ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení

Bakalářská práce

Návrh přípravku pro vícesnímačové měření vlastností nehomogenních vzorků za vysokých tlaků

2020 **Daniel Hrdinka**

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hrdinka** Jméno: **Daniel** Osobní číslo: **473431**

Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**

Zadávající katedra/ústav: **Ústav výrobních strojů a zařízení**

Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**

Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Návrh přípravku pro vícesnímačové měření vlastností nehomogenních vzorků za vysokých tlaků

Název bakalářské práce anglicky:

Design of a device for multisensor measurement of properties of inhomogeneous samples at high pressures

Pokyny pro vypracování:

Navrhněte přípravek pro vícesnímačové měření vlastností nehomogenních vzorků za vysokých tlaků.Jako vzorek se uvažuje koule o průměru 80±0,2 mm,pracovní prostředí bude vysokotlaká nádoba s hydrostatickým tlakem max. 400 MPa s rozměry vnitřního prostoru nádoby - □ průměr 120 x 220 mm,tlakové médium bude olej ISOPAR N o provozní teplotě do 35°C. Je požadováno umístit 202 snímačů po ploše vzorku (rozmístění dle výkresu PZ-202).Pro upevnění konstrukce možno využít tři otvory M4 na víku nádoby.Snímače je potřeba dotlačovat ke vzorku, neboť ten se vlivem tlaku zmenšuje; maximální posuv 1 mm ve směru snímače. Rozsah textové části: 40-60 stran; Rozsah grafické části: výkres sestavy včetně kusovníku, vybrané výrobní výkresy;

Seznam doporučené literatury:

Saxena, Vimal Krief, Michel Adam, Ludmila. (2018). Handbook of Borehole Acoustics and Rock Physics for Reservoir Characterization. (pp. 327-378). Elsevier.; CHVÁLA, Břetislav a Josef VOTAVA. Přípravky. Praha: SNTL, 1988.; PROS, Z., T. LOKAJÍČEK a K. KLÍMA. Laboratory Approach to the Study of Elastic Anisotropy on Rock Samples. Pure and Applied Geophysics [online]. 1998, 151(2-4), 619-629 [cit. 2020-01-13]. DOI: 10.1007/s000240050133. ISSN 0033-4553. Dostupné z: http://link.springer.com/10.1007/s000240050133.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Tomáš Krannich, Ph.D., ústav výrobních strojů a zařízení FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Mgr. Tomáš Svitek, Ph.D., AV ČR

Datum zadání bakalářské práce: **29.04.2020** Termín odevzdání bakalářské práce: **19.07.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2020**

Ing. Tomáš Krannich, Ph.D.	Ing. Matěj Sulitka, Ph.D.	prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis vedoucí(ho) práce	podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry	podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

9.7.2020

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

© ČVUT v Praze, Design: ČVUT v Praze, VIC

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl v přiloženém seznamu veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 17. 7. 2020 ……

podpis

Poděkování

Úvodem bych chtěl poděkovat vedoucím mé bakalářské práce, panu Ing. Tomáši Krannichovi, Ph.D. a panu Ing. Pavlovi Vrbovi, Ph.D., který vedl moji bakalářskou práci v samém úvodu, za vedení, podnětné rady a připomínky při vypracování bakalářské práce.

Dále také děkuji zaměstnancům Geologického ústavu Akademie věd České republiky, v. v. i., zejména konzultantovi BP panu Mgr. Tomáši Svitkovi, Ph.D. a vedoucímu oddělení panu Ing. Tomáši Lokajíčkovi, CSc., za množství podnětných rad a informaci, bez kterých by tato bakalářská práce nemohla vzniknout.

Děkuji také svým rodičům za podporu a trpělivost, se kterou mě podporovali v průběhu celého studia i této práce.

Anotace

Autor:	Daniel Hrdinka
Název BP:	Návrh přípravku pro vícesnímačové měření vlastností nehomogenních vzorků za vysokých tlaků
Rozsah práce:	40 str., 23 obr., 4 tab.
Školní rok vyhotovení:	2019/2020
Škola	ČVUT – Fakulta strojní
Ústav:	12135 - Výrobní stroje a zařízení
Vedoucí bakalářské práce:	Ing. Tomáš Krannich, Ph.D.
Konzultant:	Mgr. Tomáš Svitek, Ph.D.
Zadavatel:	Geologický ústav Akademie věd České republiky, v. v. i.
Využití:	Přípravek se bude využívat pro uchycení horninového vzorku a 202 ultrazvukových snímačů k měření elastické anizotropie.
Klíčová slova:	měřicí aparatura, anizotropie hornin, ultrazvukový senzor, měření za vysokého tlaku, rapid prototyping, vícesnímačové měření, vzorek horniny
Anotace:	Bakalářská práce se zabývá návrhem přípravku a jeho upevněním v přetlakovém válci pro měření nehomogenních vzorků hornin pomocí 202 ultrazvukových senzorů dotlačovaných na povrch vzorku. Obsahem práce je také návrh ultrazvukových snímačů dle předchozího funkčního modelu s ohledem na stísněné podmínky v přetlakovém válci.

Annotation

Author:	Daniel Hrdinka
Title of bachelor dissertation:	Design of a device for multisensor measurement of properties of inhomogeneous samples at high pressure
Extent:	40 p., 23 fig., 4 tab.
Academic year:	2019/2020
Univerzity:	CTU – Faculty of Mechanical Engineering
Department:	12135 – Department of Production Machines
Supervisor:	Ing. Tomáš Krannich, Ph.D.
Consultant:	Mgr. Tomáš Svitek, Ph.D.
Submitter of the Theme:	Institute of Geology of the Czech Academy of Sciences, v. v. i.
Application:	Device will be used for fixation of rock sample and 202 ultrasonic sensors. Apparatus measures elastic anisotrophy.
Key words:	apparatus for measurement, rock anisotrophy, ultrasonic sensor, high pressure measurement, rapid prototyping, multisensor measurement, rock sample
Annotation:	Bachelor's thesis deals with design of device for multisensor measurement of properties of inhomogeneous samples at high pressure. Thesis contents design of device for 202 ultrasonic sensors and design of ultrasonic sensors.

Obsah

1. Úvod 10
2. Cíl práce 11
3. Úvod do problematiky měření elastické anizotropie 12
3.1. Geologický ústav Akademie věd ČR, v. v. i. 13
3.2. Institute of Earth Sciences at Kiel 15
3.3. ErgoTech Ltd. 16
3.4. SINTEF Petroleum Research 17
4. Vícesnímačové měření 18
5. Ultrazvukové snímače 19
6. Shrnutí rešerše 22
7. Zadané parametry 23
8. Návrh tělesa přípravku a jeho upevnění 24
8.1. Návrhy tělesa přípravku 24
8.1.1. Obráběná – montáž zevnitř 25
8.1.2. Obráběná – montáž zvenku 26
8.1.3. Tisknuté z kovu 27
8.1.4. Tisknuté z plastu 27
8.2. Detailní popis vybraného návrhu klece 28
8.3. Upevnění klece 32
9. Návrh snímačů a jejich upevnění 33
9.1. Návrh snímače 34
9.1.1. Kontrola závitu na otlačení 35
9.1.2. Kontrola délkových tolerancí 36
9.2. Detailní upevnění snímačů 37

9.2.1. Pojištění třmenovým pojistným kroužkem 40
9.2.2. Pojištění maticí 40
10. Navržená konstrukce 41
10.1. Postup montáže 44
10.2. Silové účinky 45
10.3. Výměna hornin 47
11. Závěr 48
Seznamy 50
Seznam obrázků 50
Seznam tabulek 51
Seznam použitého softwaru 51
Seznam příloh 52
Seznam použité literatury 54

Přehled použitých veličin a zkratek

Symbol	Veličina	Jednotka
A	Velikost rozměru A	[mm]
A_{MAX}	Největší hodnota rozměru A	[mm]
A_{MIN}	Nejmenší hodnota rozměru A	[mm]
d_2	Roztečný průměr závitu	[mm]
F_p	Síla vyvozená pružinou	[N]
H_1	Pracovní výška profilu závitu	[mm]
$l_{\check{c}}$	Délka činného závitu	[mm]
p	Tlak působící na závit	[MPa]
p_D	Dovolený tlak	[MPa]
P	Rozteč závitů	[1]
S_z	Průmět nosné plochy závitu do příčné roviny	[mm^2]
$z_{\check{c}}$	Počet činných závitů	[1]

1. Úvod

Geologický ústav Akademie věd České republiky se zabývá tomografií hornin. Zkoumají vlastnosti, které má heterogenní hornina v různých směrech odlišné. Důležitou vlastností popisující tento jev je tzv. elastická anizotropie. K měření zmíněné veličiny používají aparaturu, do které vkládají sférický vzorek horniny a následně jej proměřují pod hydrostatickým tlakem pomocí šesti ultrazvukových snímačů. Z těchto měření získávají celkovou hodnotu elastické anizotropie měřené horniny. Pro přesné určení elastické anizotropie se vzorek a senzory vůči sobě polohují do několika určených poloh. Díky tomu senzory změří vzorek ve všech předem určených místech. Při vyšších tlacích, potřebných k přesnému určení měřené veličiny, dochází k problémům s pohyblivými částmi aparatury, které znemožňují polohování vzorku a senzorů. Popsaný měřicí proces a montáž jsou zároveň časově náročné. Tato práce se zabývá návrhem nové vícesnímačové měřicí aparatury dle zadaných parametrů z Geologického ústavu Akademie věd České republiky, v. v. i. Měla by nejen vyloučit přítomnost pohyblivých členů, které brání k dosažení vyšších tlaků při měření, ale i výrazně zefektivnit celý měřicí proces. Aparatura zároveň přinese vědcům z Geologického ústavu možnost řešení nových úloh, se kterými se dosud neměli možnost setkat.

2. Cíl práce

Tato bakalářská práce se zabývá konstrukčním návrhem přípravku pro vícesnímačové měření vlastností nehomogenních vzorků za vysokých tlaků. Cílem práce je vytvořit komplexní 3D model návrhu konstrukce přípravku měřicí aparatury dle daných vstupních požadavků.

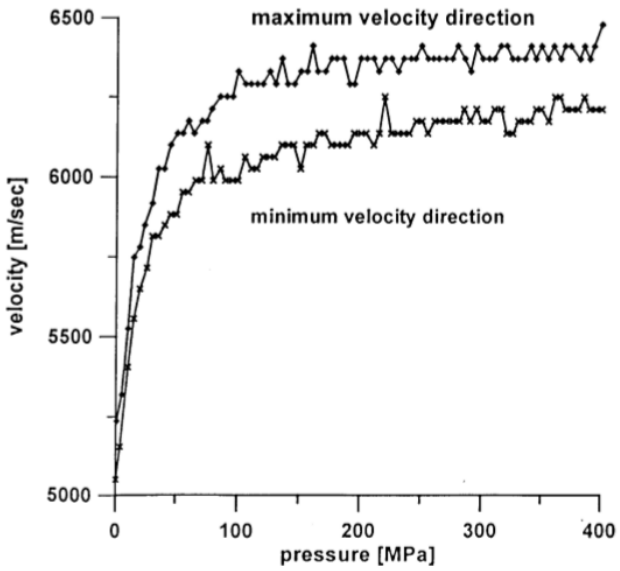
Práce obsahuje tyto části:

- rešerši obdobných typů měření a snímačů
- konstrukční návrh tělesa přípravku a jeho upevnění do stávající tlakové komory
- řešení konstrukce snímače a jeho upevnění v tělese přípravku

3. Úvod do problematiky měření elastické anizotropie

V této kapitole se píše o základech měření elastické anizotropie hornin a jsou zde představeny měřicí zařízení některých institucí, které se touto problematikou zabývají.

Závislost elastických vlastností na úhlu natočení zrn uvnitř materiálu nazýváme elastickou anizotropií [1]. Tento geofyzikální parametr lze použít ke klasifikaci hornin, interpretaci seismických měření polí a studiu struktury kůry a svrchního pláště Země [2]. Porozumění chování anizotropních hornin má také velký význam ve stavebním inženýrství a inženýrské geologii. Pomáhá při navrhování a konstrukci v horninových strukturách stavby základů, hrází a podzemních struktur. Dále také ovlivňuje odchylky vrtů a tunelů při výkopech [3].



Obrázek 1 - Závislost rychlosti P-vln na hydrostatickém tlaku [2]

Nejběžnější používanou metodou měření anizotropie v laboratoři je pomocí rychlosti šíření ultrazvukových vln [1]. Rozlišujeme dva typy vln: P-vlny (podélné) a S-vlny (příčné). Příčné vlny mohou být polarizovány horizontálně nebo vertikálně. Tato práce se zaměřuje na konstrukci přípravku pro vícesnímačové měření elastické anizotropie P-vln. Ultrazvukový piezosenzor (podrobněji v kapitole 5) vysílá skrz měřený vzorek signál, který je na druhé straně přijímán protilehlým senzorem. Měření je třeba provádět pod tlakem, protože v materiálu se vyskytují mikrotrhliny, které zpomalují prostup ultrazvuku materiálem a komplikují výstupní interpretaci hodnot. Na Obrázku 1 je graf, který ukazuje, že při hodnotě tlaku 200 MPa se

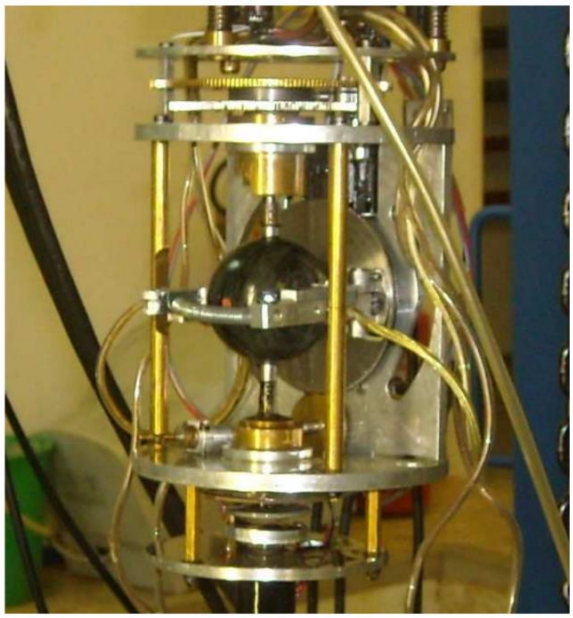
rychlosti vln postupně ustalují, což je pro měření důležité. Znamená to, že mikrotrhliny ve vnitřní struktuře vzorku se uzavřely [2]. Pokud takto proměříme vzorek v několika různých směrech, jsme schopni získat hodnotu elastické anizotropie. Přesnou hodnotu elastické anizotropie získáme při změření 132 na sobě nezávislých směrech, což lze provést pouze na sférických vzorcích. Pokud možnost proměření v tolika směrech není možné (např. z důvodu tvaru vzorku) a používáme méně senzorů a směrů k určení elastické anizotropie, pak tomuto uspořádání říkáme řídká senzorová síť [4].

Velikost vzorku při měření elastické anizotropie hraje důležitou roli. Ve větších vzorcích se objevují větší heterogenity a měření mají větší váhu [1]. Velikost vzorku je ovšem limitována metodou jeho získávání. Vzorky se připravují z jádra segmentů, které se získávají z hloubky 400 m pod zemí pomocí vědeckého vrtu. [6]

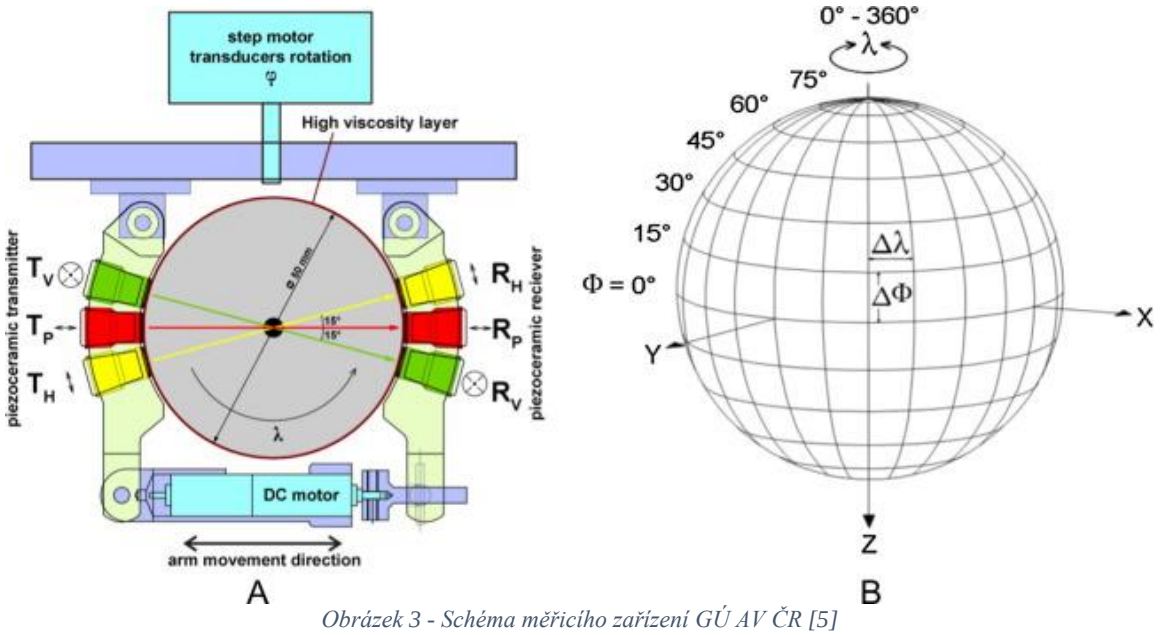
3.1. Geologický ústav Akademie věd ČR, v. v. i.

Na Geologickém ústavu používají k měření elastické anizotropie sférický vzorek horniny. Rozměr vzorku je (50 ± 0,01) mm. Umísťují ho do přípravku, který smontují a vkládají do přetlakové nádoby (viz Obrázek 2). V nádobě působí na vzorek hydrostatický tlak, jehož maximální hodnota činí 400 MPa. Tlakovým médiem je olej ISOPRAN N. V komoře se dosahuje teploty maximálně 35 °C. Přípravek obsahuje dva polohovací motory. Jeden polohuje objímkou, která nese senzory, a druhý se samotným vzorkem. Při polohování se senzory nesmí dotýkat horninového vzorku a zároveň při měření musí být senzory v neustálém kontaktu s povrchem koule, protože se koule vlivem tlaku smršťí. K tomu slouží DC motor oddalující senzory od povrchu koule při polohování (viz Obrázek 3, vlevo). Díky tomu se mohou proměřit rychlost šíření vln v různých směrech [5].

Měření se provádí pomoci šesti piezosenzorů. Tři z nich jsou vysílací a tři jsou přijímací. Senzory jsou umístěny tak, aby každá dvojice přijímač-vysílač byla v ose se středem sférického vzorku. Jeden pár senzorů pracuje s P-vlnami a zbylé dva páry s S-vlnami (jeden pár je nastaven na horizontálně polarizované vlny a druhý vertikálně). Senzory a vzorek se dle programu postupně polohují do předem daných pozic po 15°. Na obrázku 3 jsou tyto pozice vyobrazeny jako průsečíky poledníků a rovnoběžek. Kvůli uchycení koule na pólech lze s objímkou nesoucí senzory polohovat pouze do ±75°. Rotace kolem osy z je neomezená [2],[5].



Obrázek 2 - Přípravek s upevněným vzorkem



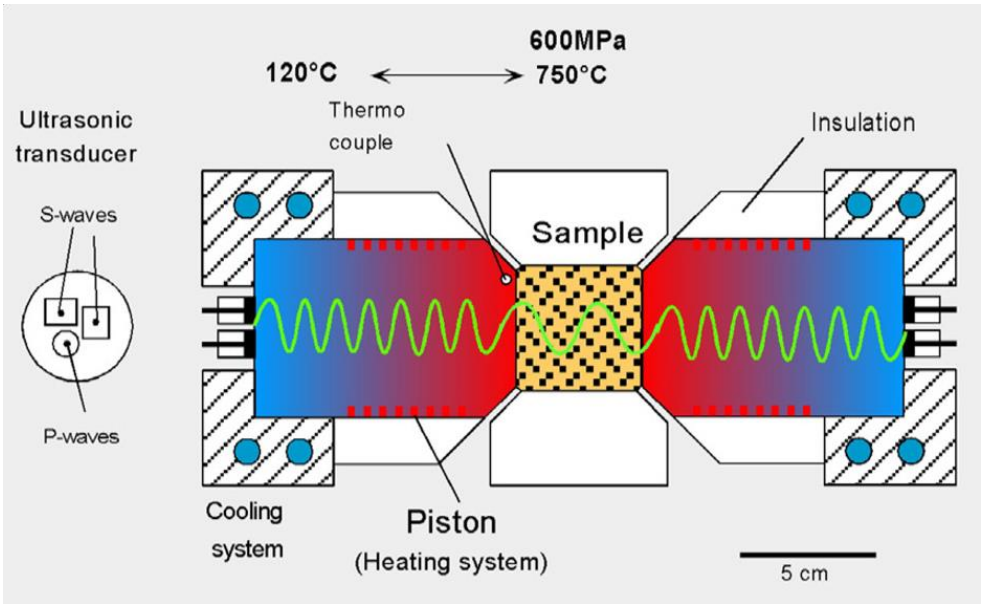
Obrázek 3 - Schéma měřicího zařízení GÚ AV ČR [5]

Měřením touto metodou jsme schopni proměřit všech 132 nezávislých směrů a přesně určit hodnotu elastické anizotropie. Montáž přípravku i měření vzorků jsou ovšem časově náročné a snižují efektivitu měření. Dále DC motor určený k oddalování senzorů od povrchu vzorku ztrácí svoji bezproblémovou funkčnost kolem hydrostatického tlaku 200 MPa a znemožňují měřit v dalších směrech. Olej se dostává do pohyblivých částí, kde tuhne a vzniká tření.

3.2. Institute of Earth Sciences at Kiel

Na ústavu přírodních věd v Kielu se k měření používá krychlový vzorek horniny o délce hrany 43 mm. Vkládá se do přístroje mezi pyramidální písty, které na vzorek vyvozují tlak až do hodnoty 600 MPa. Písty jsou ohřívány až na teplotu 750 °C. Zmíněné podmínky měření simulují reálné podmínky pod povrchem Země. Z tohoto důvodu není možné, aby se senzory umístily do blízkosti vzorku – roztavily by se. Tři vysílací ultrazvukové snímače jsou umístěny až za pyramidálními písty, kde je teplota značně nižší. Na protější straně přístroje v ose se středem krychle se umisťují tři přijímací senzory dle konfigurace na Obrázku 4. Jejich vzdálenost od vzorku je pevně dána kvůli identifikaci získaných dat, ze kterých je nutné odečíst dobu cesty od vysílače na povrch vzorku a z povrchu vzorku do přijímače. Místa kolem senzorů se aktivně chladí, aby nedošlo k dosažení Curieovy teploty v okolí senzorů, protože by došlo ke ztrátě piezoelektrických vlastností důležitých pro vznik signálu (viz kapitola 5) [6].

Při měření se skrz vzorek vysílá z jednoho senzoru P-vlna a ze zbylých dvou stejně polarizované S-vlny. Vzorek se měří ve třech ortogonálních osách. Po dokončení měření v jedné ose je třeba vzorek vyjmout a manuálně otočit do další osy. V každé se postupně otáčí po 10° do 36 poloh [6].

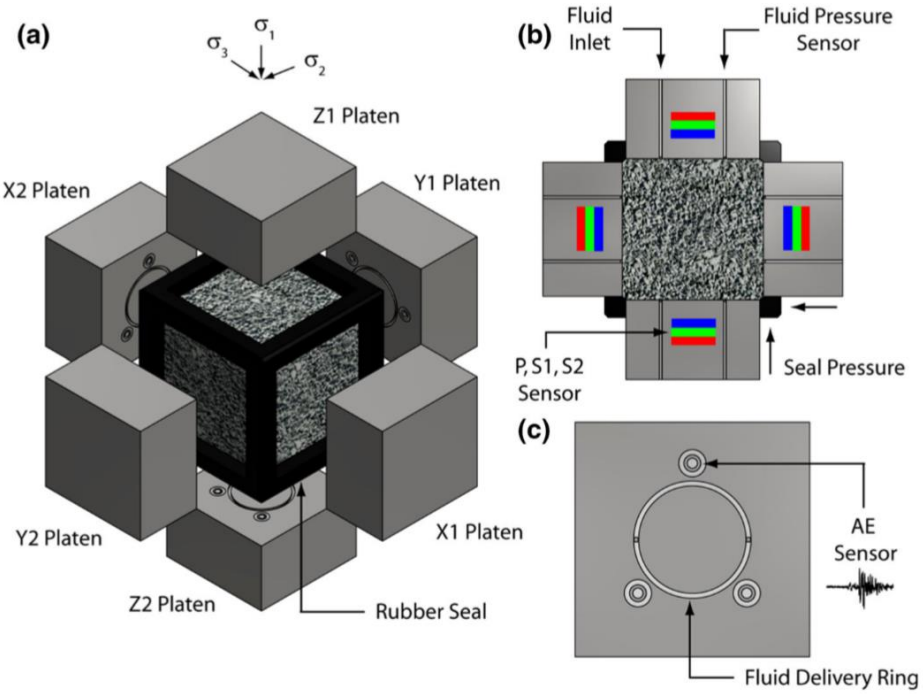


Obrázek 4 - Schéma měřicího zařízení Kiel [6]

3.3. ErgoTech Ltd.

Ve společnosti ErgoTech Ltd. používají k měření krychlový vzorek o délce hrany 80 mm s rovinností každé stěny 0,005 mm a rovnoběžností protilehlých stěn 0,01 mm. Hrany jsou zkoseny o 4 mm. Vzorek je uložen mezi šesti rovnými zatěžovacími deskami MTS a podél všech zkosených hran je utěsněn gumovým těsněním (viz Obrázek 3b). Každá deska má na styčné ploše 3 místa pro senzory a distribuční kanálek pro přívod hydrostatického tlaku pomocí oleje (viz Obrázek 3c). Konstrukce zajišťuje kontaktní tlak bez ohledu na sílu mezi horninou a zatěžovací deskou. Maximální dosažitelný tlak činí 500 MPa. Párové senzory jsou umístěny proti sobě. Senzory jsou na povrch vzorku dotlačovány pomocí pružin. Měření probíhá za pokojové teploty [7].

Vzorek je měřen ve všech třech ortogonálních osách pomocí devíti vysílacích senzorů a proti nim devíti přijímacích senzorů. Jeden snímač produkuje P-vlny a zbylé dva S-vlny (jeden horizontálně polarizované a druhý vertikálně polarizované). Při měření rychlostí se vzorek nepolohuje a na jedno upnutí mezi desky lze proměřit všechny ortogonální roviny najednou [7].

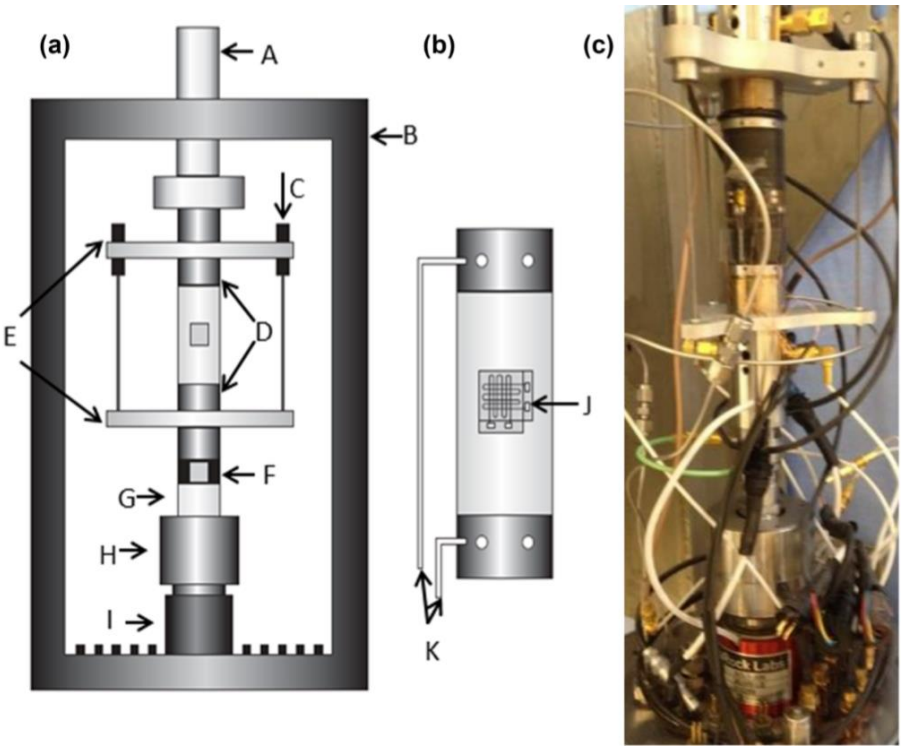


Obrázek 5 – Schéma měřicího zařízení ErgoTech Ltd. [7]

3.4. SINTEF Petroleum Research

Měřicí zařízení umístěné ve Formation Physics laboratory of SINTEF Petroleum Research se používá pro více druhů měření. Multifunkční buňka dokáže změřit nejen rychlosti P a S-vln, ale také například dynamický Youngův modul, Poissonův poměr nebo kvazistatickou deformaci jádra. Uspořádání se navrhlo za účelem úplné charakterizace elastických vlastností hornin pod napětím v závislosti na frekvenci. Nucený oscilátor kmitá na zařízení v axiálním směru. Vzorek ve tvaru válce o průměru jednoho palce je umístěn mezi dvě čelní desky (na Obrázku 6a – D) s ultrazvukovými senzory a drážkou pro přívod kapaliny, která uzavírá mikrotrhliny hydrostatickým tlakem. Vzorek je kolem dokola utěsněn gumovou manžetou (viz Obrázek 6c), která odděluje vzorek od oleje v komoře. Všechny prvky jsou uzavřeny v přetlakové komoře. Mechanický tlak je vyvíjen pomocí pístu (Obrázek 6a – A). Maximální přípustný tlak v komoře je 70 MPa [7].

Senzory měřicí elastickou anizotropii jsou zabudovány v čelních deskách ve směru osy válcového vzorku. Měření probíhá s P-vlnami a S-vlnami pouze v jednom směru [7].



Obrázek 6 - Schéma měřicího zařízení SINTEF Petroleum Research [8]

4. Vícesnímačové měření

Vícesnímačové systémy se stávají stále důležitějšími v různých oborech. Zatímco jeden senzor je schopen zachytit pouze dílčí informace o okolním prostředí, větší množství senzorů může poskytnout větší množství záznamů z různých úhlů pohledu a z různých hledisek. Kombinovat informace z takových systémů lze pomocí slučovacích algoritmů, díky kterým se značně rozšíří povědomí o měřené oblasti, čehož by se s jediným senzorem nedosáhlo [12]. Senzory lze technologicky rozřadit do dvou skupin: kontaktní a bezkontaktní. Na kontaktní senzory musí být pro získání údajů z měření vyvíjen tlak, aby byly v neustálém kontaktu s měřeným objektem. Naopak bezkontaktní senzory nevyžadují žádný fyzický kontakt s měřeným objektem. Kontaktní senzory lze dále řadit podle snímání na snímání bodové, plošné a kontinuální [13]. Při měření charakteristické vlastnosti horniny, elastické anizotropie, používáme snímače, které generují ultrazvukové P-vlny. Pro senzory generující P-vlny je k měření dostačující, ale zároveň nutný, bodový styk.

Pokud se měří vícesnímačově, získávají se data od všech senzorů najednou, která musí být navzájem neovlivněná. Z toho důvodu musí být jak senzory, tak vodiče stíněny. Senzory se mohou navzájem rušit indukovaným proudem, což je nežádoucí. Stejně tak u vodičů se může objevit nežádoucí signál (šum) způsobený indukčním rušením. Kabely se musí napěťově chránit, aby se na výstupu odečítal čistý signál z měření [14]. Tzv. koaxiální kabel má vnitřní vodič obklopen izolační vrstvou. Kolem ní se nachází vodivé stínění. Další vrstvu, izolační vnější plášť, tvoří viditelný celek kabelu [11].

Na Geologickém ústavu AV ČR zaručuje stínění přivedené fáze na piezotabletu od uzemněné části nevodivý materiál, novodur (více v další kapitole). Pro vedení signálu se používá stíněný kabel RG178. Spojení kabelů s relátky zajišťuje konektor MMCX.

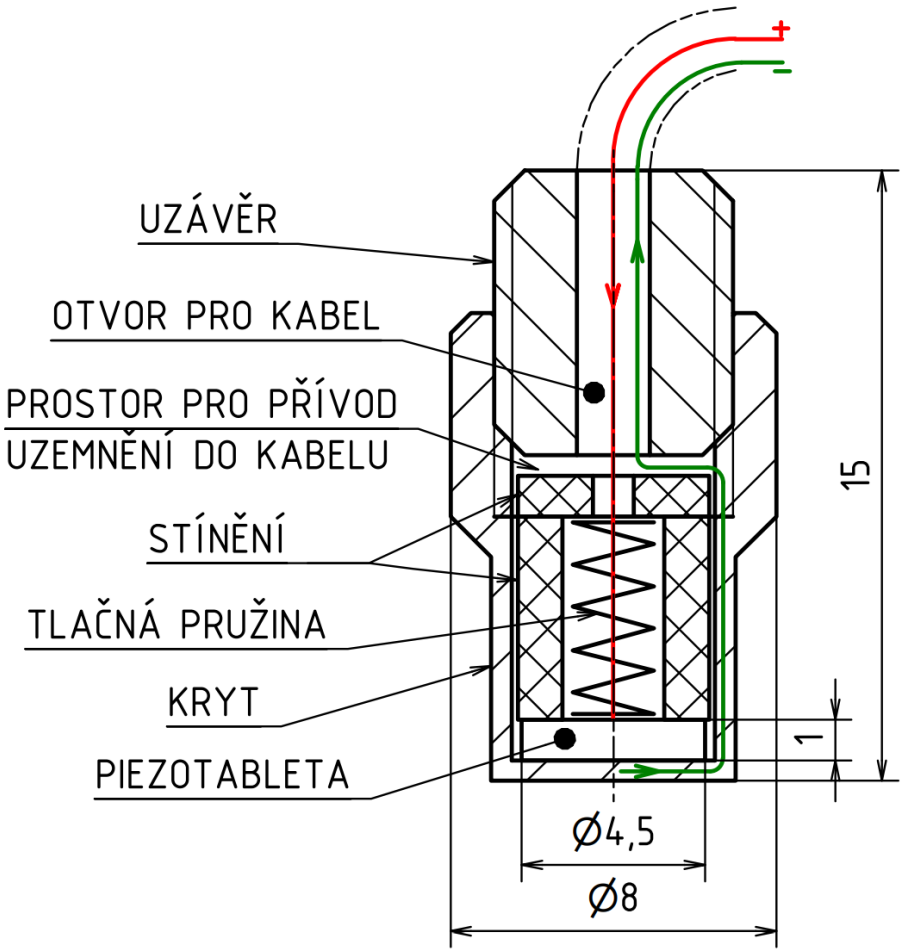
5. Ultrazvukové snímače

Ultrazvukové snímače jsou využívány v mnoha odvětvích. Používají se pro měření teploty, tlaku, polohy, vzdálenosti a průtoku, dále při analýze a monitorování procesů a při určování defektoskopie nebo při měření tomografie hornin [9].

Ultrazvukové snímače lze rozdělit dle generování ultrazvuku na snímače využívající piezoelektrický měnič, sondy s magnetostrikčním měničem a sondy s elektrodynamickým měničem. Při měření anizotropie hornin se využívají snímače s piezoelektrickým měničem. Tyto snímače se skládají z piezoelektrického měniče, tlumicího tělíska a přizpůsobovací cívky. Měniče jsou destičky z piezoelektrického materiálu. Nejčastěji se vyrábí z piezokeramiky, která je nejlepším základem pro generování a detekci ultrazvukových vln. Senzor generuje ultrazvukovou P-vlnu kmitáním jako reakci na vysokonapěťový impuls. Kmitání vzniká vlivem elektrického pole. V destičce z piezokeramického materiálu se pod vlivem elektrického pole přesouvají nosiče náboje a způsobují makroskopické změny délky. Přivedením střídavého napětí na destičku vznikají vibrace [10], [15].

Na Geologickém ústavu AV ČR používají vlastní vyrobené ultrazvukové snímače (viz Obrázek 7). Napěťový skok, přiveden stíněným kabelem RG178, vytvoří vysokonapěťový puls (rozkmitává piezotabletu), a ten díky bodovému styku prochází skrz vzorek, kde je zachycen piezotabletou v protějším senzoru, která ho převede zpět na elektrickou energii. Aby vlna prostoupila materiál vzorku, je potřeba zajistit správnou hodnotu tzv. rezonančního kmitočtu (maximální absolutní velikost vysokonapěťového pulsu). Tento důležitý parametr se odvíjí od tloušťky piezotablety (mění se v závislosti na přiváděném napětí). Čím má tableta větší tloušťku, tím se rezonanční kmitočet snižuje. Hodnota rezonančního kmitočtu vhodná k měření činí 1 až 3 MHz, což lze docílit tabletou o tloušťce cca 1 mm. Tableta se přitlačuje pružinou na stěnu krytu (mosaz) pro lepší přenos kmitů. Plocha krytu, která se dotýká vzorku, musí být rovná. Tloušťka stěny krytu v nejužším místě je 0,5 mm. Prostor s pružinou je odstíněn tak, aby nedošlo k ovlivnění indukovaným proudem, a zároveň aby nedošlo ke zkratu s uzeměním. Materiál těsnění je novodur. Koaxiální kabel se do senzoru přivádí skrz kryt senzoru. V prostoru pro přívod uzemnění se dělí. Vnitřní část vodiče obklopená izolační vrstvou pokračuje dále skrz stínění k pružině. Živá část se pak přímo přivádí na piezotabletu. Vodivé stínění kabelu vyplňuje

prostor pro přívod uzemnění. Uzemění zajišťuje vodivý kryt senzoru, který je v kontaktu s vnějším vodivým stíněním kabelu. Šroubovaný uzávěr krytu (dural) slouží ke stlačení pružiny, uzavření prostoru s piezotabletou a k vyvedení kabelu ze senzoru [16].



Obrázek 7 - Nákres ultrazvukového snímače vyrobeného na GÚ AV ČR

Ultrazvukové snímače se dají koupit u firem Pepperl+Fuchs s.r.o., SONATEST Plc., Farnell UK, SensComp Global Components nebo Zhejiang Jiakang Electronics Co., Ltd. Tyto firmy vyrábí a prodávají ultrazvukové snímače primárně do procesního inženýrství a k lékařskému využití. V následující tabulce (tabulka 1) jsou od zmíněných firem vypsány ultrazvukové snímače, které se svými vlastnostmi a vnějšími rozměry nejvíce blíží požadovaným. Firma SONATEST Plc. nabízí několik variant ultrazvukových senzorů generujících podélné vlny (viz Obrázek 8), které se nejvíce blíží požadavkům na vnější rozměry

a rozsahy rezonančního kmitočtu. Nejmenší piezoelektrický měnič měří uvnitř senzoru 5 mm. Do konstrukce tohoto typu se ovšem nehodí, jelikož senzor má vývod kabelu na straně senzoru, tudíž by se značně omezil prostor v konstrukci.

Obrázek 8 - Ultrazvukový snímač od firmy SONATEST Plc. [18]

Tabulka 1 - Nabízené ultrazvukové senzory

Firmy	Rezonanční frekvence	Vnější rozměry (šířka / délka)
Pepperl+Fuchs s.r.o. [17]	255 kHz	M12 / 40 mm
SONATEST Plc. [18]	0,5 až 10 MHz (různé senzory)	Ø(5 až 34) mm / neuvedeno (velikost měniče, nikoli v. r.!)
Farnell UK [19]	40 kHz	Ø9,9 mm / neuvedeno
SensComp Global Components [20]	50 kHz	Ø43 mm / 12 mm
Zhejiang Jiakang Electronics Co., Ltd. [21]	1,1 MHz	Ø20 mm / 9 mm

6. Shrnutí rešerše

Tomografií hornin se zabývá několik institucí po celém světě. V současném stavu používají k měření elastické anizotropie omezený počet senzorů, výsledné hodnoty získávají z omezeného počtu proměřených směrů, využívají konstrukce pro jednoduché tvary vzorků a změření jednoho vzorku trvá v řádech hodin. Řešení použití vícesnímačové konstrukce pro zkoumání tomografie hornin je světově unikátní. Výzkumníci z Geologického ústavu Akademie věd ČR, v. v. i. používají jako jediní sférický vzorek horniny. Práce bude vycházet ze znalostí z jejich dosavadního výzkumu a vývoje měřicí aparatury.

Vzhledem ke komplikované konstrukci přípravku s velkým množstvím měřicích jednotek se na ultrazvukové senzory kladou velmi stísněné prostorové nároky. Ultrazvukové senzory nabízí mnoho firem, ale žádná nesplňuje specifické požadavky, které jsou na sestavení unikátního řešení potřeba. Práce zdokonaluje funkční konstrukční řešení na Geologickém ústavu AV ČR a upravuje konstrukci dle rozměrových požadavků a požadavků na montáž.

Geologický ústav AV ČR díky nové aparatuře značně pokročí ve vývoji měření tomografie hornin. Elastická anizotropie se bude měřit ve všech potřebných směrech a data vyslaná z jednoho senzoru bude přijímat všech 201 zbylých senzorů najednou.

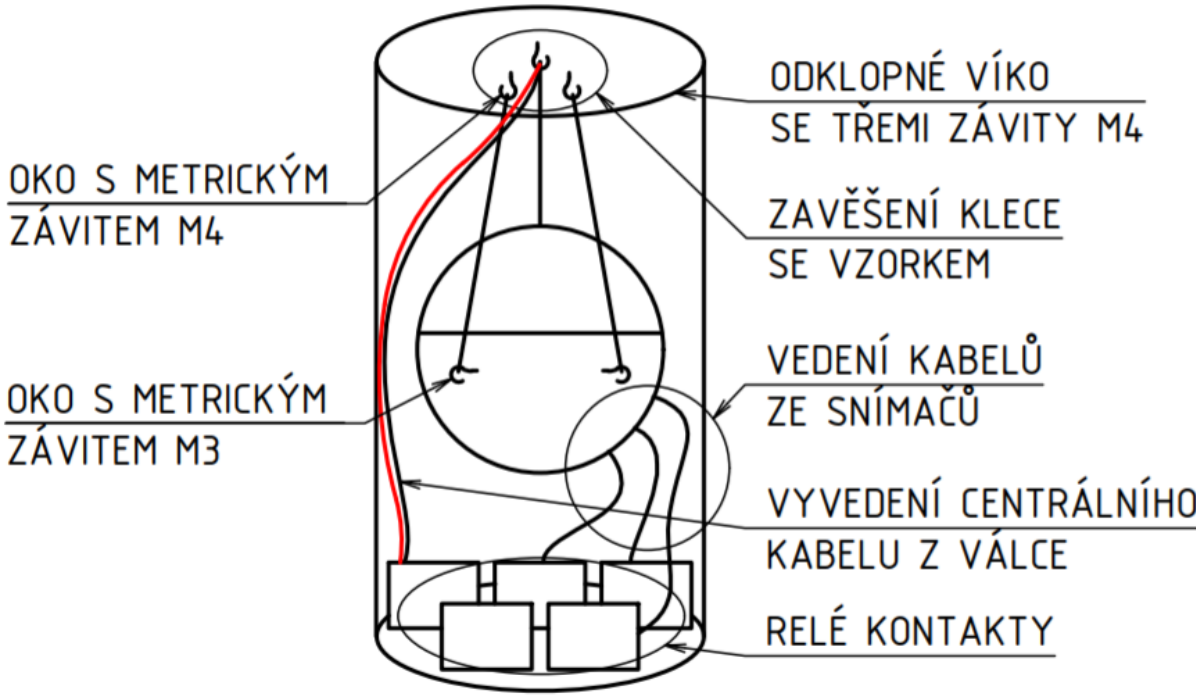
7. Zadané parametry

V následujících kapitolách bude popisován návrh nové měřicí aparatury. Aparatura má splňovat následující požadavky, zadané od GÚ AV ČR. Zásadním požadavkem je umístit na plochu vzorku 202 snímačů (místo původních 6 – viz kapitola 3.1) dle výkresu PZ–202. Podle tohoto výkresu se obrábí vzorky pro měření v aktuálně používané aparatuře. Zde vzorkem není koule, nýbrž mnohostěn. Návrhem rozmístění funkčních ploch pro měření a výrobou mnohostěnu se zabývá diplomová práce Ing. Michala Ulrycha [22]. Vzhledem k tomu, že aparatura bude navržena pro měření primárně P-vln, tak mezi snímačem a vzorkem stačí mít bodový styk a vzorkem bude koule. Tento měřený sférický vzorek horniny se požaduje zvětšit ze stávajícího $\emptyset\, 50 \pm 0{,}2$ mm na $\emptyset\, 80 \pm 0{,}2$ mm. Celá aparatura se umísťuje do vysokotlaké nádoby o rozměrech $\emptyset$ 120 mm x 220 mm (výkres TLN01–01–00) s maximální hodnotou hydrostatického tlaku 400 MPa. Tento přetlakový válec mají na Geologickém ústavu pro podobné účely již nadimenzovaný. Nádobu při měření vyplňuje olej ISOPAN N. Měření se provádí do teploty 35°C. Vlivem hydrostatického tlaku se průměr vzorku zmenšuje, a tudíž je potřeba snímače ke vzorku dotlačovat, aby byly v neustálém dotyku. Uvádí se, že posuv ve směru snímače činí maximálně 1 mm. Pro upevnění celé aparatury lze ve víku nádoby použít tři otvory M4 s roztečí o $\emptyset\, 101 \pm 0{,}1$ mm.

Díky zmíněným parametrům není potřeba v konstrukci použít polohovací zařízení. Vzorek horniny se nebude polohovat. Požaduje se ho v aparatuře vycentrovat pomocí dvou barevných kolíků, vzájemně posunutých o 90°, tak, aby byla po vyjmutí z měřicí aparatury jasná a nezaměnitelná orientace vůči jednotlivým snímačům a bylo umožněno provést měření opakovaně. Na sférickém vzorku se navrtají ve stejných polohách dva důlky. Měření bude probíhat tak, že postupně každý snímač bude vysílač a zbývající snímače budou přijímače. Dovnitř nádoby se umístí relé kontakty pro každý snímač, které takové měření umožní. Pro spojení snímačů s relé kontakty se doporučuje použít koaxiální kabel RG178, se kterým mají při měření tohoto typu zkušenosti a konektor MMCX. Zapojení relé kontaktů a vyvedení centrálního kabelu ven z přetlakové nádoby si zajišťuje GÚ AV ČR, v. v. i. sám.

8. Návrh tělesa přípravku a jeho upevnění

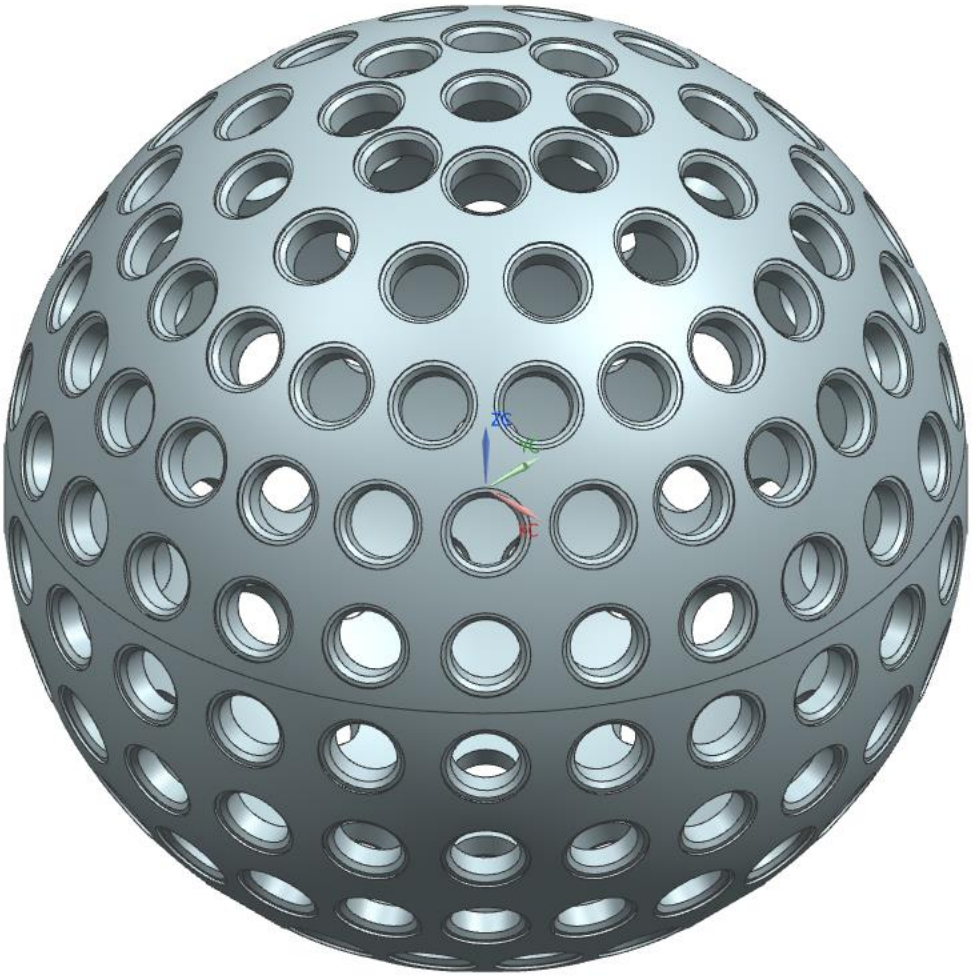
Následující kapitola obsahuje návrh tělesa přípravku v několika variantách. Varianty se liší zejména stylem výroby a upevnění snímačů v tělese přípravku. Při návrhu se kladl důraz na jednoduchost montáže, snadnou výměnu vzorků a dodržení všech daných rozměrů a dalších technologických požadavků. Vybranou variantu dále rozepisuje podrobně. Na následujícím obrázku je schematicky zobrazeno, jak bude vypadat upevnění navrhované aparatury v přetlakovém válci.



Obrázek 9 - Zavěšení navrhované aparatury v kleci

8.1. Návrhy tělesa přípravku

Těleso přípravku, dále jen „klec“ (viz Obrázek 10), se bude skládat ze dvou částí, spodní a vrchní. Do klece, která bude držet 202 snímačů, se na stavěcí šrouby nehybně umístí vzorek. Klec musí mít v sobě zakomponované řešení pevného rozebíratelného spojení spodní a vrchní části a také vyřešené uchycení k víku tělesa. V následujících návrzích jsou dále popsány různé varianty uchycení snímačů do klece.



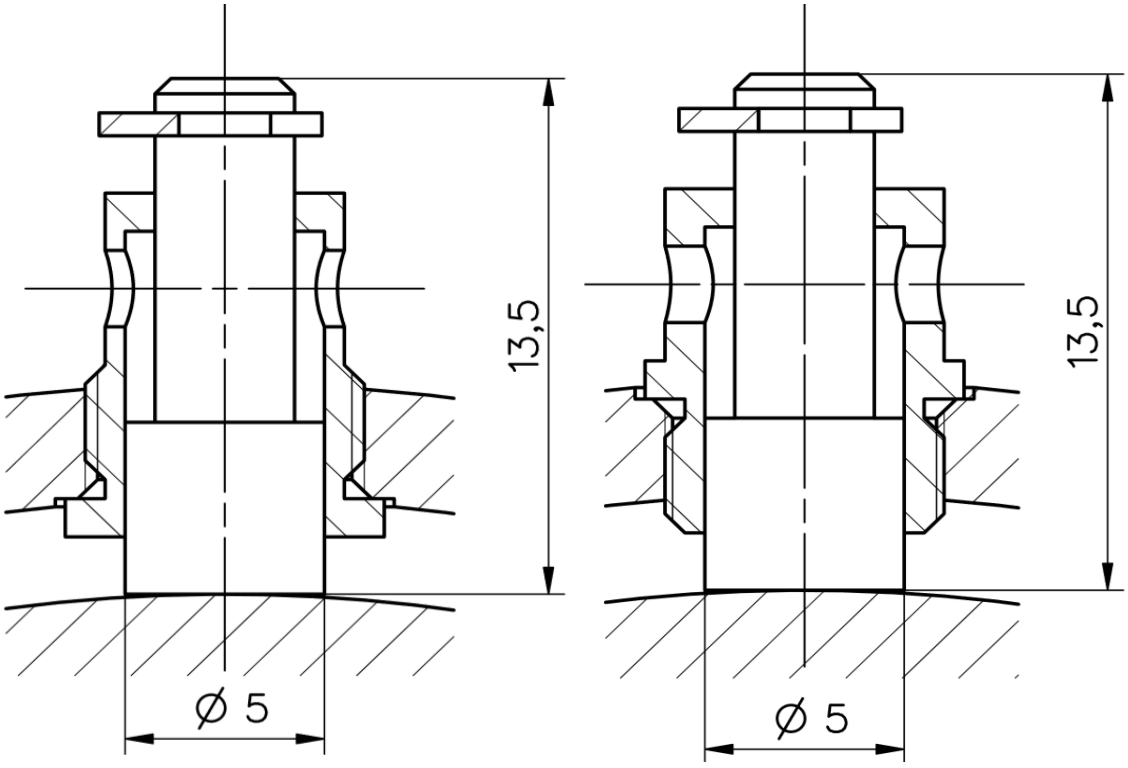
Obrázek 10 - Základní model klece

8.1.1. Obráběná – montáž zevnitř

Klec se skládá ze dvou dutých polokoulí se 202 otvory pro snímače rozmístěnými dle výkresu PZ-202. Stěna měří 3 mm. Do každého otvoru je vyřezán závit M7 a zevnitř obrobena plocha pro dosednutí domku se snímačem (viz Obrázek 11 nalevo). Snímače se vkládají spolu s pružinami do domků pro senzor a pojišťují se třmenovým pojistným kroužkem proti vypadnutí dovnitř klece. Domky pro senzor mají vnější závit M7 až k osazení pro dosednutí domku. Dále mají vnitřní prostor o průměru 5 mm pro vložení senzoru a z boku otvor pro vyrovnání tlaku uvnitř domku. Domky se šroubují do klece zevnitř a dále se nepojišťují. Polotovar pro výrobu klece se uvažuje kulatina z oceli o průměru 90 mm.

8.1.2. Obráběná – montáž zvenku

Klec se skládá ze dvou dutých polokoulí se 202 otvory pro snímače rozmístěnými dle výkresu PZ-202. Stěna měří 3 mm. Do každého otvoru je vyřezán závit M7 a zvenku obrobena plocha pro dosednutí domku se snímačem (viz Obrázek 11 napravo). Snímače se vkládají spolu s pružinami do domků pro senzor a snímače se pojišťují třmenovým pojistným kroužkem proti vypadnutí dovnitř klece. Domky pro senzor mají vnější závit M7 až k osazení pro dosednutí domku. Dále mají vnitřní prostor o průměru 5 mm pro vložení senzoru a z boku otvor pro vyrovnání tlaku uvnitř domku. Domky se šroubují do klece zvenku a dále se nepojišťují. Polotovar pro výrobu klece se uvažuje kulatina z oceli o průměru 90 mm. Výhodou návrhu oproti kleci obráběné zevnitř je masivnější konstrukce domku a jednodušší montáž.



Obrázek 11 - Návrhy uložení snímačů do klece (nalevo – klec montovaná zevnitř, napravo – klec montovaná zvenku)

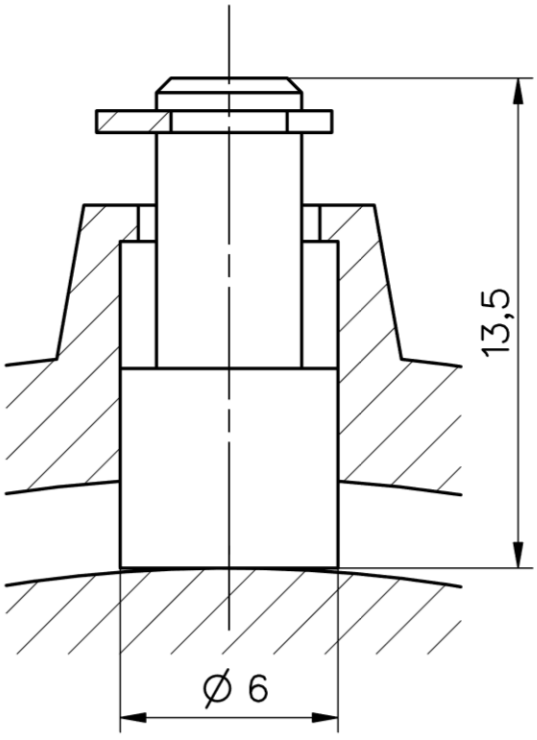
8.1.3. Tisknuté z kovu

Sestava klece a snímačů je stejná jako v návrhu 8.1.2., ale místo obrobení kovového polotovaru se obě části klece vytisknou i s otvory a následně se do nich závity obrobí.

8.1.4. Tisknuté z plastu

Klec se skládá ze dvou dutých polokoulí se 202 otvory pro snímače rozmístěnými dle výkresu PZ-202. Každý otvor je vytažen směrem ven z klece a vnější povrch vyčnívajícího válce má kónický tvar (viz Obrázek 12). Domek je tedy součástí klece a snímač s pružinou se do něj vkládá zevnitř přímo. Tiskne se z tvrdého plastu. Díky integrovanému domku přímo v kleci není velikost senzoru limitován průměrem přírub domků (na pólech jsou senzory u sebe velmi blízko), ale pouze průměrem senzoru samotného.

Na rovníku je mezi klecí a stěnou přetlakového válce velmi málo prostoru. Složitý tvar kónických domků se místo pouhých otvorů do tlustší stěny zvolil kvůli většímu prostoru v přetlakovém válci na rovníku, kudy musí projít na dno nádoby 89 kabelů, a kvůli jednotnosti.



Obrázek 12 - Návrh uložení snímače v kleci tisknuté z plastu

8.2. Detailní popis vybraného návrhu klece

Pro výrobu byla vybrána klec tisknutá z plastu. Největší výhoda tohoto návrhu spočívá ve snadné výrobě tvarově náročného dílu a možnosti využití rapid prototypingu při modelování. Další výhodou je lehká konstrukce, se kterou půjde snadněji manipulovat. Na rozdíl od ostatních návrhů se sníží počet dílů v sestavě díky integrovanému domku.

Klec tvoří dvě duté polokoule s 202 otvory rozmístěnými dle výkresu PZ-202. Z výkresu lze vyčíst, že senzory jsou rozmístěny od rovníku k pólům po 15°. Na rovníku (první pole), ve druhém i ve třetím poli jich je kolem svislé osy rovnoměrně rozmístěno 24, ve čtvrtém poli jich je 20, v pátém poli 12 a v šestém poli 8. Póly obsazují zbylé dva senzory. Výchozím domkem pro senzor je domek umístěný na rovníku s označením 0° (kladná hodnota vede proti směru hodinových ručiček – viz Obrázek 13). Kvůli senzorům v prvním poli není možné umístit dělicí rovinu do rovníku klece. Při rozebírání přípravku by snímače vždy vypadly z domků a sestavování sestavy by bylo velmi náročné. Dělicí rovina proto vede mezi prvním a druhým polem. Dělicí rovinou je plocha kužele s vrcholem ve středu klece a stěnou nakloněnou 7,5° od rovníku. Každý snímač má v kleci své jasně dané místo a při sestavování se nesmí stát, že by se vrchní část oproti spodní umístila špatně, proto je dělicí rovina křivolaká. Nejprve vede nad rovníkem mezi prvním a druhým polem v rozmezí 180°, a poté přechází pod rovinu rovníku (v místě 157,5° od výchozího domku – na Obrázku 11 je přechod naznačen čerchovanou čarou) mezi první a druhé pole a vede symetricky 180° pod rovníkem. Středem symetrie je střed sférické klece. Díky popsanému vedení dělicí roviny klece lze obě polokoule sestavit pouze jedním nezaměnitelným způsobem. Místo přechodu dělicí roviny se vybralo na základě rozmístění komponent kolem klece. Další výhodou dělení klece tímto způsobem je snížení opotřebení otěrem kontaktních ploch senzorů na rovníku. Dovnitř klece se vkládá vzorek o průměru 80 mm. Vnitřní povrch klece má průměr 82 mm a tloušťka stěny v nejužších místech měří 3,5 mm. Největším vnějším rozměrem klece jsou vnější hrany domků pro senzory. Vzdálenost mezi nimi činí 98,4 mm.

Klec vyráběná pomocí 3D tisku obsahuje mnoho technologických otvorů. Otvory pro senzory o vnitřním průměru 6 mm a osazení o průměru 4,6 mm slouží k uložení senzorů. Senzory se do otvorů vkládají přes pružinu, která zajišťuje neustálý kontakt se vzorkem horniny. Pružina se opírá o osazení domku a osazení senzoru. Senzor je veden za válec

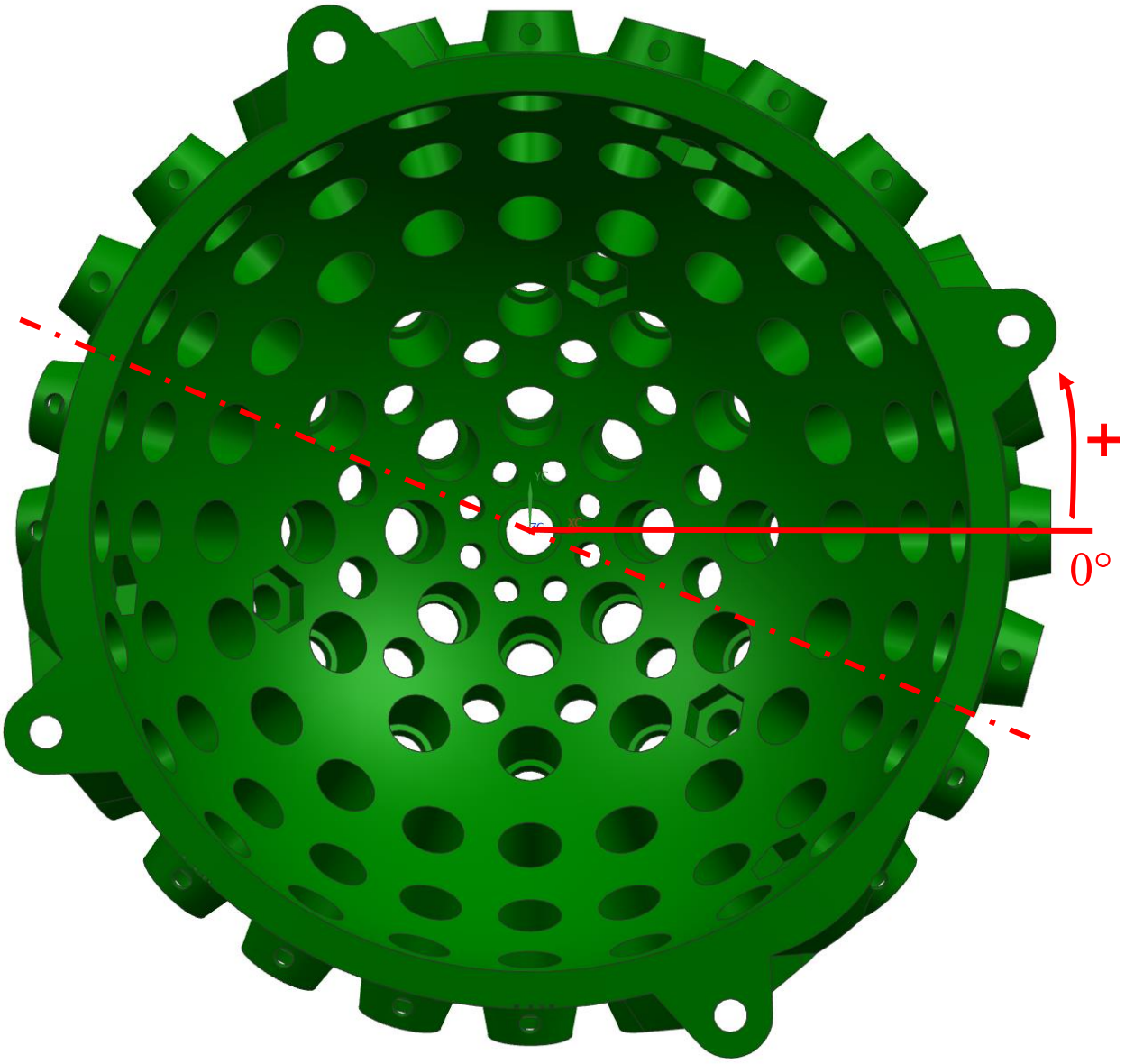
o průměru 6 mm. Pro zlepšení pevnosti má domek kónický tvar. Boční otvor do domku slouží k vyrovnání tlaku v prostoru s pružinou a vnitřním prostorem snímače. Otvory pro vyrovnání tlaku jsou umístěny také na stěně klece, aby vyrovnaly tlak uvnitř klece. Rozkládají se kolem pólů mezi pátým a šestým polem a mezi šestým polem a snímači na pólech.

Vzorek se do klece umísťuje nehybně na tři stavěcí šrouby. Otvory pro stavěcí šrouby se nachází na spodní části klece 36° od svislé osy procházející oběma póly. Jsou rozmístěny dokola po 120°. Jako stavěcí šrouby se použijí šrouby M3 s vnitřním šestihranem (DIN912), které se upevní pomocí šestihranných matic M3 (DIN 934) a podložek 3 (DIN125A). V těchto místech je stěna klece zesílena. Šroub se vkládá do otvoru o Ø 3,2 mm. Z vnitřní strany spodní klece je vymodelovaný otvor ve tvaru šestihranné matice o hloubce 2 mm a rozměrech pro matici M3. Matice se do otvorů vlepí, proto jsou rozměry zvětšeny o 0,1 mm. Délka stavěcích šroubů má jasně danou délku, aby vzorek horniny po přivedení hydrostatického tlaku seděl ve středu klece a všechny senzory se dotlačovaly stejnou silou. Délka šroubu je 8,8 mm. Po zašroubování se na kontaktní plochu šroubu nalepí izolační páska, aby byl dotyk odstíněn.

Vzorek horniny má na povrchu navrtané dva mělké otvory s barevnými okraji. Nachází se na rovníku, vzájemně posunuté o 90°. Proto se na spodní části klece také nachází dva odpovídající otvory umístěné 7,5° od výchozího domku (viz Obrázek 13 a 15). Do otvorů se aplikují „insert for thermoplastic“, konkrétně „Trisert“, se závity M2 (výrobce konkrétní typ označuje 145M2) [23]. Při vložení vzorku do klece se vzorek pomocí dvou šroubů vycentruje do správné pozice. Insert for thermoplastic se vkládají teplem. Zahřátý insert se vpraví do otvoru s rozměry danými výrobcem insertů (v tomto případě má otvor Ø 3,3 mm a délka 4,5 mm) a zchladnutím se ukotví v kleci. Okolní otvory pro senzory nebudou ovlivněny, protože teplem ovlivněná oblast je menší než vzdálenost mezi kraji otvorů (5 mm).

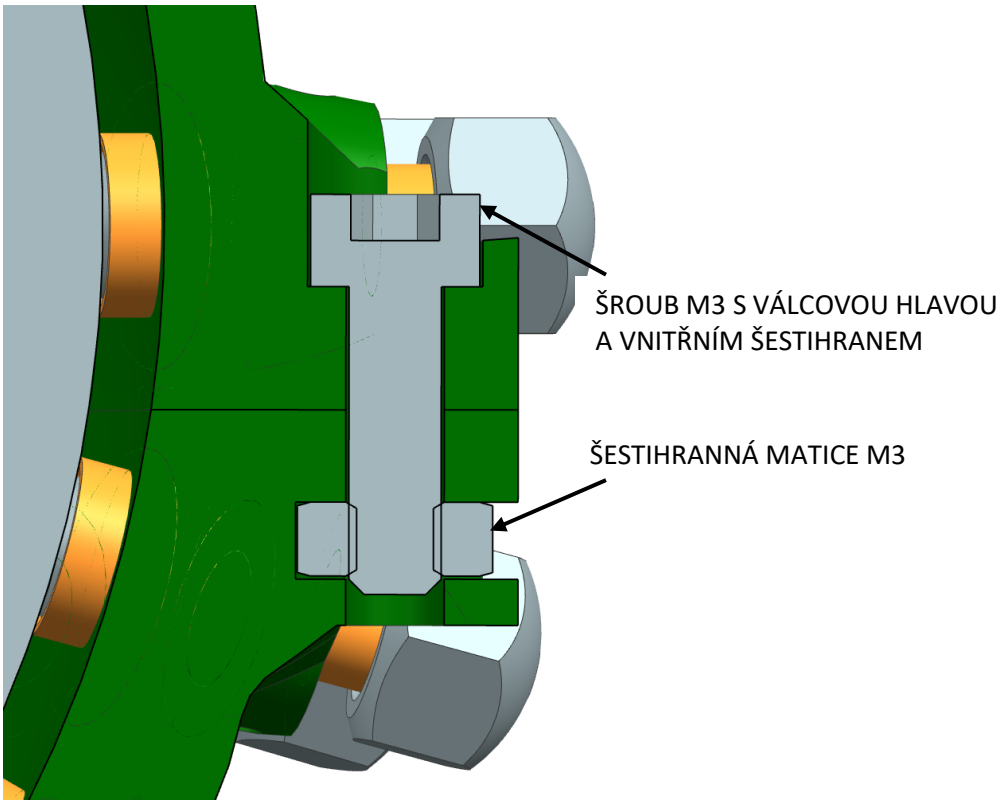
Dalšími otvory na kleci jsou tři otvory pro upevnění klece v přetlakovém válci. Nachází se na spodní části klece 22,5° od rovníku rozmístěné dokola po 120°. Umístí se do nich oka s metrickým závitem M3 a utáhnou se pomocí dvou šestihranných matic M3 (DIN 934) a podložky 3 (DIN125A). V těchto místech je stěna klece výrazně zesílena v okolí 9 mm od osy otvoru až na tloušťku 7 mm. Tloušťka stěny postupně klesá do vzdálenosti 16 mm od osy otvoru, kde nabývá hodnoty 3,5 mm. Šroub s okem se vkládá do otvoru o Ø 3,2 mm. Z vnitřní

strany spodní klece je vymodelovaný otvor ve tvaru šestihranné matice o hloubce 2 mm a rozměrech pro matici M3. Matice se do otvorů vlepí, proto jsou rozměry zvětšeny o 0,1 mm. Šroub nesmí zasahovat do horninového vzorku, proto se musí náležitě zkrátit. Spojení je zobrazeno na Obrázku 22.



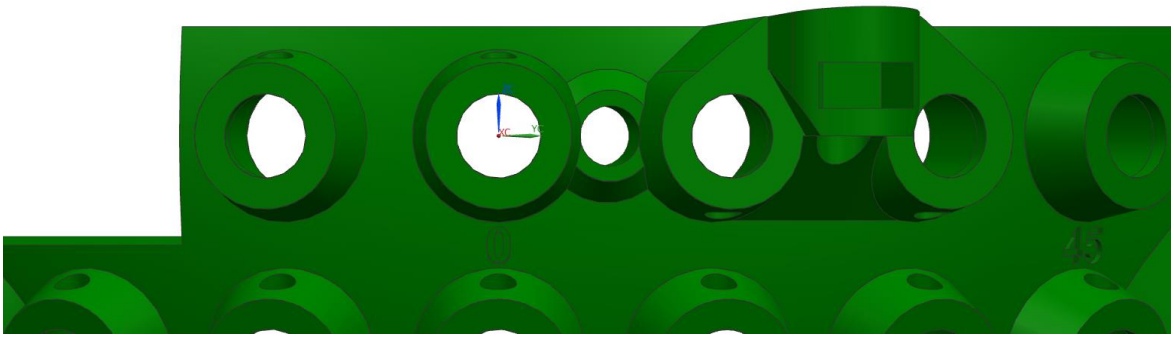
Obrázek 13 - Spodní část klece (pohled shora)

Horní a spodní část klece jsou spojeny pomocí 4 šroubů M3 s válcovou hlavou a vnitřním šestihranem (DIN912) a 4 matic M3 (DIN934). Spojení je vytvořeno rapid prototypingem metodou FDM (viz Obrázek 14 a 15). Matice se vlepí do otvorů vymodelovaných dle použitých matic s přídavkem 0,1 mm na lepidlo. Šroub s válcovou hlavou byl zvolen z důvodu prostorové úspornosti. Šroub se vkládá do otvoru o Ø 3,2 mm. Otvory pro spojení vrchní a spodní části klece jsou od svislé osy procházející oběma póly umístěny 49,5 mm. Při modelování se otvory pro spojení klece navrhly co nejblíže ke stěně klece, jak to bylo z hlediska montáže možné.



Obrázek 14 - Detail spojení klece

Pro lepší orientaci jsou na kleci vyznačeny některé polohy domků v úhlech. Při pohledu shora se pozice domků označují proti směru hodinových ručiček. Pro pole jedna, dva a tři je společné značení po 45° pod domky z pole jedna (každý třetí domek). Čtvrté pole má číslování pod domky po 36° (každý druhý domek). Páté pole je číslováno pod domky po 45° (každý druhý domek) a šesté pole je pod domky označeno po 90° (každý druhý domek).



Obrázek 15 - Detail spodní části klece s výchozím domkem (označen 0°)

Při optimalizaci návrhu byl změněn způsob modelování dělicí roviny obou částí klece. Dělicí rovina se změnila z plochy kužele na rovinu odsunutou od rovníku o 6 mm. Vzdálenost 6 mm přibližně odpovídá 7,5° nakloněné stěně od roviny rovníku. Změna se provedla kvůli zjednodušení 3D tisku. Připojovací plochy klecí se staly mnohem hladšími a po vytisknutí snadno upravitelnými. Povrch klece se po vytisknutí vyhladil acetonem.

8.3. Upevnění klece

Ve víku přetlakového válce se využívají 3 otvory se závitem M4 (viz Obrázek 9), kam se budou šroubovat tři oka s metrickým závitem M4. Na spodní části klece se nachází 3 otvory, kam se pomocí vložených matic budou šroubovat tři oka s metrickým závitem M3 (podrobněji popsáno v kapitole 8.2.). Kvůli zástavbovým prostorům klece a přetlakového válce nelze na kleci použít stejné oko s metrickým závitem M4 jako ve víku přetlakové nádoby. Dle výrobce udrží jedno oko s metrickým závitem M3 váhu až 7,5 kg [24], což je pro celou aparaturu, která váží cca 2,5 kg, dostačující. Klec visí v přetlakovém válci za svoji spodní část pomocí lanek o průměru 1 mm, které spojují oka se závity na víku válce a spodní části klece. Výšku upevnění klece lze nastavit dle potřeby (viz Obrázek 21 a kapitola 10). Konce lanek jsou zatočeny do ok a zajištěny pomocí lisovacích lanových objímek DIN3093-1.

9. Návrh snímačů a jejich upevnění

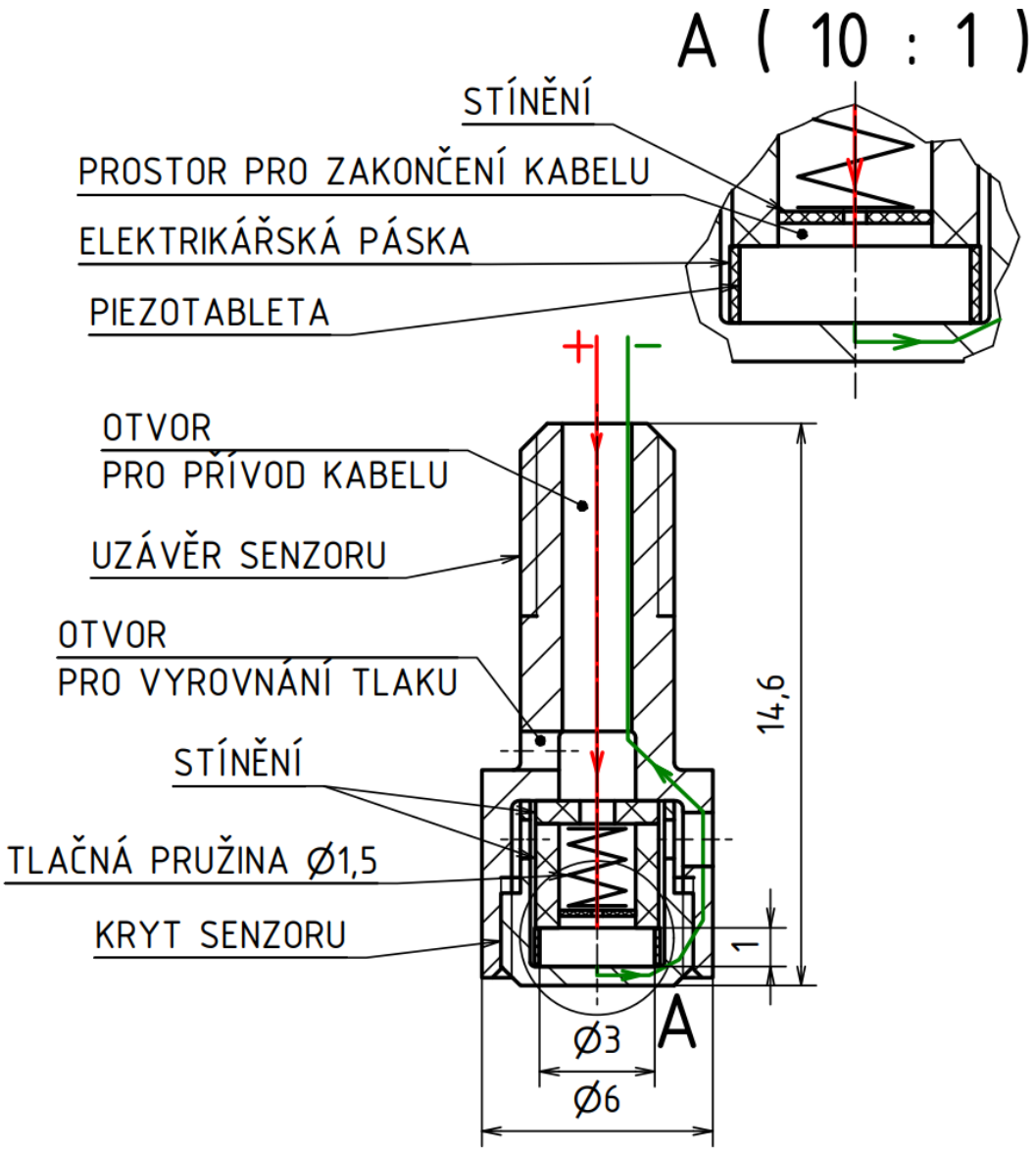
Kvůli potřebám nové konstrukce se změnily rozměry ultrazvukových senzorů. Při konstruování klece se kladl důraz na vytvoření co největšího možného rozměru senzoru a na jednotnost. Vzhledem k náročným prostorovým podmínkám ze zadaných požadavků, především v poli šest, vyplynul největší rozměr senzoru na průměr 6 mm. Vzdálenost mezi sférickým vzorkem a stěnou přetlakového válce je také nejdelší možným rozměrem senzoru s vyvedeným kabelem (především pro senzory v poli jedna). Největší možná délka senzoru i s vyvedením kabelu činí 20 mm. Žádný výrobce nenabízí senzor se zmíněnými, popř. menšími, rozměry a vhodnými parametry. Geologický ústav používá k měření vzorků hornin ultrazvukové senzory vlastní výroby. Tato část bakalářské práce řeší konstrukční návrh nového ultrazvukového snímače na základě funkční předlohy z GÚ, který popisuje kapitola 5.

Tabulka 2 - Komponenty sestavy senzoru

Komponent sestavy senzoru	Norma/číslo výkresu	Materiál
Kryt senzoru	MA-S-02	CuZn39Pb3
Uzávěr senzoru	MA-S-03	CuZn39Pb3
Stínění – válec	MA-S-04	PVC
Stínění – víko	MA-S-05	PVC
Stínění – podložka	MA-S-06	PVC
Hřídel pro dotažení	KR ČSN 42 5510-1-50	Ocel
Piezotableta	Průměr 3 mm, tloušťka 1 mm	Piezokeramika
Tlačná pružina	TL 0,2x1,5x3,2x7,5	Nerezová ocel
Koaxiální kabel	RG178	-
Elektrikářská páska	Izolační páska 19 x 0,13 mm	PVC

9.1. Návrh snímače

Kvůli zmenšeným prostorovým nárokům musí být senzor překonstruován. Návrh vychází z původní konstrukce popsané v kapitole 5 (Obrázek 7). Snímač se skládá z částí uvedených v Tabulce 2. Na piezotabletu se koaxiálním kabelem vedeným osou senzoru přivádí napěťový puls (na Obrázku 16 naznačeno červenou čarou), který rozkmitá piezotabletu na určitý rezonanční kmitočet. Uzemnění piezotablety zaručují kryt a uzávěr senzoru, které jsou z vodivé mosazi. Vodivost materiálu k tomuto účelu je vyzkoušena na původním používaném senzoru z kapitoly 5. Pro tento návrh byla použita mosaz s příměsí olova (CuZn39Pb3) kvůli své



Obrázek 16 - Návrh uspořádání senzoru (bez zobrazení kabelu)

výborné obrobitelnosti a vyšší pevnosti v tahu, než je tomu u jiných mosazí [25]. Uzávěr senzoru přivádí uzemnění do vodivého stínění koaxiálního kabelu (na Obrázku 16 naznačeno zelenou čarou). Živý drát se v prostoru pro zakončení kabelu při montáži spirálovitě stočí a pomocí pružiny je přitlačován na povrch piezotablety pro dobrý kontakt. Prostor s vnitřním vodičem koaxiálního kabelu se izoluje od uzemněných částí pomocí stínění z neměkčeného PVC.

Důležitým komponentem v sestavě je piezotableta. Zaručuje funkci ultrazvukového snímače. Pro potřebnou hodnotu rezonančního kmitočtu musí mít tableta tloušťku 1 mm. Průměr tablety tento parametr neovlivňuje. Vzhledem k rozměrům sestavy byla zvolena piezotableta o průměru 3 mm, kterou lze v tomto rozměru koupit. Piezotableta se kvůli odstínění po stranách oblepí elektrikářskou páskou a vkládá se do krytu senzoru. Tloušťka stěny krytu senzoru mezi piezotabletou a vzorkem horniny je 0,5 mm jako v předchozím návrhu. Na stěně krytu jsou čtyři otvory po 90° pro snazší dotažení krytu do uzávěru. Závit M5x0,5 krytu senzoru se dotahuje hřídelí o průměru 1 mm.

Uzávěr senzoru slouží k vedení koaxiálního kabelu. Dále uzavírá vnitřní obsah senzoru (stínění, tlačná pružina a piezotableta). Drážka v širším válci slouží k dotažení krytu senzoru. Na užším válci o průměru 4 mm má uzávěr jeden otvor pro vyrovnání tlaku uvnitř senzoru a zamezení možné imploze. Dále se zde nachází závit M4 pro nasazení matice pro pojištění senzoru v domku (více v kapitole 9.2.).

Pro přitlačení konce živé části kabelu k piezotabletě slouží tlačná pružina ČSN 026020 0,2x1,5x3,2x7,5. Síla pružiny při maximálním stlačení při délce $L_8 = 1{,}9\ mm$ je $F_8 = 1{,}9\ N$. Volná délka pružiny má délku $L_0 = 3{,}2\ mm$. Předpokládaná délka zatížené pružiny je v rozpětí $L = (2{,}1 \div 2{,}5)\ mm$. Při předpokladu lineárního profilu zatížení a pracovní délky pružiny $L_p = 2{,}3\ mm$, uvažuji přítlačnou sílu $F_p = 1{,}3\ N$.

9.1.1. Kontrola závitu na otlačení

Závit M5x0,5 uzavírající vnitřní obsah senzoru je zatěžován silou působící od pružiny $F_p = 1{,}3\ N$. Činná délka závitu (společná pro kryt i uzávěr bez zkosení) se rovná $l_č = 1{,}9\ mm$.

Při stoupání závitu 0,5 mm odpovídá délka třem činným závitům (při zaokrouhlení ve prospěch lepší bezpečnosti).

$$p = \frac{F_p}{z_{\check{c}} \cdot S_z} \leq p_D$$

$$S_z = \pi \cdot d_2 \cdot H_1 = \pi \cdot d_2 \cdot 0{,}541 \cdot P$$

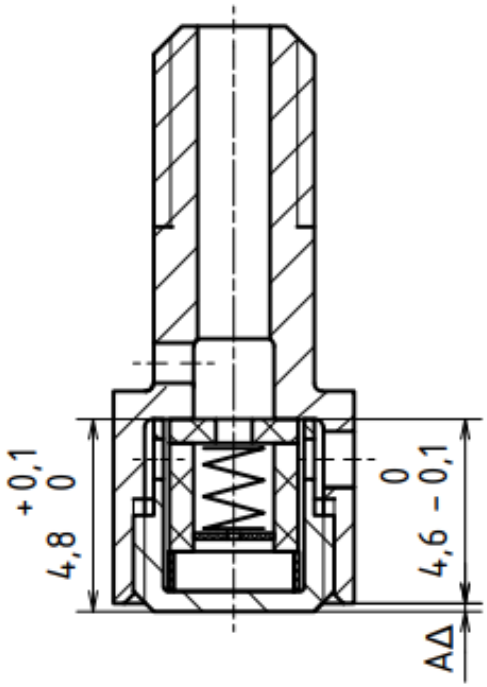
$$p = \frac{F_p}{z_{\check{c}} \cdot \pi \cdot d_2 \cdot 0{,}541 \cdot P} = \frac{1{,}3}{3 \cdot \pi \cdot 4{,}675 \cdot 0{,}541 \cdot 0{,}5} = 0{,}109\ MPa \leq p_D = 75\ MPa$$

Závit M5 bez problému udrží vnitřní sílu vyvolanou tlačnou pružinou [26].

9.1.2. Kontrola délkových tolerancí

Zvolení chybných tolerancí by mohlo mít fatální důsledky nefunkčnosti celé aparatury. Tento bod práce se zaměřuje na kontrolu rozměrů částí sestavy senzoru. Rozměry krytu a uzávěru senzoru je potřeba zvolit tak, aby při zašroubování krytu do uzávěru nevyčníval okraj uzávěru přes okraj krytu. Senzor se totiž musí dotýkat se vzorkem horniny krytem senzoru, ve kterém se nachází piezotableta. Měření by jinak neprobíhalo.

Na Obrázku 17 je zobrazen rozměrový obvod, který řeší vzdálenost mezi vnější plochou krytu a spodním okrajem uzávěru. Kryt senzoru se do uzávěru šroubuje na doraz a vnitřní komponenty sestavy jsou navrženy s délkovými tolerancemi do mínusu. Kryt senzoru se tedy vždy dotýká svým okrajem o vnitřní stěnu uzávěru senzoru. Uzavírajícím členem je $A\Delta$. Délka krytu senzoru se pro tento uzavřený rozměrový obvod chová jako zvětšující člen (s rostoucím rozměrem se zvětšuje hodnota uzavírajícího členu) a hloubka otvoru v uzávěru se chová jako zmenšující člen (s rostoucím rozměrem se zmenšuje hodnota uzavírajícího členu). Největší hodnota rozměru A se spočítá jako rozdíl největšího rozměru zvětšujícího členu a nejmenšího rozměru zmenšujícího členu a nejmenší hodnota rozměru A se spočítá jako rozdíl nejmenšího rozměru zvětšujícího členu a největšího rozměru zmenšujícího členu.



Obrázek 17 - Rozměrový obvod sestavy senzoru

$$A_{MAX} = 4{,}9 - 4{,}5 = 0{,}4\ mm$$

$$A_{MIN} = 4{,}8 - 4{,}6 = 0{,}2\ mm$$

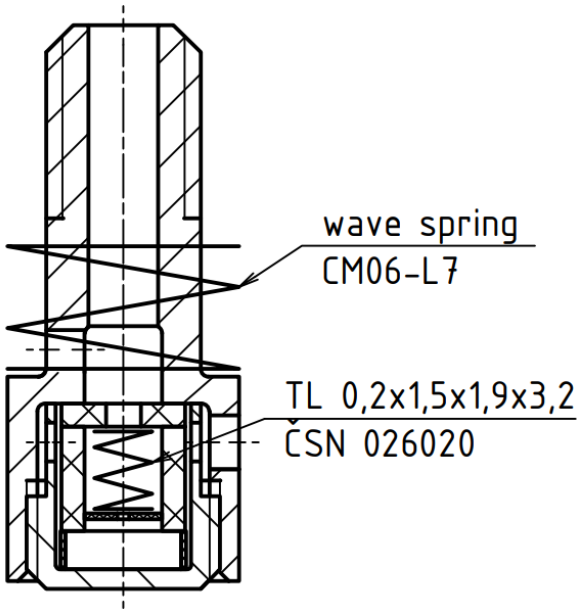
$$A = 0{,}2^{+0{,}2}_{+0}\ mm$$

Velikost uzavírajícího členu je v rozsahu 0,2 mm a 0,4 mm.

9.2. Detailní upevnění snímačů

Senzory se vkládají zevnitř do domků na kleci. V celé aparatuře se vyskytují dva druhy pružin (viz Obrázek 18). Jedna tlačná pružina byla zmíněna v kapitole 9.1. Nachází se uvnitř senzoru a přitlačuje živý drát na piezotabletu. Druhá tlačná pružina se nazývá „wave spring“ a není součástí sestavy senzoru, ale sestavy aparatury. Umísťuje se mezi senzor a domek a zajišťuje neustálý kontakt senzoru s měřeným vzorkem horniny. Pružina „wave spring“ se zvolila na základě své úsporné délky. Díky nízké pružině se zlepší pevnost klece a zvětší prostor u senzorů v poli jedna. Specifikace tlačné pružiny „wave spring“ jsou popsány v tabulce 3 a její vzhled zobrazuje Obrázek 19. Vodicí plochou senzoru je větší vnější válec o průměru 6 mm.

Dále se senzor pojišťuje proti vypadnutí z klece při výměně vzorků a koaxiální kabel se zajišťuje proti vypadnutí ze senzoru. Možnosti jednotlivých pojištění popisují body 9.2.1. a 9.2.2. Zvolené upevnění snímače je nakresleno na Obrázku 20.

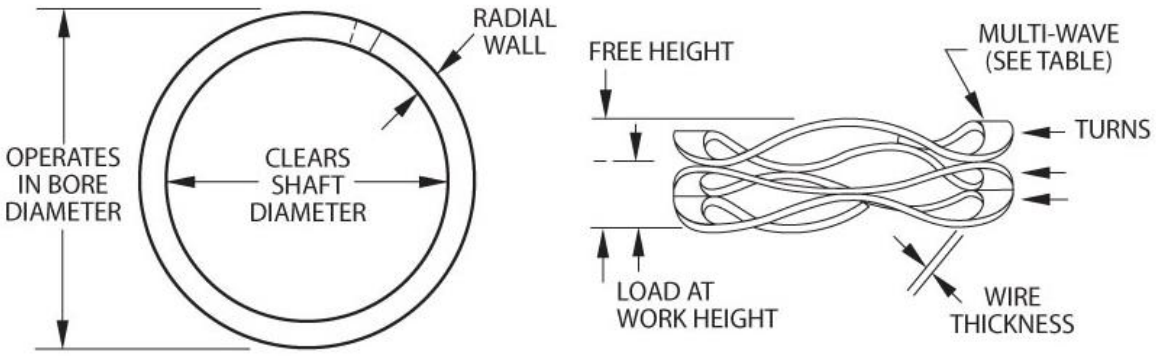


Obrázek 18 - Sestava senzoru s nasazenou „wave spring"

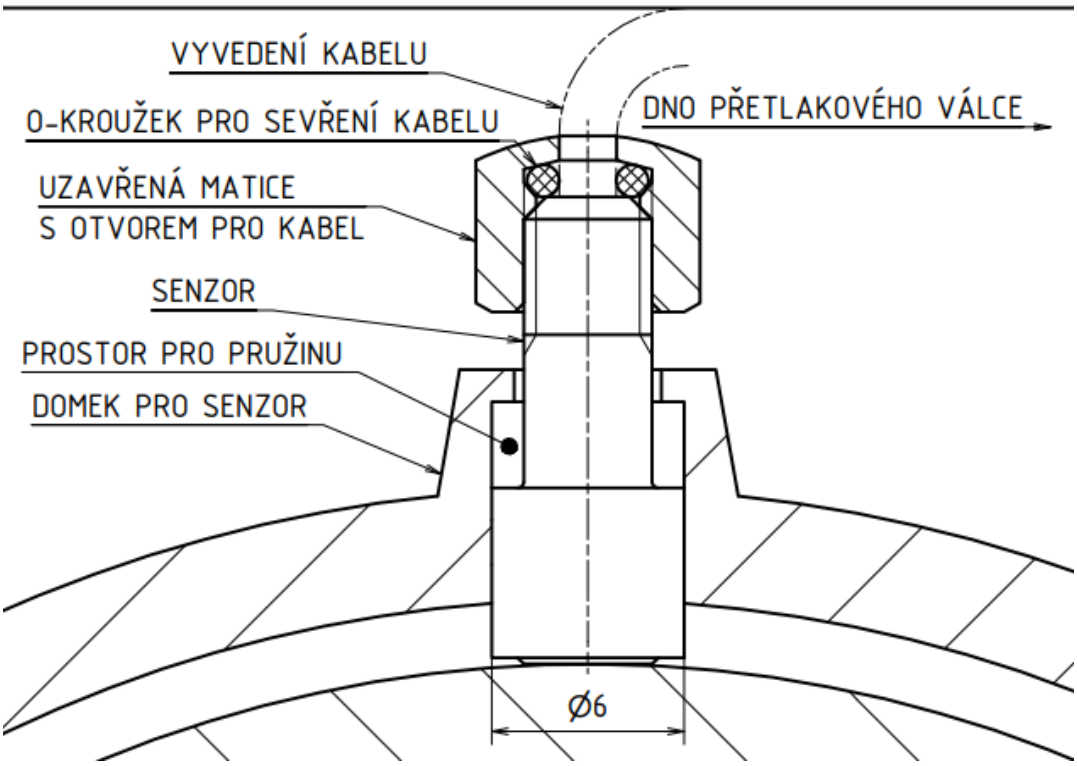
Tabulka 3 - Specifikace tlačné pružiny CM06-L7 [27]

Vnější průměr pružiny	6 mm
Délka pružiny ve volném stavu	4,57 mm
Délka pružiny při plném zatížení	1,83 mm
Síla pružiny při plném zatížení	6 N
Tuhost pružiny	2,19 N/mm
Tloušťka drátu	0,13 mm
Šířka drátu	0,51 mm
Počet kroužků	9
Počet zvlnění kroužku	2,5

Maximálního stlačení dosahuje pružina při smontování, a to 2,7 mm. Působením hydrostatického tlaku se vzorek horniny zmenšuje směrem do středu až o 1 mm. Pružina tedy pracuje až v rozsahu mezi 2,7 mm a 3,7 mm. Rozsah byl zvolen na základě střední hodnoty pracovního rozsahu pružiny, která je 3,2 mm. Dle výrobce má charakteristika zatížení pružiny lineární průběh s mírnými odchylkami v krajních polohách pracovní oblasti pružiny [27].



Obrázek 19 - Wave spring [27]



Obrázek 20 - Nákres uložení jednoho senzoru v poli 1

9.2.1. Pojištění třmenovým pojistným kroužkem

Senzor se proti vypadnutí pojišťuje pomocí třmenového pojistného kroužku ∅ 3,2 ČSN 02 2929. Uzávěr senzoru má na menším válci místo závitu M4 drážku pro pojistný kroužek. Kabel se vlepuje do otvoru pro kabel na uzávěru senzoru. Výhoda pojištění pojistným kroužkem spočívá ve větším prostoru pro vyvedení kabelu u senzorů v polích jedna a dva. Sestava senzoru má délku pouze 13,7 mm a kabel se vyvádí přímo z otvoru pro kabel. Nevýhodou je špatně rozebíratelná sestava senzoru.

9.2.2. Pojištění maticí

Senzor se proti vypadnutí pojišťuje pomocí uzavřené matice M4 DIN917, do které je v ose vyvrtaný otvor pro vyvedení kabelu. Před smontováním se do matice vloží o-kroužek 1,78x1,02 NBR70 DIN3771. Při utahování matice se o-kroužek stlačí a utěsní kabel. Výhoda pojištění pomocí matice spočívá ve snadné montáži a demontáži. Prostor pro vyvedení kabelu se zmenší o necelé 3 mm.

10. Navržená konstrukce

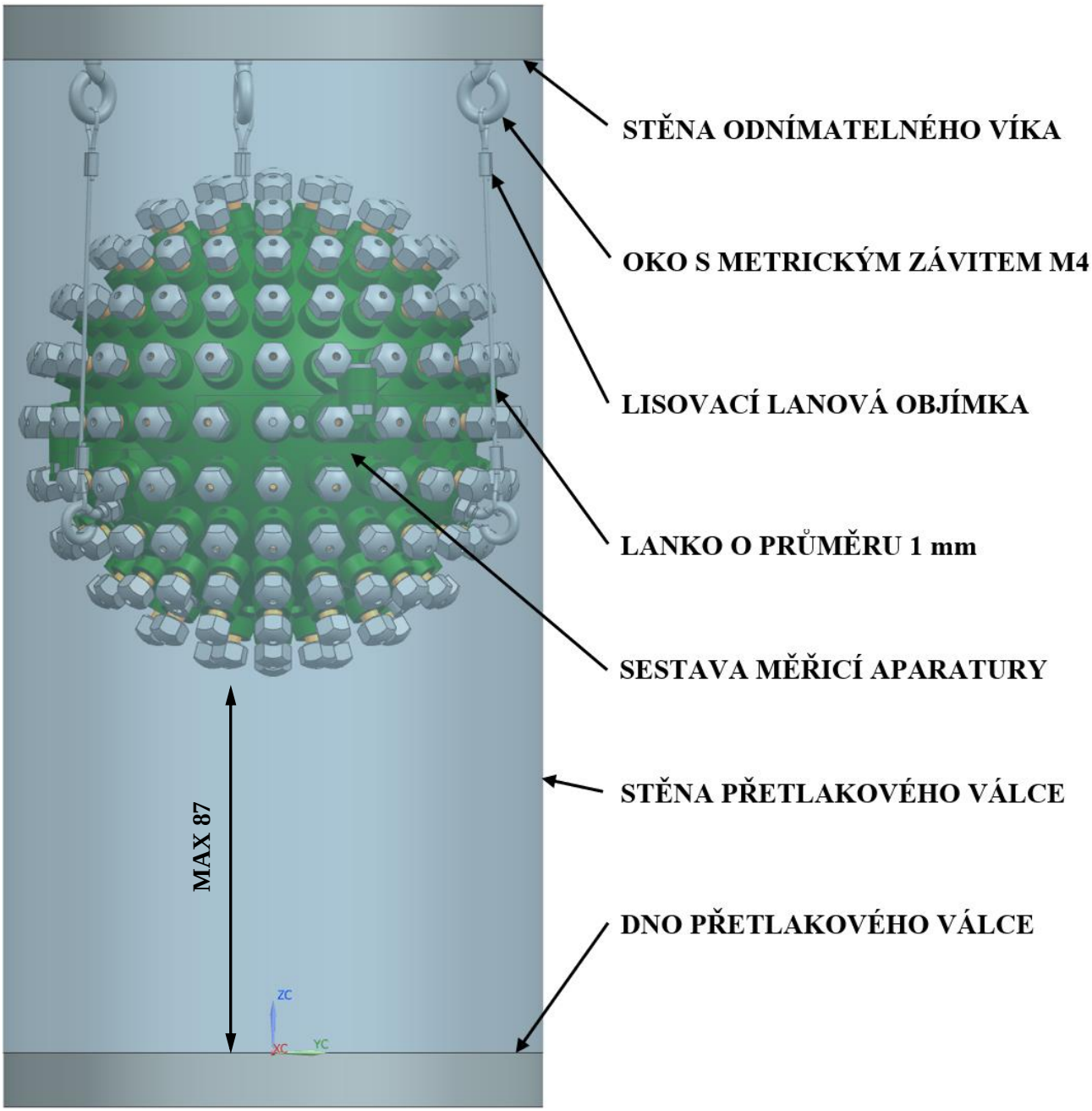
V předchozích kapitolách se nová vícesnímačová aparatura popisovala po jednotlivých částech. Poslední kapitola se zabývá pohledem na sestavu jako na celek. Řeší otázky prostoru v přetlakovém válci, montáže a silových účinků od tíhy a od pružin.

Přetlakový válec má rozměry Ø 120 mm x 220 mm. Uvnitř válce se kromě aparatury držící senzory nachází také relé kontakty, umístěné na dně válce. Aparatura se zavěšuje pomocí třech ocelových lanek, jejichž délkou lze nastavit prostor pro relé kontakty. Prostor pro relé kontakty mezi visící aparaturou a dnem nádoby při zavěšení v nejvyšší možné poloze je 87 mm (od výšky přetlakového válce odečtena výška aparatury a dvakrát minimální doporučený ohyb kabelu RG178). Pohled na celkovou aparaturu bez vyvedených kabelů je na Obrázku 21 a komponenty, které patří do sestavy jsou vypsány v tabulce 4.

Kabely RG178 vyvedené od snímačů směřují na dno přetlakového válce k relé kontaktům, kde jsou připojeny pomocí konektorů MMCX. Volná plocha v rovině vymezené rovníkem mezi aparaturou a stěnou přetlakového válce, kudy mají možnost kabely projít, má 2257 mm^2 (plocha vypočítaná při pohledu na aparaturu shora). Touto plochou musí projít 89 kabelů od senzorů z polí dva až sedm. Plocha průřezů těchto kabelů o Ø 1,8 mm činí 226 mm^2. Kabely vedoucí do relé kontaktů zabírají zhruba desetinu průchozí plochy.

Tabulka 4 - Komponenty sestavy přípravku

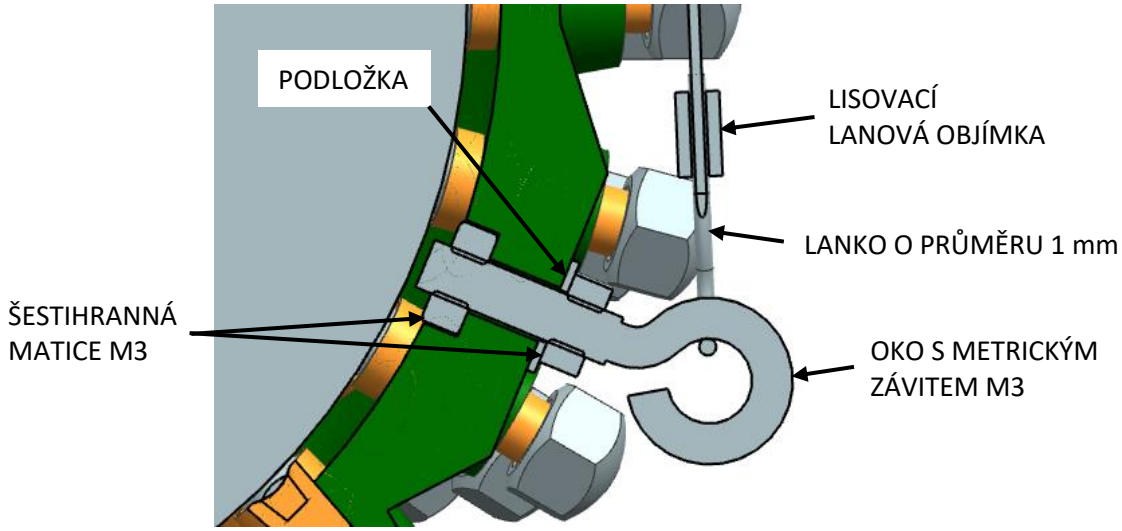
Komponent sestavy přípravku	Norma/číslo výkresu	Materiál/polotovar	Počet kusů
Spodní část klece	klec_spodní_část_3K.1.stl	ABS	1
Vrchní část klece	klec_horní_část_3K.1.stl	ABS	1
Senzor	MA-S-01	-	202
Oko se závitem M4	Oko s metrickým závitem	Nerezová ocel	3
Oko se závitem M3	Oko s metrickým závitem	Nerezová ocel	3
Šroub s válcovou hlavou	DIN 912 – M3x10	Nerezová ocel	7
Matice M3	DIN 934 – M3	Nerezová ocel	13
Wave spring	CM06-L7	Nerezová ocel	202
Uzavřená matice	DIN917/MA-02	Mosaz	202
O-kroužek	NBR70 1,78x1,02	Nitril butadien kaučuk	202
Trisert	145M2	Nerezová ocel	2
Podložka	DIN125A	Nerezová ocel	6
Konektor MMCX	-	-	202



Obrázek 21 - Pohled na sestavu umístěnou v přetlakovém válci zepředu bez vyvedení kabelů

10.1. Postup montáže

Montáž celé aparatury začíná smontováním senzoru. Krimpovacími kleštěmi se odřízne vnější izolační plášť koaxiálního kabelu 10 mm od konce RG178 a dráty vodivého stínění se přehnou podél pláště kabelu. Následně se odstraní izolační vrstva kabelu 3 mm od ohybu vodivého stínění a zůstane samotná žíla. Otvorem pro kabel, nacházejícím se v krytu senzoru, se směrem od užší části protáhne koaxiální kabel. Po celé délce otvoru pro kabel bude kabel s vnějším pláštěm spolu s přehnutými dráty stínění. Na stínění žíly se nasune víko stínění. Dále se na žílu nasune pružina válec stínění a podložka stínění a konec žíly se spirálovitě zakončí a přebytek žíly se odstřihne. Do uzávěru se vloží Piezotableta po obvodu oblepená izolační páskou. Uzávěr se našroubuje do krytu senzoru, čímž se stlačí pružina zajistí kontakt žíly s piezotabletou a uzemnění. Dotažení se provádí z boku pomocí tyče o průměru 1 mm.



Obrázek 22 - Řez aparatury osou oka s metrickým závitem

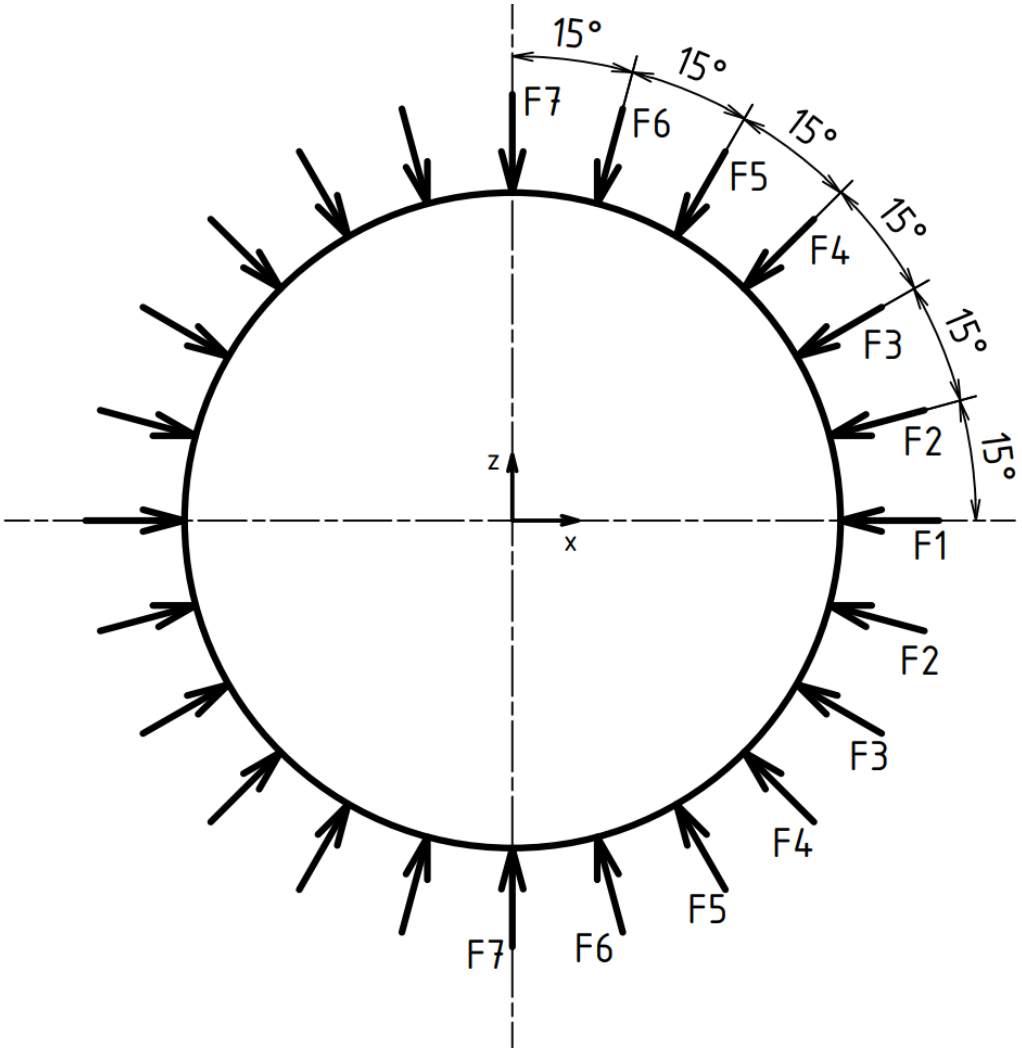
V další části montáže se sestavuje sestava aparatury s komponenty, které se při výměně horninových vzorků nerozebírají. Na sestavu senzoru se na užší válec nasune pružina „wave spring“. Senzor se prostrčí zevnitř do domku v kleci kabelem napřed a zvenku se na kabel nasune o-kroužek až k okraji senzoru a pojistí uzavřenými maticemi proti vypadnutí při výměně vzorků. Na konce kabelů se umístí konektory MMCX. Do šesti otvorů ve spodní části klece s předtisknutými tvary matek se zevnitř vlepí vteřinovým lepidlem matice M3. Matice tří spodních otvorů se s podložkami zvenku dotáhnou třemi stavěcími šrouby. Konce stavěcích

šroubů slouží k dosednutí vzorku a umístění vzorku ve správné vzdálenosti od klece. Kontaktní plochy stavěcích šroubů se přelepí izolační páskou. Dále se na oka se závitem M3 našroubují matice a nasunou podložky. Do třech zbývajících otvorů ve spodní části klece se tato oka se závitem našroubují tak, aby z matice vyčnívala nejvýše 2 stoupání závitu. Finální dotažení oka se závitem se provede pomocí vnější matice (spojení zobrazeno na Obrázku 22). Na oka se navlékne ocelové lanko, které se zajistí pomocí lisovací objímky. Ve spodní části klece jsou po obvodu čtyři předtisknuté otvory pro matice M3 sloužící ke spojení klecí. Do těchto otvorů se vlepí matice M3. Tři oka se závitem M4 se zašroubují do víka přetlakové nádoby.

Poslední část montáže popisuje úkony, které bude potřeba provádět před každým měřením vzorku horniny. Vzorek horniny se umístí na stavěcí šrouby do spodní částí klece. Následně se horní část klece spojí se spodní s dotáhne se pomocí čtyř šroubů s válcovou hlavou a vnitřním šestihranem. Nakonec se navléknou volné konce lanek na oka se závitem ve víku přetlakové nádoby a celá aparatura je smontována.

10.2. Silové účinky

Tlačné pružiny „wave spring“, pomocí kterých se dotlačují senzory na povrch vzorku, působí maximální silou 6 N. Síly působící na vzorek horniny se vzájemně vynulují, protože rozložení senzorů je symetrické dle středu sférického vzorku horniny. Silové účinky od pružin se nejvíce projeví na spojení vrchní a spodní části klece. Na spojení působí silové účinky od pružin ve vrchní i spodní kleci. Každé pole senzorů vytváří jiný silový účinek na spojení klecí dle úhlu, který svírá se svislou osou z (zobrazeno na Obrázku 23).



Obrázek 23 - Silové účinky působící na vzorek horniny

Zde jsou vypočítané silové účinky do svislého směru z (v tomto směru jsou sešroubovány klece k sobě šrouby) od pružin v každém poli dle rozložení senzorů specifikovaných dle výkresu PZ-202:

$$F_1 = F_p \cdot \cos 90° \cdot n_S = 6 \cdot \cos 90° \cdot 24 = 0\ N;$$

$$F_2 = F_p \cdot \cos 75° \cdot n_S = 6 \cdot \cos 75° \cdot 24 = 37{,}3\ N;$$

$$F_3 = F_p \cdot \cos 60° \cdot n_S = 6 \cdot \cos 60° \cdot 24 = 72\ N;$$

$$F_4 = F_p \cdot \cos 45° \cdot n_S = 6 \cdot \cos 45° \cdot 20 = 84{,}9\ N;$$

$$F_5 = F_p \cdot \cos 30° \cdot n_S = 6 \cdot \cos 30° \cdot 12 = 62{,}4\ N;$$

$$F_6 = F_p \cdot \cos 15° \cdot n_S = 6 \cdot \cos 15° \cdot 8 = 46{,}4\ N;$$

$$F_7 = F_p \cdot \cos 0° \cdot n_S = 6 \cdot \cos 0° \cdot 1 = 6\ N.$$

Celková síla působící na spojení obou klecí k sobě je dána součtem silových působení ve všech polích (pole dva až sedm jsou v dolní části klece symetrická s horní částí klece):

$$F = F_1 + 2 \cdot (F_2 + F_3 + F_4 + F_5 + F_6 + F_7);$$

$$F = 0 + 2 \cdot (37{,}3 + 72 + 84{,}9 + 62{,}4 + 46{,}4 + 6) = 618\ N.$$

Každý ze čtyř šroubů M3 musí přenést čtvrtinu z celkové síly vyvozené od pružin, tedy 154,5 N. Reálně pružiny průměrně působí ve své nejstlačenější poloze (po smontování) silou cca 4 N, takže každý šroub přenáší pouze 103 N. Po zmenšení vzorku horniny vlivem tlaku ještě méně.

10.3. Výměna hornin

Důležitým procesem při měření tomografie hornin je výměna horninového vzorku. Po doměření předchozího vzorku se vypustí přetlakový válec a otevře se. Sejmou se všechna lanka ze šroubů s metrickým závitem M4 umístěným ve víku a aparatura se pověsí jinam tak, aby byl shora dobrý přístup. Následně se odšroubují 4 šrouby spojující obě části klece. Horní část klece se opatrně odejme, aby se nepoškodily senzory s vyvedenými kabely a měřený vzorek se vymění za nový. Následně se oba barevné středicí důlky nasměrují ke dvěma otvorům na kleci a pomocí šroubů M2 se z boku aretují. Poté se přiklopí horní část klece na spodní a spojí se pomocí 4 šroubů. Lanka se navěsí zpět na oka umístěná na víku přetlakového válce, a ten se i s relé kontakty vloží dovnitř přetlakové nádoby. Nádoba se uzavře, zaplní olejem, natlakuje a měření může probíhat.

11. Závěr

V první části bakalářské práce se provedla rešerše podobných typů měření anizotropie hornin ve světě a ultrazvukových snímačů. Problematikou měření anizotropie hornin se zabývá pouze několik institucí ve světě. Z institucí zabývající se přímo pouze touto problematikou jsou Geologický ústav Akademie věd ČR, v. v. i., Institute of Earth Sciences at Kiel a Ergotech Ltd. Každá z nich používá zcela odlišnou měřicí aparaturu a tvar vzorku. Geologický ústav AV ČR používá jako jediný sférický vzorek horniny. Vědci z Geologického ústavu získají vyřešením této práce aparaturu navrženou za účelem zefektivnění a zpřesnění měření, zvýšení množství změřených dat za kratší dobu a získání možnosti řešit úlohy, se kterými se dosud neměli šanci setkat. Největším limitujícím faktorem aparatury je stísněný prostor v přetlakovém válci. Žádný výrobce nenabízí pro tuto aparaturu vhodné ultrazvukové snímače a snímače používané na Geologickém ústavu mají příliš velké rozměry pro použití na nové aparatuře, proto bylo potřeba navrhnout pro novou aparaturu i nové snímače.

V druhé části bakalářské práce jsou popsány 4 návrhy konstrukce tělesa přípravku. Jeden z nich byl vybrán vědci z Geologického ústavu a detailněji zpracován ve formě 3D modelu. Návrhy se od sebe liší metodou výroby tělesa přípravku a stylem upevnění 202 snímačů dle předem dané konfigurace. První dva návrhy jsou vyráběny obráběním z tyče z oceli a snímače se vkládají přes pružinu do příruby, která se do tzv. klece šroubuje. U prvního návrhu se příruby montují zevnitř. Druhý návrh má příruby šroubovatelné zvenku, což je z hlediska místa a montáže velmi výhodná varianta. Třetí návrh kopíruje druhý, metodou výroby ale není obrábění, nýbrž kombinace tisku z kovu a obrábění, čímž ulehčuje výrobu tvarově komplikovaného dílu. Čtvrtý návrh, zvolený pro detailní rozpracování, byl navržen pro tisk z plastu. Snímače jsou přes pružinu umístěny přímo do klece, která má pro ně vymodelované tzv. domky. Snímače se pojišťují proti vypadnutí při výměně vzorků. Klec se skládá ze dvou nesymetrických polokoulí, které jsou k sobě smontovány pomocí čtyř šroubů. Klec v přetlakové nádobě visí za oka s metrickým závitem.

V další části práce byl navržen ultrazvukový snímač. Návrh se vytvořil na základě funkčního prototypu, který vlastní Geologický ústav. Rozměry snímačů se určily na základě prostoru při rozložení senzorů dle předem dané specifikace a dle nejmenších možných vnitřních

prostorů. Princip fungování senzoru a materiály jednotlivých komponent byly zachovány. Navrhla se dvě možná uložení senzorů v kleci.

V poslední části se popisuje postup montáže aparatury, rozložení aparatury v přetlakovém válci a silové účinky vyvolané od pružin přitlačujících senzory na povrch vzorku.

V současné době jsou všechny komponenty sestavy vyrobeny a nakoupeny. Na základě výroby byly některé komponenty upraveny. Vědci z Geologického ústavu Akademie věd ČR, v. v. i. chystají elektrické zapojení aparatury a otestují celou konstrukci aparatury s menším počtem senzorů, pro které mají připravené programy. Pro plné využití aparatury bude potřeba vytvořit algoritmy pro načítání hodnot z jednotlivých snímačů pomocí relé kontaktů a jejich vyhodnocování pomocí softwaru pro zpracování velkého objemu dat.

Seznamy

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Závislost rychlosti P-vln na hydrostatickém tlaku [2] 12
Obrázek 2 - Přípravek s upevněným vzorkem 14
Obrázek 3 - Schéma měřicího zařízení GÚ AV ČR [5] 14
Obrázek 4 - Schéma měřicího zařízení Kiel [6] 15
Obrázek 5 – Schéma měřicího zařízení ErgoTech Ltd. [7] 16
Obrázek 6 - Schéma měřicího zařízení SINTEF Petroleum Research [8] 17
Obrázek 7 - Nákres ultrazvukového snímače vyrobeného na GÚ AV ČR 20
Obrázek 8 - Ultrazvukový snímač od firmy SONATEST Plc. [18] 21
Obrázek 9 - Zavěšení navrhované aparatury v kleci 24
Obrázek 10 - Základní model klece 25
Obrázek 11 - Návrhy uložení snímačů do klece (nalevo – klec montovaná zevnitř, napravo – klec montovaná zvenku) 26
Obrázek 12 - Návrh uložení snímače v kleci tisknuté z plastu 27
Obrázek 13 - Spodní část klece (pohled shora) 30
Obrázek 14 - Detail spojení klece 31
Obrázek 15 - Detail spodní části klece s výchozím domkem (označen 0°) 32
Obrázek 16 - Návrh uspořádání senzoru (bez zobrazení kabelu) 34
Obrázek 17 - Rozměrový obvod sestavy senzoru 37
Obrázek 18 - Sestava senzoru s nasazenou „wave spring" 38
Obrázek 19 - Wave spring [27] 39
Obrázek 20 - Nákres uložení jednoho senzoru v poli 1 39
Obrázek 21 - Pohled na sestavu umístěnou v přetlakovém válci zepředu bez vyvedení kabelů 43
Obrázek 22 - Řez aparatury osou oka s metrickým závitem 44
Obrázek 23 - Silové účinky působící na vzorek horniny 46

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Nabízené ultrazvukové senzory 21
Tabulka 2 - Komponenty sestavy senzoru 33
Tabulka 3 - Specifikace tlačné pružiny CM06-L7 [25] 38
Tabulka 4 - Komponenty sestavy přípravku 42

Seznam použitého softwaru

Microsoft office 365

NX Siemens 10

Autodesk Inventor 2017

Seznam příloh

- Výkresová dokumentace

Zadané výkresy:

PZ – 202	MNOHOSTĚN

Sestava senzoru:

MA-S-00	Kusovník – sestava senzoru
MA-S-01	Sestava senzoru
MA-S-02	Kryt senzoru
MA-S-03	Uzávěr senzoru
MA-S-04	Stínění – válec
MA-S-05	Stínění – kryt
MA-S-06	Stínění – podložka

Sestava aparatury:

MA-00	Kusovník – sestava aparatury
MA-01	Sestava aparatury
MA-02	Otvor do uzavřené matice

- Elektronické přílohy (CD)

3D model ve formě STEP

3D model klece ve formě STL

Bakalářská práce „Návrh přípravku pro vícesnímačové měření vlastností nehomogenních vzorků za vysokých tlaků“ ve formě PDF

Výkresová dokumentace ve formě PDF

Seznam použité literatury

[1] Saxena, Vimal Krief, Michel Adam, Ludmila. (2018). Handbook of Borehole Acoustics and Rock Physics for Reservoir Characterization. (pp. 327-378). Elsevier. Retrieved from https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpHBARPRC1/handbook-borehole-acoustics/handbook-borehole-acoustics.

[2] PROS, Z., T. LOKAJÍČEK a K. KLÍMA. Laboratory Approach to the Study of Elastic Anisotropy on Rock Samples. *Pure and Applied Geophysics* [online]. 1998, 151(2-4), 619-629 [cit. 2020-01-13]. DOI: 10.1007/s000240050133. ISSN 0033-4553. Dostupné z: http://link.springer.com/10.1007/s000240050133.

[3] TOGASHI, Yota, Mamoru KIKUMOTO a Kazuo TANI. An Experimental Method to Determine the Elastic Properties of Transversely Isotropic Rocks by a Single Triaxial Test. *Rock Mechanics and Rock Engineering* [online]. 2017, 50(1), 1-15 [cit. 2020-02-08]. DOI: 10.1007/s00603-016-1095-9. ISSN 0723-2632. Dostupné z: http://link.springer.com/10.1007/s00603-016-1095-9.

[4] PETRUŽÁLEK, M., J. VILHELM, V. RUDAJEV, T. LOKAJÍČEK a T. SVITEK. *Determination of the anisotropy of elastic waves monitored by a sparse sensor network. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* [online]. 2013, 60, 208-216 [cit. 2020-02-08]. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2012.12.020. ISSN 13651609. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1365160912002481.

[5] LOKAJÍČEK, Tomáš a Tomáš SVITEK. *Laboratory measurement of elastic anisotropy on spherical rock samples by longitudinal and transverse sounding under confining pressure. Ultrasonics* [online]. 2015, 56, 294-302 [cit. 2020-02-08]. DOI: 10.1016/j.ultras.2014.08.015. ISSN 0041624X. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0041624X14002376.

[6] LOKAJÍČEK, T., H. KERN, T. SVITEK a T. IVANKINA. *3D velocity distribution of P- and S-waves in a biotite gneiss, measured in oil as the pressure medium: Comparison with velocity measurements in a multi-anvil pressure apparatus and with texture-based calculated data. Physics of the Earth and Planetary Interiors* [online]. 2014, 231, 1-15

[cit. 2020-01-13]. DOI: 10.1016/j.pepi.2014.04.002. ISSN 00319201. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0031920114001113.

[7] GOODFELLOW, S. D., N. TISATO, M. GHOFRANITABARI, M. H. B. NASSERI a R. P. YOUNG. *Attenuation Properties of Fontainebleau Sandstone During True-Triaxial Deformation using Active and Passive Ultrasonics. Rock Mechanics and Rock Engineering* [online]. 2015, 48(6), 2551-2566 [cit. 2020-02-08]. DOI: 10.1007/s00603-015-0833-8. ISSN 0723-2632. Dostupné z: http://link.springer.com/10.1007/s00603-015-0833-8.

[8] SZEWCZYK, Dawid, Andreas BAUER a Rune M. HOLT. *A new laboratory apparatus for the measurement of seismic dispersion under deviatoric stress conditions. Geophysical Prospecting* [online]. 2016, 64(4), 789-798 [cit. 2020-02-08]. DOI: 10.1111/1365-2478.12425. ISSN 00168025. Dostupné z: http://doi.wiley.com/10.1111/1365-2478.12425.

[9] HAUPTMANN, Peter, Niels HOPPE a Alf PÜTTMER. Application of ultrasonic sensors in the process industry. *Measurement Science and Technology* [online]. 13(8), R73-R83 [cit. 2020-02-11]. DOI: 10.1088/0957-0233/13/8/201. ISSN 09570233. Dostupné z: http://stacks.iop.org/0957-0233/13/i=8/a=201?key=crossref.46c2cb671630c7655fa693634727bc91.

[10] KOPEC, Bernard. Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí: (nauka o materiálu IV). Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. ISBN 978-80-7204-591-4.

[11] TYSCO, Krista. What is coaxial cable and how is it used? *PPC Worldwide* [online]. New York: PPC Worldwide, 2020 [cit. 2020-03-05]. Dostupné z: https://www.ppc-online.com/blog/what-is-coaxial-cable-and-how-is-it-used.

[12] XIONG, N. a P. SVENSSON. Multi-sensor management for information fusion: issues and approaches. *Information Fusion* [online]. 2002, 3(2), 163-186 [cit. 2020-02-22]. DOI: 10.1016/S1566-2535(02)00055-6. ISSN 15662535. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1566253502000556.

[13] VERWYS, William. ABCs of Multisensor Measurement. *Quality Measurement* [online]. 2004, 2004 [cit. 2020-03-01]. Dostupné z: https://www.qvii.com/Assets/files/OGP_article_ABCs_of_Multisensor_Measurement.pdf.

[14] THUE, William A. *Electrical Power Cable Engineering* [online]. II. Series. New York: Marcel Dekker, c1999 [cit. 2020-03-05]. ISBN 0-8247-9976-3. Dostupné z: https://www.slideshare.net/hprabowo/electrical-power-cable-engineering.

[15] Generating Ultrasound with Piezo Components. *PI Piezo Technology* [online]. Lederhose (Germany): PI Ceramic, 2020 [cit. 2020-03-06]. Dostupné z: https://www.piceramic.com/en/piezo-technology/generating-ultrasound-with-piezo-components/.

[16] Podklady a informace z Geologického ústavu Akademie věd České republiky

[17] *Pepperl+Fuchs* [online]. Praha: Pepperl+Fuchs, c2020 [cit. 2020-03-07]. Dostupné z: https://www.pepperl-fuchs.com/czech_republic/cs/index.htm.

[18] Advanced Technology Group. *Ultrazvukové sondy a příslušenství* [online]. Praha: ATG [cit. 2020-03-07]. Dostupné z: https://atg.cz.

[19] *Farnell* [online]. Leeds: Farnell, c2019 [cit. 2020-03-07]. Dostupné z: https://cz.farnell.com.

[20] *SensComp* [online]. Detroit: SensComp global components, c2016 [cit. 2020-03-07]. Dostupné z: http://www.senscomp.com.

[21] *Jiakang Electronics* [online]. Zhejiang: Jiakang Electronics, c2018 [cit. 2020-03-07]. Dostupné z: http://en.jkelec.com.

[22] *Návrh experimentálního zařízení pro broušení rovinných ploch zkušebních vzorků.* Fakulta strojní, ČVUT, 2015. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní. Vedoucí práce Ing. Pavel Vrba, Ph.D.

[23] TAPPEX – THREAD INSERTS. *KVT – SOLUTIONEERING* [online]. Dietikon: Bossard, c2020 [cit. 2020-07-05]. Dostupné z: https://www.kvt-fastening.ch/en/products/brands/tappex/

[24] Oko s metrickým závitem, pozinkovaný. *Obchod pro dílnu [online].* České Budějovice: Ferospoj, c2020 [cit. 2020-07-09]. Dostupné z: https://www.obchodprodilnu.cz/oko-s-metrickym-zavitem-pozinkovany-5824.html.

[25] Obrábění bezolovnatých slitin. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 14. 5. 2013n. l., 2013(5), 32 [cit. 2020-07-15]. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/obrabeni-bezolovnatych-slitin-medi.html

[26] ŠVEC, Vladimír. *Části a mechanismy strojů: spoje a části spojovací.* Vyd. 3. V Praze: České vysoké učení technické, 2008. ISBN 978-80-01-04138-3.

[27] CM06-L7. *Smalley* [online]. Lake Zurich: Smalley, c2020 [cit. 2020-07-09]. Dostupné z: https://www.smalley.com/wave-spring/cm06-l7.