet k nevyvážení pouzdra při rotaci senzoru. V tomto ohledu je tato varianta méně vhodná.

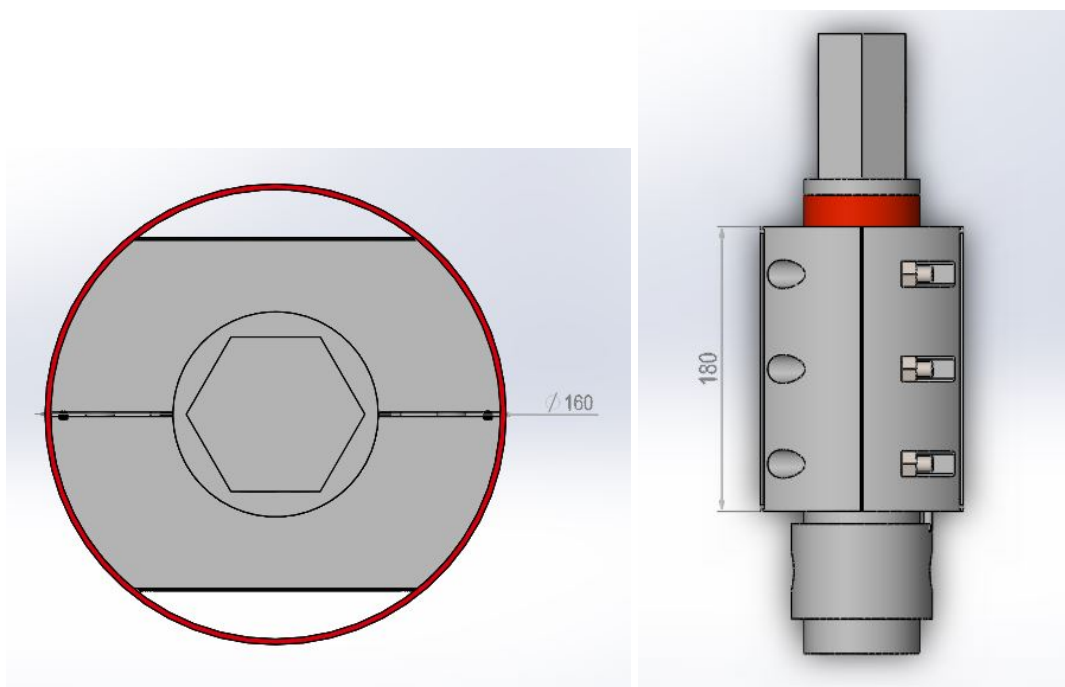
Shrnutí

- + Jednoduchá konstrukce
- + Umístění komponent na jedné straně
- + Lehké

- Možnost pootočení pouzdra při vrtání
- Nevyváženost pouzdra
- Složitější manipulace s dataloggerem a akumulátory uvnitř pouzdra

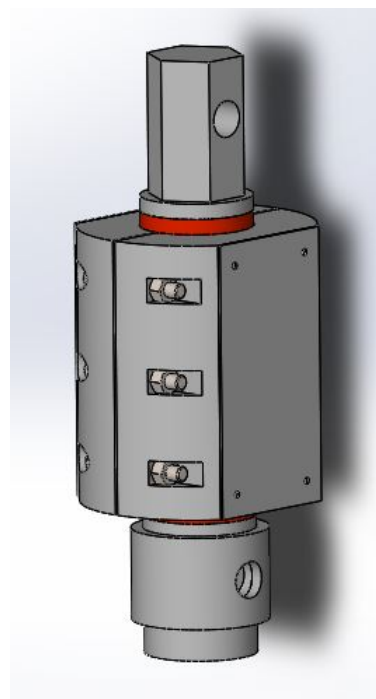
3.4.2 Koncepční návrh č.2

Tento konstrukční návrh využívá stejného principu jako svěrná spojka, čili dvě svěrné části spojeny pomocí šroubového spoje. Jak je uvedeno v kap. 3 i tento návrh splňuje rozměrová kritéria viz obr. 63.



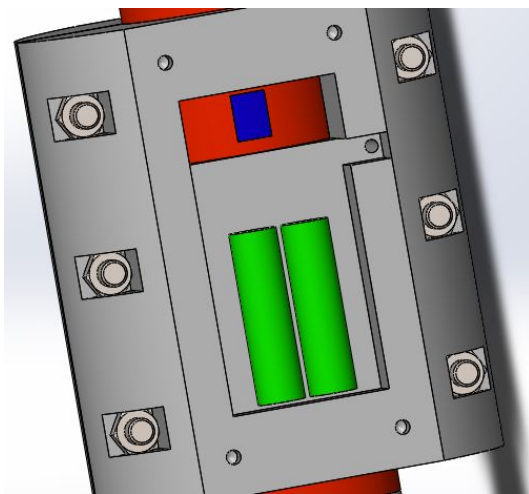
Obr. 63: Limitní rozměry

Jak lze vidět na obr. 64 pouzdro se skládá ze dvou částí. V jedné části jsou umístěny akumulátory, kdežto v druhé části je umístěn datalogger (podrobněji viz níže). Dále bylo nutné navrhnout kanálek, který by byl schopen propojit obě části pouzdra tak, aby kabeláž vedoucí z jedné části například z akumulátorů se dala protáhnout do druhé části a mohly tak napájet datalogger. Kanálek je detailně vidět na obr. 67.

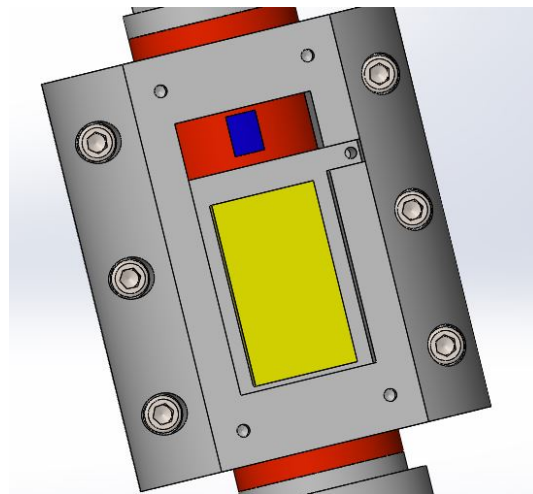


Obr. 64: Návrh č.2

V ochranném pouzdře je vyfrézován prostor (prozatím neřešeny rádiusy frézy) pro uložení jednotlivých komponent. V této části návrhu je rozmístění orietační. Hlavní prioritou je vytvořit dostatečný prostor pro akumulátory viz obr. 65 a pro datalogger viz obr. 66. V této fázi návrhu prozatím nebyla řešena žádná těsnění, která jsou nutná k utěsnění veškerých prostor kvůli náročným podmínkám (prach, stříkající voda) při vrtání.

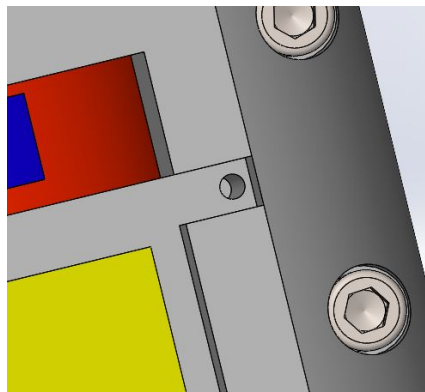


Obr. 65: Pouzdro s akumulátory



Obr. 66: Pouzdro s dataloggerem

Pouzdro musí být konstruováno z pevnějších plastových materiálů jako jsou kupříkladu ABS (Akrylonitrilbutadienstyren), což je plastický amorfnní kopolymer. Nebo jiný typ materiálu jako je POM (Polyoxymetylén), jedná se o termoplastický polymer. Mez pevnosti v tahu uvedených plastů se pohybuje okolo $\sigma_{pt} = 50 \text{ N/mm}^2$. Samozřejmě záleží na teplotě a stáří plastu, kde vyšší teplota či vysoké stáří snižuje pevnost a tím i odolnost proti prasknutí.



Obr. 67: Propojovací kanálek

Shrnutí

- + Nízká možnost protočení pouzdra vzhledem k deformačnímu členu
- + Vyváženost pouzdra
- + Jednoduchý přístup k dataloggeru, akumulátorům

- Akumulátory a datalogger na opačných stranách (nutnost kanálku)
- Vyšší hmotnost

3.4.3 Vícekriteriální rozhodování

Díky vícekriteriálnímu rozhodování lze určit, která z těchto uvedených dvou variant je vhodnější z hlediska vlastností, ceny, náročnosti výroby a jiných stejně podstatných kritérií. K usnadnění rozhodování je zde vytvořen soubor tabulek, které pomocí jednoho hodnotitele určí více vyhovující variantu. První tab. 1 obsahuje vybraná kritéria jako snadná konstrukce čili snadná vyrobiteľnosť, vysoká spoľehlivosť, zástavbová veľkosť, náročnosť montáže a cena. Ďalej je vhodné určiť váhu jednotlivých kritérií (tab. 2), kde najnižšia hodnota odpovedá hodnote 1, čo znamená najmenej podstatné kritérium a naopak najvyššia čili najviac podstatným je hodnota rovna 5.

Kritéria	Hodnotitel
Snadná vyrobiteľnosť	5
Vysoká spoľehlivosť	5
Zástavbová veľkosť	3
Náročnosť montáže	3
Cena	2
Σ	18

Tab. 1: Váha kritérií

V tabulce váh kritérií lze vyčíst, že najviac ztžejní byla kritéria jako snadná vyrobiteľnosť a vysoká spoľehlivosť a naopak najmenej podstatným se jevila cena. Jednalo se pouze o pohľad jedného hodnotitele. Ďalším krokom je určiť dílčí váhy jednotlivých kritérií viz tab. 2.

Kritéria	Hodnotitel
Snadná vyrobiteľnosť	$5/18 = 0,28$
Vysoká spoľehlivosť	$5/18 = 0,28$
Zástavbová veľkosť	$3/18 = 0,17$
Náročnosť montáže	$3/18 = 0,17$
Cena	$2/18 = 0,11$
Σ	1

Tab. 2: Dílčí váhy kritérií

Zhodnocení jednotlivých variant, kde hodnotil pouze jeden hodnotitel, lze vidět v tab. 3. Nutné podotknout, že bez ohledu váhy kritérií. Nejpatrnější rozdíl nastává ve vysoké spolehlivosti jednotlivých variant. Varianta č. 2 je ohodnocena nejvyšším stupněm 5 oproti variantě č. 1 (ohodnocena pouze stupněm 2). V konečném sečtení varianta č. 1 "prohrává" pouze o bod vzhledem k variantě č. 2. Proto je nezbytné zohlednit i váhu kritérií.

Kritéria	Varianta č. 1	Varianta č. 2
Snadná vyrobiteľnosť	3	3
Vysoká spolehlivosť	2	5
Zástavbová veľkosť	3	2
Náročnosť montáže	4	4
Cena	3	2
Σ	15	16

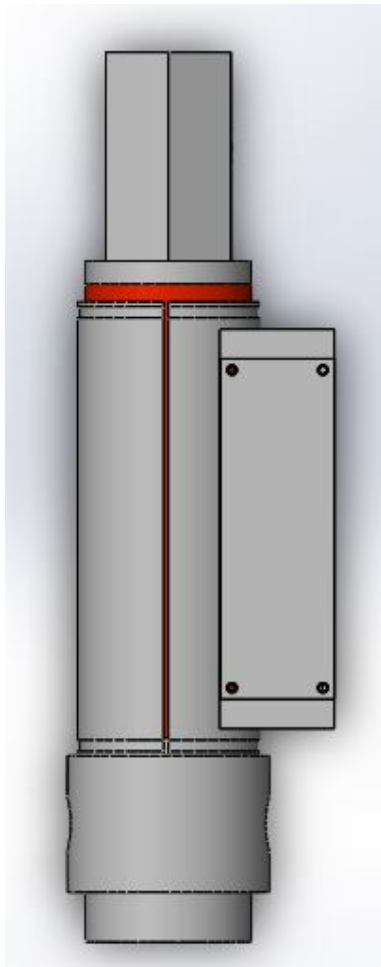
Tab. 3: Agregace kritérií (bez ohledu váhy kritérií)

Dále je nutné vzít v úvahu i váhu kritérií. Konečné hodnocení viz tab. 4 ukazuje, která varianta se jeví jako více vhodnější pro konstrukci senzoru. V tabulce (4) je zřejmé, že tentokrát varianta č. 2 prokazatelně "vítězí" hlavně díky kritériu vysoké spolehlivosti, na kterou se kladl nejvyšší důraz.

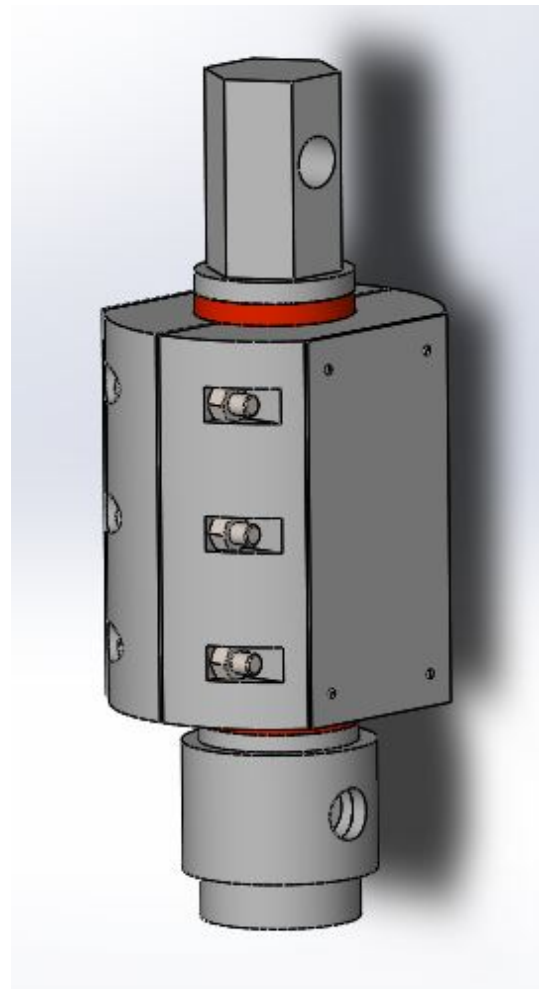
Kritéria	Varianta č. 1	Varianta č. 2
Snadná vyrobiteľnosť	$3 \times 0,28 = \mathbf{0,84}$	$3 \times 0,28 = \mathbf{0,84}$
Vysoká spolehlivosť	$2 \times 0,28 = \mathbf{0,56}$	$5 \times 0,28 = \mathbf{1,4}$
Zástavbová veľkosť	$3 \times 0,17 = \mathbf{0,51}$	$2 \times 0,17 = \mathbf{0,34}$
Náročnosť montáže	$4 \times 0,17 = \mathbf{0,68}$	$4 \times 0,17 = \mathbf{0,68}$
Cena	$3 \times 0,11 = \mathbf{0,33}$	$2 \times 0,11 = \mathbf{0,22}$
Σ	2,81	3,48

Tab. 4: Agregace kritérií (s ohledem váhy kritérií)

Ve vícekritériálním rozhodování bylo nutné si nejdříve určit váhu jednotlivých kritérií (tab. 1). Dále se stanovily dílčí váhy (tab. 2) a agregace kritérií bez ohledu dílčích vah. (tab. 3). V poslední řadě tab. 4 určuje agregaci s ohledem dílčích vah jednotlivých kritérií. Je evidentní, že varianta č. 2 je více vyhovující pro danou aplikaci oproti variantě č. 1.



Obr. 68: Varianta č. 1

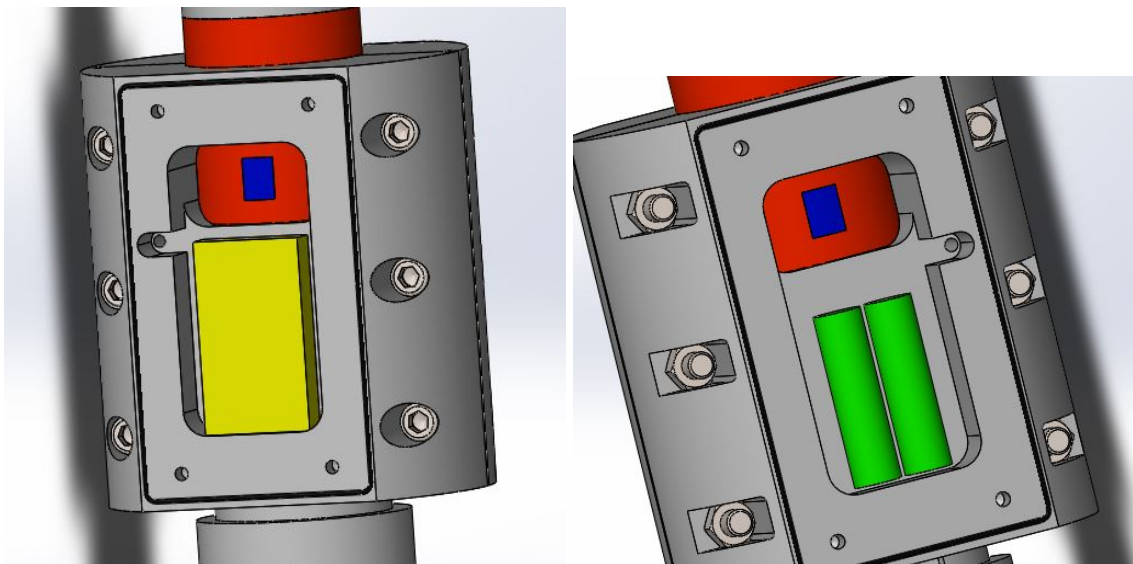


Obr. 69: Varianta č. 2

3.4.4 Vhodnější koncepční návrh

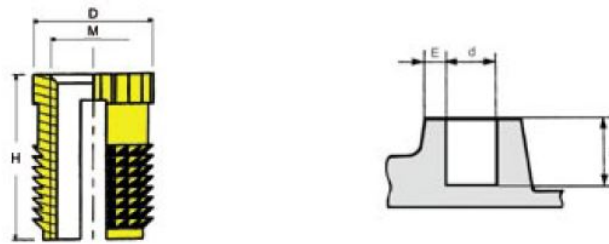
V předchozí kapitole (3.4.3) je vybrána varianta č. 2 ochranného pouzdra pro konstrukci senzoru, čili pouzdro konstruované na principu svěrné spojky. V této kapitole bude podrobněji probráno tvoření senzoru. Omezující rozměry zůstaly nezměněny, tak jak je uvedeno v kap. 3.4.2.

Ochranné pouzdro je doplněno zaoblením nástroje frézy viz obr. 70. Dále je zapotřebí zvětšit prostor okolo tenzometrů, aby bylo dostatačné místo na pájecí pole tenzometrů a s tím související prostor pro propojovací kabeláž.



Obr. 70: Ochranné pouzdro

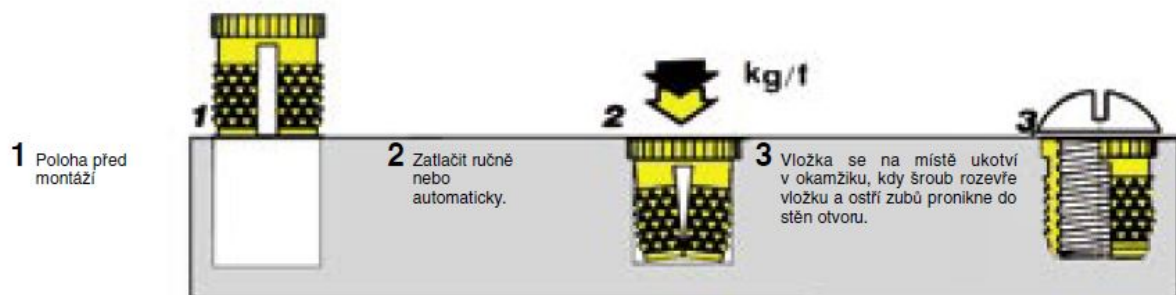
Plastová dvířka o tloušťce $t = 2$ mm jsou přišroubována do pouzdra pomocí šroubů M4. Do pouzdra bylo nejprve uvažováno vyřezat závit, ale z důvodu rotačního pohybu pouzdra by mohlo dojít ke stržení závitu. Další možností je umístění závitových vložek (katalogový list firmy Simaf viz obr. 71) do vyvrtané díry pouzdra.



Zavit M	Objednací číslo Serplast TR	Výška H	D	Rozměry otvoru		
				d	P min.	E min.
M2	40/TR020H040	4	4	3,5	4,5	1,8
M2,5	40/TR025H040 40/TR025H065	4 6,5	4,5	4	4,5 7	2
M3	40/TR030H050 40/TR030H065	5 6,5	4,5	4	5,5 7	2
M3,5	40/TR035H050 40/TR035H080	5 8	5,5	5	5,8 8,8	2,5
M4	40/TR040H080 40/TR040H095	8 9,5	6	5,5	8,8 10,3	2,8

Obr. 71: Katalogový list závitových vložek Simaf [22]

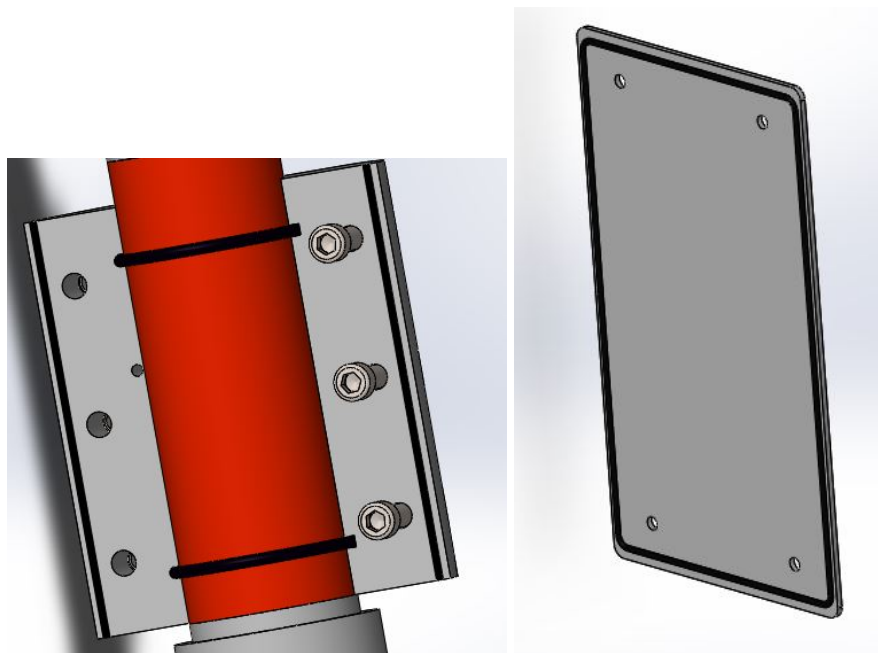
Montáž je velice jednoduchá a existuje mnoho variant, jak správně umístit vložku do požadované díry například metodou ultrazvukovou, tepelnou nebo montáží za studena, která je vidět na obr. 72.



* Délka šroubu musí být zvolena tak, aby po našroubování procházel celou délkou vložky.

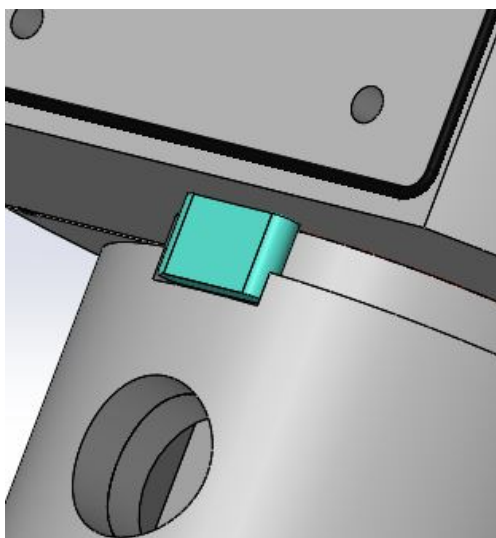
Obr. 72: Montáž za studena závitových vložek [22]

Při jádrovém vrtání do zemního podloží je důležité těsnění, jak už bylo zmíněno v kap. 3. Klíčové je utěsnit ochranné pouzdro a samozřejmě také víčka. Těsnicí kruhové profily jsou vybrány (z firmy GUMEX) v průměru $d = 2$ mm, které jsou lepeny na víčka senzoru a do vyfrézovaných drážek v pouzdře. Okolo deformačního členu je využito těsnění v průměru $d = 5$ mm viz obr. 73.



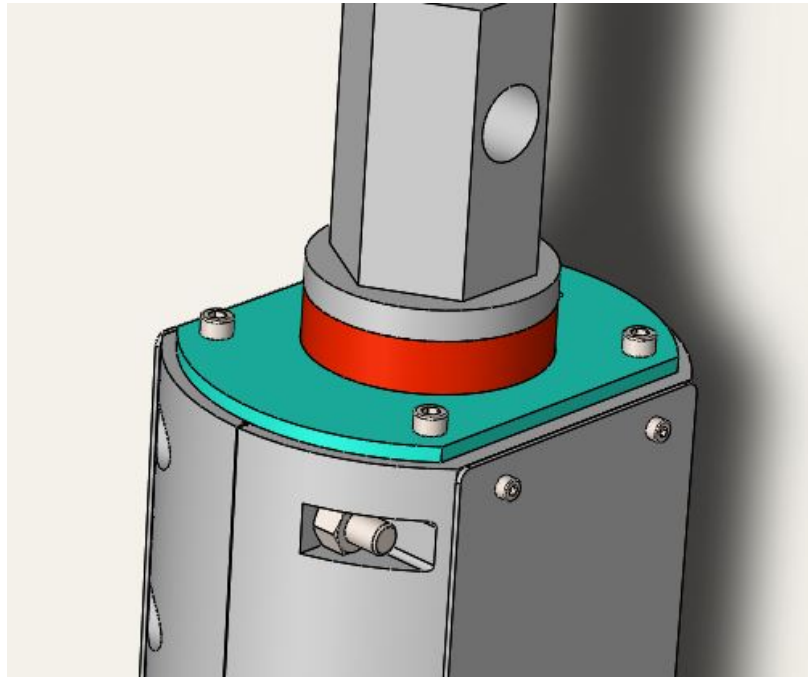
Obr. 73: Těsnění senzoru (černá barva)

Ochranné pouzdro by se nemělo potočit vlivem rotace vrtné kolony díky svěrnému spoji, avšak byl zde nakonstruován pojistný prvek viz obr. 74. V pouzdře je vyfrézovaná drážka, do které se vsadí pero. Pero zapadne do vyfrézované drážky v pouzdře a zapře se do drážky vytvořené v protikuse deformačního členu senzoru.



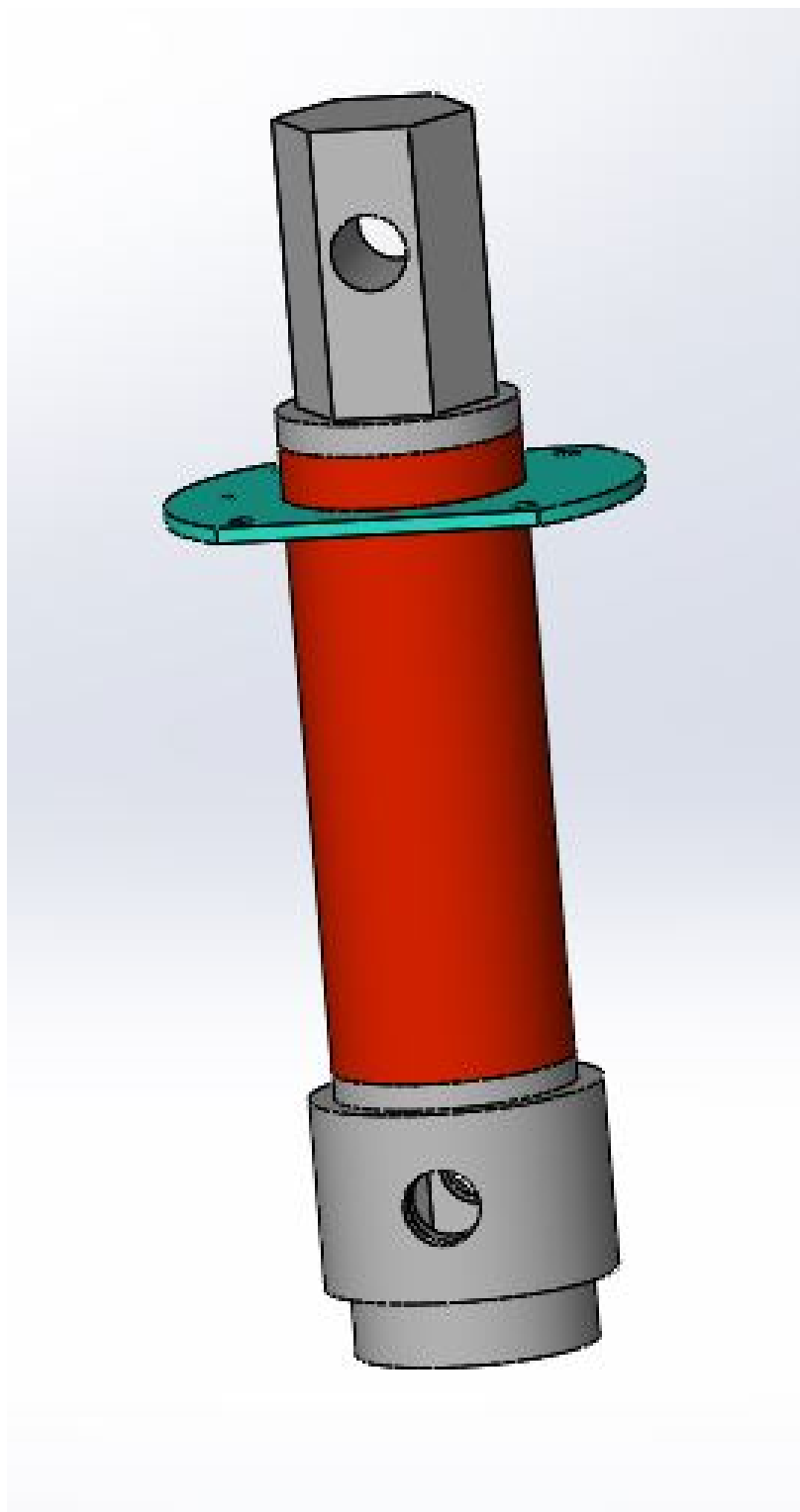
Obr. 74: Pojistný prvek

Další možností, jak zajistit pouzdro proti pootočení je pomocí navařené příruby v tomto případě tloušťky $t = 6 \text{ mm}$ (tyrkysová barva na obrázku) na horní okraj deformačního členu obr. 75. Tento díl je vypálen laserem s díry pro šrouby M6. Je zde uvažováno s větší vůlí pro šrouby a to z důvodu stažitelnosti svěrného spoje, kde nelze přesně zajistit, jak bude při montáži stlačeno těsnění.



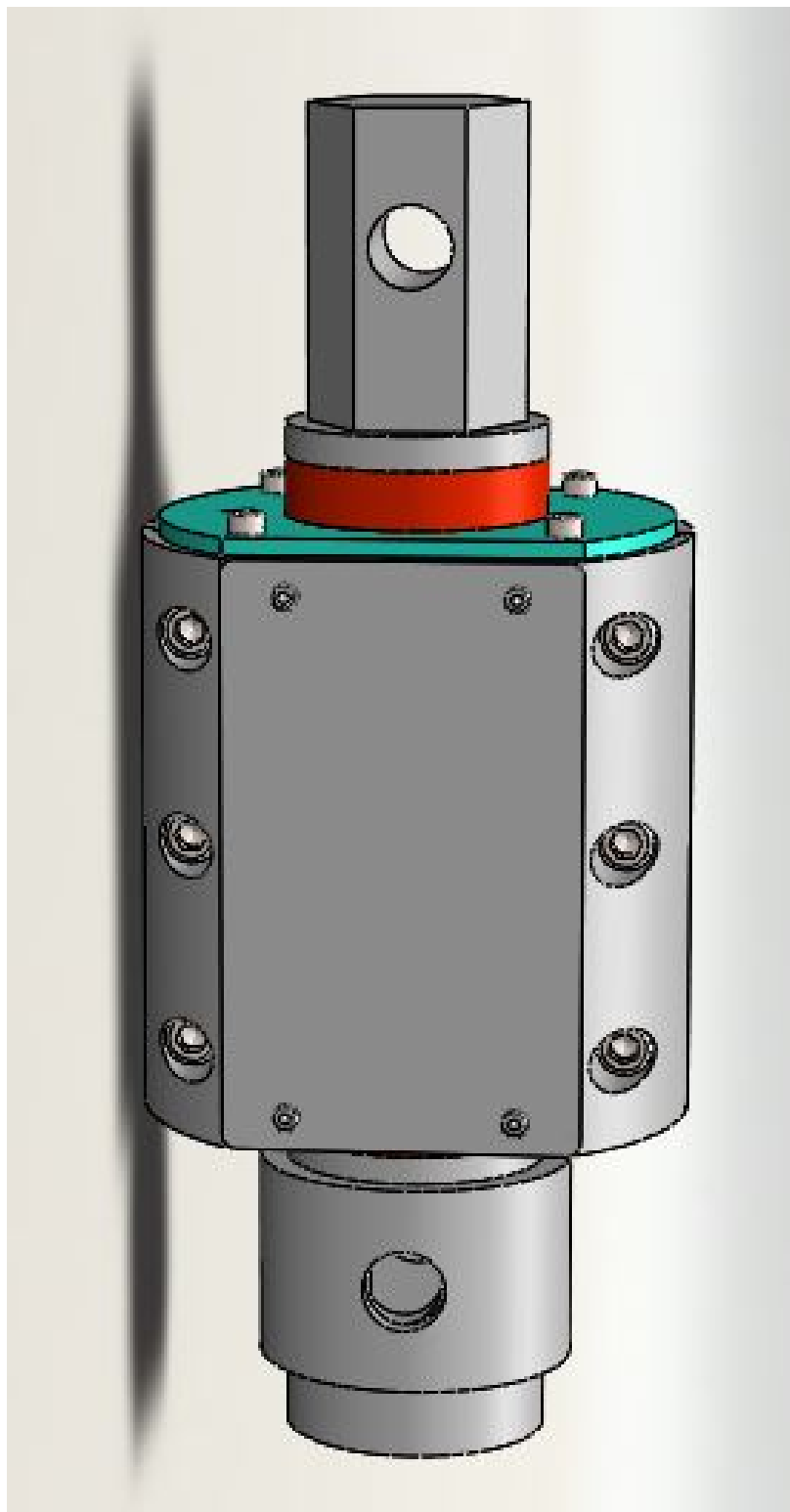
Obr. 75: Pojištění pomocí navařeného kotouče

Na obr. 76 je zobrazen svařenec deformačního členu s přírubou pro zajištění ochranného pouzdra. Návrhový výkres svařence s označením výkresu DP-00-01 je uveden v příloze diplomové práce.



Obr. 76: Deformační člen s navařenou přírubou

Celkový senzor se všemi náležitostmi splňující veškeré stanovené podmínky, je na obr. 77



Obr. 77: Senzor s ochranným pouzdem

4 Experimentální zkoušení

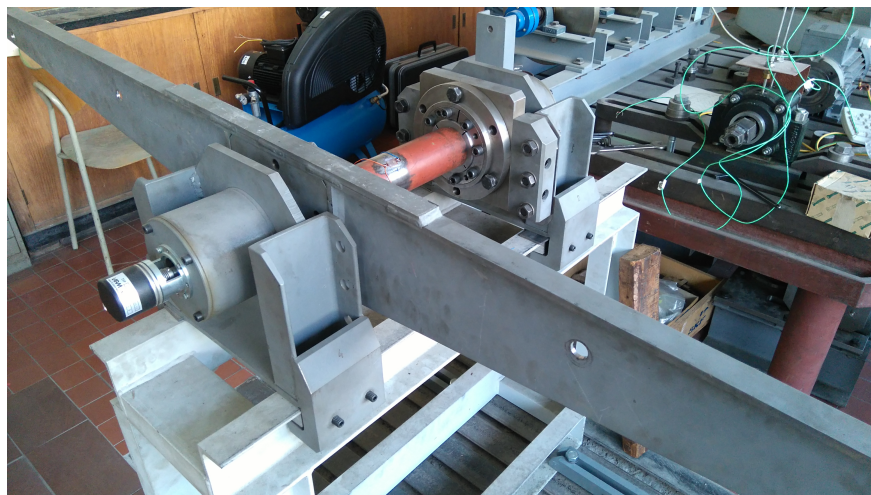
Hlavním cílem experimentálního zkoušení je ověření a testování citlivosti hardwaru (datalogery, měřící ústředna NI PXI-1073). Pro tento účel bude provedeno měření krouticího momentu na zkušebním standu viz obr. 78. Měření bude probíhat na trubce použité části vrtné tyče. Při měřeních jsou použity tenzometry na krut HBM XY41-6 / 120 v uspořádání plného mostu. Tenzometry jsou instalovány na deformační člen senzoru. Člen bude vložen do zkušebního zařízení, kde bude působit zatížení krouticího momentu. Z tohoto důvodu je nutné si vyjádřit souvislost mezi el. napětím a krouticím momentem.

V podkapitole (2.2.2) je odvozen vztah pro relativní prodloužení ϵ , který vyjadřuje poměr mezi deformační citlivostí tenzometru k výstupním napětím U a napájecím napětím U_B (rovnice 15). Je nutné vyjádřit si vztah pro napětí v krutu τ přes naměřená el. napětí (napájecí, výstupní) měřící ústřednou.

$$\tau = G\gamma \quad (16)$$

$$\gamma = 2 \cdot \epsilon, \quad (17)$$

kde G vyjadřuje modul pružnosti ve smyku a γ zkos, což je deformace, která vzniká působením smykového napětí τ .

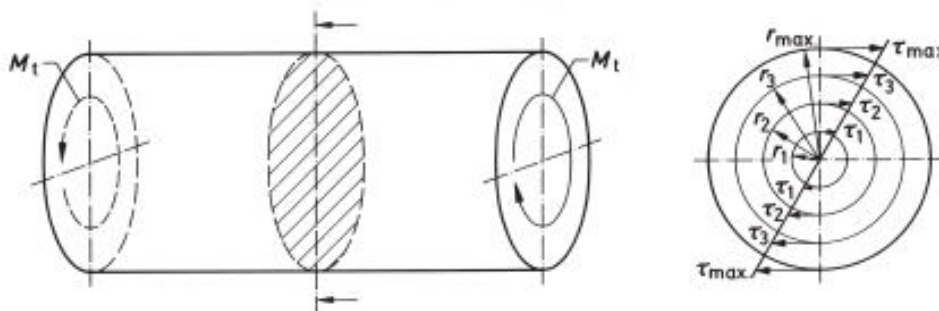


Obr. 78: Zkušební stand

Na obr. 79 si lze všimnout rozložení napětí při kroucení momentem M_t , kde napětí τ nabývá od $\tau = 0$ až po maximální hodnotu τ_{MAX} na jejím obvodu.

Pro τ_{MAX} platí

$$\tau_{MAX} = 2 \cdot \epsilon G \quad (18)$$



Obr. 79: Rozložení zkrutného napětí [7]

Při zapojení plného mostu se dále zkrutné napětí τ rovná

$$\tau = \frac{1}{2} \cdot \epsilon_i G, \quad (19)$$

kde ϵ_i je deformace z plného mostu

Do vztahu 19 lze dosadit vztah 15, ze kterého vyplyne výsledné napětí

$$\tau = \frac{GU}{2 \cdot kU_B} \quad (20)$$

Pro krouticí moment M_k obecně platí

$$M_k = \tau W_k, \quad (21)$$

kde W_k je průřezový modul v krutu.

Při dosazení vztahu 18 do vztahu 21 lze získat výsledný vztah 28 pro vypočítání krouticího momentu vznikajícím kroucením zkušební vzorku

$$M_k = \frac{2 \cdot W_k GU}{kU_B} \quad (22)$$

Při experimentálním zkoušení je použita trubka o vnějším průměru $D = 76,5$ mm a tloušťky stěny $t = 6$ mm. Materiál, mez pevnosti a mez kluzu jsou již zmíněny v kap. 3. Další potřebné parametry k výpočtu výsledného krouticího momentu jsou zaznamenány v následující tabulce.

Parametr	Hodnota
Průměr D	76,5 mm
Vnitřní průměr d	64 mm
Modul pružnosti ve smyku G	81 000 MPa
k-faktor tenzometru	2,03
Budicí napětí U_B	3000000 μ V
Hmotnost 1 závaží m	19,8 kg
Délka ramene l	981 mm
gravitační konstanta g	9,81 m/s ²

Tab. 5: Parametry měření

Dále je vhodné si dopočítat veličiny jako jsou průřezový modul v krutu W_k a maximální krouticí moment M_{kMAX} (počítáno analyticky se šesti závažími)

$$W_k = \frac{\pi}{16} D^3 \left(1 - \frac{d^4}{D^4}\right) \quad (23)$$

$$M_{kMAX} = 6 \cdot m_{celk} l g \quad (24)$$

Z těchto hodnot lze snadno vyjádřit maximální napětí v krutu vztah 25, které vznikne při zatěžování na zkušebním standu při použití šesti závaží o celkové hmotnosti $m_{celk} = 118,8$ kg a délce ramene $l = 981$ mm.

$$\tau_{MAX} = \frac{M_{kMAX}}{W_k} \quad (25)$$

Poslední veličinou, kterou lze formulovat je výstupní napětí (odvozeno ze vztahu 20)

$$U = \frac{\tau U_B 2k}{G} \quad (26)$$

Po dosazení do výše uvedených vzorců a následné výsledné hodnoty jsou vypočteny v tabulce

Parametr	Hodnota
Průřezový modul v krutu W_k	44843,705m ³
Maximální kroučící moment M_{kMAX}	1143284,87Nmm
Napětí v krutu τ	25,49N/mm ²
Výstupní napětí U	958,42mV

Tab. 6: Parametry měření

4.1 1. Kalibrační měření

Kalibrační měření proběhlo na dvou měřících ústřednách a zároveň byl proveden výpočet i analyticky podle vztahu viz 27. Vypočtené hodnoty jsou zaznamenány v tab. 7. První měřící stanice je od National Instruments s označením NI PXI-1073, druhá pak datalogger. Pro jednotlivé měřící aparatury jsou naměřeny hodnoty krouticích momentů a ty jsou pak vyneseny do grafů. Poslední fází měření je vhodně určit kalibrační konstantu, která vyrovnává nepřesnosti měření způsobené například zkorodovaným povrchem, špatně nalepenými tenzometry a jiné nedostatky, které mohly vzniknout při měření či lepení.

$$M_k = nmlg, \quad (27)$$

kde n je rovno počtu závaží

Počet závaží n	Krouticí moment M_k [Nmm]
0	0
1	191637,25
2	388284,63
3	577416,82
4	770306,6
5	963196,38
6	1153581,12

Tab. 7: Vypočtené hodnoty

Při měření stanicí NI PXI-1073 je nutné aplikovat vztah pro výpočet krouticího momentu, který byl již vyjádřen

$$M_k = \frac{2 \cdot W_k G U}{k U_B} \quad (28)$$

Počet závaží n	Poměr U/U_B	Krouticí moment M_k [Nmm]
0	0	0
1	51	191637,25
2	101,6	381771,47
3	152,6	573408,72
4	203,7	765421,73
5	254,5	956307,46
6	305,7	1148696,23

Tab. 8: Naměřené hodnoty NI PXI-1073

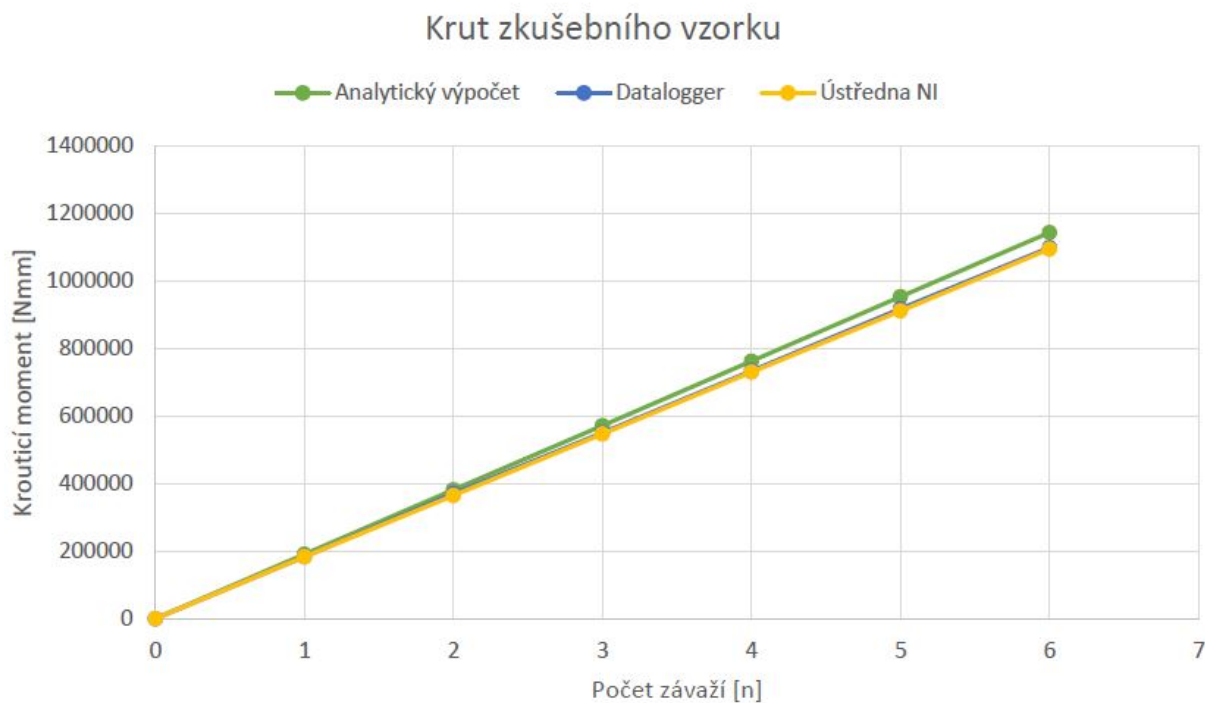
U měření dataloggerem je výpočet krouticího momentu vyjádřen stejným vztahem jako tomu bylo u prvního případu. Rozdíl nastává pouze v získání napětí U_i , kde velikost $U_{i0+} = -975mV$ je způsobena ofsetem, u NI PXI-1073 byl ofset odstraněn ústřednou.

$$U_i = U_{i0+} - U_{i+} \quad (29)$$

Rozdíl napětí U_i [mV]	Napětí U_{i+} [mV]	Krouticí moment M_k [Nmm]
0	-975	0
153	-1128	191637,25
310	-1285	388284,63
461	-1436	577416,82
615	-1590	770306,60
769	-1744	963196,38
921	-1896	1153581,12

Tab. 9: Naměřené hodnoty dataloggerem

Naměřené hodnoty jsou zaznamenány v grafu, nejdříve bez kalibrační konstanty.



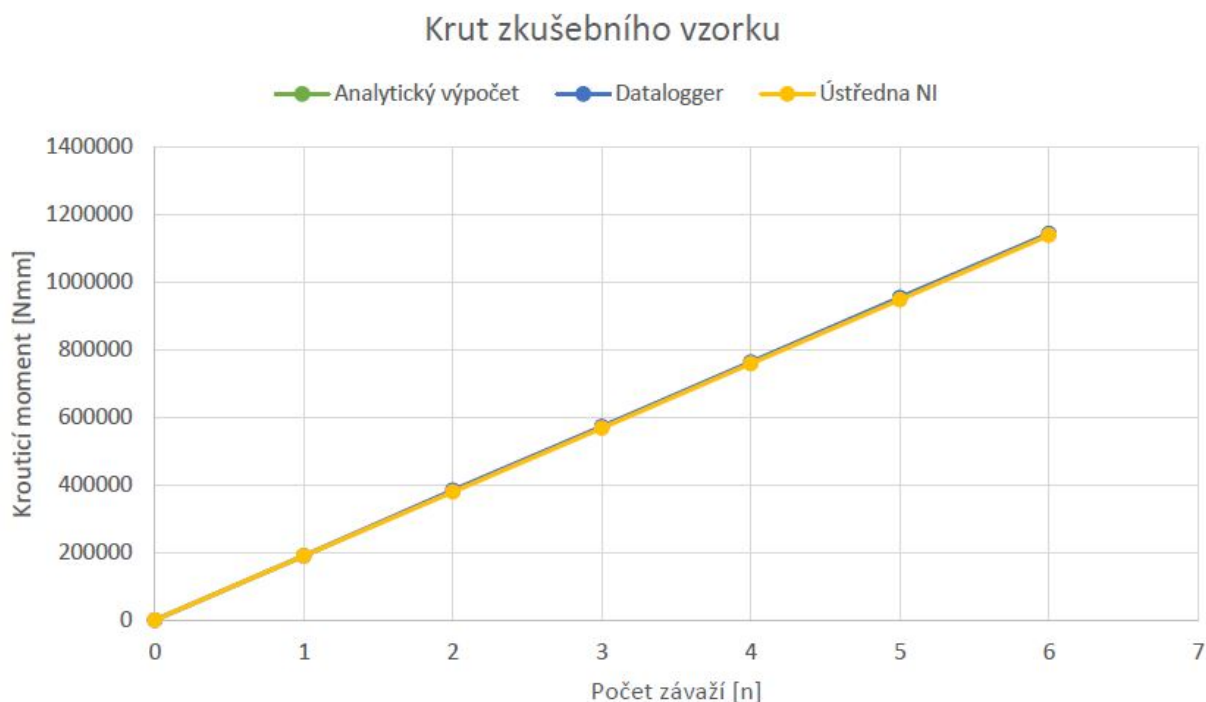
Obr. 80: Krut prototypu deformačního členu (bez kalibrační konstanty)

Dále je vypočtena velikost odchylek v procentech

Měření	Krouticí moment [Nmm]	Maximální chyba [%]
Analytika	1143284,87	
NI PXI-1073	1093996,41	4,3
Datalogger	1098648,67	3,9

Tab. 10: Velikost odchylky měření

Následný graf zobrazuje hodnoty s velikostí kalibrační konstanty $k = 1,04$.



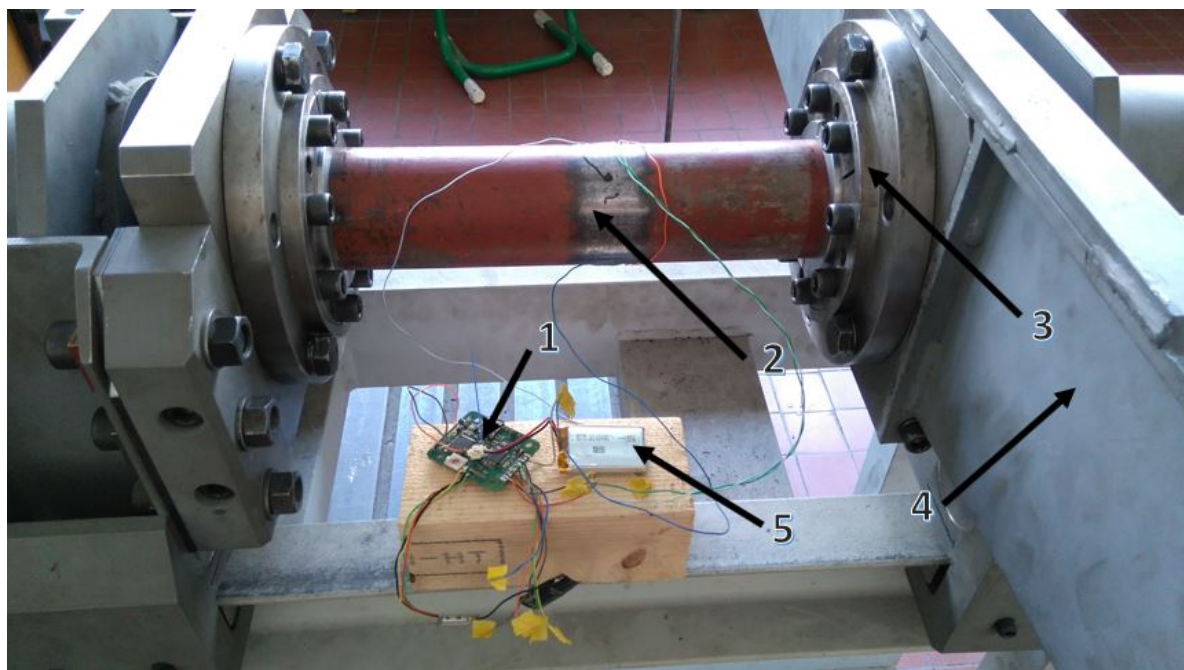
Obr. 81: Krut prototypu deformačního členu s kalibrační konstantou

Velikost odchylek s použitím kalibrační konstanty.

Měření	Krouticí moment [Nmm]	Maximální odchylka [%]
Analytika	1143284,87	
NI PXI-1073	1137756,27	0,48
Datalogger	1142594,62	0,1

Tab. 11: Velikost odchylky měření s kalibrační konstantou

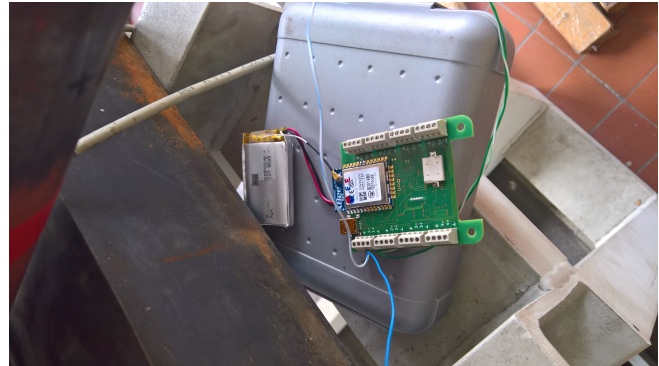
Po srovnání obou tabulek lze říci, že při použití nízké kalibrační konstanty ($k = 1,04$) je měření téměř shodné s analytickým výpočtem. Odchylka je způsobena nedokonalostí vnitřního průměru d trubky, protože i malý rozdíl průměrů silně ovlivní konstantu Wk . Deformační člen je vyroben ze staré vrtné tyče, který má velmi drsný a zrezivělý vnitřní povrch. Obrábění tohoto povrchu by bylo velmi náročné. Pro další měření je vhodné mít zcela nový deformační člen aby se dosáhlo nulových odchylek. Z tohoto důvodu byla zavedena kalibrační konstanta, kde se odchylky pro maximální hodnoty momentu pohybují maximálně do 0,5 % nepřesnosti.



Obr. 82: Průběh měření na standu, 1 - Datalogger, 2 - Deformovaná trubka, 3 - Svěrné pouzdro, 4 - Rameno standu se zátěží, 5 - Li-Pol akumulátor

4.2 2. Kalibrační měření

Při druhém kalibračním měření je použito zařízení datalogger s označením LPDR (obr. 83). Měření probíhalo obdobně jako při prvním měření viz v kapitole 4.1 výše. Jediným rozdílem je odlišnost standu, kdy při prvním měření se využil stand na krut o délce ramene $l = 981$ mm



Obr. 83: Datalogger LPDR

viz obr. 82. Při tomto měření se zařízením LPDR se použil stand na ohyb a krut o délce ramene $l = 500$ mm viz 84. V následujících grafech je možné si všimnout, že tenzometry dokonale kompenzují ohyb měřeného vzorku.



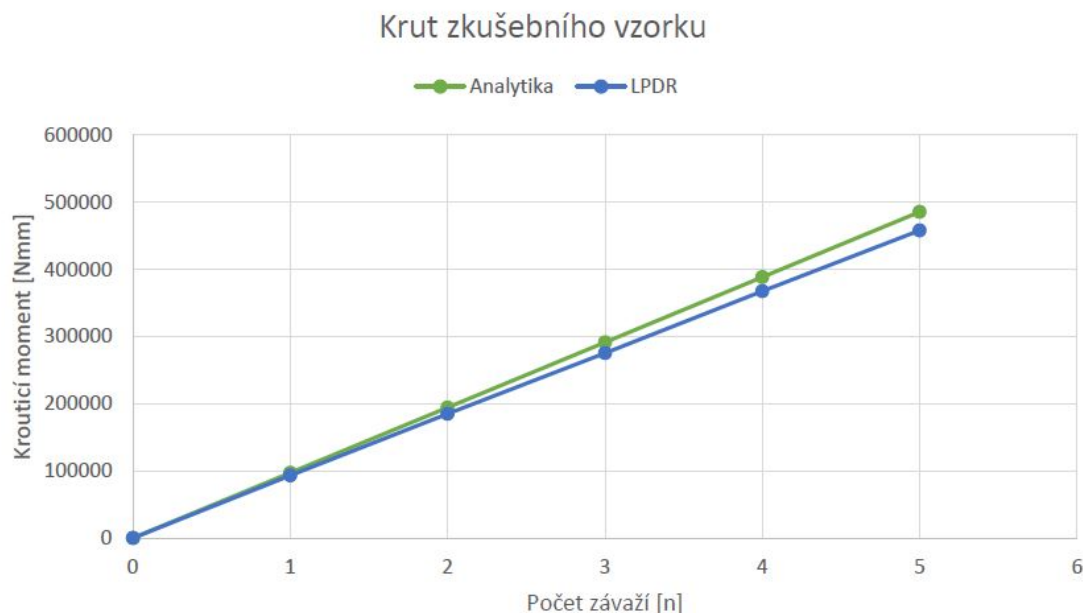
Obr. 84: Průběh druhého měření na standu

Dále jsou opět měřeny hodnoty napětí můstku a dle výpočtu 29 a následné rovnice 28 lze dostat výsledný krouticí moment, který je pak porovnáván s analytickým výpočtem. Vše je zaznamenáváno do grafu, nejprve bez kalibrační konstanty viz obr. 85, poté s kalibrační konstantou viz obr. 86.

Rozdíl napětí U_i [mV]	Napětí U_{i+} [mV]	Krouticí moment M_k [Nmm]
0	-1252	0
78	-1330	97679
155	-1407	194142
231	-1483	289335
308	-1560	385780
384	-1636	480972

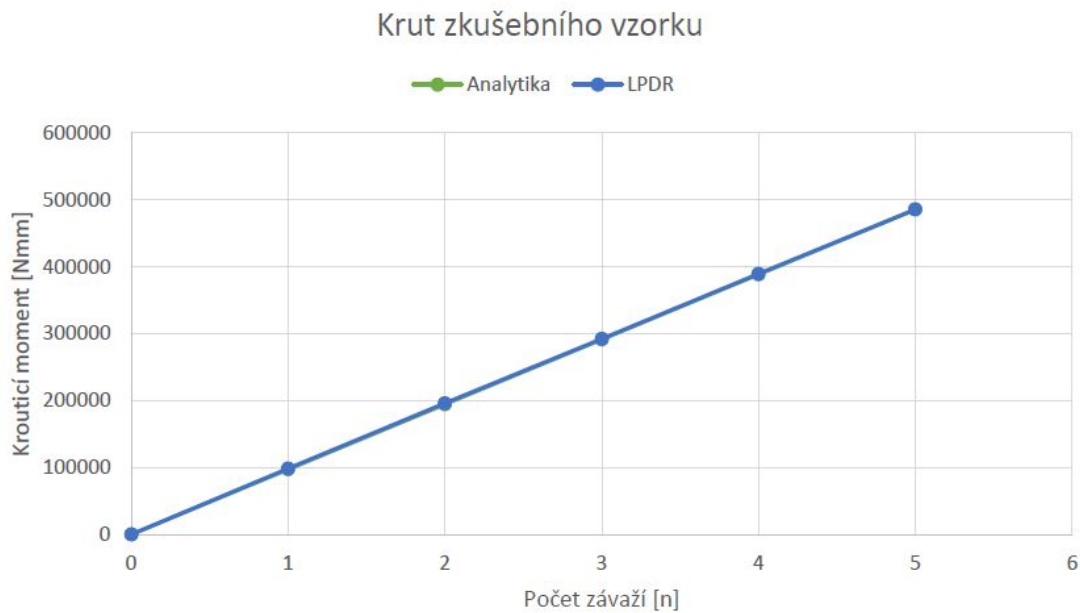
Tab. 12: Naměřené hodnoty LPDR

Naměřené hodnoty jsou zaznamenány v grafu nejdříve bez kalibrační konstanty.



Obr. 85: Krut prototypu deformačního členu (bez kalibrační konstanty)

Následný graf hodnot s velikostí kalibrační konstanty $k = 1,06$.



Obr. 86: Krut prototypu deformačního členu s kalibrační konstantou

Měření	Kroucí moment [Nmm]	Maximální odchylka [%]
Analytika	485595	
LPDR (bez kalibrace)	458069	5,67
LPDR (s kalibrací)	485553	0,01

Tab. 13: Velikost odchylky měření zařízením LPDR

V tabulce 13 si lze všimnout, že bez použití kalibrační konstanty se maximální odchylka reálného měření od analytického výpočtu rovná 5,67%. Použitím kalibrační konstanty se odchylka rovná pouze 0,01%, což je opět velmi dobrý výsledek měření.

4.3 MKP ověření měření

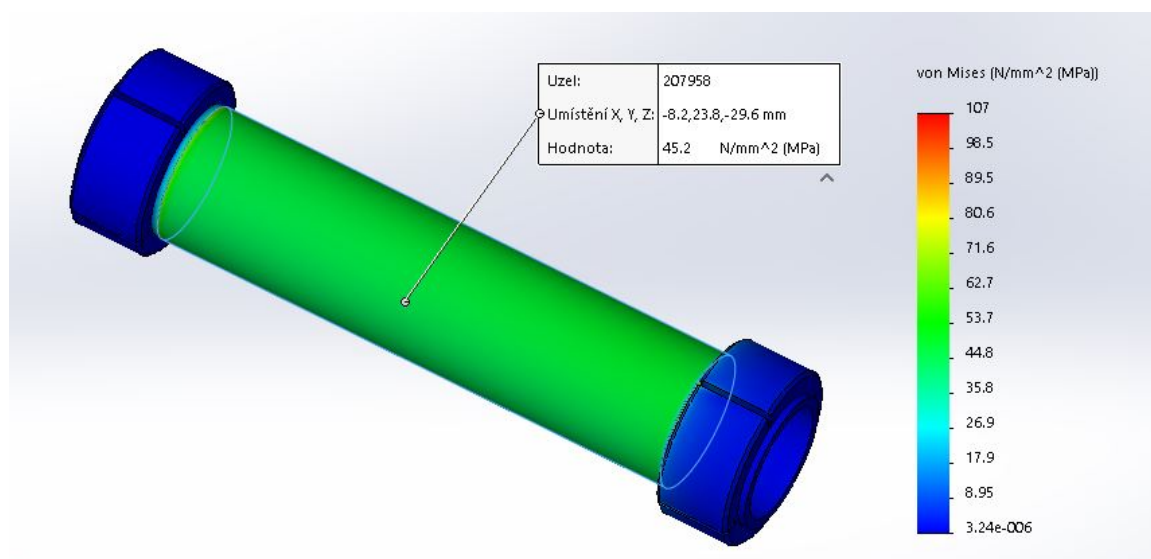
V této kapitole je proveden výpočet metodou konečných prvků pro ověření naměřených hodnot v kap. 4.1. Na obr. 87 lze vidět oblast, která je ovlivněna maximálním působícím krouticím momentem $M_{kMAX} = 1143284,9 \text{ Nmm}$. Jak si lze všimnout, napětí vyprodukované krouticím momentem je rovnoměrně rozmístěno po zkušební vzorku. Podle hypotézy von Mises se napětí pohybuje okolo $\sigma_{RED} = 45 \text{ N/mm}^2$, což je redukované napětí. S porovnáním s maximálním napětím z analytického výpočtu $\tau_{MAX} = 25,5 \text{ N/mm}^2$ se hodnota musí upravit dle výrazu

$$\tau_{MAX} = \frac{\sigma_{RED}}{\sqrt{3}} = 26 \text{ N/mm}^2 \quad (30)$$

Metoda	$\tau_{MAX} [\text{N/mm}^2]$
Analytický výpočet	25,5
Výpočet MKP	26

Tab. 14: Porovnání metod výpočtu τ_{MAX}

Jak lze vidět v tab. 14 se hodnoty τ_{MAX} od sebe liší velmi nepatrně. Tím je možné říci, že ověření MKP metodou potvrdilo správnost analytického výpočtu.



Obr. 87: Velikost napětí prototypu deformačního členu podle hypotézy von Mises

5 Závěr

V této diplomové práci byla zpracována problematika týkající se tenzometrického měření a jádrového vrtání. Dále byly navrhnuty dvě varianty ochranných pouzder, kde více vyhovující varianta je dovedena do finální verze. V poslední řadě byla provedena dvě experimentální měření s různými měřicími přístroji. Práce je tímto rozdělena na tři hlavní části.

V první části je podrobně rozvedena práce s tenzometry. Jsou zde probrány jednotlivé typy tenzometrů a jejich vhodné použití. Poté jsou řešeny úpravy povrchu měřeného vzorku, instalace a zapojení tenzometrů s využitím Wheatstonova můstku (plného mostu). Dále je probrána problematika jádrového vrtání. Jsou zde zmíněny typy vrtných souprav, které se běžně používají v provozu. Byly popsány i nástroje pro jádrové vrtání.

Následně byla provedena konstrukce ochranného pouzdra. Musela být nakonstruována tak, aby bylo možné snadno do pouzdra umístit komponenty jako datalogger a akumulátory. Hlavním požadavkem pouzdra byla těsnost, snadná dostupnost a vysoká spolehlivost při vrtných procesech. Z počátku byly navrženy dvě konstrukce ochranných pouzder. Podle metody vícekritériálního rozhodování se vybrala kritéria, podle kterých se určila více vyhovující varianta. Tato varianta je navržena až do konečné fáze.

Poslední pasáží diplomové práce byla provedena dvě experimentální měření krouticího momentu na zkušebním zařízení. Při prvním měření byla použita dvě zařízení, datalogger a ústředna od National Instruments NI PXI-1073. Výsledky byly nepatrně odlišné od analytického výpočtu. V práci je vysvětleno, čím může tato odchylka vznikat. Pomocí kalibrační konstanty $k = 1,04$ jsou výsledky téměř totožné. Při druhém měření byl použit datalogger s označením LPDR, kde naměřené výsledky se daly považovat za velmi podobné jako tomu bylo u předchozí měření a za využití kalibrační konstanty $k = 1,06$ lze výsledky měření považovat za velmi přesné.

6 Seznam použité literatury a zdrojů

Reference

- [1] JANÍČEK, Přemysl. Technický experiment. Brno: Ediční středisko VUT, 1989. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 9788021410114
- [2] Deformeter EDU. Huggenberger Ag [online]. Švýcarsko [cit. 2018-02-28]. Dostupné z: <http://www.huggenberger.com/en/measuring-devices-for>
- [3] Experimentální metody v mechanice [online]. Ostrava: prof. Ing. Pavel Macura, DrSc, 2013 [cit. 2018-02-28]. ISBN 978-80-248-3018-6. Dostupné z: http://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY_01_007
- [4] Odporové tenzometry. Automatizace.hw.cz [online]. 2017 [cit. 2018-02-28]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz>
- [5] Tenzometrická měření [online]. Brno, 2012 [cit. 2018-04-11]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=53920 Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [6] Odporové tenzometry. Měření tlaku [online]. [cit. 2018-02-28]. Dostupné z: <http://uprt.vscht.cz/ucebnice/mrt/F4/F4k42-tlak.htm#k424>
- [7] Fóliové tenzometry. HBP měřící technika [online]. Praha [cit. 2018-02-28]. Dostupné z: <https://www.hbm.cz/produkty/rada-y/xy2-xy4-krut-smyk/>
- [8] Měření síly pomocí tenzometrů zapojených do můstku. Měření tenzometry [online]. [cit. 2018-02-28]. Dostupné z: http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske/STB/3_LU_tenzometry.pdf
- [9] HRUŠKA, František. Senzory: Fyzikální principy, úpravy signálů, praktické použití. Zlín, 2011. ISBN 978-80-7454-096-7.
- [10] 1-channel telemetry for rotating shafts. KMT Telemetry [online]. Mnichov [cit. 2018-03-01]. Dostupné z: <https://www.kmt-telemetry.com/telemetry/1-channel-telemetry/t1-pcm-ind/>

- [11] Kapacitní snímač hladiny. MM GROUP s.r.o. [online]. Ostrava [cit. 2018-03-01]. Dostupné z: www.mmgroup.cz/kapacitni-snimac-hladiny-cis-3z-a-cis-3z/ex/
- [12] Technika a technologie hlubinného vrtání. Institut geologického inženýrství [online]. Ostrava [cit. 2018-03-01]. Dostupné z: <http://geologie.vsb.cz/>
- [13] Jak na jádrové vrtání. GENT [online]. [cit. 2018-03-01]. Dostupné z: <http://www.gent.cz/jak-na-jadrove-vrtani/>
- [14] Jádrové vrtání. Diamantové vrty [online]. [cit. 2018-03-01]. Dostupné z: <http://www.diamantovevrty.cz/jadrove-vrtani>
- [15] ZIF 1200-MR. ALL BIZ [online]. Moskva [cit. 2018-03-01]. Dostupné z: <https://ru.all.biz/burovaya-ustanovka-zif-1200-mr-g1433918>
- [16] UA-INFO Drilling rig URB-3AM [online] . Kyjev [cit. 2018-03-01]. Dostupné z: <https://avto.ua-info.kiev.ua>
- [17] Inženýrskogeologické průzkumné práce [online]. Ostrava [cit. 2018-03-01]. Dostupné z: <http://departments.fsv.cvut.cz/k135/wwwold/webkurzy/ig/ig-web/sondy.html>
- [18] GRAPDIAMANT Diamantová jádrová vrtací korunka. Vrtací korunky [online]. Ostrava [cit. 2018-03-01]. Dostupné z: <https://www.vrtacikorunky.cz>
- [19] Pružnost a pevnost I - Podklady pro přednášky [online]. 9. dopl. vyd. Praha, 2018 [cit. 2018-04-11]. Dostupné z: http://pruznost.unas.cz/PP_I_17_18.pdf
- [20] Vodicí lišta pro tenké karty. Essentra Components [online]. [cit. 2018-03-15]. Dostupné z: <https://www.essentracomponents.cz/vodici-listy-se-sterbinou-a-manipulatory>
- [21] CLEVER TECH [online]. [cit. 2018-03-01]. Dostupné z: <http://www.cleverttech.cz/>
- [22] Závitové vložky. Simaf [online]. [cit. 2018-03-15]. Dostupné z: <https://www.simaf.cz/spojovaci-material-do-plastu/zavitove-vlozky>

7 Seznam obrázků a tabulek

Seznam obrázků

Obrázek 1	Huggenbergerův tenzometr [2]	4
Obrázek 2	Schéma Martensova tenzometru [3]	4
Obrázek 3	Strunové tenzometry [3]	5
Obrázek 4	Pneumatický tenzometr [2]	5
Obrázek 5	Tenzometrický snímač [4]	6
Obrázek 6	Deformační křivka [5]	7
Obrázek 7	Princip tenzometru [6]	8
Obrázek 8	Wheatstoneův můstek [8]	9
Obrázek 9	Poloviční můstek [8]	9
Obrázek 10	Čtvrtinový můstek [8]	9
Obrázek 11	Změny odporů při ohybu [8]	10
Obrázek 12	Drátkové tenzometry [1]	11
Obrázek 13	Fóliový tenzometr [7]	11
Obrázek 14	Drátové tenzometry [1]	12
Obrázek 15	Tenzometrický kříž [1]	12
Obrázek 16	Tenzometrická růžice [1]	12
Obrázek 17	Membránová růžice [1]	13
Obrázek 18	Smykový snímač [1]	13
Obrázek 19	Schéma polovodičového senzoru a jeho charakteristika pro různé plyny [9]	15
Obrázek 20	Indukčnostní tenzometr [10]	16
Obrázek 21	Změna vzduchové mezery [1]	16
Obrázek 22	Změna polohy [1]	16
Obrázek 23	Změna permeability [1]	16
Obrázek 24	Změna vzdálenosti polepů [1]	17
Obrázek 25	Změna velikosti plochy kondenzátoru [1]	17
Obrázek 26	Kapacitní snímač [11]	17

Obrázek 27	Tenzometr na měření krutu (smyku) [7]	18
Obrázek 28	Hrubé čištění povrchu [19]	18
Obrázek 29	Jemné čištění povrchu [19]	19
Obrázek 30	Označení polohy [19]	19
Obrázek 31	Přilepení lepící páskou [19]	20
Obrázek 32	Lepení tenzometru [19]	20
Obrázek 33	Připojení vodičů [19]	20
Obrázek 34	Kontrola elektrické funkčnosti [19]	20
Obrázek 35	Znázornění tenzometrů na trubce [7]	21
Obrázek 36	Zapojení tenzometrů	21
Obrázek 37	Schéma plného můstku	21
Obrázek 38	Propojení tenzometrů	21
Obrázek 39	Vrtná souprava MVS 1 [12]	23
Obrázek 40	Jádrové vrtání [12]	23
Obrázek 41	Jádrové vrtání do betonu s použitím vodního výplachu [13]	24
Obrázek 42	Dělník při práci [14]	24
Obrázek 43	Schéma vrtu a vrtné kolony [12]	25
Obrázek 44	Ruční vrtná souprava HILTI [12]	26
Obrázek 45	Vrtná souprava ZIF 1200-MR [15]	27
Obrázek 46	Vrtná souprava DIAMEC 250 [12]	27
Obrázek 47	Vrtná souprava URB-3AM [16]	28
Obrázek 48	Schéma ruské soupravy URB, popis jednotlivých částí: 1 - sklopná věž, 2 - vrátek, 3 - rotační stůl, 4 - motor, 5 - ovládací zařízení [12]	28
Obrázek 49	Lžícový vrták [17]	29
Obrázek 50	Vrtací korunky diamantové [18]	29
Obrázek 51	Schéma diamantové korunky, popis: 1 Tělo - spojovací článek vrtné kolony a pracovní částí nástroje, 2 Pracovní část - tvořena diamanty a nosnou maticí, 3 Výplachové kanálky [12]	30
Obrázek 52	Schéma roubíkové korunky [12]	31
Obrázek 53	Schéma valivé korunky [12]	31

Obrázek 54	Vrtací tyče - spojení pomocí vnějšího a vnitřního šestihrannu .	32
Obrázek 55	Schéma vrtné sestavy osazené senzorem zajišťujícím on-line bezdrátový přenos dat	33
Obrázek 56	Návrh deformačního členu	34
Obrázek 57	Hardware LPDR strana svorkovnic	36
Obrázek 58	Hardware LPDR strana součástek	37
Obrázek 59	Koncepční návrh č.1	38
Obrázek 60	Omezující rozměry	39
Obrázek 61	Lišta na tenké karty[20]	39
Obrázek 62	Rozmístění komponent	40
Obrázek 63	Limitní rozměry	41
Obrázek 64	Návrh č.2	41
Obrázek 65	Pouzdro s akumulátory	42
Obrázek 66	Pouzdro s dataloggerem	42
Obrázek 67	Propojovací kanálek	42
Obrázek 68	Varianta č. 1	46
Obrázek 69	Varianta č. 2	46
Obrázek 70	Ochranné pouzdro	47
Obrázek 71	Katalogový list závitových vložek Simaf [22]	48
Obrázek 72	Montáž za studena závitových vložek [22]	48
Obrázek 73	Těsnění senzoru (černá barva)	49
Obrázek 74	Pojistný prvek	49
Obrázek 75	Pojištění pomocí navařeného kotouče	50
Obrázek 76	Deformační člen s navařenou přírubou	51
Obrázek 77	Senzor s ochranným pouzdem	52
Obrázek 78	Zkušební stand	53
Obrázek 79	Rozložení zkrutného napětí [7]	54
Obrázek 80	Krut prototypu deformačního členu (bez kalibrační konstanty)	59
Obrázek 81	Krut prototypu deformačního členu s kalibrační konstantou . .	60

Obrázek 82	Průběh měření na standu, 1 - Datalogger, 2 - Deformovaná trubka, 3 - Svěrné pouzdro, 4 - Rameno standu se zátěží, 5 - Li-Pol akumulátor	61
Obrázek 83	Datalogger LPDR	62
Obrázek 84	Průběh druhého měření na standu	62
Obrázek 85	Krut prototypu deformačního členu (bez kalibrační konstanty)	63
Obrázek 86	Krut prototypu deformačního členu s kalibrační konstantou . .	64
Obrázek 87	Velikost napětí prototypu deformačního členu podle hypotézy von Mises	65

Seznam tabulek

Tabulka 1	Váha kritérií	44
Tabulka 2	Dílčí váhy kritérií	44
Tabulka 3	Agregace kritérií (bez ohledu váhy kritérií)	45
Tabulka 4	Agregace kritérií (s ohledem váhy kritérií)	45
Tabulka 5	Parametry měření	55
Tabulka 6	Parametry měření	56
Tabulka 7	Vypočtené hodnoty	57
Tabulka 8	Naměřené hodnoty NI PXI-1073	58
Tabulka 9	Naměřené hodnoty dataloggerem	58
Tabulka 10	Velikost odchylky měření	59
Tabulka 11	Velikost odchylky měření s kalibrační konstantou	60
Tabulka 12	Naměřené hodnoty LPDR	63
Tabulka 13	Velikost odchylky měření zařízením LPDR	64
Tabulka 14	Porovnání metod výpočtu τ_{MAX}	65

8 Seznam použitých značek a symbolů

σ	$[N/mm^2]$	Napětí v tahu
E	$[MPa]$	Modul pružnosti v tahu
Δl	$[m]$	Prodloužení
l_0	$[m]$	Původní délka
R	$[\Omega]$	Odpor vodiče
ρ	$[kg/m^3]$	Hustota vodiče
S	$[m^2]$	Obsah vodiče
l	$[m]$	Délka vodiče
δR	$[1]$	Parciální derivace odporu vodiče
$\delta \rho$	$[1]$	Parciální derivace hustoty vodiče
δS	$[1]$	Parciální derivace obsahu vodiče
μ	$[1]$	Poissonovo číslo
ψ	$[1]$	Poměrná deformace v příčném směru
ϵ	$[1]$	Poměrná deformace v podélném směru
ΔR	$[\Omega]$	Přírůstek odporu tenzometru
k	$[1]$	Citlivost (konstanta) tenzometru
U_1	$[V]$	Vstupní napětí můstku
U_2	$[V]$	Výstupní napětí můstku
$\Delta \rho$	$[kg/m^3]$	Přírůstek hustoty tenzometru
π_i	$[1]$	Piezo-resistivní součinitel
C	$[F]$	Kapacita tenzometru
δ	$[1]$	Vzdálenost polepů
ϵ_c	$[1]$	Dielektrická konstanta prostředí
T_n	$[1]$	Odporové tenzometry
U_B	$[V]$	Vstupní (budící) napětí
τ	$[N/mm^2]$	Napětí v krutu
G	$[MPa]$	Modul pružnosti ve smyku
γ	$[1]$	Zkos

ϵ_i	[1]	Poměrná deformace z plného mostu
M_k	[Nm]	Krouticí moment
W_k	[m ³]	Průřezový modul v krutu
π	[1]	Ludolfovo číslo
D	[mm]	Vnější průměr zkušební vzorku
d	[mm]	Vnitřní průměr zkušební vzorku
t	[mm]	Tloušťka stěny zkušební vzorku
n	[1]	Počet závaží
m	[kg]	Hmotnost závaží
l	[m]	Délka ramene
U_i	[V]	Výstupní napětí i
l	[m]	Délka ramene

9 Seznam příloh

Příloha 1	Deformační člen - návrhový výkres	DP-00-01
-----------	-----------------------------------	----------