



**FAKULTA  
STROJNÍ  
ČVUT V PRAZE**

## **Ústav konstruování a částí strojů**

**Experimentální měření vlnovce a konstrukce  
experimentálního přípravku**

**Experimental Measurement Of The Air  
Spring Bellow And Construction Of Utilities  
For Measumerement**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**2017**

**Bc. Vojtěch STEHLÍK**

**Studijní program:** N2301 STROJNÍ INŽENÝRSTVÍ  
**Studijní obor:** 2301T047 Dopravní, letadlová a transportní technika  
**Vedoucí práce:** prof. Ing. Vojtěch Dinybyl, Ph.D.

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Stehlík** Jméno: **Vojtěch** Osobní číslo: **409146**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav konstruování a částí strojů**  
Studijní program: **Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Dopravní, letadlová a transportní technika**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Experimentální měření vlnovce a konstrukce experimentálního přípravku**

Název diplomové práce anglicky:

**Experimental Measurement Of The Air Spring Bellow And Construction Of Utilities For Measurement**

Pokyny pro vypracování:

V rámci diplomové práce bude řešeno experimentální naměření zátěžové charakteristiky dvou vlnovců. Měření bude provedeno při tlacích 1-8 bar s odstupňováním po 1 baru. Výsledkem měření budou grafy závislosti zdvih  $\delta$  síla pro jednotlivé tlakové hladiny a tabulky naměřených dat. V této práci bude také vyřešena konstrukce upínacího přípravku potřebného k měření na daném stroji. Dále bude popsána metodika měření statické charakteristiky a zároveň bude zpracována teorie pro měření a stanovení dynamických charakteristik.

Seznam doporučené literatury:

ŠVEC, V.: Části a mechanismy strojů. Spoje a části spojovací. Praha: ČVUT, 2008.

ŠVEC, V.: Části a mechanismy strojů. Mechanické převody. Praha: ČVUT, 2003.

KUGL, O. a kol.: Projekt III. Ročník. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**prof. Ing. Vojtěch Dinybyl Ph.D., ústav konstruování a částí strojů FS**


Jméno a pracoviště druhého(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **24.03.2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **09.06.2017**

Platnost zadání diplomové práce: \_\_\_\_\_

  
Podpis vedoucí(ho) práce

  
Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

  
Podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

10.4.2017  
Datum převzetí zadání

Vojtěch Stehlík  
Podpis studenta

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem: „Experimentální měření vlnovce a konstrukce experimentálního přípravku“ vypracoval samostatně pod vedením Prof. Ing. Vojtěcha Dynybyla, Ph.D. s použitím literatury, uvedené na konci mé diplomové práce v seznamu použité literatury.

V Praze dne 30. 7. 2017

Bc. Vojtěch Stehlík

## **Poděkování**

Chtěl bych poděkovat především vedoucímu své práce, panu prof. Ing. Vojtěchu Dynybylovi, Ph. D., za čas, který mi věnoval, za cenné rady a poznatky, které mi ke zpracování práce poskytl, a hlavně za trpělivost, když se ne vše dařilo podle plánu. Dále bych rád poděkoval svému konzultantovi ve firmě Rubena a.s. Ing. Milanu Říhovi za důležité informace a zkušenosti, které jsem při této práci využil. Nakonec chci poděkovat své rodině za pomoc a podporu po celou dobu mého studia.

# Anotační list

Jméno autora: **Bc. Vojtěch STEHLÍK**

Název DP: Experimentální měření vlnovce a konstrukce experimentálního přípravku

Anglický název: Experimental Measurement Of The Air Spring Bellow And Construction Of Utilities For Measumerement

Rok: 2017

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství

Obor studia: 2301T047 Dopravní, letadlová a transportní technika

Ústav: Ústav konstruování a částí strojů

Vedoucí BP: Prof. Ing. Vojtěch Dinybyl, Ph.D.

Bibliografické údaje:

počet stran	59
počet obrázků	33
počet tabulek	1
počet příloh	8

Klíčová slova: pneumatická pružina, vlnovec, měch, experiment, zátěžová charakteristika, vibroizolace

Keywords: air spring below, air suspension, measurement, load characteristics, vibro-isolation

## Anotace:

*Cílem této diplomové práce je naměření zátěžové charakteristiky vlnovců 21,5"x1 a 21,5"x2 pro pracovní zdvih pro tlaky 1-8 bar. V teoretické části je popsána historie výroby, konstrukční uspořádání, využití a výhody a nevýhody vlnovců. Praktická část zahrnuje navržení metodiky a naměření dat. Ta jsou poté zpracována do výsledných grafů.*

## Abstract:

*The main purpose of this diploma thesis is the measurement of load characteristics of air spring bellows 21,5"x1 and 21,5"x2 for whole work range and for pressures 1-8 bar. There is a description of history of production, construction, use and advantages and disadvantages of air spring bellows in theoretical part. Practical part includes design of methodology and measurement of data, which are then processed to the final graphs.*

# Obsah

Seznam zkratk a symbolů .....	1
Úvod.....	3
1 Historie výroby vlnovců .....	4
2 Konstrukce a použití vlnovců v praxi.....	6
2.1 Využití vzduchových pružin .....	6
2.2 Výhody a nevýhody použití vlnovců .....	7
2.3 Konstrukce pneumatických pružin.....	8
3 Metodika měření statických charakteristik .....	13
3.1 Vypracování teoretických východisek problému.....	13
3.2 Vytyčení cílů měření .....	18
3.3 Navržení způsobu dosažení provozních podmínek .....	19
3.4 Konstrukce experimentálního přípravku.....	22
3.5 Snímání a archivace dat.....	29
3.6 Stanovení způsobu řízení experimentu.....	29
3.7 Navržení sledu jednotlivých kroků při měření.....	29
3.8 Navržení vhodného systému záznamu o průběhu měření.....	31
3.9 Navržení způsobu zpracování naměřených dat.....	32
3.10 Zkušební stanoviště .....	32
4 Průběh vlastního měření.....	36
5 Vyhodnocení výsledků měření.....	43
6 Stanovení frekvenčních charakteristik .....	46
Závěr.....	48
Seznam obrázků .....	50
Seznam tabulek .....	51
Seznam příloh.....	51

## Seznam zkratek a symbolů

Veličiny, u nichž není uvedena jednotka, jsou bezrozměrné.

symbol	jednotka	význam
$d$	[mm]	průměr čelistí stroje
$d_1$	[mm]	průměr otvoru pro usazení do čelistí meř. zař.
$d_2$	[mm]	průměr otvoru pro usazení vlnovce
$d_3$	[mm]	průměr děr v rozích přípravku
$d_4$	[mm]	průměr díry pro ventil
$D$	[mm]	maximální průměr vlnovce
$D_{req}$	[mm]	zástavbové místo
$D_{roz1}$	[mm]	roztečný průměr děr pro šrouby
$D_{roz2}$	[mm]	roztečný průměr díry pro ventil
$f$	[Hz]	vzorkovací frekvence
$f_x$	[Hz]	frekvence příčných vlastních kmitů
$f_z$	[Hz]	frekvence svislých vlastních kmitů
$F$	[N]	síla ke stlačení pružiny
$F_p$	[N]	síla na píst ve stlačeném stavu
$F_{p0}$	[N]	síla na píst v klidovém stavu
$g$	[ms <sup>-2</sup> ]	tíhové zrychlení
$h$	[mm]	proměnná výška vlnovce
$H(0)$	[mm]	statická výška vlnovce
$H_{MAX}$	[mm]	maximální pracovní výška vlnovce
$H_{MIN}$	[mm]	minimální pracovní výška vlnovce
$H_{stat}$	[mm]	statická výška vlnovce
$k$	[N/mm]	koeficient tuhosti pružiny
$k_0$	[N/mm]	statická tuhost pneumatické pružiny
$k_x$	[N/mm]	tuhost pružiny v ose X
$k_z$	[N/mm]	tuhost pružiny v ose Z
$K_z$	[mm]	jednotková tuhost pružiny
$K_1$	[mm]	jednotková provozně objemová tuhost
$K_2$	[mm]	jednotková plošná tuhost

$m$	[kg]	hmotnost objektu
$n$		polytropický exponent
$p$	[Pa]	tlak plynu ve stlačeném stavu
$p_0$	[Pa]	tlak plynu v klidovém stavu
$p_a$	[Pa]	atmosférický tlak
$p_{destr}$	[Mpa]	minimální destrukční tlak
$p_p$	[MPa]	pracovní přetlak
$p_{MAX}$	[MPa]	maximální pracovní přetlak
$S$	[mm <sup>2</sup> ]	plocha pístu
$S_{ef}$	[mm <sup>2</sup> ]	efektivní plocha pružiny
$t_1$	[mm]	tloušťka tenčího plechu
$t_2$	[mm]	tloušťka tlustšího plechu
$t_3$	[mm]	tloušťka desky pro ocelový přípravek
$V$	[m <sup>3</sup> ]	objem stlačeného plynu
$V_0$	[m <sup>3</sup> ]	objem plynu v klidu
$z$	[mm]	výchylka pružiny od klidové polohy
$Z$	[mm]	celková výška zdvihu
$z_p$	[mm]	stlačení/roztážení měchu
$\alpha$	[rad]	úhel sklonu lineární char. pružiny
$\pi$		Ludolfovo číslo



## Úvod

Tato diplomová práce je psána ve spolupráci s firmou Rubena a.s. Ta je v České republice předním výrobcem pryžových, pryžokovových a pryžotextilních výrobků. Součástí portfolia výrobků jsou například O-kroužky, hřídelová těsnění, hydraulická těsnění, klínové řemeny, silentbloky, pryžové profily či pneumatické pružiny (vlnovce).

Hlavním předmětem této práce je experimentální měření dvou vlnovců dimenzí 21,5"x1 a 21,5"x2 z firmy Rubena a.s. Při návrhu strojních zařízení či odpružení, jejichž součástí mají být pneumatické pružiny, je nutné znát alespoň přibližné hodnoty reakčních sil pro požadovaný zdvih. Tyto hodnoty se značně liší v závislosti na přetlaku vzduchu uvnitř pružiny. Vzhledem k tomu, že pružícím médiem je ve vlnovcích právě vzduch, není možné matematicky přesně určit závislosti sil na velikosti stlačení pro různé tlaky. Je proto třeba využít experimentálního měření, díky kterému jsme schopni proměřit zátěžové charakteristiky těchto pružin a tím získat jasnější představu o silovém rozpětí vlnovce pro různé hodnoty zdvihu.

Cílem této práce tedy bude experimentální naměření zátěžových charakteristik dvou vlnovců po celém jejich pracovním rozsahu pro 8 různých přetlaků odstupňovaných od 1 baru do 8 barů. Zároveň bude zpracována metodika měření, kterou je nutné propracovat před začátkem měření. Součástí metodiky bude také návrh měřicího přípravku potřebného k ustavení vlnovce do měřicího zařízení. Dále budou naměřená data vyhodnocena a zpracována do grafické podoby, aby byla použitelná pro firemní účely.

# 1 Historie výroby vlnovců

Vlnovce, tedy vzduchové pružinové měchy, jsou již poměrně dlouho používaným systémem odpružení nejen automobilů. Počátky pneumatického odpružení vozidel se datují od roku 1901, kdy si Američan William W. Humphreys nechal patentovat myšlenku pneumaticky odpruženého vozidla, která spočívala v pneumatických pružinách vedených po levé a pravé straně podvozku téměř po celé délce vozu. Pružiny byly v podstatě dva vyduté pneumatické polštáře uzavřené z jedné strany a opatřené ventilem pro přívod vzduchu na straně druhé. [1]

První úspěšné použití pneumatické pružiny se nicméně připisuje české společnosti Tatra, která ve 20. letech 19. století použila vzduchové odpružení pro zadní nápravu svého nákladního automobilu. Konstrukce této pružiny však byla tvořena pístem, který se posouval ve válci, což mělo poměrně dost nevýhod. Písty v této konstrukci se totiž hůře těsní, při pohybu ve válci způsobují značné tření a válce se tím pádem celkem rychle opotřebovávají. [2]

Okolo roku 1930 se objevují první pneumatické pružiny s vlnovcovými pryžovými elementy, které jsou vyztužené kordem. Zkoušeny byly na závodním automobilu Bluebird v Anglii a osobním automobilu Regotti v Itálii. Životnost těchto systémů však byla stále velmi malá, proto se do všeobecného povědomí v té době ještě nedostaly.

Během 2. světové války vyvinuly USA vzduchové odpružení pro těžká letadla, které mělo za cíl snížit váhu při zachování kompaktní konstrukce. Tyto vzduchové systémy byly také použity u těžkých nákladních automobilů k dosažení snadné regulace výšky karoserie pomocí nastavitelného tlaku vzduchu, aniž by výška nápravy byla závislá na zatížení vozidla. [2]

O několik let později se firmě Firestone konečně podařilo zkonstruovat a technologicky vyřešit vlnovcové pneumatické pružiny tak, aby svými vlastnostmi dokázaly nahradit a později také předčít dosavadní systémy odpružení automobilů. Zásadně zlepšovaly pocit a komfort z jízdy a jejich životnost byla výrazně vyšší než dosud používaných vzduchových odpružení. Prvním opravdu sériovým použitím se v letech 1953-55 staly autobusy GM 1404 od firmy Greyhound. [2]

Tímto použitím se pneumatické systémy dostaly do všeobecného povědomí tehdejších převážně amerických firem. Společnosti jako Cadillac, Ford, Pointac, Chevrolet nebo Buick se dokonce snažily prosadit pneumatické pružiny pro odpružení svých osobních automobilů, avšak kvůli relativně vysokým pořizovacím nákladům a

poměrně složitým regulačním systémům, jejichž poruchovost byla značná, se ve sféře osobní automobilové dopravy tehdy pořádně neprosadily. [2]

Od roku 1957 se vývoj a výroba pneumatických pružin dostává mezi další světoznámé gumárenské společnosti, jako jsou Dunlop, Pirelli, Continental, Rubena apod. Postupným vývojem se vytváří nové a dokonalejší typy odpružení a roste i sortiment nabízených pružin. Začínají se využívat nejen u autobusů, ale také u nákladních automobilů, návěsů, přívěsů či kolejových vozidel. Dá se říci, že v tuto dobu se pneumatické odpružení dostává do povědomí po celém světě a mnoho firem se snaží o zlepšování jeho konstrukce a technologie výroby. [2]

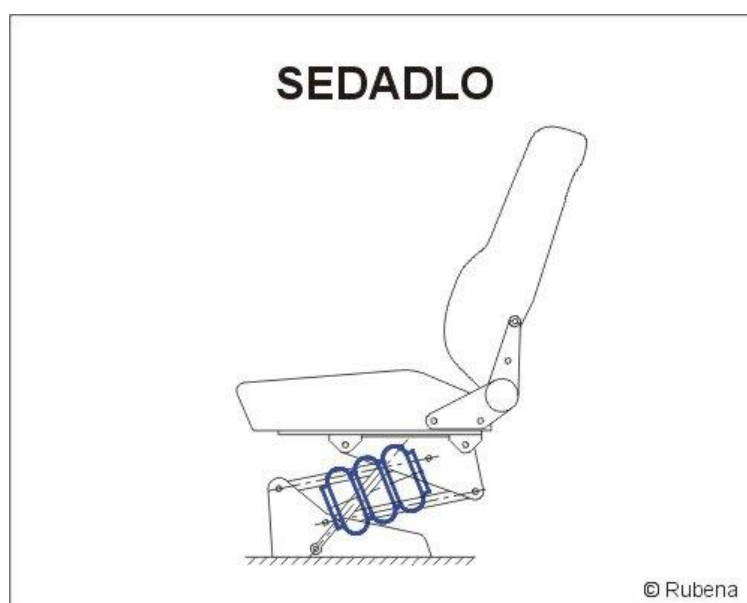
Postupem času dochází k vymýšlení nových konstrukčních řešení, jsou zkoušeny vlnovcové pružiny obdélníkové, které byly používány pro odpružení náprav těžkých nákladních automobilů či speciálních vozidel. Dále jsou také zkoušeny vlnovcové pružiny vakové, jejichž konstrukce je vysvětlena v další kapitole. U pružin membránových došlo k výraznému zvýšení životnosti, která dosahovala 100 až 200 tis. km. Firma Dunlop uvedla na trh také pneumatické pružiny kombinované, jejichž konstrukční řešení vlnovec-membrána bylo montážně zaměnitelné s běžnými vlnovcovými pružinami. Jejich konstrukce již byla technologicky dobře vyřešená, a dokonce se skládaly z některých shodných dílů včetně pryžového vlnovce. Byly vhodné především pro autobusy nebo užitková vozidla. [2]

V dnešní době je na trhu již spousta druhů pneumatického odpružení pro mnoho různých použití. Liší se konstrukčním uspořádáním, rozměry, pracovními rozsahy nebo pracovním tlakem. Životnost těchto výrobků je však již mnohonásobně vyšší, a proto se jejich využití stále zvyšuje. [2]

## 2 Konstrukce a použití vlnovců v praxi

### 2.1 Využití vzduchových pružin

Dnešní použití vzduchových pružin je značně různorodé. Obecně se využívají v oblastech tlumení vibrací a rázů, případně nastavování požadované polohy či výšky. Může se jednat o odpružení nákladních vozidel, traktorů, náprav autobusů či vlakových a tramvajových vagonů. Menší dimenze těchto pružin se využívají také pro odpružení sedadel řidičů nákladních automobilů nebo autobusů, příp. jako pneumatické zvedáky osobních aut v autoservisech.

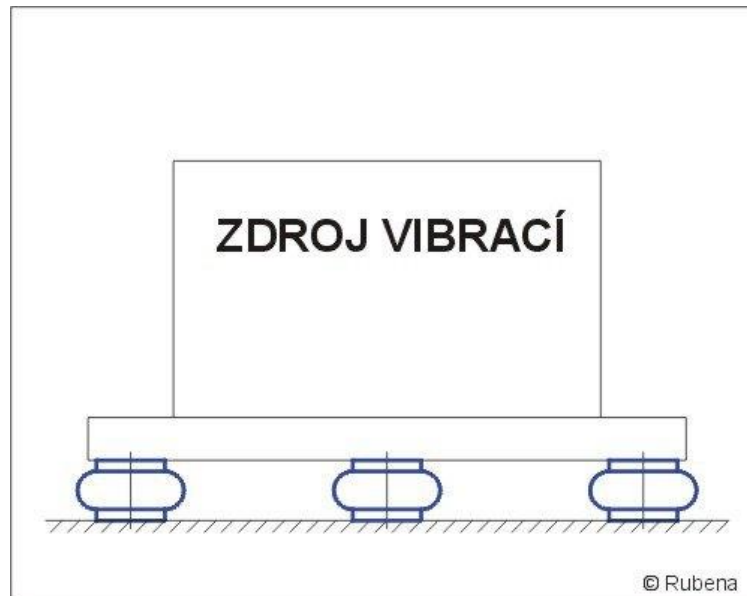


obr. 1: Ukázka použití pružiny pod sedadlem [3]

Dalším poměrně častým a velice účinným způsobem využití pneumatických pružin je pružné uložení strojů či zařízení, které vzbuzují vibrace a rázy. Ty jsou bez tlumení přenášeny konstrukcí do základny uložení a dále do okolí, většinou do konstrukce budovy. Vlnovce lze tedy najít jako aktivní pružné prvky uložení např. textilních stavů, různých dopravníků, bucharů, kovacích lisů apod. Jejich dobré izolační vlastnosti jsou také využívány pro izolaci citlivých laboratorních přístrojů od okolních vibrací. [4]

Vzduchové pružiny se ovšem nepoužívají pouze na tlumení či izolaci objektů, lze je najít také v mnoha průmyslových a mobilních aplikacích, kde zastávají funkci pohonů či pneumatických silových prvků. Uplatnění tedy naleznou například jako hradítka nebo dorazy u dopravníků, lze je použít také u zdvihacích strojů či pneumatických zvedáků, jak již bylo zmíněno výše. Mohou zvedat osy nákladních vozidel nebo upravovat světlu

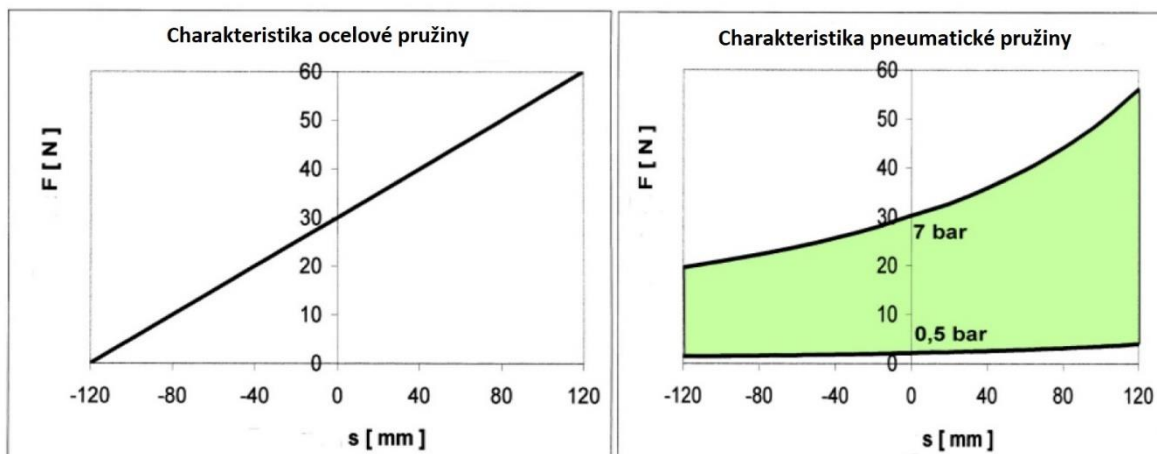
výšku osobních automobilů. Je možné s nimi napínat gumové pásy stavebních a zemědělských strojů nebo je použít k ustavení požadované polohy. [5]



obr. 2: Ukázka izolace okolí od zdroje vibrací [3]

## 2.2 Výhody a nevýhody použití vlnovců

Užívání vzduchových pružin k tlumení vibrací má mnoho výhod, které jsou využívány hlavně v automobilové dopravě. Oproti ocelové pružině lze u pneumatického odpružení měnit tlumící charakteristiku zvyšováním nebo snižováním vnitřního přetlaku vzduchu, jak je patrné z obr. 3. Díky tomu je možné měnit nebo udržovat světlou výšku automobilu nad vozovkou nezávisle na zatížení vozidla. Toho je využíváno především u nákladních automobilů či autobusů. [4]



obr. 3: Srovnání charakteristik ocelové a pneumatické pružiny [6]

Stále více se však vlnovce dostávají i do moderních osobních automobilů, kde oproti klasickým ocelovým pružinám poskytují zvýšený komfort z jízdy, udržují vozidlo v rovině při nerovnoměrném naložení a mění chování vozidla například v zatáčkách (různé jízdní režimy vozidla). Zároveň je vylepšená zvuková izolace a snížena rezonanční frekvence, což vede k pohodlnější a klidnější jízdě. Pneumatická pružina má také větší schopnost absorbovat energii a rázy, její použití tedy zvyšuje bezpečnost a umožňuje řídit auto i v extrémních podmínkách, což je využíváno především u terénních SUV automobilů a džípů. [4] [6]

V neposlední řadě patří mezi výhody použití vlnovců i šetření vozidla a nákladu, snížení opotřebení pneumatik nebo nižší spotřeba pohonných hmot. Oproti ocelovým pružinám mají vzduchové měchy větší životnost a menší nároky na údržbu. Lze je také použít pro konstrukce, kde je nutné určité úhlové natočení např. osy vůči rámu.

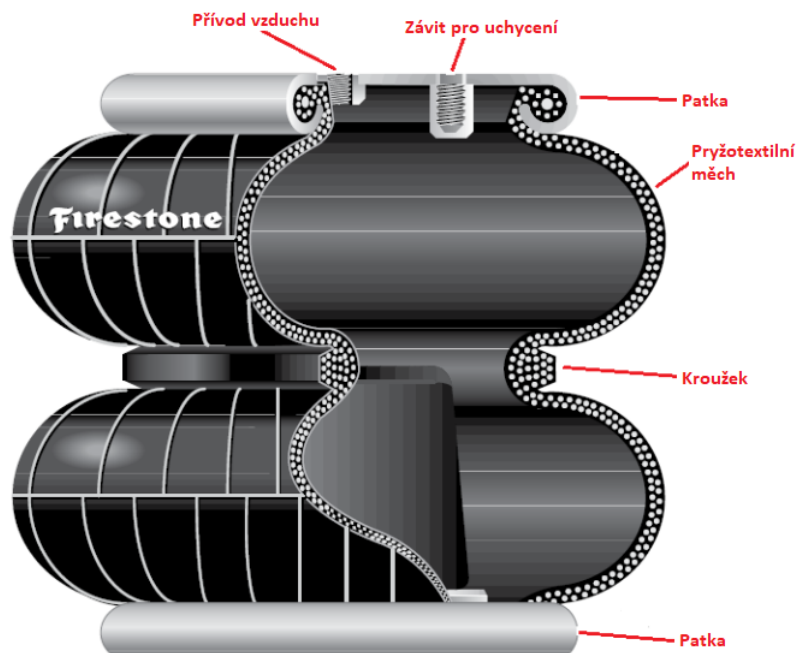
Existuje ale také pár nevýhodných vlastností, které zabraňují masovému rozšíření vzduchového odpružení do osobních automobilů. Jednou z hlavních nevýhod pneumatických systémů je nutnost přídavného pneumatického oběhu s kompresorem, zásobníkem vzduchu, do kterého kompresor doplňuje vzduch na určený tlak, několika uzavíracími, přepouštěcími a škrťacími ventily, či řídicí jednotkou, která kontroluje přetlak v pružinách a poskytuje rozvod vzduchu do dalších částí systému. Je evidentní, že přídavný vzduchový systém je poměrně složitým zařízením, které zvyšuje celkovou cenu automobilu i jeho hmotnost. Větší složitost také může vést k menší celkové spolehlivosti vozidla a dražším opravám porouchaných součástí. [6]

## 2.3 Konstrukce pneumatických pružin

Existuje mnoho variant pneumatických pružin dle specifikací jednotlivých výrobců a různých požadovaných vlastností. Většina variant se však podle konstrukčního řešení dělí na dva základní a nejčastěji používané typy – vlnovce nebo vaky. Oba druhy jsou v podstatě symetrické elastické pryžové měchy, které jsou vyztužovány textilním kříženým kordem. Ten je položen v pryžové stěně měchu tlusté 2-4 mm ve dvou nebo více vrstvách a slouží ke zpevnění pružiny a zvýšení její odolnosti proti proražení. Vnitřní pryžová stěna tedy zaručuje hlavně těsnost, kordová vložka nejvíce přenáší zatížení a vnější stěna slouží k ochraně kordu. Na obou koncích měchu jsou vyhnuté zesílené patky, pomocí kterých je měch držen v přírubách. [2]

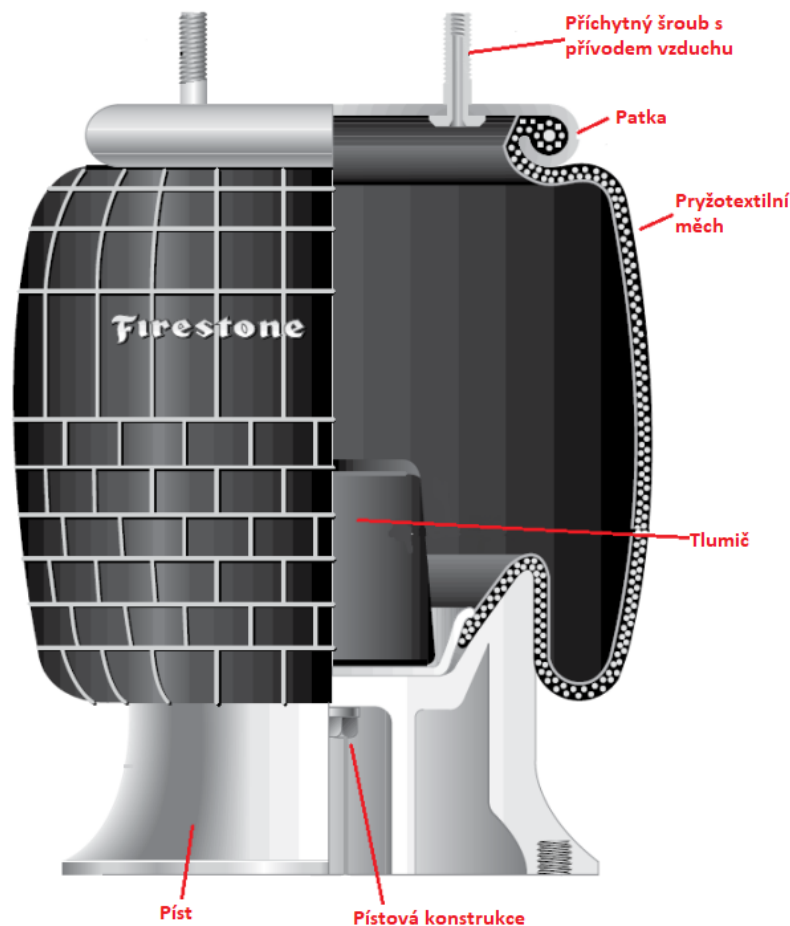
Vlnovcová pružina je pravděpodobně nejčastěji používaným typem pneumatického odpružení. Může být deformována v osové i příčném směru, lze ji použít i pro určité úhlové naklopení. Bývá jedno až čtyř vlnová a skládá se z několika částí, které jsou zobrazeny na obr. 4. Jednou z hlavních částí je pryžotextilní měch, jehož význam a konstrukce je popsána o odstavce výše. Měch je mezi vlnami obepnut kroužkem, který slouží k udržení tvaru, aby nedošlo k vyboulení měchu při vyšších tlacích, a pomáhá zvyšovat příčnou tuhost pružiny. Ta je však stále poměrně malá, proto musejí být pružně uložené objekty vedeny přídatnou konstrukcí. Výrobci používají různé druhy kroužků – od plastových, přes pryžokovové až po celokovové.

Na obou koncích měchu jsou příruby, které obepínají zesílené patky měchu a zaručují těsnost a soudržnost vlnovce. Koncové řešení se liší dle výrobce a typu použití. Jedna z variant, tzv. pertlování, využívá jedné příruby na každé straně, jejíž konce obepínají celou pryžovou patku, viz obr. 4. Toto uzavření vlnovce je nerozebíratelné. Další variantou je rozebíratelné šroubované spojení, které využívá upínací patkové kroužky se žlábkem, do kterých zapadá zesílená patka měchu. K těmto kroužkům jsou z druhé strany přišroubována víka tak, aby nedošlo k úniku vzduchu a patka držela na svém místě. Víka v sobě zároveň mají otvory se závity pro uchycení k odpružené a neodpružené části stroje či automobilu. Horní víko je navíc opatřeno otvorem se závitem, který je určen pro přívod vzduchu. [7]



obr. 4: Konstrukce vlnovcové pružiny [7]

Druhým poměrně rozšířeným typem pneumatické pružiny jsou vakové měchy. Vaková pružina funguje na stejném principu jako vlnovec a její konstrukce je znázorněna na obr. 5. Místo volného pohybu měchu je zde však využíváno pístu, který se zasouvá do prostoru uvnitř měchu. Dochází k většímu opotřebení stěny vaku, neboť ta se odvaluje po obvodu pístu a dochází zde ke značným deformacím. Ke zvýšení životnosti je výhodné píst tvarovat tak, aby průběh stlačení byl co nejvhodnější. Výhodou této konstrukce bývá menší zástavbový prostor, jelikož pružina se při stlačování nerozpíná do šířky. Lze je deformovat osově i příčně a dají se využít i k úhlovému naklopení. Využívají se spíše pro odpružení vozidel, nejsou tolik vhodné pro izolaci vibrací a rázů průmyslových zařízení. [2] [7]



obr. 5: Vaková pneumatická pružina [7]

Další typy pneumatických pružin:

- *Membránové*: Někdy též označovány jako půlvlnové. Mají značnou příčnou tuhost, lze je deformovat osově a v omezené míře příčně.



- *Hadicové:* Lze si je představit jako válcový měch bez koncových patek. Mají podobné vlastnosti jako pružiny vakové, tvar získají až účinkem vnitřního přetlaku.
- *Kombinované:* Jedná se o spojení dvou různých pružin, nejčastěji vlnovcové a vakové nebo membránové. [2]

Dle hmotnosti uloženého zařízení lze pneumatické pružiny umisťovat jednotlivě nebo ve skupinách v tzv. panelech, na kterých je potřebný počet pružin spojen do celku. Jedním z takových použití je například uložení betonového lože viz obr. 6. To je třeba izolovat od okolí soustavou měchů, které tlumí vibrace a rázy ze stroje na něm postaveného. Na obrázku je také vidět rozvod pneumatické soustavy přivádějící vzduch do jednotlivých měchů.



obr. 6: Uložení betonového lože na soustavě měchů [4]

Ohledně konstrukčních aplikací vlnovců je důležité, aby pryžotextilní stěna nepřicházela do styku s ostrými nebo žhavými předměty (okuje, hrany, výfuky apod.). [4]

Každý typ vlnovce má svoji statickou výšku  $H(0)$ , která je definována výškou formy, ve které je daný měch vyráběn a vulkanizován. Zároveň existuje maximální  $H_{MAX}$

a minimální  $H_{MIN}$  výška, které je nutné dodržet pro správnou funkci měchů. Omezují celkový zdvih vlnovců a také zabraňují jejich poškozování při provozu. Jako omezovače zdvihů jsou většinou použity pryžové dorazy. Zvýšení celkového zdvihu je možné dosáhnout volbou vlnovce s dvěma či více vlnami. [2]

Co se běžného zatěžování pneumatických pružin týče, smluvně se udává jmenovité zatížení pružiny pro přetlak  $500 \text{ kPa}$  a pro předepsanou statickou výšku  $H(0)$ . Pneumatické pružiny jsou dimenzovány takovým způsobem, aby při předepsané statické výšce vydržely přetlak stlačeného vzduchu až  $1000 \text{ kPa} = 10 \text{ bar}$ . Jednotlivé maximální přetlaky jsou často uvedeny v katalozích pro danou dimenzi přímo od výrobce. K poruchám pružiny dochází většinou až při přetlaku větším než  $2500 \text{ kPa} = 25 \text{ bar}$ . [2]

Z výrobních a technologických důvodů nelze vyrobit pryžové měchy libovolně malé. Proto jsou vyráběny až od určité dimenze a není možné je používat pro extrémně malá zatížení. Celkově však mají větší životnost než pružiny ocelové, neboť jejich stěna se při pružení pouze ohýbá. Zároveň mají celkově mnohem menší hmotnost pro srovnatelná zatížení. Dnes používané měchy lze osově zatěžovat pouze tlakovými silami. [2]

### 3 Metodika měření statických charakteristik

Tato kapitola rozebírá metodiku měření, která je použita při realizaci experimentu. Jedná se o souhrn kroků, které je potřeba připravit a propracovat před zahájením měření. Při přípravě experimentu a popisu metodiky jsem vycházel z literatury [8], která slouží jako podklad pro studenty nebo různé firemní pracovníky při realizaci experimentálních činností a pokusů.

Dle této literatury je několik základních kroků, které je třeba v metodické přípravě propracovat. Jedná se především o:

1. vypracování teoretických východisek problému,
2. vytyčení cílů měření,
3. navržení způsobu dosažení provozních podmínek,
4. konstrukce experimentálního přípravku,
5. snímání a archivace dat,
6. stanovení způsobu řízení experimentu,
7. navržení sledu jednotlivých kroků při měření,
8. navržení vhodného systému záznamu o průběhu měření,
9. navržení způsobu zpracování naměřených dat.

Záměrně jsou některé kroky vynechány, neboť pro přípravu tohoto experimentu, tj. měření průběhové charakteristiky vlnovce, nejsou podstatné. Naproti tomu je přidán krok ohledně výběru a konstrukce měřícího přípravku.

#### 3.1 Vypracování teoretických východisek problému

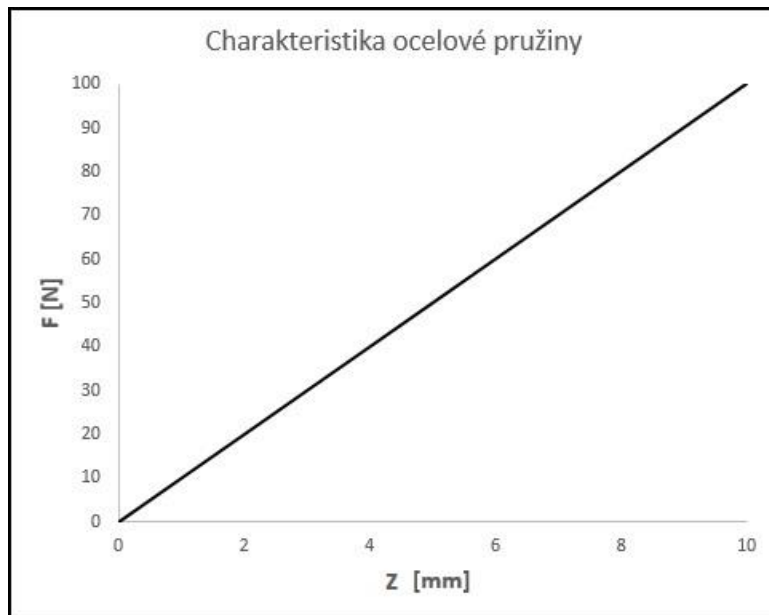
Při pohledu na charakteristiky z obr. 3 je vidět rozdíl v chování pružin při určitém stlačení/natažení. Klasická ocelová pružina má charakteristiku lineární viz obr. 7 a lze ji popsat Hookovým zákonem:

$$F = k \cdot z, \quad (1)$$

kde  $F$  je síla potřebná ke stlačení pružiny,  $k$  je koeficient tuhosti pružiny a  $z$  je velikost výchylky pružiny od klidové polohy. Z této lineární charakteristiky můžeme po znalosti tuhosti pružiny  $k$  jednoduše určit sílu pro konkrétní stlačení/natažení pružiny. Tuhost je pro celý rozsah deformace konstantní a udává sklon dané přímky vůči vodorovné ose:

$$k = \frac{F}{z} = tg \alpha, \quad (2)$$

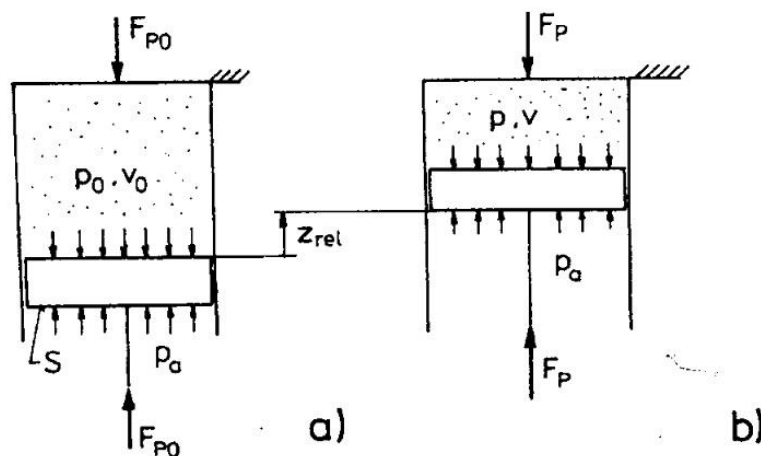
kde  $\alpha$  je úhel mezi lineární přímkou charakteristiky a vodorovnou osou grafu. Čím je tuhost pružiny větší, tím je charakteristika pružiny strmější a naopak.



obr. 7: Deformační charakteristika ocelové pružiny s tuhostí 10N/mm [6]

Pneumatická pružina však k pružení jako médium využívá plyn. Ten je z fyzikální podstaty stlačitelný, což má za následek nelineární deformační charakteristiku. Tím, jak se objem plynu při stlačování zmenšuje, zvětšuje se jeho odporu vůči dalšímu stlačování a pružina je tvrdší. Průběh deformace takových pružin má tedy progresivní charakter. [9]

Pro odvození základních vztahů deformační charakteristiky uvažujme pístovou plynovou pružinu viz obr. 8:



obr. 8: Schéma k odvození deformační charakteristiky: a) klidový stav, b) stlačený stav [9]

V klidovém stavu působí na píst síla:

$$F_{p0} = (p_0 - p_a) \cdot S, \quad (3)$$

kde  $p_0$  je tlak plynu,  $p_a$  je tlak atmosférický a  $S$  je plocha pístu. Pro stlačený vztah je působící síla analogická:

$$F_p = (p - p_a) \cdot S. \quad (4)$$

Během stlačení dojde ke změně objemu plynu odpovídající rovnici:

$$V = V_0 - S \cdot z, \quad (5)$$

kde  $V$  je objem stlačeného plynu,  $V_0$  je objem plynu v klidu a  $z$  je velikost stlačení.

Zároveň dle polytropického izotermického zákona platí:

$$p \cdot V^n = p_0 \cdot V_0^n = konst. , \quad (6)$$

přičemž exponent  $n$  je tzv. polytropický exponent změny stavu vzduchu nabývá hodnot  $0 < n < 1,4$  dle charakteru provozních podmínek. Pro pomalou změnu objemu (izotermický děj) je  $n = 1$ , pro rychlou změnu objemu (adiabatický děj) je  $n = 1,4$ . Po dosazení rov. (5) do rov. (6) dostáváme vztah pro tlak stlačeného plynu [2] [9]:

$$p = p_0 \cdot \left( \frac{V_0}{V_0 - S \cdot z} \right)^n, \quad (7)$$

což po dosazení do rov. (4) dává vztah pro sílu pružiny po stlačení o hodnotu  $z$ :

$$F_p = \left[ \frac{p_0 \cdot V_0^n}{(V_0 - S \cdot z)^n} - p_a \right] \cdot S. \quad (8)$$

Tuhost pneumatické pružiny je proměnná v závislosti na přetlaku vzduchu a stlačení a vždy je směrnici tečny na deformační charakteristiku  $F_p = f(z)$  v daném bodě. Okamžitou tuhost získáme derivací rov. (8) dle proměnné  $z$  [9]:

$$k = \frac{dF_p}{dz} = \frac{n \cdot p_0 \cdot V_0^n \cdot S^2}{(V_0 - S \cdot z)^{n+1}}, \quad (9)$$

z čehož po dosazení počáteční hodnoty stlačení  $z = 0$  vychází statická tuhost pneumatické pružiny:

$$k_0 = \frac{n \cdot p_0 \cdot S^2}{V_0}. \quad (10)$$

Předchozí odvození pracovalo s předpokladem, že činná plocha pístu je neměnná, což v případě jednoduché pístové pružiny platí. Skutečné pneumatické pružiny, tj. vzduchové měchy se však od pístové pružiny liší především tím, že činná plocha není konstantní. V měchu totiž není žádný píst a zdvih vytváří stlačený vzduch

uzavřený v elastickém plášti z pryže, která je vyztužena kordy. Pro popis síly vyvolané pneumatickou pružinou se proto používá spíše vztah [9]:

$$F_p = p \cdot S_{ef}, \quad (11)$$

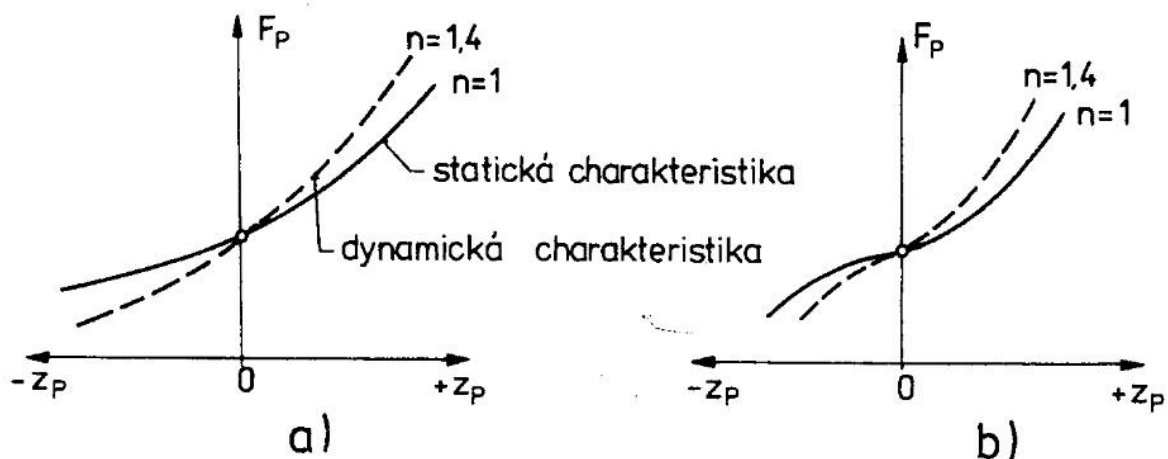
kde  $F_p$  je síla pružiny,  $p$  je vnitřní přetlak vzduchu v pružině a  $S_{ef}$  je efektivní plocha pružiny. Ta se v průběhu zdvihu a změnou vnitřního přetlaku mění a je definována poměrem dle rov. (11):

$$S_{ef} = \frac{F_p}{p}. \quad (12)$$

Vzhledem k tloušťce stěny vaku nebo vlnovce, která se pohybuje v rozsahu 2 – 4 mm a je tedy velmi tenká a pružná, lze z výpočtů zanedbat vlastní tuhost pryžového tělesa. Pryžová stěna má funkci pouze těsnící. Nosná síla je tedy závislá hlavně na přetlaku [2] [9]:

$$F_p \sim p, \quad (13)$$

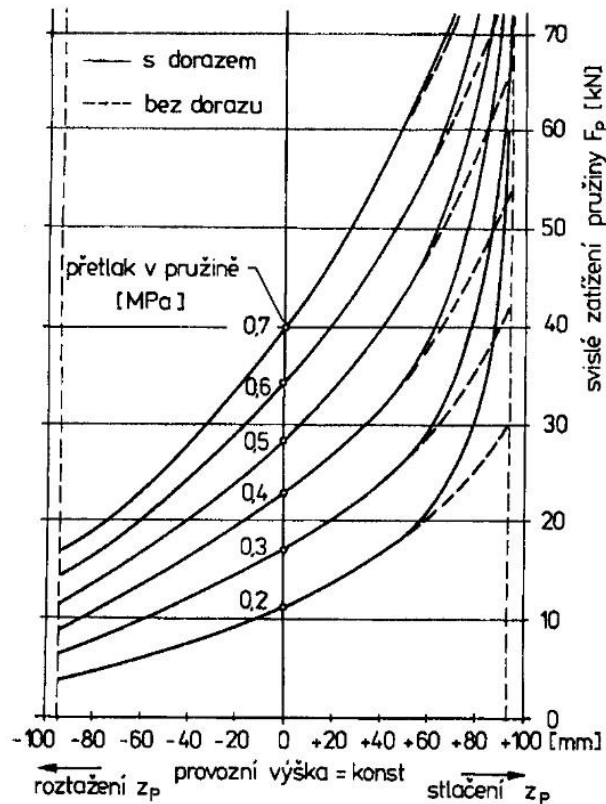
Deformační charakteristiku pneumatických pružin je třeba rozlišovat dle rychlosti zatěžování a změny zdvihu. Rychlost se do charakteristiky promítá díky koeficientu změny stavu plynu  $n$ , jak již bylo popsáno výše. Díky tomu dělíme deformační charakteristiku na statickou (pomalé zatěžování, izotermický děj, exponent  $n = 1$ ) a dynamickou (rychlé zatěžování, adiabatický děj, exponent  $n = 1,4$ ). Vliv exponentu je graficky znázorněn na obr. 9.



obr. 9: Vliv exponentu na průběh charakteristiky pružiny: a) vlnovec, b) vak [9]

Všechny měchové pneumatické pružiny mají svou statickou výšku  $H(0)$ , pro kterou z rov. (13) plyne vlastní pružící křivka pro každou hodnotu zatížení v celém rozsahu zatěžování (od prázdného stavu až po stav plně zatížený). To stejné platí pro

jakoukoli zvolenou konstantní konstrukční polohu (provozní výšku)  $z_p = \pm 0$ . Je tedy evidentní, že vzduchová pružina má regulovatelnou charakteristiku dle konkrétního zatížení. Průběh charakteristik pro různé vnitřní přetlaky v určitém provozním rozsahu je schematicky znázorněn na grafu obr. 10. [9]



obr. 10: Charakteristika vlnovcové pružiny pro různé přetlaky [9]

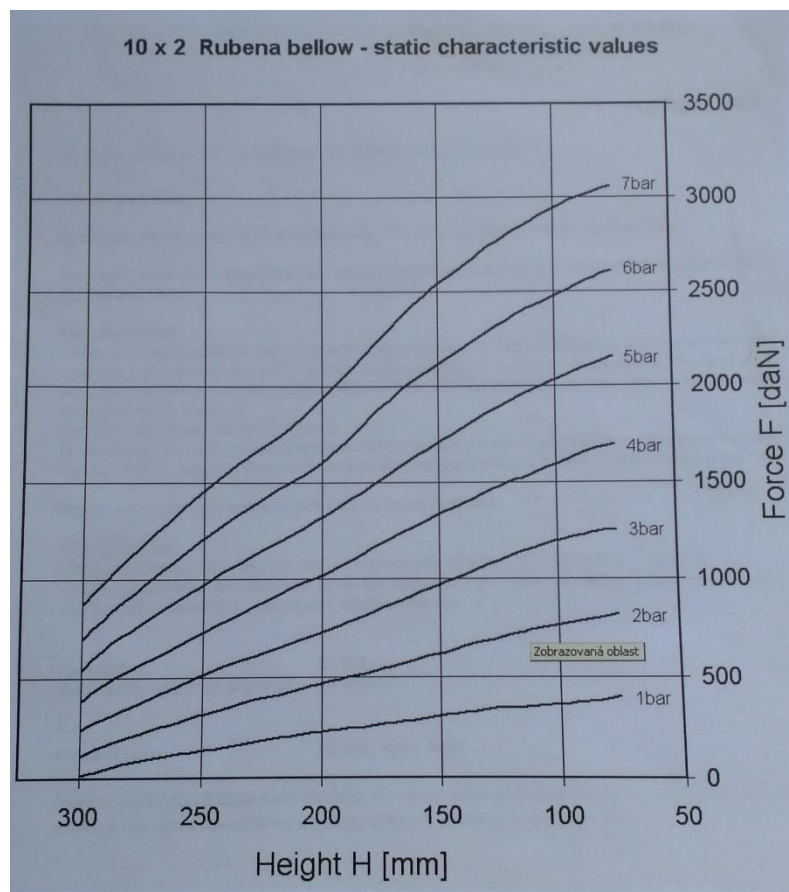
Vzhledem k průběhu tohoto experimentu, kdy bude měch zatěžován velmi pomalu (řádově mezi 1 a 1,5 mm/s, jak bude popsáno v pozdějších kapitolách), je pro nás podstatná charakteristika statická. Zároveň z předchozího shrnutí teorie o pneumatických pružinách vyplývá, že nelze jednoznačně určit deformační charakteristiky matematicky, a že pro jednotlivé dimenze měchů jsou dané charakteristiky různé. Je proto třeba přistoupit k praktickým experimentům, kdy přímé měření závislosti síly na tlaku a stlačení  $F_p = f(p, z)$  vykreslí charakteristiku pro konkrétní dimenzi a vlnovec. Z naměřených dat jsme poté schopni určit průběhy pro jednotlivé přetlaky a rozsahy. Máme díky tomu jasnou představu o silovém rozložení pro potřebný provozní zdvih vlnovce v dané aplikaci.

## 3.2 Vytyčení cílů měření

Cílem tohoto experimentu je naměření zátěžové charakteristiky dvou vlnovců po celém průběhu předepsaného zdvihu a pro 8 různých pracovních tlaků. Tyto vlnovce jsou vyrobeny firmou Rubena a.s. a jejich označení je 21,5"x1 a 21,5"x2. Zátěžovou charakteristikou je myšlena grafická závislost síly  $F$  na výšce vlnovce  $h$ :  $F = f(h)$ .

Naměřené závislosti jsou potřeba k jasnému určení chování vlnovce při určité kombinaci přetlaku vzduchu  $p_p$  a stlačení  $h$ . Grafická závislost udává představu síly, kterou vlnovec při dané kombinaci vyvolá. Tato síla může být v rozsahu několika desítek  $kN$  při malém přetlaku a nejvyšší výšce vlnovce až po několik stovek  $kN$  při maximálním provozním přetlaku a stlačení. Grafy jsou poté použity jako podklad pro firmy ke katalogu pro zákazníky tak, aby měli představu, jakých sil je která dimenze vlnovce schopna dosáhnout.

Pro ukázkou výsledného výstupu byl od firmy obdržen graf jimi naměřené závislosti pro pryžový měch dimenze 10x2 viz obr. 11. Průběhy grafů by v tomto experimentu měl vyjít obdobně, ovšem s vyššími rozsahy i dosaženými silami.



obr. 11: Charakteristika vlnovce 10x2 od firmy Rubena a.s.

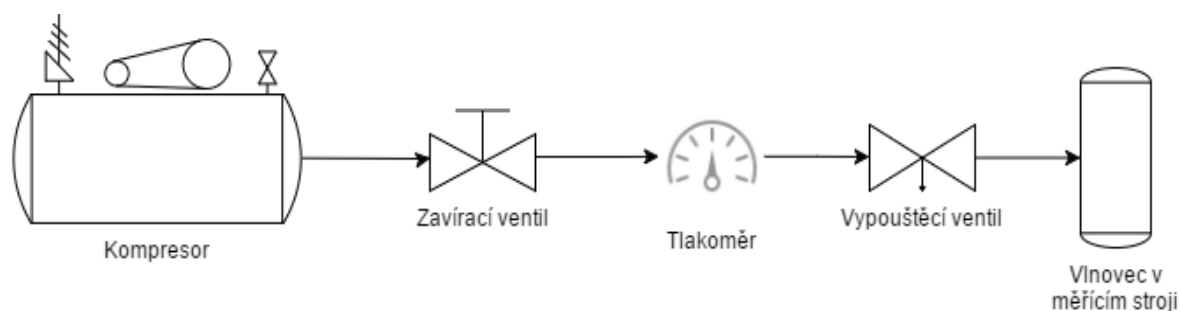


### 3.3 Navržení způsobu dosažení provozních podmínek

Při zjišťování deformační charakteristiky pneumatické pružiny je základním předpokladem dosažení pracovních přetlaků, na které je daný vlnovec dimenzován. Jak bylo popsáno v kap. 2.3, naprostá většina pneumatických pružin je dimenzována takovým způsobem, aby vydržely přetlaky až  $1000 \text{ kPa} = 1 \text{ MPa} = 10 \text{ bar}$  při dané statické výšce. Ta je jedním z charakteristických rozměrů vlnovce a je tedy pro každou dimenzi jiná. Vzhledem k bezpečnosti a pracovnímu rozsahu pružin, kdy statická výška většinou není zachována, je maximální pracovní přetlak pro vlnovce vyrobené ve firmě Rubena a.s.  $p_{MAX} = 8 \text{ bar} = 0,8 \text{ MPa}$ . Z toho vyplývá první podmínka měření.

Pro zjištění deformační charakteristiky v plném rozsahu pracovních možností pružiny je třeba naměřit data pro přetlaky od  $p_p = 1 \text{ bar} = 0,1 \text{ MPa}$  až po maximální přetlak  $p_{MAX} = 8 \text{ bar} = 0,8 \text{ MPa}$ . Běžnou praxí firmy je měřit charakteristiku od maximální provozní výšky vlnovce  $H_{MAX}$  po minimální provozní výšku  $H_{MIN}$  při konstantním vnitřním přetlaku (isobarická zkouška). Měření je rozděleno na jednotlivé zdvihy pro přetlaky odstupňované po  $1 \text{ baru}$ . Při experimentu se bude postupovat od nejnižšího tlaku po nejvyšší.

K zajištění vnitřního přetlaku uvnitř měchu bude použita vzduchová soustava sestavená takovým způsobem, aby bylo možné dodržet podmínku isobarické zkoušky. Zjednodušené koncepční schéma této soustavy je na obr. 12.



obr. 12: Zjednodušené schéma vzduchové soustavy experimentu

*Kompresor* zajišťuje potřebný přetlak v celé soustavě. Po ustálení hodnot tlaku na požadované hodnotě je uzavřen *zavírací ventil*, který oddělí *kompresor* od zbytku soustavy. *Tlakoměr* tedy ukazuje tlak ve vlnovcové větvi. Díky tomu je možné pomocí ručního *vypouštěcího ventilu* regulovat pracovní přetlak uvnitř měchu. Při stlačování *vlnovce ve stroji* dochází k nárůstu tlaku kvůli zmenšování efektivní plochy pružiny, jak bylo popsáno v kap. 3.1, a proto je nutné vypouštět vzduch určitou rychlostí takovým způsobem, aby byl zachován požadavek isobarické zkoušky. Ruční mechanický

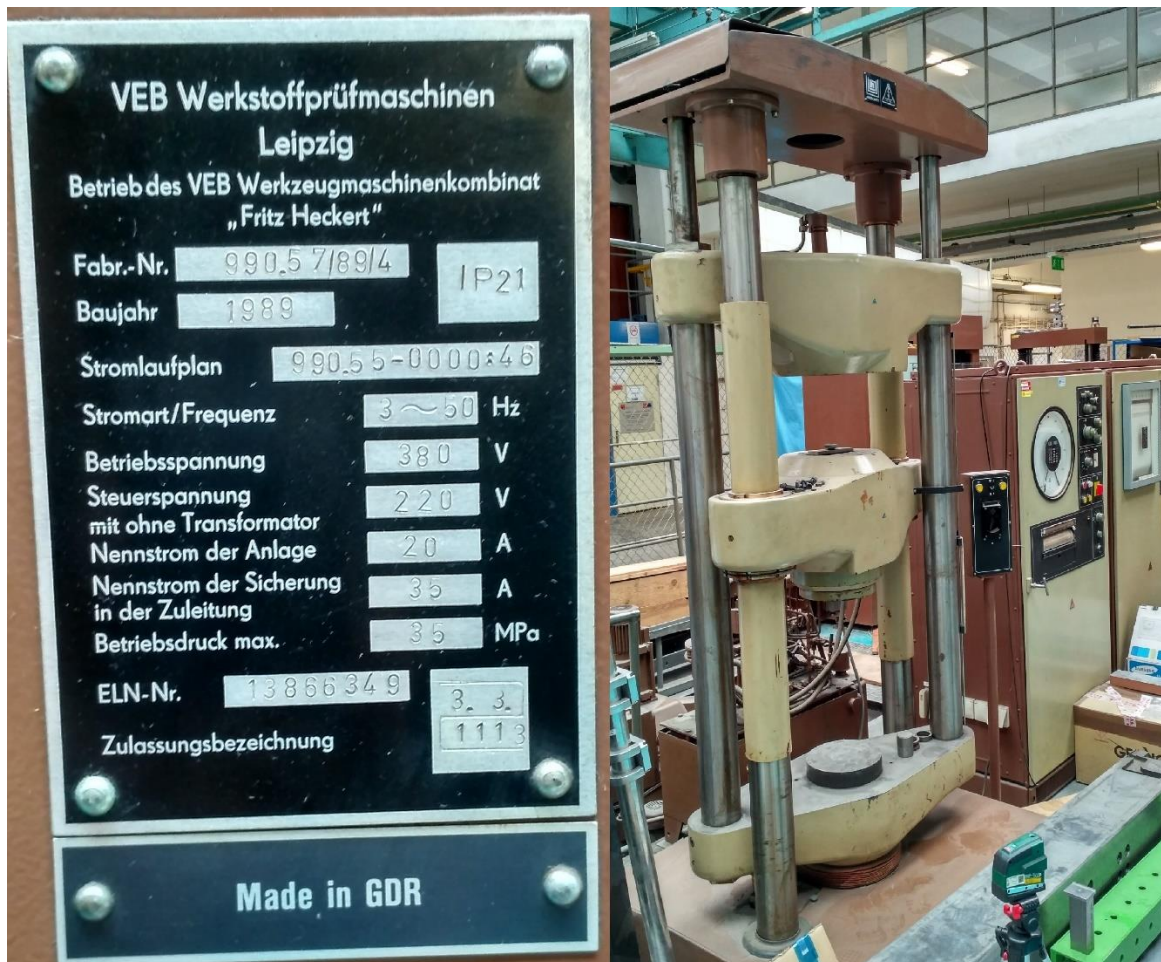
vypouštěcí ventil je zvolen záměrně, neboť se díky zkušenostem firmy z měření jiných dimenzí vlnovců jeví jako nejvhodnější. Při pokusech používat automatický vypouštěcí ventil, který by držel velikost přetlaku na požadované hodnotě, byly naměřené charakteristiky hrbolaté a skákavé. Automatický ventil totiž začal vypouštět vzduch po překročení určité hodnoty tlaku a vypouštěl do té doby, dokud se znovu hodnota tlaku nedostala na minimální povolenou odchylku. Poté se ventil uzavřel a nevypouštěl vzduch do dalšího překročení maximální odchylky. To v grafech charakteristik vytvářelo „skoky“, které neodpovídaly skutečnému průběhu síly. Ručním vypouštěcím ventilem je možné dosáhnout stálého a plynulého uvolňování vzduchu z vlnovcové větve dle rychlosti stlačování. Křivky získané měřením s ručním ventilem lépe odpovídají skutečnému průběhu síly.

Jako kompresor je použito zařízení firmy Einhell. Jeho podrobné technické parametry jsou popsány v příloze č. 1. Nejdůležitějším parametrem pro jeho použití byl maximální pracovní přetlak, který tento kompresor se svými 8 *bary* splňuje.

Neméně důležitou součástí experimentu je samotné měřicí zařízení. Vzhledem k velkým rozměrům vlnovců, jejichž maximální průměr je  $D = 580 \text{ mm}$  pro tlak 8 *bar* a jejichž zástavbová plocha musí být alespoň 630 *mm* široká, je třeba použít stroj vyhovující daným parametrům. Ústav konstruování a částí strojů FS ČVUT takové zařízení nemá k dispozici, proto byla domluvena spolupráce s Ústavem mechaniky, biomechaniky a mechatroniky, Odbor pružnosti a pevnosti, konkrétně s Ing. Karlem Doubravou, Ph.D., jejichž laboratoř takové zařízení vlastní. Jde o měřicí stroj od firmy *VEB Werkstoffprüfmaschinen Leipzig* [10] z roku 1989, který je určen pro dynamické zkoušky materiálů. Výrobní štítek spolu s daným zařízením je vyfotografován na obr. 13. Další fotografie stroje jsou poté v následující kapitole.

Tento měřicí stroj má vnitřní světlost mezi sloupy cca 750 *mm* a je schopen vyvodit sílu až 1 000 *kN*. Maximální možný zdvih tohoto zařízení je 240 *mm*. Pracuje na principu hydraulického lisu s tím, že dokáže zaznamenávat data v nastavené vzorkovací frekvenci. Pro měření obou vlnovců je nastavena hodnota vzorkovací frekvence na  $f \sim 3 \text{ Hz}$ . Rychlost zatěžování vlnovce není firmou Rubena a.s. specifikována, musí se však pohybovat do 5 *mm/s*. Ani počet jednotlivých měření pro dané přetlaky není firmou definován, neboť pro jejich potřeby stačí pro každý přetlak jedna naměřená charakteristika. Pro alespoň částečnou eliminaci možných nepřesností při měření či regulaci tlaku byl zvolen počet jednotlivých měření pro vlnovec 21,5" x 1 na

3 a pro vlnovec 21,5" x 2 kvůli časové náročnosti na 2. Průběhem zdvihů bude stlačování od maximální hodnoty po minimální.



obr. 13: Výrobní štítek a měřící zařízení

Vzhledem k velikosti čelistí stroje, jejichž průměr je  $d = 250 \text{ mm}$ , je třeba navrhnout pro měření přípravek takovým způsobem, aby byl v čelistech pevně usazen a vycentrován a zároveň se o něj vlnovce opíraly v celé své ploše, aby nedošlo k poškození nebo prasknutí přírub na měchu. Tyto příruby mají průměr  $D_{př} = 498,5 \text{ mm}$ . Návrhem přípravku se zabývá následující podkapitola.

Dle katalogového listu firmy, který je přiložen v příloze č. 2, je pracovní zdvih tohoto měchu od  $H_{MIN} = 90 \text{ mm}$  přes  $H_{stat} = 200 \text{ mm}$  do  $H_{MAX} = 370 \text{ mm}$ , což dává celkovou výšku zdvihu  $Z = 280 \text{ mm}$ . Podle specifikací měřícího zařízení, popsaných výše, však není možné zdvihu  $280 \text{ mm}$  dosáhnout při jednom měření, proto byly na výběr celkem tři varianty, jak by bylo možné měření provést. S výběrem a rozhodováním zároveň souvisely předběžné návrhy přípravků, které by pro jednotlivé varianty byly

použity. Návrh jednotlivých variant a následný výběr jedné použité při měření je podrobněji popsán v následující podkapitole.

Pro vlnovec 21,5"x1 katalogový list neexistuje, neboť tento měch není součástí portfolia výrobků firmy. Je však možné ho vyrobit po individuální dohodě se zákazníkem, proto i on má své definované parametry. Rozměrově jsou oba vlnovce shodné, liší se pouze velikostí pracovního zdvihu. Minimální pracovní výška tohoto vlnovce je  $H_{MIN} = 80 \text{ mm}$  a maximální výška je  $H_{MAX} = 180 \text{ mm}$ . Celkový zdvih této pružiny je tedy  $Z = 100 \text{ mm}$ .

Maximální velikost sil při nejvyšším tlaku  $p_{MAX} = 8 \text{ bar}$  a úplném stlačení, tj. minimální pracovní výšce daného vlnovce, je předpokládána dle naměřené charakteristiky konkurenční firmy Dunlop. Podle jejich protokolu z měření, který je přiložen v příloze č. 3, je dosažitelná síla  $F_{MAX}$  cca  $186 \text{ kN}$ . Předpokládáme proto podobné výsledné hodnoty i při tomto experimentu.

Pro úplnost a přehlednost je přidána tabulka parametrů obou vlnovců.

tab. 1: Srovnání parametrů měřených vlnovců

Dimenze vlnovce	21,5"x1	21,5"x2
Maximální průměr $D$	580 mm	580 mm
Zástavbové místo $D_{req}$	630 mm	630 mm
Maximální pracovní výška $H_{MAX}$	180 mm	370 mm
Statická výška $H_{stat}$	130 mm	200 mm
Minimální pracovní výška $H_{MIN}$	80 mm	90 mm
Celkový pracovní zdvih $Z$	100 mm	280 mm
Maximální pracovní tlak $p_{MAX}$	8 bar = 0,8 MPa	8 bar = 0,8 MPa
Minimální destrukční tlak $p_{destr}$	20 bar = 2 MPa	20 bar = 2 MPa

### 3.4 Konstrukce experimentálního přípravku

Přípravek je jednoúčelový strojní výrobek, který je konstruován a vyroben s účelem umožnit například experimentální měření, obsluhu určitého stroje nebo zařízení, nebo kalibraci různých přístrojů. Jeho funkce je čistě jednoúčelová, a proto je důležité při konstrukci a vymýšlení nového přípravku hledět na několik základních bodů:

1. vhodnost pro danou aplikaci,
2. co nejlevnější výroba,

3. co nejjednodušší konstrukce,
4. opakované použití pro daný účel.

Při návrhu přípravku pro experimentální měření zátěžové charakteristiky musí být vycházeno z dostupných informací o měřených objektech (vlnovcích), o měřicím zařízení, o průběhu měření a z požadavků firmy Rubena a.s.

Nejdůležitějším bodem při návrhu je samozřejmě co nejjednodušší konstrukce přípravku. Z toho zároveň vyplývá levná výroba a případně možnost nechat si přípravek vyrobit přímo ve firmě.

Dalším velmi důležitým faktorem při návrhu přípravku je nutnost usadit měřený měch do čelistí měřícího stroje. Jak již bylo napsáno v předchozí podkapitole, víko vlnovců má průměr  $D_{pr} = 498,5 \text{ mm}$ , zatímco čelisti stroje  $d = 250 \text{ mm}$ . Při zatěžování je však nutné mít víko vlnovce opřené v celé ploše, aby nedošlo k jeho prasknutí. Tento bod je jedním ze stěžejních bodů při návrhu.

S ohledem na velikost a velkou váhu samotných vlnovců je také třeba myslet i na hmotnost přípravku. Po přichycení přípravku na měch musí být možné jej zvednout nejvíce ve dvou osobách a přenést do čelistí měřícího stroje.

Posledním důležitým bodem pro návrh přípravku je umožnění přívodu vzduchu na jedné straně vlnovce. Ten je na vlnovci vyvrtán na roztečném průměru  $150 \text{ mm}$ . Je proto třeba umístit na přípravek otvor umožňující přišroubování ventilu s rychlospojku, přes který bude do vlnovce vháněn vzduch.

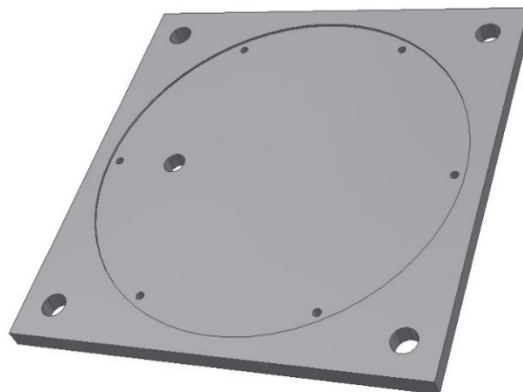
Tyto základní předpoklady pro konstrukci přípravku by měly být dodrženy i s ohledem na možné pozdější opětovné využití daných přípravků pro jiná měření vlnovců těchto dimenzí.

Jak již bylo popsáno v předchozí podkapitole, pro naměření charakteristiky vlnovce 21,5"x2 je tedy třeba vyvodit pracovní zdvih  $Z = 280 \text{ mm}$ . Toho však dostupné měřicí zařízení není schopné, neboť jeho maximální zdvih pro jedno měření je pouhých  $240 \text{ mm}$ . Vypracoval jsem tedy dvě varianty přípravku, které by umožnily dané měření přerušit v určité části zdvihu, poté přenastavit rozsah zdvihu měřícího stroje, a poté dokončit měření až do požadované minimální pracovní výšky. Třetí variantou pro měření bylo použít jednodušší variantu přípravku a omezit pracovní zdvih vlnovce tak, aby se snížil na celkovou hodnotu  $Z = 240 \text{ mm}$ . Všechny tyto varianty jsou v následujících odstavcích popsány a zobrazeny, jsou ukázány jejich výhody a nevýhody, a nakonec jsou vypsány důvody výběru jedné konkrétní varianty.

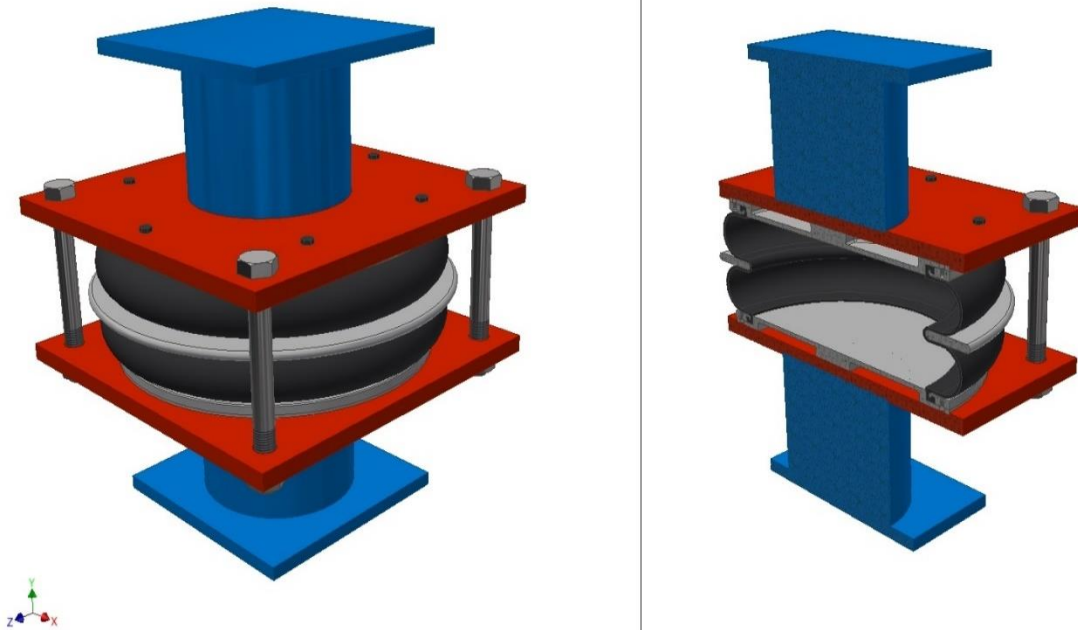
Varianta č. 1 – Přerušení zdvihu zhruba v polovině měření se stálým přetlakem

Prvním nápadem na provedení experimentu v plném rozsahu a naměření charakteristiky pro celý zdvih bylo přerušení měření zhruba v polovině zdvihu. Pomocí speciálního přípravku, který by udržel reakční síly vlnovce, by bylo možné za stálého přetlaku uvnitř měchu měření zastavit v určité výšce, přenastavit by se rozsah stroje a poté by měření došlo do požadované minimální pracovní výšky vlnovce.

Základním materiálem pro tvorbu přípravku byly zamýšleny hliníkové plechy (hliník byl zvolen hlavně s ohledem na celkovou hmotnost přípravku). Celkem by se jednalo o tři čtvercové plechy pro jednu část přípravku a další tři pro druhou část přípravku. Tyto čtverce o rozměrech  $550 \times 550 \text{ mm}$  by byly vyrobeny ze dvou plechů tloušťek  $t_1 = 2 \text{ mm}$  a  $t_2 = 20 \text{ mm}$ . Tlustší plech by byl celou svou plochou opřen z jedné strany o vlnovec a druhou stranou o čelist měřicího stroje. Jeden plech o tloušťce  $t_1$  by měl ve svém středu laserem vypálen otvor o průměru  $d_1 = 250 \text{ mm}$  tak, aby obepnul čelist měřicího zařízení. Druhý plech o tloušťce  $t_1$  by měl vypálen otvor o průměru  $d_2 = 500 \text{ mm}$  tak, aby obepnul příruby vlnovce. Všechny tři plechy by navíc v sobě měly na rozteči  $D_{roz1} = 470 \text{ mm}$  vypáleno 6 děr pro šrouby M10, kterými by byly přišroubovány k měřenému vlnovci a zároveň by byla zajištěna jejich správná vzájemná poloha. Jak je vidět na obr. 14, ve všech rozích by navíc byly vypáleny průchozí díry o průměru  $d_3 = 33 \text{ mm}$ , kterými by byly vedeny závitové tyče. Pomocí nich by bylo možné ustanovit vzájemnou polohu obou polovin přípravku a udržet vlnovec stlačený i při potřebném přetlaku. Ukázka ustanovení polohy a umístění vlnovce v přípravku je na obr. 15. V jedné z částí přípravku by byla navíc vypálena díra o velikosti  $d_4 = 45 \text{ mm}$ , která by umožňovala přišroubování ventilu k vlnovci a tím i přívod vzduchu.



obr. 14: Čtvercové plechy tvořící jednu polovinu přípravku



obr. 15: Uložení vlnovce v přípravku (normální pohled a řez)

Na obr. 15 je znázorněno uchycení přípravku (červená barva) v čelistech měřícího zařízení (modrá barva). Zároveň je vidět přišroubování přípravku k vlnovci pomocí 6 šroubů na každé straně. Názorně je také ukázáno přidržení vlnovce v určené poloze pomocí závitových tyčí s maticemi.

Tato varianta tedy umožňuje zastavit měření v domluvené poloze, přenastavit rozsah stroje a doměřit zbytek zdvihu. To vše za stálého vnitřního přetlaku vlnovce.

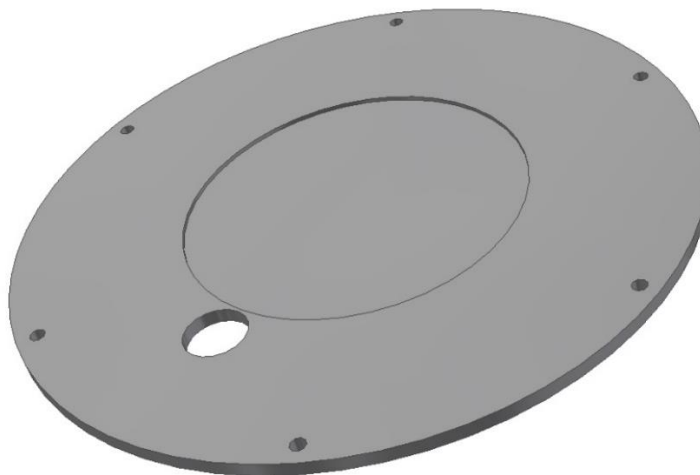
Výhodou této varianty je naměření charakteristiky pro úplný zdvih. Je možné jednotlivé části přípravku vypálit laserem u odborné firmy. Zároveň by šlo tento přípravek použít opakovaně pro jiná měření vlnovců stejných rozměrů.

Nevýhodou je však značně komplikovaná konstrukce, čímž by vzrostla cena celého přípravku. Firma Rubena a.s. nedisponuje laserovými stroji pro vypalování plechů, proto by nebylo možné nechat tento přípravek vyrobit interně. Důležité z hlediska experimentu je také náročnost postupu při použití tohoto přípravku. Bylo by nutné každý jednotlivý zdvih přerušit a změnit rozsah stroje, doměřit a změnit rozsah stroje zpět. Takový postup by byl časově velice náročný a zbytečně složitý. Zároveň by v průběhu charakteristik byly pravděpodobně vidět určité „skoky“ v místech přerušování měření. Ty by sice šly vyhladit v pozdějším zpracování dat, ale charakteristika by už přesně neodpovídala naměřeným hodnotám.

Varianta č. 2 – Přerušení zdvihu zhruba v polovině měření bez stálého přetlaku

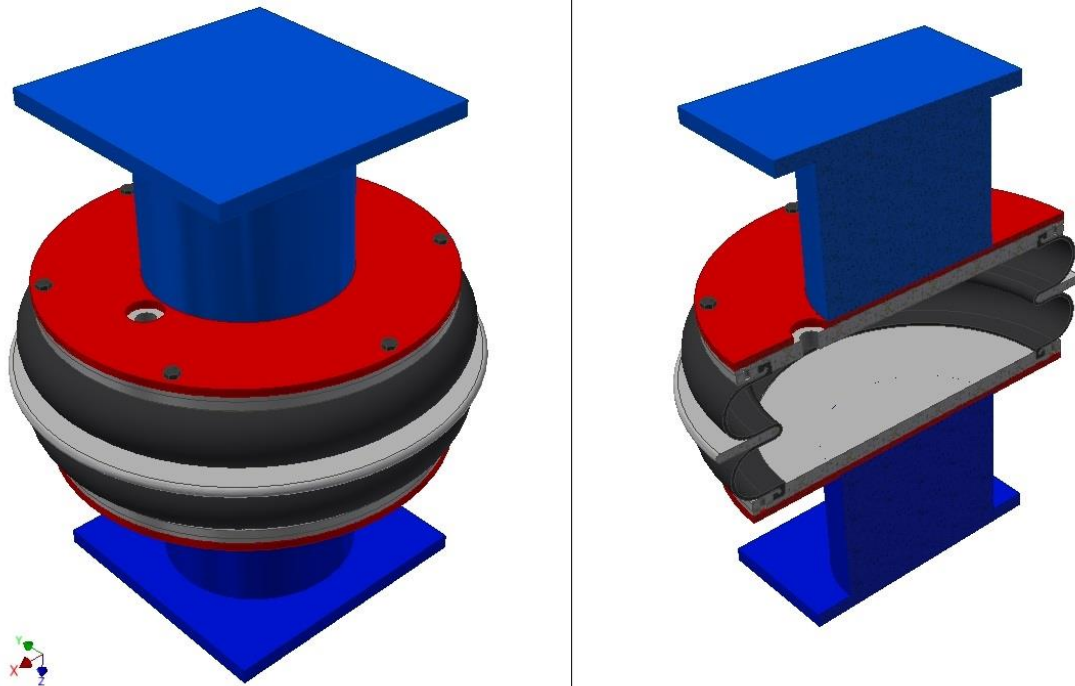
Druhou variantou, která byla zvažována, byl poměrně jednoduchý přípravek sloužící pouze pro rozložení tlaku z čelistí měřícího stroje na celou plochu příruby vlnovce. Přerušení zdvihu by bylo provedeno takovým způsobem, že by bylo možné naměřit charakteristiky od maximální pracovní výšky vlnovce po domluvenou hodnotu zhruba v polovině měření. Provedena by byla postupně všechna měření pro jednotlivé přetlaky. Poté by byl měch odtlakován a změnil by se rozsah zdvihu stroje tak, aby bylo možné doměřit charakteristiky od přerušené hodnoty po minimální pracovní výšku vlnovce.

Konstrukčně by byl přípravek pro takové měření řešen podstatně jednodušeji než ve variantě č. 1. Místo laserem vypalovaných hliníkových plechů by šlo o dvě ocelové desky tloušťky  $t_3 = 10 \text{ mm}$ . Ty by byly kruhového tvaru a v podstatě by kopírovaly plochu obou přírub. Na jedné straně obou desek by bylo vyfrézováno kruhové vybrání o průměru  $d_1 = 250 \text{ mm}$ , které by plnilo stejnou funkci jako v případě varianty č. 1, tedy usazení přípravku do čelistí měřícího zařízení tak, aby byla zajištěna souosost obou přírub a tím i rovnoměrně rozložené zatížení vlnovce. Vybrání by bylo hluboké  $3 \text{ mm}$  a obepínalo by čelisti stroje. Po obvodu obou desek by bylo na roztečné kružnici  $D_{roz1} = 470 \text{ mm}$  vyvrtáno 6 děr pro šrouby M10 určených k přišroubování desky přípravku k vlnovci, stejně jako v případě předchozí varianty. Zároveň by v jedné z desek byl na roztečné kružnici  $D_{roz2} = 150 \text{ mm}$  vyvrtán otvor o průměru  $d_4 = 45 \text{ mm}$ , který by, obdobně jako v předchozí variantě, také umožňoval našroubování ventilu pro přívod vzduchu.



obr. 16: Jedna deska přípravku varianty č. 2





obr. 17: Vlnovec s přípravkem v měřícím zařízení (normální pohled a řez)

Na obr. 17 je vidět uložení vlnovce s přípravkem (červená barva) v čelistech měřícího stroje (modrá barva). Pomocí 6 šroubů jsou obě části přípravku přichyceny na vlnovci z obou stran. Čelisti stroje sedí přímo ve vyfrézovaných vybráních.

Je již na první pohled patrné, o kolik je tato varianta konstrukčně jednodušší. Z jednoduché konstrukce vyplývá i levnější a snadnější výroba. Přípravek tohoto typu by navíc šlo vyrobit interně ve firmě Rubena a.s. Bylo by také možné naměřit tímto způsobem zatěžovací charakteristiku v celém rozsahu pracovního zdvihu měchu, a to podstatně rychleji, než by tomu bylo v případě přípravku z varianty č. 1. Nemusel by se totiž přerušovat každý jednotlivý zdvih pro přenastavení rozsahu, ale po naměření první poloviny charakteristik by se rozsah přenastavil pouze jednou.

Nevýhodou této varianty je však téměř jistota, že výsledné křivky složené ze dvou měření na sebe nebudou navazovat. Je takřka nemožné, aby po odtlakování měchu, přenastavení rozsahu a novém natlakování byl tlak totožný s měřením pro předchozí rozsah. Jedním z řešení by mohlo být naměřit data s určitým přesahem a poté jednotlivé křivky ručně kalibrovat tak, aby na sebe navazovaly. Stejně jako v předchozí variantě se ale jedná o manipulaci s naměřenými daty, a grafy tedy poté nelze považovat za plně věrohodné. Z firemního hlediska to nepředstavuje takový problém, neboť naměřené grafy slouží hlavně pro představu zákazníkům ohledně dosažitelných sil pro různé

přetlaky a výšky zdvihů. Malé posunutí křivky jedním či druhým směrem se tedy dá považovat v rámci určitých tolerančních mezí za jakési vyhlazení charakteristik. Pro potřeby a výsledky této práce je však důležitá věrohodnost naměřených veličin a dat, a poté jejich jasné přenesení do grafické podoby.

### Varianta č. 3 – Zmenšení celkového zdvihu vlnovce na hodnotu $Z = 240 \text{ mm}$

Vzhledem k výše zmíněným faktům byl tedy navržen třetí způsob měření, který se nakonec jevil jako nejvýhodnější a nejrozumnější pro tento experiment. Vzhledem k nutnosti použít přípravek kvůli rozložení tlaku v celé ploše příruby by byla použita jednodušší konstrukce přípravku popsaná jako varianta č. 2. Všechny zákonitosti ohledně konstrukce popsané výše by platily ve stejné míře, byl by pouze omezen celkový pracovní zdvih vlnovce tak, aby nepřesáhl hodnotu  $240 \text{ mm}$ . Tím by bylo dosaženo takových podmínek měření, že by bylo možné získat data bez přerušení zdvihu pro všechny tlaky. Jednalo by se tak i z časového hlediska o nejvýhodnější volbu.

Nevýhodou této varianty je samozřejmě omezená zatěžovací charakteristika, která není proměřena pro celý pracovní zdvih vlnovce.

Po konzultacích s firmou Rubena a.s. však byla domluvena tato varianta s tím, že po zpracování naměřených dat do jednotlivých křivek je možné odhadnout jejich pokračování. Naměřená budou data pro rozsah stlačení  $235 \text{ mm}$ , což je téměř 84 % z celkového pracovního zdvihu, který se pro dimenzi  $21,5 \times 2$  rovná  $280 \text{ mm}$ . Pro potřeby tohoto experimentu je důležité zpracovat charakteristiky na reálných datech bez nějakých pozdějších zásahů.

Nově domluvené hodnoty maximální a minimální měřené výšky jsou tedy stanoveny na  $H_{MAX} = 350 \text{ mm}$  místo původních  $370 \text{ mm}$  a  $H_{MIN} = 115 \text{ mm}$  místo původních  $90 \text{ mm}$ .

Všechny hodnoty dimenze  $21,5 \times 1$  zůstávají beze změny, neboť její pracovní zdvih je  $Z = 100 \text{ mm}$ . Jinak jde o rozměrově naprosto totožné vlnovce, přípravek je tedy možné použít pro obě měření stejným způsobem.

Obě části přípravku byly vyrobeny interně ve firmě Rubena a.s. Výrobní výkresová dokumentace je součástí příloh, konkrétně se jedná o přílohy č. 4 – výrobní výkres části s otvorem pro vzduch a č. 5 – výrobní výkres plné části přípravku. Výkresy jsou také uloženy na CD jako součást přílohy č. 8.

### 3.5 Snímání a archivace dat

Snímání dat není v této práci řešeno, neboť je součástí systému měřicího stroje. Na zařízení je nastavena požadovaná vzorkovací frekvence odečítání dat  $f = 3 \text{ Hz}$  a všechna data jsou vyhodnocována přes software v připojeném PC. Při experimentu je vykreslována křivka okamžitého měření a všechna data jsou ukládána do mezipaměti. Poté je možné tato data uložit na přenosný flash disk do textových souborů s koncovkou „.txt.“ Tyto soubory jsou součástí přílohy č. 8 a jsou určeny k dalšímu zpracování, o kterém je pojednáno v podkapitole 3.9.

### 3.6 Stanovení způsobu řízení experimentu

Řízení toho experimentu je prováděno výhradně ručně a mechanicky. I vzhledem ke stáří měřicího stroje (ten je z roku 1989) není vytvořen žádný speciální elektronický systém, kterým by bylo možné měření řídit. Je proto nutné mít při měření přítomny alespoň dvě osoby. Jednu pro ovládání měřicího stroje, druhou pro ovládání a regulaci tlaku. Po nastavení rychlosti stlačování a zapnutí ukládání dat je zdvih proveden konstantní rychlostí automaticky. Když vlnovec dosáhne své minimální pracovní výšky  $H_{MIN}$ , je nutné znovu ručně zastavit stlačování a ukončit ukládání dat.

Po celou dobu zdvihu je potřeba regulovat vnitřní přetlak ve vlnovci, aby byl zachován požadavek isobarické zkoušky. Regulace tlaku probíhá pomocí vzduchové soustavy podle popisu v kap. 3.1. Schéma vzduchové soustavy je na obr. 12 také v kap. 3.1. Regulační ventil je mechanický a je nutné ho ručně ovládat. To může způsobit mírné nepřesnosti při zahájení stlačování, ovšem poměrně pomalá rychlost zdvihu a její konstantní průběh umožňují srovnat poměr vypouštění vzduchu s mírou stlačení poměrně efektivně a účelně. Jak již bylo popsáno dříve, automatický regulační ventil zkresloval skutečný průběh křivek, a proto se jevil jako nevhodný pro tento experiment.

### 3.7 Navržení sledu jednotlivých kroků při měření

V této podkapitole je popsána posloupnost kroků při experimentu. Jedná se o jakýsi postup měření, který je sestaven na základě teoretického rozboru problému a vytyčených cílů měření. [8]

1. Sestavení jedné části vzduchového systému. Ta vznikne spojením kompresoru s uzavíracím ventilem. Spojení je tvořeno hadicí pro max. přetlak  $10 \text{ bar}$  s rychlospojkami na obou koncích.

2. Uchycení jedné části přípravku na uzavřenou stranu vlnovce (bez přívodu vzduchu). K přichycení je použito 6 šroubů M10, které jsou dotaženy příslušným klíčem tak, aby přípravek seděl na přírubě vlnovce po celé ploše.
3. Otočení vlnovce a našroubování ventilu s rychlospojkou do otvoru pro přívod vzduchu. Poté uchycení druhé části přípravku obdobným způsobem jako v kroku č.2.
4. Spojení již vytvořené části vzduchového systému s ventilem na vlnovci. Spojení je znovu tvořeno hadicemi pro max. přetlak 10 *bar* s rychlospojkami na obou koncích.
5. Umístění měřeného měchu s přípravkem do měřícího zařízení. Vzhledem k malým přesahům čelistí a poměrně velkému ventilu s přívodem vzduchu je třeba stranu s přívodem umístit směrem k zemi a podložit několika ocelovými podložkami.
6. Tlakování vlnovce na hodnotu cca 1 *bar*, aby došlo ke zvednutí horního víka s přípravkem a opření o horní čelist stroje.
7. Naměření maximální výšky vlnovce  $H_{MAX}$  a ustavení měřícího zařízení do této polohy.
8. Vynulování rysky posuvu takovým způsobem, aby byla jasně definována počáteční poloha zdvihu.
9. Nastavení požadovaného rozsahu sil na stroji. Rozsah je předpokládán do  $F_{MAX} \leq 200 \text{ kN}$ . Zároveň nastavení vzorkovací frekvence na hodnotu  $f = 3 \text{ Hz}$ .
10. Zapnutí PC a softwaru potřebného pro měření a ukládání dat.
11. Kontrola požadované výšky vlnovce a dotlakování na hodnotu přesně 1 *bar*.
12. Uzavření zavíracího ventilu – rozdělení vzduchového systému na dvě větve.
13. Začátek měření. Je nutné ručně nastavit rychlost stlačování a ručně regulovat velikost přetlaku ve vlnovcové části vzduchového systému.
14. Okamžitě po začátku zdvihu je nutné otevřít vypouštěcí ventil takovým způsobem, aby tlak zůstal konstantní na hodnotě  $p_p = 1 \text{ bar}$ .
15. Po dosažení minimální pracovní výšky daného vlnovce zastavení stlačování a ukončení ukládání dat z této části měření. Uložení dat do textového souboru.
16. Odtlakování vlnovce kvůli rychlejšímu návratu měřícího zařízení do počáteční polohy.
17. Návrat čelistí stroje do počáteční polohy, tj. maximální pracovní výšky daného vlnovce.

18. Opakování zdvihu pro daný tlak – opakování kroků 11 až 17 (pro dimenzi 21,5“x1 celkem tři měření pro jeden tlak; pro dimenzi 21,5“x2 celkem dvě měření pro jeden tlak).
19. Po naměření charakteristik při jednom tlaku a návratu do počáteční polohy se vlnovec natlakuje na následující požadovaný tlak (2 bary, 3 bary apod. až do 8 barů).
20. Opakování kroků 11 až 18 pro následující tlaky.
21. Po naměření všech charakteristik pro všechny tlaky vyjmutí vlnovce s přípravkem ze zařízení. Odpojení vzduchového systému od vlnovce a sejmutí přípravků.
22. Opakování kroků 2 až 21 pro druhou dimenzi vlnovce.
23. Ukončení měření a uložení naměřených dat na přenosný flash disk. Rozebrání vzduchového systému.
24. Vypnutí měřicího zařízení a podpurných systémů včetně PC.
25. Vyhodnocení naměřených dat, vykreslení grafů a zhodnocení výsledků.

### **3.8 Navržení vhodného systému záznamu o průběhu měření**

Systém záznamu o měření je důležitou součástí většiny experimentů. Je důležité dodržet metodický postup popsany v kap. 3.7, avšak musíme brát v potaz lidský faktor a předpokládat, že si všechny kroky člověk není schopen při provádění experimentu zapamatovat. Proto je postup většinou písemně předem připraven a při experimentu se jím člověk řídí. [8]

Pro experiment, který je předmětem této práce, je vytvořen postup kroků písemně a je součástí přípravy. Při měření se hledí na jeho dodržování. Zároveň je průběh experimentu dokumentován fotografiemi z mobilního telefonu, které určitým způsobem dokumentují posloupnost měření a celkové zařízení experimentálního stanoviště.

Dalším záznamem o průběhu měření jsou naměřená data zaznamenaná a uložena do souborů v připojeném PC. Součástí měřených hodnot, tj. síly a velikosti zdvihu, je i zaznamenaný čas uložení dané hodnoty. Vzhledem k zvolené vzorkovací frekvenci  $f = 3 \text{ Hz}$  jsou každou sekundu zaznamenány tři hodnoty síly a zdvihu.

Vybrané fotografie jsou součástí přílohy č. 8 na CD – disku spolu se všemi naměřenými daty.

### 3.9 Navržení způsobu zpracování naměřených dat

V dnešní době je způsob zpracování dat značně zjednodušen dostupnými softwary. Ty velice zlepšují produkci práce s daty, umožňují rychlé vykreslení průběhů různých charakteristik a zároveň jejich jasnou a přehlednou prezentaci.

Všechna data uložená do souborů s koncovkou „.txt“ jsou převedena do tabulkového kalkulátoru MS Excel. V tom je velmi jednoduché data roztřídit. Jedná se hlavně o průběhy jednotlivých zdvihů. Jsou vytvořeny dva soubory pro ukládání, jeden představuje měření dimenze 21,5“x1, druhý soubor je souhrnem měření dimenze 21,5“x2. V obou souborech je vytvořeno celkem 9 listů, z nichž každý má svůj účel.

Na prvním listu je zobrazen graf průběhu naměřených hodnot. Pro vlnovec dimenze 21,5“x1 jsou pro každý tlak vykresleny tři křivky, které jsou barevně odlišeny podle čísla měření. Pro vlnovec dimenze 21,5“x2 je to řešeno obdobným způsobem, vykreslené křivky jsou však pouze dvě.

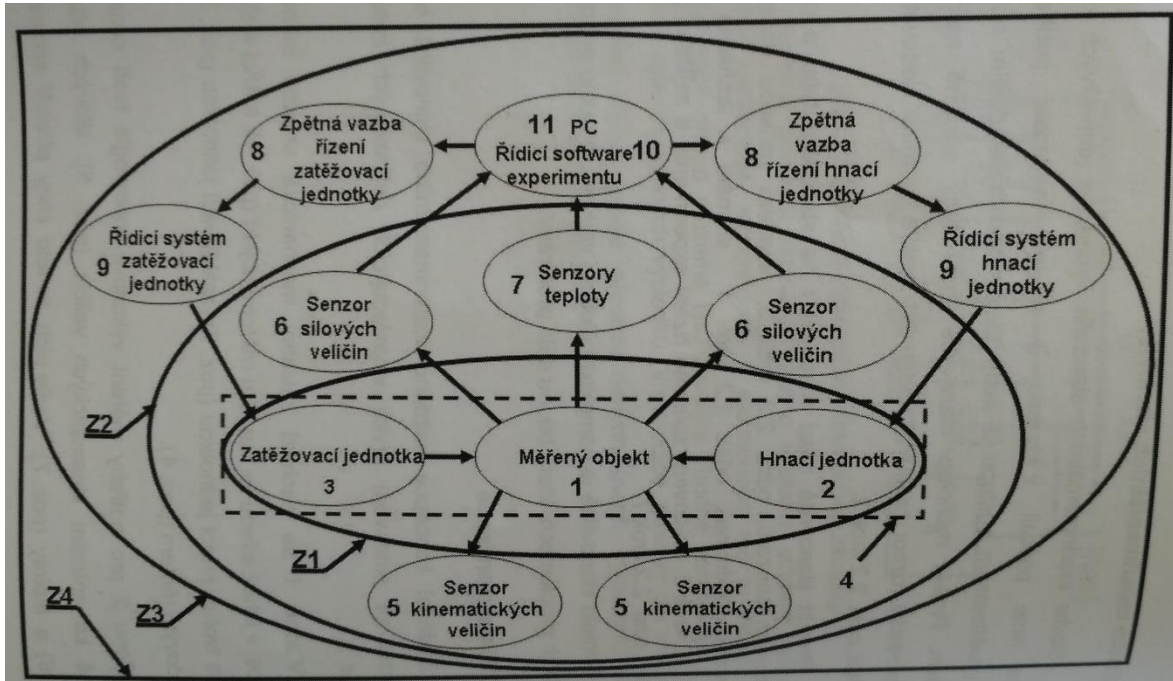
Dalších 8 listů představuje vždy měření pro jednotlivé tlaky (od 1 baru do 8 barů). V každém listě jsou vytvořeny tři tabulky, z nichž každá obsahuje 4 sloupce rozdělené dle měřených veličin. V první sloupci je měřená síla  $F_p$  v  $kN$ , v druhém sloupci je hodnota zdvihu stroje v  $mm$ , která byla zapsaná do .txt souborů. Ve třetím sloupci je tato hodnota přepočítána dle počáteční polohy na výšku vlnovce. Tento údaj udává hodnotu zdvihu vlnovce od maximální pracovní výšky  $H_{MAX}$  do minimální výšky  $H_{MIN}$  v  $mm$ . V posledním sloupci je zaznamenán čas odečtu hodnot od začátku ukládání dat. Ukazuje tedy vzorkovací frekvenci a zároveň udává dobu trvání zdvihu a tím pádem i rychlost stlačování. Křivka grafu byla tvořena závislostí  $F_p = f(Z)$ , tedy síly závislé na zdvihu vlnovce, nikoli stroje.

Oba soubory dat zpracovaných v programu MS Excel jsou součástí přílohy č. 8. Jsou uloženy na CD spolu s naměřenými daty v textových souborech a fotografiemi z měření. Vzhledem ke značné obsáhlosti jednotlivých tabulek je v následujících kapitolách uveden pouze výčet několika naměřených hodnot a vykreslený graf.

### 3.10 Zkušební stanoviště

Tato podkapitola obsahuje popis tvorby experimentálního stanoviště a fotografie z místa experimentu včetně uzpůsobení a popisu měřící aparatury.

Dle [8] vychází základní koncepce každého experimentálního stanoviště z prvků sestavených v definovaných zónách.



obr. 18: Konceptní schéma stavby experimentálního stanoviště [8]

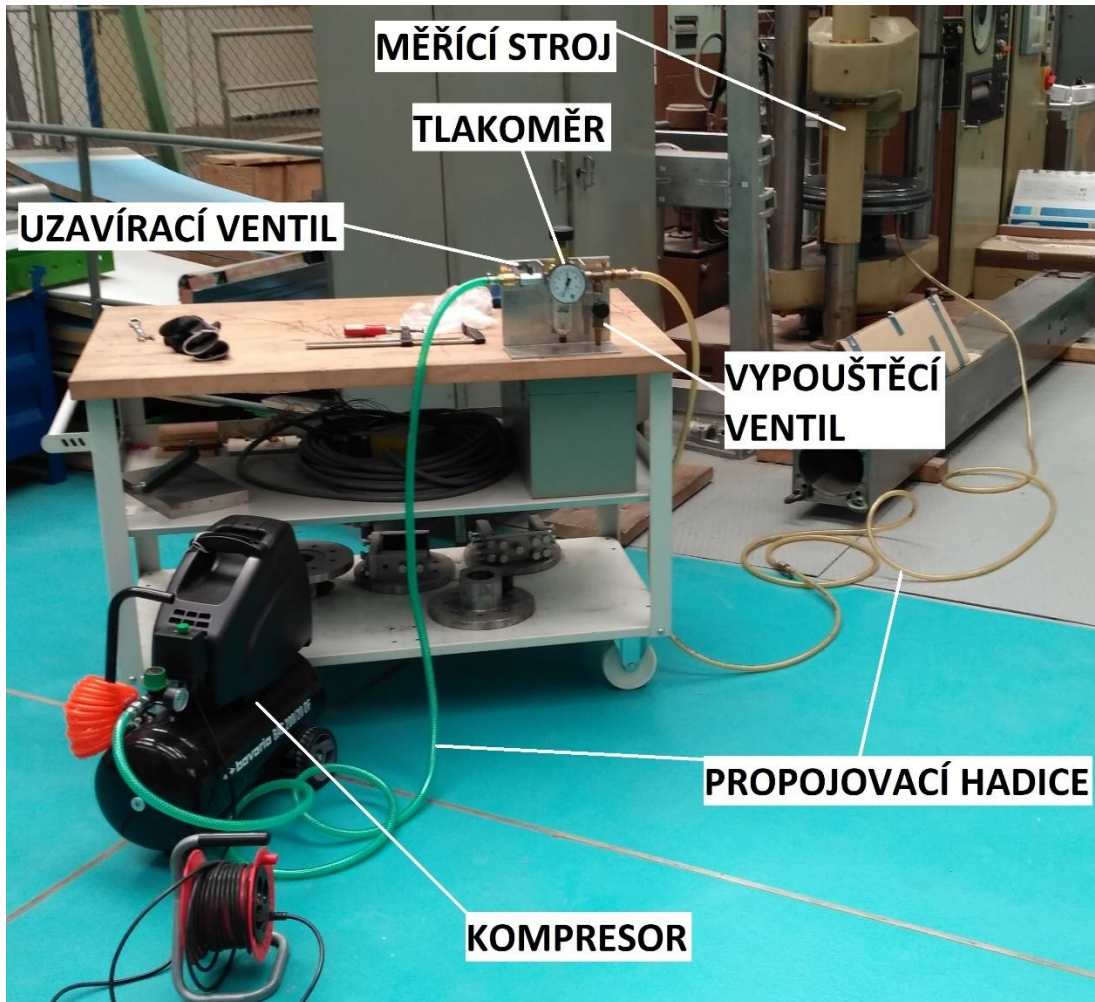
Zóna 1 (Z1) obsahuje mechanickou skladbu měřicího řetězce, včetně měřeného objektu. Její součástí jsou i hnací jednotky, zatěžovací jednotky či základové rámy. V případě našeho experimentu je součástí zóny 1 měřený vlnovec, celá vzduchová sestava včetně kompresoru a zároveň i měřicí zařízení vč. jeho ovládacích prvků. [8]

Zóna 2 (Z2) je tvořena všemi senzory potřebnými pro snímání požadovaných veličin. Vedle nich do ní patří také prvky určené k propojení zóny 1 se zónou 2. Jako celek tyto propojené zóny tvoří kompletní měřicí řetězec. V našem stanovišti jsou senzory součástí měřicího zařízení, a tak do této zóny můžeme zařadit maximálně analogový manometr. [8]

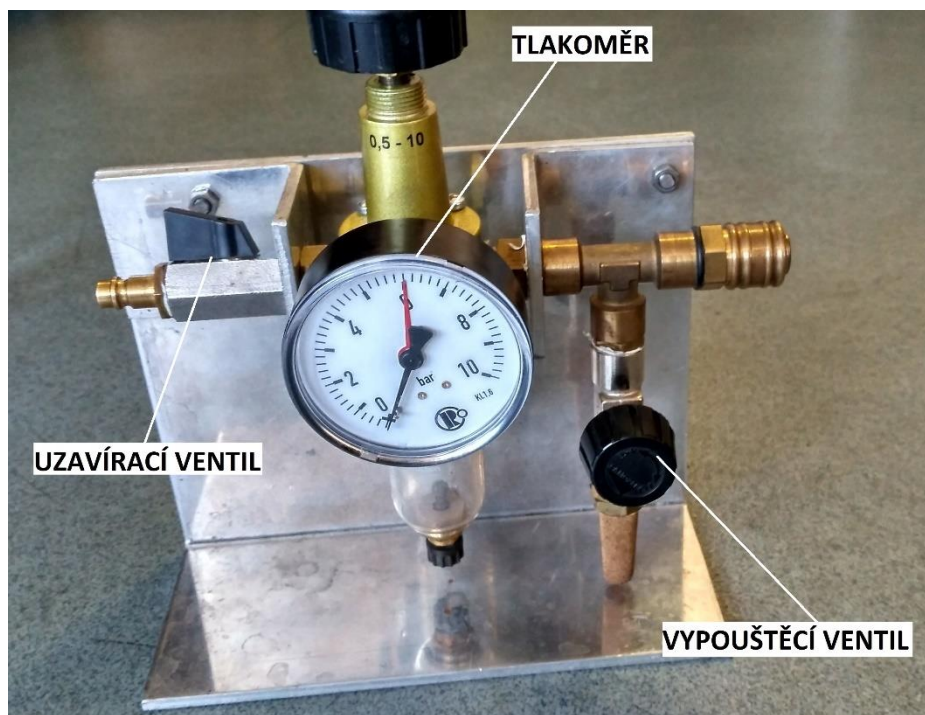
Zóna 3 (Z3) pak zahrnuje všechny elektrické a elektronické systémy. Řadí se sem napájecí zdroje, zařízení pro úpravu signálů, pro jejich záznam a další zpracování. Může zde být také realizován celý řídicí proces. Při měření tohoto experimentu je elektronickými systémy propojeno měřicí zařízení s výpočetní jednotkou (PC), ve které jsou data díky příslušnému softwaru zpracovávána. [8]

Je možné ještě uvažovat zónu 4 (Z4), která by případně umožňovala vstup dalších zařízení pro doplňkové metody (např. tenzometry pro měření napjatosti apod.) [8]

Na následujících obrázcích je popsána měřicí aparatura a uzpůsobení stanoviště při experimentu.



obr. 19: Popis celé vzduchové soustavy

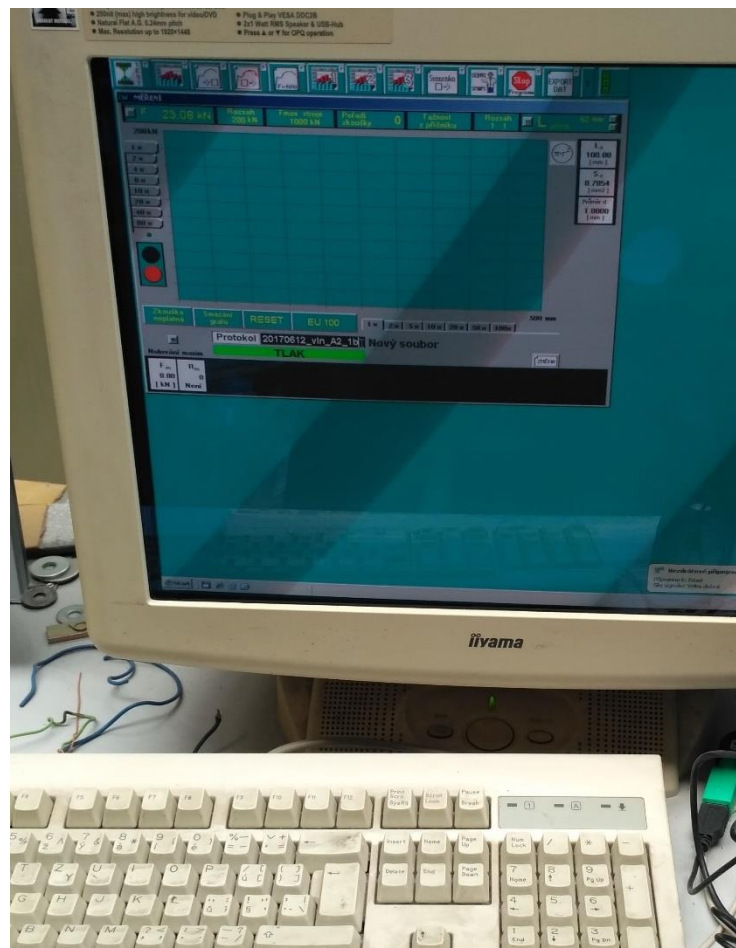


obr. 20: Detail ovládací části vzduchové soustavy





obr. 21: Detail měřícího stroje v laboratořích



obr. 22: Software v PC pro záznam a ukládání dat

## 4 Průběh vlastního měření

V této kapitole bude stručně popsán reálný průběh experimentu vč. fotografií.

Měření probíhalo v uzavřených těžkých halových laboratořích Fakulty strojní ČVUT. Experiment byl realizován ve spolupráci s Ústavem mechaniky, biomechaniky a mechatroniky, Odbor pružnosti a pevnosti, jejichž měřicí zařízení bylo při měření využito. Velké díky patří Ing. Karlu Doubravovi, Ph.D., který byl při měření přítomen a ovládal veškeré náležitosti týkající se měřicího stroje. Jak tomu ovšem u experimentů bývá, ani nám se nevyhnula nečekaná a nepříjemná situace, díky které bylo nutné měření zopakovat.

První měření se tedy odehrávalo na začátku května roku 2017. Přítomni měření byli kromě mě i Ing. Karel Doubrava, Ph.D., můj kamarád Bc. Lukáš Baše, který byl nápomocen při přenášení vlnovce s přípravkem a zároveň je autorem většiny fotografií, a chvíli byl přítomen i prof. Ing. Vojtěch Dinybyl, Ph.D. Již od začátku byl striktně dodržován postup popsáný v kap. Navržení sledu jednotlivých kroků při měření<sup>3.7</sup>. Na obr. 23 je vidět příprava vlnovce 21,5“x1 a měřicího přípravku k usazení do čelistí měřicího stroje. Zároveň je vidět již našroubovaný ventil s rychlospojkou pro připojení k hadici na přívod vzduchu do měchu.



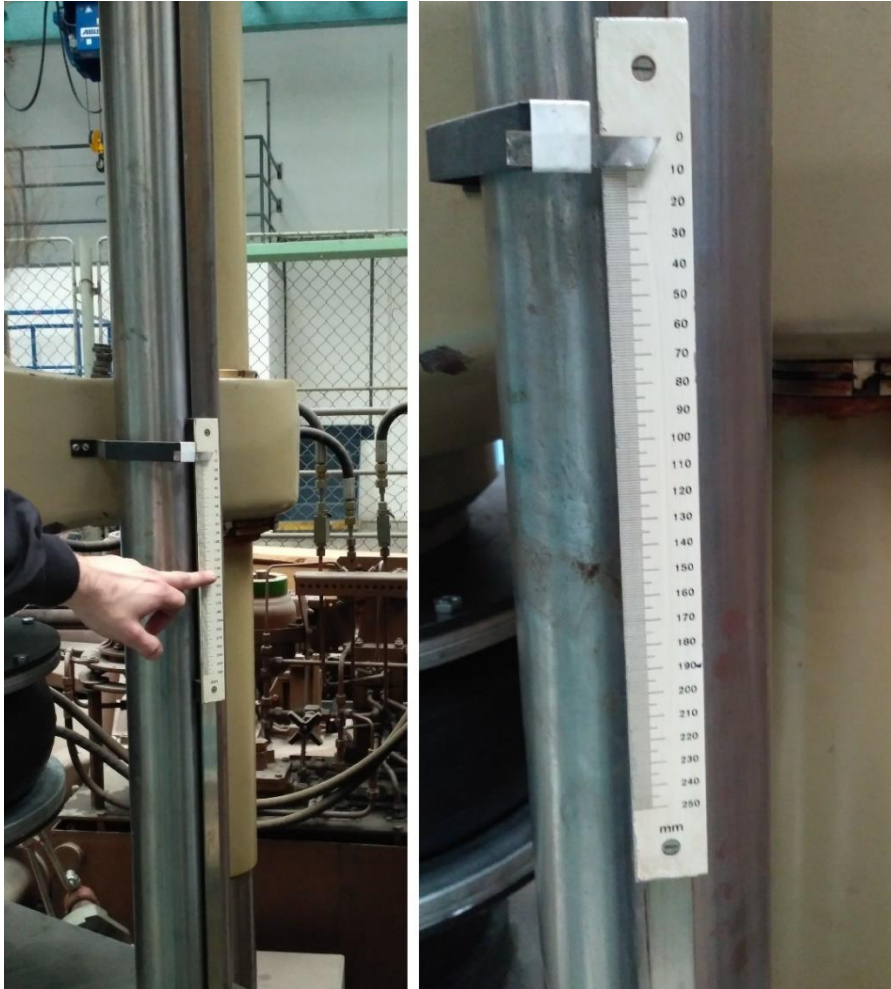
*obr. 23: Přišroubování přípravku k vlnovci*

Po uchycení přírub k vlnovci byl vlnovec vložen do čelistí stroje a natlakován na zhruba 1 bar, aby bylo možné ustanovit jeho maximální pracovní výšku viz obr. 24.

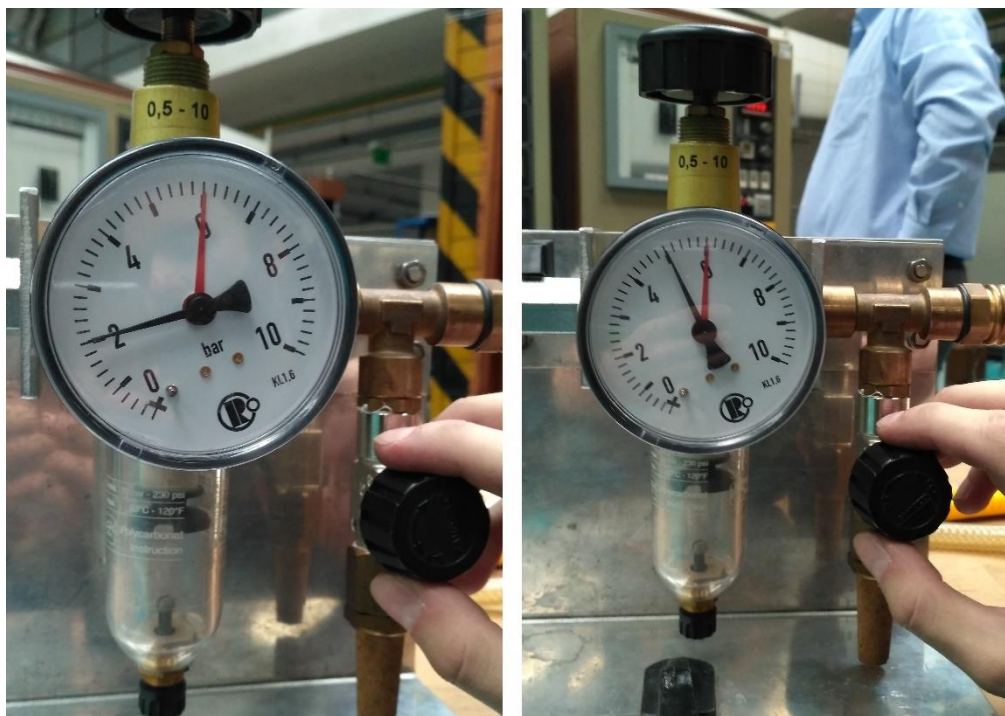


obr. 24: Vyfouknutý vlnovec (vlevo) a natlakovaný měch při ustavování polohy

Po určení maximální pracovní výšky vlnovce  $H_{MAX} = 180 \text{ mm}$  byla vynulována ryska na měřícím přístroji, aby bylo možné jasně definovat začátek i konec zdvihu. Jak je vidět na obr. 25, zdvih byl na rysce veden vždy od hodnoty „0“ do hodnoty „100“, což byla velikost minimální pracovní výšky  $H_{MIN} = 80 \text{ mm}$ . Po ustavení počáteční polohy vlnovce bylo zahájeno měření. To sestávalo z natlakování měchu na požadovanou hodnotu, poté zahájení zdvihu při konstantním tlaku, kdy bylo třeba upouštět vzduch ze soustavy pomocí vypouštěcího ventilu takovým způsobem, aby byla data zaznamenávána při isobarickém ději. Ukázka regulace je na obr. 26. Měření charakteristik pro přetlaky 1-7 barů probíhalo bez sebemenších problémů. Hodnoty z těchto měření byly ukládány do textových souborů.



obr. 25: Ustanovení rysky měřícího stroje na maximální hodnotu



obr. 26: Ukázka regulace tlaku při stlačování pro přetlaky 2 bary a 5 bar

Problém nastal až při tlakování měchu na požadovaný maximální přetlak  $p_{MAX} = 8 \text{ bar}$ . Zhruba při hodnotě  $7,5 \text{ bar}$  ve vzduchovém okruhu se zničehonic ozvala obrovská rána. Stala se naprosto nečekaná a zvláštní věc. Tlakovaný vlnovec vyklouzl ze zámku mezi přírubou a upínacím kruhem viz. obr. 27. Po této události jsme se s Ing. Doubravou domluvili na přerušení měření a nutnosti přezkoušení daných kompletů na zkušebně ve firmě. Byl dán požadavek na natlakování obou vlnovců na přetlak 10 bar na horní hranici zdvihu tak, aby byla jistota, že při příštím měření stejná událost nenastane.



obr. 27: Vyklouznutí pryžového měchu z příruby

Nastalo řešení problému s firmou a hledání důvodů oné nehody. Vlnovce byly rozebrány a přeměřovány. Bylo zjištěno, že při kompletaci měchu do přírub byla pravděpodobně přehlédnuta nesouosost vnitřního přesahu příruby vůči upínacímu kruhu. To mělo po kompletaci a sešroubování za následek přílišné stlačení pryžové patky měchu na jedné straně, zatímco na druhé straně nebyla zajištěna příslušná těsnost.

To byl pravděpodobně hlavní důvod, proč pryžová patka v jednom místě při tak obrovském tlaku a na maximální možné pracovní výšce vyskočila ze zámku. Při takovém tlaku stačí sebemenší netěsnost a dojde k neřízené reakci, která má za

následek v podstatě výbuch natlakovaného vzduchu. Zjednodušeně by se taková situace dala přirovnat k prasknutí nafouknutého balonku při píchnutí jehlou, kdy se také vytvoří malinká dírka a vzduch začne nekontrolovatelně unikat takovou rychlostí, že balonek v podstatě roztrhne.

Dalším možným důvodem mohla být špatná kompletace, kdy pryžová patka nemusela být správně usazena do zámku. Pokud byl zároveň utahovací šroub v příliš malém předpětí, mohl při takovém tlaku závit s upínacím kruhem poodskočit a vytvořit tak prostor pro expanzi natlakovaného vzduchu, což by mělo za následek také vyskočení patky ze zámku příruby a upínacího kruhu.

Posledním, asi nejméně pravděpodobným, důvodem mohla být špatně vyrobená patka měchu. Je možné, že při kontrole mohla být přehlédnuta nepřesnost patky nebo nějaké její vyhloubení. Při prohlídce po nehodě se ovšem žádný takový problém neobjevil, proto je tato varianta asi nejméně důležitá.

Je také možné, že nehoda nastala z jiných příčin, které však nejsme schopni reálně podchytit. Mohla také nastat kombinace více menších důvodů, které dohromady vedly k destrukci a výbuchu.

Po kontrole obou měchů a všech součástí kompletu v laboratořích firmy Rubena a.s. bylo rozmyšleno, jak postupovat dál. Jako nejlepší varianta se jevila nechat si vyrobit nové upínací kruhy, které by byly vycentrovány vůči vnitřnímu přesahu víka. Tak by bylo zajištěno rovnoměrné zatížení patky měchu po celém jejím obvodu. Nakonec byla tato varianta i zvolena a po vyrobení nových upínacích kruhů byly oba vlnovce znovu zkompletovány.

Bylo ještě třeba zkontrolovat jejich těsnost a výdrž, jak bylo domluveno s Ing. Doubravou. Těsnost se ve firmě Rubena a.s. zjišťuje natlakováním vlnovce vodou pro příslušnou výšku. Postupně byly oba měchy tlakovány vodou na 10 *bar* a na této hodnotě zhruba 10 minut ponechány. Tlakování probíhalo na maximální pracovní výšce jednotlivých dimenzí. Po kontrole těsnosti bylo rozhodnuto, že by oba vlnovce měly tlak 8 *bar* na příslušných maximálních výškách vydržet. Vedoucím ve firmě byl vypracován protokol o těchto zkouškách těsnosti, který je součástí přílohy. Konkrétně jde o přílohu č. 6 a č. 7.

Po otestování těsnosti a výdrže byly vlnovce připraveny pro druhé měření. Po domluvě s Ing. Doubravou byl domluven termín a na začátku června proběhlo druhé měření. Znovu bylo postupováno výhradně dle metodického postupu vypracovaného v kap. 3.7. Byly měřeny celkem tři závislosti pro jeden tlak pro dimenzi 21,5"x1 a kvůli

časové náročnosti pouze dvě závislosti pro jeden tlak pro dimenzi 21,5"x2. Na obr. 28 je vidět měření maximální výšky pracovního zdvihu pro vlnovec dimenze 21,5"x1 (na obrázku vlevo), která je  $H_{MAX} = 180 \text{ mm}$ . Dále je možné vidět měření maximální výšky pracovního zdvihu pro vlnovec dimenze 21,5"x2 (na obrázku uprostřed), jehož hodnota je  $H_{MAX} = 350 \text{ mm}$ , a také kontrolu minimální výšky pracovního zdvihu stejné dimenze (na obrázku vpravo), jejíž hodnota je  $H_{MIN} = 115 \text{ mm}$ .



obr. 28: Kontrola velikostí jednotlivých zdvihů



obr. 29: Dosažení maximálního pracovního přetlaku 8 bar



*obr. 30: Ukázka velikosti natlakovaného vlnovce dimenze 21,5"x1*

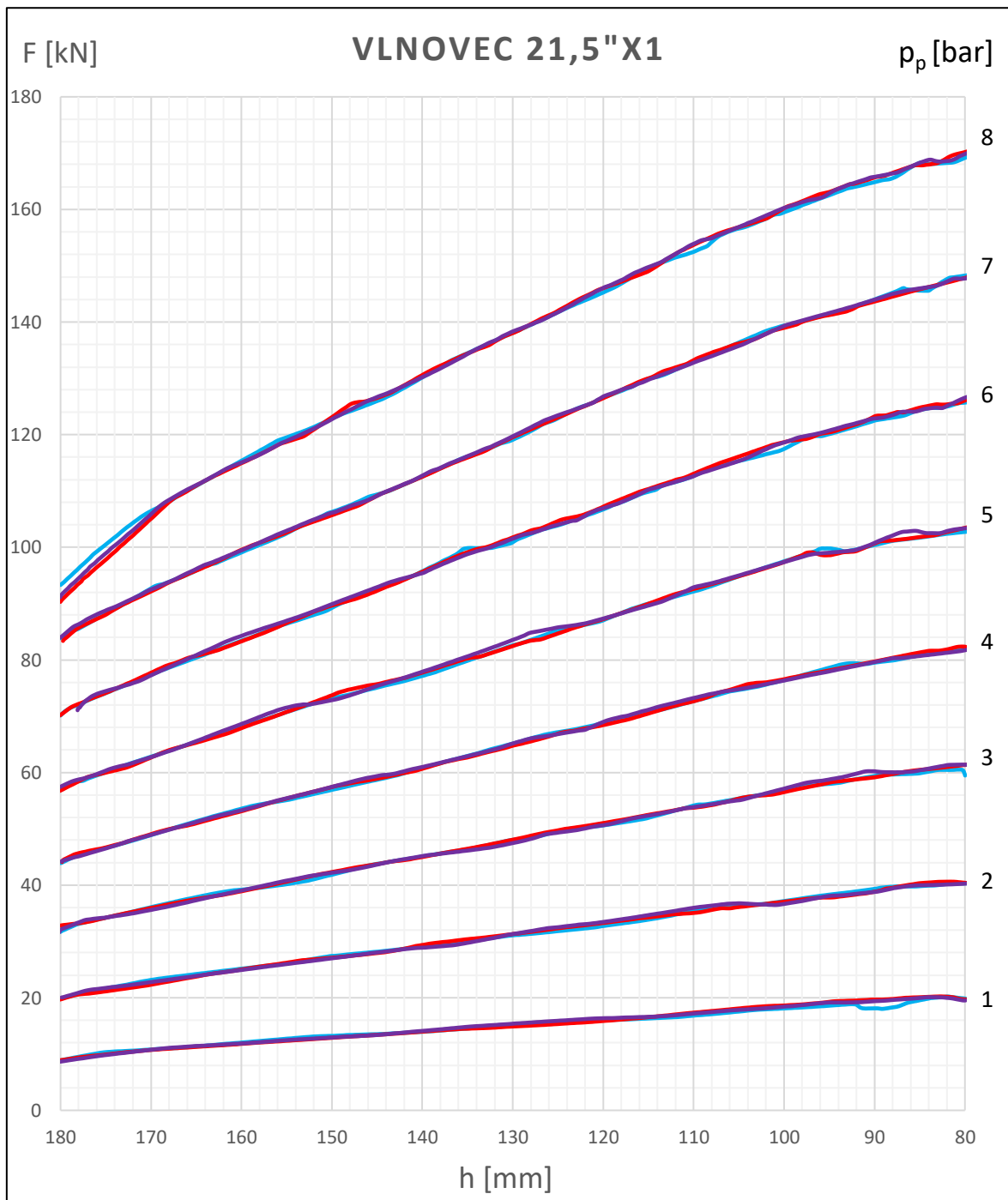
Druhé měření pro obě dimenze vlnovců již bylo úspěšné a naměřená data byla v pořádku uložena do PC i přenosný flash disk. Následovalo přenesení dat z textových souborů do tabulkového kalkulátoru MS Excel a poté vynesení grafů. Vyhodnocení výsledků je popsáno v následující kapitole.



## 5 Vyhodnocení výsledků měření

Zpracování naměřených dat proběhlo dle popisu v kap. 3.9. Použit byl tabulkový kalkulátor MS Excel, ve kterém byla na jednotlivých listech rozřazena naměřená data do tabulek tak, aby bylo co nejjednodušší je převést do grafické podoby. Byly vyneseny jednotlivé závislosti síly na zdvihu, resp. výšce vlnovce  $F_p = f(h, p_p)$  pro jednotlivé přetlaky.

Jako první zhodnotím naměřené charakteristiky vlnovce dimenze 21,5"x1.



obr. 31: Graf charakteristik pro vlnovec dimenze 21,5"x1

Na obr. 31 je zobrazen graf sestavný z naměřených dat. Jedná se o závislost síly  $F$  [kN] na výšce vlnovce  $h$  [mm]. Z průběhů křivek je evidentní, že velikost přetlaku  $p_p$  značně závisí na velikosti vyvolané síly pro určitou velikost zdvihu. Například rozdíl sil pro přetlak 1 bar je zhruba 12 kN, pro přetlak 5 bar je to již téměř 50 kN. Na tom je jasně vidět, že jednu dimenzi vlnovce lze použít pro opravdu různé aplikace s velmi odlišnými zatíženími od 10 kN až po téměř 170 kN.

Jednotlivé barvy křivek znázorňují číslo měření pro daný tlak – světle modrá je měření první, tmavě modrá měření druhé a červená měření třetí. Je zřejmé, že téměř všechny křivky se krásně překreslují. Mírné odchylky jednotlivých křivek jsou způsobeny poněkud nepřesným odpouštěním vzduchu z vlnovce při stlačování. Většinou jde ale jen o jednu křivku ze tří.

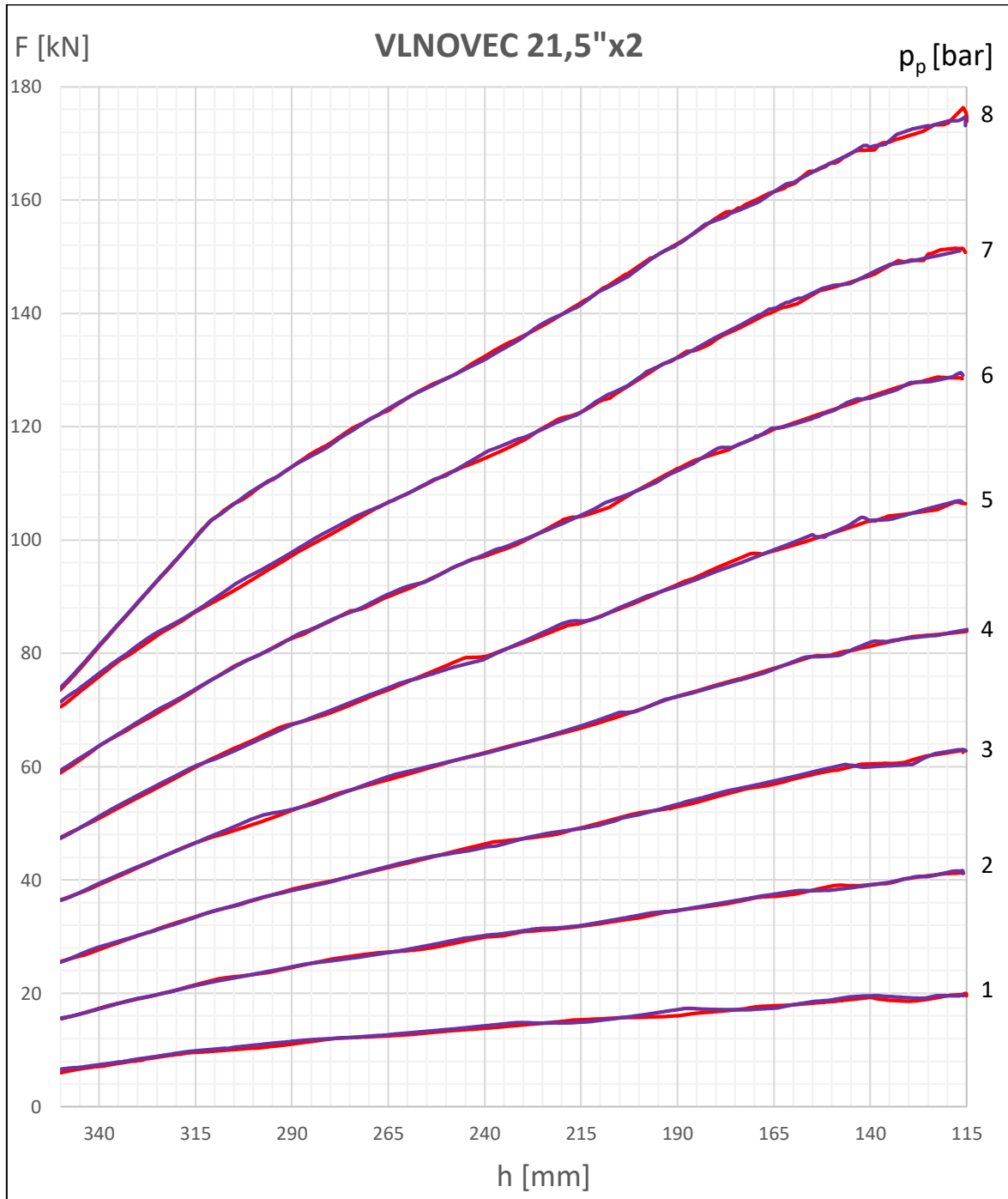
Nepřesné udržování stálého tlaku také způsobuje mírné zvlnění některých křivek. Nejvíce je rozdíl patrný na počátečním zakřivení charakteristik pro tlak 8 bar. Toto zakřivení je způsobeno nedostatečným výkonem kompresoru při měření. Ačkoli je v technických parametrech kompresoru (příloha č. 1) deklarován maximální pracovní tlak 8 bar, kompresor nebyl schopen dále tlakovat tak velký objem vzduchu, který se do těchto dimenzí vejde. Tlakování se zastavilo vždy na zhruba 7,3 barech. Jedinou šancí, jak dosáhnout požadovaných 8 barů, bylo začít stlačovat vlnovec při nižším přetlaku za uzavřeného vypouštěcího ventilu. Stlačováním ve vlnovcové větvi vzduchového systému rostl tlak až na požadovaných 8 barů. Po dosažení této hodnoty byl ventil znovu otevřen tak, aby stlačování nadále probíhalo při požadovaném konstantním přetlaku.

Na obr. 32 jsou vykresleny zátěžové charakteristiky vlnovce dimenze 21,5"x2. Všechny náležitosti ohledně vykreslených křivek a jejich závislostí jsou shodné s předchozími odstavci.

Jednotlivé barvy také znázorňují číslo měření pro daný tlak – tmavě modrá pro první měření, červená pro druhé měření. Znovu jsou viditelné mírné odchylky vzájemných křivek a jejich zvlnění, což je způsobeno špatnou regulací tlaku.

Stejně jako u dimenze 21,5"x1 i zde nastal problém s tlakováním kompresoru na hodnotu 8 bar. Záležitost byla řešena stejným způsobem, tedy začátek stlačování z hodnoty tlaku, při které se kompresor vypnul a poté stlačování s uzavřeným vypouštěcím ventilem, dokud tlak nedosáhl požadovaných 8 barů.

Naměřené hodnoty a data jsou vzhledem k velkému rozsahu uložena na přiloženém CD v elektronické podobě.



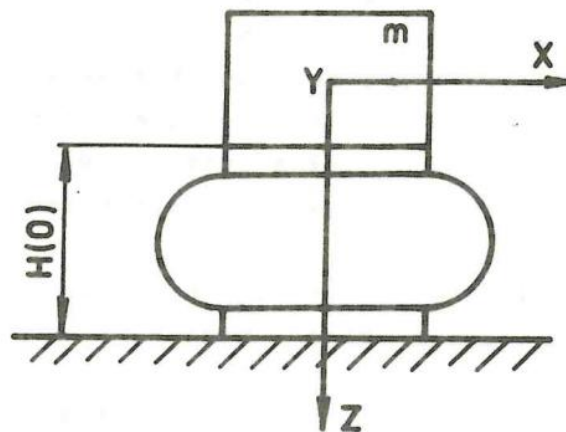
obr. 32: Graf charakteristik pro vlnovec dimenze 21,5"x2

Po konzultacích výsledků ve firmě Rubena a.s. jsme dospěli k názoru, že v této práci bude nejvhodnější ponechat grafy tak, jak byly naměřeny. Firma si nechtěná zakřivení a různé zvlnění do svých katalogových listů vyhladí. Stejně tak se z průběhu křivek dá určit jejich sklon a přibližné pokračování a lze tedy ručně dodělat křivky dimenze 21,5"x2 do požadovaných hodnot pracovního zdvihu. Dá se říci, že měření a výsledky můžeme považovat za věrohodné a vydařené.

## 6 Stanovení frekvenčních charakteristik

Stanovení frekvenčních charakteristik pneumatických pružin je důležité hlavně z hlediska jejich izolačních schopností. Tato kapitola není určena pro řešení této problematiky, má pouze nastínit podstatu stanovení a případně měření frekvenčních charakteristik. Může zároveň sloužit jako podklad pro možné rozšíření této práce jinou diplomovou či doktorskou prací.

Pro popis frekvenční charakteristiky je nutné zavést model odpovídající reálnému pružně pneumaticky uloženému objektu. Pro model je zaveden souřadný systém X, Y, Z s počátkem procházejícím středem hmotnosti podepřeného objektu. [2]



obr. 33: Objekt podepřený pneumatickou pružinou [2]

Na obr. 33 můžeme vidět objekt o hmotnosti  $m$ , který je podepřen pneumatickou pružinou o statické výšce  $H(0)$ . Tato pružina obsahuje určitý objem stlačeného vzduchu  $V$  o přetlaku  $p_p$ . Pro výpočet frekvence  $f_z$  svislých vlastních kmitů platí rovnice [2]:

$$f_z = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{k_z}{m}}, \quad (14)$$

kde  $k_z$  je tuhost pružiny. Zároveň je evidentní, že objekt o hmotnosti  $m$  pružinu zatěžuje statickou silou svislého směru

$$F_z = g \cdot m, \quad (15)$$

kde  $g$  je tíhové zrychlení. Po dosazení rov. (15) do rov. (14) dostaneme vztah

$$f_z = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{g \cdot k_z}{F_z}}. \quad (16)$$

Dle literatury [2] platí, že tuhost  $k_z$  lze vyjádřit jako:

$$k_Z = F_Z \cdot K_Z, \quad (17)$$

kde  $K_Z$  je jednotková tuhost pružiny. Tu je možné zapsat algebraickým součtem dvou dílčích jednotkových tuhostí:

$$K_Z = K_1 + K_2. \quad (18)$$

Dílčí tuhost  $K_1$  je možné označit jako jednotkovou provozně objemovou tuhost. Je závislá na provozních parametrech a relativní změně objemu pružiny. Dílčí tuhost  $K_2$  můžeme označit jako jednotkovou tuhost plošnou. Ta je vyvolána relativní změnou efektivní plochy při deformaci pneumatické pružiny. Může nabývat jak kladných, tak záporných hodnot a vzhledem k tomu, že se obě jednotkové tuhosti algebraicky sčítají, je možné vhodnou kombinací provozních parametrů (přetlaku  $p_p$ , objemu  $V$ , volbou konstrukčního uspořádání apod.) vytvořit pneumatickou pružinu požadované tuhosti. [2]

Pokud dosadíme rov. (17) do rov. (16), dostaneme výraz:

$$f_Z = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{g \cdot K_Z}, \quad (19)$$

ze kterého je patrné, že frekvence vlastních kmitů závisí pouze na jednotkové tuhosti pružiny (tíhové zrychlení považujeme za konstantu). Pokud zvyšujeme hmotnost objektu  $m$ , zvětšuje se přetlak  $p_p$  vzduchu uvnitř pružiny. To má za následek snižování jednotkové provozně objemové tuhosti  $K_1$  a tím i snižování frekvence vlastních kmitů soustavy [2].

Pro výpočet frekvence vlastních vodorovných kmitů  $f_X$  platí obdobně jako v rov. (14)

$$f_X = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{k_X}{m}}. \quad (20)$$

Dle [2] však tuhost  $k_X$  na rozdíl od svislé tuhosti  $k_Z$  není závislá na přetlaku vzduchu, tzn. ani na tíze uloženého objektu. Frekvenci vodorovných kmitů lze však také regulovat, a to hlavně změnou statické výšky pružiny.

Je evidentní, že frekvenční charakteristiky pneumatických pružin jsou poměrně složitým a komplexním problémem hlavně kvůli nekonstantní tuhosti. Ta se mění v závislosti na několika faktorech, čehož je často využíváno pro snižování frekvence vlastních kmitů pružiny a tím dosažení efektivnějšího tlumení. Analýza takového problému by byla značně rozsáhlá a byla by vhodným pokračováním této práce například v doktorském studiu.

## Závěr

Hlavním cílem této práce bylo experimentální naměření zátěžových charakteristik dvou dimenzí vlnovců – 21,5“x1 a 21,5“x2. Bylo také nutné zpracovat metodiku měření, která je důležitá z hlediska přípravy a pozdějších postupů v experimentu. Dále bylo nutné zkonstruovat přípravek, který by umožnil usazení vlnovců do měřícího zařízení. Naměřená data pak bylo třeba vyhodnotit a vykreslit z nich grafy zátěžových charakteristik takovým způsobem, aby je firma Rubena a.s., v jejíž spolupráci byla tato práce vyhotovena, mohla použít jako podklady o dosažitelných silách ke svým produktovým katalogům.

V teoretické části byla probrána historie výroby a použití vlnovců od jejich úplných počátků až k dnešnímu využití. Dále byla popsána základní konstrukce pneumatických pružin, jejich hlavní využití v dnešním světě a důležité výhody a nevýhody použití. Byly také vypsány hlavní pracovní parametry vlnovců a definice základních veličin.

V další části byla vypracována podrobná metodika měření, která byla poté striktně dodržována. Součástí metodiky byla konstrukce přípravku pro měření, který by umožnil rovnoměrné rozložení tlaku na víka vlnovců a zároveň by sloužil k usazení pružin do měřícího zařízení. Dále byl v metodice vypracován podrobný postup měření, kterými jsem se v praktické části řídil.

V praktické části bylo sestaveno experimentální stanoviště, které sloužilo k dosažení potřebných podmínek měření. Dále byly naměřeny průběhy charakteristik obou vlnovců pro tlaky 1-8 bar po 1 baru. Tyto charakteristiky byly měřeny v rozsahu celého zdvihu vlnovce. Poté byla naměřená data zpracována a vyhodnocena. Byly vytvořeny dva grafy průběhu síly na velikosti stlačení pro všechny tlaky. Výsledky měření i vyhodnocení odpovídaly předpokladům a lze je tedy považovat za věrohodné.

V poslední části poté byla krátce zpracována teorie ohledně frekvenčních charakteristik pneumatických pružin, která může sloužit jako podklad a impulz pro řešení této problematiky v jiných diplomových či doktorských pracích.

## Seznam použité literatury

1. *Pneumatic spring for vehicles*. USA. Strojírenství, US 673682 A. 1901-01-22 [cit. 2016-12-08]. Dostupné z: <https://www.google.com/patents/US673682>
2. KREJČÍŘ, O. *Pneumatiká vibroizolace* [Doktorská disertační práce]. Liberec: VŠST Liberec, 1986.
3. RUBENA. *Schéma použití* [online]. 2016 [cit. 2017-03-20]. Dostupné z: <http://www.rubena.cz/cz/produkty/vzduchove-pruzeni-silove-prvky/vlnovce-vzduchoveho-pruzeni/schema-pouziti/>
4. RUBENA. *Vzduchové pružiny typu RUBENA*. Náchod: 2008 [cit. 2017-03-20]. Dostupné z: [http://www.rubena.cz/underwood/download/files/vlnovce-rubena\\_2008-cz.pdf](http://www.rubena.cz/underwood/download/files/vlnovce-rubena_2008-cz.pdf)
5. E-konstruktor. *Pružné pohony* [online]. 2017 [cit. 2017-03-20]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/novinka/pruzne-pohony-konstruovane-pro-beh-na-dlouhou-trat-2-dil>
6. WEMINGHAUSEN, M. *Mercedes Air Suspension* [Článek]. Boston: 2014 [cit. 2017-03-18]. Dostupné z: <http://600airsuspension.com/resources/article-on-mercedes-air-suspension-by-martin-werminghausen.pdf>
7. Globspec. *Air Springs Information* [online]. 2017 [cit. 2017-04-02]. Dostupné z: [http://www.globalspec.com/learnmore/mechanical\\_components/springs/air\\_springs](http://www.globalspec.com/learnmore/mechanical_components/springs/air_springs)
8. DYNBYL, V. et al. *Výkonová metrologie - experimentální podpora vývoje a inovací mechanismů ve strojírenství*. Praha: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 978-80-01-04325-7.
9. VLK, F. *Podvozky motorových vozidel*. Brno: Nakladatelství Vlk, 2006. ISBN 80-239-6464-X.
10. Werkstoffprüfmaschinen Leipzig. *Über uns* [online]. [cit. 2017-06-15]. Dostupné z: <http://www.werkstoffpruefmaschinen-leipzig.de/4507.html>

## Seznam obrázků

obr. 1: Ukázka použití pružiny pod sedadlem .....	6
obr. 2: Ukázka izolace okolí od zdroje vibrací .....	7
obr. 3: Srovnání charakteristik ocelové a pneumatické pružiny .....	7
obr. 4: Konstrukce vlnovcové pružiny.....	9
obr. 5: Vaková pneumatická pružina.....	10
obr. 6: Uložení betonového lože na soustavě měchů .....	11
obr. 7: Deformační charakteristika ocelové pružiny s tuhostí 10N/mm .....	14
obr. 8: Schéma k odvození deformační char. : a) klidový stav, b) stlačený stav .....	14
obr. 9: Vliv exponentu na průběh charakteristiky pružiny: a) vlnovec, b) vak .....	16
obr. 10: Charakteristika vlnovcové pružiny pro různé přetlaky .....	17
obr. 11: Charakteristika vlnovce 10x2 od firmy Rubena a.s. ....	18
obr. 12: Zjednodušené schéma vzduchové soustavy experimentu .....	19
obr. 13: Výrobní štítek a měřicí zařízení.....	21
obr. 14: Čtvercové plechy tvořící jednu polovinu přípravku.....	24
obr. 15: Uložení vlnovce v přípravku (normální pohled a řez).....	25
obr. 16: Jedna deska přípravku varianty č. 2 .....	26
obr. 17: Vlnovec s přípravkem v měřicím zařízení (normální pohled a řez).....	27
obr. 18: Konceptní schéma stavby experimentálního stanoviště .....	33
obr. 19: Popis celé vzduchové soustavy .....	34
obr. 20: Detail ovládací části vzduchové soustavy.....	34
obr. 21: Detail měřicího stroje v laboratořích.....	35
obr. 22: Software v PC pro záznam a ukládání dat.....	35
obr. 23: Přišroubování přípravku k vlnovci .....	36
obr. 24: Vyfouknutý vlnovec (vlevo) a natlakovaný měch při ustavování polohy.....	37
obr. 25: Ustanovení rysky měřicího stroje na maximální hodnotu.....	38
obr. 26: Ukázka regulace tlaku při stlačování pro přetlaky 2 bary a 5 bar .....	38
obr. 27: Vykloznutí pryžového měchu z příruby .....	39
obr. 28: Kontrola velikostí jednotlivých zdvihů .....	41
obr. 29: Dosažení maximálního pracovního přetlaku 8 bar .....	41
obr. 30: Ukázka velikosti natlakovaného vlnovce dimenze 21,5"x1 .....	42
obr. 31: Graf charakteristik pro vlnovec dimenze 21,5"x1 .....	43
obr. 32: Graf charakteristik pro vlnovec dimenze 21,5"x2 .....	45



obr. 33: Objekt podepřený pneumatickou pružinou .....	46
---	----

## Seznam tabulek

tab. 1: Srovnání parametrů měřených vlnovců .....	22
---	----

## Seznam příloh

<a href="#">Příloha č. 1 – Kompresor použitý při experimentu</a> .....	52
<a href="#">Příloha č. 2 – Katalogový list vlnovce 21,5x2</a> .....	53
<a href="#">Příloha č. 3 – Protokol měření Dunlop</a> .....	54
<a href="#">Příloha č. 4 – Výkres přípravku – vzduch. část</a> .....	55
<a href="#">Příloha č. 5 – Výkres přípravku – plná část</a> .....	56
<a href="#">Příloha č. 6 – Protokol o těsnosti měchu 21,5"x1</a> .....	57
<a href="#">Příloha č. 7 – Protokol o těsnosti měchu 21,5"x2</a> .....	58
<a href="#">Příloha č. 8 – Dokumenty uložené na CD</a> .....	59

## Příloha č.1 – Kompresor použitý při experimentu

### Einhell Kompresor BAC 230/50

#### Hlavní technické parametry

Síťové napětí: 230 V | 50 Hz

Max. výkon motoru: (S2 | S2 t) 1.600 W | 15 min

Otáčky motoru: 2850 / min

Sací výkon: 230 l / min

Výstupní výkon na 0 bar: 140 l / min

Výstupní výkon při 4 bar: 118 l / min

Výstupní výkon při 7 bar: 100 l / min

Max. provozní tlak: 8 bar

Počet válců: 1 ks

Objem nádrže: 50 l



#### Všeobecné vlastnosti

Tlakový spínač

Přepravní rukojeť

Pojistný ventil

Sací filtr

Kontrola hladiny oleje

Vypouštěcí šroub pro zkondenzovanou vodu

Velká kola pro snadný transport

Manometr s rychlospojkou pro regulovaný pracovní tlak

Manometr s rychlospojkou pro neregulovaný tlak v láhvi

Redukční ventil

Zpětný ventil

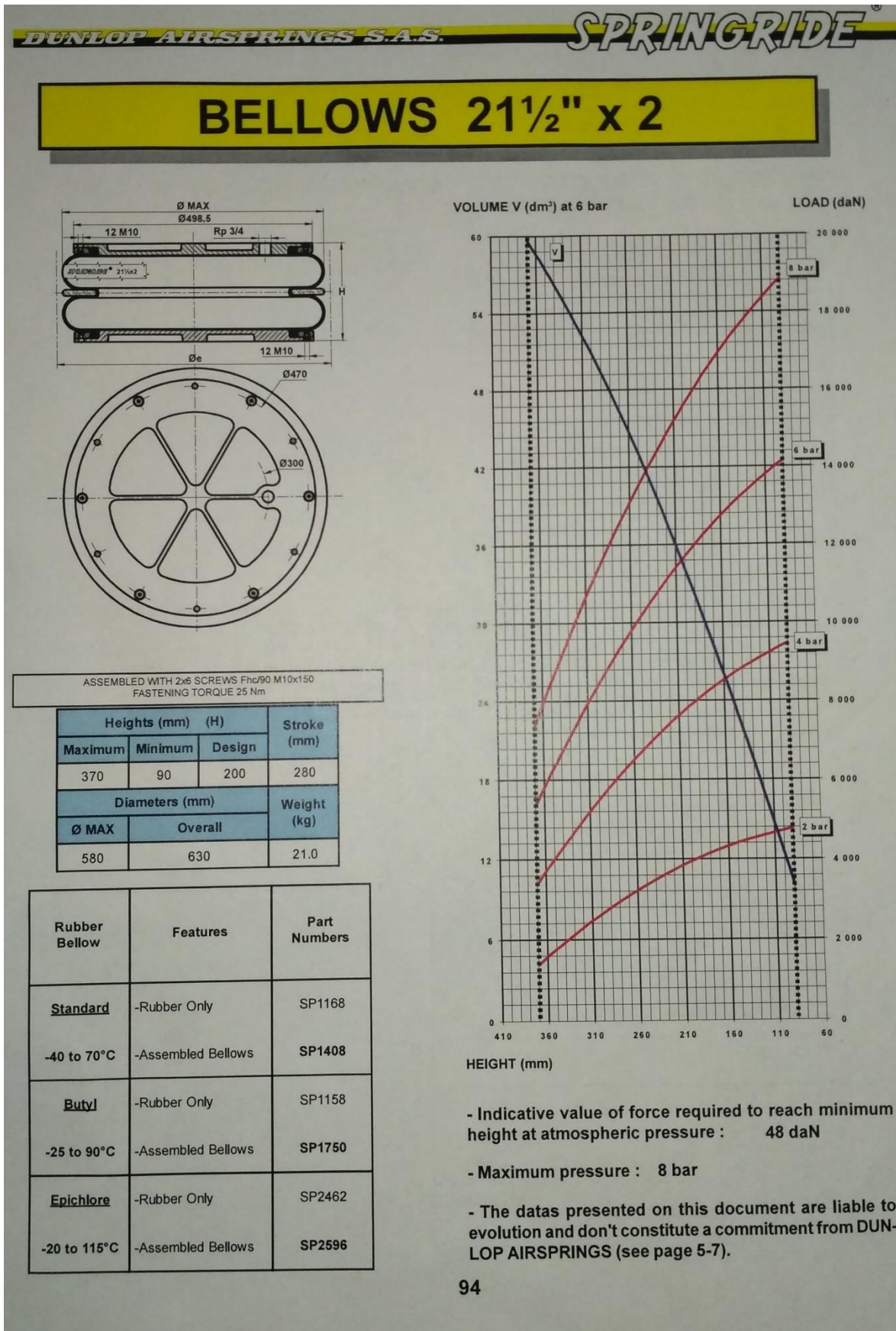
Čerpadlo mazané olejem

Zdroj: <https://www.einhell.cz/x76426/kompresor-bac-230%2F50-bavaria-black>

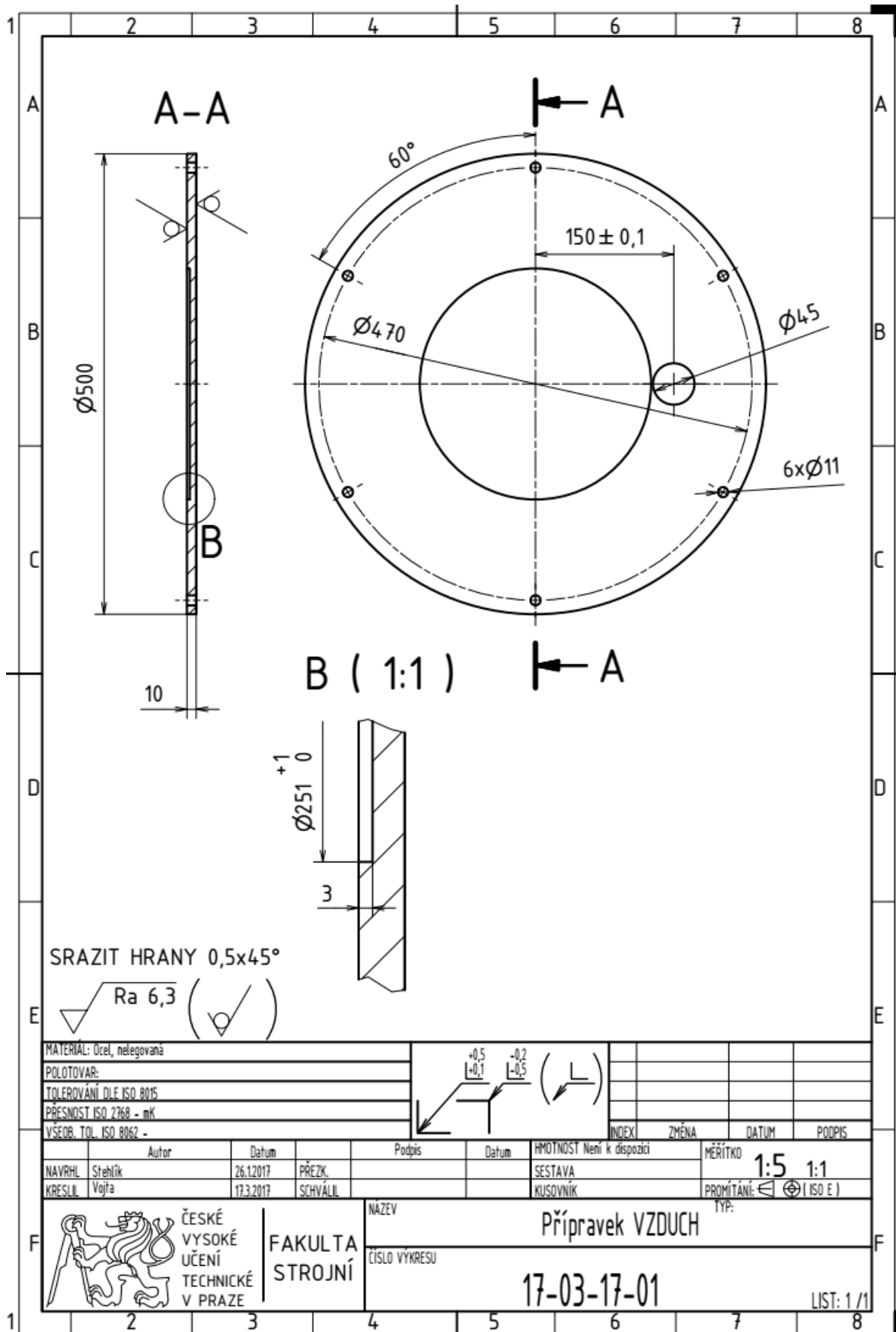
[cit. 2017-05-23]



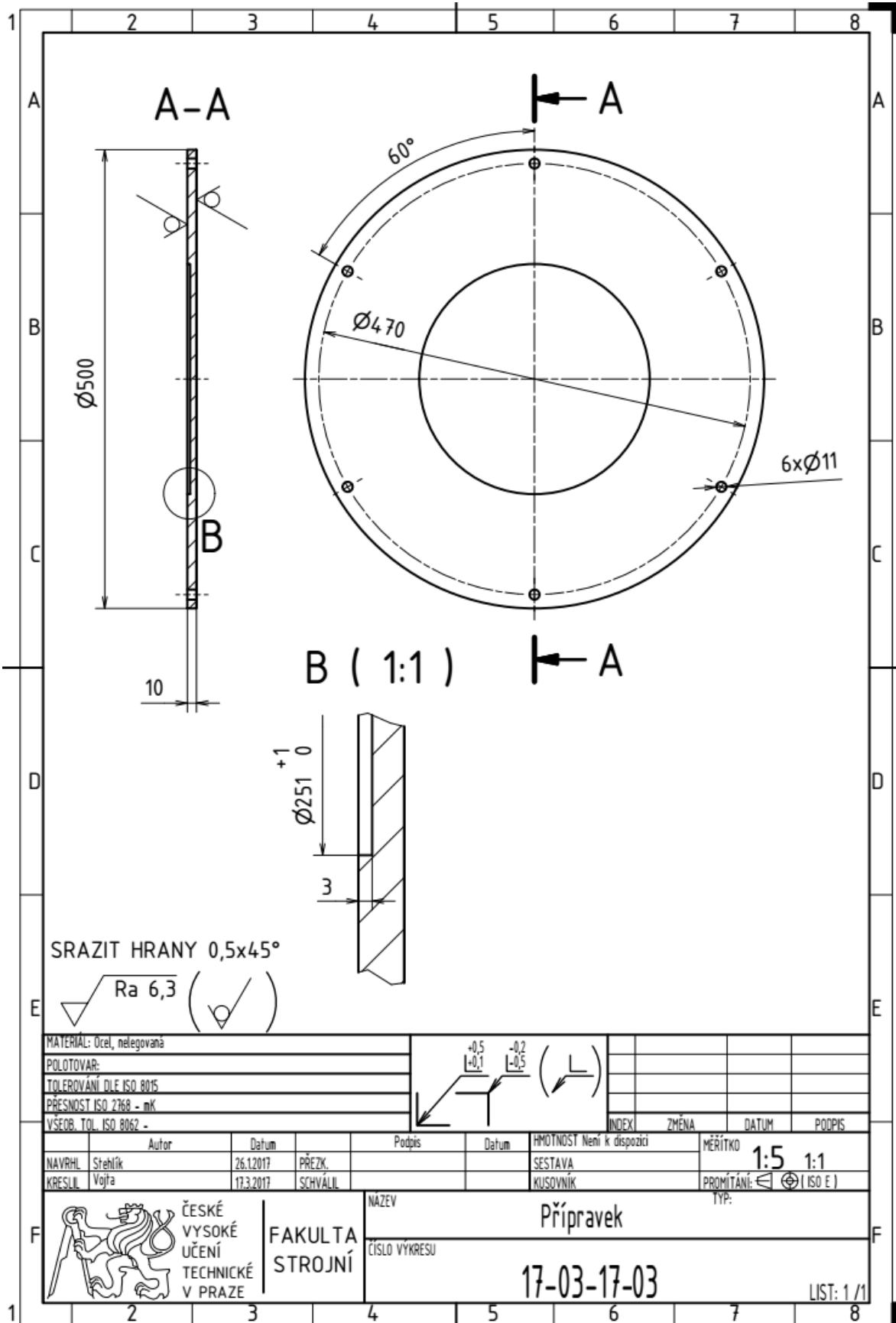
## Příloha č. 3 – Protokol měření Dunlop



### Příloha č. 4 – Výkres přípravku – vzduch. část



### Příloha č. 5 – Výkres přípravku – plná část





## Příloha č. 6 – Protokol o těsnosti měchu 21,5"x1

		<b>ZKOUŠKA TĚSNOSTI VLNOVCŮ</b> (BELLOWS PROOF TEST)		<b>Číslo protokolu</b> (Report No.) : <b>01/2017</b>	
<b>Dimenze (Dimension)</b>		<b>Označení vlnovce č.1</b> (Bellow No.1 date code)		<b>Označení vlnovce č.2</b> (Bellow No.2 date code)	
21,5x1					
<b>Minimální výška</b> (Minimum height)		<b>Statická výška</b> (Static height)		<b>Maximální výška</b> (Maximum height)	
80 mm				180 mm	
<b>Zkušební metodika</b> (Test specification)					
Požadovaný test. tlak (Required test pressure)					
1 MPa					
<b>Specifikace vlnovců</b> (Specification of the bellows) : seriová výroba / batch production					
<b>Důvod zkoušky a požadavky na zkoušku</b> (Reason of the test and the test requirements) : Ověření těsnosti kompletu před měření zátěžových charakteristik.					
<b>Zadal (Applied by) :</b> Říha			<b>Dne (Date) :</b> 15.5.2017		
Vlnovec č.1 (Bellow No.1)	Test.výška $H_{min} + 25mm$ : (Test height $H_{min} + 25mm$ ) : 80 + 25 = 105 mm		Výsledek testu po 30 s : (Test result after 30 sec) : O.K.		
	Test.výška $H_{stat}$ : (Test height $H_{stat}$ ) :		Výsledek testu po 30 s : (Test result after 30 sec) : -----		
	Test.výška $H_{max} - 25mm$ : (Test height $H_{max} - 25mm$ ) : 180 - 25 = 155 mm		Výsledek testu po 30 s : (Test result after 30 sec) : O.K.		
Vlnovec č.2 (Bellow No.2)	Test.výška $H_{min} + 25mm$ : (Test height $H_{min} + 25mm$ ) : 80 + 25 = 105 mm		Výsledek testu po 30 s : (Test result after 30 sec) :		
	Test.výška $H_{stat}$ : (Test height $H_{stat}$ ) :		Výsledek testu po 30 s : (Test result after 30 sec) :		
	Test.výška $H_{max} - 25mm$ : (Test height $H_{max} - 25mm$ ) : 180 - 25 = 155 mm		Výsledek testu po 30 s : (Test result after 30 sec) :		
<b>Zkoušel (Tested by) :</b> Holý <i>Hofl</i>			<b>Dne (Date) :</b> 26.5.2017		
<b>Vyhodnocení zadavatele</b> (Applicant's evaluating) : Při zkoušce nebyl zpozorován únik vody / netěsnost. Vlnovce vyhovují.					
 RUBENA s.s., Akademičtí Bedny 531/0a, Vítkovice 500 03 Hradec Králové iČ: 00012131, DIČ: CZ00012131 SBU Speciální výroba / 03 - vývoj Českých bratří 338, 547 36 Náchod					
<b>Schválil (Approved by) :</b> Říha <i>Pla</i>			<b>Dne (Date) :</b> 29.5.2017		

F-10.001.066



## Příloha č. 7 – Protokol o těsnosti měchu 21,5"x2

		<b>ZKOUŠKA TĚSNOSTI VLNOVCŮ</b> (BELLOWS PROOF TEST)		Číslo protokolu (Report No.) : <b>02/2017</b>	
Dimenze (Dimension)		Označení vlnovce č.1 (Bellow No.1 date code)		Označení vlnovce č.2 (Bellow No.2 date code)	
21,5x2					
Minimální výška (Minimum height)		Statická výška (Static height)		Maximální výška (Maximum height)	
100 mm		300 mm		350 mm	
Zkušební metodika (Test specification)					
Požadovaný test. tlak (Required test pressure)					
1 MPa					
Specifikace vlnovců (Specification of the bellows) : seriová výroba / batch production					
Důvod zkoušky a požadavky na zkoušku (Reason of the test and the test requirements) : Ověření těsnosti kompletu před měření zátěžových charakteristik.					
Zadal (Applied by) : <b>Řiha</b>			Dne (Date) : <b>15.5.2017</b>		
Vlnovec č.1 (Bellow No.1)	Test.výška $H_{min} + 25mm$ : (Test height $H_{min} + 25mm$ ) : $100 + 25 = 125$ mm		Výsledek testu po 30 s : (Test result after 30 sec) : <b>O.K.</b>		
	Test.výška $H_{stat}$ : (Test height $H_{stat}$ ) : <b>300</b> mm		Výsledek testu po 30 s : (Test result after 30 sec) : <b>O.K.</b>		
	Test.výška $H_{max} - 25mm$ : (Test height $H_{max} - 25mm$ ) : $350 - 25 = 325$ mm		Výsledek testu po 30 s : (Test result after 30 sec) : <b>O.K. při 0,9MPa</b>		
Vlnovec č.2 (Bellow No.2)	Test.výška $H_{min} + 25mm$ : (Test height $H_{min} + 25mm$ ) : $100 + 25 = 125$ mm		Výsledek testu po 30 s : (Test result after 30 sec) :		
	Test.výška $H_{stat}$ : (Test height $H_{stat}$ ) : <b>300</b> mm		Výsledek testu po 30 s : (Test result after 30 sec) :		
	Test.výška $H_{max} - 25mm$ : (Test height $H_{max} - 25mm$ ) : $350 - 25 = 325$ mm		Výsledek testu po 30 s : (Test result after 30 sec) :		
Zkoušel (Tested by) : <b>Holý</b>			Dne (Date) : <b>29.5.2017</b>		
Vyhodnocení zadavatele (Applicant's evaluating) : Při zkoušce nebyl zpozorován únik vody / netěsnost. Vlnovce vyhovují.					
 <b>RUBENA s.s., Akademička Bedny 531/8a, Vítkov</b> 500 03 Hradec Králové IČ: 00012131, DIČ: CZ00012131 SBU Speciální výroba / 03 - vývoj Českých bratř 338, 547 36 Náchod					
Schválil (Approved by) : <b>Řiha</b>			Dne (Date) : <b>29.5.2017</b>		

F-10.001.066



## Příloha č. 8 – Dokumenty uložené na CD

CD je přiloženo na deskách práce. CD obsahuje tyto soubory:

- Vybrané fotografie z měření
- Naměřené textové soubory rozříděné ve složkách
- Soubory Excelu s vypracovanými tabulkami a grafy
- Výkresy ve formátu PDF