



**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**F2**

**Fakulta strojní  
Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky**

**Bakalářská práce**

# **Augmentovaný chyt pro lezení na umělé stěně**

**Martin Vltavský**

**2018**



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Vitavský** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **456613**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky**  
Studijní program: **Teoretický základ strojínského inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Augmentovaný chyt pro lezení na umělé stěně**

Název bakalářské práce anglicky:

**Augmented hold for wall climbing**

Pokyny pro vypracování:

1. Rešerše stávajících technických řešení
2. Návrh měření sil a momentů na umělé stěně
3. Pevnostní ověření návrhu
4. Technická dokumentace návrhu

Seznam doporučené literatury:

1. Lechner, Bernhard. (2013). A Climbing Hold With an Integrated Three Dimensional Force Measurement and Wireless Data Acquisition. International Journal of Smart Sensing and Intelligent Systems. 6. 2296.
2. Donath L, Wolf P. (2015) Reliability of Force Application to Instrumented Climbing Holds in Elite Climbers. J Appl Biomech. 2015 Oct;31(5):377-82.
3. Fuss, Franz & Niegl, Günther. (2008). Instrumented climbing holds and performance analysis in sport climbing. Sports Technology. 1. 301-313. 10.1080/19346182.2008.9648487.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

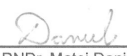
**prof. RNDr. Matej Daniel, Ph.D., odbor biomechaniky FS**

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

Datum zadání bakalářské práce: **19.04.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **17.08.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

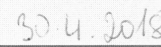
  
prof. RNDr. Matej Daniel, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

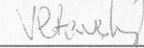
  
prof. Ing. Milan Růžička, CSc.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

  
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

  
Datum převzetí zadání

  
Podpis studenta





## Poděkování / Prohlášení

Rád bych poděkoval panu prof. RNDr. Matěji Danielovi, Ph.D. za cenné rady, vstřícnost při konzultacích a čas, který mi věnoval při psaní této bakalářské práce. Dále děkuji své rodině za morální a materiální podporu během celého studia a svým přátelům za zpříjemnění studia.

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně s použitím literárních pramenů a informací, které cituji a uvádím v seznamu použité literatury a zdrojů informací.

V Praze dne 7.6.2018

.....

## Abstrakt / Abstract

Trendem poslední doby ve sportovní biomechanice je experimentálně zaznamenat výkony sportovců, proto se i v této práci budeme zabývat zdokonalením měřících prostředků ke zlepšení výkonu tím, že zaznameneáme silové účinky při sportovním lezení. Cílem práce je navrhnout měřící soustavu, která bude schopna změřit silové a momentové složky působící na chyt. Na základě tohoto zadání byly navrženy tři návrhy, které jsou v této práci popsány. Jako nejpraktičtější byl vybrán návrh druhý, který se skládá z šestiosého senzoru integrovaného v lezeckém chytu. Návrhy byly pevnostně ověřeny.

**Klíčová slova:** Sportovní lezení, Měření výkonnosti, Konstrukční návrh

The trend of the recent years in the sports biomechanics is to experimentally record sportsman's performances. We have decided to follow up with this concept and made endeavours to apply this idea to one particular sport - climbing. We consequently devote this work to the analysis of the improvement of instruments that measure sports-related force quantities with the aim of enhancing overall performance of athletes, in our case climbers. The primary focus of the thesis is to devise a new measuring unit which will possess the inner ability to measure force and torque components which are exerted on a climbing hold while being used in the act of climbing. On the basis of this assignment there are three designs in total that will be described in detail. The second one has been chosen as the most practical. It consists of the six-axis sensor embedded in the climbing hold. The designs have undergone a structural analysis to confirm their qualities.

**Keywords:** Sports climbing, Performance measurement, Constructional design

## / Obsah

<b>1 Úvod</b> .....	1
<b>2 Stav problematiky</b> .....	2
2.1 Rešerše stávajících technických řešení .....	2
2.1.1 Technická provedení .....	3
2.2 Princip měření sil a momentů ...	5
2.2.1 Měření sil .....	6
2.2.2 Měření momentů .....	10
2.3 Lezecké chyty a stěny .....	12
2.3.1 Lezecké chyty .....	12
2.3.2 Lezecké stěny .....	14
<b>3 Cíle práce</b> .....	17
<b>4 Metody a výsledky</b> .....	18
4.1 1. návrh .....	18
4.1.1 Konstrukční řešení .....	19
4.1.2 Dimenzování .....	21
4.2 2. návrh .....	26
4.2.1 Konstrukční návrh .....	26
4.2.2 Dimenzování .....	27
4.3 3. návrh .....	30
<b>5 Realizace</b> .....	31
5.1 Výroba upraveného chytu .....	31
5.2 Měřicí zařízení .....	32
5.3 Kalibrace .....	33
<b>6 Diskuze</b> .....	34
6.1 Výsledný výběr .....	35
6.1.1 Srovnání se stávajícími řešeními .....	35
<b>7 Závěr</b> .....	36
<b>Literatura</b> .....	37
<b>A Technická dokumentace</b> .....	41

## Tabulky / Obrázky

<b>4.1.</b> Kalibrace senzoru Mini85 .....	19
<b>4.2.</b> Parametry senzoru Mini85 .....	19
<b>4.3.</b> Šroubové spoje .....	20
<b>4.4.</b> Tabulka řešení Mohrova integrálu .....	22
<b>4.5.</b> Tabulka řešení Mohrova integrálu pro bod D .....	23
<b>4.6.</b> Kalibrace senzoru Mini58 .....	26
<b>4.7.</b> Parametry senzoru Mini58 .....	27
<b>4.8.</b> Šroubové spoje – 2. návrh .....	27
<b>5.1.</b> Technická data polyuretanu ...	31
<b>5.2.</b> Přenos dat TWE .....	33
<b>6.1.</b> Hodnocení návrhu .....	34
<b>2.1.</b> Upravené chyty k měření sil .....	4
<b>2.2.</b> Schéma zařízení .....	4
<b>2.3.</b> Boulderingová trasa .....	5
<b>2.4.</b> Odporové tenzometry .....	6
<b>2.5.</b> Různé typy zapojení tenzometrů .....	7
<b>2.6.</b> Plný můstek .....	8
<b>2.7.</b> Zapojení tenzometrů do souhlasného půlmůstku .....	8
<b>2.8.</b> Zapojení tenzometrů do ne-souhlasného půlmůstku .....	8
<b>2.9.</b> Piezoelement .....	10
<b>2.10.</b> Uspořádání měření momentu ..	11
<b>2.11.</b> Tenzometrický snímač momentu .....	12
<b>2.12.</b> Jugs .....	12
<b>2.13.</b> Crimps .....	13
<b>2.14.</b> Slopers .....	13
<b>2.15.</b> Pockets .....	14
<b>2.16.</b> Uložení šroubu v chytu .....	14
<b>2.17.</b> Narážecí matice .....	14
<b>2.18.</b> Nosná konstrukce .....	15
<b>2.19.</b> Lezecká stěna .....	16
<b>4.1.</b> 3D model 1. návrhu .....	18
<b>4.2.</b> Senzor Mini 85 .....	19
<b>4.3.</b> Šroubové spojení .....	20
<b>4.4.</b> Upevnění senzoru .....	20
<b>4.5.</b> Výpočtový model prutu .....	21
<b>4.6.</b> Uvolnění prutu .....	21
<b>4.7.</b> Výpočet deformace v bodě D ..	23
<b>4.8.</b> Obdélníkový průřez .....	24
<b>4.9.</b> Deformace křivého prutu vy-počtené pomocí programu Beam .....	25
<b>4.10.</b> 3D model 2. návrhu .....	26
<b>4.11.</b> Senzor Mini 58 .....	27
<b>4.12.</b> Schématický model uchycení ..	29
<b>4.13.</b> Silová deska .....	30
<b>5.1.</b> Proces odlívání chytu .....	32
<b>5.2.</b> Aplikace síly a momentu na senzor .....	32
<b>5.3.</b> Vnitřní zapojení půlmůstků .....	33
<b>A.1.</b> Výkres senzoru Mini85 .....	41
<b>A.2.</b> Výkres senzoru Mini58-E .....	42
<b>A.3.</b> Ocelový profil .....	43
<b>A.4.</b> Forma na odlitek .....	44

## Seznam použitých symbolů

$a$	Rozměr ocelového profilu ve směru $y$	[mm]
$a_3$	X-ová vzdálenost senzoru k počátku	[mm]
$a_v$	Šířka výbrusu	[mm]
$a_x$	X-ová vzdálenost působíště síly	[mm]
$a_y$	Y-ová vzdálenost působíště síly	[mm]
$a_{z0}$	Poloviční tloušťka silové desky	[mm]
$A$	Plocha průřezu vodiče	[mm <sup>2</sup> ]
$b$	Rozměr ocelového profilu ve směru $z$	[mm]
$b_3$	Y-ová vzdálenost senzoru k počátku	[mm]
$b_v$	Výška výbrusu	[mm]
$c$	Rozměr ocelového profilu ve směru $y$	[mm]
$C$	Kapacita snímače	[F]
$d_2$	Střední průměr závitu	[mm]
$d_3$	Malý průměr závitu	[mm]
$d_e$	Vzdálenost elektrod	[m]
$d_p$	Piezoelektrická konstanta	[C.N <sup>-1</sup> ]
$D$	Průměr podložky	[mm]
$D_2$	Střední průměr závitu díry	[mm]
$D_3$	Malý průměr závitu díry	[mm]
$e$	Vzdálenost zatížení k ocelovému profilu	[mm]
$E$	Modul pružnosti v tahu	[N.mm <sup>2</sup> ]
$f$	Součinitel tření pro závity	[-]
$f_M$	Součinitel tření matice	[-]
$F$	Zátěžná síla	[N]
$F_x$	Síla působící na výbrus křemene ve směru elektrické osy	[N]
$F_y$	Síla působící na výbrus křemene ve směru mechanické osy	[N]
$F_R$	Reakční síla	[N]
$F_x$	Síla ve směru $x$	[N]
$F_y$	Síla ve směru $y$	[N]
$F_z$	Síla ve směru $z$	[N]
$F_{xy}^o$	Osové silové zatížení v rovině $xy$	[N]
$F_z^o$	Osové silové zatížení v ose $z$	[N]
$g$	Tíhové zrychlení	[m.s <sup>-2</sup> ]
$G$	Modul pružnosti ve smyku	[N.m <sup>-2</sup> ]
$h_2$	Výška matice	[mm]
$H$	Vzdálenost osy senzoru k poloviční výšce chytu	[mm]
$H_A$	Horizontální síla v bodě A	[N]

$i$	Počet chodů	[—]
$J_P$	Polární moment setrvačnosti	[m <sup>4</sup> ]
$J_z$	Osový kvadratický moment	[mm <sup>4</sup> ]
$k$	Koeficient bezpečnosti	[—]
$K$	Součinitel deformační citlivosti	[—]
$K_x$	Tuhost ve směru x	[N.m <sup>-1</sup> ]
$K_y$	Tuhost ve směru y	[N.m <sup>-1</sup> ]
$K_z$	Tuhost ve směru z	[N.m <sup>-1</sup> ]
$K_{tx}$	Tuhost natočení ve směru x	[N.m.rad <sup>-1</sup> ]
$K_{ty}$	Tuhost natočení ve směru y	[N.m.rad <sup>-1</sup> ]
$K_{tz}$	Tuhost natočení ve směru z	[N.m.rad <sup>-1</sup> ]
$l$	Délka drátku tenzometru	[mm]
$l_v$	Délka vodiče	[mm]
$\Delta l$	Prodloužení drátku	[mm]
$L$	Délka strany	[mm]
$L_{\varphi_D}$	Maximální délka z podmínky natočení	[mm]
$L_{v_D}$	Maximální délka z podmínky posunutí	[mm]
$L_P$	délka páky	[m]
$M$	Moment	[N.mm]
$M_A$	Moment v bodě A	[N.mm]
$M_k$	Kroutící moment	[N.m]
$M_{k_K}$	Kroutící moment od klíče	[N.mm]
$M_{k_M}$	Kroutící moment od tření matice	[N.mm]
$M_{k_Z}$	Kroutící moment závitu	[N.mm]
$M_m$	Měřený moment	[N.m]
$M_x$	Moment ve směru x	[N.m]
$M_y$	Moment ve směru y	[N.m]
$M_z$	Moment ve směru z	[N.m]
$M_{xy}^o$	Osové momentové zatížení v rovině xy	[N.m]
$M_z^o$	Osové momentové zatížení v ose z	[N.m]
$n$	Počet kusů	[ks]
$P$	Rozteč	[mm]
$Q$	Osamělá síla	[N]
$Q_0$	Předpětí	[N]
$Q_e$	Náboj na elektrodách	[C]
$r_h$	Poloměr hřídele	[m]
$R$	Elektrický odpor	[Ω]
$\delta R$	Změna odporu tenzometrů	[mm]
$\Delta R$	Změna elektrického odporu	[Ω]
$R_1$	Elektrický odpor na rezistoru 1	[Ω]

$R_2$	Elektrický odpor na rezistoru 2	$[\Omega]$
$R_3$	Elektrický odpor na rezistoru 3	$[\Omega]$
$R_4$	Elektrický odpor na rezistoru 4	$[\Omega]$
$R_o$	Odpor nezatíženého rezistoru	$[\text{mm}]$
$s$	Vzdálenost levé strany senzoru k pravé straně desky	$[\text{mm}]$
$S_2$	Šířka senzoru Mini58-E	$[\text{mm}]$
$S_3$	Plocha průřezu malého průměru závitu	$[\text{mm}^{-2}]$
$S_e$	Společná plocha elektrod	$[\text{m}^2]$
$S_a$	Koeficient tenzometru	$[\text{mm}]$
$t$	Tloušťka strany	$[\text{mm}]$
$u_A$	Horizontální posunutí v bodě A	$[\text{mm}]$
$v_c$	Velikost vůle	$[\text{mm}]$
$v_A$	Vertikální posunutí v bodě A	$[\text{mm}]$
$v_D$	Dovolené vertikální posunutí v bodě A	$[\text{mm}]$
$v_{max}$	Maximální vertikální posunutí v bodě A	$[\text{mm}]$
$v_{min}$	Minimální velikost vůle	$[\text{mm}]$
$V_A$	Vertikální síla v bodě A	$[\text{N}]$
$W_{k3}$	Průřezový modul v krutu malého průměru	$[\text{mm}^3]$
$\alpha$	Koeficient H.M.H teorie	$[-]$
$\beta$	Úhel boku závitu	$[\circ]$
$\gamma$	Úhel stoupání	$[\text{rad}]$
$\varepsilon$	Poměrné prodloužení	$[-]$
$\varepsilon_d$	Permitivita dielektrika (prostředí)	$[\text{F} \cdot \text{m}^{-1}]$
$\rho$	Měrný odpor materiálu vodiče	$[\Omega \cdot \text{mm}]$
$\rho_M$	Třecí poloměr matice	$[\text{mm}]$
$\sigma$	Napětí působící na nosníky	$[\text{MPa}]$
$\sigma_{K_t}$	Napětí na mezi kluzu tahové	$[\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}]$
$\sigma_{red}$	Redukované napětí	$[\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}]$
$\sigma_{red_{max}}$	Maximální redukované napětí	$[\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}]$
$\sigma_t$	Tahové napětí	$[\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}]$
$\tau$	Smykové napětí	$[\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}]$
$\tau_D$	Dovolené smykové napětí	$[\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}]$
$\varphi'$	Redukovaný úhel tření	$[\text{rad}]$
$\varphi_A$	Natočení v bodě A	$[\text{rad}]$
$\varphi_D$	Dovolené natočení v bodě A	$[\text{rad}]$
$\varphi_{max}$	Maximální natočení v bodě A	$[\circ]$

## Seznam použitých zkratek

COM	■	Center of mass
COP	■	Center of pressure
H.M.H.	■	Huber, von Mises, Hencky
IOC	■	International Olympic Comitee
MKP	■	Metoda konečných prvků
OS	■	On sight
PC	■	Polykarbonát
RP	■	Red point
TWE	■	F/T Transducer without Electronics
UIIA	■	Union Internationale des Associations D'Alpinisme



# Kapitola 1

## Úvod

Dříve bylo lezení nenápadným sportem, kterému se věnovalo profesionálně pár jedinců a veřejnost jej vnímala spíše jako koníček než soutěžní sport. V současné době se sportovní lezení zařadilo mezi populární sporty a divácky natolik oblíbené, že si vydobylo účast na Letních olympijských hrách v Tokiu.

Závody probíhají na umělé stěně ve třech disciplínách – lezení na obtížnost, lezení na rychlost a bouldering. Aby závodník mohl dosáhnout co nejlepšího umístění, je zapotřebí tréninku a tréninkových pomůcek, které mu vyhodnotí, v jaké oblasti má své přednosti či nedostatky a na čem dále zapracovat. Proto je snaha o zdokonalení popisu pohybu lezce pomocí fyzikálních veličin, ať už se jedná o analýzu dynamickou či kinematickou.

Jednou z metod dynamické analýzy je měření síly, kterou lezec musí vyvinout, aby daný chyt překonal, měření momentu a případně i zjištění časového úseku, po kterou na chyt působil. Tyto informace můžou lezci případně trenérovi pomoci se sestavováním tréninku. Doposud bylo možné zaznamenat sílu pouze v jednom směru. V současné době nejsou na trhu dostupná zařízení, která by umožňovala měření výkonů lezce, jež by navíc poskytovala informace o síle ve zbylých dvou směrech a současně i momentu ve střezech směrech. V následujících stránkách se touto problematikou budeme zabývat.

## Kapitola 2

### Stav problematiky

V této kapitole se blíže seznámíme s možnými technickými řešeními měření sil na lezecké stěně. Výchozím bodem pro naše návrhy byly tyto dvě publikace: *F.K.FUSS a G.NIEGL. (2008)* a *L.DONATH a P.WOLF. (2015)*, z nichž jsme se nechali inspirovat jejími konstrukčními návrhy, které jsme upravili tak, aby vyhovovaly našim požadavkům. Další část se zabývá principy měření sil a momentů. V poslední části této kapitoly se zmíníme o typech lezeckých chytů a jejich výrobě a o konstrukci lezecké stěny.

### 2.1 Rešerše stávajících technických řešení

V posledním desetiletí se sportovní lezení zařadilo mezi nejpobulárnější druh volného lezení, především kvůli tomu, že už nezáleží na geografické lokaci, ale že se z primárně venkovního sportu stal i sport vnitřní. Profesionální pole se natolik rozšířilo, že Mezinárodní olympijský výbor IOC schválil přijetí sportovního lezení mezi olympijské sporty a svoji premiéru si odbude na Letních olympijských hrách v Tokiu v roce 2020. [1]

Výkon lezce je obvykle vyjádřen pomocí stupnice obtížnosti výstupu či cesty. Mezi tyto stupnice patří například stupnice UIAA (Mezinárodní svaz horolezeckých asociací) nebo v současné době pravděpodobně nejpoužívanější Francouzská stupnice. Při hodnocení horolezeckého výkonu se zvažuje, zda lze určitý způsob obtížnosti zvládnout při prvním pokusu nebo až po několika zkouškách, které jsou označovány jako *on sight* (OS) a *red point* (RP). Stejně jako u jiných sportovních odvětví je i ve sportovním lezení snaha o zdokonalení kvantifikovatelnosti výkonu. Jedna z možností je dynamická a kinematická analýza. [2]

Kinematická analýza byla provedena Kauerem a spol.<sup>1</sup> Byla měřena vzdálenost mezi stěnou a těžištěm (COM) lezce. Z obecné zkušenosti vyplývá, že čím menší je vzdálenost, tím lepší je lezec.

Dynamickou analýzou se mimo jiné zabývali pánové Franz Konstantin Fuss a Günther Niegl z University of Adelaide v Austrálii nebo pánové Lars Donath z University of Basel a Peter Wolf z ETH Zurich ve Švýcarsku. Jejich technická provedení si popíšeme v podkapitole 2.1.1

První jmenovaní publikovali článek nazvaný *Instrumented climbing holds and performance analysis in sport climbing* (z angl. přeloženo Upravené lezecké chyty a výkonostní analýza ve sportovním lezení). Cílem jejich studie bylo prozkoumat a definovat výkonostní parametry sportovního lezení tím, že vizualizovali síly na chytu. Celkem byly prováděny tři experimenty při různých závodních příležitostech (National Climbing Championship, sport climbing world cup, předzávodní trénink). Výsledným zjištěním bylo, že čím je lezec zkušenější, tím použije menší kontaktní sílu, kratší kontaktní čas a menší impuls. A dále čím vyšší je součinitel tření, tím je spojitější pohyb COP (v konkrétních chytech). [3]

<sup>1</sup> Kauer B., Gebert W., Werner I. – Three-dimensional analysis of rockclimbing techniques

Druzí jmenovaní napsali publikaci nazvanou *Reliability of Force Application to Instrumented Climbing Holds In Elite Climbers* (z angl. přeloženo Spolehlivost působení síly na upravený lezecký chyt pro elitní lezce). Jejich studie vyhodnocuje absolutní a relativní mezi-zkušební spolehlivost bez a s předchozím obeznámením se cestou. Vícesloživé silové senzory byly aplikovány pro měření interakcí sil během dynamických pohybů. Při interpretaci interakčních sil je třeba kvantifikovat minimální zjištělé změny, typické chyby a variační koeficienty souvisejících ukazatelů výkonu. Jedenáct švýcarských elitních horolezců (5 žen, 6 mužů) bylo testováno během dvou opakujících se stoupacích sekvencí. Experimenty byly prováděny na boulderové stěně, kde se analyzovala kontaktní doba, maximální výsledná síla, střední výsledná síla, impuls a počet změn zatížení. Výsledným poznatkem bylo, že upravené chyty různého tvaru poskytují přijatelnou absolutní a relativní spolehlivost, přičemž při opakovaných pokusech lezení se většina opatření spolehlivosti zlepšila. [4]

### 2.1.1 Technická provedení

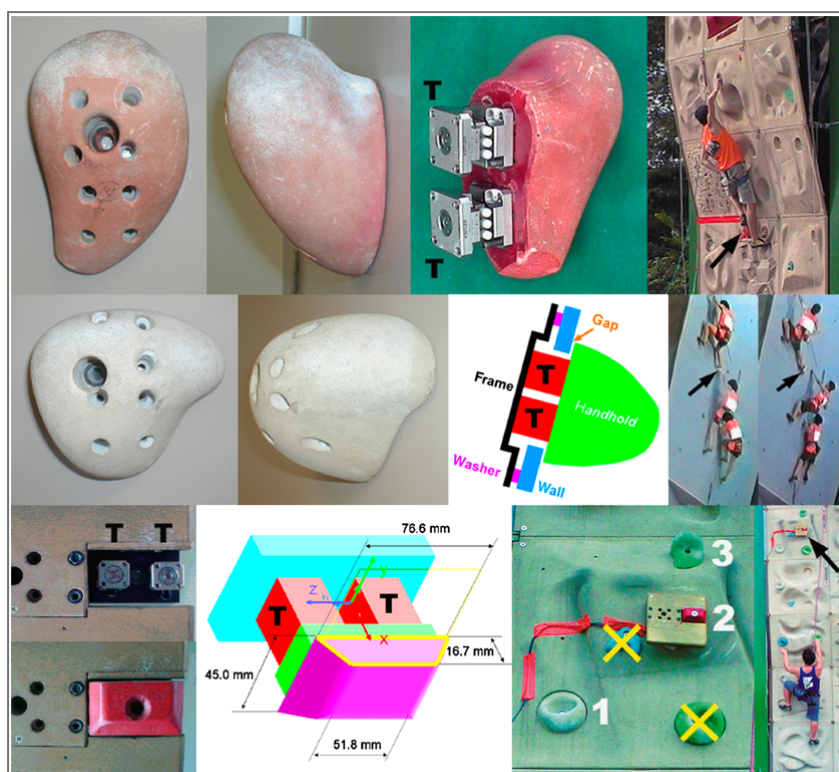
V publikaci *F.K.FUSS a G.NIEGL. (2008)* byly použity pro měření síly na všech upravených chytch dva silové senzory Kistler na chyt (typ 9327 a typ 9317). Senzory byly umístěny mezi stěnu a chyt. Datová vzorkovací frekvence byla 200 Hz v prvním měření a 100 Hz v posledních dvou měření. Hardwarové vybavení se skládalo ze zesilovače (DAQ-5040A23; DE-WETRON, Graz, Austria), z A/D převodníku (National Instruments, Austin TX, USA) a laptopu. Data byla sbírána pomocí DASyLab 5.6 od Datalogu (Munich, Germany). Silový senzor vyhodnocuje sílu podle tří os souřadného systému. Souřadným systémem byl zvolen kartézský systém se třemi osami: x – ven ze stěny, y – nahoru (ve směru pohybu lezce) a z – ve směru levé ruky lezce. Silové senzory byly zarovnané podle osy y. Toto zarovnání umožnilo vypočítání momentu okolo osy z a střed tlaku (COP – počátek vektorové síly) v rovině xy na povrchu chytu. Počátek souřadného systému chytů byl umístěn na střed horní plochy horního převodníku. Na obrázku 2.1 jsou zobrazeny tvary chytu, silové senzory (T) a pozice chytů.

V prvním experimentu byly silové senzory přímo zašroubovány do lezecké stěny. V druhém experimentu byl použit ocelový můstek mezi silové senzory a stěnou. Ve třetím experimentu byla mezi lezeckou stěnu a silové senzory vložena ocelová deska a dřevěné prkno. [3]

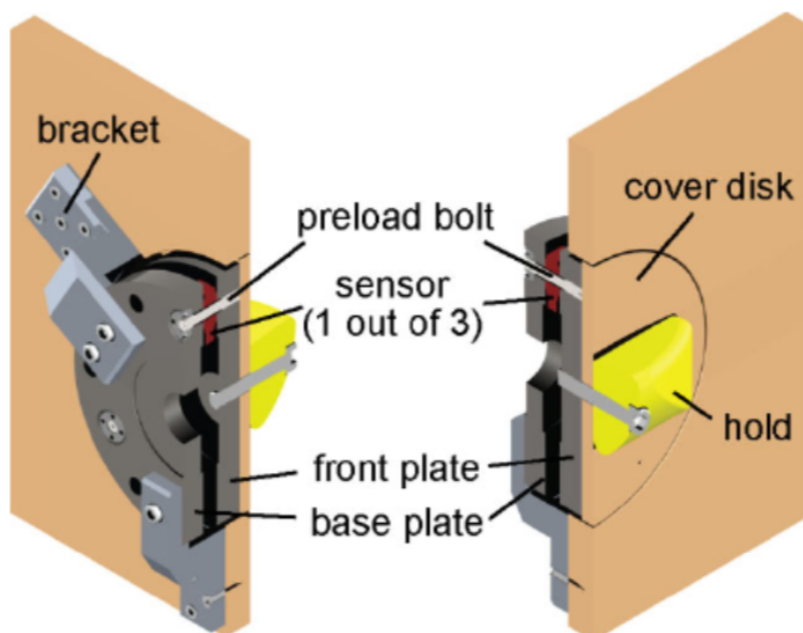
V publikaci *L.DONATH a P.WOLF. (2015)* se přístroje skládaly ze tří piezoelektrických silových senzorů (9251, Kistler AG, Switzerland), které byly schopny měřit síly v rozsahu  $\pm 7,5$  kN v rovině lezecké stěny a  $\pm 15,0$  kN kolmo ke stěně. Signál ze senzoru byl přiváděn k počítači pomocí EtherCat konektoru (EK1100, Beckhoff AG, Germany) a zesílen (amplifier 5073A, Kistler AG, Switzerland) a digitalizován pomocí A/D převodníku (EL3008, Beckhoff AG, Germany).

Senzory byly umístěny mezi dva ocelové plechy. Přední ocelový plech byl překryt dřevěným ochranným diskem, který byl potažený vrstvou hmoty, používané jako povrch stěny. Pomocí tří hliníkových držáků byl zadní plech připojen k zadní části lezecké stěny. Schéma můžeme vidět na obrázku 2.2. Ocelové plechy měřily v průměru 154 mm a byly široké 15 mm. Šrouby byly utažené s předpětím 15 kN.

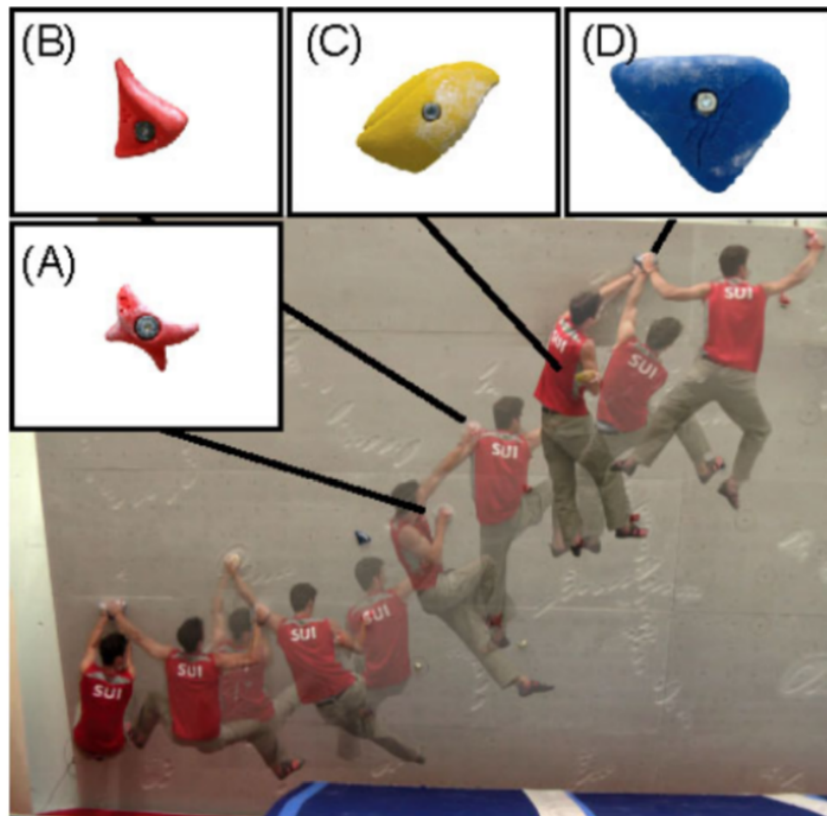
Čtyři měřené chyty (dva crimps, jeden undercling a jedna oblina) byly připojeny pomocí šroubů M10 k boulderové stěně, která se nacházela ve sportovní hale ETH Zurich. Chyty byly částí jedné boulderové cesty, skládající se z přibližně 12 pohybů. Umístění chytů na cestě je zobrazeno na obrázku 2.3. [4]



**Obrázek 2.1.** Upravené chyty k měření sil: Experiment 1 – dolní chyt; Experiment 2 – střední chyt; Experiment 3 – horní chyt [3]



**Obrázek 2.2.** Schéma zařízení [4]



**Obrázek 2.3.** Boulderingská trasa. Byly použity dva typy crimp (A a B), jeden typu undercling (C) a jeden typu slopers (D) [4]

## 2.2 Princip měření sil a momentů

Síla a moment jsou důležité mechanické veličiny, které je nutno v mnoha aplikacích umět změřit. Některé z nich jsou uvedeny níže.

### ■ Měření síly

- Hmotnost objektu
- Studium chování materiálů při různých typech zatížení
- Napěťová analýza
- Zbytková pnutí

### ■ Měření momentu

- Studie na konstrukčním prvku v torzi

Jak je zřejmé z výše uvedeného seznamu, měření síly a momentu je zapojeno do dynamických systémů a proto pokrývá velmi širokou škálu technických aplikací. Další oblasti, v nichž jsou tyto veličiny taky využívány, jsou biologické aplikace, sportovní medicína, ergonomie nebo určování mechanických vlastností materiálů. Snímače síly a momentu využívají deformační účinky síly na objekt.

Jelikož nás bude zajímat dynamika lezce, budeme potřebovat senzor, který změří sílu i moment. Seznámením se s dostupnými způsoby měření sil a momentů zajistíme, že pro náš návrh navrhne adekvátní typ senzoru, který bude splňovat naše zadané požadavky. [5]



### 2.2.1 Měření sil

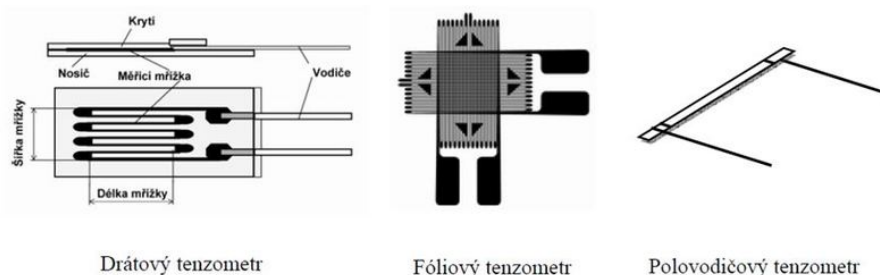
Síla je vektorová veličina, která udává vzájemné působení těles nebo polí. Je definovaná druhým Newtonovým zákonem, zvaným zákon síly. *Časová změna (tj. změna podle času) hybnosti tělesa je přímo úměrná výslednici všech sil na těleso působících a má s ní stejný směr.* [6]

Snímače sil je možné dělit podle interakce síly.

- síla způsobuje deformaci pružného členu, který může být ve tvaru vetknutého nosníku, válce nebo pružného rámu (paralelogramu). Vyhodnocuje se ohyb, tah, tlak, smyk nebo krut.
- síla vlivem deformace způsobuje změnu parametrů měřicího členu – u piezoelektrických snímačů to je změna náboje, u magnetických snímačů fyzikální vlastnosti (indukčnost, permeabilita, magnetický indukční tok).

Měřit sílu dokážeme několika způsoby. Mezi ně patří například použití tenzometrů, induktivní a kapacitní systémy, nebo senzory založené na piezoelektrickém jevu. V následujícím textu si přiblížíme jejich principy.

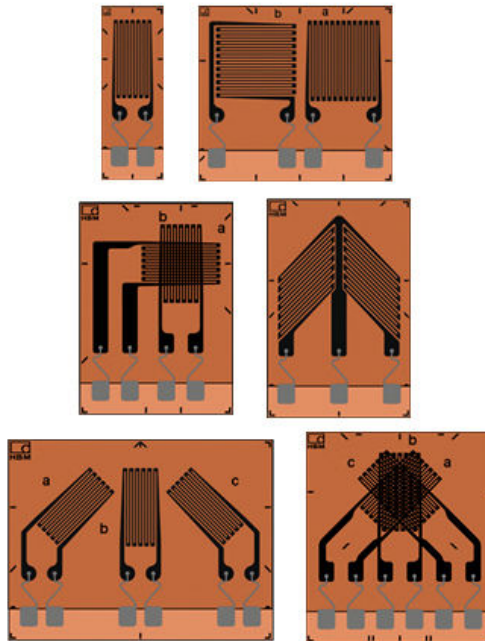
Jedním z nejpoužívanějších senzorů pro měření sil jsou **odporové tenzometry**. Tenzometry dělíme do dvou druhů podle materiálu na kovové a polovodičové a podle tvaru na jednoosé, tenzometrické kříže a tenzometrické růžice. Kovové tenzometry se mohou dále dělit na drátkové a foliové, ale jejich principy měření jsou stejné, liší se pouze v tom, jak vypadá základní materiál, který mění elektrický odpor. Na obrázku 2.4 můžeme vidět zmíněné typy tenzometrů.



**Obrázek 2.4.** Odporové tenzometry [7]

**Kovové tenzometry** jsou nejpožívanější tenzometry, protože mají spoustu výhod. Zprv je lineární v rozsahu napětí, ve kterém budeme měřit a zadruhé nemají takovou teplotní závislost jako polovodičové tenzometry. Tedy drtivá většina aplikací používá kovové tenzometry, ať už jsou drátkové nebo foliové. Kovové tenzometry se skládají z několika součástí. Základním materiálem (nosič) – to, co nainstalujeme na daný objekt – obvykle bývá papír nebo třeba kapton, čili látky, které se dobře lepí na deformační člen a mají dobré vlastnosti z důvodů životnosti tenzometru. Další komponentou tenzometru je měřicí mřížka, která je udělaná z konstantanu. Konstantan je slitina mědi a niklu. Měřicí mřížka je místo, kde dochází ke změnám elektrického odporu, které chceme vyhodnotit.

Tenzometr měří v jednom směru. Snažíme se, aby citlivost v daném směru byla co největší a v kolmém co nejmenší. Pokud potřebujeme měřit ve více směrech, nebo zjistit směry hlavních napětí, musíme použít tenzometrické růžice. Pokud směry hlavních napětí známe, postačí nám tenzometrický kříž, kde jsou instalovány dva tenzometry svírající úhel 90°. Pokud směry hlavních napětí neznáme, musíme použít tenzometrickou



**Obrázek 2.5.** Různé typy zapojení tenzometrů [8]

růžici, kde jsou tři tenzometry vůči sobě natočeny o  $45^\circ$ . Různé instalace tenzometrů můžeme vidět na obrázku 2.5

Základní charakteristikou tenzometrů je, že neměří sílu přímo, ale zprostředkovaně přes deformaci. Princip tenzometru je změna elektrického odporu vodiče, pokud se mění rozměry toho vodiče (např. u drátkového tenzometru se mění délka a průřez). Vzhledem k malým rozměrům tenzometru omezíme deformaci způsobenou tahem nebo tlakem pouze v mezích Hookova zákona. Zajímá nás tedy závislost mezi změnou elektrického odporu na prodloužení ze vztahu (2.1)

$$\frac{\Delta R}{R} = K \cdot \varepsilon \quad (2.1)$$

kde  $\varepsilon$  je poměrné prodloužení definované rovnicí (2.2),  $R$  je elektrický odpor daný rovnicí (2.3) a  $K$  je součinitel deformační citlivosti vodiče, který pro kovové tenzometry z konstantanu je  $K > 2,1$ .

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (2.2)$$

$$R = \rho \cdot \frac{l_v}{A} \quad (2.3)$$

Při běžném rozsahu měření ( $\varepsilon = 10^{-5}$  až  $10^{-3}$ ) a při použití kovových tenzometrů se odporové změny pohybují v rozsahu jednotek až stovek  $m\Omega$ . Abychom takto malé změny zaregistrovali, potřebujeme velmi stabilní a citlivé elektronické obvody. Jako vstupní obvod je používán nejčastěji Wheatstonův můstek, napájený stejnosměrným, lépe však střídavým napětím. Základní odpor tenzometru je  $120 \Omega$  pro teplotu  $23^\circ$ .

Odpor u všech tenzometrů je teplotně závislý. Vliv teploty je podstatně větší u polovodičových než kovových tenzometrů a je hůře kompenzovatelný. Je tedy nutná teplotní

kompenzace. Jednou z možností je použití samokompenzačního tenzometru. Je to tenzometr, který má na stejné podložce v sérii s měřicím vinutím zapojené vinutí s opačnou teplotní charakteristikou. Výsledná odporová změna při této kombinaci by měla být rovna nule, to však platí jen pro určitý, výrobcem daný rozsah teplot.

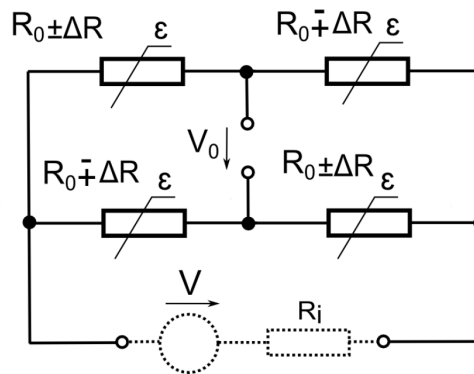
Pro nejčastěji používanou teplotní kompenzaci je vhodné zapojení měřicích a kompenzačních tenzometrů v můstku. Existují čtyři druhy zapojení můstků:

- čtvrtmůstek
- půlmůstek – souhlasné namáhání
- půlmůstek – nesouhlasné namáhání
- plný můstek

Pro teplotní kompenzaci používáme tenzometry nainstalované tak, aby neměřili deformaci, kterou měří měřící tenzometry, ale aby měly stejnou teplotu. Rozmístění tenzometrů se řídí podle podmínky rovnováhy (2.4):

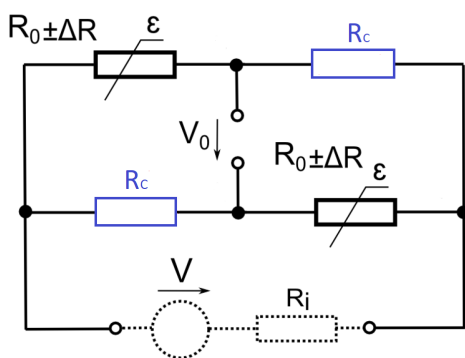
$$R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3 \quad (2.4)$$

kde  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  a  $R_4$  značí jednotlivé rezistory.

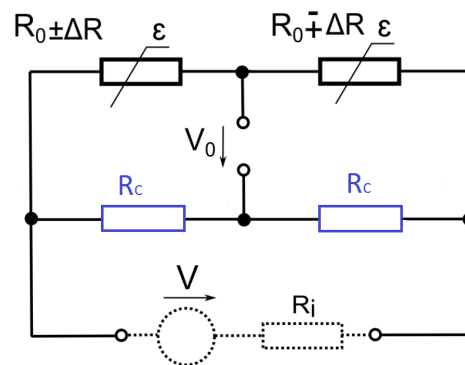


**Obrázek 2.6.** Plný můstek [9]

Nejúčinnější zapojení je plný můstek (viz obrázek 2.6), kdy se vliv teploty na výstupním napětí  $\Delta U$  neprojeví. Zapojením čtyř kompenzačních tenzometrů, z nichž dva musí být namáhány na tlak a dva na tah, se zvýší citlivost na čtyřnásobek.



**Obrázek 2.7.** Zapojení tenzometrů do souhlasného půlmůstku [9]



**Obrázek 2.8.** Zapojení tenzometrů do nesouhlasného půlmůstku [9]



Další možností zapojení je do půlmůstku, kde jsou použity dva měřicí tenzometry a dva kompenzační tenzometry. Podle umístění dvou měřících tenzometrů se půlmůstek následně rozlišuje na souhlasný nebo nesouhlasný. Souhlasný znamená, že oba měřicí tenzometry měří buď tlak nebo tah a nesouhlasný znamená, že jeden měří tah a druhý tlak. Zapojení do souhlasného respektive nesouhlasného půlmůstku je zobrazeno na obrázku 2.7 respektive 2.8. Barevně jsou znázorněny kompenzační tenzometry.

Druhým typem odporového tenzometru je **polovodičový tenzometr**. Jeho velkou výhodou je vysoká citlivost ( $K > 100$ ), která je přibližně 25x větší než u kovových tenzometrů. Naopak nevýhodou polovodičového tenzometru je nelineární závislost odporu na poměrném prodloužení  $R = f(\varepsilon)$  a na teplotě  $R = f(t)$ , která je až 75x větší.

Pokud chceme měřit deformace na objektu, kam nemůžeme nainstalovat tenzometry, je nutno použít deformační člen. Pro střední síly se používají deformační členy typu S. Pro měření malé síly se používá deformační člen typu vetknutý nosník. Pokud chceme měřit velké síly, dá se použít sloupcový deformační člen, který měří pouze tlak. [10] [9] [11]

Další možností měření síly je pomocí **piezoelektrického jevu**, který převádí sílu na elektrický signál. Je to fyzikální jev, při němž deformace krystalu některých dialektrických látek způsobí dipólový elektrický moment objemového elementu. Elektrické momenty všech objemových elementů způsobí polarizaci krystalu. Hodnota elektrické polarizace je číselně rovna fiktivnímu vázanému náboji na jednotkové ploše povrchu, který je kolmý ke směru vektoru polarizace. Po přiložení elektrod k povrchu krystalu vzniknou indukci na těchto vodivých elektrodách volné náboje.

Piezoelektrický jev objevili v roce 1880 Pierre a Jacques Curie a v současné době se široce využívá v laboratořích pro přesné měření záznamu dynamických změn mechanických veličin jako je síla, tlak nebo zrychlení.

Piezoelektrické měřicí systémy jsou aktivní elektrické systémy. To znamená, že krystaly produkují elektrický výkon pouze tehdy, když zaznamenávají změnu zatížení. Z tohoto důvodu nemohou provádět skutečná statická měření. Můžou však nabídnout vynikající kvazistatické měřicí schopnosti. Pokud experiment vyžaduje měření statických sil, je nutné použít nábojový zesilovač.

Piezoelektrické snímače se sestávají v podstatě z tenkých desek nebo desek řezaných v přesné orientaci na krystalové osy, které jsou citlivé na zatížení buď stlačováním nebo stříháním. Jemně překryté křemenné prvky se sestavují buď jednotlivě, nebo ve stohu. Křemenný obal generuje signál nabíjení, který je přímo úměrný trvalé síle. Každý typ měniče používá křemennou konfiguraci, která je optimalizována a nakonec kalibrována pro konkrétní aplikaci (síla, tlak, zrychlení nebo deformace). [12]

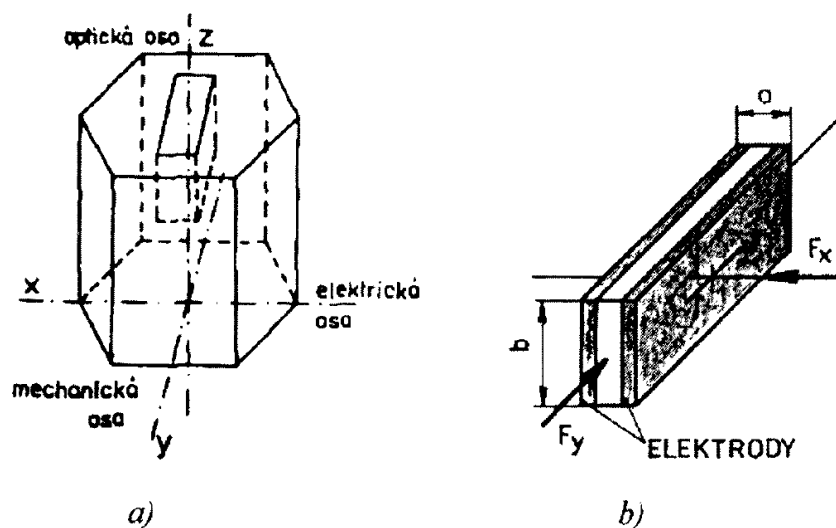
Na obrázku 2.9 můžeme vidět vyříznutý kus krystalu z křemene, jehož podélná osa souhlasí s mechanickou a příčná osa s elektrickou. Působí-li síla  $F_x$  ve směru elektrické osy, pak se na elektrodách objeví náboj o velikosti:

$$Q_e = d \cdot F_x \quad (2.5)$$

kde  $Q_e$  je náboj na elektrodách [C],  $d_p$  je piezoelektrická konstanta [ $C \cdot N^{-1}$ ] a  $F_x$  je síla působící na výbrus krystalu [N]. Působí-li síla ve směru mechanické osy krystalu, pak pro velikost náboje  $Q$  platí rovnice:

$$Q_e = d_p \cdot F_y \cdot \frac{b_v}{a_v} \quad (2.6)$$

Jako piezoelektrického materiálu se používaly krystaly křemene. Pro oxid křemičitý  $SiO_2$  je piezoelektrická konstanta rovna  $d_p = 2,3 \cdot 10^{-12} C \cdot N^{-1}$ . Nověji se využívá dal-



**Obrázek 2.9.** Piezoelement – a) krystal křemene, b) výbrus [10]

ších materiálů podobných vlastností – piezoelektrická keramika (titaničitan olovnatý  $\text{PbTiO}_3$ , zirkonát olova  $\text{PbZrO}_3$ , titaničitan barnatý  $\text{BaTiO}_3$  a niobáty) nebo polyvinylidenfluorid ( $\text{PVDF}_2$ ) apod. Výhodou je malý rozměr čidla, který je konstrukčně velmi jednoduchý, nevýhodou je velký vnitřní odpor, který vyžaduje vstupní odpor vyhodnocovacích obvodů řádově  $10^{12} \Omega$ .

Další možností pro měření jsou **kapacitní snímače síly**. Jejich princip závisí na změně kapacity dle vztahu:

$$C = \varepsilon_d \cdot \frac{S_e}{d_e} \quad (2.7)$$

Ze vztahu (2.7) vyplývá, že změnu kapacity můžeme dosáhnout změněním dielektrika, přímo úměrně plochou elektrod, nebo nepřímo úměrně vzdáleností. U kapacitních snímačů se obvykle používají všechny tyto způsoby.

Dále je možné použít **snímačů sil s převodem deformace na polohu**. Tyto snímače mají v sobě zabudované deformační členy, které jsou navrženy tak, aby síla vyvolala co největší změnu polohy některého jeho význačného bodu. Tato změna polohy je snímána induktivními nebo kapacitními snímači a z ní je vyhodnocována výsledná síla. Mezi nejčastěji používané deformační členy patří pružný člen ve tvaru šroubovice nebo prstencový pružný člen.

Ke konstrukci snímačů síly je možné také využít deformace magnetického pole při deformaci feromagnetika. Mezi takovéto snímače patří například **snímač na principu magnetostrikce, snímač na principu magnetoanizotropie**. [10] [9]

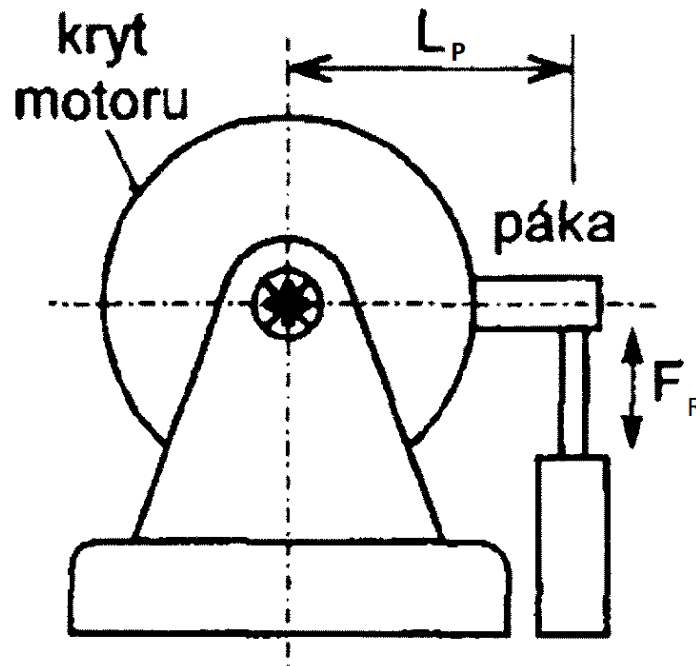
### 2.2.2 Měření momentů

V mechanické praxi rozlišujeme hned několik typů momentu (kroutící moment, ohybový moment, moment setrvačnosti, moment hybnosti) V této kapitole se však zaměříme pouze na první dva jmenované, neboť s nimi můžeme při našem měření přijít do styku.

Největší roli bude hrát v našem případě **moment ohybový**. Ohybový moment vzniká v důsledku působení dvojicí sil ležící v rovině kolmé k rovině řezu a způsobuje ohyb objektu. Nelze ho měřit přímo, ale zprostředkovaně pomocí síly a vzdáleností působíště síly od bodu počátku.

Druhou mechanickou veličinou, se kterou bychom se mohli potkat, je kroutící moment. Kroutící moment je vektorová veličina, jejíž velikost udává dvojice sil a způsobuje rotaci objektu.

K měření kroutícího momentu rotačních strojů se využívá Newtonův zákon o rovnosti akčních a reakčních sil. Jedním typem snímače je **stacionární dynamometr**, jehož princip je znázorněn na obrázku 2.10.



**Obrázek 2.10.** Uspořádání měření momentu [10]

Měřený stroj je otočně uložen v kuličkových ložiscích na zkušebním stojanu a spojen pákou o délce  $L$  se snímačem síly. Snímač je ukotven a měří reakční sílu  $F$ , odpovídající momentu reakce statorových částí stroje dle vztahu:

$$M_m = F_R \cdot L_P \quad (2.8)$$

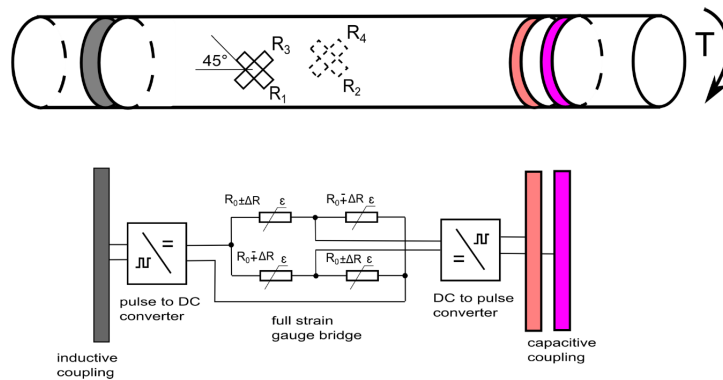
kde  $M_m$  je měřený moment [N.m],  $F_R$  je reakční síla [N] a  $L_P$  je délka páky [m].

Další možností jak měřit moment je pomocí **tenzometrického snímače momentu**. Jeho provedení je zobrazeno na obrázku 2.11. Hlavní část měřicí části je speciálně upravená hřídel, kam se nainstalují čtyři tenzometry pod úhlem  $45^\circ$ , aby se omezil vliv ohybu, teploty a tahu. Zapojení tenzometrů je vždy do plného můstku, takže mezi relativním zapojením jednoho tenzometru a kroutícím momentem  $M_k$  platí vztah:

$$M_k = \pm \varepsilon \cdot \frac{2GJ_P}{r_h} \quad (2.9)$$

kde  $M_k$  je kroutící moment,  $G$  je modul pružnosti ve smyku,  $J_P$  je polární moment setrvačnosti a  $r_h$  je poloměr hřídele.

Na levé straně je část napájení. Může to být například přenos přes vzduchovou mezeru pomocí střídavého napětí (baterie). Na pravé straně je přenos, upravující data k vyhodnocení, například pomocí pulsů, které budou úměrné kroutícímu momentu nebo pomocí rádiových vln jako bezdrátový signál. [10] [11]



Obrázek 2.11. Tenzometrický snímač momentu

## 2.3 Lezecké chyty a stěny

Abychom se mohli pustit do tvorby návrhů, je důležité vědět, jak se takový chyt vyrábí, z jakého materiálu je i jak se na stěnu přišroubuje. To stejné platí o lezecké stěně, kam budeme senzor šroubovat. V České republice je několik výrobců, zabývajících se výrobou a vývojem lezeckých chytů i lezeckých stěn, které dodávají své výrobky nejen do tuzemska, ale i do celého světa.

### 2.3.1 Lezecké chyty

Nejprve bychom si měli říct něco o typech chytů. Lezecké chyty se vyrábějí ve velkém množství různých tvarů a velikostí, díky tomu je jejich dělení obtížné. Nejzákladnější dělení chytů je dle velikosti na malé a velké. Každý chyt má svůj určitý tvar a vyžaduje různou techniku lezení. Seznámení se s co největším počtem tvarů pomůže lezci zdolat stěnu snadněji. V následující části si představíme nejznámější typy, se kterými se můžeme běžně setkat.

#### Jugs

Z angličtiny se tento pojem překládá jako madlo. Řadí se mezi velké chyty, avšak je možné najít i malá madla. Patří mezi nejlehčí chyty, které na lezecké stěně můžeme nalézt. Tvar mají takový, aby chyt šel uchopit do dlaní, jak můžeme vidět na obrázku 2.12.



Obrázek 2.12. Jugs [13]

### Crimps

Crimp – neboli lišta (volně přeloženo z angličtiny) – se řadí mezi malé chyty. Jeho tvar je nepravidelný a bývá často úzký. Často se využívá jako chyt pro nohu, zejména na začátku cesty nebo na traverzních stěnách. Tento typ patří mezi jedny z nejtěžších chytů na stěně a vyžaduje vyšší úroveň lezectví, jelikož má malou záběrovou plochu. Na obrázku 2.13 můžeme vidět uchopení chytu.



**Obrázek 2.13.** Crimps [14]

### Slopers

Mezi lezci známá jako oblina se řadí mezi velké chyty. Na rozdíl od většiny lezeckých chytů mají oblina zaoblený tvar. Kompenzací nedostatku úchopové plochy je povrch, který oblina mají velmi drsný. Jsou používány většinou na pokročilých cestách. Na obrázku 2.14 můžeme vidět uchopení chytu.



**Obrázek 2.14.** Slopers [15]

### Pockets

Pockety jsou lezecké chyty, které mají uprostřed díru pro prsty. Řadí se mezi malé chyty a obvykle mají malou úchopnou plochu. Na obrázku 2.15 můžeme vidět uchopení chytu na lezecké stěně. [16]

Chyty se ještě před pár desítky let vyráběly ze dřeva, které bylo nejdostupnějším materiálem, na druhou stranu jeho velká nevýhoda byla v nízkém tření. Ruka či noha



**Obrázek 2.15.** Pockets [17]

po dřevěném chytu lehce klouzala. Dalším krokem ve vývoji výroby chytů bylo použití směsi epoxidu s pískem. Jedna z nevýhod této směsi byla, že chyt byl velmi těžký. Největším evolučním přínosem pro výrobu bylo využití polyesteru, čímž byly chyty lehčí a zlepšila se i jejich pevnost. Nevýhodou použití polyesterové směsi bylo, že trvalo dlouho než směs zaschla a ztvrdla. V dnešní době se chyty také čím dál víc častěji odlévají i z polyuretanu. Polyuretan je ze všech zmíněných materiálů nejlehčí a nejpevnější, je ale dražší než polyester. Dnes se obecně na stěně vyskytuje 95 % chytů z polyesteru a 5 % procent z polyuretanu.

Při odlévání chytu je ještě důležité nezapomenout na díru pro šroub. Ta se udělá tak, že do určeného místa, kde se později bude nacházet šroub, vloží kolík z umělé hmoty, který se po zaschnutí směsi vytáhne. Pro dlouhé chyty se dělá ještě jedna díra navíc pro vrut, aby se předešlo protočení chytu.

Nejpoužívanější upevnění chytu na stěnu je pomocí šroubu s válcovou hlavou s vnitřním šestihranem, jehož uložení v chytu můžeme vidět na obrázku 2.16 a zarážecí matice, jenž je na obrázku 2.17. Zarážecí matice může ještě obsahovat na svém obvodu díry pro vruty, pro lepší pevnost. [18]



**Obrázek 2.16.** Uložení šroubu v chytu [19]



**Obrázek 2.17.** Narážecí matice [20]

### 2.3.2 Lezecké stěny

Lezecká stěna je uměle postavená zeď s chyty pro ruce a nohy, obvykle používaná pro lezení v interiéru.

Lezecké stěny se skládají ze dvou částí:

- Nosná konstrukce – vnitřní část
- Opláštění stěny – vnější část



### Nosná konstrukce

Vnitřní část lezecké stěny je ve většině případů tvořena svařovanými, či montovanými ocelovými příhradovými nosníky navrženy statickým výpočtem. Aby stěna nebyla náchylná na korozi, jsou ocelové konstrukce potírány standardně třemi antikorozními nátěry. Je-li stěna určena pro venkovní prostředí, je možné konstrukce upravit žárovým pozinkováním. Ocelové nosné konstrukce jsou vyráběny z oceli 10 235. Nosné ocelové konstrukce doplňují dřevěné hranoly 80x80 mm, které jsou pro venkovní použití opatřeny ochrannými nátěry (Lignofix). Pohled za opláštění stěny je zobrazen na obrázku 2.18.



**Obrázek 2.18.** Nosná konstrukce [21]

V případě dřevěného opláštění se plášť připevňuje na ocelovou konstrukci přímo pomocí dřevěných hranolů. Pokud máme jiné opláštění, je nutné použít pro připevnění speciálně tvarovaných plechů, které jsou umístěny v rozích panelu. Jako spojovací materiál slouží svorníky a vruty. V případě jednoduchých horolezeckých a boulderingových stěn je používána pouze dřevěná konstrukce.

### Opláštění stěny

Nejčastěji se opláštění vyrábí z březové překližky tloušťky 18 mm, formátů 1510x1510 mm, případně 2500x1250 mm. V případě, jedná-li se o instalaci venkovní, je použita překližka vodovzdorná. Povrch lezecké stěny je možné navrhnout z různých zaoblených, prohnutých, či prolámaných profilů s prvky spáry a sokolíku.

Aby se lezci dodal pocit, že se nachází na opravdové skále, jsou panely opatřeny různými povrchovými úpravami pro zdrsnění povrchu, které se poté i s hotovou stěnou natírají dvousložkovou epoxidovou barvou. Nátěr se provádí ve dvou vrstvách, kde první nátěr tvoří základní barvu, druhý nátěr (po dokončení opláštění lezecké stěny) pak vybraný barevný odstín.

Do opláštění jsou udělány díry pro umístění horolezeckých chytů. Jejich hustota se pohybuje okolo 50 kusů na 1 m<sup>2</sup>. Na spoje desek, kde se předpokládá tření od lana, jsou umístěny ochranné kovové lišty připevněné zapuštěnými vruty.

Další materiály, které se používají pro lezeckou stěnu jsou:

- Laminát
- Freeform
- Polykarbonát



**Obrázek 2.19.** Lezecká stěna [22]

Laminátové opláštění se vyrábí z profilovaných modulových dílců tloušťky 8–12 mm do rozličných tvarů, které mohou tvořit stěnu nenáročnou (plošnou), ale i velmi převislou. V každém modulovém dílci o velikosti 1000x1000 mm je 8–12 možností na uchycení horolezeckých chytů. Výhodou tohoto opláštění je jeho životnost, odolnost vůči klimatu a nenáročná údržba.

Freeform opláštění se svým tvarováním a povrchovou úpravou nejvíce přibližuje povrchu skály. Vyrábí se ručně ze skelných vláken a polyesterové pryskyřice. Povrch nabízí standardně 12–16 insertů na 1 m<sup>2</sup> na uchycení horolezeckých chytů. Výhodou tohoto opláštění je opět jeho vyšší životnost, neomezená velikost modulového dílce, odolnost vůči klimatu a nenáročná údržba.

Polykarbonátové opláštění z plného čirého PC 15 mm nám umožní použití lezeckých profilů i v místě oken při zachování denního světla. [23]



## **Kapitola 3**

### **Cíle práce**

Cílem této práce je navržení měřící soustavy na lezeckou stěnu umožňující za použití šestiosého senzoru měření silové a momentové složky do třech směrů, která by posloužila jako tréninková pomůcka pro zlepšení dynamického popisu pohybu lezce.

# Kapitola 4

## Metody a výsledky

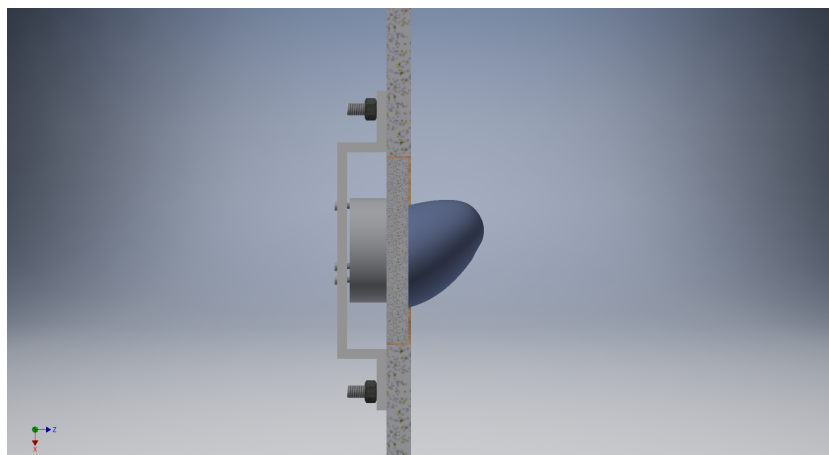
V této kapitole se blíže seznámíme s návrhy, které je možné využít k řešení daného problému. Snažili jsme se o takové řešení, které by podalo co nejvíce informací o dynamice lezce, bylo konstrukčně nenáročné a zároveň nijak neovlivňovalo lezce v pohybu.

Jako měřicí prvky jsme vybrali šestiosé senzory, které nám umožní měřit jak síly, tak i momenty do směrů x, y a z. Aby byla zajištěna správná funkčnost senzorů, musíme zaručit, aby senzor byl jediným spojovacím prvkem mezi stěnou a chytem. Na základě rešerší z již stávajících technických provedení, byly navrženy tři konstrukční řešení. Pro první návrh jsme se rozhodli k uchycení senzoru přes ocelový profil k lezecké stěně. Tento způsob nám umožní použití jakéhokoliv druhu chytu, ale pouze na předem určené místo. U druhého návrhu jsme zvolili možnost uchycení senzoru uvnitř chytu. To nám dává možnost umístit chyt kamkoliv na lezeckou stěnu, avšak lze měřit pouze na onom upraveném chytu. Ve třetím návrhu jsme se rozhodli pro silovou desku, která by nahradila část lezecké stěny. Tento návrh nám poskytuje nejširší spektrum možností, jaké chyty použít a kam je umístit.

Pro vytváření 3D modelů a výkresů jsem používal AutoCAD Inventor. [24] Výpočty dimenzování jsem prováděl v MATLABu. [25]

### 4.1 1. návrh

V prvním návrhu jsme se rozhodli pro uchycení měřicího prvku pomocí ocelového profilu. Z lezecké stěny se vyřízne čtvercová deska s jednou dírou pro uchycení chytu, která se poté zkrátí o dva milimetry na každé straně. K této desce se z jedné strany přišroubuje chyt a z druhé senzor. Na senzor se poté přišroubuje již zmiňovaný profil, který se šrouby připevní k lezecké stěně. Celkový návrh můžeme vidět na obrázku 4.1.



Obrázek 4.1. 3D model 1. návrhu

### 4.1.1 Konstrukční řešení

Tento návrh se skládá ze tří komponentů – senzor, profil a deska – a šroubových spojení.

#### Senzor

Jeden z hlavních komponentů tohoto návrhu je senzor, který je na obrázku 4.2. Vybrali jsme šesti-osý senzor od *ATI Industrial Automation* Mini85, který lze zakoupit ve třech různých kalibracích podle toho, jak velké zatížení očekáváme. Všechny dostupné kalibrace můžeme nalézt v tabulce 4.1

Kalibrace	Snímací rozsah				Rozlišení			
	$F_x, F_y$	$F_z$	$M_x, M_y$	$M_z$	$F_x, F_y$	$F_z$	$M_x, M_y$	$M_z$
	[N]	[N]	[N.m]	[N.m]	[N]	[N]	[N.m]	[N.m]
SI-475-20	475	950	20	20	9/112	3/28	5/1496	7/2992
SI-950-40	950	1900	40	40	9/56	3/14	5/748	7/1496
SI-1900-80	1900	3800	80	80	9/28	3/7	5/374	7/748

Tabulka 4.1. Kalibrace senzoru Mini85 [26]

Mezi jeho největší výhody patří vysoká pevnost. Maximální přípustné hodnoty přetížení jsou jmenovité hodnoty násobené 5,9 až 24,9. Další z jeho výhod je vysoký poměr signálu k šumu. Křemíkové tenzometry poskytují signál 75 krát silnější než běžné fóliové. Tento signál je zesílen, což vede k téměř nulovému zkreslení šumu. Jeho parametry jsou k nahlédnutí v tabulce 4.2 a výkres v příloze A.1. [26]



Obrázek 4.2. Senzor Mini 85 [26]

Fyzické specifikace		Osová zatížení		Tuhost	
průměr	85,1 mm	$F_{xy}^o$	$\pm 13\,000\ N$	$K_x, K_y$	$7,7 \cdot 10^7\ N.m^{-1}$
výška	33,4 mm	$F_z^o$	$\pm 27\,000\ N$	$K_z$	$1,8 \cdot 10^8\ N.m^{-1}$
hmotnost	0,635 kg	$M_{xy}^o$	$\pm 500\ N.m$	$K_{tx}, K_{ty}$	$8,1 \cdot 10^4\ N.m.rad^{-1}$
		$M_z^o$	$\pm 610\ N.m$	$K_{tz}$	$1,3 \cdot 10^5\ N.m.rad^{-1}$

Tabulka 4.2. Parametry senzoru Mini85 [26]

### Profil

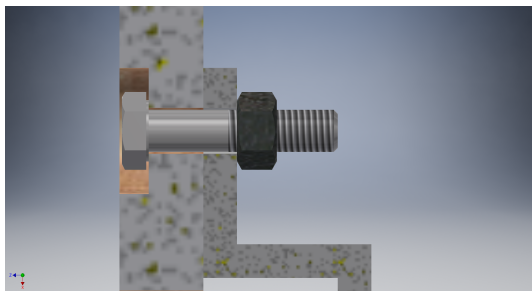
Druhým důležitým komponentem návrhu je ocelový profil. Polotovarem by byla ocelová plochá tyč válcovaná za tepla o šířce 90 mm, tloušťce 8 mm, délce 360 mm a hmotnosti 2,034 kg normovaná dle ČSN 42 5522.01 z oceli třídy 11. Šířku profilu volíme takto vysokou, abychom využili všechny díry pro šrouby v senzoru pro jeho správné upevnění. Daného tvaru bychom mohli dosáhnout za použití tváření - ohýbání, nebo svařením čtyř částí. Do vyrobeného dílu se ještě vyvrtají díry pro šrouby. Výkres profilu je v příloze A.3. [27]

### Deska

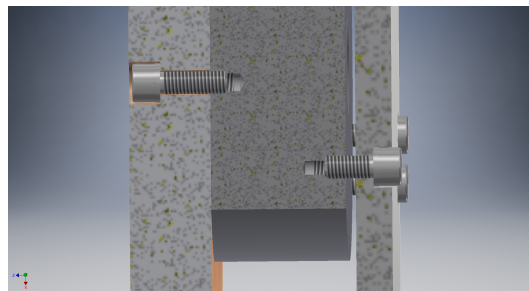
Dalším komponentem návrhu je samotná deska, která se vyřízne z lezecké stěny. Bude čtvercového průřezu o délce stran 154 mm. Poté se musí každá strana obrousit tak, aby byla délka stran 150 mm, což nám vytvoří dostatečnou vůli mezi lezeckou stěnou a deskou.

### Šroubová spojení

V tabulce 4.3 můžeme vidět všechny komponenty šroubových spojení. Chyt je připojen k desce šroubem s válcovou hlavou s vnitřním šestihranem M8 a z druhé strany zajištěn nárazecí maticí M8 (buldok). Senzor je z obou stran připojen k desce i profilu šrouby s válcovou hlavou s vnitřním šestihranem M5 (viz 4.4). Profil je ke stěně připojen šrouby se šestihrannou hlavou M10 (viz 4.3) a zajištěn šestihrannou maticí M10. Pod šrouby jsem použil pružné podložky.



Obrázek 4.3. Šroubové spojení



Obrázek 4.4. Upevnění senzoru

<b>Šrouby</b>			
označení	$d_3$ [mm]	$P$ [mm]	$n$ [ks]
ISO 4762 M5x12 4.8	4,019	0,8	6
ISO 4762 M5x16 4.8	4,019	0,8	6
ISO 4014 M10x45 4.8	8,160	1,5	4
ISO 4762 M8x70 4.8	6,466	1,25	1
<b>Matices</b>			
označení	$D_3$ [mm]	$P$ [mm]	$n$ [ks]
ISO 4034 M10 4	8,160	1,5	4
<b>Podložky</b>			
označení	$D$ [mm]	$P$ [mm]	$n$ [ks]
ČSN 02 1741 5	5	-	12
ČSN 02 1741 8	8	-	1

Tabulka 4.3. Šroubové spoje [27]

Abychom měli jistotu, že šrouby vydrží zatížení, kterým na ně budeme působit, je třeba provést kontrolu na střiž. Kontrolu provedeme pro šrouby M5 a M10 podle vzorce (4.1):

$$\frac{\tau_D}{k} \geq \frac{F}{S_3} = \frac{F}{n \cdot \frac{\pi \cdot d_3^2}{4}} \quad (4.1)$$

$\tau_D$  je dovolené smykové napětí a pro materiál šroubu je  $\tau_D = 65 - 100 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ . Po úpravě nerovnice dostáváme výsledný vztah pro maximální zatížení  $F$  :

$$F \leq \frac{\tau_D \cdot \pi \cdot d_3^2 \cdot n}{4 \cdot k} \quad (4.2)$$

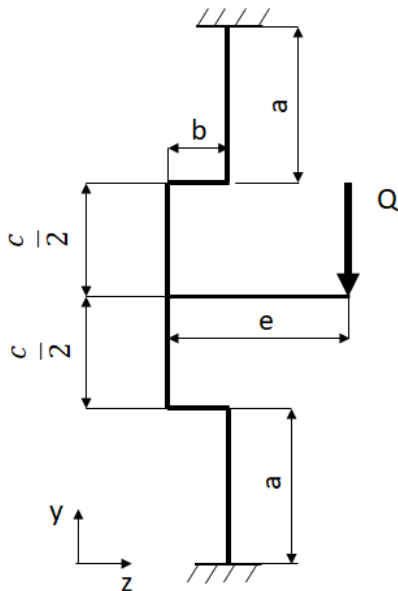
Dosazením do nerovnice (4.2) hodnoty z tabulky 4.3 a zvolením koeficientu bezpečnosti  $k = 5$ , dostaneme maximální síly pro šrouby M5 a M10, které vychází:

$$F_{M5} = 1\,522 \text{ N} \quad F_{M10} = 6\,276 \text{ N}$$

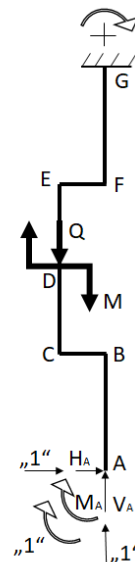
Z těchto dvou sil vybereme tu nejmenší, kterou nesmíme překročit. Pokud bychom to přepočítali na maximální hmotnost lezce, který by toto řešení využíval, jeho hmotnost nesmí být větší než 155 kg, pokud uvažujeme gravitační zrychlení  $g = 9,82 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ . [28]

#### 4.1.2 Dimenzování

Pro správnou funkci měřícího modelu je nutné, aby se deska s úchytem a senzorem nedotýkala v žádném bodě lezecké stěny. Správné navržení vůle mezi deskou a stěnou nám toto zajistí.



Obrázek 4.5. Výpočtový model prutu



Obrázek 4.6. Uvolnění prutu

Jednoduchý profil nahradíme výpočtovým modelem křivého prutu podle obrázku 4.5. Tento křivý prut rozdělíme na 6 polí: [A-B], [B-C], [C-D], [D-E], [E-F], [F-G] (viz obrázek 4.6). Výpočet provedeme pro zatížení osamělou silou  $Q = 800 \text{ N}$  na rameni  $e = 90 \text{ mm}$ . Rozměry profilu jsou  $a = 31 \text{ mm}$ ,  $b = 32 \text{ mm}$  a  $c = 168 \text{ mm}$ . Nahrazením osamělé síly  $Q$  na rameni vzniká v bodě D moment  $M$ , který musíme doplnit o sílu  $Q$  v bodě D

ve stejném směru jako prvotní osamělá síla, abychom zachovali původní smysl zatížení. Velikost momentu je dána rovnicí (4.3) a je rovna 72 000 N.mm.

$$M = Q \cdot e \quad (4.3)$$

Uvažujeme-li, že křivý prut je z obou stran vetknutý, jedná se o 3x staticky neurčitou úlohu (neznámé síly  $V_A$ ,  $H_A$  a moment  $M_A$ ), kterou musíme řádně uvolnit (viz obrázek 4.6). Z toho vyplývá, že deformační podmínky v bodě A jsou:  $u_A = 0$ ,  $v_A = 0$  a  $\varphi_A = 0$ .

K řešení použijeme metodu Mohrova integrálu, a to ve tvaru:

$$\varphi_A = \frac{1}{E \cdot J_z} \cdot \sum_{i=1}^6 \int M_{o_i}(s_i) \cdot m_{o_i}^\varphi(s_i) \cdot ds_i \quad (4.4)$$

$$u_A = \frac{1}{E \cdot J_z} \cdot \sum_{i=1}^6 \int M_{o_i}(s_i) \cdot m_{o_i}^u(s_i) \cdot ds_i \quad (4.5)$$

$$v_A = \frac{1}{E \cdot J_z} \cdot \sum_{i=1}^6 \int M_{o_i}(s_i) \cdot m_{o_i}^v(s_i) \cdot ds_i \quad (4.6)$$

pole	$ds _{dm}^{hm}$	$M_o(s_i)$	$m_o^u(s_i)$	$m_o^v(s_i)$	$m_o^\varphi(s_i)$
A–B	$ds_1 _0^a$	$M_A - H_A s_1$	–„1“ $s_1$	0	„1“
B–C	$ds_2 _0^b$	$M_A - H_A a - V_A s_2$	–„1“ $a$	–„1“ $s_2$	„1“
C–D	$ds_3 _0^{\frac{c}{2}}$	$M_A - H_A(a + s_3) - V_A b$	–„1“ $(a + s_3)$	–„1“ $b$	„1“
D–E	$ds_4 _0^{\frac{c}{2}}$	$M_A + M - H_A(a + \frac{c}{2} + s_4) - V_A b$	–„1“ $(a + \frac{c}{2} + s_4)$	–„1“ $b$	„1“
E–F	$ds_5 _0^b$	$M_A + M - H_A(a + c) - Q s_5 - V_A(b - s_5)$	–„1“ $(a + c)$	–„1“ $(b - s_5)$	„1“
F–G	$ds_6 _0^a$	$M_A + M - H_A(a + c + s_6) - Q b$	–„1“ $(a + c + s_6)$	0	„1“

**Tabulka 4.4.** Řešení Mohrova integrálu

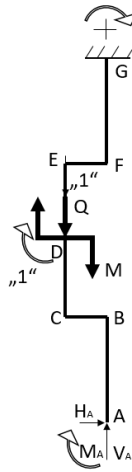
Po dosazení jednotlivých polí do rovnic (4.4),(4.5) a (4.6) za použití deformačních podmínek a následné integraci získáme výsledné rovnice, které můžeme napsat v maticovém tvaru:

$$\begin{bmatrix} 2a + 2b + c & -(b^2 + bc) & -(2a^2 + 2ac + 2ab + bc + \frac{c^2}{2}) \\ -(b^2 + bc) & \frac{2b^3}{3} + b^2c & ab^2 + abc + \frac{b^2c}{2} + \frac{bc^2}{2} \\ -(2a(a + b + c) + cb + \frac{c^2}{2}) & ab^2 + abc + \frac{b^2c + bc^2}{2} & \frac{8a^3 + c^3}{3} + a^2(2b + 4c) + 2abc + c^2(2a + b) \end{bmatrix} \cdot$$

$$\cdot \begin{bmatrix} M_A \\ V_A \\ H_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -M(a + b + \frac{c}{2}) + F(\frac{b^2}{2} + ab) \\ M(\frac{b^2}{2} + \frac{bc}{2}) - Q\frac{b^3}{6} \\ M(\frac{3a^2}{2} + \frac{3ac}{2} + ab + cb + \frac{3c^3}{8}) + Q(abc + \frac{cb^2}{2} + \frac{3a^2b}{2} + \frac{ab^2}{2}) \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Z rovnice (4.7) v maticovém tvaru dostáváme reakce v bodě A, které vychází:  $M_A = 20451 \text{ N.mm}$ ,  $V_A = 400 \text{ N}$  a  $H_A = 380 \text{ N}$ .

Abychom však zjistili posunutí a natočení v bodě D, musíme připojit jednotkový moment a jednotkovou sílu do bodu D, jak můžeme vidět na obrázku 4.7



**Obrázek 4.7.** Výpočet deformace v bodě D

pole	$ds \Big _0^m$	$M_o(s_i)$	$m_o^v(s_i)$	$m_o^\varphi(s_i)$
A-B	$ds_1 \Big _0^a$	$M_A - H_A s_1$	0	0
B-C	$ds_2 \Big _0^b$	$M_A - H_A a - V_A s_2$	0	0
C-D	$ds_3 \Big _0^{\frac{c}{2}}$	$M_A - H_A(a + s_3) - V_A b$	0	0
D-E	$ds_4 \Big _0^{\frac{c}{2}}$	$M_A + M - H_A(a + \frac{c}{2} + s_4) - V_A b$	0	„1“
E-F	$ds_5 \Big _0^b$	$M_A + M - H_A(a + c) - Qs_5 - V_A(b - s_5)$	– „1“ $s_5$	„1“
F-G	$ds_6 \Big _0^a$	$M_A + M - H_A(a + c + s_6) - Qb$	– „1“ $b$	„1“

**Tabulka 4.5.** Řešení Mohrova integrálu pro bod D

Výsledný vztah pro svislou deformaci  $v_D$  a natočení  $\varphi_D$  získáme dosazením z tabulky 4.5 do rovnic (4.4) a (4.6). Dostáváme dvě rovnice (4.8) a (4.9), z kterých lze dopočítat šířku profilu.

$$v_D = \frac{1}{EJ_z} \left[ -(M + M_A) \left( ab + \frac{b^2}{2} \right) + Q \left( \frac{b^3}{3} + ba^2 \right) + V_A \frac{b^3}{6} + H_A \left( abc + \frac{ab^2 + 3a^2b + b^2c}{2} \right) \right] \quad (4.8)$$

$$\varphi_D = \frac{1}{EJ_z} \left[ (M + M_A) \left( a + b + \frac{c}{2} \right) - Q \left( \frac{b^2}{2} + ba \right) - V_A \left( \frac{b^2 + bc}{2} \right) - H_A \left( abc + \frac{12ac + 3c^2 + 12a^2 + 8ab + 8bc}{8} \right) \right] \quad (4.9)$$

Pro dimenzování profilu si musíme určit maximální dovolené hodnoty svislého posunutí a natočení, které podělíme koeficientem bezpečnosti  $k$ . Z této úvahy vychází podmínky pro posunutí:

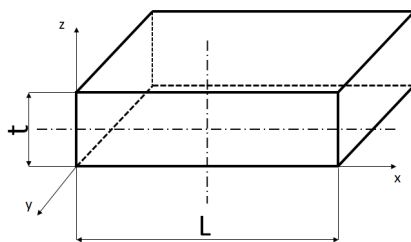
$$v_D \leq \frac{v_{max}}{k} \quad (4.10)$$

a pro natočení:

$$\varphi_D \leq \frac{\varphi_{max}}{k} \quad (4.11)$$

Pro náš návrh jsem si zvolil maximální svislé posunutí  $v_{max} = 1$  mm, maximální natočení  $\varphi_{max} = 5^\circ$  a koeficient bezpečnosti  $k = 2$ .

Průřez v bodě D lze považovat za obdélníkový s délkami stran  $t$  a  $L$  dle obrázku 4.8.



**Obrázek 4.8.** Obdélníkový průřez

Jelikož tloušťku  $t$  máme danou technologicky (volím stejnou, jaká je použita v konstrukčním řešení), musíme určit, jak široký musí být profil. To lze zjistit z charakteristiky průřezu - osový kvadratický moment  $J_z$  - dle vzorce (4.12).

$$J_z = \frac{1}{12} L \cdot t^3 \quad (4.12)$$

Dosazením vztahů (4.12) a (4.8) do rovnice (4.10), respektive (4.12) a (4.9) do rovnice (4.11) dostáváme výsledné vztahy pro tloušťku profilu:

$$L_{v_D} \geq \frac{12 \cdot k}{t^3 \cdot v_{max} \cdot E} \cdot \left[ -(M + M_A) \left( ab + \frac{b^2}{2} \right) + Q \left( \frac{b^3}{3} + ba^2 \right) + V_A \frac{b^3}{6} + H_A \left( abc + \frac{ab^2 + 3a^2b + b^2c}{2} \right) \right] \quad (4.13)$$

$$L_{\varphi_D} \geq \frac{12 \cdot k}{t^3 \cdot \varphi_{max} \cdot E} \cdot \left[ (M + M_A) \left( a + b + \frac{c}{2} \right) - Q \left( \frac{b^2}{2} + ba \right) - V_A \left( \frac{b^2 + bc}{2} \right) - H_A \left( abc + \frac{12ac + 3c^2 + 12a^2 + 8ab + 8bc}{8} \right) \right] \quad (4.14)$$



Dosažením zadaných rozměrů profilu do rovnic (4.13) a (4.14) získáme dvě hodnoty pro šířku:

$$L_{v_D} \doteq 3,7306 \text{ mm} \quad (4.15)$$

$$L_{\varphi_D} \doteq 2,9428 \text{ mm} \quad (4.16)$$

Z těchto dvou hodnot vybereme tu největší, tedy minimální šířka profilu musí být po zaokrouhlení 4 mm. Když dosadíme tuto hodnotu zpět do rovnic (4.8) a (4.9), získáme přesné hodnoty pro natočení a svislé posunutí v bodě D, které vychází:

$$v_D = 0,4663 \text{ mm} \quad \varphi_D = 0,0324 \text{ rad}$$

K výpočtu deformací lze také využít jednoduché freewarové programy na bázi metody konečných prvků. Metoda konečných prvků je numerická metoda, podle které se dají vypočítat deformace a průběhy napětí v namodelované součásti. Můžeme si pod tím představit způsob diskretizace kontinua, který vychází z představy rozdělení tělesa na podoblasti, ve kterých je posuv interpolován z hodnot v tzv. uzlových bodech. [29] Jako příklad je zde uveden program **Beam2D ML**. [30] Na obrázku 4.9 můžeme vidět deformaci prutu. Dle MKP vyšlo svislé posunutí v bodě D  $v_D = 0,4728 \text{ mm}$  a natočení  $\varphi_D = 0,0324 \text{ rad}$ . V porovnání s našimi vypočtenými hodnotami se lišíme o 1,4 %.



**Obrázek 4.9.** Deformace křivého prutu vypočtené pomocí programu **Beam** [30]

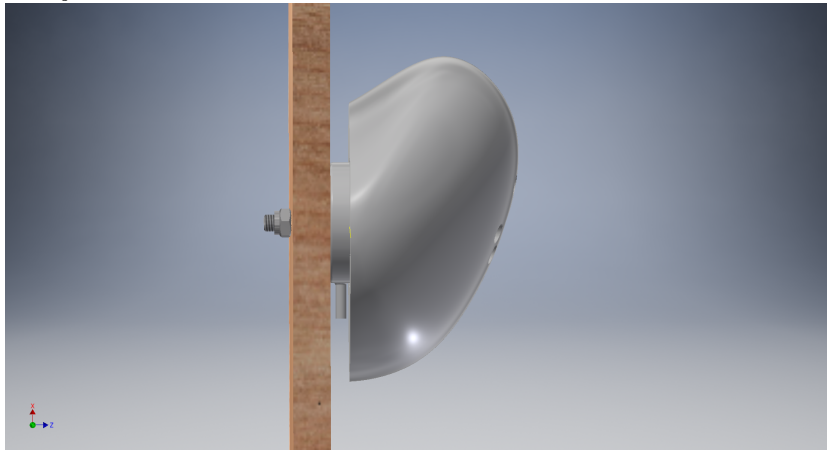
Jakmile známe hodnotu pro natočení a posunutí v bodě D, můžeme spočítat, jak velká má být vůle mezi deskou a stěnou. Ta se určí z následující rovnice:

$$v_c = v_D + s \cdot \sin(\varphi_D) \quad (4.17)$$

kde  $s$  je vzdálenost levé strany senzoru k pravé straně desky a je rovna 32 mm, uvažujeme-li středně velký chyt. Po dosažení hodnot natočení a posunutí získáváme výslednou vůli  $v_c = 1,5 \text{ mm}$ . Tato hodnota je pouze informativní, neboť jsme počítali s minimální šířkou profilu a ne s tou, kterou reálně máme. [31] [32]

## 4.2 2. návrh

V druhém případě jsme vymysleli takové řešení, že se senzor vloží do předem vytvořené díry v chytu a přišroubuje se šrouby. A poté se celý chyt přišroubuje ke stěně. Celkový návrh je na obrázku 4.10.



Obrázek 4.10. 3D model 2. návrhu

### 4.2.1 Konstrukční návrh

Zde je nutno zmínit, že chyt použitý pro tento návrh, bude muset být technologicky upraven tak, aby se do něj dal vložit senzor a ještě z druhé strany daly prostrčit šrouby. Jedno možné řešení, jak bychom této úpravě dosáhli, by bylo vyrobít jádro ve tvaru dutiny, které by se vložilo do formy pro chyt. Druhé řešení je takové, že by se díra pro senzor vyfrézovala a díry pro šroub vyvrtaly. Další možné řešení je pomocí 3D tiskárny vyrobít celý chyt s již hotovými dírami.

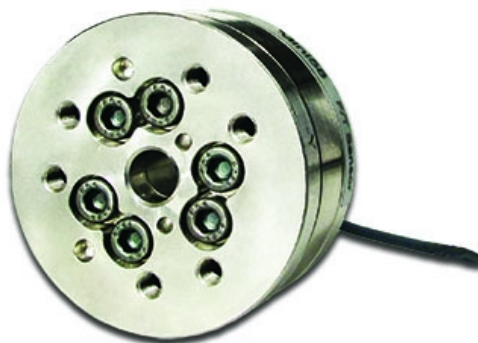
#### Senzor

Pro tento návrh jsme vybrali šestiosý senzor od *ATI Industrial Automation* Mini58–E, který můžeme vidět na obrázku 4.11. Tento senzor je dostupný ve třech různých kalibracích. Jelikož očekáváme velké zatížení, budeme potřebovat nejvyšší kalibraci, tedy SI–2800–120. V tabulce 4.6 můžeme vidět jak kalibrace ovlivňuje rozsah měřené síly a rozlišení.

Kalibrace	Snímací rozsah				Rozlišení			
	$F_x, F_y$	$F_z$	$M_x, M_y$	$M_z$	$F_x, F_y$	$F_z$	$M_x, M_y$	$M_z$
	[N]	[N]	[N.m]	[N.m]	[N]	[N]	[N.m]	[N.m]
SI-700-30	700	1700	30	30	1/6	7/24	9/1600	1/320
SI-1400-60	1400	3400	60	60	1/3	7/12	9/800	1/160
SI-2800-120	2800	6800	120	120	3/4	1 1/4	9/400	1/80

Tabulka 4.6. Kalibrace senzoru Mini85 [33]

Mezi jeho největší výhody patří vysoká pevnost. Maximální přípustné hodnoty přetížení jsou jmenovité hodnoty násobené 5,9 až 24,9. Další z jeho výhod je vysoký poměr signálu k šumu. Křemíkové tenzometry poskytují signál 75 krát silnější, než běžné fóliové. Tento signál je zesílen, což vede k téměř nulovému zkreslení šumu. Jeho parametry jsou k nahlédnutí v tabulce 4.7 a výkres v příloze A.2.



Obrázek 4.11. Senzor Mini 58 [33]

Fyzické specifikace		Osová zatížení		Tuhost	
průměr	58 mm	$F_{xy}^o$	$\pm 21\,000\text{ N}$	$K_x, K_y$	$2,5 \cdot 10^8\text{ N.m}^{-1}$
výška	30 mm	$F_z^o$	$\pm 48\,000\text{ N}$	$K_z$	$3,7 \cdot 10^8\text{ N.m}^{-1}$
hmotnost	0,345 kg	$M_{xy}^o$	$\pm 590\text{ N.m}$	$K_{tx}, K_{ty}$	$1,1 \cdot 10^5\text{ N.m.rad}^{-1}$
		$M_z^o$	$\pm 800\text{ N.m}$	$K_{tz}$	$2,0 \cdot 10^5\text{ N.m.rad}^{-1}$

Tabulka 4.7. Parametry senzoru Mini85 [33]

### Šroubová spojení

Pro uchycení senzoru v chytu jsme použili šrouby s válcovou hlavou s vnitřním šestihranem M5, jelikož jsme omezeni velikostmi děr pro šrouby, které jsou již vytvořené v senzoru. Pro připevnění chytu k lezecké zdi jsme použili šroub s válcovou hlavou s vnitřním šestihranem M8, tedy takový, který se běžně používá. Parametry šroubových spojů jsou vypsány v tabulce 4.8. Pro uchycení šroubu k lezecké zdi použijeme narážecí matici M8. Pod šrouby s válcovou hlavou s vnitřním šestihranem jsme použili pružné podložky.

Šrouby							
označení	$d_2$ [mm]	$d_3$ [mm]	P [mm]	$\sigma_{Kt}$ [MPa]	i [-]	f [-]	$\beta$ [°]
ISO 4762 M5x30 8.8	4,482	4,019	0,8	630	1	0,15	30
ISO 4762 M8x80 8.8	7,188	6,466	1,25	630	1	0,15	30
Matice							
označení	$D_2$ [mm]	$D_3$ [mm]	$h_2$ [mm]	$\rho_M$ [mm]	$f_M$ [-]		
AN 9312/A12 M8 8	9,5	22	11	$0,75 \cdot D_2$	0,25		
Podložky							
označení	$D$ [mm]	n [ks]					
ČSN 02 1741 5	5	6					
ČSN 02 1741 8	8	1					

Tabulka 4.8. Šroubové spoje – 2. návrh [27]

### 4.2.2 Dimenzování

Největší pravděpodobnost deformace návrhu je stříhem, je tedy nutné stanovit maximální povolené předpětí. V tomto případě neuvažujeme vliv ohybu, který bude za-

nedbatelný vůči stříhu. Předpětí  $Q_0$  se vnáší do šroubu kroutícím momentem od klíče, který můžeme rozepsat do dvou složek. První složka je od kroutícího momentu závitů:

$$M_{k_z} = \frac{d_2}{2} \cdot Q_0 \cdot \tan(\gamma + \varphi') \quad (4.18)$$

kde  $\gamma$  je úhel stoupání, který je dán vztahem (4.19),  $\varphi'$  je redukovaný úhel tření dle vztahu (4.20)

$$\tan \gamma = \frac{i \cdot P}{\pi \cdot d_2} \quad (4.19)$$

$$\tan \varphi' = f' = \frac{f}{\cos(\arctan(\tan \beta \cdot \cos \gamma))} \quad (4.20)$$

a druhá složka je od tření matice:

$$M_{k_M} = Q_0 \cdot \rho_M \cdot f_M \quad (4.21)$$

kde  $\rho_M$  je poloměr tření a  $f_M$  je součinitel tření mezi deskou a maticí .

Celkový utahovací moment bude součet rovnic (4.18) a (4.21):

$$M_{k_K} = M_{k_z} + M_{k_M} \quad (4.22)$$

Pro určení předpětí vycházíme z rovnice pro statickou bezpečnost pro maximální redukované napětí (4.23)

$$\frac{\sigma_{Kt}}{k} \geq \sigma_{red_{max}} \quad (4.23)$$

,kde  $\sigma_{Kt}$  je materiálová charakteristika šroubu určující napětí na mezi kluzu a  $k$  je volená bezpečnost.

Jelikož je šroub zatížen jak normálovým napětím tak i smykovým, použijeme pro výpočet redukovaného napětí energetickou hypotézu (H.M.H.).

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_t^2 + (\alpha \cdot \tau)^2} \quad (4.24)$$

Normálové napětí je tvořeno pouze od předpětí a můžeme ho vyjádřit rovnicí:

$$\sigma_t = \frac{Q_0}{S_3} \quad (4.25)$$

Smykové napětí je tvořeno dvěma složkami, kroutícím momentem od utahovacího klíče a stříhem. Nejnamáhanější místo bude na obvodu šroubu, kde se obě složky sčítají. Celkové smykové napětí bude vyjádřeno rovnicí:

$$\tau = \frac{M_{k_K}}{W_{k3}} + \frac{F}{S_3} \quad (4.26)$$

Řešený průřez v nejnamáhanějším místě lze považovat za kruhový. Charakteristiky tedy budou:

• Plocha:

$$S_3 = \frac{\pi \cdot d_3^2}{4} \quad (4.27)$$

• Průřezový modul v krutu:

$$W_{k3} = \frac{\pi \cdot d_3^3}{16} \quad (4.28)$$

Po dosazení rovnic (4.25) a (4.26) do rovnice (4.23), dostáváme novou nerovnici:

$$\frac{\sigma_{Kt}}{k} \geq \sqrt{\left(\frac{Q_0}{S_3}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{M_{kK}}{W_{k3}} + \frac{F}{S_3}\right)^2} \quad (4.29)$$

Když dosadíme vztahy (4.22), (4.25) a (4.26) do rovnice (4.24) a následně upravíme, dostáváme následující vztah pro předpětí:

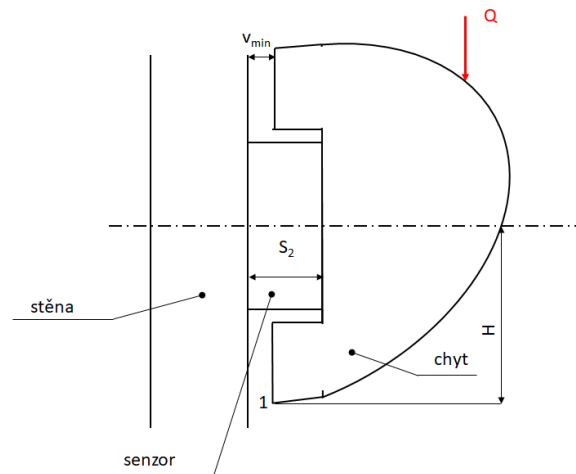
$$\begin{aligned} \left(\frac{\sigma_{Kt}}{k}\right)^2 - 3 \cdot \left(\frac{F}{S_3}\right)^2 &\geq Q_0^2 \cdot \left[ \frac{1}{S_3^2} + 3 \cdot \frac{\left(\frac{d_2}{2} \tan(\gamma + \varphi') + \rho_M f_M\right)^2}{W_{k3}^2} \right] + \\ &+ Q_0 \cdot \frac{6F \left(\frac{d_2}{2} \tan(\gamma + \varphi') + \rho_M f_M\right)}{W_{k3} \cdot S_3} \end{aligned} \quad (4.30)$$

Po dosazení hodnot z tabulky 4.8 a následném vyřešení nerovnice, získáme dva kořeny

$$Q_{01} = 11\,339\,N \quad Q_{02} = -21\,512\,N$$

z nichž pouze první je reálný. Když máme maximální předpětí, můžeme pomocí vztahu (4.21) určit utahovací moment, kterým je nutno šroubové spojení utáhnout. Po dosazení maximálního předpětí vychází utahovací moment  $M_{kK} = 2\,420\,N.mm$ . [28]

Další důležitou podmínkou pro správné měření je, že se úchyt v žádném bodě nesmí dotýkat lezecké stěny. Abychom tuto podmínku zajistili, vytvoříme mezi chytem a stěnou dostatečně velkou vůli, jak můžeme vidět na zjednodušeném modelu na obrázku 4.12.



**Obrázek 4.12.** Schématický model uchycení

Budeme-li předpokládat, že chyt je absolutně tuhý, bude se natáčet stejně jako senzor. Pro natočení v ose můžeme psát rovnici:

$$\varphi = \frac{Q \cdot H}{K_{tz}} \quad (4.31)$$

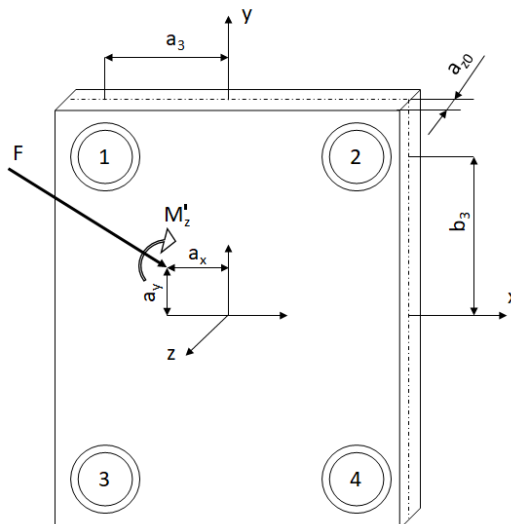
Po dosazení hodnot vychází natočení  $\varphi = 5,382 \cdot 10^{-4}\,rad$ . Abychom mohli určit velikost vůle, musíme zjistit horizontální posunutí v bodě 1. To bude dané rovnicí:

$$v_{min} = \sin(\varphi) \cdot H \quad (4.32)$$

Minimální vůle mezi stěnou a chytem musí být větší než 0,05 mm.

### 4.3 3. návrh

Jako třetí návrh jsme se rozhodli pro silovou desku, která by nahradila desku lezecké stěny. Tato deska je výhodná v tom, že měří současně tři silové složky podél os x,y,z. Síly jsou měřeny tenzometry, které jsou součástí senzoru. Jak můžeme vidět na obrázku 4.13, na desku jsou připevněny čtyři senzory, v každém rohu jeden.



Obrázek 4.13. Silová deska

Můžeme tedy z naměřených sil vypočítat celkovou sílu do daného směru:

$$F_x = f_{x1} + f_{x2} + f_{x3} + f_{x4} \quad (4.33)$$

$$F_y = f_{y1} + f_{y2} + f_{y3} + f_{y4} \quad (4.34)$$

$$F_z = f_{z1} + f_{z2} + f_{z3} + f_{z4} \quad (4.35)$$

nebo celkový moment do daného směru:

$$M_x = b_3 \cdot (f_{z1} + f_{z2} - f_{z3} - f_{z4}) \quad (4.36)$$

$$M_y = a_3 \cdot (-f_{z1} + f_{z2} + f_{z3} - f_{z4}) \quad (4.37)$$

$$M_z = b_3 \cdot [-(f_{x1} + f_{x2}) + (f_{x3} + f_{x4})] + a_3 \cdot [-(f_{y2} + f_{y3}) + (f_{y1} + f_{y4})] \quad (4.38)$$

Abychom mohli určit, kde má síla své působíště, musíme momenty  $M_x$  a  $M_y$  přepočítat do horní roviny desky.

$$M'_x = M_x + F_y \cdot a_{z0} \quad (4.39)$$

$$M'_y = M_y - F_x \cdot a_{z0} \quad (4.40)$$

Jakmile známe tyto dvě hodnoty, můžeme spočítat působíště výslednice  $F$ .

$$a_x = \frac{-M'_y}{F_z} \quad (4.41)$$

$$a_y = \frac{-M'_x}{F_z} \quad (4.42)$$

Následně i torzní moment  $M'_z$ , který působí v horní části desky. [34]

$$M'_z = M_z - F_y \cdot a_x + F_x \cdot a_y \quad (4.43)$$

# Kapitola 5

## Realizace

V této kapitole se budeme věnovat realizaci zvoleného návrhu. Popíšeme výrobu chytu a blíže specifikujeme výběr senzoru.

Ze všech navržených modelů jsme se rozhodli realizovat druhý návrh. Ačkoli všechny návrhy mají své klady (více v kapitole 6), druhý návrh je výrobně nejméně komplikovaný a v praxi nejvyužitelnější.

### 5.1 Výroba upraveného chytu

Pro výrobu chytu jsme zvolili metodu odlití, která je nejpoužívanější. Forma, do které bude chyt odlit, bude ve tvaru velké oblíny, aby se do ní mohl umístit senzor o průměru 58 mm. Abychom vytvořili díru pro senzor a díry pro šrouby, bylo nutné vytvořit jádro. Jádro bude vytištěno z ABS plastu pomocí 3D tiskárny, jehož výkres je přiložen v příloze A.4. Před odlitím se jádro vloží do formy chytu a po dolití se pomocí kyseliny rozpustí, takže vzniknou díry. K jádru je ještě nutné přidat kolík, který vytvoří díru pro šroub M8, který slouží k uchycení chytu ke stěně.

Chyt je vytvořen z polyuretanové pryskyřice, jejíž technická data jsou zobrazena v tabulce 5.1. Odlitky jsou tvrdé, trvanlivé, strojově i povrchově opracovatelné. Použitím tohoto materiálu získáme vyšší odolnost proti vlhkosti a jemnějším rozpouštědlům, což je žádoucí vzhledem k tomu, že budeme muset posléze rozpustit jádro pro vytvoření děr.

Vlastnost	Hodnota
Viskozita směsi	80 [MPa.s]
Doba zpracování	3 [min]
Doba odformování	10 [min]
Tvrdost (Shore D)	70
Pevnost v trhu	20,7 [N.mm <sup>-2</sup> ]
Modul elasticity	960 [N.mm <sup>-2</sup> ]
Pevnost v lomu	31,1 [N.mm <sup>-2</sup> ]

**Tabulka 5.1.** Technická data polyuretanu [35]

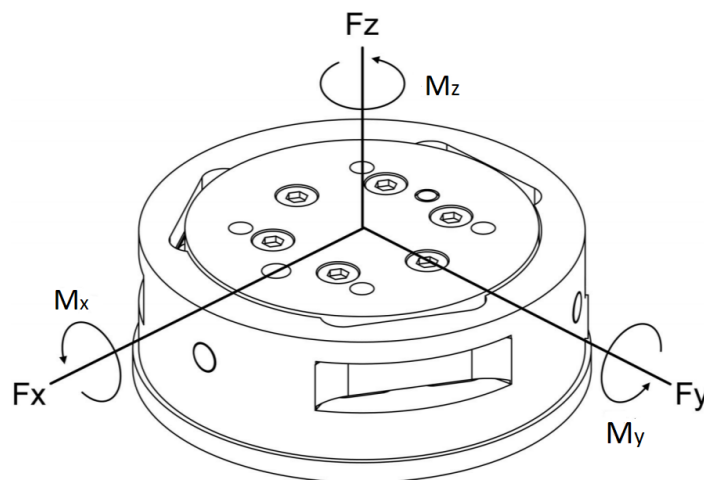
Před výrobou je důležité formu připravit a očistit od nečistot vzniklých při její výrobě. Poté se na kolík pro šroub instalují podložky a bezpečnostní dráty z důvodu bezpečnosti, aby se chyt nerozpadl. Mezitím se připraví směs a přidá se do ní tvrdidlo. Pak následuje samotné odlití chytu. Po proběhnutí exotermické reakce se chyt vyjme z formy. Na obrázku 5.1 je zobrazen proces při odlívání chytu. [36]



**Obrázek 5.1.** Proces odlívání chytu [36]

## 5.2 Měřící zařízení

Jak bylo zmíněno v podkapitole 4.2 k měření použijeme senzor ATI Mini 58-E, tzn. s vývodem kabelu po straně, jehož výkres je přiložen v příloze A.2. Jedná se o víceosý silový a momentový senzor, který současně měří síly  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  a momenty  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$ . Jelikož budeme očekávat velké zatěžující síly, budeme muset použít kalibraci Si-2800-120, která nám zvýší rozsah měřené síly i citlivost (přesné hodnoty jsou k dohledání v tabulce 4.6).



**Obrázek 5.2.** Aplikace síly a momentu na senzor [37]

Síly působící na senzor ohýbají tři symetricky umístěné nosníky pomocí Hookova zákona:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (5.1)$$

kde  $\sigma$  je napětí působící na nosníky (úměrná síle),  $E$  je modul pružnosti materiálu nosníků a  $\varepsilon$  poměrné prodloužení nosníků. Polovodičové tenzometry jsou připojeny k nosníkům a jsou považovány za rezistory citlivé na napětí. Odpor napětí měniče se mění v závislosti na použitém tenzometru následujícím způsobem:

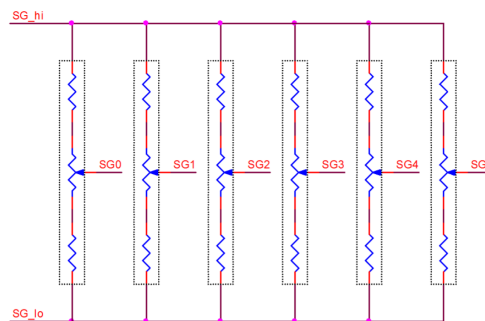


$$\delta R = S_a \cdot R_o \cdot \varepsilon \quad (5.2)$$

kde  $\delta R$  je změna odporu tenzometrů,  $S_a$  je koeficient tenzometru,  $R_o$  je odpor nezatíženého rezistoru a  $\varepsilon$  je prodloužení tenzometru.

Výstupní napětí z tenzometrů senzoru se používá k měření změny odporu. Musí být matematicky kombinovány, aby byly přeměněny na síly a točivé momenty.

Senzor je vybaven vysoce kvalitními křemíkovými tenzometry, které nevyžadují tak velké zesílení, jako například fóliové a díky tomu mají nižší rušivý signál. Senzor využívá šest půlmůsteků, kde každý půlmůstek obsahuje dvojici tranzistorů, které měří zátěž. Dvojice tenzometrů pracuje jako napěťový dělič produkující elektrický signál odpovídající zatížení páru. Schématické zapojení je zobrazeno na obrázku 5.3 [37] [38]



**Obrázek 5.3.** Vnitřní zapojení půlmůsteků [37]

Jelikož uvedený senzor pracuje na principu tenzometru, je nutné instalovat systémové rozhraní, které nám deformaci převede na signál a následně program vyhodnotí sílu či moment. Vybírat jsme mohli z několika možností, avšak z finančních důvodů jsme se rozhodli pro nejobyčejnější systémové rozhraní a tedy bez elektroniky TWE.

Toto rozhraní se skládá pouze ze senzoru, kalibračních informací a zdrojového kódu. Uživatel si musí sám obstarat elektrické rozhraní, zesílení a úpravu signálu. Vlastnosti přenosu dat jsou vypsány v tabulce 5.2 [39]

Výstupní formát	Napětí
Maximální výstupní hodnota	Prakticky nekonečná
Latence	Zanedbatelná
Možnost filtrování	Žádná
Filtrování proti aliasingu	Žádná

**Tabulka 5.2.** Přenos dat TWE [39]

## 5.3 Kalibrace

Pro vyhodnocení výsledků je nutné znát, jakých chyb v měření se dopouštíme. Jakmile bude přichycena nainstalovaná měřící soustava musíme provést kalibraci, abychom upravili počáteční podmínky na nulové hodnoty. Možností kalibrací je několik, avšak z cenových a konstrukčních důvodů volíme způsob použití nástavce, který se nasadí na chyt. Nástavec bude obsahovat tři tyče, které budou ve směru os x, y a z. Na tyto tyče se umístí závaží.

# Kapitola 6

## Diskuze

Cílem této práce je navrhnout měřicí soustavu, která by poskytovala informace lezci o rozložení a velikosti síly při uchopení lezeckého chytu a pomohla tak ke zlepšení výkonu ve sportovním lezení. Rozhodli jsme se pro výběr šestiosého senzoru, abychom mohli změřit silové a momentové složky do tří směrů, pro něž jsme vymysleli tři různé možnosti uchycení. V prvním návrhu se jedná o uchycení senzoru ke stěně pomocí plechového profilu. V druhém návrhu jsme se rozhodli umístit senzor přímo do lezeckého chytu. Ve třetím návrhu jsme se rozhodli pro aplikaci silové desky místo lezecké stěny. Hlavní požadavek na chyt byl takový, aby se dal umístit kdekoliv na stěnu a případně ho jednoduše přemístit a nevyžadoval konstrukční úpravy stěny.

Jelikož každý návrh splňuje svoji určitou škálu kritérií, lze hodnocení rozdělit do více oblastí, ve kterých můžeme jednotlivé návrhy porovnávat. Zvolili jsme metodu bodovací, která spočívá v tom, že každému návrhu přiřadíme celočíselnou hodnotu (známku) z intervalu  $\langle 1; 3 \rangle$ , kdy 1 znamená nejlepší a naopak 3 nejhorší. V následující tabulce 6.1 jsou vypsána a ohodnocena nejdůležitější kritéria, které by měla měřicí soustava splňovat.

Kriterium	1. návrh	2. návrh	3. návrh
Universálnost chytu	1	3	1
Flexibilita umístění měřicí soustavy	3	1	3
Ukotvení soustavy na stěnu	2	1	3
Ovlivnitelnost měření	1	3	2
Cenový odhad	1	1	3

**Tabulka 6.1.** Hodnocení návrhů

V následující části je odůvodněno zvolení jednotlivých kritérií a vysvětleno přiřazení počtu bodů jednotlivým návrhům.

### Universálnost chytu

Toto kritérium hodnotí, zda-li se na daný měřicí modul dá přidělat jakýkoliv chyt různého tvaru a velikosti. Jelikož u druhého návrhu je nutná technologická úprava chytu, aby byl použitelný k měření, byl ohodnocen nejhorší známkou. Naopak u prvního a třetího návrhu je možné použít jakýkoliv chyt.

### Flexibilita umístění měřicí soustavy

Tímto kritériem byla hodnocena flexibilita umístění měřicí soustavy, tzn. aby bylo možné umístit měřicí soustavu kamkoliv na stěnu, kam ji lezec vyžaduje. V tomto porovnání dopadly nejhůře třetí a druhý návrh. Třetí návrh tvoří celá silová deska a po jejím umístění by bylo velmi složité ji přemístit na jinou část stěny a proto byl ohodnocen známkou 3. Známkou 3 byl také ohodnocen první návrh, který po vytvoření díry ve stěně už nejde umístit jinam. Nejlépe hodnocen byl tedy druhý návrh, který lze umístit kamkoliv na stěnu.

### Ukotvení měřicí soustavy na stěnu

Důležitým parametrem byla obtížnost při smontování měřicí soustavy na stěnu. Bodování bylo rozdělováno podle toho, zda-li je nutné k instalaci odborného pracovníka nebo to zvládne lezec sám. Vzhledem k tomuto přihlídnutí, vyšla nejobtížnější instalace třetího návrhu, jenž bude muset být připevněn i k nosné konstrukci. Známkou 2 byl ohodnocen první návrh, který je sice méně komplikovaný, než návrh třetí, ale je také zapotřebí, aby se vyvrtala díra ve stěně. Nejlehčí na smontovatelnost měřicího modelu je první návrh, který se nikterak neliší od instalace jakéhokoliv chytu, kromě zašroubování senzoru do chytu, a proto je ohodnocen známkou 1.

### Cenový odhad

Ve výběru výsledného návrhu hraje roli i finanční složka. Po cenové kalkulaci jednotlivých návrhů vyšel jako nejdražší třetí návrh, který obsahuje čtyři senzory. Ve stejné cenové relaci se pohybovaly zbylé dva návrhy a jsou tak ohodnoceny stejnou známkou 1.

### Ovlivnitelnost měření

Toto kritérium udává, jaká je možnost, že změřené výsledky budou zkreslené. Jelikož třetí návrh tvoří silová deska, která obsahuje více chytů, z měřených výsledků nebude možno poznat, který chyt byl zatěžován, tzn., že když se lezec bude v jednom momentě držet dvou a více chytů najednou, bude změřena pouze výsledná síla. U druhého návrhu je ovlivnění měření takové, že při šlápnutí na chyt by se špička mohla opřít o stěnu a tak by síla byla rozložena z části do stěny a z části do senzoru. Nejlépe ohodnocen známkou 1 byl první návrh, kdy při vyříznutí části stěny se při dotyku nohy desky bude síla přenášet na senzor, neboť vyříznutá část je spojena šrouby se senzorem.

## 6.1 Výsledný výběr

Z tabulky 6.1 je vidět, že nejvýhodnější se jeví první návrh, který v hodnocení obdržel nejmenší počet bodů. Z důvodů hlavních požadavků, uvedených v prvním odstavci této kapitoly, jsme se však rozhodli pro realizaci druhého návrhu, který se skládá ze speciálně upraveného chytu, který je vyroben na míru a senzoru od firmy *ATI Automation Industrial* Mini 58-E. Senzor je umístěn vně chytu.

Aby nedošlo ke strhnutí měřicí soustavy, bylo vypočítáno maximální předpětí, které je nutno vnést utahovacím momentem do šroubu. Dále jsme zajistili, aby se senzor nedotýkal stěny, jelikož by to ovlivnilo měření tak, že jsme vypočítali potřebnou vůli, která vyšla 0,05 mm, ale z konstrukčních důvodů jsme ji zvětšili na 3 mm. Po nainstalování měřicí soustavy je nutné provést kalibraci.

### 6.1.1 Srovnání se stávajícími řešeními

Zatímco stávající řešení jsou omezena měřením pouze jedné silové složky, použitím šestiosého senzoru v našem konstrukčním návrhu dostaneme širší přehled o dynamice pohybu lezce, neboť budeme schopni měřit silové a momentové složky do třech směrů. Nevýhodou našeho řešení je vyšší cena a konstrukční složitost.

# Kapitola 7

## Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo navržení měřicí soustavy s použitím silového senzoru tak, aby soustava byla schopna změřit všechny silové a momentové složky působící na chyt při sportovním lezení.

První část je zaměřena na obeznámení se se stávajícími technickými možnostmi pro měření sil na lezecké stěně, dále na principy měření sil a momentu a také na popis lezeckých chytů a lezeckých stěn

Na základě rešeršní části byly navrženy tři návrhy měřicí soustavy, které by vyhovovaly zadaným požadavkům. Návrhy byly konstrukčně zkontrolovány a vyhověly pevnostním podmínkám. Technické dokumentace senzorů a komponentů návrhů jsou uvedeny v příloze.

První návrh se skládá ze šestiosého senzoru *ATI Mini 85*, který byl pomocí ocelového profilu přichycen k lezecké stěně. Byla spočítána minimální vůle mezi deskou a stěnou pomocí Mohrova integrálu pro křivý prut. Tento návrh umožňuje použití jakéhokoliv lezeckého chytu, avšak je omezen pouze na jedno místo. Druhý návrh se sestavuje z upraveného lezeckého chytu, do něhož se vloží šestiosý senzor *ATI Mini 58-E*. Celá tato soustava se přišroubuje na lezeckou stěnu. Pro tento návrh byl spočítán maximální utahovací moment, kterým se může šroub utáhnout. Tento návrh umožňuje použití jakéhokoliv lezeckého chytu, avšak je omezen pouze na jedno místo. Výhodou tohoto návrhu je, že ho lze přimontovat na jakékoliv místo na lezecké stěně. Nevýhodou je, že ho lze aplikovat pouze na daný upravený chyt. Základem třetího návrhu je silová deska, která v každém svém rohu obsahuje jeden silový senzor. Byl vysvětlen postup pro získání výsledné síly a momentu z naměřených sil. Tento návrh poskytuje volnost při výběru lezeckého chytu i místa na silové desce. Nevýhodou je však vysoká cena a velký zásah do lezecké stěny.

Z těchto tří návrhů byl vybrán návrh druhý, který je konstrukčně nejjednodušší, v praxi nejvyužitelnější a cenově nejdostupnější. Pro tento návrh byla navržena výroba a kalibrace, která je nutná udělat před měřením.

## Literatura

- [1] Sportovní lezení. *Czech olympic team* [online]. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <https://www.olympic.cz/sport/86--sportovni-lezeni>
- [2] Lezecké stupnice obtížnosti. *Stránky pro lezce* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: [http://www.goat.cz/index.php?path=Lezeni\\_LezeckeStupnice\\_LezeckeStupnice](http://www.goat.cz/index.php?path=Lezeni_LezeckeStupnice_LezeckeStupnice)
- [3] Instrumented climbing holds and performance analysis in sport climbing. *Sports Technology*. 2008, **1**(6), 301-313. DOI: 10.1002/jst.71. ISSN 19346182. Dostupné také z: <http://doi.wiley.com/10.1002/jst.71>
- [4] DONATH, Lars a Peter WOLF. Reliability of Force Application to Instrumented Climbing Holds in Elite Climbers. *Journal of Applied Biomechanics*. 2015, **31**(5), 377-382. DOI: 10.1123/jab.2015-0019. ISSN 1065-8483. Dostupné také z: <http://journals.humankinetics.com/doi/10.1123/jab.2015-0019>
- [5] Measurement of Force or Acceleration Torque and Power. *Nptel.ac.in* [online]. Indian Institute of Technology Madras [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <http://nptel.ac.in/courses/112106139/pdf/4.4.pdf>
- [6] ČERNÝ, František. *Fyzika I*. Vyd. 2. přeprac. V Praze: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-010-2913-1.
- [7] WAGNEROVÁ, Renata a Jiří TŮMA. *Základy automatizace* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2008 [cit. 2018-05-24]. ISBN isbn978-80-248-1523-7.
- [8] RESISTIVE STRAIN GAUGE / FORCE MEASUREMENT. In: *Direct industry* [online]. [cit. 2018-05-24]. Dostupné z: <http://www.directindustry.com/prod/omega/product-19150-1760382.html>
- [9] NOVÁK, Martin. *Technická měření*. V Praze: České vysoké učení technické, 2018. ISBN 978-80-01-06388-0.
- [10] JENČÍK, Josef, Jaromír VOLF a KOLEKTIV. *Technická měření*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2000. ISBN 9788001021385; 8001021386.
- [11] Technická měření ZS17/18 - přednáška 5 - síla, moment. In: *Youtube* [online]. 11.02.2017 [cit. 2018-05-24]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=BtDP-KAsnDx0&t=2963s>
- [12] Force Measurement. *The John W. Sutherland Research Page* [online]. [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <http://www.mfg.mtu.edu/cyberman/quality/metrology/force.html>
- [13] Climbing holds. In: *Coreclimbing.co* [online]. [cit. 2018-05-24]. Dostupné z: <https://coreclimbing.co.uk/shop/climbing-holds-climbing-wall-matting-bolts-and-clothing/shop-by-type/jugs/core-mini-jugs.html>
- [14] Rock Climbing Technique. In: *Rockandice* [online]. [cit. 2018-05-24]. Dostupné z: <http://rockandice.com/how-to-climb/rock-climbing-technique/>
- [15] Groovy Slopers — Big. In: *Kitkaclimbing* [online]. [cit. 2018-05-24]. Dostupné z: <https://kitkaclimbing.com/product/groovy-slopers-big-pu/>

- [16] Rock Climbing Holds. *Mpora* [online]. [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <https://mpora.com/rock-climbing/climbing-holds-climb>
- [17] Pocket-hold. In: *Head rush Technologies* [online]. [cit. 2018-05-24]. Dostupné z: <http://headrushtech.com/blogs/tree-climbing-holds-types-and-terms-to-improve-route-setting/pocket-hold-250x250/>
- [18] Materiálová evoluce: od dřeva k polyuretanu. *Továrna na chyty* [online]. Praha, 2016 [cit. 2018-05-01]. Dostupné z: <http://www.emontana.cz/vyroba-chytu-aix/>
- [19] Přednosti a naše výroba. In: *Makak* [online]. [cit. 2018-05-24]. Dostupné z: <http://www.makak.cz/cz/prednosti-a-nase-vyroba>
- [20] Matice narážecí. In: *Landsmann* [online]. [cit. 2018-05-24]. Dostupné z: <http://www.landsmann.cz/matice-narazeci-m-6-do-dreva-ocel-povrch-zinek-bily-100-ks-d38560.html>
- [21] Seamless wall. In: *Climbing Business Journal* [online]. [cit. 2018-05-24]. Dostupné z: <http://www.climbingbusinessjournal.com/wp-content/uploads/seamless-wall.jpeg>
- [22] Wall. In: *Tr-walls* [online]. [cit. 2018-05-24]. Dostupné z: [http://tr-walls.eu/wp-content/uploads/ngg\\_featured/pn14079516-720x380.jpg](http://tr-walls.eu/wp-content/uploads/ngg_featured/pn14079516-720x380.jpg)
- [23] Technical description climbing walls. *MAKAK* [online]. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <http://www.makak.cz/en/technical-description-climbing-walls>
- [24] Autodesk, Inc., *Autodesk Inventor 2016*[software]. [cit. 2018-05-18] Dostupné z: <https://www.autodesk.com/products>
- [25] The MathWorks, Inc., *MATLAB and Statistics Toolbox Release 2015b*[software]. [cit. 2018-05-18] Dostupné z: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>
- [26] F/T Sensors: Mini85. *ATI Industrial automation* [online]. [cit. 2018-03-30]. Dostupné z: [http://www.ati-ia.com/products/ft/ft\\_models.aspx?id=Mini85](http://www.ati-ia.com/products/ft/ft_models.aspx?id=Mini85)
- [27] LEINVEBER, Jiří a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 5., upr. vyd. Úvaly: Albra, 2011. ISBN 978-80-7361-081-4.
- [28] BOLEK, Alfred a Josef KOCHMAN. *Části strojů*. Vyd. 5., přeprac. (v SNTL 1. vyd.). Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1989. Technický průvodce. ISBN 80-0300046-7.
- [29] ŠPANIEL, Miroslav a Zdeněk HORÁK. *Úvod do metody konečných prvků*. V Praze: České vysoké učení technické, 2011. ISBN 978-80-01-04665-4.
- [30] EngiLab, *EngiLab Beam.2D 2018 Lite v2.5*[software]. [cit. 2018-05-18] Dostupné z: <https://www.engilab.com/downloads>
- [31] ŘEZNÍČEK, Jan a Jitka ŘEZNÍČKOVÁ. *Pružnost a pevnost v technické praxi: příklady II*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN 80-01-03584-0.
- [32] MICHALEC, Jiří. *Pružnost a pevnost I*. 3. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 978-80-01-04224-3.
- [33] F/T Sensor: Mini58. *ATI Industrial Automation* [online]. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: [http://www.ati-ia.com/products/ft/ft\\_models.aspx?id=Mini58](http://www.ati-ia.com/products/ft/ft_models.aspx?id=Mini58)
- [34] Kistler Force Plate Formulae. *International Society of Biomechanics* [online]. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <https://isbweb.org/software/movanal/vaughan/kistler.pdf>
- [35] Technický list Smooth Cast 300. *SILIKONY s.r.o.* [online]. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: [https://www.silikonysro.cz/documents/Smooth-Cast-300-322/Smooth-Cast\\_300\\_300Q\\_305\\_310\\_Technicky\\_list.pdf](https://www.silikonysro.cz/documents/Smooth-Cast-300-322/Smooth-Cast_300_300Q_305_310_Technicky_list.pdf)

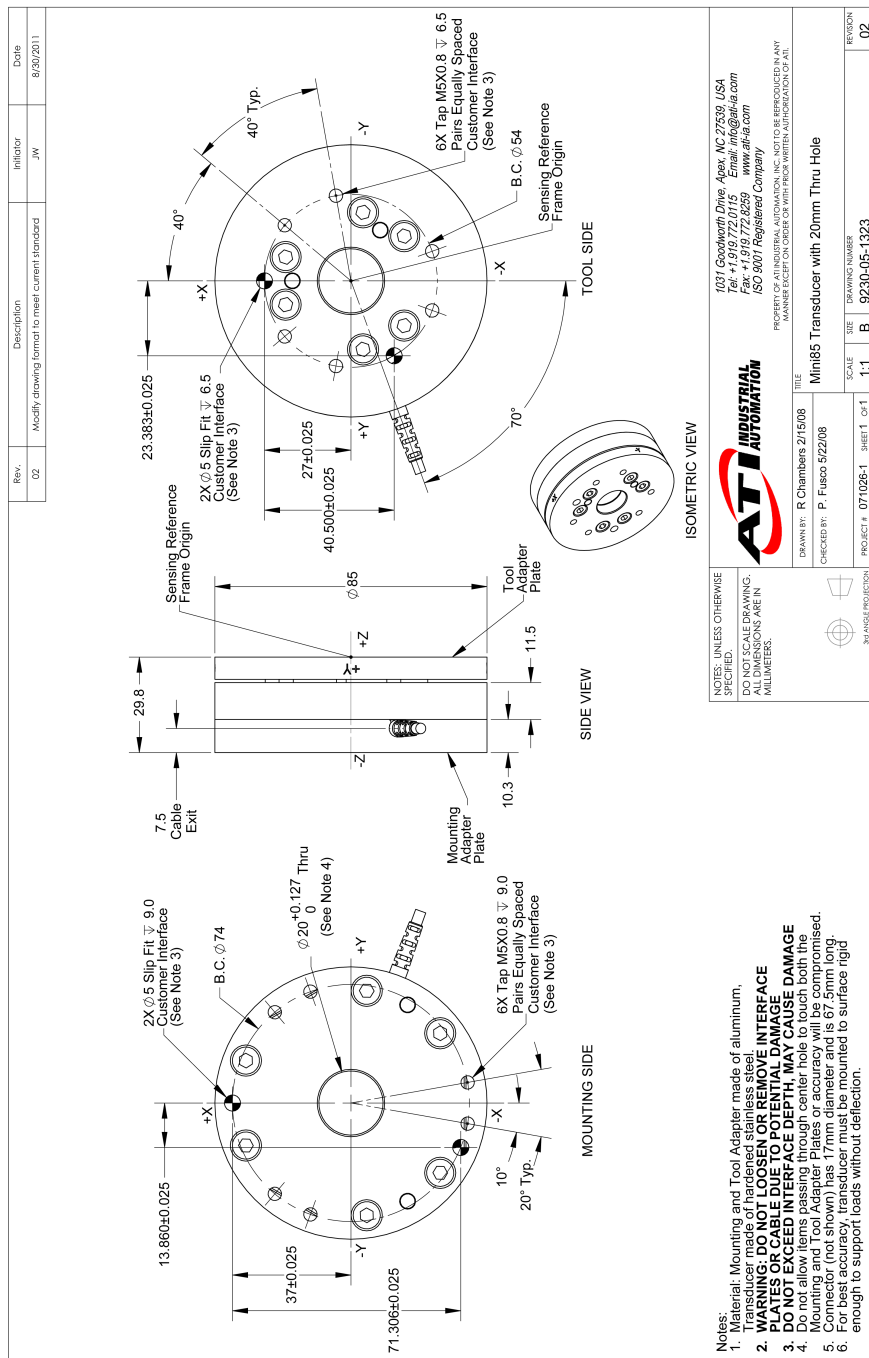
- 
- [36] Napsali o nás aneb jak vyrobit chyt a dětskou lezeckou stěnu. *Aix* [online]. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <https://www.aix.cz/cs/napsali-o-nas/>
- [37] F/T Transducer without Electronics (TWE). *ATI Industrial Automation* [online]. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: [http://www.ati-ia.com/app\\_content/documents/9620-05-TWE.pdf](http://www.ati-ia.com/app_content/documents/9620-05-TWE.pdf)
- [38] KUBEŠ, Jan. *Využití šestiosého silového senzoru pro řízení průmyslového manipulátoru*. ČVUT v Praze, 2014. Diplomová práce. České vysoké učení technické, Fakulta elektrotechnická, Katedra kybernetiky.
- [39] F/T System Interfaces. *ATI Industrial Automation* [online]. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: [http://www.ati-ia.com/products/ft/ft\\_SystemInterfaces.aspx](http://www.ati-ia.com/products/ft/ft_SystemInterfaces.aspx)



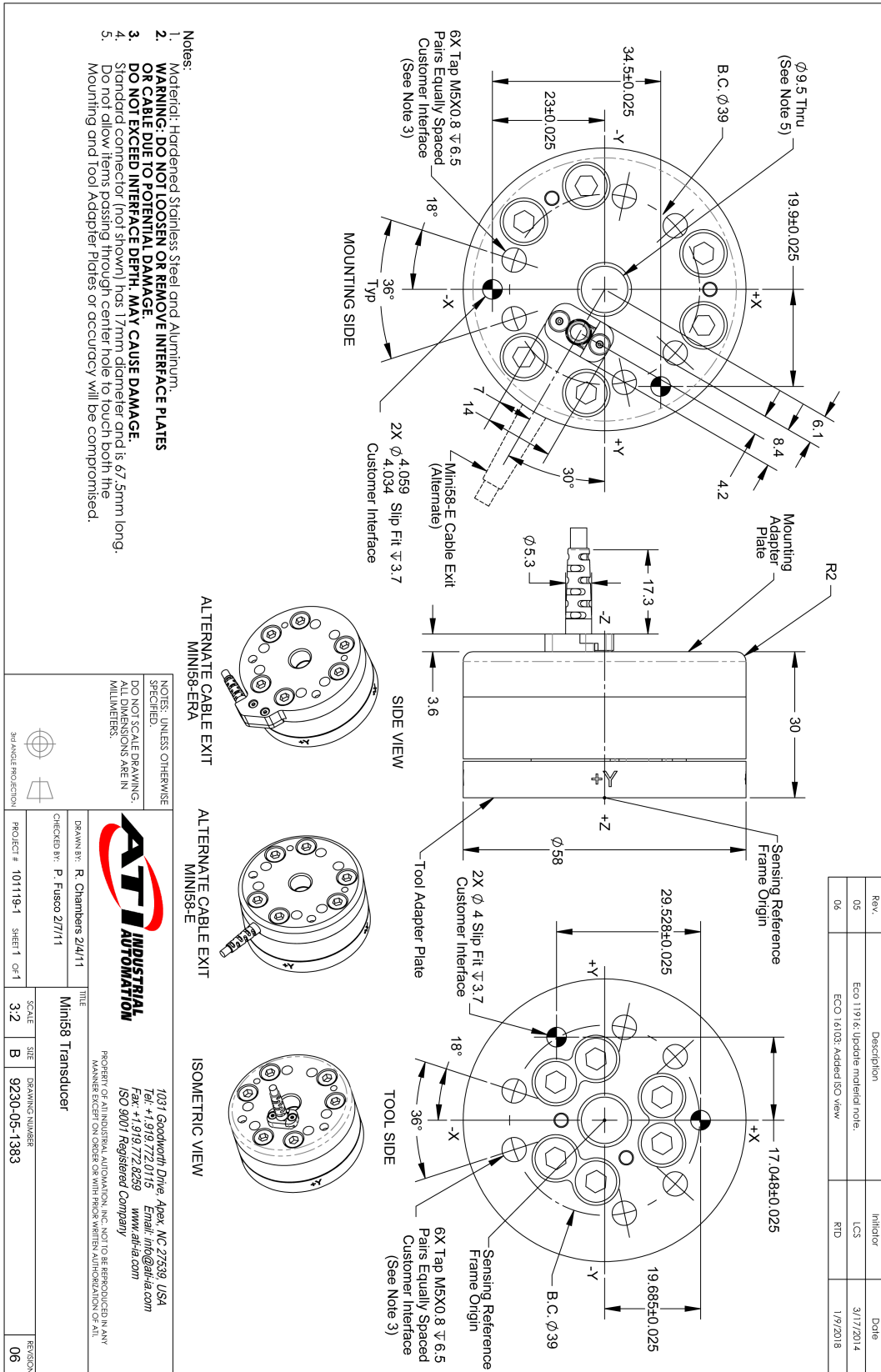


# Příloha A

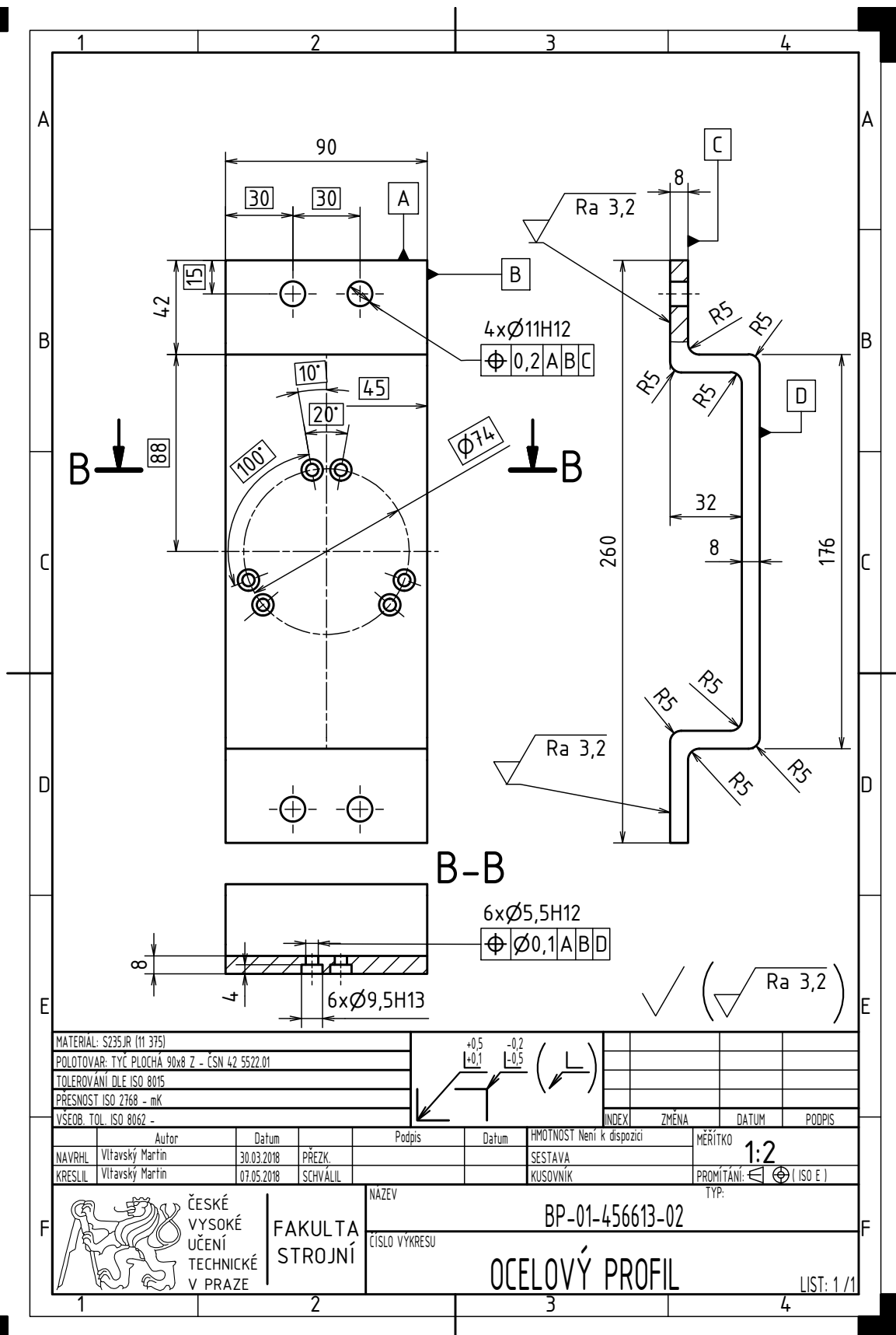
## Technická dokumentace



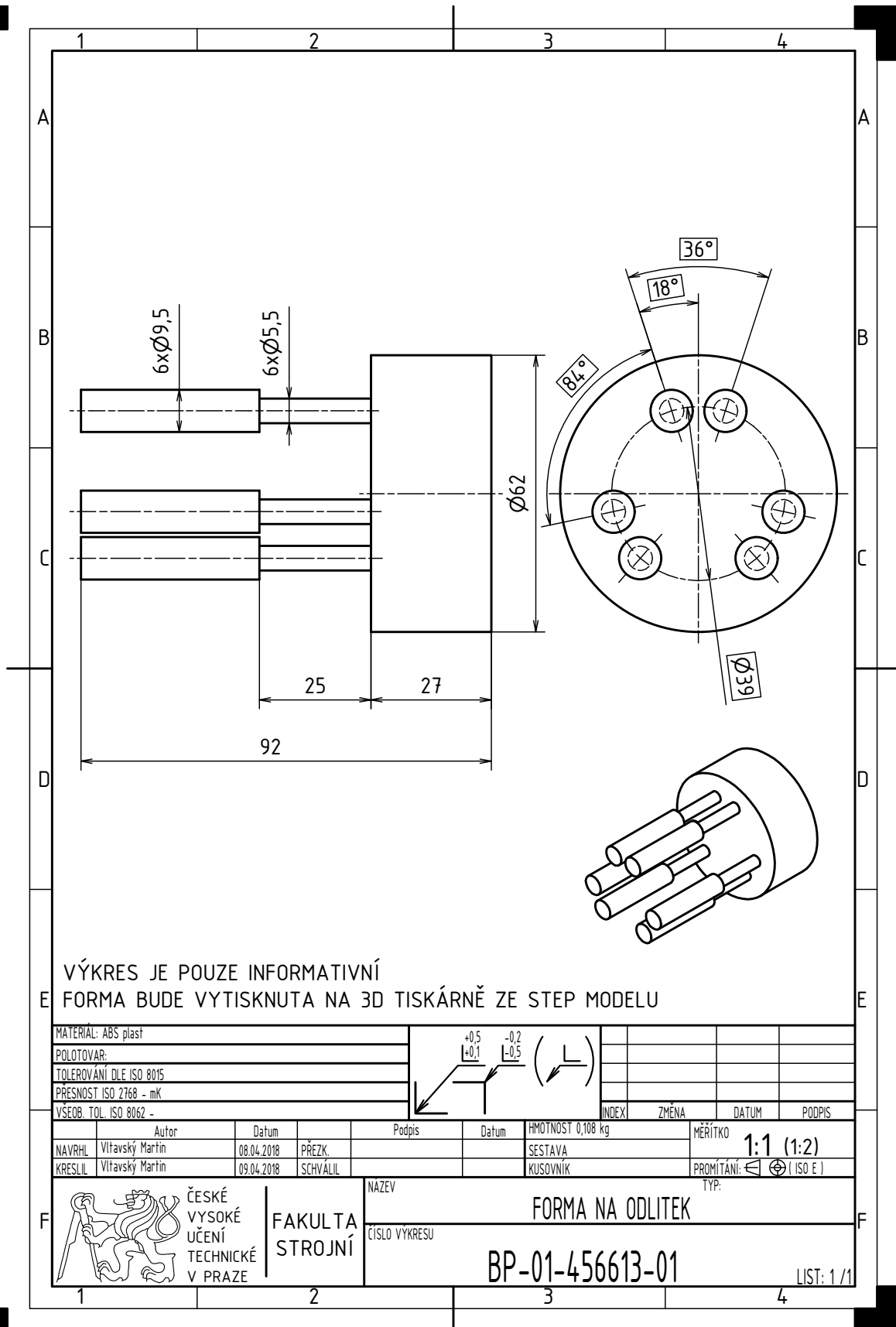
Obrázek A.1. Výkres senzoru Mini85 [26]



Obrázek A.2. Výkres senzoru Mini58-E [33]



Obrázek A.3. Ocelový profil



Obrázek A.4. Forma na odlitek

