

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Měření proudových polí v objemu

Bc. Tomáš Peterka

Vedoucí:
Ing. Jakub Filipský

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

pro: **Bc. Tomáš Peterka**

program: **Strojní inženýrství**

obor: **Aplikovaná mechanika**

název česky: **Měření proudových polí v objemu**

název anglicky: **Flow field measurements in volumes**

Zásady pro vypracování:

- 1) Proveďte rešerši systémů pro měření proudových polí v objemu
- 2) Navrhněte vhodný systém pro měření proudového pole v objemu úplavu osobního automobilu v měřítku 1:4
- 3) Systém zkonstruujte a ověřte experimentálně

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu. Dále prohlašuji, že výsledky mohou být dále použity podle uvážení vedoucího diplomové práce jako jejího spolu autora. Souhlasím také s případnou publikací výsledků diplomové práce nebo její podstatné části, pokud budu uveden jako její spoluautor.

V Praze dne 7.5.2017

Bc. Tomáš Peterka

Anotační list

Jméno autora: Bc. Tomáš Peterka

Název DP: Měření proudových polí v objemu
Anglický název: Flow field measurements in volumes

Rok: 2017
Studijní program: Strojní inženýrství
Obor studia: Aplikovaná mechanika
Ústav: Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky
Vedoucí práce: Ing. Jakub Filipický
Konzultant:

Bibliografické údaje:

počet stran	40
počet obrázků	10
počet tabulek	0

Klíčová slova: měření, proudové, pole, PIV, metody, stereoskopické, aerodynamika

Keywords: flow, field, measurement, PIV, methods, stereoscopic, aerodynamics

Abstrakt: Práce pojednává o měření rychlostních polí v objemu. Popisuje některé známé metody měření rychlostních polí, jejich matematicko-fyzikální principy a hodnotí jejich náročnost a omezení. Popisuje zpracování metody PIV pro měření proudových polí v aerodynamickém tunelu. Dále popisuje konstrukční návrh a realizaci zařízení k traverzování oblasti měření metodou PIV a ověření jeho funkčnosti.

Abstract: This thesis deals with methods for flow field measurement in volumes. It describes some of the known methods, their principles and evaluates their difficulties and limits. It describes elaboration of the PIV method for flow field measurements in wind tunnels. It describes design and realisation of a device for use of the PIV method, including verification of its functionality.

Poděkování

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu této diplomové práce Ing. Jakobovi Filipskému za rady a připomínky, které významně přispěly k vypracování této práce. Dále celému ústavu mechaniky tekutin a termodynamiky za umožnění pracovat na projektu s tímto problémem spojeným.

Bc. Tomáš Peterka

OBSAH

1. Úvod.....	5
2. Měřicí metody rychlostního pole	6
2.1. Miskové anemometry.....	7
2.2. Lopatkové anemometry	8
2.3. Pitotova trubice	9
2.4. Venturiho trubice	10
2.5. Metoda žhaveného drátku	12
2.6. Metoda žhavených elementů.....	13
2.7. Metoda ultrazvukové anemometrie.....	14
2.8. Metoda LDA	15
2.9. Metoda PIV	17
3. Výběr vhodné měřicí metody.....	18
3.1. Trasovací částice	19
3.2. Optická a snímací technika	21
3.3. Kalibrace a vyhodnocování měření	22
4. Konstrukce zařízení.....	25
4.1. Snímaná rovina a umístění kamer.....	25
4.2. Koncepční návrh konstrukce.....	27
4.3. Konstrukce a dimenzování.....	29
4.4. Momenty krokových motorů pro posuvy	33
4.5. Výkresová dokumentace	35
5. Realizace návrhu	36
6. Funkčnost zařízení	39
7. Závěr	39
Použitá literatura	41
Příloha č. 1	43
Příloha č. 2	44

LEGENDA

v.....	rychlost [m/s]
n.....	otáčky [ot/s]
r.....	poloměr [m]
π	Ludolfovo číslo
p_c	celkový tlak [Pa]
p_s	statický tlak [Pa]
p_d	dynamický tlak [Pa]
ρ	hustota [kg/m ³]
S.....	průřez [m ²]
d.....	průměr [m]
c.....	rychlost zvuku [m/s]
f_0	vysílaná frekvence [Hz]
f_d	snímaná frekvence [Hz], Dopplerovská frekvence [Hz]
α	úhel vysílání [°]
Θ	úhel paprsků [°]
λ	vlnová délka laserového paprsku [mm]
d_f	vzdálenost lokálních extrémů [mm]
c-CoC	Circle of Confusion [mm]
f.....	ohnisková vzdálenost [mm]
l.....	vzdálenost ostření [m]
N.....	jmenovatel clonového čísla [-]
DOF..	hloubka ostření (Depth of Focus) [mm]
I.....	intenzita
x.....	pozice [mm]
s.....	posuv [mm]
C.....	koncentrace částic [částice/m ²]
Δz_0	tloušťka laserového listu [mm]
M_0	zvětšení [-]
D_I	Velikost výsekový oblasti [mm ²]
w_o	šířka snímané oblasti [mm]
w_s	šířka snímače [mm]

Mu.... utahovací moment [Nm]
d₂..... střední průměr závitu [mm]
γ..... úhel stoupání [°]
φ..... třecí úhel [°]
F_o..... osová síla [N]
H₁..... nosná výška závitu
n..... počet závitů v matici [1]
d..... velký průměr závitu šroubu [mm]
D₁.... malý průměr matice [mm]
p..... tlak [MPa]

1. Úvod

Cílem této práce je vytvořit řešení pro měření rychlostního pole v aerodynamickém tunelu za měřeným objektem jednou vybranou metodou. Měřený objekt je model automobilu v měřítku 1:4. Zvolená metoda měření by měla sloužit ke zkoumání a následně zlepšování aerodynamických vlastností vozu.

V první části práce bude vypracována rešerše vybraných měřících metod. V rešerši budou jednotlivé metody popsány a bude hrubě vysvětleno, na jakých principech fungují. Budou také popsány výhody a nevýhody jednotlivých metod. V hlavní části této práce bude vybrána jedna z metod měření, která bude podrobněji vysvětlena. Další část práce bude věnována konstrukčnímu návrhu řešení měření vybranou metodou. V neposlední řadě bude konstrukční návrh zrealizován. Nakonec bude zhodnocena funkčnost tohoto řešení včetně popisu dalších možností využitelnosti.

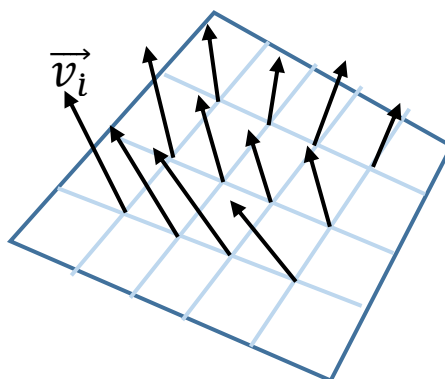
2. Měřicí metody rychlostního pole

Rychlostním polem je označováno takové vektorové pole, které obsahuje vektory rychlosti s působištěm v tomto poli. Takové pole může obsahovat libovolný počet vektorů rychlosti. Příklad rychlostního pole je zobrazeno na obr. 1. Nástrojů, jak změřit vektor rychlosti je hned několik. Obecně je takovéto zařízení označováno jako anemometr z řeckého anemos, v češtině vítr, tedy větroměr. Anemometrů je celá řada a lze je rozdělit do základních skupin podle počtu složek rychlostí a dimenzí měření:

Dimenze měření Složek vektoru rychlosti	0D (bod)	1D (vektor)	2D (rovina)	3D (objem)
1	Pitotova trubice, Venturiho trubice, miskové a lopatkové anemometry (bez korouhve), LDA, ...	dopplerovský ultrazvuk		
2	Miskové a lopatkové anemometry s korouhví, 2 žhavené drátky, ultrazvukem o 3 snímačích, LDA (2+2 paprsky kolmo na rovinu), ...		PIV	
3	3 drátky, pěti otvorová sonda, ultrazvuk o 5 snímačích, LDA (1+ 2 páry paprsků + sonda), ...		Stereoscopic PIV	Volumetric PIV (Tomo PIV)

Dále se mohou anemometry dělit podle způsobu měření:

- Mechanické
- Tlakové
- Teplotní
- Ostatní



Obr. 1. Pomyslné rychlostní pole

Vzhledem k množství metod měření, budou vybrány pouze některé, které budou popsány. První skupinou jsou anemometry mechanické. Mechanické proto, že rychlost vzduchu je převáděna na mechanickou práci, zpravidla na rotační pohyb určitého elementu. Mezi mechanické anemometry patří například:

2.1. Miskové anemometry

2.2. Lopatkové anemometry

Další skupinou jsou anemometry tlakové. Jak už název napovídá, měřená veličina je zde tlak, přesněji rozdíl tlaků. Do této skupiny lze zařadit:

2.3. Pitotova trubice

2.4. Venturiho trubice

V neposlední řadě je zde skupina teplotních anemometrů. Tato skupina měří ochlazení žhaveného tělíška vlivem proudícího vzduchu. Patří sem:

2.5. Metoda žhaveného drátku

2.6. Metoda žhavených elementů

Na konec skupina ostatních, resp. speciálních anemometrů. Jde především o sofistikovanější metody měření s využitím laseru, optických prvků či ultrazvuku.

2.7. Metoda ultrazvukové anemometrie

2.8. Metoda LDA

2.9. Metoda PIV

2.1. Miskové anemometry

Miskové anemometry jsou využívány především v meteorologii k měření rychlosti větru. Jejich konstrukce je velice jednoduchá. Jak název napovídá, jejich hlavním elementem jsou půlkulové misky umístěné na koncích ramen. Ramena jsou připojena k svislé hřídeli, která se v anemometru může volně otáčet. Fungují na principu rozdílu odporu vzduchu při obtékání misek. Proudění vzduchu vytváří větší odpor na vyduté straně misek než na vypouklé. Tento rozdíl sil způsobuje moment, kterým jsou misky roztáčeny okolo osy anemometru. Anemometr tedy měří otáčky hřídele, které jsou převáděny na rychlost větru, to lze vztahem [1]:

$$v = 6\pi nr \quad (1)$$

, kde v je rychlost proudění, n otáčky a r je délka ramene.

Obvykle se používají tři nebo čtyř-miskové. Tři-miskové rychleji reagují na změnu rychlosti větru. Avšak ani jeden není schopný měřit směr větru. Pro měření směru větru je zapotřebí připojit korouhev [1]. Příklad miskového anemometru je zobrazen na obr. 2.



Obr. 2. Tři-miskový anemometr (převzato z [2])

2.2. Lopatkové anemometry

Lopatkové anemometry fungují na stejném principu jako miskové. Liší se elementem, který převádí rychlost vzduchu na otáčky. V tomto případě je takovým elementem lopatkové oběžné kolo, které roztáčí vodorovnou hřídel. Funguje podobně jako nebrzděná větrná elektrárna. Tento anemometr je náchylný na směr větru, proto je důležité, aby osa rotace lopatkového kola byla vždy ve směru proudění vzduchu. To je zajištěno směrovým stabilizátorem. Rychlost proudění je opět úměrná otáčkám lopatkového kola. Tento typ anemometru je přesnější a rychleji reaguje na změny rychlosti proudění než miskové anemometry [1]. Příklad lopatkového anemometru je zobrazen na obr. 3.

Jak bylo zmíněno výše, tyto typy anemometrů se používají převážně v meteorologii, kde jejich přesnost, citlivost na změnu je dostatečná stejně tak, jako rozsah rychlostí proudění, které jsou schopny měřit.



Obr. 3. Lopatkový anemometr (převzato z [3])

2.3. Pitotova trubice

Pitotova trubice patří mezi tlakové anemometry, které jsou v současné době nejvíce používané, a to především z důvodu rozvoje letectví a jiných odvětví s ním spojených. Princip měření spočívá v měření rozdílu tlaků, a to statického p_s a celkového p_c . Konstrukce trubice je velice jednoduchá. Skládá se ze dvou trubic, které jsou z jedné strany spojeny. Vnější trubice obsahuje děrování k odebírání statického tlaku. Vnitřní trubice přivádí celkový tlak. Znázornění Pitotovy trubice je na obr. 4. Rychlost proudění v se tedy vypočte z rozdílu tlaků podle následujících vztahů:

$$p_c = p_s + p_d \quad (2)$$

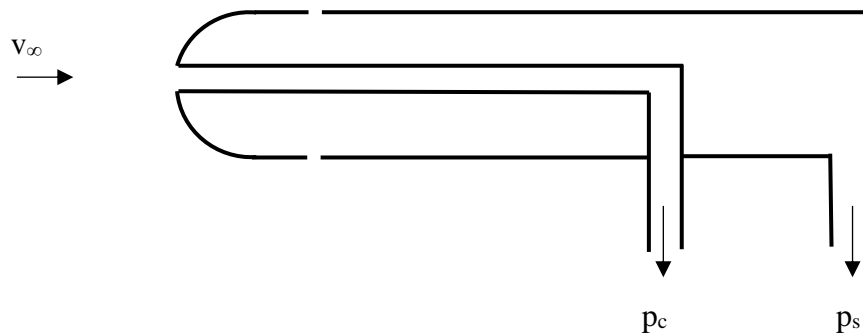
$$p_c - p_s = p_d \quad (3)$$

, kde p_d je dynamický tlak. Dynamický tlak lze také vyjádřit pomocí rychlosti v , která je žádaná, a to následovně:

$$p_d = \frac{\rho v^2}{2} \quad (4)$$

, kde ρ je hustota prostředí a v rychlost proudění. Položením do rovnosti vztah 3() se vztahem (4) a vyjádřením rychlosti v se obdrží konečný vztah:

$$v = \sqrt{\frac{2(p_c - p_s)}{\rho}} \quad (5)$$

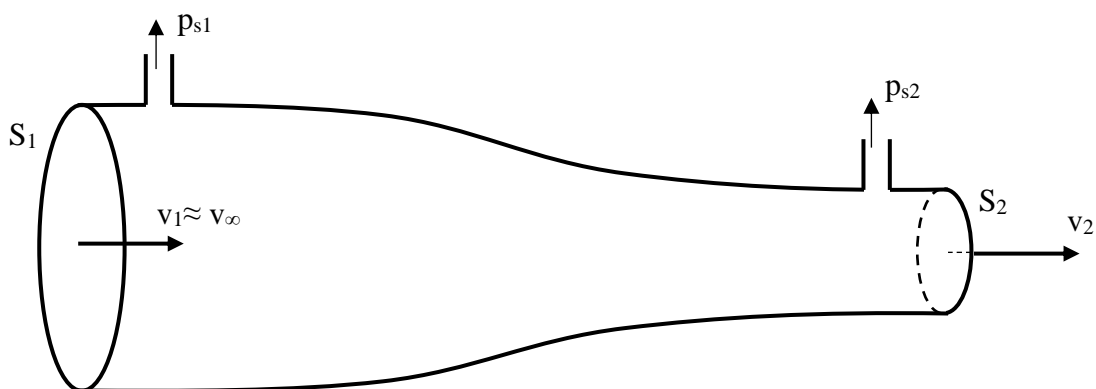


Obr. 4. Schéma Pitotovy trubice

Trubice dosahují relativně malých rozměrů a dosahují dostatečné přesnosti. Mají veliký rozsah měřených rychlostí, proto se dnes používají pro letouny. Jsou však náchylné na směr proudění. S výchylkou směru proudění od osy trubice se zmenšuje přesnost měření. Jsou také citlivé na námrazu, při které může být funkčnost trubice omezena nebo úplně vyřazena, proto jsou některé trubice vyhřívané.

2.4. Venturiho trubice

Venturiho trubice je mj. dalším zástupcem tlakových anemometrů. Tak jako u Pitotovy trubice i Venturiho trubice pracuje na principu rozdílu tlaků. Zde však na rozdíl od dvou statických tlaků p_{s1} a p_{s2} . Konstrukce je jednodušší než v případě Pitotovy trubice. Jedná se o trubici, která je postupně zúžena. Odebírání tlaků se provádí kolmo na trubici v nezúžené části p_{s1} a v zúžené části p_{s2} . Podle rovnice kontinuity se rychlost proudění v užší části trubice zvýší a tím se sníží statický tlak p_{s2} . Tím vznikne rozdíl mezi statickými tlaky. Tento děj je také znám pod pojmem Venturiho efekt. Schéma Venturiho trubice je zobrazeno na obr. 5.



Obr. 5. Schéma Venturiho trubice

Pro získání rychlosti proudění je potřeba užít Bernoulliho rovnici ve tvaru:

$$p_{s1} + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_{s2} + \frac{1}{2} \rho v_2^2 \quad (6)$$

Dále je potřeba užít rovnici kontinuity ve tvaru vyjádřené rychlosti v_2 tak, že:

$$v_2 = \frac{v_1 S_1}{S_2} \quad (7)$$

, kde v_1 je rychlost v místě 1, S_1 plocha průřezu v místě 1 a analogicky v_2 je rychlost v místě 2 a S_2 plocha průřezu v místě 2. Je uvažováno, že rychlost v místě 1 se přibližně rovná rychlosti volného nabíhajícího proudu vzduchu v_∞ . Po úpravě Bernoulliho rovnice (6) a dosazením rovnice kontinuity (7) do (6) vznikne následující vztah:

$$p_{s1} - p_{s2} = \frac{1}{2} \rho v_1^2 \left(\frac{S_1^2}{S_2^2} - 1 \right) \quad (8)$$

Vyjádřením rychlosti v místě 1 pak vznikne vztah pro výpočet rychlosti proudění:

$$v_1 = \sqrt{\frac{2(p_{s1} - p_{s2})}{\rho \left(\frac{S_1^2}{S_2^2} - 1 \right)}} \quad (9)$$

Tento výraz lze ještě upravit pro průměry trubice d_1 a d_2 následovně:

$$S_1 = \frac{\pi d_1^2}{4} \quad \text{resp.} \quad S_2 = \frac{\pi d_2^2}{4}$$

Potom:

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{d_1^2}{d_2^2} \quad (10)$$

Tedy:

$$v_1 = \sqrt{\frac{2(p_{s1} - p_{s2})}{\rho \left(\frac{d_1^4}{d_2^4} - 1 \right)}} \quad (11)$$

Venturiho trubice je stejně jako Pitotova citlivá na směr proudění, tj. výchylka směru proudění od osy trubice. Její nevýhoda spočívá v tlakové ztrátě díky zúžení trubice.

2.5. Metoda žhaveného drátku

Metoda žhaveného drátku je mj. metoda tzv. žárové anemometrie. Existují různé typy provedení této anemometrie. Prvním je CTA (z anglického Constant Temperature Anemometry), druhým CVA (z anglického Constant Voltage Anemometry) a nakonec CCA (z anglického Constant Current Anemometry). V prvním případě udržuje elektrický obvod konstantní teplotu čidla. V druhém případě ředící elektronika udržuje konstantní úbytek napětí na čidle. Nakonec provedení CCA, kde je udržován konstantní proud procházející čidlem [1].

Principem této metody je zahřátí jemného nejčastěji wolframového drátku na určitou teplotu, která je vyšší než teplota prostředí. Wolfram vykazuje dobré vlastnosti pro tento účel. Má malou tavitelnost a tím i teplotní odolnost, při které si udržuje částečně svoji pevnost. Dále je odolný vůči korozi a slabým anorganickým kyselinám. Ilustrace snímače

pro tuto metodu je na obr. 6. Ohřátí drátku je způsobeno průtokem elektrického proudu. Tento drátek je pak ochlazován proudícím vzduchem. Z dodávek energie pro různé provedení (CTA, CCA, CVA) lze zjistit rychlost proudění. Tyto typy anemometrů jsou velmi citlivé na změnu rychlosti proudění, ale nedokáží měřit směr proudění. Pro měření směru proudění je potřeba přidat více drátků. Problémem této metody je samotný drátek, který se velice jednoduše přetrhne [1].

Snímač se dvěma žhavenými drátky měří dvě složky rychlosti. Pro měření všech složek rychlosti je zapotřebí přidat další drátek, tj. dohromady tři drátky.

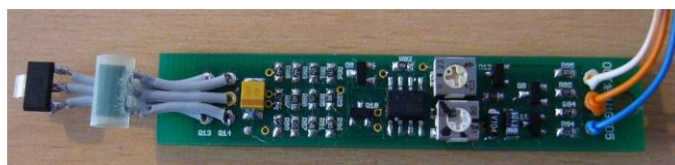


Obr. 6. Senzor metody žhaveným drátkem

2.6. Metoda žhavených elementů

Metoda žhavenými elementy je podobná metodě žhaveného drátku. Místo drátku se však použije pár elementů. Ty mohou být například diody, rezistory, PT100 atd. Jako jeden z příkladů je zde uveden pár transistorů. Jeden z páru slouží jako referenční a je udržován na teplotě okolí. Řídící obvod udržuje na druhém tranzistoru vyšší teplotu. Vlivem proudění se chladí a díky své vlastní vodivosti polovodičů se sám uzavírá či otevírá. Tyto změny se projevují jako změny elektrické veličiny, která je úměrná rychlosti proudění [1].

Tento typ senzoru je velice citlivý na změnu rychlosti proudění stejně jako metoda žhaveným drátkem. Má ale větší odolnost. Příklad takového senzoru je na obr. 7.



Obr. 7. Anemometr tvořený párem transistorových čidel (převzato z [1])

2.7. Metoda ultrazvukové anemometrie

Ultrazvuková anemometrie se používá převážně v meteorologii. Princip spočívá v šíření ultrazvukových vln mezi piezoelektrickými měniči, kdy se měří čas šíření vln od vysílače k přijímačům. Jde o jeden z nejpřesnějších metod měření rychlosti větru. Problém je však v konstrukci anemometru, která ovlivňuje rychlost proudění z důvodu vzniku vírů kolem ramen anemometru. Proto musí být anemometr kalibrován v aerodynamickém tunelu. Celková rychlost šíření vlny lze vypočítat podle následujícího vztahu

$$v = w + c \quad (12)$$

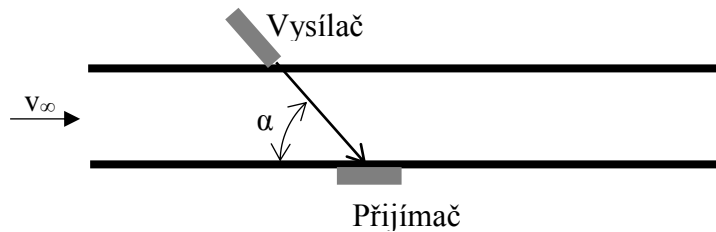
, kde v je celková rychlost šíření vlny, w je rychlost větru a c je rychlost šíření vlny ve vzduchu [4].

Existují dva nejpoužívanější druhy ultrazvukových anemometrů, a to se čtyřmi rameny a se šesti rameny. Příklady těchto anemometrů jsou vidět na obr. 8 a.



Obr. 8 a. Příklad šestiramenný (vlevo) a čtyřramenného (vpravo) anemometru

Dalším způsobem, jak měřit rychlost proudění je metoda tzv. dopplerovské ultrazvukové anemometrie. Jak už název napovídá, tato metoda využívá Dopplerova jevu. Jde o změnu frekvence ultrazvukového paprsku vlivem proudění tekutiny. Znázornění této metody je na obr. 8 b.



Obr. 8 b. Schéma dopplerovské ultrazvukové anemometrie

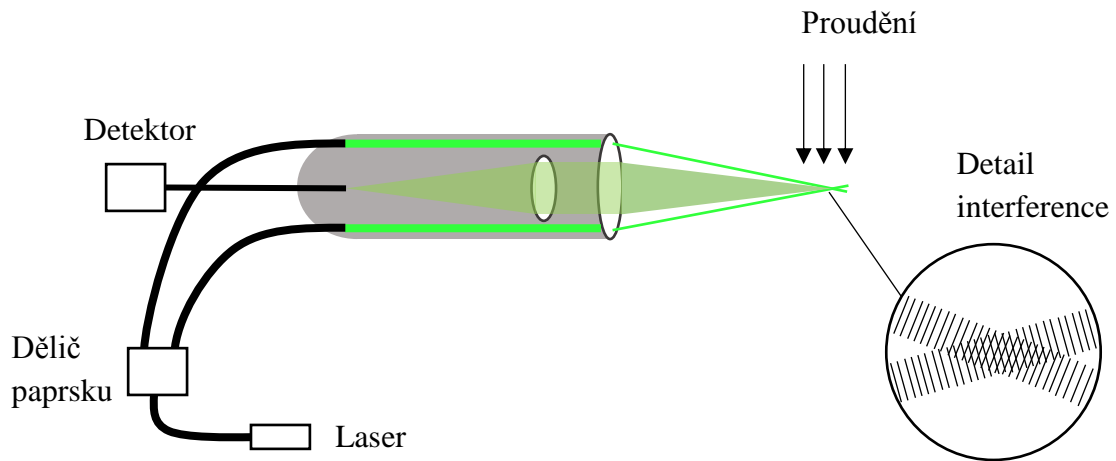
Rychlost proudění se vypočítá podle následujícího vzorce

$$v = \frac{c \cdot f_d}{2 f_0 \cos \alpha} \quad (13)$$

, kde c je rychlost zvuku v proudící tekutině, f_d frekvence snímaná přijímačem, f_0 frekvence vysílaná a α je úhel vysílaného paprsku zvuku [5].

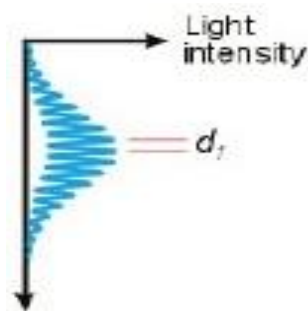
2.8. Metoda LDA

Metoda LDA (z anglického Laser-Doppler Anemometry) funguje na principu Dopplerova jevu. Jde o dva nebo více laserových paprsků, které se v tekutině kříží. V místě křížení vzniká interference. Je nutné, aby tekutina obsahovala pevné částice. Když taková částice prochází místem křížení paprsků laseru, světlo z paprsků se od této částice odrazí a vytvoří tzv. Dopplerův zákmit (obr. 10). Detektor pak snímá světelný odraz a vyhodnocuje jeho frekvenci. Porovnáním frekvence vysílaného paprsku s odraženým signálem od částice lze vypočítat velikost dané složky rychlosti [6] [7]. Schéma metody je na obr. 9.



Obr. 9. Schéma metody LDA

Tato metoda je velmi rozšířená, protože je neinvazivní, přesná a lze jí použít i pro proudění o vysokých teplotách nebo v tekutinách, které jsou agresivní vůči konvenčním sensorům. LDA metoda je absolutní a nemusí se kalibrovat [6].



Obr. 10. Rozložení světelné intenzity v místě křížení paprsků (převzato z [7])

Rychlost částice se vypočítá ze vzdálenosti mezi lokálními extrémy intenzity d_f , a Dopplerovou frekvencí f_D , tj. frekvencí odraženého signálu. Vzdálenost mezi lokálními extrémy intenzity d_f se vypočítá následovně [7]:

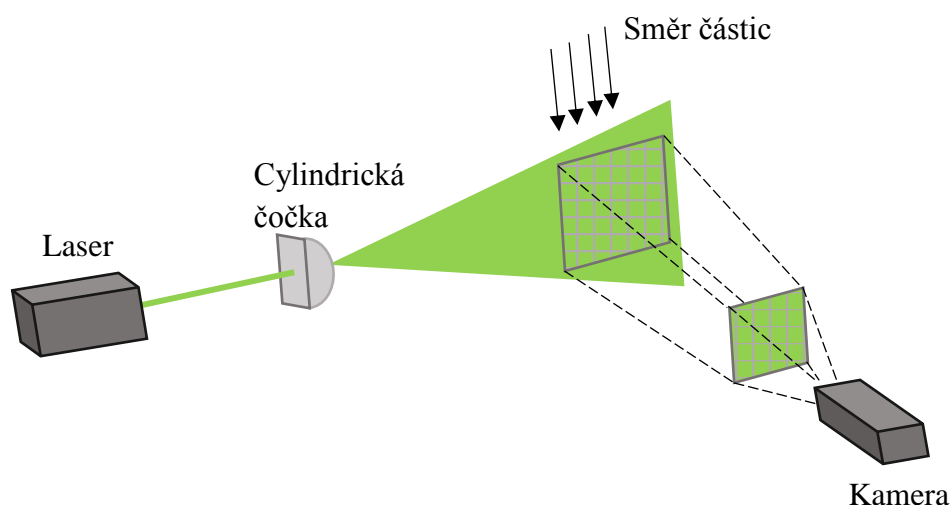
$$d_f = \frac{\lambda}{2\sin(\theta/2)} \quad (14)$$

, kde λ je vlnová délka paprsků laseru a θ je úhel, který paprsky svírají. Rychlost částice v je dána takto [7]:

$$v = d_f \cdot f_D \quad (15)$$

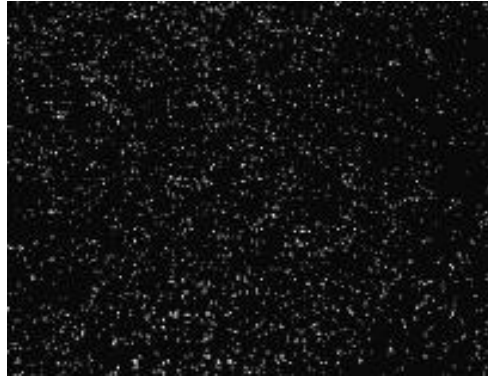
2.9. Metoda PIV

Metoda rovinné laserové anemometrie, tzv. PIV z anglického Particle Image Velocimetry, je další z metod, která využívá laserový paprsek. Tentokrát je laserový paprsek rozšířen přes cylindrickou čočku do tzv. laserového listu. Tento list prochází tekutinou, která musí obsahovat trasovací částice. Na plochu laseru je namířena kamera (CCD nebo CMOS), která snímá potřebný měřicí prostor. Řídící technika zajistí, aby se vyfotily dva snímky za sebou, které dělí čas v jednotkách milisekund. Příklad snímku je vidět na obr. 12. Tyto dva snímky se následně zpracují. Software pak vypočítá, jak se jednotlivé částice posunuly (v jakém směru) a z rozdílu času snímků vypočítá rychlost. V tomto případě metoda měří pouze dvě složky rychlosti. Schéma metody PIV je na obr. 11 [8].



Obr. 11. Schéma PIV metody

Je zjevné, že tato metoda zachycuje více částic a díky tomu dokáže měřit více bodů rychlostního pole. Je tedy mnohem méně náročná na měřicí čas než jakákoliv jiná metoda. Je ale zvýšená náročnost na optickou techniku a musí se před každým měřením kalibrovat. PIV dokáže měřit široký rozsah rychlosti a to od 0 až po nadzvukové. Stejně jako u metod ultrazvukové anemometrie a LDA je i PIV neinvazivní. Díky množství dat získaných zpracováním je možné vyhodnotit i další ukazatele proudění, jako je například vířivost nebo průtok kontrolní oblastí [8].



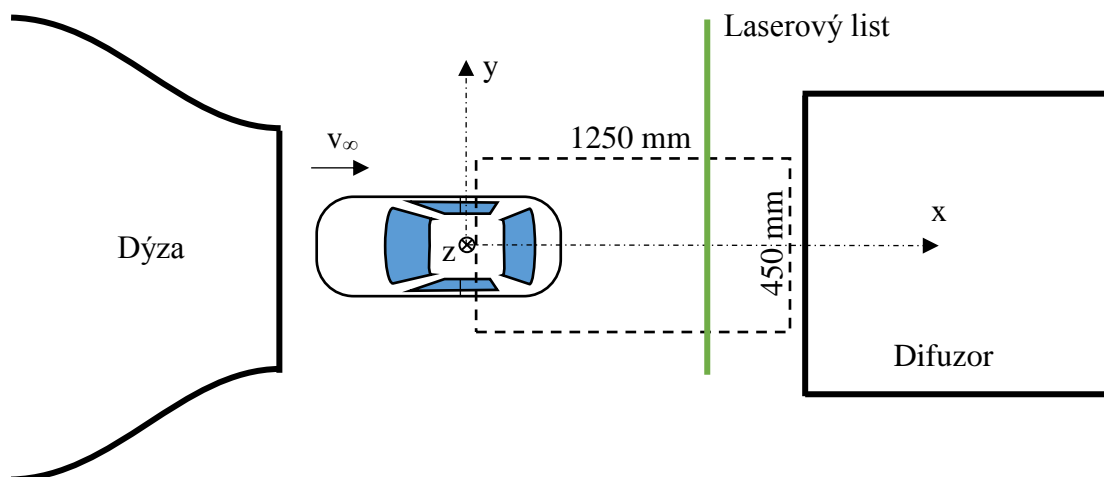
Obr. 12. Obrázek zachycený kamerou (převzato z [8])

Metoda PIV může být rozšířena o třetí složku rychlosti a to na tzv. Stereoscopic PIV, kde laserový list sledují dvě kamery šikmo v úhlu přibližně 45° . Jejich obrazy se musí překrývat. Tento princip je podobný vyhodnocování vzdálenosti objektů od lidských očí. Dále existují další modifikace jako například časosběrné PIV nebo Tomo PIV (tři složky rychlosti v objemu, nikoliv v rovině) [8].

3. Výběr vhodné měřící metody

Pro výběr metody měření úpravu modelu automobilu je stěžejní velikost měřícího prostoru. Dále je potřeba uvážit rozlišení rychlostního pole, tedy jak hustě budou rozmístěny vektory rychlosti v tomto poli. Předpoklad je, že rozmístění vektorů rychlosti v poli bude rovnoměrné. Měřená oblast má rozměry $1250 \times 450 \times 300$ mm a je znázorněna na obr. 13. Je-li uvažované změření vektoru rychlosti každých 10 mm ve všech směrech, potom $45 \cdot 30 \cdot 125 = 168750$ tj. přibližný počet vektorů rychlosti v rychlostním poli, který je potřeba změřit. Potřebný čas pro změření jednoho bodu je počítán přibližně 3 vteřiny. V tomto případě by čas potřebný k měření byl přibližně 6 dnů. Přesto, že jde o relativně hrubé rozlišení pole, je jasné, že s konvenčními anemometry, které měří pouze bodově, je nemožné takovou oblast změřit v reálném čase. Proto je nejvhodnější metodou metoda PIV a je tedy vybrána k vypracování pro daný účel.

Metoda PIV bude z důvodu změření všech složek rychlosti modifikována na Stereoscopic PIV, tj. na metodu PIV se dvěma kamerami. Základní princip metody PIV byl již vysvětlen v kapitole 2.9., proto nebude opakován, ale bude pouze prohlouben o podrobnosti, které jsou nezbytné k realizaci.



Obr. 13. Schéma měřicího prostoru a měřené oblasti (pohled shora)

3.1. Trasovací částice

Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.9., je zapotřebí, aby sledované proudící médium obsahovalo tzv. trasovací částice. Druhů částic je celá řada a liší se velikostí a materiálem, od kterého se odvíjí jejich aplikace. Částice musejí být dostatečně malé a lehké, aby odpovídaly pohybu tekutiny bez ovlivnění vlastností proudění, ale zároveň musejí být dostatečně velké, aby byly viditelné. Při výběru velikosti částic jde tedy o kompromis. Souvisí s tím také umístění generátoru částic tak, aby nedocházelo k vytváření tzv. slepých míst. Tedy míst s nízkou nebo dokonce nulovou koncentrací trasovacích částic. V tabulce č. 1 a 2 jsou uvedeny některé běžné trasovací částice podle materiálu, velikosti a aplikace. Dalším důležitým aspektem při výběru částic je schopnost rozptylu a refrakce světla. Přičemž rozptyl světla je závislý na poměru velikosti trasovací částice ku vlnové délce dopadajícího světla (v tomto případě laserového listu). Obecně platí, že čím větší poměr velikosti ku vlnové délce, tím větší rozptyl světla. To vše při zachovaném indexu refrakce. Co je ale důležité a závisí na rozptylu, je intenzita odraženého světla. Tato intenzita se sleduje obvykle ve směru kolmém na laserový list (z pozice kamery). Podle předešlého tvrzení se rozptyl světla s velikostí částice zvětšuje a může se zdát, že tomu bude naopak v případě intenzity odraženého světla. To ovšem neplatí a intenzita odraženého světla se zvětšuje také [9] [10].

Jak bylo řečeno výše, je zapotřebí, aby měly částice malou hmotnost, resp. hustotu, a to z důvodu setrvačných sil. Podle proudícího média a velikosti částice se tedy určí její materiál. To vyplývá z rovnic dynamiky tekutin. Na tato pravidla také navazuje doba odezvy částice na změnu vektoru rychlosti v proudící tekutině. Kvalitu párování částice a proudícího média vyjadřuje Stokesovo číslo. Čím je Stokesovo číslo menší, tím je lepší párování, interakce mezi dvěma fázemi proudu, v tomto případě částicí a proudícím médiem [9] [10]. Je také zapotřebí zvolit správnou koncentraci částic, od které se odvíjí velikost výsekové oblasti a tím i jemnost a přesnost změřeného rychlostního pole (viz 3.3. Kalibrace a vyhodnocování měření). Příklad snímků s malou a velkou koncentrací částic je vyobrazen v příloze č.2.

Typ	Materiál	Průměr částice d_p [μm]
Pevné	Polystyren	10-100
	Hliník	2-7
	Skelné kuličky	10-100
	Granule syntetických povlaků	10-500
Kapalné	Různé oleje	50-500
Plynné	Vzduchové bubliny	50-1000

Tab. 1. Typy částic pro kapalné médium [9]

Typ	Materiál	Průměr částice d_p [μm]
Pevné	Polystyren	0,5-10
	Hliník	2-7
	Hořčík	2-5
	Skelné mikro-balónky	30-100
	Granule syntetických povlaků	10-50
	Dioctyl ftalát (diethylhexyl ftalát)	1-10
Plynné	Kouř	<1
Kapalné	Různé oleje	0,5-10

Tab. 2. Typy částic pro plynné médium [9]

Pro účely měření PIV v laboratořích ústavu mechaniky tekutin a termodynamiky, ve kterých je tato práce realizována, se osvědčily částice v podobě kouře, který bude využit i pro měření v této práci.

3.2. Optická a snímací technika

Pro měření metodou PIV, jak je vidět na obr. 11., je zapotřebí snímací techniky. V tomto případě se jedná o kamery. Pro měření se všeobecně používají převážně CCD, sCMOS nebo CMOS kamery a není tomu jinak ani v tomto případě. Avšak pro měření metodou PIV je zapotřebí, aby tyto kamery byly schopny vyfotit dva snímky rychle za sebou, tj. v rozmezí milisekund. CCD čipy mají výhodu v malém šumu při nízké citlivosti, který však při velkém ISO rychle stoupá. Tyto čipy mají ale díky své konstrukci a způsobu čtení snímaných dat nevýhodu. Snímek dat se čte najednou a čas potřebný ke čtení je delší než u snímku snímaného po řádcích čipem CMOS. Čipy CMOS mají zesilovače signálu u každé buňky což zvyšuje šum. Rozdíl je také ve spotřebě. Čipy CMOS mají spotřebu výrazně nižší. Pro potřebnou kvalitu snímku je však zapotřebí optimalizací a tím se spotřeba o málo zvýší. Obecně platí, že CCD čipy jsou lepší než CMOS, mají vyšší dynamický rozsah, vyšší rozlišení a kvalitu a nízký šum. Čipy sCMOS jsou vylepšené čipy CMOS, které v současné době představují naprostou špičku a používají se pro časově rozlišené PIV (Time resolve PIV) [11] [12].

Klasické CCD senzory nemohou vyčíst data tak rychle, jak je potřeba v metodě PIV (v jednotkách milisekund). Proto se používají CCD senzory s IT (interline transfer) architekturou. Tyto senzory obsahují kanály pro transfer náboje, tzv. interline masks (v češtině vertikální čtecí registry), které jsou umístěny hned vedle jednotlivých fotocitlivých buněk. Kanály pak fungují podobně jako okamžitá RAM paměť, do které se uloží informace před vyčtením dat. Pak se data přesunou do horizontálního čtecího registru. Díky IT architektuře lze udělat dva obrázky velice rychle za sebou. Nevýhoda IT architektury je snížení světlo-citlivé plochy, tj. poloviční rozlišovací schopnost [13] [14].

V laboratořích mechaniky tekutin a termodynamiky jsou k dispozici CCD kamery, které budou, s ohledem na výše jmenované vlastnosti, využity i pro realizaci této práce. Tyto kamery mají velikost světlo-citlivé plochy 8,6x6,4 mm. Jde o senzor 2/3“.

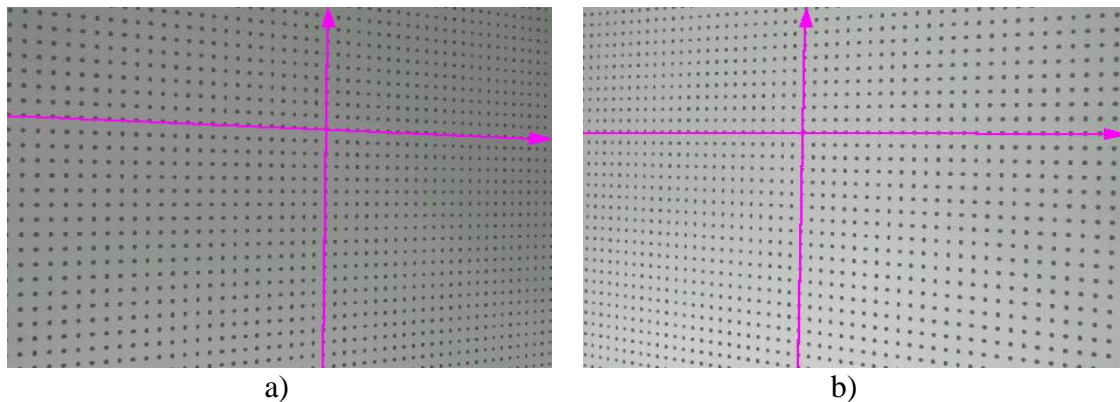
Součástí kamer musí být také optická technika. Optickou technikou se v tomto případě myslí objektivy kamer. Objektivů v současné době existuje celá řada. Takže si každý může vybrat podle účelu, ke kterému mají sloužit. Mezi důležité charakteristiky objektivu patří ohnisková vzdálenost, světelnost (tj. clonové číslo), sférické a bodové vady případně vady barvy. Od těchto vlastností se také odvíjí cena. V laboratořích mechaniky tekutin a termodynamiky jsou k dispozici kamery s objektivy, které jsou pro tyto kamery i účel měření vhodné. Jde o objektivy s ohniskovou vzdáleností 85 mm a clonovým číslem 1/1,4. Z uvedených parametrů lze vypočítat hloubku ostrosti podle následujícího vztahu

$$DOF = \frac{2 \cdot N \cdot c \cdot l^2}{f^2} \quad (16)$$

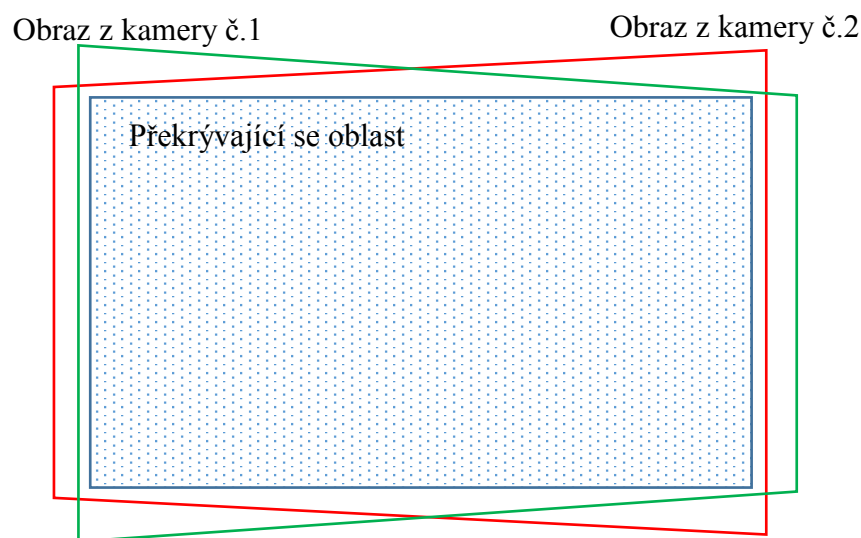
, kde N je jmenovatel clonového čísla, c je CoC (circle of confusion) pro tento snímač je $c=0,008$, l je ostřicí vzdálenost a f je ohnisková vzdálenost. Pro konkrétní čísla je vypočítaná hloubka ostrosti 1,6 cm. To znamená, že do vzdálenosti 7,95 mm od snímané roviny k objektivu a do vzdálenosti 8,01 mm od snímané roviny směrem od objektivu bude obraz stále relativně ostrý. Tyto vzdálenosti jsou vzhledem k velikosti snímané plochy velice malé. Proto musí být teplotní roztažnost konstrukce výrazně menší, než je hloubka ostrosti, aby nenastalo rozostření. Je také třeba dbát zvýšené pozornosti při manuálním ostření.

3.3. Kalibrace a vyhodnocování měření

Než je možné začít měřit je potřeba zařízení zkalibrovat. To se dělá pomocí kalibrační desky, která obsahuje síť kalibračních markerů, jejichž pozice jsou známy viz obr. 14. Porovnáním pozic markerů s korespondujícími pozicemi markerů snímaných kamerami se přizpůsobí ostření a snímaný obraz kamer tak, aby byla zajištěna co nejlepší shoda. Díky principu stereoscopic PIV je obraz kamer zdeformován. Pokud se tedy snímá například obdélník z úhlu (v tomto případě 45°), tak se obdélník vyobrazí jako lichoběžník, jde vlastně o perspektivu. Obrazy kamer se musejí navzájem překrývat tak, aby byla překrývající se oblast co největší. Pouze v této oblasti se dají změřit všechny složky rychlosti [15]. Jak vypadá schéma překrývající se oblasti je vidět na obr. 15.



Obr. 14. Snímky kalibračních markerů, a) Kamera č. 2; b) Kamera č. 1 (převzato z [15])



Obr. 15 Schéma překrývající se oblasti

Jakmile je kalibrace hotová, je možné přistoupit k samotnému měření. Každá kamera snímá dva snímky za sebou, které odděluje čas Δt . Pro dvě kamery tedy dva páry obrázků. Každý pár obrázků se rozdělí na tzv. výsekové oblasti. Tyto výsekové oblasti se zpracují. Mezi nimi se vypočítá tzv. korelace, která hledá špičky signálů a posouvá, resp. otáčí druhý výsek vůči prvnímu, tak aby se našla co nejlepší shoda. Jinými slovy hledá natočení a posuv výseku. Pak se vypočítá koeficient shody, který udává, jestli se má cross-korelace opakovat pro lepší výsledek. V podstatě jde o sumu intenzit, vysoká suma je dobrá shoda, nízká suma je špatná shoda. Cross-korelace je dána následujícím vztahem:

$$R(s) = \int I_1(x)I_2(x + s)dx \quad (17)$$

, kde I_1 je intenzita z výseku 1, I_2 je intenzita z výseku $1+\Delta t$, x je pozice, a nakonec s je posun [8] [16]. Samotná problematika cross-korelace je dosti obsáhlé téma a nebude tedy dále předmětem řešení této práce. Další krok je detekce špiček a oddělení špiček od šumu. Dále pak subpixelová interpolace, která zpřesňuje umístění špičky v rámci okolních pixelů. Metod, jak zpřesnit výsledek je hned několik. V PIV měření se většinou používá Gaussova interpolace, metoda nejmenších čtverců nebo parabolická interpolace [17]. Subpixelová interpolace je také dosti rozsáhlé téma a také nebude dále předmětem této práce. Nakonec se vypočítá vektorové pole posuvů v dané výsekové oblasti z výše zmíněných operací. Toto se opakuje pro všechny výsekové oblasti ve snímku. Velikost výsekových oblastí závisí na hustotě částic zaznamenaných v této výsekové oblasti. Výsekovou oblast tedy nelze zmenšovat směrem k nekonečnu. Hustota výsekové oblasti lze vypočítat následujícím vztahem:

$$N_I = \frac{C \cdot \Delta z_0}{M_0^2} D_I^2 \quad (18)$$

, kde C je koncentrace částic, Δz_0 je tloušťka laserového listu, M_0 je zvětšení, D_I je velikost výsekové oblasti. Pro měření PIV metodou se obecně doporučuje, aby hustota výsekové oblasti byla $N_I > 10$. Samozřejmostí je také výpočet chyb, které mohou být způsobeny hustotou výsekové oblasti, posuvem výseku, velkým posuvem částic čili velké Δt a podobně [8].

Je-li známo vektorové pole posuvů, lze toto pole vydělit časem Δt . Tím se vypočítá vektorové pole rychlostí. Tento postup se aplikuje i na druhý pár obrázků. Výsledkem jsou dvě vektorová pole rychlostí. Z těchto dvou vektorových polí lze vypočítat třetí složku rychlosti. Výsledkem je tedy rychlostní pole v rovině.

Všechny tyto kroky dnes obstarává software, bez kterého by měření ani nešlo realizovat, protože se jedná o velké množství dat a vyšší matematické operace.

4. Konstrukce zařízení

Tato část práce se bude zabývat konstrukcí zařízení pro traverzování oblasti měření metodou PIV. Nejprve bude vyhodnocena rozměrová náročnost v rámci statě 4.1. Poté bude vypracován koncepční návrh zařízení. Budou vyhodnocena zatížení, vypočteny průhyby konstrukce v rizikových místech, a nakonec budou vypočítány momenty motorů pro posuv konstrukce v ose z . Závěr této části bude věnován výsledku konstrukčního návrhu a výkresové dokumentaci.

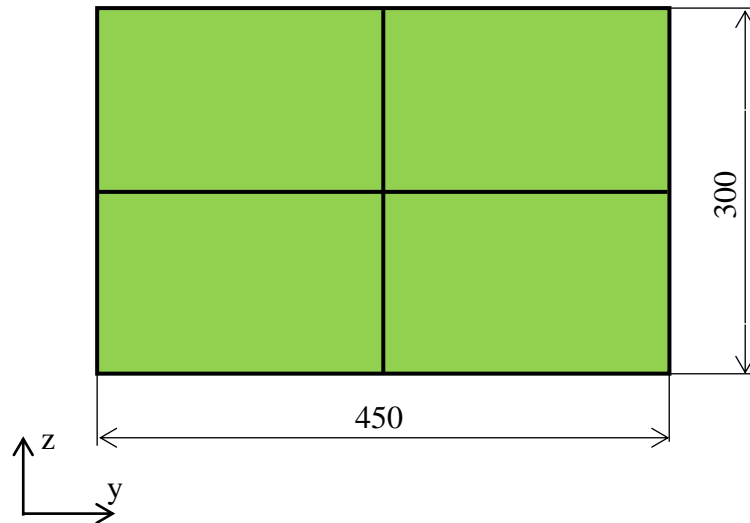
4.1. Snímaná rovina a umístění kamer

Z velikosti sensoru kamer (8,8x6,6 mm), snímané oblasti (240x180 mm) a ohniskové vzdálenosti (85 mm) vyplývají vzdálenosti kamer od laserového listu podle vztahu

$$l = \frac{w_o \cdot f}{w_s} \quad (19)$$

, kde f je ohnisková vzdálenost, w_o je šířka snímané oblasti, w_s je šířka snímače a l je vzdálenost snímače kamer od laserového listu. Tato vzdálenost vyšla 2312 mm.

Oblast měření zobrazena na obr. 13. bude traverzována podél osy x několika rovinami. Laserový list bude měřenou oblast prosvítat rovnoběžně s rovinou yz , tedy napříč tunelem. Oblast prosvícená laserovým listem bude rozdělená na čtyři části tak, jak je vidět na obr. 16. Z rozměrů se může zdát, že velikost snímané oblasti (viz výše) je příliš velká. Je to z důvodu perspektivy, o které bylo psáno ve statí 3.3. Kalibrace a vyhodnocování měření. Každá část bude snímána samostatně. Je tedy nutné k celkové koncepci přidat další 2 pohyby, které budou kamerami posouvat v ose y a z tak, aby se proměřily všechny 4 části v rovině yz .

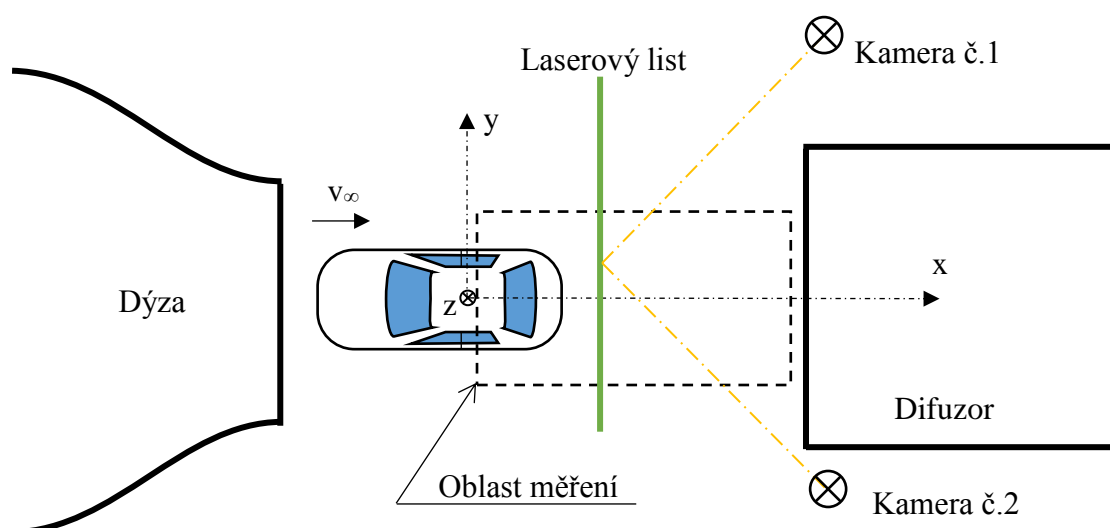


Obr. 16. Rozdělená měřená oblast

Z teorie v kapitole 2.9 je známo, že pro stereoscopic PIV je doporučený úhel os kamer 90° (45° vůči snímané rovině). Z tohoto a dalších předpokladů viz výše (ohnisková vzdálenost a velikost čipu), lze stanovit vzdálenost kamer od snímané roviny viz výše. Tuto vzdálenost lze pro ulehčení zapsat do vektoru $(x; y; z)$, a to pro první kameru $(1635; 1635; 0)$ a pro druhou kameru zrcadlově $(1635; -1635; 0)$. Vzdálenost kamer je schematicky zobrazena na obr. 17. Zde je poprvé viděna prostorová náročnost zařízení. Z obr. 17 je také vidět, že může dojít k zakrytí zorného pole kamer difuzorem. To může nastat především v situacích, kdy jsou zapotřebí změřit roviny, které se nacházejí blízko difuzoru. To může představovat zásadní problém pro změření proudění v dostatečné délce úplavu za automobilem. Řešením tohoto problému je posouvání kamer, a to v ose x za rovinu laserového listu. Tím se rovina změří z obrácené strany. Před tímto měřením je potřeba kamery znovu zkalibrovat.

Aby se zajistila vzdálenost mezi rovinou laserového listu a kamerami, musejí být laser a kamery pevně provázány. To je docíleno umístěním laseru na podpůrnou konstrukci kamer. Laser se tedy bude pohybovat s kamerami ve dvou směrech na jedné konstrukci. I po tomto řešení se však systém kamer bude muset kalibrovat před každou měřicí kampaní.

Dále nesmí být zařízení invazivní tzn. zařízení musí být postaveno okolo tunelu. Tímto jsou všechny podstatné parametry známy.



Obr. 17. Schéma umístění kamer

4.2. Konceptní návrh konstrukce

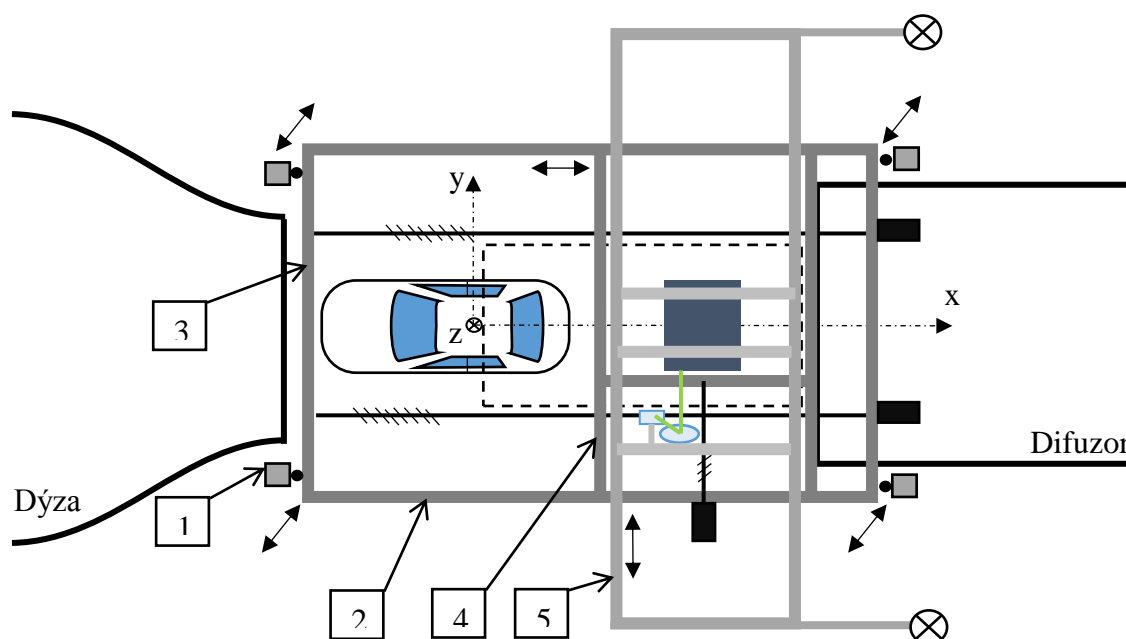
V předchozích statích (3. a 4.1) byly vyhodnoceny parametry podstatné pro vytvoření koncepčního návrhu. Následuje shrnutí těchto parametrů:

- 1) Z Principu stereoscopic PIV a vlastností kamer a objektivů vyplývá vzdálenost kamer od snímané roviny
- 2) Pro traverzování oblasti měření snímanou rovinou, která je rozdělena na čtyři části, je zapotřebí pohybů ve všech třech osách, tj. x , y a z .
- 3) Z důvodu tepelné roztažnosti a kalibrace před každým měřením je vhodné umístění laseru na stejné části konstrukce jako kamery
- 4) Zařízení nesmí zasahovat do oblasti proudění v tunelu

Při vytváření koncepčního návrhu se musejí uvážit další faktory, a to především charakter zařízení, jednoduchost konstrukce, finanční stránka, případně mobilita zařízení. První tři faktory spolu relativně úzce souvisí. Pokud jde o charakter zařízení, lze říci, že toto zařízení bude sloužit k měření. Proto je zde požadavek na zvýšenou přesnost a tuhost celé konstrukce. Z tohoto důvodu bude zařízení náročnější na finance. Jednoduchost konstrukce také ovlivňuje finanční stránku. Aby byla docílena dostatečná tuhost konstrukce, lze se

obrátit na tvarově složitější konstrukci nebo na rozměrově větší prvky konstrukce. V určitých případech bude jednodušší konstrukce finančně náročnější, než konstrukce tvarově složitá (např. příhradová konstrukce). Proto je potřeba tyto faktory uvážit a vytvořit mezi nimi jakési optimum. S těmito faktory samozřejmě souvisí i typ konstrukce. Tím je myšlen typ smontování konstrukce. Lze je rozdělit na konstrukce svařované, šroubované z profilů nebo šroubované z profilů stavebnicového typu. Konstrukce pájené a lepené se neuvažují. Také v těchto případech hraje roli finanční stránka, ale také stránka mobility. Pokud se totiž počítá s tím, že se zařízení bude v brzké době stěhovat, svařovaná konstrukce asi nebude ideální volba, a to i z pohledu financí a přesnosti konstrukce (zkroucení vlivem vnitřního pnutí).

Po zvážení těchto čtyř faktorů byl vytvořen koncepční návrh. Jde o konstrukci z profilů stavebnicového typu, které zajišťují dostatečnou tuhost, malou vlastní hmotnost, dostupnost a také mobilitu. Pro přesnost celého zařízení byla přidána lineární tyčová vedení s vozíky s nastavitelnou vůlí. Pohony budou zajištěny pohybovými šrouby s lichoběžníkovým rovnoramenným závitem. Schéma koncepčního návrhu je na obr. 18. Čáry se šipkami na obou koncích znázorňují směr pohybu. Šikmé znázorňují pohyb ve směru osy z . Celá konstrukce bude vedená lineárním vedením na čtyřech svislých sloupech, jejichž součástí jsou pohony pro posuv v ose z . Velkým tmavě modrým obdélníkem je znázorněn laser, který je upevněn ze spodu spolu se systémem zrcátek a cylindrickou čočkou.



Obr. 18. Schéma koncepčního návrhu konstrukce

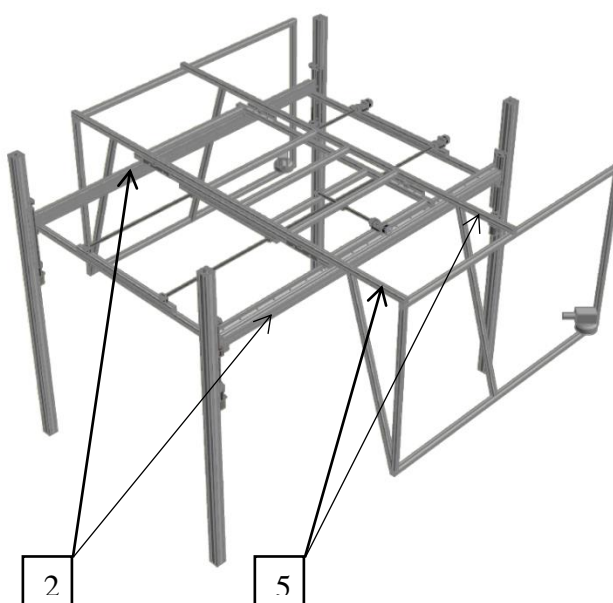
4.3. Konstrukce a dimenzování

Tato část bude, jak už název napovídá, věnována konstrukci a dimenzování v kritických místech. V předešlé části byl vypracován koncepční návrh, který bude dále zpracován.

Nejprve musejí být vyhodnocena zatížení. Zatížení se převážně skládají z vlastní váhy konstrukce. Dále pak z hmotností zařízení, která jsou ke konstrukci připevněny. Jedná se zejména o laser, kamery a pohony. Hmotnost laseru vč. Systému zrcátek a cylindrické čočky byla počítána do 10 kg. Hmotnosti ostatních zařízení byla převzata od výrobců. Hmotnosti zařízení jsou uvedeny v tab. 3. Hmotnost konstrukce je dána hustotou a geometrickými rozměry profilů. Většinou se u výrobců stavebnicových profilů uvádí hmotnost profilu na metr délky. Dále se počítá s hmotností spojovacích prvků, která je také u většiny výrobců uváděna.

Zařízení	Hmotnost [kg]
Pohon Y	3,781
Pohon X	9,182
Kamera vč. objektivu a otočného podstavce	3,84
Laser vč. sys. zrcátek a cylindrické čočky	10

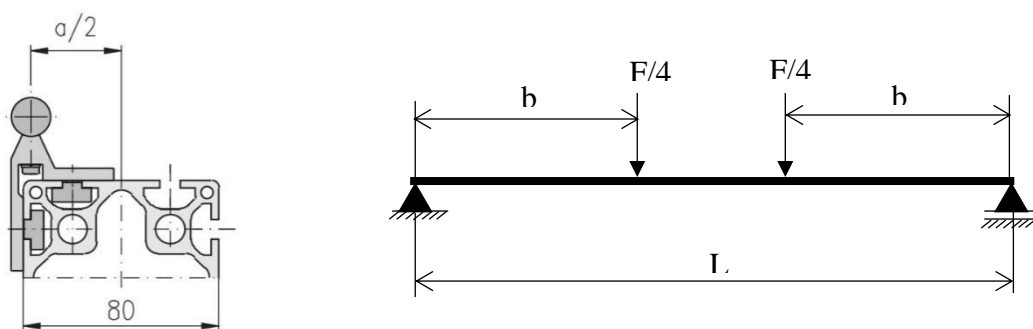
Tab. 3 Hmotnosti zařízení



Obr. 19 Prostorová ilustrace koncepčního návrhu

Jako kritické prvky byly definovány hlavní nosníky, jejichž součástí je i lineární vedení pro pohyb v ose x , přesněji vodící tyč s podpěrným profilem (obr. 19 pozice č. 2). Hlavní nosníky totiž drží zbytek celé konstrukce včetně připevněných zařízení. Důvodem je také jejich průhyb, protože při přejezdu z jednoho místa na druhé, se změní vzdálenost mezi střediskem ostření kamer a podložkou, na které je umístěn model automobilu. V každém místě by tedy byla snímaná rovina posunutá v ose z o průhyb nosníků v daném místě. Výrobce systému vedení na podpěrném profilu také uvádí geometrické a mechanické vlastnosti, jako je například kvadratický moment průřezu a Youngův modul pružnosti v tahu. Tyto vlastnosti jsou klíčové pro výpočty napětí a průhybů. Dalšími kritickými prvky byly uvažovány nosníky táhnoucí se napříč tunelem až ke kamerám (obr. 19 pozice č. 5). Jsou to vlastně nejdelší prvky konstrukce a drží hmotnost kamer spolu s dalšími nosníky a hmotností laseru.

Hlavní nosníky byly počítány jako nosníky na dvou podporách s dvěma zatěžujícími silami uprostřed. Uvažoval se rovinný ohyb. Schéma nosníku a průřez profilu je vidět na obr. 20. Parametry nosníku jsou v tab. 4. Délka hlavních nosníků byla zvolena delší, než bylo potřeba z důvodu univerzálnosti měřicího zařízení. Protože jsou nosníky dva a na každém jsou dva vozíky lineárního vedení, jsou zatěžující síly vyděleny čtyřmi. Jako kritický stav bylo zvoleno umístění zatížení symetricky doprostřed nosníku. Vzdálenost mezi vozíky, resp. silami, byla volena s ohledem na stabilitu konstrukce pro kamery a laser. Rozměr $a/2$ není v tuto chvíli důležitý.



Obr. 20. Schéma nosníku a průřez profilu

Zatěžující síla byla zaokrouhlena nahoru. Youngův modul pružnosti v tahu byl brán pro hliníkový profil. Ve skutečnosti bude modul pružnosti v tahu celé podsestavy větší z důvodu umístění ocelové vodící tyče a ocelového vodícího profilu.

Profil [mm]	80x80
Průměr vodící tyče d [mm]	16
Kvadratický moment průřezu vč. tyče J_x [mm ⁴]	2,72e6
Youngův modul pruž. v tahu [MPa]	7e4
Rozměr b [mm]	850
Délka nosníku L [mm]	2800
Zatěžující síla F/4 [N]	200
Jednotková hmotnost nosníku [kg/m]	8,8

Tab. 4. Parametry nosníku

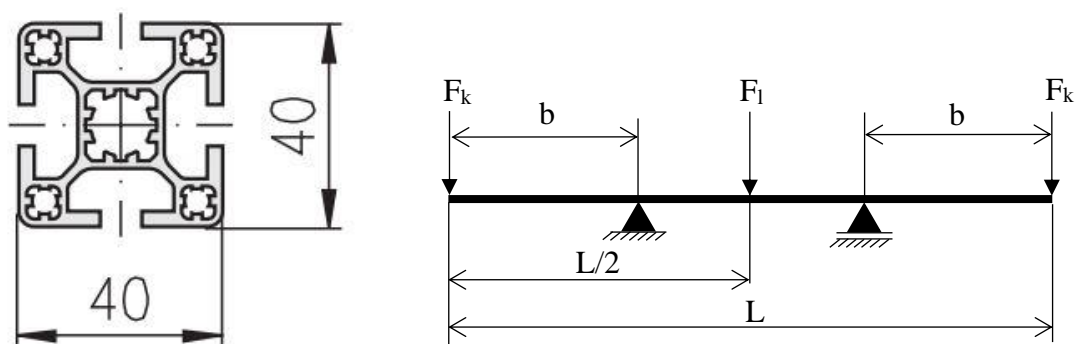
Pro tyto nosníky bylo vypočítáno napětí a průhyb. Je potřeba si uvědomit, že napětí i průhyb mohou mít ve skutečnosti nižší hodnoty právě z důvodu skutečné velikosti hodnoty modulu pružnosti v tahu. Tato skutečnost stojí na straně bezpečnosti. Průhyb je počítán jako maximální možný, a to je uprostřed nosníku, nikoliv pod vozíky lineárního vedení. Vozíky jsou od místa maximálního průhybu vzdáleny, proto průhyb v místech pod vozíky bude jistě menší. Hodnoty napětí a průhybu jsou vypsány v tab. 5. Hodnota napětí byla spočítána pouze orientačně z důvodu složitosti průřezu a tím i neznámého modulu průřezu W_o . Byl uvažován modul průřezu profilu bez vodící tyče. Důležitější je průhyb, který udává tuhost nosníku. Nutno podotknout, že hodnoty se mohou o málo lišit, protože byl nosník počítán jako rovinný ohyb, což neodpovídá dispozici profilu. Tato skutečnost může způsobit o málo větší průhyb, než bylo vypočteno.

Hlavní nosník	
Napětí [MPa]	4,2
Průhyb [mm]	0,767

Tab. 5. Hodnoty napětí a průhybu hlavních nosníků

Na řadu přicházejí nejdelší prvky, a to nosníky, které nesou hmotnost kamer, přidružených profilů a laseru (obr. 19 pozice č. 5). V tomto případě nebyla hodnota průhybu tak důležitá jako v předchozím případě. Nicméně i v tomto případě je průhyb ukazatelem

tuhosti, proto bude také spočítán. Tyto nosníky byly počítány jako nosníky na dvou podporách s převislými konci a se třemi zatěžujícími silami. Byl uvažován rovinný ohyb. Průřez a schéma nosníku je zobrazen na obr. 21. Parametry nosníku jsou v tab. 6. Délka nosníků se odvíjela od vzdálenosti kamer od snímané roviny a úhlu, který spolu svírají. Vzdálenost podpor byla volena co největší. Byla ale omezena velikostí konstrukce, která se pohybuje ve směru osy x . V tomto případě však nejsou tyto nosníky zatěžovány stejně, protože jsou kamery umístěny na převislých koncích přídružených nosníků, které mění rozložení zatížení na počítané nosníky (obr. 19 nebo viz výkres 12112-6-17-02). Z tohoto důvodu byl uvažován nejhorší případ.



Obr. 21. Průřez profilu a schéma nosníku

Zatěžující síly byly zaokrouhleny nahoru. Youngův modul pružnosti v tahu byl brán pro hliníkový profil.

Profil [mm]	40x40
Kvadratický moment průřezu J_x [mm ⁴]	10e4
Youngův modul pruž. v tahu [MPa]	7e4
Rozměr b [mm]	942
Délka nosníku L [mm]	3384
Zatěžující síla F_k [N]	220
Zatěžující síla F_1 [N]	100
Jednotková hmotnost nosníku [kg/m]	1,8

Tab. 6. Parametry nosníku

Pro tento nosník byly vypočítány hodnoty napětí a průhybu, metodou superpozice. Je potřeba si uvědomit, že modelovaný stav ve skutečnosti nemusí vůbec nastat, protože je zatížen i druhý nosník (viz obr. 19 pozice č. 5). Z tohoto důvodu mohou být hodnoty napětí a průhybu nižší, než bylo podle výpočtu očekáváno. Průhyb byl vypočítán na koncích nosníku, tedy v místě uchycení kamer. Hodnoty napětí a průběhu jsou vypsány v tab. 7. Hodnota průhybu se během pohybu nemění. Musí se však omezit chvění kamer. Proto byly přidány šikmé podpůrné profily, které zvyšují tuhost konstrukce (viz 12112-6-17-02 pozice č. 6).

Nosník kamerové konstrukce	
Napětí [MPa]	23,32
Průhyb [mm]	25,25

Tab. 7. Hodnoty napětí a průhybu nosníku kamerové konstrukce

4.4. Momenty krokových motorů pro posuvy

Jakmile jsou známy všechny rozměry hlavní konstrukce, jsou známa i zatížení pro pohyby. Pro výpočet momentů motorů jsou stěžejní právě zatížení, ale také zrychlení, s jakým je konstrukce uváděna do pohybu. Vzhledem k tomu, že nejsou potřeba velká zrychlení, nebude s nimi dále počítáno. Momenty motorů budou tedy záviset pouze na statickém zatížení pohybových šroubů. Z tohoto faktu plyne, že nebude zapotřebí počítat výkony motorů pro vodorovné pohyby, ale pouze pro pohyb v ose z. Momenty motorů pro vodorovné pohyby budou odhadnuty na základě tření v závitě pohybového šroubu a matice.

Byly navrženy pohybové šrouby s označením Tr 20x4, tedy velký průměr závitu $d=20$ mm a stoupání 4 mm/ot. Závit je jednochodý. Délka závitové části šroubu vyplývá z rozsahu pohybu a byla určena na 500 mm. Délka závitové části bronzové matice je 60 mm.

Z teorie pohybových šroubů je známo, že utahovací moment je větší než povolovací. Proto bude potřebný moment motoru počítán právě z utahovacího momentu, který se vypočítá následujícím vztahem

$$M_u = \frac{d_2}{2} F_o \operatorname{tg}(\gamma + \varphi') \quad (20)$$

, kde d_2 je střední průměr závitu, F_o je osová síla, úhel γ je úhel stoupání a úhel φ' je modifikovaný třecí úhel. Ten je dán vztahem $f' = tg \varphi'$, kde f' je modifikovaný koeficient tření, který se vypočítá z koeficientu tření mezi ocelovým šroubem a bronzovou maticí viz strojnické tabulky [18]. V tomto případě byl modifikovaný koeficient tření určen takto $f' = 1,03 \cdot f = 0,1545$, kde f je zmiňovaný koeficient tření mezi ocelí a bronzem. Osová síla F_o se vypočítá ze zatížení následovně

$$F_o = \frac{mg}{i} \quad (21)$$

, kde m je hmotnost celé konstrukce, g je gravitační zrychlení, a i je počet pohonů, které budou zatížení přenášet. V tomto případě $i=4$, na každém sloupu jeden pohon. Hmotnost m celé konstrukce byla zaokrouhlena nahoru a to na 220 kg. Výsledný utahovací moment je přibližně 1,5 Nm. Utahovací moment byl vynásoben bezpečností $k=1,4$. Pro takovouto bezpečnost je výsledný moment 2,1 Nm.

Následuje kontrola tlaku v závitech, která se provedla dle obvyklých zvyklostí pomocí vztahu

$$p = \frac{F_o}{\pi \cdot D_2 \cdot n \cdot H_1} \leq p_d \quad (22)$$

, kde D_2 je střední průměr závitu matice, $n = l/s$ je počet závitů v matici (l je délka závitové části matice a s je stoupání závitu) a H_1 je nosná výška závitu. Nosná výška závitu se pak vypočítá podle vztahu

$$H_1 = \frac{d - D_1}{2} \quad (23)$$

, kde d je průměr šroubu a D_1 je malý průměr závitu matice.

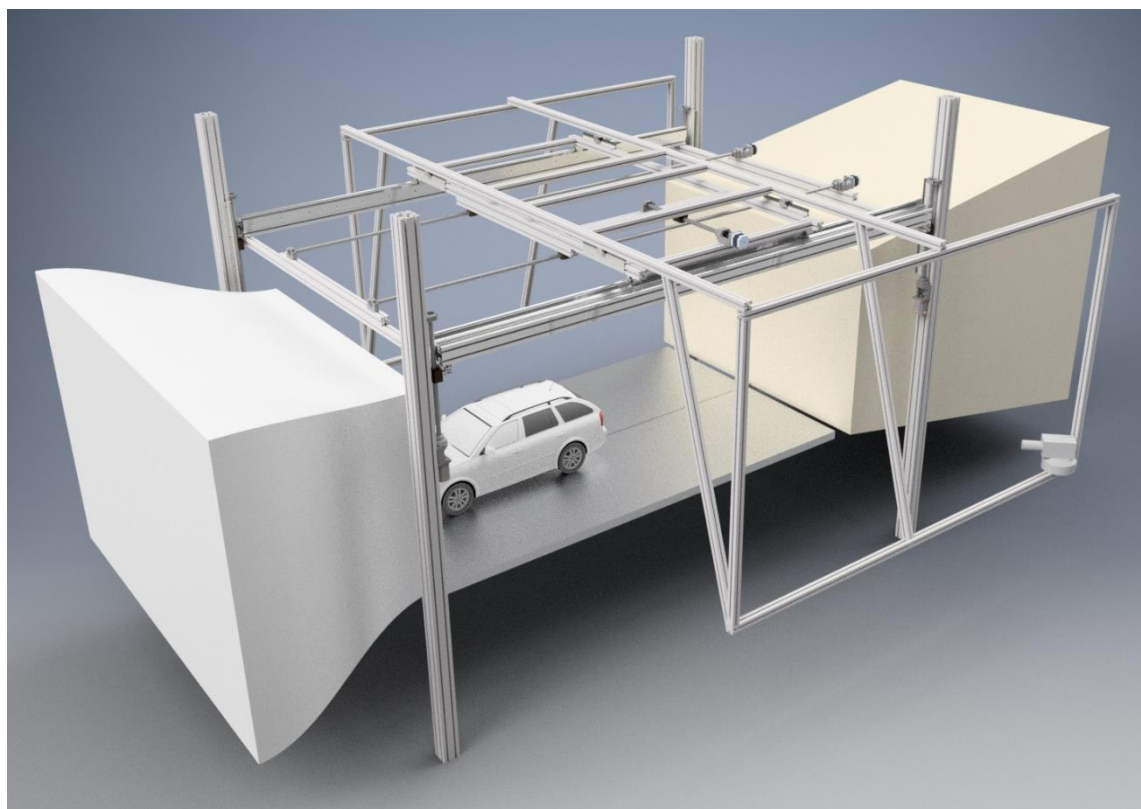
Kontrola tlaku v závitech vyšla $p=0,32 \text{ MPa} < p_d=10 \text{ MPa}$, tj. s výraznou rezervou. Dalším, logickým krokem je kontrola pohybového šroubu na vzpěr. To však není nutné, protože je konstrukce vedena lineárním vedením na sloupech, které neumožňuje výchylku pohybového šroubu vznikající při působení vzpěru a překročení kritické síly. Návrh pohonu je tedy u konce.

Výběr krokového motoru byl proveden na základě výpočtu utahovacího momentu a nabídky prodejců. Byl zvolen dvoufázový krokový motor s momentem 2,2 Nm, tj. s větší

bezpečností. Momenty ostatních krokových motorů byly voleny 0,6 Nm s ohledem na třecí a setrvačné síly.

4.5. Výkresová dokumentace

Byly navrženy a zpracovány veškeré potřebné parametry k vytvoření detailního návrhu podle koncepčního návrhu. Na následujících listech jsou zobrazeny rendery sestavy návrhu v CAD software (obr.22 a obr.23). Rendery neobsahují spojovací prvky z důvodu náročnosti na výpočetní výkon PC. Podrobnější výkresová dokumentace je součástí přílohy č. 1.



Obr. 22 Dokončený návrh konstrukce



Obr. 23 Detail vedení a pohonu konečného návrhu

5. Realizace návrhu

V této části práce bude popsán postup sestavení zařízení až do funkčního stavu, který bude v další kapitole ověřen a zhodnocen.

Pokud jsou všechny součásti k dispozici, je možné začít se stavbou. Nejprve budou sestaveny pohony konstrukce. Každý pohon se skládá z pohybového šroubu s upravenými konci pro upevnění ložisek, ložiskových domečků, matice s lichoběžníkovým závitem, držáku motoru, spojky, pojistného kroužku a krokového motoru. Výkresová dokumentace pohybového šroubu je součástí přílohy č.2 (výkres č. 2 ks 12112-5-17-00-01 a 5 ks 12112-5-17-00-02). Na konci, na kterém se nachází jemný závit, je umístěn ložiskový domek s pevným (v axiálním směru) ložiskem a pojistnou maticí. K tomuto domku je čtyřmi šrouby přimontován držák motoru. K držáku motoru je přišroubován motor pomocí čtyř šroubů. Pro spojení konce pohybového šroubu a hřídele motoru je použita svěrná spojka s pružným elementem. Na opačném konci pohybového šroubu je umístěn ložiskový domek s volným (v axiálním směru) ložiskem, které je na pohybovém šroubu zajištěno pojistným kroužkem. Typ motoru se mění v závislosti na použití pohonu. Čtyři nejsilnější pohony, sloužící k pohybu ve směru osy z, se namontují na čtyři největší profily (myšleno průřezem). Ty budou sloužit jako sloupy (viz výkres č. 12112-6-17-00 pozice č. 6).

Dále se sestaví konstrukce, která se pohybuje po hlavních nosnících ve směru osy x (viz výkres č. 12112-6-17-01). Ta se skládá ze dvou párů profilů a jednoho pomocného profilu pro upevnění pohonu, několika spojovacích úhelníků a čtyřech krátkých lineárních vedení včetně nasunutých čtyřech vozíků (jeden na každém vedení), které slouží pro pohyb konstrukce kamer ve směru osy y .

Na řadu přichází hlavní a nejvíce problematická část konstrukce. Problematická je především z důvodu hmotnosti a tím špatné manipulovatelnosti. Jsou to čtyři hlavní sloupy, které mají namontovány čtyři nejsilnější pohony a krátká lineární vedení s nasunutými vozíky. Je zapotřebí sloupy zafixovat k zemi, aby se nehýbaly a nebyly tak nebezpečné a držely tuhost konstrukce. Jakmile jsou sloupy zafixovány, je možné namontovat dva dvoumetrové profily táhnoucí se napříč tunelem od matice pohonu k matici pohonu (viz výkres č. 12112-6-17-00 pozice č. 7). Na tyto profily lze namontovat několik krátkých profilů k montáži vozíků lineárního vedení a jako spojku, dva hlavní nosníky (viz výkres č. 12112-6-17-00 pozice č. 5), které obsahují lineární vedení s nasunutými čtyřmi vozíky (dva na každém nosníku). Mezi tyto nosníky se rovnoběžně namontují dva dlouhé pohony, sloužící k posuvu v ose x .

Následuje připevnění konstrukce sloužící k pohybu v ose x (viz výkres č. 12112-6-17-01). Ta se namontuje na čtyři vozíky, které jsou již nasunuty na vedení hlavních nosníků. Na tuto konstrukci se namontují dva nejdelší profily, které se táhnou napříč tunelem (viz výkres č. 12112-6-17-02 pozice č. 2). Tyto profily jsou namontovány na vozíky a spojeny třemi krátkými profily. Jeden ze tří profilů slouží pouze pro upevnění matice pohonu, který slouží k pohybu v ose y . Tyto dva dlouhé a tři krátké profily jsou součástí konstrukce kamer.

Následuje namontování kratšího pohonu se slabším motorem mezi konstrukci kamer a konstrukci, která se pohybuje v ose x . Namontuje se maticí na konstrukci kamer (12112-6-17-02) a ložiskovými domky na konstrukci, která se pohybuje ve směru osy x (12112-6-17-01).

Na dva nejdelší profily (výkres č. 12112-6-17-02 pozice č. 2) se z každé strany namontují podpůrné profily. Jde o dva páry profilů (výkres č. 12112-6-17-02 pozice č. 4 a 3) a jeden pár šikmých profilů sloužící ke zvýšení tuhosti konstrukce (výkres č. 12112-6-17-02 pozice č. 6). Na tyto podpůrné nosníky se připevní kamery, které jsou upevněny na otočných podstavcích sloužící k jemnému úhlovému nastavení kamer. V neposlední řadě se na konstrukci kamer připevní laser s příslušenstvím jako je cylindrická čočka, zrcátka apod. Laser je umístěn pod dvěma spojovacími profily, které spojují dlouhé profily, které se táhnou napříč tunelem. To vše podle výkresu č. 12112-6-17-02.

Nakonec se zavede elektroinstalace a vytvoří se program pro řízení pohonů.

Samozřejmostí je také vytvoření kalibrační desky s terčíky, aby se zajistila správná kalibrace a následná funkčnost. Výsledek realizace je možné vidět na obr. 24 a 25.



Obr. 24 Pohled sestaveného zařízení

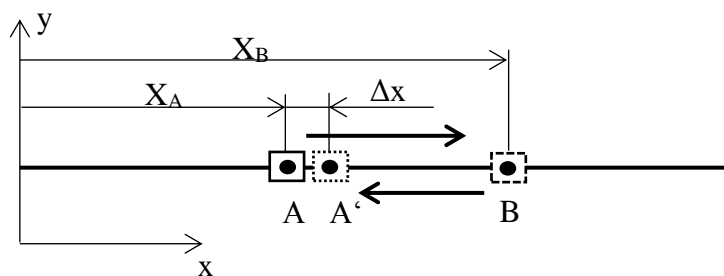


Obr. 25 Detail vedení sestaveného zařízení

6. Funkčnost zařízení

Po realizaci lze ověřit funkčnost zařízení. Ta spočívá ve funkčnosti pohonů, dále v opakovatelné přesnosti polohování a také v ověření průhybu hlavních nosníků (viz výkres č. 12112-6-17-00 pozice č. 5).

Funkčnost pohonů se ověří přejezdem z místa na místo. Opakovatelnost přesnosti polohování je míra, při které se zařízení vrátí do počátečního bodu do určité délkové tolerance. Zařízení začíná obecně v nějakém bodě A, přejeđe do bodu B v přiměřené vzdálenosti od A a vrací se zpět do bodu A. Lze označit jako A'. Přesnost je pak velikost rozdílu Δx vzdáleností od počátku souřadnicového systému k bodu A a k bodu A'. Schematicky je tato přesnost zobrazena na obr. 26.



Obr. 26. Schéma opakovatelnosti přesnosti polohování

Změření průhybu hlavních nosníků (obr. 19 pozice 2) je prováděno úchylkoměrem uprostřed délky těchto nosníků, ve které byl průhyb také počítán. Následně se tato hodnota porovná s výpočtem a zhodnotí se výsledek.

7. Závěr

V předchozích statích byla zpracována rešerše některých metod měření rychlostního pole. V rámci rešerše byly popsány principy, výhody a nevýhody vybraných metod. Na základě úvahy o době měření konvenčními metodami, kdy by doba potřebná ke změření celé oblasti měření byla přibližně 6 dní, byla vybrána metoda PIV. Tato metoda šetří čas a je také přesnější než konvenční metody.

V kapitolách 3.1.-3.3. byly popsány potřebné detaily k realizaci měření metodou PIV. Byla popsána problematika výběru trasovacích částic s ohledem na materiál, velikost a odrazivost. Na základě těchto parametrů a zkušeností byly vybrány trasovací částice v podobě kouře. Optická a snímací technika byla dalším tématem. Zde byly vyjmenovány nejpoužívanější typy snímačů a jejich výhody a nevýhody. Byly také zmíněny vlastnosti objektivů a jejich poruchy. Vzhledem k tomu, že laboratoře mechaniky tekutin a termodynamiky disponují CCD kamerami, které se osvědčily, byly použity také pro tuto práci. Stejně tomu bylo i u objektivů. Používané kamery jsou Dantec HiSense PIV/PLIF C4742-53-12NR s objektivy s manuálním ostřením, které mají ohniskovou vzdálenost 85 mm a clonové číslo 1/1,4. V další části byl popsán postup kalibrace a vyhodnocování včetně nezbytných parametrů. Postup vyhodnocování obstarává ovládací software.

V rámci kapitoly 4 byl vytvořen koncepční návrh konstrukce zařízení pro traverzování metodou PIV. Konečný návrh byl vytvořen na základě rozměrové analýzy, výpočtu průhybů nosníků v kritických místech a také výpočtu momentů krokových motorů potřebných k pohybu částí zařízení. Dále byla vytvořena výkresová dokumentace k realizaci návrhu.

V části 5. Realizace návrhu byl popsán postup sestavení zařízení po etapách.

Nakonec byl popsán postup ověřování funkčnosti zařízení v kapitole 6.

Po sestavení zařízení, zavedení elektroinstalace a instalaci řídicího systému lze říci, že pohony fungují. Z tohoto pohledu je zařízení funkční a provozuschopné. Opakovatelnost polohy je 1,2 mm. Technický pracovník by s touto nepřesností měl počítat a přizpůsobit tomu způsob měření. Tím je myšleno používat pohony při měření pouze jedním směrem a nevracet se do již překročeného bodu. Nicméně i tato nepřesnost je v porovnání s ostatními rozměry malá. Co se týče průhybu nosníků, lze říci, že průhyb byl ve skutečnosti menší, než bylo modelováno viz tab. 8. Je to především z důvodu zaokrouhlování hmotnosti konstrukce směrem nahoru. V tomto případě je to pozitivní výsledek a nemusí se tak korigovat tento průhyb. Zařízení je tedy po všech stránkách funkční a návrh byl úspěšný.

Hlavní nosník (viz obr. 19 pozice 2)	
Způsob	Průhyb [mm]
Výpočet	0,767
Měření	0,65

Tab. 8 Porovnání průhybu hlavního nosníku

Použitá literatura

1. **Vrbický, Jiří.** Senzor měření rychlosti proudění vzduchu v elektrickém stroji. [Online] 2013. https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=65861.
2. **Kühn, Stefan.** Tří miskový anemometr. [Online] 2004. <https://cs.wikipedia.org/wiki/Anemometr#/media/File:Anemometer.jpg>.
3. **Airflow.** Lopatkový anemometr LCA501. [Online] <http://www.airflow.cz/images/pristroje/lca501.gif>.
4. **Hůlka, Bc. Jakub.** Ultrazvukový anemometr. [Online] 2015. https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=99920.
5. **Prof. MUDr. Ivo Hrazdira, DrSc.** Úvod do ultrasonografie. [Online] 2008. http://www.med.muni.cz/dokumenty/pdf/uvod_do_ultrasonografie1.pdf.
6. **Prof. Ing. Václav Uruba, CSc.** Měření rychlosti - Laser Doppler Anemometry. [Online] <http://www.it.cas.cz/~uruba/docs/ZIE/LDA.pdf>.
7. **DantecDynamics.** Laser Doppler Anemometry. [Online] <https://www.dantecdynamics.com/docs/support-and-download/research-and-education/lda.zip>.
8. —. Particle Image Velocimetry. [Online] <https://www.dantecdynamics.com/measurement-principles-of-piv>.
9. **Xiangqun Son, Hui Meng.** Tracer Particles and Seeding for PIV. [Online] 2001. https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=5&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiAha3Ly-jVAhVBPRQKHbgZAW0QFghGMAQ&url=http%3A%2F%2Fwwwcourses.sens.buffalo.edu%2Fmae513%2FLecture__Seeding_Particle_for_PIV.ppt&usg=AFQjCNGIPv-qDt3CnxoF0b_c7ZxdQWOUw.
10. **unknown.** Tracer particles and seeding for Particle Image Velocimetry. [Online] 1997. http://www.aere.iastate.edu/~huhui/teaching/2014_Summer/AerE545/lecture-notes/reference/PIV-seeding-1997pdf.pdf.
11. **Šurkala, Milan.** Fotomobily: Snímací čipy CMOS vs. CCD. [Online] 2009. <https://www.digimanie.cz/fotomobily-snimaci-cipy-cmos-vs-ccd/2885>.
12. —. Jak si vybrat kompaktní snímací čipy. [Online] 2010. <https://www.digimanie.cz/jak-si-vybrat-kompakt-snimaci-cipy/3253-2>.
13. **ANDOR.** CCD Sensor Architectures. [Online] Andor an Oxford Instruments Company. <http://www.andor.com/learning-academy/ccd-sensor-architectures-architectures-commonly-used-for-high-performance-cameras>.
14. **Fischer, Jan.** Optoelektronické snímače fotodiodová pole. [Online] 2015. http://measure.fel.cvut.cz/system/files/files/cs/vyuka/predmety/A3M38VBM/A3M38VBM_2015_pred_CMOS_CCD_5.pdf.
15. **DantecDynamics.** Stereoscopic PIV. [Online] 2010. https://www.dantecdynamics.com/docs/support-and-download/research-and-education/Stereoscopic_PIV_educational_slide_show.ppt.
16. **Bastiaans, Rob J.M.** Cross-correlation PIV; theory, implementation and accuracy. [Online] 2000. <http://alexandria.tue.nl/repository/books/531139.pdf>.

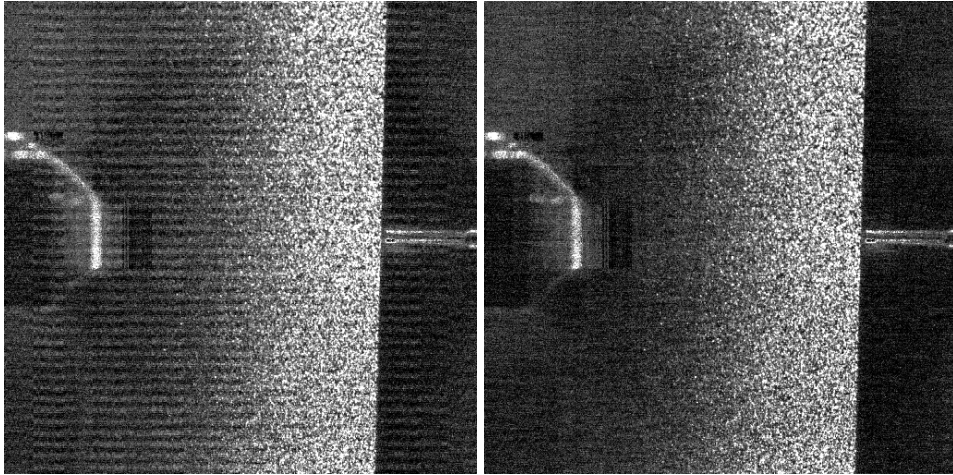
17. **H. Nobach, N. Damaschke and C. Tropea.** High-precision sub-pixel interpolation in PIV/PTV image processing. [Online]
http://lces.dem.ist.utl.pt/lxaser/lxaser2004/pdf/paper_24_1.pdf.
18. **Jan Leinveber, Pavel Vávra.** *Strojnické tabulky*. Úvaly : Albra - pedagogické nakladatelství, 2005. ISBN 80-7361-011-6.
19. **Smith, Barton.** Inviscid Unsteady Flow with Varying Seeding Density. [Online] 2015.
http://piv.de/uncertainty/?page_id=46.

Příloha č. 1

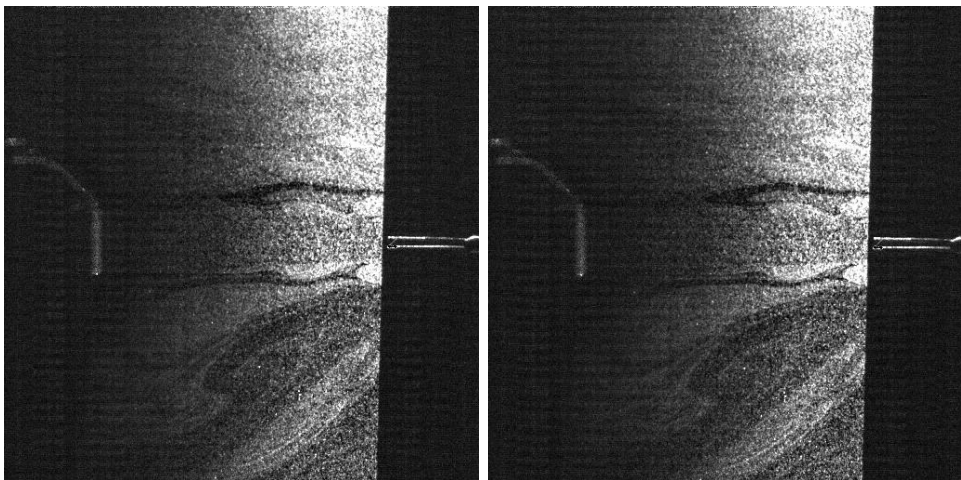
Seznam výkresové dokumentace:

Hlavní sestava	č. výkresu 12112-6-17-00
Suport X	č. výkresu 12112-6-17-01
Pohon Y	č. výkresu 12112-6-17-01-01
Konstrukce kamer	č. výkresu 12112-6-17-02
Pohon Z	č. výkresu 12112-6-17-03
Pohon X	č. výkresu 12112-6-17-04
Pohybový šroub 1	č. výkresu 12112-5-17-00-01
Pohybový šroub 2	č. výkresu 12112-5-17-00-02

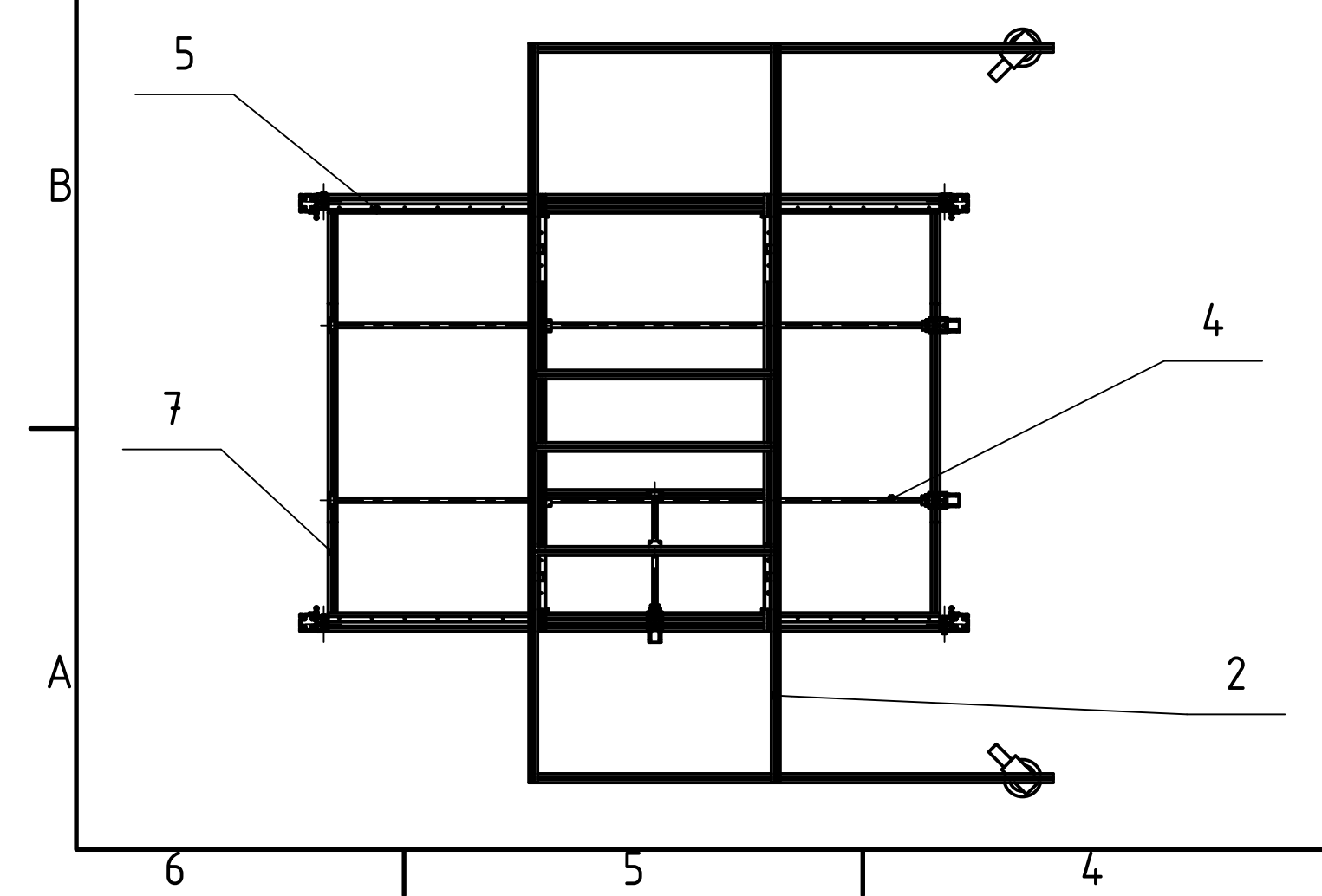
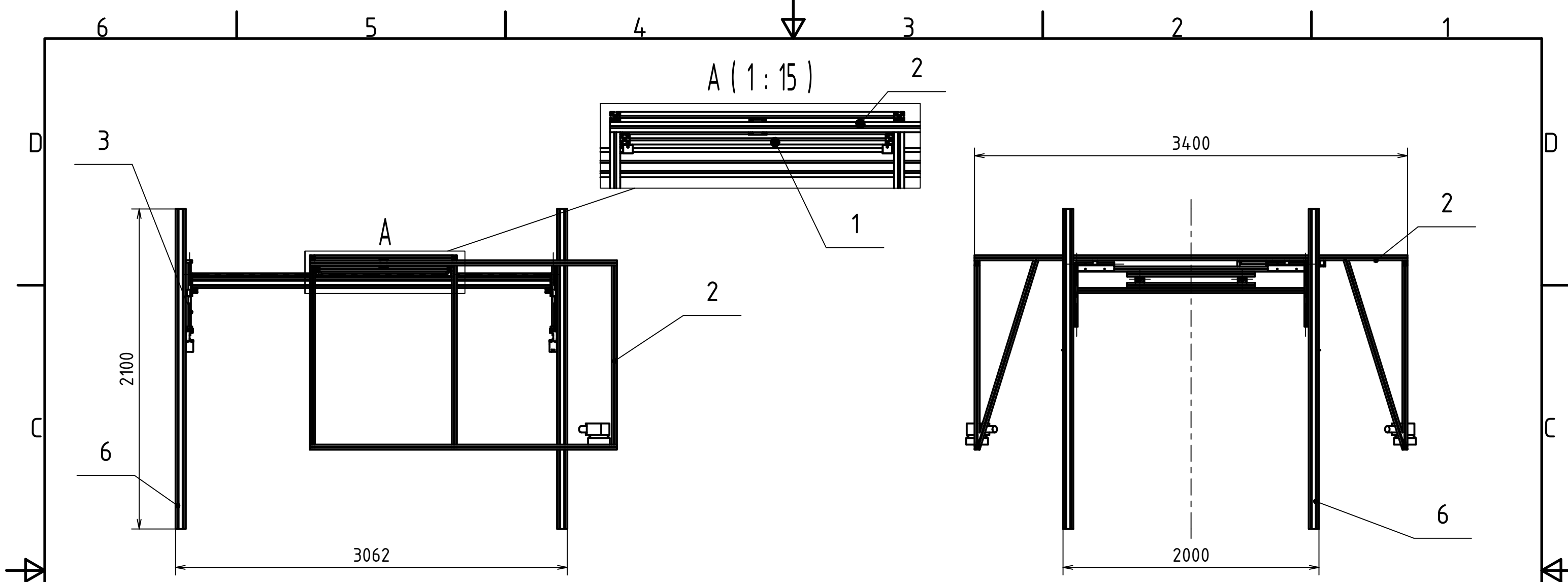
Příloha č. 2



Obr. 2/1 Příklad snímků s nízkou koncentrací částic (převzato z [19])



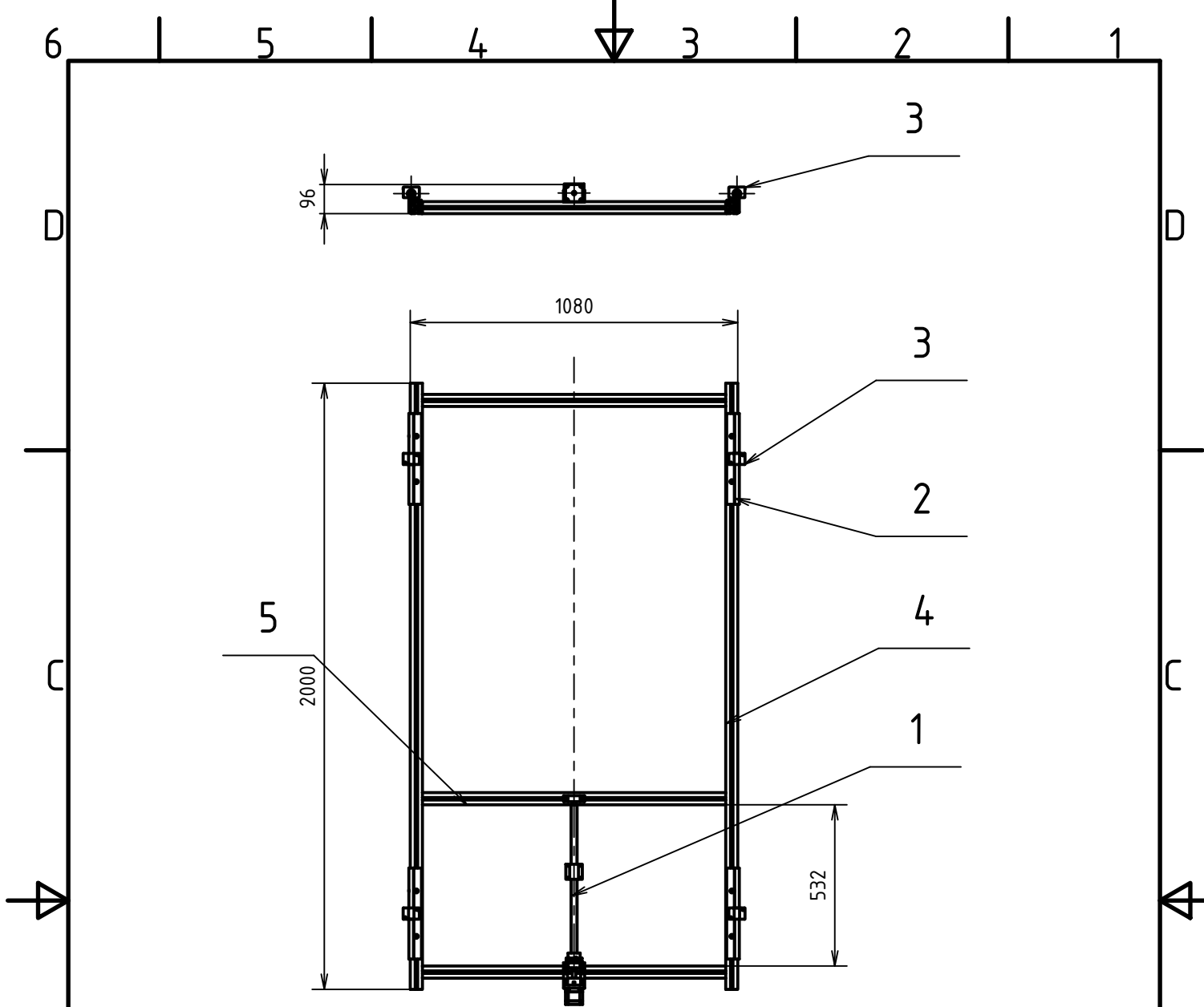
Obr. 2/2 Příklad snímků s vysokou hustotou částic (převzato z [19])



č. poz.	Název - rozměr	č. výkresu - č. normy	Hmotnost [kg]	Množství
1	Suport X	12112-6-17-01	23,656	1
2	Konstrukce Kamer	12112-6-17-02	57,184	1
3	Pohon Z	12112-6-17-03	4,521	4
4	Pohon X	12112-6-17-04	9,423	2
5	Hlavní nosník s vedením	4.19.00.080080.83 NH12.16.1/2800	24,64	2
6	Profil 80 - 2100	80x80L-N8-2100	11,193	4
7	Profil 40 - 2000	40x40L-N8-2000	3,6	2

NAVRHL	Podpis	Datum	STATIK	Podpis	Datum	HMOTNOST	217,834 kg	MĚŘÍTKO	1:30
KRESLIL	T. Peterka	21.6.2017	NORM. REF.			MIKROFILM		Č. SVITKU	
SKUPINÁŘ			PŘEZK.			SESTAVA		KUSOVNIK	
TECHNOL.			SCHVÁLIL			STARÝ V.			

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
 NÁZEV: **Hlavní sestava traverzéro**
 TYP:
 ČÍSLO VÝKRESU: **12112-6-17-00**
 LIST:



Č. poz.	Název - rozměr	Č. výkresu - č. normy	Hmotnost [kg]	Množství
1	Pohon Y	12112-6-17-01-01	3,781	1
2	Vedení Y	4.119.0A.37203720-A00A00/300 4.119.0W.21.16-SF0SF0/300	1,599	4
3	Otevřený vozík rozšířený pro podepřené tyče	TBR-16	0,146	4
4	Profil 40x40L-N8-2000	-----	3,6	2
5	Profil 40x40L-N8-1000	-----	1,8	3

NAVRHL	Podpis	Datum	STATIK	Podpis	Datum	HMOTNOST	kg	MĚŘÍTKO	1:20
KRESLIL	T. Peterka	20.6.2017	NORM. REF			MIKROFILM		Č. SVITKU	
SKUPINÁŘ			PREZK.			SESTAVA	12112-6-17-00	KUSOVNIK	
TECHNOL.			SCHVÁLIL			STARÝ V.			

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

NÁZEV

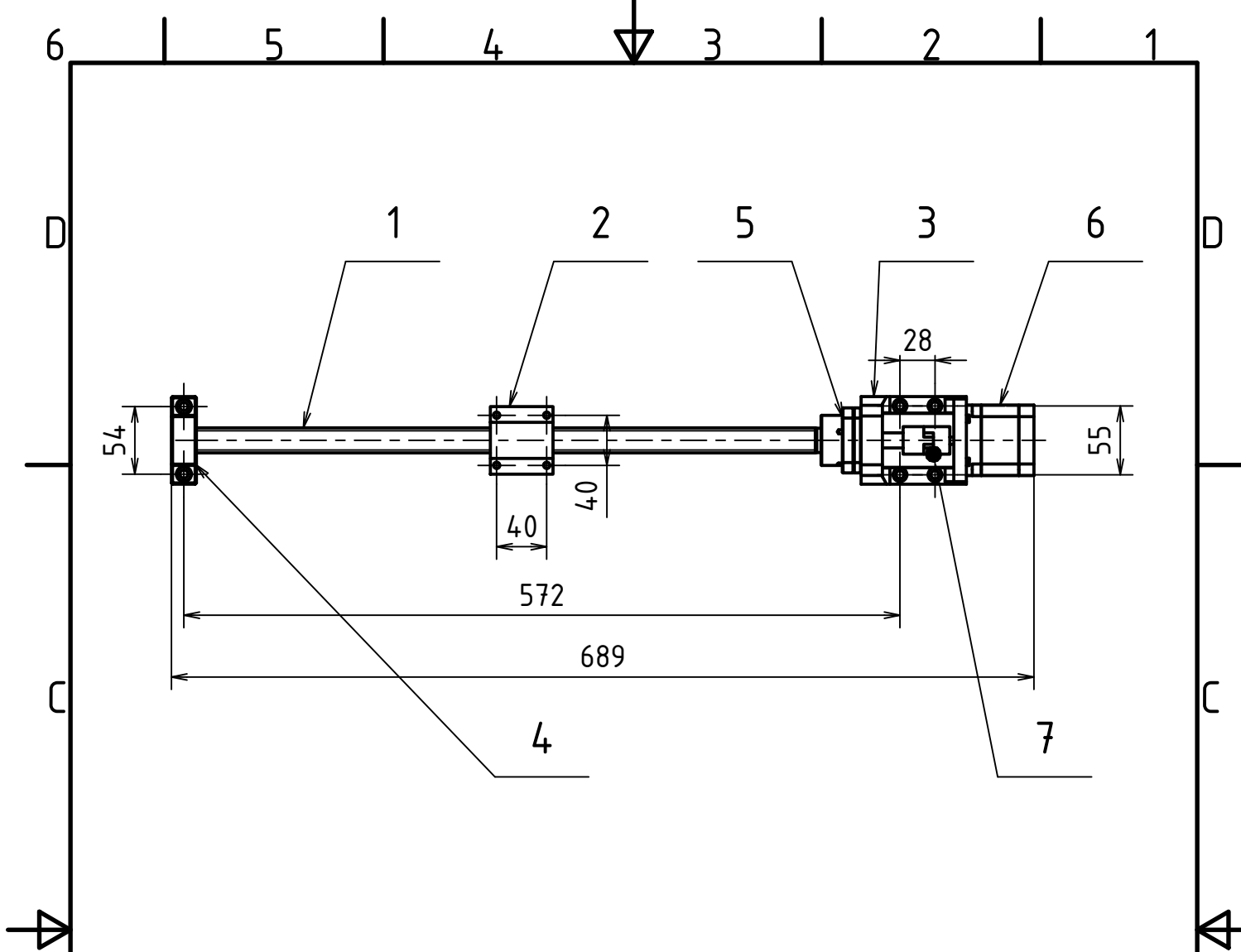
Suport X

ČÍSLO VÝKRESU

12112-6-17-01

TYP:

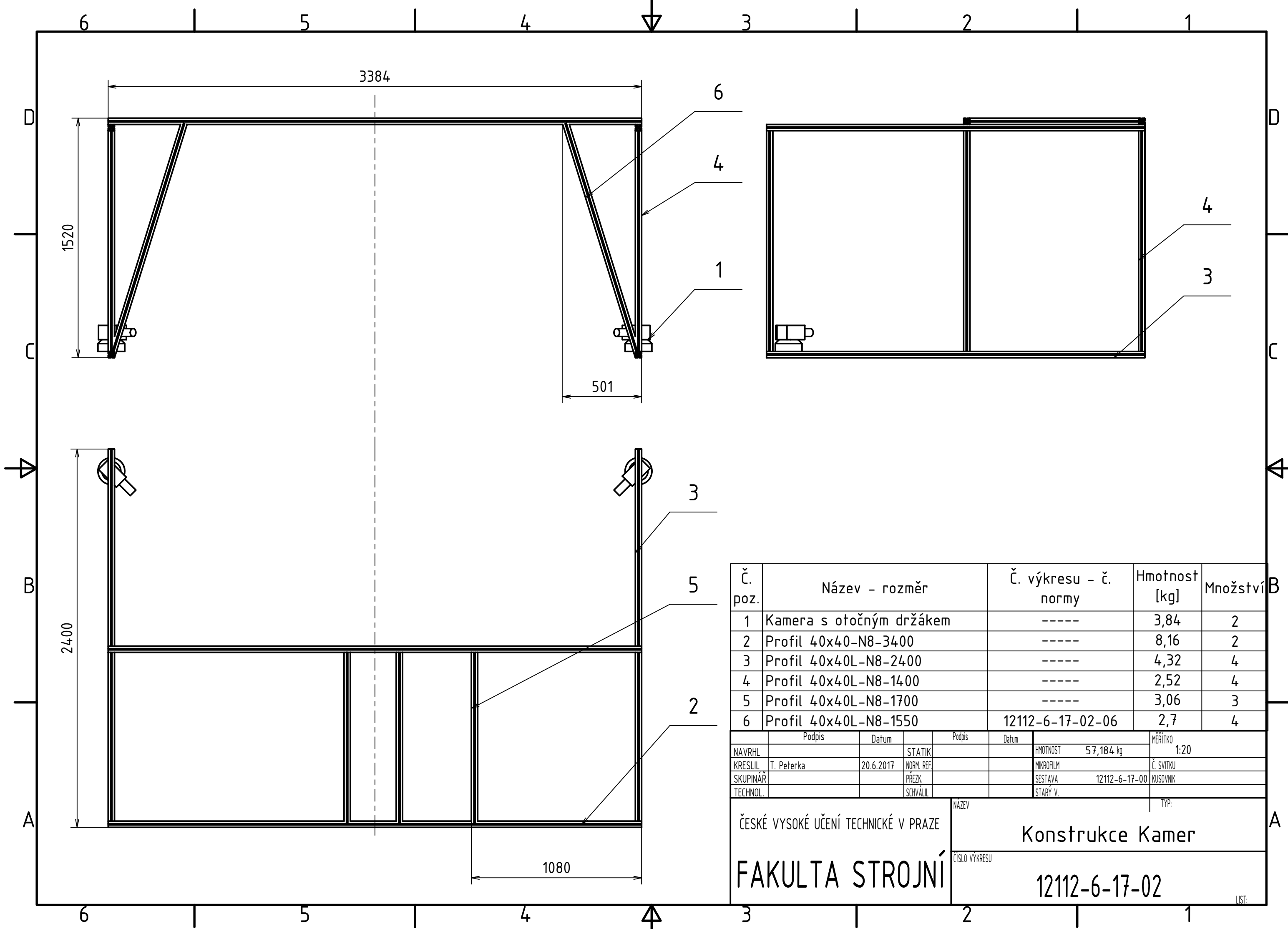
LIST:



č. poz.	Název - rozměr	č. výkresu - č. normy	Hmotnost [kg]	Množství
1	Pohybový šroub 2	12112-5-17-00-02	1,338	1
2	Matice TRMD 2004		0,231	1
3	Držák motoru MBA15-C		0,827	1
4	Volné ložisko BF15		0,340	1
5	Pevné ložisko FK15 A		0,374	1
6	Motor 57HS09		0,772	1
7	Spojka LK20-C25-6,35/12		0,121	1

NAVRHL	Podpis	Datum	STATIK	Podpis	Datum	HMOTNOST	kg	MĚŘÍTKO	1:5
KRESLIL	T. Peterka	15.7.2017	NORM. REF			MIKROFILM		Č. SVITKU	
SKUPINÁŘ			PREZK.			SESTAVA		KUSOVNIK	
TECHNOL.			SCHVÁLIL			STARÝ V.			

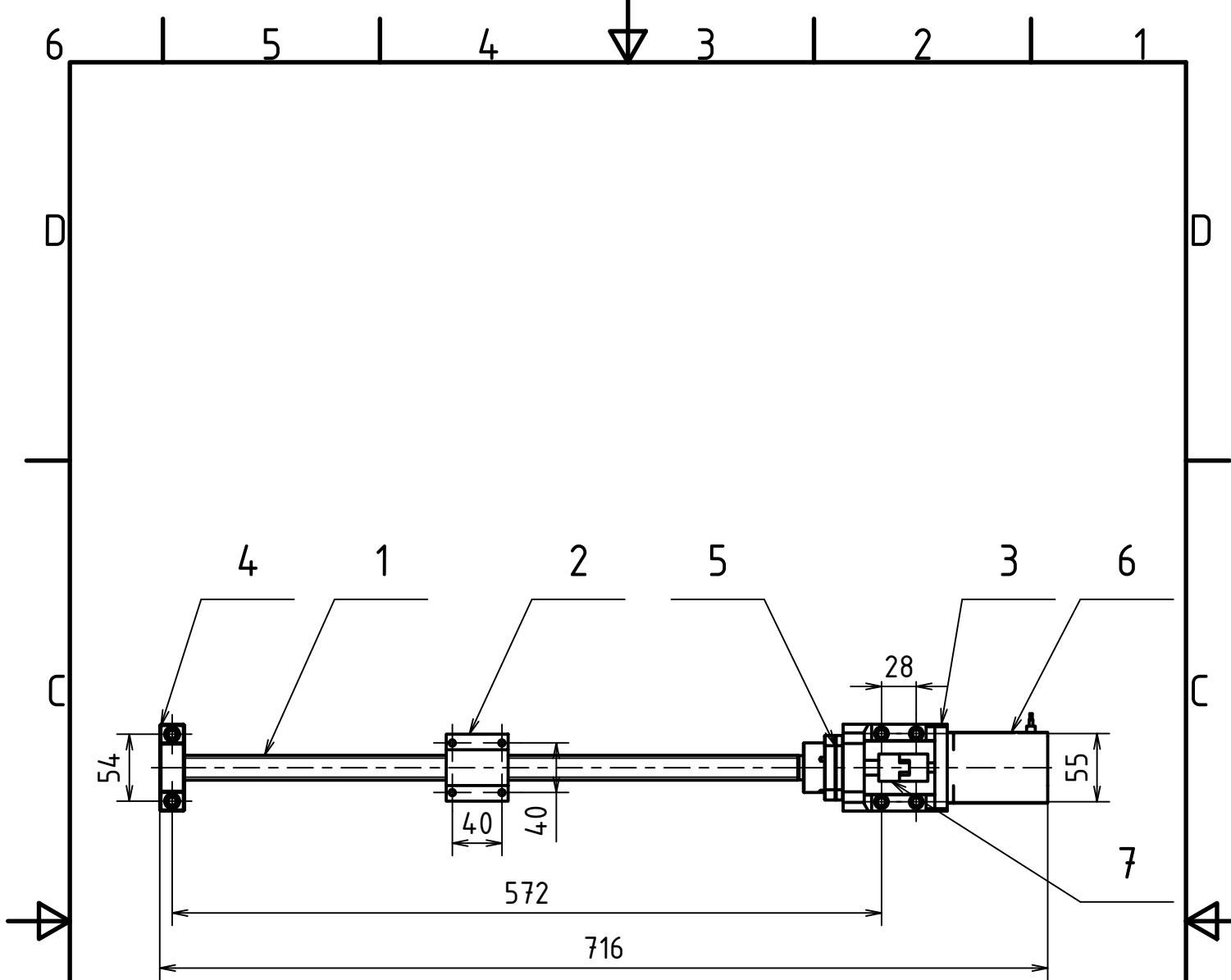
ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE FAKULTA STROJNÍ	NÁZEV	TYP:
	Pohon Y	
	ČÍSLO VÝKRESU	
	12112-6-17-01-01	



Č. poz.	Název - rozměr	Č. výkresu - č. normy	Hmotnost [kg]	Množství
1	Kamera s otočným držákem	-----	3,84	2
2	Profil 40x40-N8-3400	-----	8,16	2
3	Profil 40x40L-N8-2400	-----	4,32	4
4	Profil 40x40L-N8-1400	-----	2,52	4
5	Profil 40x40L-N8-1700	-----	3,06	3
6	Profil 40x40L-N8-1550	12112-6-17-02-06	2,7	4

NAVRHL	Podpis	Datum	STATIK	Podpis	Datum	HMOTNOST	57,184 kg	MĚŘÍTKO	1:20
KRESLIL	T. Peterka	20.6.2017	NORM. REF.			MIKROFILM		Č. SVITKU	
SKUPINÁŘ			PŘEZK.			SESTAVA	12112-6-17-00	KUSOVNIK	
TECHNOL.			SCHVÁLIL			STARÝ V.			

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE FAKULTA STROJNÍ	NÁZEV	Konstrukce Kamer
	ČÍSLO VÝKRESU	12112-6-17-02



č. poz.	Název - rozměr	č. výkresu - č. normy	Hmotnost [kg]	Množství
1	Pohybový šroub 2	12112-5-17-00-02	1,338	1
2	Matice TRDM 2004		0,231	1
3	Držák motoru MBA15C		0,827	1
4	Volné ložisko BF15		0,340	1
5	Pevné Ložisko FK15 A		0,374	1
6	Motor 57HS22		1,103	1
7	Spojka LK20-C25-6,35/12		0,121	1

NAVRHL	Podpis	Datum	STATIK	Podpis	Datum	HMOTNOST	4,523 kg	MĚŘÍTKO	1:5
KRESLIL	T. Peterka	10.7.2017	NORM. REF			MIKROFILM		Č. SVITKU	
SKUPINÁŘ			PŘEZK.			SESTAVA	12112-6-17-00	KUSOVNIK	
TECHNOL.			SCHVÁLIL			STARÝ V.			

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

NÁZEV

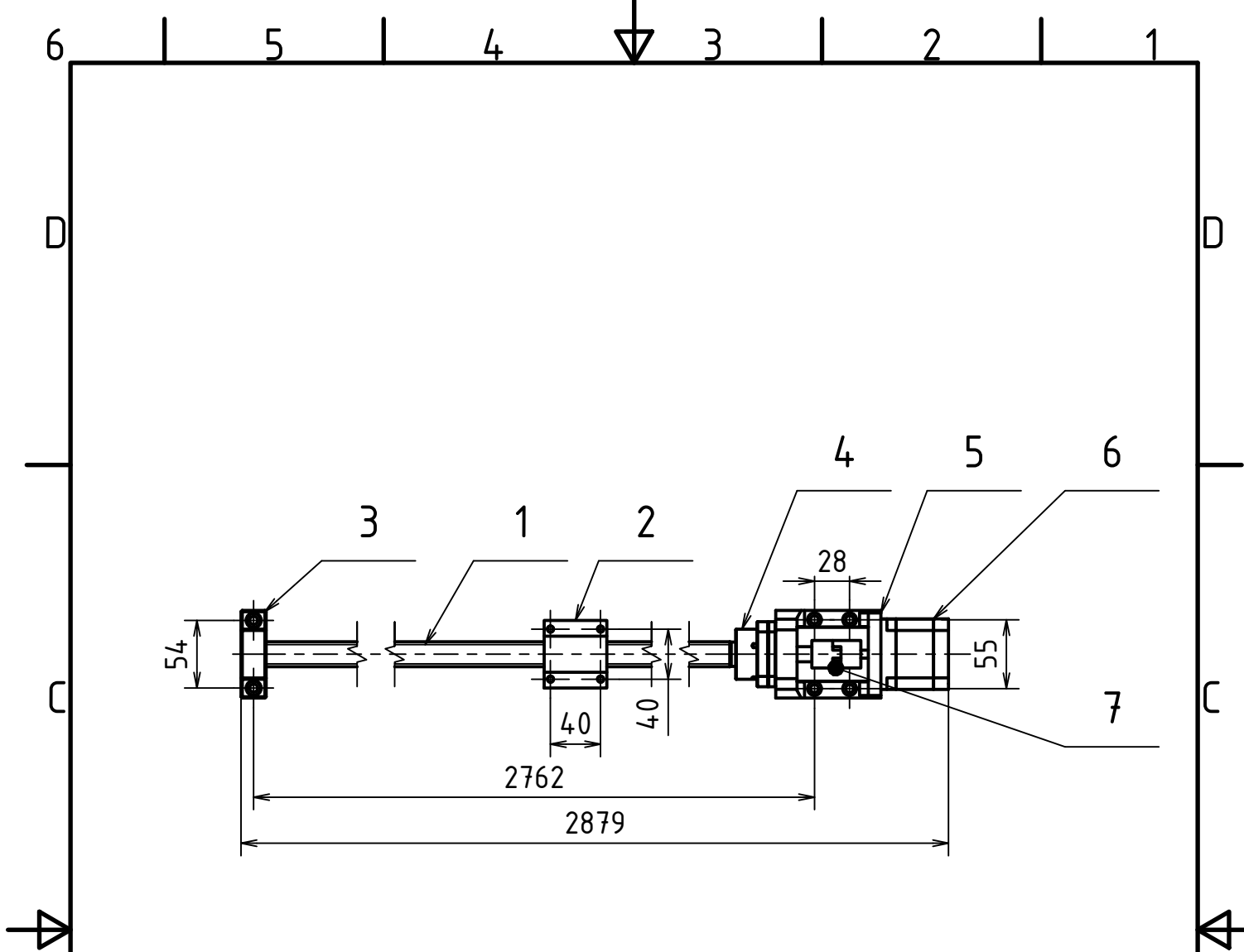
Pohon Z

ČÍSLO VÝKRESU

12112-6-17-03

TYP:

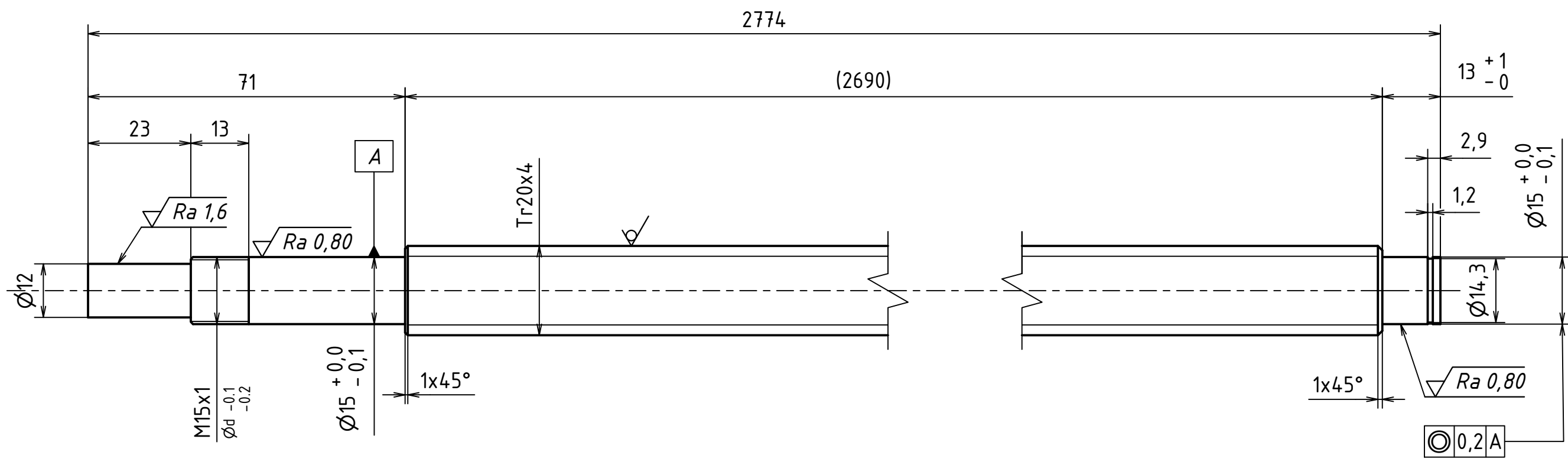
LIST:



č. poz.	Název - rozměr	č. výkresu - č. normy	Hmotnost [kg]	Množství
1	Pohybový šroub 1	12112-5-17-00-01	6,738	1
2	Matice TRDM 2004		0,231	1
3	Volné ložisko BF15		0,340	1
4	Pevné ložisko FK15 A		0,374	1
5	Držák motoru MBA15 C		0,827	1
6	Motor 57HS09		0,772	1
7	Spojka LK20-C25-6,35/12		0,121	1

NAVRHL	Podpis	Datum	STATIK	Podpis	Datum	HMOTNOST	9,423 kg	MĚŘÍTKO	1:5
KRESLIL	T. Peterka	25.7.2017	NORM. REF			MIKROFILM		Č. SVITKU	
SKUPINÁŘ			PŘEZK.			SESTAVA	12112-6-17-00	KUSOVNIK	
TECHNOL.			SCHVÁLIL			STARÝ V.			

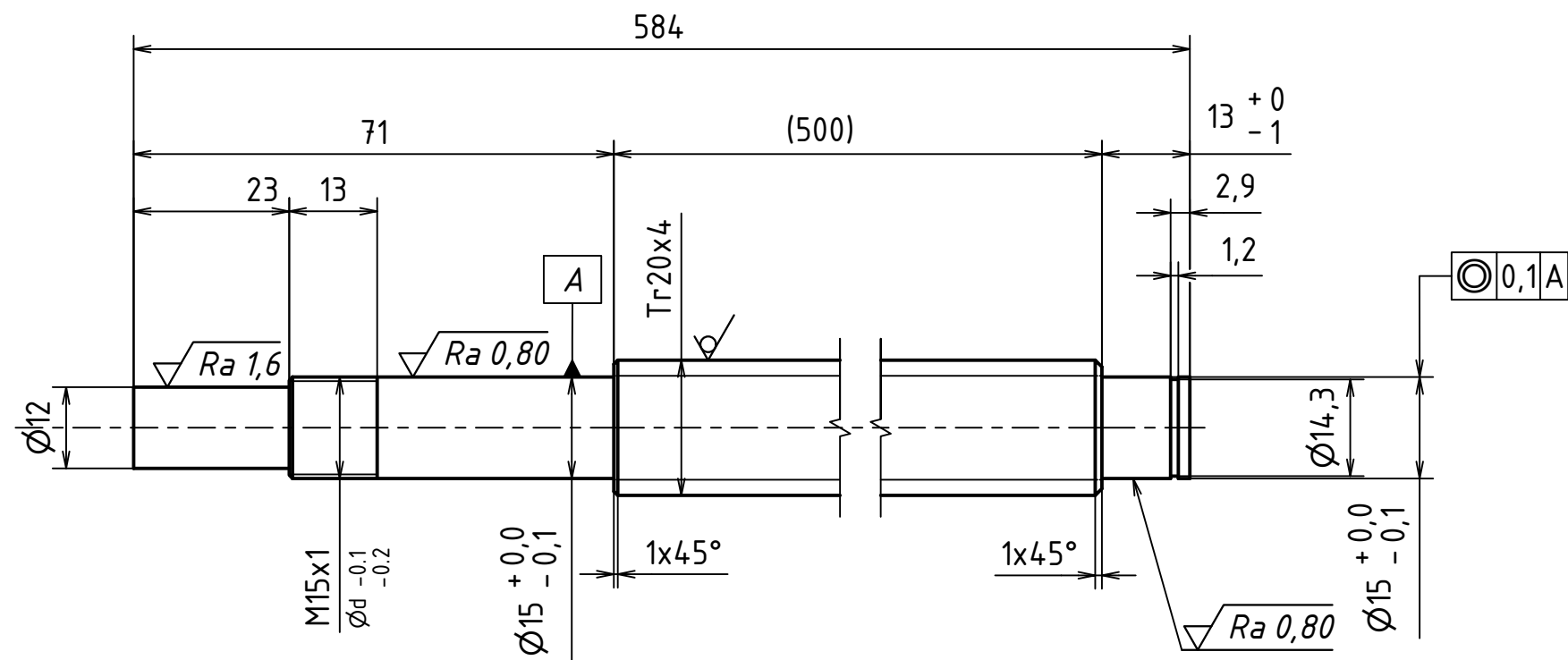
ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE FAKULTA STROJNÍ	NÁZEV	TYP:
	Pohon X	
	ČÍSLO VÝKRESU	
	12112-6-17-04	



$\sqrt{Ra 3,2}$ (\checkmark)

MATERIAL:									
POLOTOVAR:									
PROMITANI:		$\left(\begin{smallmatrix} \oplus \\ \ominus \end{smallmatrix} \right)$ (ISO E)							
TOLEROVANI PODLE ISO 8015:		NE							
PRESNOST ISO 2768 - mk									
	Podpis	Datum		Podpis	Datum	HMOTNOST	6,738 kg	MERITKO	
NAVRHL			STATIK					1:1	
KRESLIL	T. Peterka	15.5.2017	NORM. REF.			MIKROFILM		C. SVITKU	
SKUPINAR			PREZK.			SESTAVA	12112-5-17-00	KUSOVNIK	
TECHNOL.			SCHVALIL			STARÝ V.			
ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE FAKULTA STROJNÍ						NÁZEV		TYP:	
						Pohybový šroub 1			
						ČÍSLO VYKRESU			
						12112-5-17-00-01			

LST:



$\sqrt{Ra 3,2}$ ($\sqrt{\quad}$)

MATERIAL:									
POLOTOVAR:									
PROMĚTÁNÍ: ⊕ (ISO E)									
TOLEROVÁNÍ PODLE ISO 8015: NE									
PŘESNOST ISO 2768 - mk									
	Podpis	Datum	Podpis	Datum	INDEX	ZMĚNA	DATUM	PODPIS	
NAVRHL									MĚŘITKO 1:1
KRESLIL	T. Peterka	15.5.2017	STATIK						HMOTNOST 1,338 kg
SKUPINÁŘ			NORM. REF.						MIKROFILM
TECHNOL.			PŘEZK.						SESTAVA 12112-5-17-00
			SCHVÁLIL						Č. SVITKU KUSOVNIK
									STARÝ V.

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ

NÁZEV: Pohybový šroub 2
TYP:
ČÍSLO VYKRESU: 12112-5-17-00-02
LIST: