

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

**Fakulta strojní**



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

2010

Martin Veselý

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

**FAKULTA STROJNÍ**

**Katedra energetických zařízení**



**MARTIN VESELÝ**

**Analýza odmrazování čelních skel automobilů**

**(Analysis of deicing cars' windscreen)**

**Vedoucí diplomové práce:** Vít Tomáš, Ing., PhD.

**Konzultant diplomové práce:** Dančová Petra, Ing.

**Rozsah práce:**

**Počet stran:** 37

**Počet obrázků:** 18

**Počet tabulek:** 6

**Počet grafů:** 5

**Počet příloh:** 4

**Liberec 2010**

# **Analýza odmrazování čelních skel automobilů**

## **Anotace**

**Cílem této práce je zjistit jaké systémy pro odmrazování čelních skel automobilů se v dnešní době používají a jak odmrazování probíhá. Součástí je také příprava a provedení experimentu měření rychlostního profilu na vnitřní straně čelního skla automobilu metodou drátkové anemometrie.**

**Klíčová slova:** odmrazování, automobil, rychlostní profil, drátková anemometrie

# **Analysis of de-icing cars' windscreen**

## **Annotation**

**The aim of this thesis is to learn what kinds of systems are used for de-icing cars' windscreen nowadays and how de-icing proceeds. One part of this thesis is also preparation and conduct an experiment of metering of velocity profile on the inside car's windscreen using method of Constant Temperature Anemometry.**

**Key words:** de-icing, car, velocity profile, Constant Temperature Anemometry

## **Prohlášení**

Byl (a) jsem seznámen (a) s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom (a) povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval (a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum

Podpis

## **Declaration**

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/200 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec (TUL) is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a license for use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of thesis and a consultant.

Date

Signature

## **Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce Ing. Tomáši Vítovi, PhD. a konzultantce Ing. Petře Dančové. Můj dík také patří Ing. Robertu Voženílkovi z Katedry vozidel a motorů za zapůjčení a přistavení vozidla a dále Luboši Dittrichovi za asistenci v laboratoři Katedry vozidel a motorů.

# Obsah

|                                                       |    |
|-------------------------------------------------------|----|
| Seznam použitých symbolů a označení.....              | 2  |
| 1 Úvod.....                                           | 5  |
| 1.1 Zamrzání a zamlžování oken automobilu.....        | 5  |
| 1.2 Vnitřní aerodynamika automobilu.....              | 7  |
| 1.3 Experiment.....                                   | 8  |
| 2 Teorie.....                                         | 9  |
| 2.1 Vlhký vzduch.....                                 | 9  |
| 2.2 Přenos tepla.....                                 | 20 |
| 2.3 Přenos tepla a hmoty.....                         | 21 |
| 2.4 Anemometrie.....                                  | 22 |
| 3 Řešení.....                                         | 26 |
| 3.1 Měřicí zařízení.....                              | 26 |
| 3.2 Stojánek.....                                     | 27 |
| 3.3 Měření rychlostního profilu na skle.....          | 28 |
| 3.4 Měření rychlostí na vstupu do klimatizace.....    | 29 |
| 3.5 Kalibrace.....                                    | 30 |
| 4 Výsledky.....                                       | 31 |
| 4.1 Rychlosti v bodě v závislosti na vzdálenosti..... | 31 |
| 4.2 Rychlosti v určité vzdálenosti.....               | 32 |
| 4.3 Rychlosti na vstupu - první stupeň.....           | 33 |
| 4.4 Rychlosti na vstupu – maximální výkon.....        | 34 |
| 5 Závěr.....                                          | 35 |
| Seznam použité literatury.....                        | 37 |
| Seznam příloh.....                                    | 37 |

## Seznam použitých symbolů a označení

| Označení         | Název                                              | Hodnota  | Jednotka        |
|------------------|----------------------------------------------------|----------|-----------------|
| $\alpha$         | součinitel teplotní vodivosti                      |          | $m^2 \cdot K/W$ |
| $A$              | složka A                                           |          |                 |
| $A_W$            | povrch drátu                                       |          | $m^2$           |
| $B$              | složka B                                           |          |                 |
| $c_l$            | měrná tepelná kapacita ledu                        | 2090     | $kJ/kg \cdot K$ |
| $c_p$            | měrná tepelná kapacita za konstantního tlaku       |          |                 |
| $c_{sv}$         | měrná tepelná kapacita suchého vzduchu (při 20 °C) | 1010     | $kJ/kg \cdot K$ |
| $c_{vv}$         | měrná tepelná kapacita vodní páry za konst. objemu | 1840     | $kJ/kg \cdot K$ |
| $c_w$            | měrná tepelná kapacita vody                        | 4187     | $kJ/kg \cdot K$ |
| $d$              | faktor náklonu                                     |          |                 |
| $e$              | faktor odklonu                                     |          |                 |
| $E$              | napětí                                             |          | $V$             |
| $h$              | entalpie                                           |          | $J/kg$          |
| $h''$            | entalpie nasyceného vlhkého vzduchu                |          | $J/kg$          |
| $h_{sv}$         | entalpie suchého vzduchu                           |          | $J/kg$          |
| $h_v$            | entalpie vodní páry                                |          | $J/kg$          |
| $h_w$            | entalpie vody                                      |          | $J/kg$          |
| $k$              | součinitel prostupu tepla                          |          | $W/m^2 \cdot K$ |
| $Le$             | Lewisovo číslo                                     |          |                 |
| $l_l$            | měrné skupenské teplo tání ledu                    | 0,333301 | $kJ/kg$         |
| $l_v$            | měrné výparné teplo vody                           | 2500     | $kJ/kg$         |
| $m$              | celková hmotnost                                   |          | $kg$            |
| $M$              | molární hmotnost                                   |          | $kg/kmol$       |
| $m_i$            | hmotnost složky                                    |          | $kg$            |
| $m_{sv}$         | hmotnost suchého vzduchu                           |          | $kg_{sv}$       |
| $m_v$            | hmotnost vodní páry                                |          | $kg$            |
| $\dot{m}$        | hmotnostní tok                                     |          | $kg/s$          |
| $\dot{m}_{sv}$   | hmotnostní tok suchého vzduchu                     |          | $kg/s$          |
| $\dot{m}_w$      | hmotnostní tok vody                                |          | $kg/s$          |
| $Nu$             | Nusseltovo číslo                                   |          |                 |
| $p$              | celkový tlak                                       |          | $Pa$            |
| $p_b$            | barometrický tlak                                  |          | $Pa$            |
| $p_i$            | tlak složky                                        |          | $Pa$            |
| $Pr$             | Prandtlovo číslo                                   |          |                 |
| $p_{sv}$         | tlak suchého vzduchu                               |          | $Pa$            |
| $p_v$            | tlak vodní páry                                    |          | $Pa$            |
| $p_v''$          | tlak nasycené vodní páry                           |          | $Pa$            |
| $\dot{Q}_{celk}$ | celkový tepelný výkon                              |          | $W$             |

| Označení        | Název                                        | Hodnota | Jednotka            |
|-----------------|----------------------------------------------|---------|---------------------|
| $\dot{Q}_{cit}$ | tepelný výkon citelného tepla                |         | W                   |
| $\dot{Q}_{ch}$  | tepelný výkon chladiče                       |         | W                   |
| $\dot{Q}_{oh}$  | tepelný výkon ohřivače                       |         | W                   |
| $\dot{Q}_{váz}$ | tepelný výkon vázaného tepla                 |         | W                   |
| $R$             | univerzální plynová konstanta                | 8,314   | kJ/kmol · K         |
| $Re$            | Reynoldsovo číslo                            |         |                     |
| $r_{sv}$        | specifická plynová konstanta suchého vzduchu |         | J/kg·K              |
| $r_v$           | specifická plynová konstanta vodní páry      |         | J/kg·K              |
| $R_W$           | odpor drátu                                  |         | $\Omega$            |
| $Sc$            | Schmidtovo číslo                             |         |                     |
| $Sh$            | Sherwoodovo číslo                            |         |                     |
| $t$             | teplota                                      |         | °C                  |
| $T$             | termodynamická teplota                       |         | K                   |
| $t_i$           | teplota složky                               |         | °C                  |
| $t_{ch}$        | povrchová teplota chladiče                   |         | °C                  |
| $t_m$           | teplota mokrého teploměru                    |         | °C                  |
| $T_O$           | teplota okolí                                |         | K                   |
| $t_r$           | teplota rosného bodu                         |         | °C                  |
| $t_{sm}$        | teplota směsi                                |         | °C                  |
| $T_W$           | teplota drátu                                |         | K                   |
| $U$             | rychlost                                     |         | m/s                 |
| $U_{ef}$        | efektivní rychlost                           |         | m/s                 |
| $U_x$           | rychlost ve směru osy x                      |         | m/s                 |
| $U_y$           | rychlost ve směru osy y                      |         | m/s                 |
| $U_z$           | rychlost ve směru osy z                      |         | m/s                 |
| $V$             | celkový objem                                |         | m <sup>3</sup>      |
| $\dot{V}$       | objemový tok                                 |         | m <sup>3</sup> /s   |
| $x$             | měrná vlhkost vzduchu                        |         | g/kg <sub>sv</sub>  |
| $X$             | kalibrační konstanta                         |         |                     |
| $x_i$           | měrná vlhkost složky                         |         | g/kg <sub>sv</sub>  |
| $x_{max}$       | maximální měrná vlhkost vzduchu              |         | g/kg <sub>sv</sub>  |
| $x_{sm}$        | měrná vlhkost směsi                          |         | g/kg <sub>sv</sub>  |
| $Y$             | kalibrační konstanta                         |         |                     |
| $\alpha$        | součinitel přenosu tepla                     |         | W/m <sup>2</sup> ·K |
| $\beta'$        | modifikovaný součinitel přenosu hmoty        |         |                     |
| $\eta$          | účinnost                                     |         |                     |
| $\lambda$       | součinitel tepelné vodivosti                 |         | W/m·K               |
| $\mu$           | dynamická viskozita tekutiny                 |         | Pa·s                |
| $\rho$          | celková hustota                              |         | kg/m <sup>3</sup>   |
| $\rho_{sv}$     | hustota suchého vzduchu                      |         | kg/m <sup>3</sup>   |

| Označení           | Název                           | Hodnota | Jednotka |
|--------------------|---------------------------------|---------|----------|
| $\rho_v$           | absolutní vlhkost vzduchu       |         | $kg/m^3$ |
| $\rho_{v''}$       | hustota nasycených vodních par  |         | $kg/m^3$ |
| $\varphi$          | relativní vlhkost               |         |          |
| $\mathcal{D}_{AB}$ | součinitel difuze mezi složkami |         | $m^2/s$  |

# 1 Úvod

Tato práce má za úkol zjistit, jaké systémy se v současnosti používají pro odmrazování čelních skel automobilů. Za jakých podmínek zamrzání vzniká a jak je těmito systémy odstraňováno. V další části se zaměřuje na přípravu a provedení měření rychlostního profilu na vnitřní straně čelního skla osobního automobilu pomocí drátkové anemometrie.

## 1.1 Zamrzání a zamlžování oken automobilu

Zamrznutí či zamlžení oken snižuje nebo zabraňuje řidiči výhled z vozidla, a tím zvyšuje riziko dopravní nehody. Se zamlžováním se setkáváme hlavně v podzimních a jarních měsících, se zamrzáním pak v zimě. Nejčastěji zrána, kdy venkovní teplota bývá nižší než v automobilu a skla automobilu ještě nejsou ohřátá od slunce. Zamrznutí nastane v zimě většinou přes noc, kdy sražená vodní pára z předchozí jízdy na skle zmrzne.

Zamlžování oken vznikne při dosažení určitých podmínek, a to:

- dostatečná vlhkost vzduchu
- teplota skla je pod rosným bodem a vzduch uvnitř vozu má teplotu vyšší
- nedostatečné odpařování vysrážené vlhkosti

Pro zamrznutí je třeba, aby teplota skla byla pod bodem tuhnutí vody. Pokud jsou tyto podmínky splněny, je vysoká pravděpodobnost, že se voda na skle vysráží a sklo zamrzne.

Vlhkost nejčastěji ve vozidle vzniká:

- od cestujících - dýchání, pocení, sních a voda z bot a oblečení
- od minulé jízdy – z cestujících za předpokladu, že auto nebylo dostatečně vyvětráno
- od deště, sněhu – průsaky ve spojích karoserie, voda nateklá v topení, vlhkost usazená ve vzduchových filtrech

Abychom zabránili mlžení, je důležité odstranit co nejvíce příčin jejich vzniku. Pro uživatele vozidla jsou nejlépe odstranitelnou příčinou zdroje vlhkosti. Kontrolujeme technický stav vozidla. Před vstupem do vozu z bot oklepeme sních.

Vůz před uzamčením necháme vyvětrat, a pokud vůz garážujeme, necháme ho větrat stále. Pootevřením dveří navíc chráníme izolaci před otláčením.

## **Odstraňování zamrznutí**

Moderní vozidla s klimatizací neustále upravují parametry vnitřního vzduchu, a tak je možnost zamrznutí čelního skla u těchto vozů nepravděpodobná. Pokud se tak stane, vzniklou ledovku nejčastěji ze skla oškrábeme, protože odmrazování pomocí klimatizační jednotky používající teplý vzduch, je časově a energeticky mnohem náročnější.

Aby bylo přes sklo dobře vidět, je potřeba zabránit též mlžení, a to:

- ofukováním vzduchem z ofukovačů
- použitím speciálních skel
- použitím speciálních přípravků

## **Ofukování vzduchem**

Ofukování oken vzduchem je nejpoužívanější metoda pro odstraňování zamlžení a pro předcházení zamlžení a zamrznutí. Studený vzduch odstraňuje zamlžení lépe než teplý, protože pojme více vlhkosti, stejně tak proudění vyšší rychlostí je účinnější než proudění pomalé. Teplý vzduch ovšem sklo prohřeje, a tím zamrznutí zabrání. U moderních automobilů je důležitou součástí úprava vzduchu před samotným ofukováním - sušení pomocí klimatizace. Další možností úpravy vzduchu u luxusnějších klimatizací je také recirkulace vnitřního vzduchu v klimatizaci.

## **Použití speciálních skel**

Speciální skla se dají rozdělit do dvou skupin, a to:

**Skla s vyhříváním** jsou vybavena topnými dráty, sklo se zahřeje a vzniklé zamrznutí odstraní. Metoda je účinná, nevýhodou je rušivý vliv topných drátů ve výhledu, nejčastěji se používá u zadních skel, u předních brání jejich rozšíření cena průhledných drátů.

**Skla se speciální povrchovou úpravou** patří do vyšší cenové skupiny, používají se do luxusních vozidel, snižují pravděpodobnost kondenzace vlhkosti na skle, vzniklé zamlžení či zamrznutí ale neodstraní.

## **Použití speciálních přípravků**

Obecně se přípravek aplikuje na sklo, kde vytvoří ochrannou vrstvu, která zabrání zamlžení. Nemají permanentní účinek, a proto se nehodí pro výrobce, jejich aplikaci provádí až uživatel. Proti zamrznutí jsou ovšem neúčinné.

Existují různé možnosti:

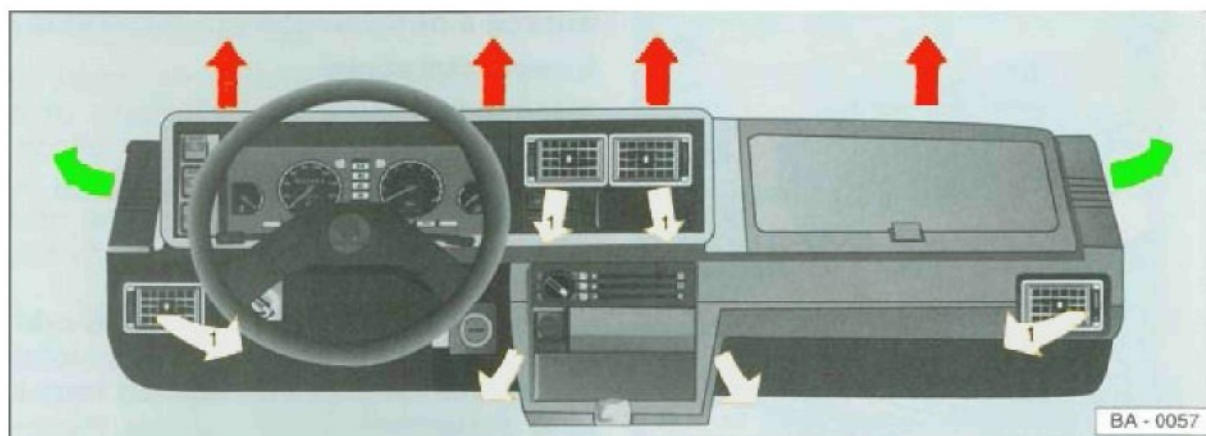
- *Speciální výrobky* – vyšší pořizovací cena, poměrně zaručená účinnost, různé obchodní názvy (antifog ap.)
- „*Babské rady*“ – mezi lidmi kolují různé nápady nahrazující speciální výrobky, jejich účinnost je však zřejmě nižší než u speciálních přípravků (například saponát), či vyloženě podivné, jejichž funkčnost je nejistá (potřít sklo polovinou jablka, nebo špekem). Účinnost saponátu byla ověřena experimentem.

## 1.2 Vnitřní aerodynamika automobilu

Pro lepší pohodu a větší bezpečnost silničního provozu se v automobilech používá systém topení a větrání, popřípadě chlazení. Dříve pouze za pomoci topení a větráků, dnes komplexní klimatizace, která má za úkol vytvořit příjemné podmínky pro řidiče i v nepříznivých klimatických podmínkách. Jedním z důležitých úkolů tohoto systému je též odstraňování zamlžení a zamrznutí čelního okna pro zajištění bezproblémového výhledu z vozidla. Odstraňování zamlžení je systémem prováděno ofukováním skel.

### Uspořádání ofukovačů

Základní uspořádání ofukovačů je u většiny osobních automobilů velmi podobné. Skládá se z ofukovacího systému čelního skla, který tvoří nejčastěji mezera mezi plastovými díly přístrojové desky. Může probíhat po celé šířce, anebo pouze v určité části (červené šipky na obr. 1). Další částí jsou postranní ofukovače na boční okna (zelené šipky na obr. 1). Nastavitelné a uzavíratelné ofukovače, v části přístrojové desky obrácené k posádce, jsou výstupy klimatizace vnitřního prostředí vozu (bílé šipky na obr. 1).



Obr. 1 Přístrojová deska automobilu Škoda Favorit/Forman [1]

### 1.3 Experiment

Podle návodu na jednom z diskusních fór, která se zabývají automobilistikou, jsem vyzkoušel účinnost saponátu jako přípravku na zabránění zamlžení skel. Postup aplikace je jednoduchý. Na hadřík, nebo houbičku se nakape saponát tak, aby důkladně prosákla. Houbička se nechá vyschnout a poté se takto připravenou houbičkou ošetří skla zevnitř vozu, u kterých chceme předejít zamlžení. Skla musí být čistá a suchá. Sklo, na kterém nejsou nečistoty (mastnota, prach, pyl, atd.), má oproti čistému sklu menší plochu a voda nemá takovou tendenci se srážet v kapičkách. Důvodem, proč po aplikaci k zamlžení nedojde, je, že saponát je tenzid měnící povrchové napětí vody a jeho aplikací sklo ztrácí hydrofobii (vodoodpudivost).



*Obr. 2 Ošetření části bočního skla saponátem, automobil Škoda Forman, 1,5 hod. provozu, jedna osoba, bez ofukování [2]*

Mikrokapičky se nevytvoří, protože je saponátem snižováno povrchové napětí každé kapičky. Vysrážená voda se na skle rovnoměrně rozprostře a přes sklo je pak mnohem lépe vidět než přes samostatné mikrokapičky. Vše je názorně vidět na obrázku 2. Prostřední část okna jsem neošetřil. Na okrajích se již hromadí nadbytek zkondenzované páry. Přes ošetřené sklo je mnohem lépe vidět oproti neošetřené části. Účinnost ostatních komerčních přípravků tzv. antifog sprejů apod. jsem nezkoušel. Obvyčejný saponát mě svým účinkem příjemně překvapil. Využití přípravků na tomto principu však končí s prvními mrazy. Pokud je venku opravdu chladno a povrchová teplota skla je pod bodem mrazu, tak se vodní pára téměř ihned po kondenzaci na skle změní v ledový krystalek, který sklo zneprůhlední.

## 2 Teorie

### 2.1 Vlhký vzduch

Vlhký vzduch je směs suchého vzduchu a určitého množství vody ve formě syté, či přehřáté vodní páry, mlhy nebo jinovatky.

#### Základní pojmy

##### *Daltonův zákon*

Používá se pro výpočty tepelných procesů a zní: Celkový tlak směsi plynů  $p$  je dán součtem dílčích (parciálních) tlaků jednotlivých složek  $p_i$ :

$$p = \sum p_i \quad (2.1.1)$$

Vzhledem k této skutečnosti lze rozepsat barometrický tlak do jednotlivých složek:

$$p_b = p_{sv} + p_v \quad (2.1.2)$$

##### *Stavová rovnice*

Pro 1 kg vlhkého vzduchu má stavová rovnice tvar:

$$p = \frac{R}{M} \cdot \rho \cdot T \quad (2.1.3)$$

Vztah (2.1.3) určuje výsledný barometrický tlak směsi suchého vzduchu a vodní páry.

#### Vyjádření vlhkosti vzduchu

Vlhký vzduch se dělí na:

- *nenasycený*, kdy parciální tlak vodní páry ve vzduchu je menší, než tlak sytých vodních par při téže teplotě ( $p_v < p''_v$ )
- *nasycený*, kdy tlaky jsou totožné ( $p_v = p''_v$ )
- *přesycený*, když se v nasyceném vzduchu objevuje vysrážená voda v kapalném nebo tuhém skupenství

## Veličiny určující vlhkost vzduchu

*Absolutní vlhkost* vzduchu  $\rho_v$  udává hmotnost vodní páry v objemu  $1 \text{ m}^3$

*Relativní vlhkost*  $\varphi$  udává míru nasycení vzduchu. Pokud je  $\varphi = 100 \%$ , znamená to nasycený vzduch.

$$\varphi = \frac{\rho_v}{\rho''_v} \doteq \frac{p_v}{p''_v} \quad (2.1.4)$$

*Měrná vlhkost* vzduchu  $x$  udává hmotnost vodní páry v  $\text{kg}$  připadající na  $1 \text{ kg}$  suchého vzduchu  $[\text{kg}/\text{kg}_{sv}]$ . Vzhledem k nízkým řádům se spíše používají jednotky  $[\text{g}/\text{kg}_{sv}]$ . Spolu s relativní vlhkostí je toto určení vlhkosti vzduchu ve vzduchotechnice nejběžnější.

$$x = \frac{m_v}{m_{sv}} \quad (2.1.5)$$

Dosazením stavových rovnic pro suchý vzduch a vodní páru obdržíme vzájemný vztah mezi měrnou a relativní vlhkostí:

$$x = \frac{m_v}{m_{sv}} = \frac{V \cdot \rho_v}{V \cdot \rho_{sv}} = \frac{r_{sv}}{r_v} \cdot \frac{p_v}{p_{sv}} = 0,622 \cdot \frac{p_v}{p_{sv}} \quad (2.1.6)$$

Dalším dosazováním dostaneme konečnou podobu:

$$x = 0,622 \cdot \frac{p_v}{p - p_v} = 0,622 \cdot \frac{\varphi \cdot p''_v}{p - \varphi \cdot p''_v} \quad (2.1.7)$$

Vztah (2.1.7) je důležitý, neboť nám umožňuje stanovit měrnou vlhkost z měřitelných veličin ( $\varphi$ ,  $p$ ) a parciálního tlaku syté páry.

Po dalších úpravách lze získat další závislosti:

$$x = 0,622 \cdot \frac{p_v}{p - p_v} \Rightarrow p_v = p \cdot \frac{x}{0,622 + x} \quad (2.1.8)$$

A dále:

$$\varphi = \frac{p}{p''_v} \cdot \frac{x}{0,622 + x} \quad (1.1.9)$$

Dalšími možnostmi určení vlhkosti vzduchu jsou teplota rosného bodu a teplota mokrého teploměru. Tyto veličiny se dají získat měřením.

## **Základní parametry vlhkého vzduchu**

### ***Teplota rosného bodu $t_r$***

Teplota rosného bodu je taková teplota, při které je vzduch nasycen vodními parami. Při dalším ochlazování začíná vodní pára kondenzovat. V  $h$ - $x$  diagramu se teplota rosného bodu pro daný stav vzduchu odečte na průsečíku křivky nasycení a čáry měrné vlhkosti, odpovídající danému stavu vzduchu.

### ***Teplota mokrého teploměru $t_m$***

Je to teplota vody, při níž je teplo potřebné k vypařování vody do vzduchu odebíráno přestupem tepla konvekcí z okolního vzduchu při izobarickém ději. Je také označována jako mezní teplota adiabatického chlazení.

### ***Hustota vlhkého vzduchu***

Hustota vlhkého vzduchu je dána vztahem:

$$\rho = \rho_{sv} + \rho_v \quad (2.1.10)$$

Při rozepsání:

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{m}{V} = \frac{m_{sv} + m_v}{V} = \frac{m_{sv}}{V} + \frac{m_v}{V} = \rho_{sv} + \rho_v = \frac{p_{sv}}{r_{sv} + T} + \frac{p_v}{r_v + T} \\ &= \frac{p - \varphi \cdot p''_v}{r_{sv} \cdot T} + \frac{\varphi \cdot p''_v}{r_v \cdot T} = \frac{1}{T} \cdot \left( \frac{p}{r_{sv}} - \frac{\varphi \cdot p''_v}{r_{sv}} + \frac{\varphi \cdot p''_v}{r_v} \right) \\ &= \frac{1}{T} \cdot \left[ \frac{p}{r_{sv}} + \varphi \cdot p''_v \cdot \left( \frac{1}{r_v} - \frac{1}{r_{sv}} \right) \right] = \frac{1,316 \cdot 10^{-3}}{T} \cdot (2,65 \cdot p + \varphi \cdot p''_v) \end{aligned} \quad (2.1.11)$$

Vztah (2.1.11) je stejně jako v případě měrné vlhkosti důležitý, neboť nám umožňuje stanovit hustotu vlhkého vzduchu z měřitelných veličin ( $\varphi$ ,  $p$ ) a parciálního tlaku syté páry.

### **Entalpie vlhkého vzduchu**

Výpočty stavů vlhkého vzduchu se s výhodou provádějí pro 1 kg suchého vzduchu, který obsahuje  $x$  kg vodní páry. Hmotnost suchého vzduchu je tedy při úpravách vlhkého vzduchu konstantní, mění se pouze hmotnost vodní páry. Totéž platí i pro entalpii.

Entalpie je fyzikální veličina, která vyjadřuje tepelnou energii uloženou v jednotkovém množství látky. Entalpie směsi 1 kg suchého vzduchu a  $x$  kg vodní páry bude:

$$h = h_{sv} + x \cdot h_v \quad (2.1.12)$$

Entalpie suchého vzduchu je násobkem měrné tepelné kapacity a teploty. Při teplotě 0 °C je podle definice entalpie suchého vzduchu nulová:

$$h_{sv} = c_{sv} \cdot t \quad (2.1.13)$$

Entalpie vodní páry je funkcí teploty a tlaku. Měrná tepelná kapacita vodní páry při konstantním objemu je  $c_{vv} = 1\,840 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ . Pro běžné výpočty lze do teploty 100 °C a tlaku par 10 kPa použít empirický vztah:

$$h_v = l_v + c_{vv} \cdot t = l_v + c_{vv} \cdot t \quad (2.1.14)$$

kde  $l_v$  je měrné výparné teplo vody při 0°C.

Po rozepsání:

$$h = h_{sv} + h_v = c_{sv} \cdot t + (l_v + c_{vv} \cdot t) \quad (2.1.15)$$

Pokud vzduch obsahuje vodní mlhu (vodní kapky), přičte se k entalpii nasyceného vlhkého vzduchu entalpie mlhy (vodních kapek):

$$h = h'' + (x - x'') \cdot h_w = h'' + (x - x'') \cdot c_w \cdot t \quad (2.1.16)$$

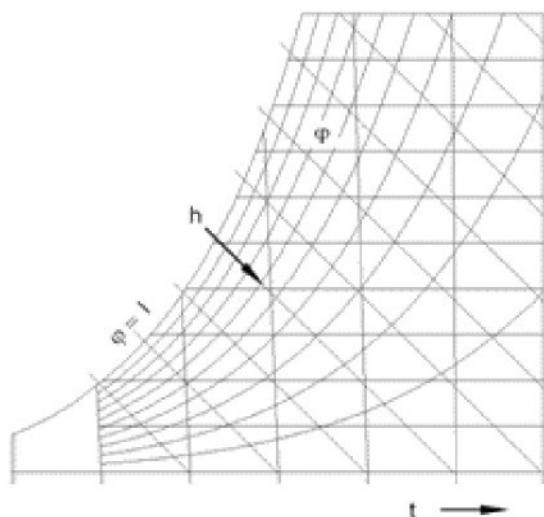
A při teplotách pod 0 °C, kdy se ve vzduchu vyskytuje jinovatka či zmrzlá mlha, bude entalpie:

$$h = h'' + (x - x'') \cdot (l_l + c_l \cdot t) \quad (2.1.17)$$

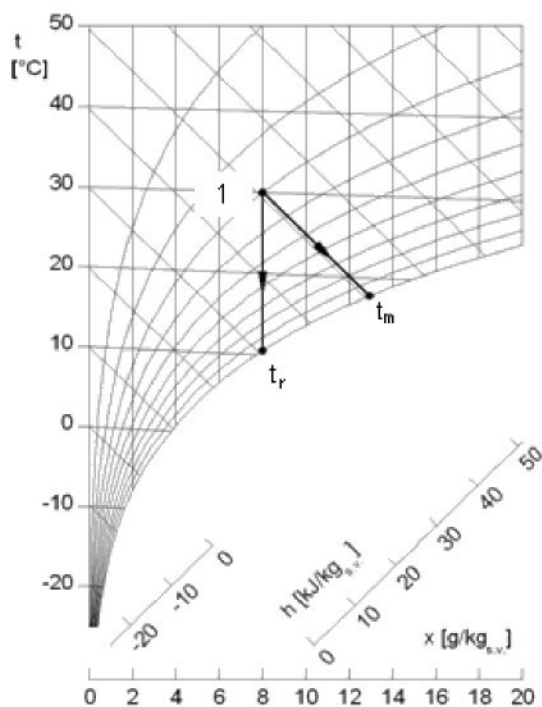
### Diagram $h$ - $x$

Pro znázorňování změn stavu vzduchu při izobarických dějích se používají dva typy diagramů vlhkého vzduchu. Jedná se o:

- psychrometrický diagram (obr. 3)
- Mollierův  $h$ - $x$  diagram (obr. 4)



Obr. 3 Psychrometrický diagram často používaný v anglosaské literatuře [3]



Obr. 4 Mollierův  $h$ - $x$  diagram se zakreslením rosného bodu  $t_r$  a teploty mokrého teploměru  $t_m$  pro daný stav vzduchu [3]

Základní osy diagramů (pod úhlem  $135^\circ$ ):

- entalpie  $h$  [ $\text{kJ/kg}_{sv}$ ]
- měrná vlhkost  $x$  [ $\text{g/kg}_{sv}$ ]

další osy:

- teplota  $t$  [ $^\circ\text{C}$ ]
- relativní vlhkost  $\varphi$  [-]
- hustota vlhkého vzduchu  $\rho$  [ $\text{kg/m}^3$ ]

Součástí diagramu je i stupnice tzv. směrového měřítka. Směrové měřítko  $\delta$  je definováno poměrem:

$$\delta = \frac{\dot{Q}_{celk}}{\dot{m}_w} = \frac{\dot{m} \cdot \Delta h}{\dot{m} \cdot \Delta x} = \frac{\Delta h}{\Delta x} \quad (2.1.18)$$

a udává směr změny stavu vzduchu. Stupnice směrového měřítka je na h-x diagramu vztažena k referenčnímu bodu.

Součástí diagramu je také stupnice tzv. činitele citelného tepla. Činitel citelného tepla  $v$  je definován poměrem citelného tepla  $Q_{cit}$  a celkového tepla  $Q_{celk}$ :

$$v = \frac{\dot{Q}_{cit}}{\dot{Q}_{celk}} = \frac{\dot{Q}_{cit}}{\dot{Q}_{cit} + \dot{Q}_{váz}} = \frac{c_{sv} \cdot \Delta t}{\Delta h} \quad (2.1.19)$$

V běžné praxi se vyskytují převážně úpravy vlhkého vzduchu jako ohřev, chlazení mokré, chlazení suché, vlhčení vodou či párou a směřování. K dosažení požadovaného stavu vzduchu lze dospět pouze kombinací těchto úprav.

### Ohřev vzduchu

Při ohřevu se zvyšuje teplota vzduchu při konstantní měrné vlhkosti  $x = konst$ . Výchozí vztah pro výpočet výkonu výměníku je:

$$\dot{Q}_{oh} = \dot{m} \cdot \Delta h = \dot{V} \cdot \rho \cdot \Delta h \quad (2.1.20)$$

Po rozepsání obdržíme vztah:

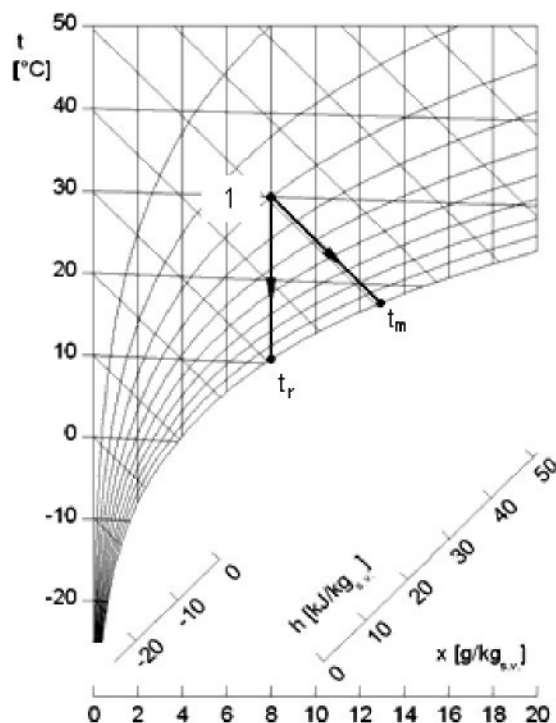
$$\dot{Q}_{oh} = \dot{m}_{sv} \cdot \Delta h = \dot{m}_{sv} \cdot c_{sv} \cdot \Delta t + \Delta x \cdot (l_v + c_v \cdot \Delta t) \quad (2.1.21)$$

Protože  $\Delta x = 0$  je poslední člen nulový, a pro stanovení potřebného výkonu ohříváče lze použít vztah:

$$\dot{Q}_{oh} = \dot{m}_{sv} \cdot c_{sv} \cdot \Delta t \quad (2.1.22)$$

## Chlazení vzduchu

Chlazení vzduchu může být tzv. suché nebo mokré. Záleží na tom, jestli při tomto procesu dochází ke kondenzaci či nikoli.



Obr. 5 Průběh změny stavu vzduchu při chlazení vzduchu [3]

### Suché chlazení:

Probíhá v případech, kdy je povrchová teplota výměníku vyšší než teplota rosného bodu upravovaného vzduchu  $t_{ch} > t_r$  (viz obr. 4). Vzhledem k tomu, že  $\Delta x = 0$ , lze pro stanovení potřebného výkonu chladiče použít stejný vztah jako pro výpočet výkonu ohřívače. Tento případ se však v praxi vyskytuje jen výjimečně. Je to dáno zdroji chladu, jež jsou většinou konstruovány na teplotní spád chladicího okruhu 6/12 °C. Střední povrchová teplota výměníku je potom tedy  $t_{ch} = 9$  °C.

### Mokrý chlazení

Dochází ke kondenzaci vodní páry obsažené v upravovaném vzduchu. Probíhá v případech, kdy je povrchová teplota výměníku nižší než teplota rosného bodu upravovaného vzduchu  $t_{ch} < t_r$  (viz obr. 6). Pro stanovení potřebného výkonu chladiče je třeba použít vztah:

$$\dot{Q}_{ch} = \dot{m}_{sv} \cdot \Delta h = \dot{m}_{sv} \cdot c_{sv} \cdot \Delta t + \Delta x \cdot (l_v + c_v \cdot \Delta t) \quad (2.1.23)$$

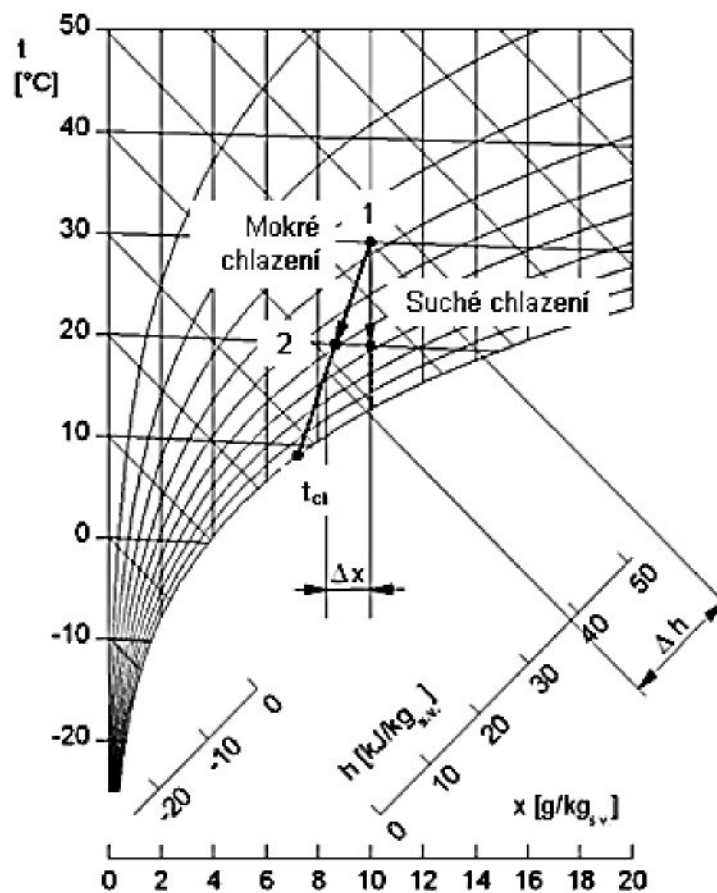
*Celkové teplo* odpovídá celkovému výkonu chladiče a je dáno součtem citelného a vázaného tepla.

$$\dot{Q}_{celk} = \dot{V} \cdot \rho \cdot \Delta h = \dot{Q}_{cit} + \dot{Q}_{váz} \quad (2.1.24)$$

*Citelným teplem* se nazývá část chladicího výkonu, která je využita na snížení teploty vzduchu.

$$\dot{Q}_{cit} = \dot{V} \cdot \rho \cdot \Delta t \quad (2.1.25)$$

*Vázaným teplem* se nazývá část výkonu daná kondenzací vodních par ve vzduchu.



Obr. 6 Průběh změny stavu vzduchu při chlazení [3]

Podle vztahu

$$\dot{m}_w = \dot{m} \cdot \Delta x \quad (2.1.26)$$

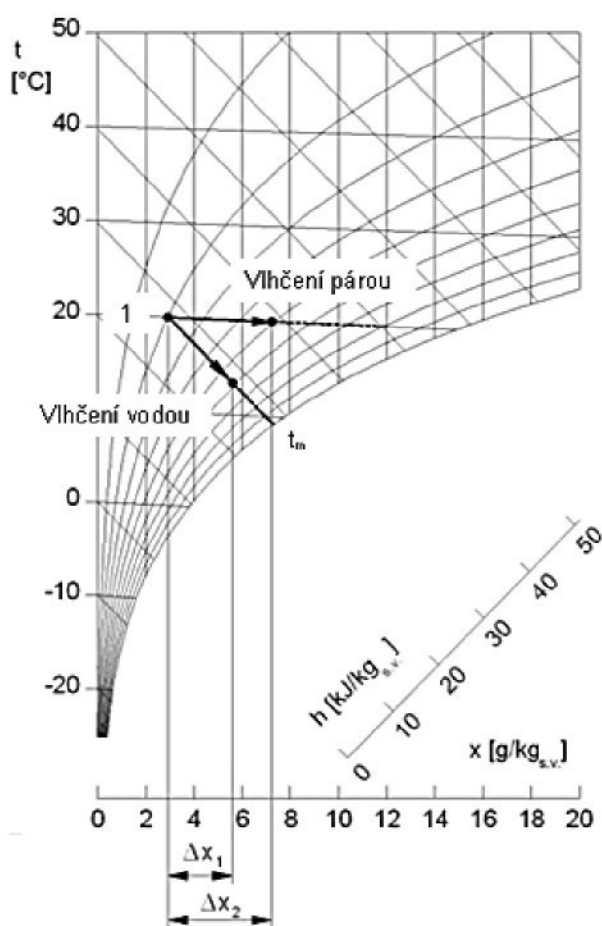
lze zjistit množství zkondenzované vody.

## Vlhčení vzduchu

Vlhčit vzduch lze párou nebo vodou.

Směr změny stavu vzduchu při *vlhčení párou* probíhá za konstantní teploty (ve skutečnosti se vzduch mírně ohřívá, pro praxi však zcela vyhovuje směr změny stavu vzduchu, kdy  $t = konst.$ ).

Směr změny stavu vzduchu při *vlhčení vodou* o teplotě  $t_m$  probíhá za konstantní entalpie, tj. adiabatické chlazení a  $h = konst.$  (viz obr. 5). Měrná vlhkost vzduchu roste, teplota vzduchu klesá a proces tak lze v některých případech využít i k chlazení.

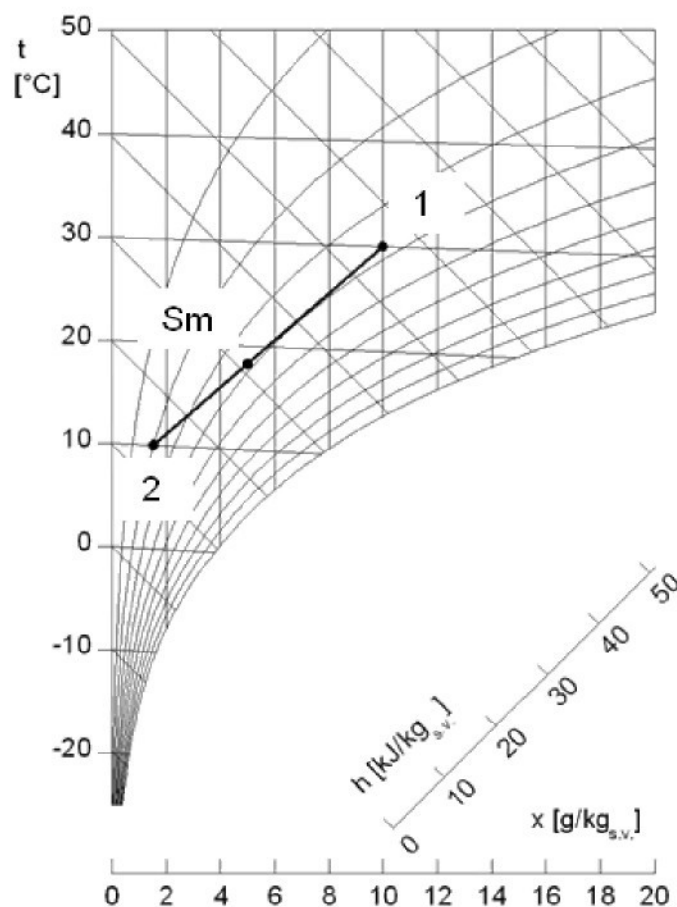


Obr. 7 Průběh změny stavu vzduchu při vlhčení vodou a párou [3]

Účinnost pračky vzduchu je dána vztahem:

$$\eta = \frac{\Delta x}{\Delta x_{max}} \cdot 100 \quad (2.1.27)$$

## Mísení dvou a více různých stavů vzduchu



Obr. 8 Konečný stav vzduchu  $Sm$  po smísení dvou různých stavů vzduchu [3]

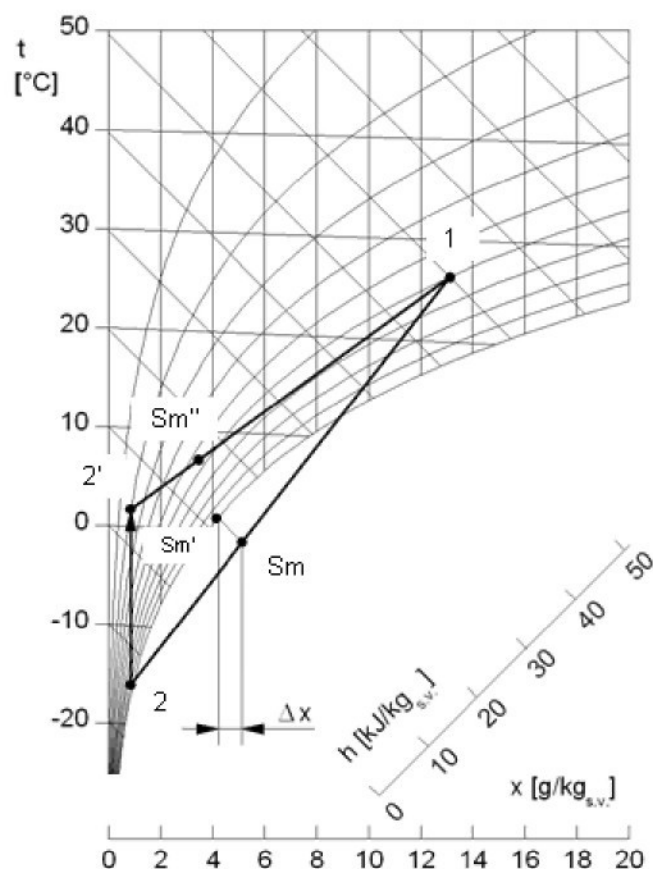
Konečná teplota po smísení  $n$  různých stavů vzduchu o různých průtocích se stanoví dle směšovací rovnice:

$$t_{sm} = \frac{t_1 \cdot m_1 + t_2 \cdot m_2 + \dots + t_n \cdot m_n}{m_1 + m_2 + \dots + m_n} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i \cdot m_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad (2.1.28)$$

a podobně i pro konečnou měrnou vlhkost:

$$x_{sm} = \frac{x_1 \cdot m_1 + x_2 \cdot m_2 + \dots + x_n \cdot m_n}{m_1 + m_2 + \dots + m_n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot m_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad (2.1.29)$$

Leží-li konečný stav vzduchu po smísení pod křivkou nasycení  $\varphi = 1$ , začne se vytvářet mlha. Po zkondenzování vodní páry se stav vzduchu ustálí na bodě  $Sm'$  (viz obr. 7). To je ovšem v technické praxi nežádoucí, a hrozí-li tento případ, je výhodné vzduch o nízké teplotě přehřát na takovou teplotu, aby se tvoření mlhy (kondenzaci) zabránilo.



Obr. 9 Mísení dvou různých stavů vzduchu při nebezpečí kondenzace, přehřev studeného vzduchu pro zabránění tvorby mlhy [3]

## Odvlhčování

Odvhlčení vzduchu lze dosáhnout buď kombinací mokrého chlazení a následného ohřevu, nebo využitím sorpčních výměníků.

### **Odvhlčení chlazení - ohřev**

Pro odvlhčení lze využít kombinace chladiče a ohřivače, nevýhodou je však vysoká spotřeba energie. Samostatná zařízení na odvlhčování využívají přímo chladivového oběhu, kde chladičem je výparník a ohřivačem kondenzátor.

### **Sorpční chlazení**

Dělí se na mechanickou a chemickou adsorpci (například Silikagel  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , aktivovaný oxidovaný hliník  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , molekulová síta). Materiál je třeba regenerovat a většinou se vyrábí jako rotační nebo přepínací výměníky.

Zdroj [3]

## 2.2 Přenos tepla

### Druhy šíření tepla

Teplo se přenáší prostředím třemi základními způsoby:

**Vedením** - Při vedení (neboli *kondukcí*) tepla částice látky v oblasti s vyšší střední kinetickou energií předávají část své kinetické energie prostřednictvím vzájemných srážek částicím v oblasti s nižší střední kinetickou energií. Částice se přitom nepřemísťují, ale kmitají kolem svých rovnovážných poloh.

**Prouděním** - Při proudění (neboli *konvekci*) dochází k přenosu tepla v důsledku proudění a promíchávání různě ohřátých částí hmoty.

**Zářením** - Při záření (neboli *sálání* či *radiaci*) dochází k vyzařování energie ze zdroje ve formě elektromagnetických vln a jeho následnému pohlcování ozařovaným tělesem.

### Vlastnosti přenosu tepla

Teplo se vždy přenáší od místa s vyšší teplotou k místu s teplotou nižší.

Tepelná energie se může přenášet vedením a prouděním pouze v prostředí, které je vyplněno látkou. Příčinou přenosu je neustálý pohyb částic hmoty. Vzájemným působením mezi jednotlivými částicemi dochází k předávání kinetické energie, a to tak dlouho, dokud nedojde k vyrovnání teplot.

Tepelné záření se svojí povahou odlišuje od vedení a proudění, neboť tepelná energie se může přenášet i v prostoru, který není vyplněn látkou (tedy ve vakuu). Důvodem je skutečnost, že sálání představuje elektromagnetické záření, které ke svému přenosu hmotu nepotřebuje.

### Přestup tepla (konvekce)

**Přestup tepla** je jeden ze způsobů šíření tepla, kdy dochází k proudění hmoty o různé teplotě. Tepelné proudění se uplatňuje pouze u tekutin. Pohybem hmoty dochází k promíchávání jednotlivých částic, které mají odlišnou teplotu, a tím se přenáší teplo mezi různými částmi hmotného útvaru.

### **Rozdělení konvekce**

*Nucená konvekce* – pohyb tekutiny je vyvolán vnějším působením, např. čerpadlem, ventilátorem, větrem atd.

*Přirozená konvekce* – neboli volná konvekce vzniká v tekutině s nehomogenním teplotním polem a je podmíněna existencí pole objemových sil (např. gravitace, odstředivá síla aj.)

### **Vlastnosti konvekce**

Ve srovnání s vedením tepla může být proudění tepla intenzivnější. Přestup je obvykle spojen se změnou některé vlastnosti látky v závislosti na teplotě. Samovolné tepelné proudění stoupá vzhůru, protože teplejší části kapalin a plynů mají menší hustotu. Chladnější klesá dolů.

Zdroj [3], [4], [5]

## **2.3 Přenos tepla a hmoty**

Přenos hmoty z jedné fáze do druhé je vždy doprovázen určitým tepelným efektem. Například při absorpci putuje určitá složka z plynu přes mezifázové rozhraní do kapaliny, kde se rozpustí. Při rozpouštění se uvolňuje rozpouštěcí teplo.

Pokud rozpouštěná složka reaguje chemicky s kapalinou, uvolňuje se navíc i teplo reakční. Teplota fázového rozhraní se v průběhu času ustálí na určité stacionární hodnotě, která závisí na možnostech přestupu tepla mezi oběma fázemi. Rychlost absorpce je značně ovlivněna teplotou fázového rozhraní, takže přenos tepla a hmoty je zde vzájemně svázán. Podobně je tomu i u odpařování, kde se páry odpařující se kapaliny difundují do mezifázového rozhraní a odpařováním je kapalině odebíráno teplo.

Při vyjadřování vzájemného vztahu mezi součiniteli přenosu hmoty a tepla lze vyjít z analogií mezi oběma procesy. Pro Nusseltovo číslo lze při nucené konvekci užít zpravidla vztah:

$$Nu = A \cdot Re^{\gamma_1} \cdot Pr^{\gamma_2} \quad (2.3.1)$$

A analogicky lze pro Sherwoodovo číslo psát:

$$Sh = A \cdot Re^{\gamma_1} \cdot Sc^{\gamma_2} \quad (2.3.2)$$

Dělením rovnice (2.3.2) rovnicí (2.3.1) obdržíme:

$$\frac{Sh}{Nu} = \left(\frac{Sc}{Pr}\right)^{1/2} = Le^{1/2}, \quad (2.3.3)$$

kde  $Le$  je tzv. Lewisovo číslo vyjadřující míru analogie mezi přenosem tepla a hmoty:

$$Le = \frac{a}{D_{AB}} \quad (2.3.4)$$

S využitím definic Sherwoodova a Nusseltova čísla obdržíme po úpravě a dosazení do rovnice (2.3.3) poměr mezi součiniteli přestupu:

$$\frac{\beta'}{\alpha} = \frac{Sh}{Nu} \cdot \frac{D_{AB}}{\lambda} = \frac{Sh}{Nu} \cdot \frac{1}{Le \cdot \rho \cdot c_p} = \frac{1}{\rho \cdot c_p} \cdot Le^{1/2-1} \quad (2.3.5)$$

Vztah (2.3.5) potom můžeme využít pro určení přestupu hmoty ze zjištěného součinitele pro přestup tepla.

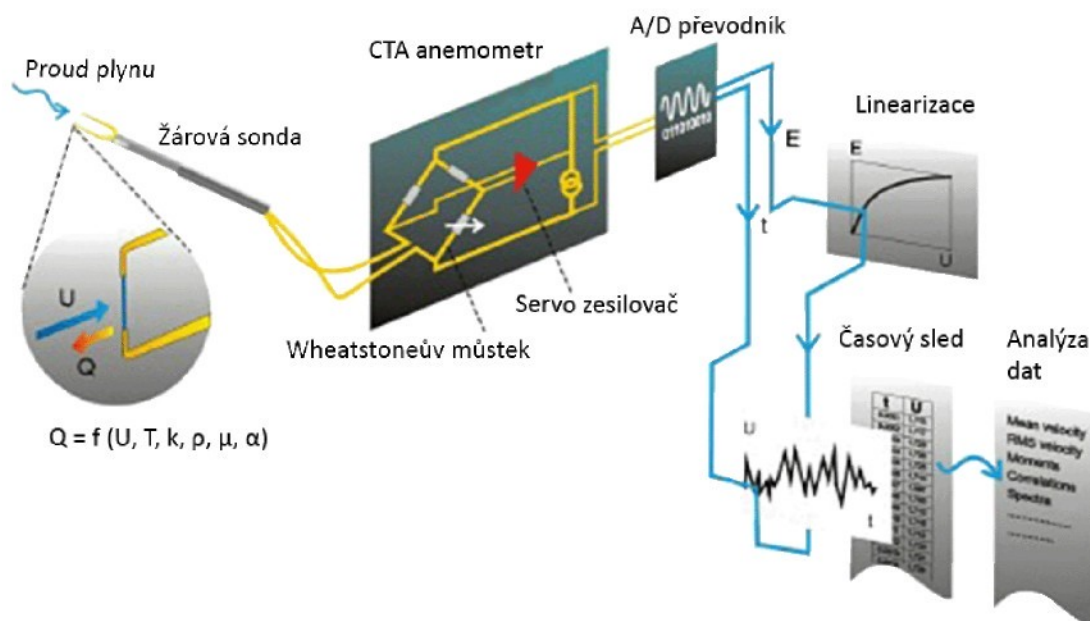
Zdroj [4]

## 2.4 Anemometrie

Anemometr neboli větroměr je přístroj pro měření rychlosti proudění, anebo rychlosti a směru proudění. CTA neboli drátková anemometrie se používá pro měření jemných rozdílů v turbulentním proudění tekutin. Princip měření je založen na chladícím účinku tekutiny na zahřátá tělesa. CTA měří rychlost proudění v bodě a zajišťuje kontinuální sledování změn, ze kterých mohou být zjištěny maximální hodnoty, nebo mohou být využity k určení statistických údajů, jako například průměrná rychlost, intenzita turbulence a další.

Vlastnosti CTA:

- měření rychlostí od několika cm/s po nadzvukové
- vysoké časové rozlišení – změny v řádu několika stovek Hz
- vysoké prostorové rozlišení – víry o rozměrech 1 mm i méně
- informace o okamžité rychlosti



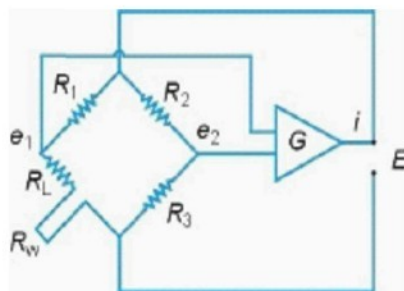
Obr. 10 Schéma drátkové anemometrie [6]

## Přenos tepla

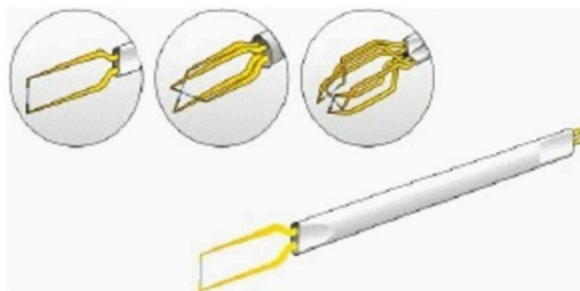
Konvektivní přenos tepla  $Q$  z drátu je funkcí rychlosti  $U$ , teploty drátu  $T_w$  a fyzikálních vlastností tekutiny:

(2.4.1)

kde  $A_w$  je povrch drátu a  $k$  součinitel prostupu tepla. Tyto jsou sloučeny do kalibračních konstant  $X$  a  $Y$ . Drát ( $R_w$ ) je spojen s jednou stranou Wheatstonova můstku a je vyhříván elektrickým proudem.



Obr. 11 Princip funkce Wheatstonova můstku [6]



Obr. 12 CTA sondy obvykle používají 1mm dlouhý wolframový drát o průměru 5μm připojený na dvě jehly [6]

Servo zesilovač drží můstek v rovnováze tím, že řídí proud senzoru tak, aby odpor, a tudíž i teploty zůstaly konstantní, nezávislé na chlazení měřenou tekutinou. Napětí E představuje přenos tepla, a proto je přímým měřítkem rychlosti. Kombinace senzoru s nízkou tepelnou setrvačností a vysokým ziskem serva smyčky zesilovače poskytuje velmi rychlou reakci na kolísání průtoku. Rozlišovací schopnost sondy je udávána jako šířka frekvenčního pásma a je definována jako frekvence, na které je signál tlumen o -3 dB.

Zvyšuje se s klesající časovou konstantou drátu, zvyšujícím se ziskem servo smyčky a rychlostí proudění. Šířka pásma pro CTA se sondou s 5 mm drátem je kolem 100 kHz při rychlosti proudění okolo 30 m/s. Systém je optimalizován použitím obdélníkového signálu na vrcholu můstku a nastavením zisku servo smyčky.

### **Převod napětí na rychlost**

Vztah mezi napětím a rychlostí může být popsán jako exponenciální funkce nebo jako polynom. Citlivost relativní rychlosti je téměř konstantní v širokém rychlostním rozsahu. Kalibrace ve známém proudění tvoří základ pro tvorbu křivky používané k převodu napětí na sondě na rychlost.

### **Citlivost**

Napětí na můstku závisí na obou složkách rychlosti a teplotě. Jako drát je sonda citlivá na obě složky rychlosti a různé směry. Kolmo umístěné dráty umožňují získat informace o obou složkách. Efektivní rychlost chlazení pro drát ve třídímenzionálním proudění může být vyjádřena jako:

$$U_{ef}^2 = U_x^2 + d \cdot U_y^2 + e \cdot U_z^2 \quad (2.4.2)$$

Pro dvou a třídrátkové sondy pak mohou být řešeny rovnice efektivní rychlosti proudění pro jednotlivé složky. Faktory náklonu d a odklonu e jsou určeny pomocí směrové kalibrace. Změna teploty o 1 K znamená chybu přibližně 2 % rychlosti. Napětí může být korigováno před linearizací užitím poměru mezi teplotou při měření a teplotou při kalibraci.

## **Konverze a redukce dat**

Napětí můstku jsou získávána z A/D převodníku (s frekvencí až 1 MHz nebo vyšší) po přefiltrování přes dolní propust. Data jsou převedena do technických jednotek ve třech stupních:

- korekce teploty
- linearizace
- přepočet na jednotky rychlosti

Převedená data jsou poté uložena do statistik měřeného proudění.

Zdroj [4], [6]

## 3 Řešení

### 3.1 Měřicí zařízení

Pro vlastní měření jsem použil měřicí jednotku pro drátkovou anemometrii z laboratoře Katedry energetických zařízení. Sestava pro měření se skládá z počítačové sestavy s přídatnou kartou pro příjem dat, převodníku dat z měřicího přístroje do přídatné karty, měřicího přístroje obsahujícího regulátor napětí a držáku sondy se sondou.

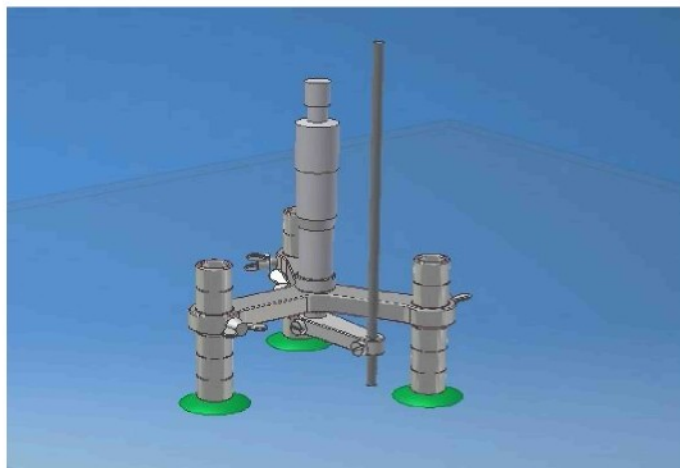
Na počítači zajišťoval zápis a konverzi dat pro další použití program Dantec LabVIEW. Převodník byl použit CA-1000 od firmy National Instruments. Měřicí přístroj byl typu StreamLine 90N10Frame, taktéž od společnosti Dantec s regulátorem 90C10 a kalibračním modulem 90H01. Měřicí sonda byla typu P14 s rovnými jehlami. Držáky sondy byly z důvodu členitosti vnitřního prostoru vozidla použity dva, a to přímý a zahnutý.



Obr. 13 Sestava použitá na měření [2]

## 3.2 Stojánek

Abych mohl měřit, bylo potřeba, aby sonda během měření setrvala v určené pozici a aby bylo možno jednoduše a přesně měnit její vzdálenost od skla.



Obr. 14 3D model stojánu [2]

Proto bylo nutné vyrobit stojánek spojující držák sondy se sklem a umožňující její posuv kolmo ke sklu. Dalšími požadavky bylo, aby byl přípravek neinvazivní a nemohl nijak poškodit sklo, proto jsem pro jeho připevnění použil přísavky. Aby se co nejvíce snížila hmotnost, kterou musí přísavky unést, byl stojánek vyroben z hliníkové slitiny. Dalším požadavkem byla jeho snadná výroba.

Stojánek jsem vzhledem k zakřivení čelního skla navrhl jako třícípý s posuvnými nohami ve vrcholech a mikrometrickým šroubem uprostřed. Na každé noze je upevněna jedna přísavka. Mikrometrický šroub má na posuvném konci připevněnou výměnnou konzolu umožňující natáčení držáku. Různé kombinace konzol a držáků sondy mi zabezpečily dobrou přístupnost všech měřených míst.

Pro stojánek bylo potřeba vyrobit tři součásti:

- konzolu, která drží vše pohromadě
- nohy, které spojují stojánek s přísavkami a umožňují výškové nastavení konzoly
- výložník upevněný na mikrometrickém šroubu, ve kterém je upevněn držák sondy

Výrobní výkresy těchto součástí jsou v příloze. Ostatní součásti byly zakoupené, mikrometrický šroub patří k vybavení laboratoře.

### 3.3 Měření rychlostního profilu na skle

Měření jsem provedl na vnitřní straně čelního skla automobilu Škoda Roomster, který zapůjčila Katedra vozidel a motorů, která jej vlastní. Jedná se o nultou sérii s klimatizací typu Climatronic s plynulou regulací. Climatronic nabízí intenzitu ofukování v sedmi stupních. Pro měření jsem vzhledem k provozu na baterii použil první stupeň.

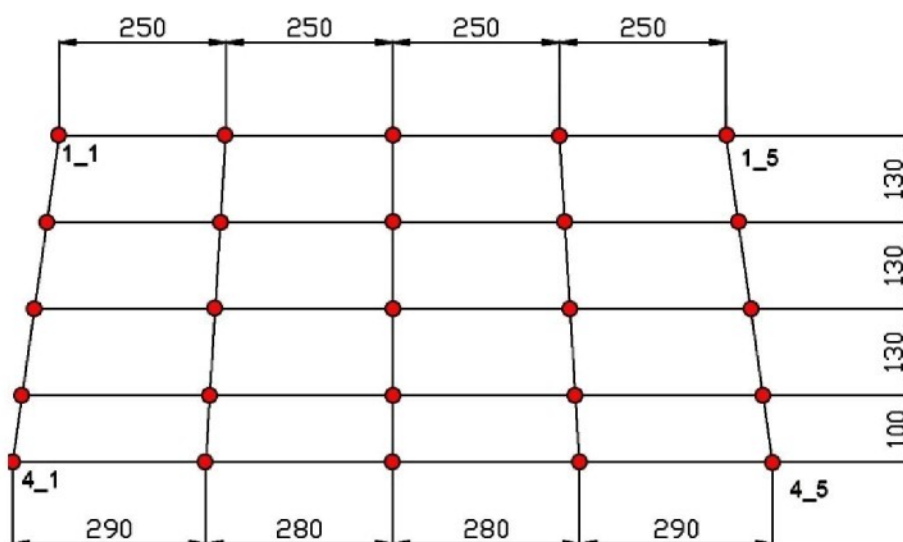


Obr. 15 Nastavení klimatizace během měření [2]

Všechny ovladatelné průduchy byly uzavřené, ostatní zůstaly jako při běžném provozu.

Aby bylo možné objektivně vyhodnotit výsledky měření, bylo zapotřebí vytvořit síť bodů.

Měření probíhalo ve dvaceti bodech uspořádaných do čtyř řad a pěti sloupců.



Obr. 16 Síť měřených bodů [2]

Body v prostředním sloupci leží v rovině souměrnosti vozidla. Od této roviny byly odměřovány vodorovné vzdálenosti. Svislé vzdálenosti jsou měřeny od spodní hrany skla, a proto leží na křivkách rovnoběžných s touto hranou.

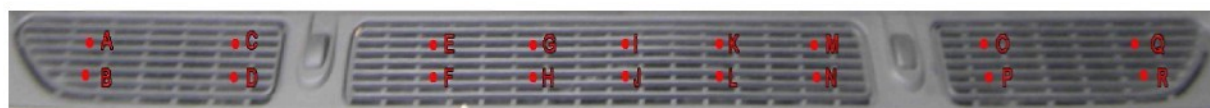


*Obr. 17 Přenesení bodů na sklo [2]*

V každém bodě je rychlost proudění změřena v patnácti vzdálenostech od skla v následujících hodnotách: 0,0 (co nejbližší u skla), 0,5 mm, 1,0 mm, 1,5 mm, 2,0 mm, 2,5 mm, 3,0 mm, 3,5 mm, 4,0 mm, 5,0 mm, 6,0 mm, 7,0 mm, 8,0 mm, 9,0 mm a 10 mm.

### **3.4 Měření rychlostí na vstupu do klimatizace**

Po dohodě s vedoucím práce jsem dále změřil rychlost na vstupu do klimatizace, abychom získali přehled o těchto hodnotách pro případné další experimenty. Síť pro sběr dat měla následující tvar:



*Obr. 18 Schéma umístění bodů pro měření rychlosti na vstupu [2]*

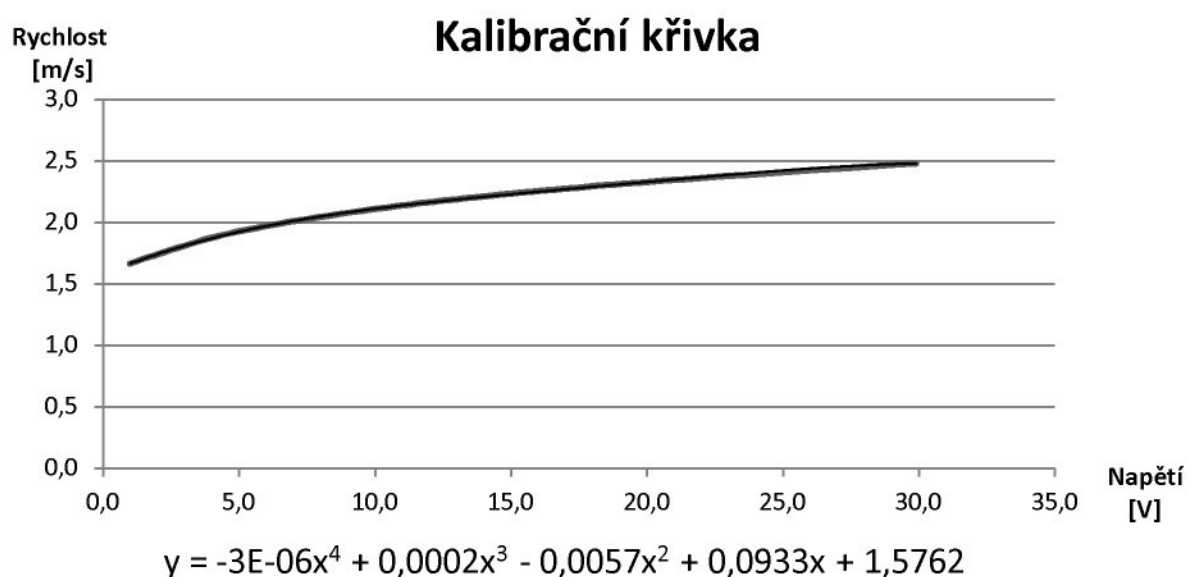
Rychlosti jsem měřil příručním drátkovým anemometrem. Tento typ přímo ukazuje naměřenou rychlost na displeji. Klimatizace byla nastavena na první stupeň, stejně jako při měření rychlostního profilu na skle, viz obr. 15. Dále jsem ještě změřil rychlosti při maximálním výkonu ventilátoru.

### 3.5 Kalibrace

Sonda použitá pro měření na skle ovšem poskytuje pouze výsledky v podobě napětí, a proto je potřeba tyto výsledky převést na rychlost. Pro převod se používá tzv. Kalibrační křivka, kterou získáme měřením výsledného napětí při přesně definovaných rychlostech. Vzhledem k poruše původní sondy, s kterou byla měření prováděna, byly použity hodnoty naměřené na jiné sondě shodného provedení.

| Kalibrační hodnoty |                |
|--------------------|----------------|
| napětí [V]         | rychlost [m/s] |
| 1,000              | 1,664          |
| 1,500              | 1,704          |
| 2,027              | 1,741          |
| 2,990              | 1,810          |
| 4,397              | 1,897          |
| 6,508              | 1,990          |
| 9,510              | 2,093          |
| 13,634             | 2,204          |
| 20,229             | 2,333          |
| 29,913             | 2,481          |

Tab. 1 Kalibrační hodnoty [2]



Graf 1 Kalibrační křivka s odpovídajícím polynomem čtvrtého řádu [2]

Pro přepočet naměřených hodnot jsem použil polynom čtvrtého řádu, který jsem z kalibračních hodnot vygeneroval v programu Microsoft Excel. Kde y odpovídá rychlosti proudění a x naměřenému napětí.

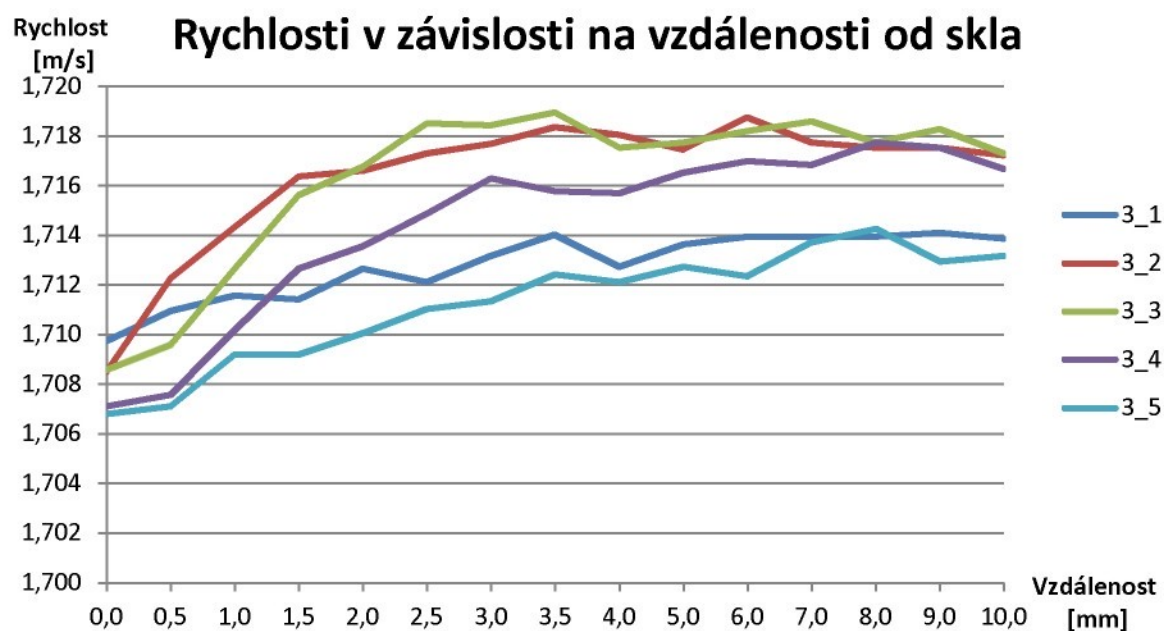
## 4 Výsledky

### 4.1 Rychlosti v bodě v závislosti na vzdálenosti

Pro názornou ukázkou jsem vybral body 3\_1 až 3\_5. Tyto body leží v druhé řadě odshora, viz obr. 16.

|                 |      | Rychlosti v bodech [m/s] |        |        |        |        |
|-----------------|------|--------------------------|--------|--------|--------|--------|
|                 |      | bod                      |        |        |        |        |
|                 |      | 3_1                      | 3_2    | 3_3    | 3_4    | 3_5    |
| vzdálenost [mm] | 0,0  | 1,7097                   | 1,7085 | 1,7086 | 1,7071 | 1,7068 |
|                 | 0,5  | 1,7110                   | 1,7123 | 1,7096 | 1,7076 | 1,7071 |
|                 | 1,0  | 1,7116                   | 1,7143 | 1,7126 | 1,7102 | 1,7092 |
|                 | 1,5  | 1,7114                   | 1,7164 | 1,7156 | 1,7126 | 1,7092 |
|                 | 2,0  | 1,7126                   | 1,7166 | 1,7168 | 1,7136 | 1,7100 |
|                 | 2,5  | 1,7121                   | 1,7173 | 1,7185 | 1,7149 | 1,7110 |
|                 | 3,0  | 1,7132                   | 1,7177 | 1,7184 | 1,7163 | 1,7113 |
|                 | 3,5  | 1,7140                   | 1,7184 | 1,7190 | 1,7158 | 1,7124 |
|                 | 4,0  | 1,7127                   | 1,7181 | 1,7175 | 1,7157 | 1,7121 |
|                 | 5,0  | 1,7136                   | 1,7174 | 1,7178 | 1,7165 | 1,7127 |
|                 | 6,0  | 1,7139                   | 1,7187 | 1,7182 | 1,7170 | 1,7123 |
|                 | 7,0  | 1,7139                   | 1,7178 | 1,7186 | 1,7168 | 1,7137 |
|                 | 8,0  | 1,7139                   | 1,7175 | 1,7178 | 1,7178 | 1,7143 |
|                 | 9,0  | 1,7141                   | 1,7175 | 1,7183 | 1,7175 | 1,7130 |
|                 | 10,0 | 1,7139                   | 1,7172 | 1,7173 | 1,7167 | 1,7132 |

Tab. 2 Rychlosti v bodech 3\_1 až 3\_5 v závislosti na vzdálenosti od skla [2]



Graf 2 Rychlosti v bodech 3\_1 až 3\_5 v závislosti na vzdálenosti od skla [2]

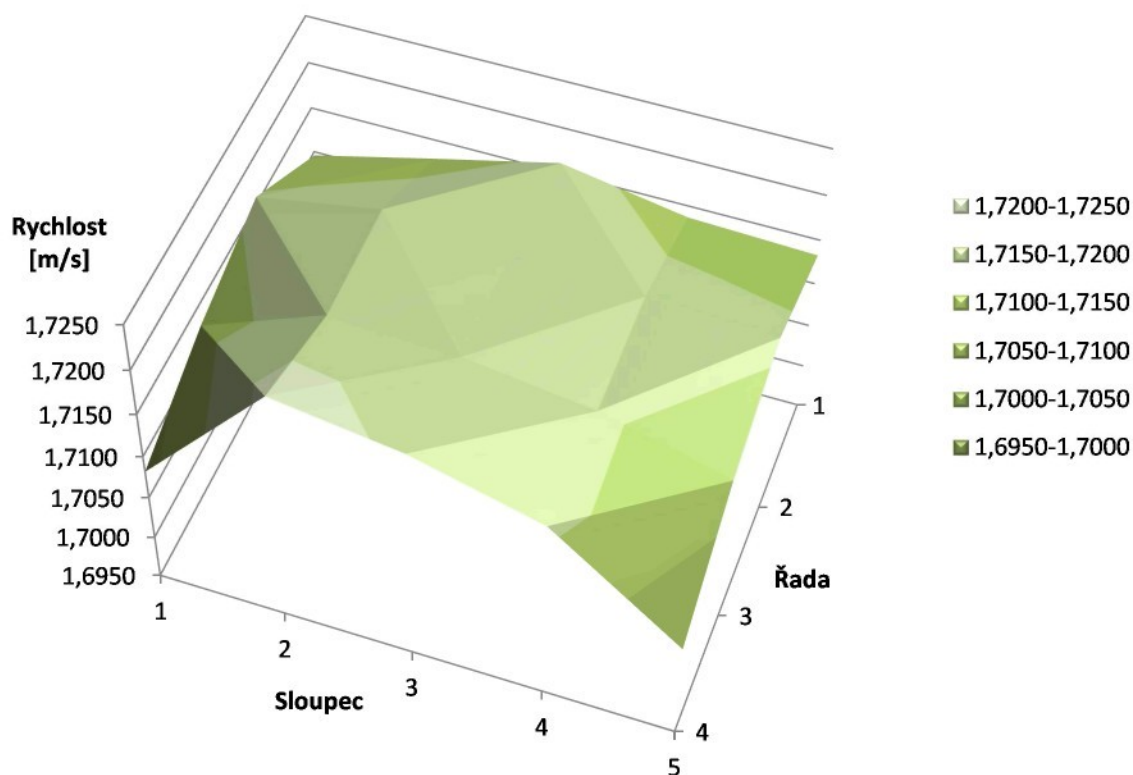
## 4.2 Rychlosti v určité vzdálenosti

Jelikož jsem měřil v 15 vzdálenostech od skla, vzniklo 15 grafů znázorňujících rychlosti v každém měřeném bodě v určité vzdálenosti od skla. Pro ukázkou jsem vybral vzdálenost 4 mm od skla. Bod 1\_1 se nachází nahoře u spolujezdce, bod 4\_5 dole u řidiče.

| Vzdálenost 4 mm [m/s] |        |        |        |        |        |
|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Bod                   | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      |
| 1                     | 1,7096 | 1,7129 | 1,7161 | 1,7137 | 1,7133 |
| 2                     | 1,7158 | 1,7182 | 1,7171 | 1,7163 | 1,7158 |
| 3                     | 1,7127 | 1,7181 | 1,7175 | 1,7157 | 1,7121 |
| 4                     | 1,7082 | 1,7215 | 1,7195 | 1,7159 | 1,7059 |

Tab. 3 Rychlosti v bodech ve vzdálenosti 4 mm od skla[2]

### Rychlosti ve vzdálenosti 4 mm



Graf 3 Rychlosti v bodech ve vzdálenosti 4 mm od skla [2]

Tabulky a grafy ostatních vrstev jsou obsaženy v příloze.

### 4.3 Rychlosti na vstupu - první stupeň

Rychlosti naměřené na vstupu do klimatizace byly změřeny v bodech A až R, které odpovídají schématu na obr. 18. Toto schéma také odpovídá tab. 4 uvedené níže.

| Klíč k tabulce hodnot |   |   |   |   |   |   |   |   |
|-----------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A                     | C | E | G | I | K | M | O | Q |
| B                     | D | F | H | J | L | N | P | R |

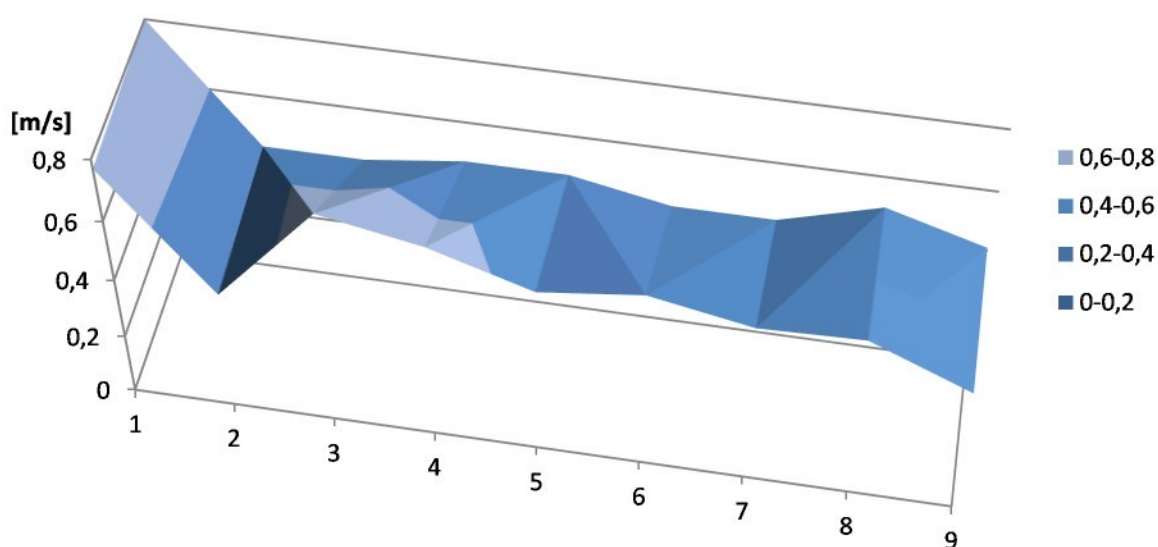
Tab. 4 Klíč k tabulce hodnot [2]

Klimatizace byla nastavena na první stupeň ofukování stejně jako při měření rychlostního profilu na skle, viz obr. 15.

| Hodnoty při výkonu na první stupeň [m/s] |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0,77                                     | 0,40 | 0,72 | 0,66 | 0,56 | 0,60 | 0,54 | 0,55 | 0,42 |
| 0,80                                     | 0,43 | 0,43 | 0,47 | 0,47 | 0,41 | 0,41 | 0,50 | 0,41 |

Tab. 5 Hodnoty naměřené při nastavení ofukování na první stupeň uspořádané podle tab. 4 [2]

### Rychlost proudění při výkonu na první stupeň



Graf 4 Rychlost proudění na vstupu při ofukování na první stupeň [2]

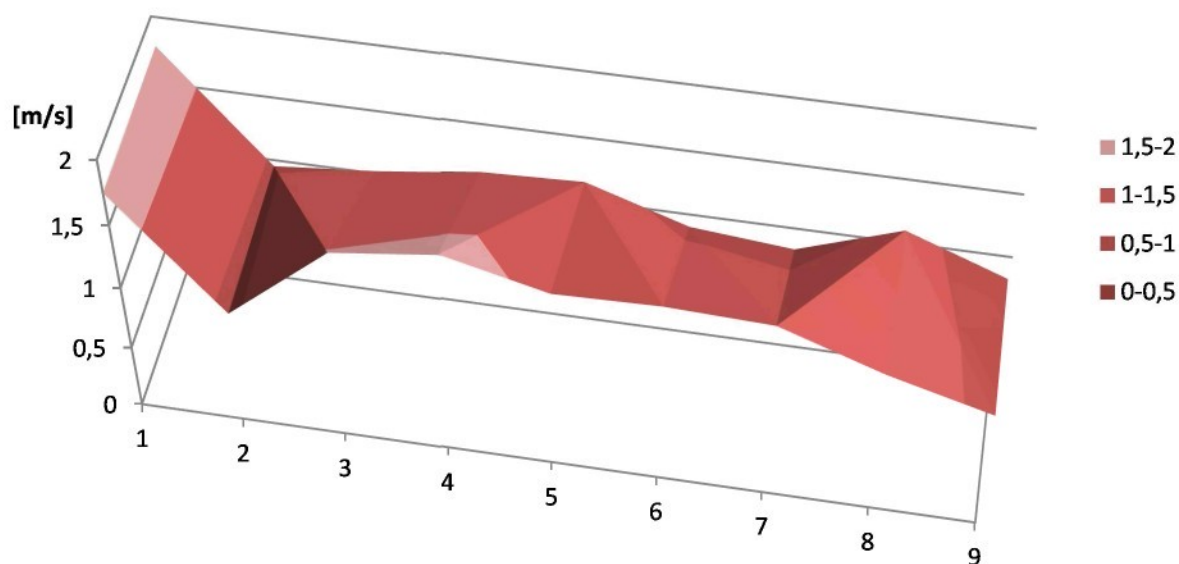
## 4.4 Rychlosti na vstupu – maximální výkon

Pro porovnání jsem ještě změřil hodnoty při maximálním výkonu ofukování.

| Hodnoty při maximálním výkonu [m/s] |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1,75                                | 0,91 | 1,52 | 1,62 | 1,43 | 1,45 | 1,42 | 1,15 | 0,94 |
| 1,78                                | 0,95 | 1,02 | 1,12 | 1,15 | 0,9  | 0,83 | 1,1  | 0,82 |

Tab. 6 Hodnoty naměřené při nastavení ofukování na maximální výkon uspořádané podle tab. 4 [2]

## Rychlost proudění při maximálním výkonu



Graf 5 Rychlost proudění na vstupu při ofukování na maximální výkon [2]

## 5 Závěr

Úkolem bakalářské práce bylo zjistit bližší informace o systémech, které se používají k odmrazování čelních skel. Jelikož nejčastějším systémem pro odstraňování a prevenci zamrznutí je ofukování vzduchem, bylo potřeba se na odmrazování podívat i z pohledu přenosu tepla a hmoty. Nejdříve je potřeba vzniklou námrazu rozpustit a poté vzniklou kapalinu ofukováním odstranit. Protože rychlost odvodu vlhkosti z čelního skla přímo souvisí s rychlostí proudícího vzduchu na čelním skle, bylo další částí této práce navrhnout a následně provést změření rychlostního profilu na vnitřní straně čelního skla automobilu pomocí drátkové anemometrie. Automobil typu Škoda Roomster nám pro tento účel zapůjčila Katedra vozidel a motorů Technické univerzity v Liberci. Pro měření bylo potřeba navrhnout a vyrobit stojánek pro upevnění sondy rovnoběžně se sklem.

Klimatizační soustava automobilu Škoda Roomster je navržena tak, že ventilátor umístěný před spolujezdcem nasává vzduch z venkovního prostředí. Upravený venkovní vzduch je čelně přiveden do středu vozu do klimatizační jednotky. Odsud pokračuje vzhůru potrubím souměrným k podélné ose vozu vedoucím k čelnímu sklu. Proto se zdá logické, že proudění na čelním skle by mělo být symetrické. Z výsledků měření však vyplývá, že nejvyšší rychlost na ofukovaném skle je před spolujezdcem. Zaměřené sklo tedy bude průhledné dříve u spolujezdce než u řidiče. Tento výsledek mě u takto moderního vozu velmi překvapil. Rozhodně jsem očekával výsledek spíše opačný nebo přinejmenším takový, že proudění bude na obou stranách stejné.

Takováto vlastnost ofukovací soustavy je zřejmě způsobena dynamikou proudícího vzduchu a zřejmě není plánována z výroby. Zjištění přesného důvodu by si vyžádalo měření uvnitř celé klimatizační soustavy. Toto měření by však bylo vzhledem k nepřístupnosti jednotlivých částí klimatizační soustavy náročné. Měření by totiž vyžadovalo umístění sond v kanálech, což by se neobešlo bez vrtání otvorů a zapůjčení vozidla od Katedry vozidel a motorů je pro tyto účely nemožné.

Možnost, že vyšší rychlosti proudění u spolujezdce jsou způsobeny mimostředním umístěním ventilátoru vozidla, bychom mohli zjistit při porovnání s prouděním na čelním skle u automobilu, který má ventilátor umístěn v podélné ose vozidla, jako například Škoda Favorit nebo Škoda Felicia.

Pro zjištění skutečného důvodu této vlastnosti bude zřejmě nejlepší použít simulaci proudění pomocí počítače. Pokud by byl k dispozici počítačový model klimatizace a vnitřního prostoru vozidla, mohli bychom ofukování čelního skla nasimulovat. Tato metoda má výhodu v tom, že je neinvazivní a nenaruší proudění v kanálu sondou. Její nevýhodou je složité zjišťování okrajových vstupních podmínek, na kterých výsledek simulace velmi závisí.

Jednou z těchto podmínek je zjištění rychlostí na vstupu do klimatizace. Z těchto hodnot lze zjistit celkový objemový průtok vzduchu klimatizací na určitý rychlostní stupeň ventilátoru. Na zkoušku jsem změřil proudění při výkonu ventilátoru ve stejném režimu jako při měření rychlostních profilů na čelním skle a pro porovnání jsem ještě změřil rychlosti při maximálním výkonu ventilátoru. Měření vstupních rychlostí dopadlo podle mého očekávání, a to tak, že nejvyšší rychlosti jsou nejbližší u sání ventilátoru.

Získat z těchto hodnot celkový průtok vzduchu by však vzhledem k členitosti vstupního otvoru bylo poměrně složité. Jako výhodnější se jeví výroba přípravku pro měření rychlosti v místě prachového filtru, umístěného těsně před ventilátorem, který má obdélníkový tvar. Výpočet objemového průtoku v tomto místě by pak byl výrazně jednodušší.

## Seznam použité literatury

[1] ŠKODA AUTO A.S., *Návod k obsluze Škoda Forman*

[2] Materiály autora

[3] *TZB Info Větrání a klimatizace* [online]. [cit. 25.10.2009]. Dostupné z : <<http://vetrani.tzb-info.cz/t.py?t=1&i=244>>

[4] *Wikipedie, otevřená encyklopedie* [online]. [cit. 14.11.2009]. Dostupné z: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/>>

[5] LEINHARD IV, JOHN H., LEINHARD V, JOHN H., *A Heat transfer textbook*, Third edition, Version 1.23, Cambridge 2005

[6] *Dantec Dynamics* [online]. [cit. 24.3.2010]. Dostupné z: <<http://www.dantecdynamics.com/Default.aspx?ID=1057>>

[7] ŠESTÁK JIŘÍ, RIEGER FRANTIŠEK, *Přenos hybnosti tepla a hmoty*, Vydavatelství ČVUT, 2005

## Seznam příloh

Příloha 1 – Naměřené hodnoty pro body 1\_1 až 4\_5

Příloha 2 – Rychlostní profily v jednotlivých bodech

Příloha 3 – Rychlosti v jednotlivých vzdálenostech od skla

Příloha 4 – Konstrukční výkresy stojáčku

**Tabulky naměřených hodnot [V]**

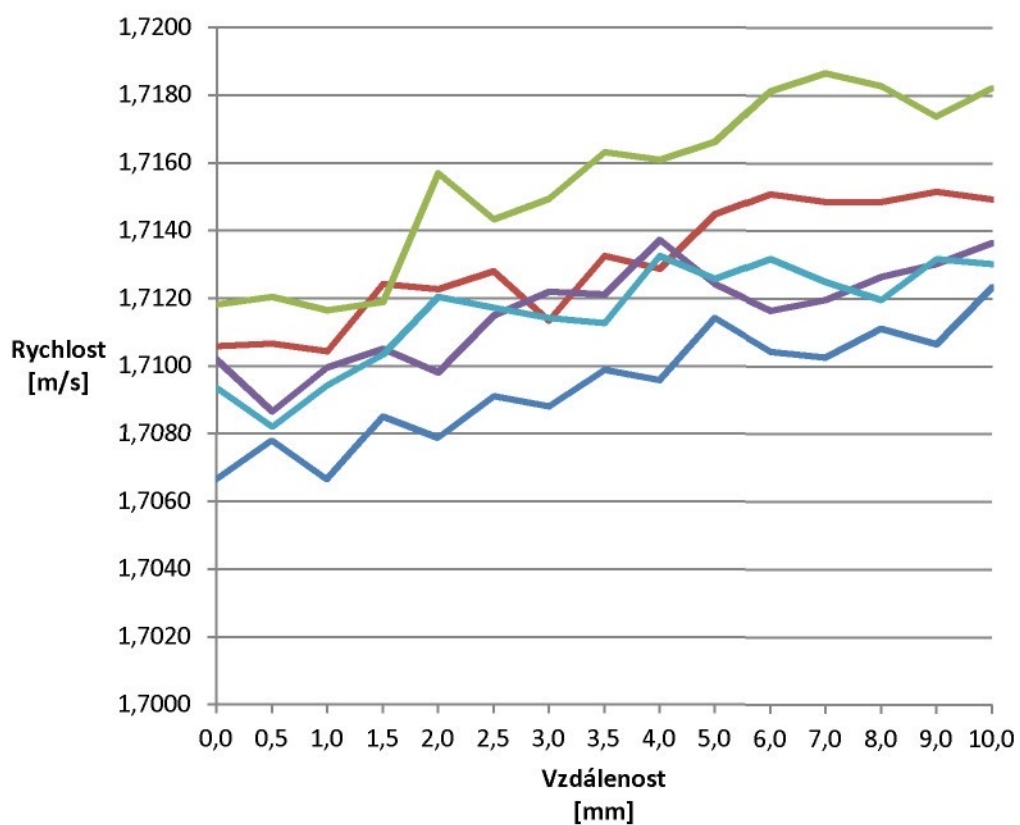
| Body 1_1 až 2_2 |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-----------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                 |      | Bod   |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|                 |      | 1_1   | 1_2   | 1_3   | 1_4   | 1_5   | 2_1   | 2_2   | 2_3   | 2_4   | 2_5   |
| Vzdálenost [mm] | 0,0  | 1,534 | 1,585 | 1,601 | 1,580 | 1,569 | 1,602 | 1,653 | 1,630 | 1,626 | 1,593 |
|                 | 0,5  | 1,549 | 1,586 | 1,604 | 1,560 | 1,554 | 1,597 | 1,660 | 1,642 | 1,634 | 1,600 |
|                 | 1,0  | 1,534 | 1,583 | 1,599 | 1,577 | 1,570 | 1,620 | 1,659 | 1,637 | 1,630 | 1,611 |
|                 | 1,5  | 1,558 | 1,609 | 1,602 | 1,584 | 1,582 | 1,623 | 1,667 | 1,663 | 1,646 | 1,615 |
|                 | 2,0  | 1,550 | 1,607 | 1,652 | 1,575 | 1,604 | 1,628 | 1,673 | 1,672 | 1,647 | 1,638 |
|                 | 2,5  | 1,566 | 1,614 | 1,634 | 1,597 | 1,600 | 1,644 | 1,666 | 1,669 | 1,650 | 1,624 |
|                 | 3,0  | 1,562 | 1,595 | 1,642 | 1,606 | 1,596 | 1,637 | 1,686 | 1,665 | 1,661 | 1,646 |
|                 | 3,5  | 1,576 | 1,620 | 1,660 | 1,605 | 1,594 | 1,629 | 1,690 | 1,662 | 1,658 | 1,665 |
|                 | 4,0  | 1,572 | 1,615 | 1,657 | 1,626 | 1,620 | 1,653 | 1,685 | 1,671 | 1,660 | 1,653 |
|                 | 5,0  | 1,596 | 1,636 | 1,664 | 1,609 | 1,611 | 1,636 | 1,678 | 1,674 | 1,676 | 1,648 |
|                 | 6,0  | 1,583 | 1,644 | 1,684 | 1,599 | 1,619 | 1,662 | 1,692 | 1,672 | 1,669 | 1,668 |
|                 | 7,0  | 1,581 | 1,641 | 1,691 | 1,603 | 1,610 | 1,651 | 1,695 | 1,676 | 1,678 | 1,672 |
|                 | 8,0  | 1,592 | 1,641 | 1,686 | 1,612 | 1,603 | 1,674 | 1,680 | 1,657 | 1,674 | 1,668 |
|                 | 9,0  | 1,586 | 1,645 | 1,674 | 1,617 | 1,619 | 1,661 | 1,675 | 1,672 | 1,663 | 1,682 |
|                 | 10,0 | 1,608 | 1,642 | 1,685 | 1,625 | 1,617 | 1,654 | 1,664 | 1,655 | 1,668 | 1,676 |

| Body 3_1 až 4_5 |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-----------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                 |      | Bod   |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|                 |      | 3_1   | 3_2   | 3_3   | 3_4   | 3_5   | 4_1   | 4_2   | 4_3   | 4_4   | 4_5   |
| Vzdálenost [mm] | 0,0  | 1,574 | 1,558 | 1,559 | 1,540 | 1,536 | 1,531 | 1,677 | 1,706 | 1,596 | -     |
|                 | 0,5  | 1,590 | 1,607 | 1,572 | 1,546 | 1,540 | 1,533 | 1,674 | 1,711 | 1,592 | 1,502 |
|                 | 1,0  | 1,598 | 1,634 | 1,612 | 1,580 | 1,567 | 1,525 | 1,672 | 1,665 | 1,600 | 1,502 |
|                 | 1,5  | 1,596 | 1,661 | 1,651 | 1,612 | 1,567 | 1,534 | 1,695 | 1,707 | 1,622 | 1,509 |
|                 | 2,0  | 1,612 | 1,664 | 1,666 | 1,624 | 1,578 | 1,545 | 1,717 | 1,713 | 1,633 | 1,515 |
|                 | 2,5  | 1,605 | 1,673 | 1,689 | 1,641 | 1,591 | 1,545 | 1,708 | 1,713 | 1,639 | 1,516 |
|                 | 3,0  | 1,619 | 1,678 | 1,688 | 1,660 | 1,595 | 1,558 | 1,721 | 1,711 | 1,648 | 1,522 |
|                 | 3,5  | 1,630 | 1,687 | 1,695 | 1,653 | 1,609 | 1,557 | 1,723 | 1,707 | 1,639 | 1,519 |
|                 | 4,0  | 1,613 | 1,683 | 1,676 | 1,652 | 1,605 | 1,554 | 1,728 | 1,702 | 1,654 | 1,524 |
|                 | 5,0  | 1,625 | 1,675 | 1,679 | 1,663 | 1,613 | 1,558 | 1,741 | 1,703 | 1,655 | 1,525 |
|                 | 6,0  | 1,629 | 1,692 | 1,685 | 1,669 | 1,608 | 1,550 | 1,752 | 1,697 | 1,675 | 1,523 |
|                 | 7,0  | 1,629 | 1,679 | 1,690 | 1,667 | 1,626 | 1,564 | 1,765 | 1,666 | 1,668 | 1,522 |
|                 | 8,0  | 1,629 | 1,676 | 1,679 | 1,679 | 1,633 | 1,551 | 1,769 | 1,674 | 1,664 | 1,532 |
|                 | 9,0  | 1,631 | 1,676 | 1,686 | 1,676 | 1,616 | 1,559 | 1,763 | 1,665 | 1,666 | 1,522 |
|                 | 10,0 | 1,628 | 1,672 | 1,673 | 1,665 | 1,619 | 1,562 | 1,773 | 1,634 | 1,655 | 1,523 |

Příloha č. 2 – Rychlostní profily v jednotlivých bodech

|                 |      | bod    |        |        |        |        |
|-----------------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                 |      | 1_1    | 1_2    | 1_3    | 1_4    | 1_5    |
| vzdálenost [mm] | 0,0  | 1,7066 | 1,7106 | 1,7118 | 1,7102 | 1,7093 |
|                 | 0,5  | 1,7078 | 1,7107 | 1,7120 | 1,7087 | 1,7082 |
|                 | 1,0  | 1,7066 | 1,7104 | 1,7117 | 1,7100 | 1,7094 |
|                 | 1,5  | 1,7085 | 1,7124 | 1,7119 | 1,7105 | 1,7103 |
|                 | 2,0  | 1,7079 | 1,7123 | 1,7157 | 1,7098 | 1,7120 |
|                 | 2,5  | 1,7091 | 1,7128 | 1,7143 | 1,7115 | 1,7117 |
|                 | 3,0  | 1,7088 | 1,7113 | 1,7149 | 1,7122 | 1,7114 |
|                 | 3,5  | 1,7099 | 1,7133 | 1,7163 | 1,7121 | 1,7113 |
|                 | 4,0  | 1,7096 | 1,7129 | 1,7161 | 1,7137 | 1,7133 |
|                 | 5,0  | 1,7114 | 1,7145 | 1,7166 | 1,7124 | 1,7126 |
|                 | 6,0  | 1,7104 | 1,7151 | 1,7181 | 1,7117 | 1,7132 |
|                 | 7,0  | 1,7103 | 1,7149 | 1,7187 | 1,7120 | 1,7125 |
|                 | 8,0  | 1,7111 | 1,7149 | 1,7183 | 1,7126 | 1,7120 |
|                 | 9,0  | 1,7107 | 1,7152 | 1,7174 | 1,7130 | 1,7132 |
|                 | 10,0 | 1,7123 | 1,7149 | 1,7182 | 1,7136 | 1,7130 |

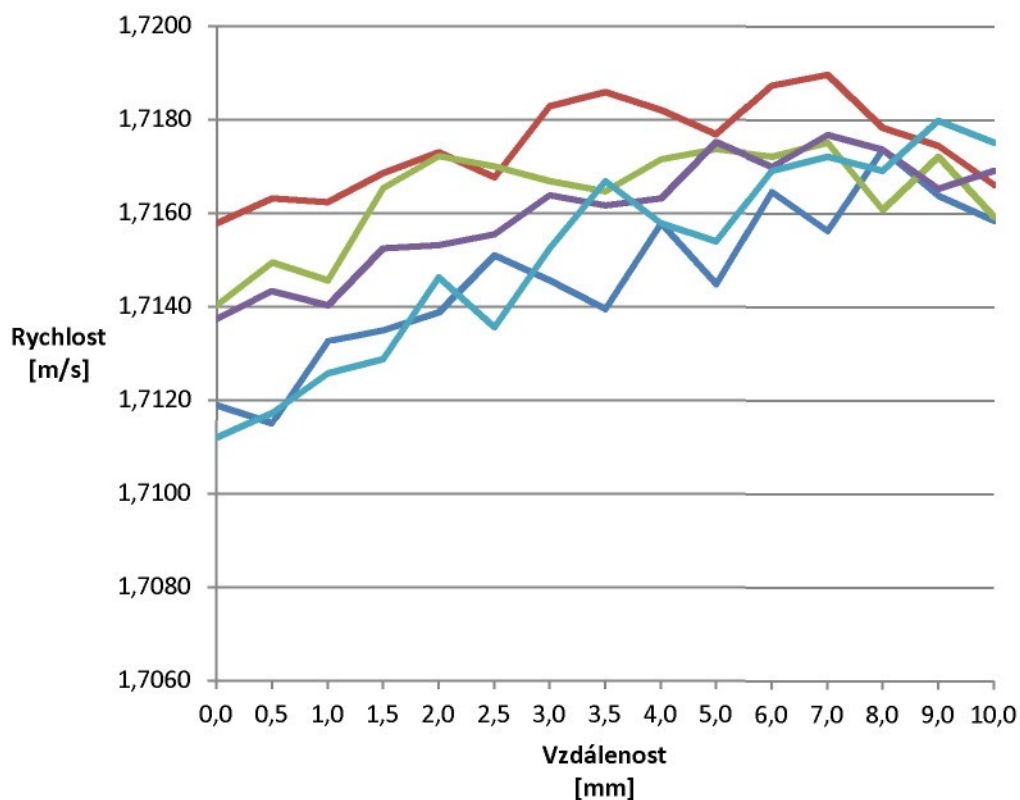
**Graf hodnot pro body 1\_1 až 1\_5**



Příloha č. 2 – Rychlostní profily v jednotlivých bodech

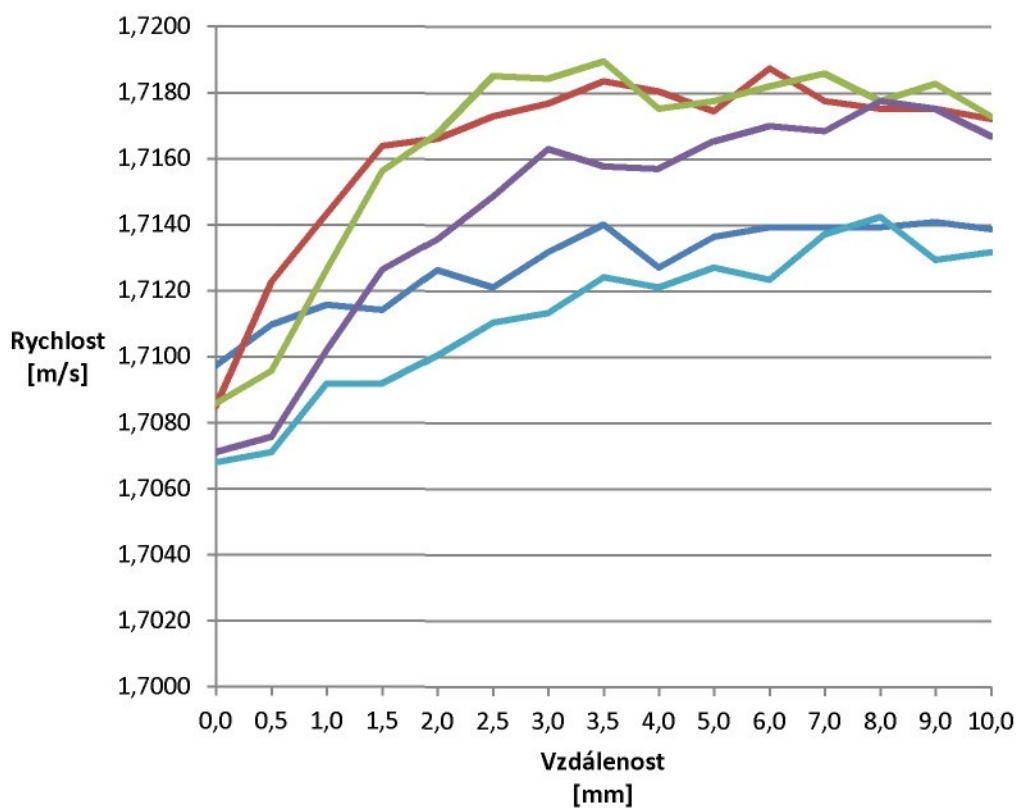
|                 |      | bod    |        |        |        |        |
|-----------------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                 |      | 2_1    | 2_2    | 2_3    | 2_4    | 2_5    |
| vzdálenost [mm] | 0,0  | 1,7119 | 1,7158 | 1,7140 | 1,7137 | 1,7112 |
|                 | 0,5  | 1,7115 | 1,7163 | 1,7149 | 1,7143 | 1,7117 |
|                 | 1,0  | 1,7133 | 1,7162 | 1,7146 | 1,7140 | 1,7126 |
|                 | 1,5  | 1,7135 | 1,7168 | 1,7165 | 1,7152 | 1,7129 |
|                 | 2,0  | 1,7139 | 1,7173 | 1,7172 | 1,7153 | 1,7146 |
|                 | 2,5  | 1,7151 | 1,7168 | 1,7170 | 1,7155 | 1,7136 |
|                 | 3,0  | 1,7146 | 1,7183 | 1,7167 | 1,7164 | 1,7152 |
|                 | 3,5  | 1,7139 | 1,7186 | 1,7165 | 1,7162 | 1,7167 |
|                 | 4,0  | 1,7158 | 1,7182 | 1,7171 | 1,7163 | 1,7158 |
|                 | 5,0  | 1,7145 | 1,7177 | 1,7174 | 1,7175 | 1,7154 |
|                 | 6,0  | 1,7165 | 1,7187 | 1,7172 | 1,7170 | 1,7169 |
|                 | 7,0  | 1,7156 | 1,7190 | 1,7175 | 1,7177 | 1,7172 |
|                 | 8,0  | 1,7174 | 1,7178 | 1,7161 | 1,7174 | 1,7169 |
|                 | 9,0  | 1,7164 | 1,7174 | 1,7172 | 1,7165 | 1,7180 |
|                 | 10,0 | 1,7159 | 1,7166 | 1,7159 | 1,7169 | 1,7175 |

**Graf hodnot pro body 2\_1 až 2\_5**



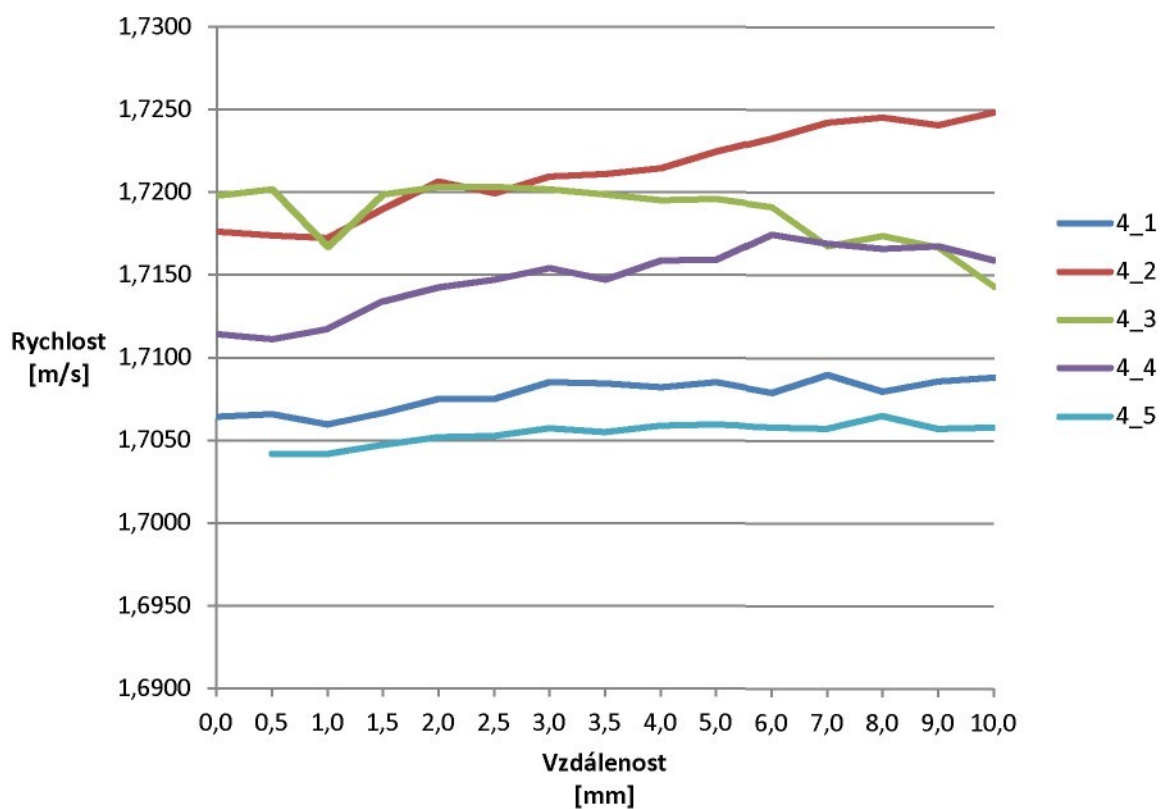
|                 |      | bod    |        |        |        |        |
|-----------------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                 |      | 3_1    | 3_2    | 3_3    | 3_4    | 3_5    |
| vzdálenost [mm] | 0,0  | 1,7097 | 1,7085 | 1,7086 | 1,7071 | 1,7068 |
|                 | 0,5  | 1,7110 | 1,7123 | 1,7096 | 1,7076 | 1,7071 |
|                 | 1,0  | 1,7116 | 1,7143 | 1,7126 | 1,7102 | 1,7092 |
|                 | 1,5  | 1,7114 | 1,7164 | 1,7156 | 1,7126 | 1,7092 |
|                 | 2,0  | 1,7126 | 1,7166 | 1,7168 | 1,7136 | 1,7100 |
|                 | 2,5  | 1,7121 | 1,7173 | 1,7185 | 1,7149 | 1,7110 |
|                 | 3,0  | 1,7132 | 1,7177 | 1,7184 | 1,7163 | 1,7113 |
|                 | 3,5  | 1,7140 | 1,7184 | 1,7190 | 1,7158 | 1,7124 |
|                 | 4,0  | 1,7127 | 1,7181 | 1,7175 | 1,7157 | 1,7121 |
|                 | 5,0  | 1,7136 | 1,7174 | 1,7178 | 1,7165 | 1,7127 |
|                 | 6,0  | 1,7139 | 1,7187 | 1,7182 | 1,7170 | 1,7123 |
|                 | 7,0  | 1,7139 | 1,7178 | 1,7186 | 1,7168 | 1,7137 |
|                 | 8,0  | 1,7139 | 1,7175 | 1,7178 | 1,7178 | 1,7143 |
|                 | 9,0  | 1,7141 | 1,7175 | 1,7183 | 1,7175 | 1,7130 |
|                 | 10,0 | 1,7139 | 1,7172 | 1,7173 | 1,7167 | 1,7132 |

**Graf hodnot pro body 3\_1 až 3\_5**



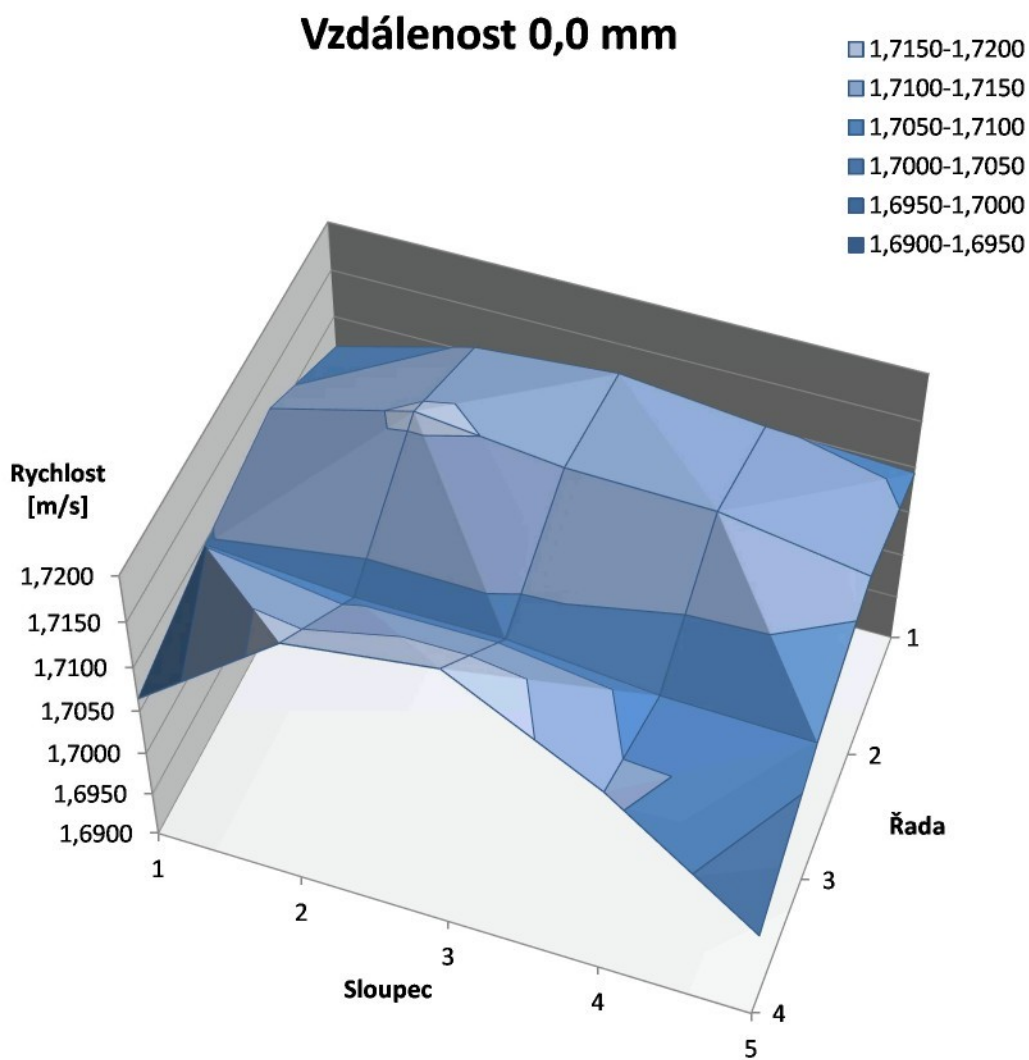
|                 |      | bod    |        |        |        |        |
|-----------------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                 |      | 4_1    | 4_2    | 4_3    | 4_4    | 4_5    |
| vzdálenost [mm] | 0,0  | 1,7064 | 1,7176 | 1,7198 | 1,7114 |        |
|                 | 0,5  | 1,7066 | 1,7174 | 1,7202 | 1,7111 | 1,7042 |
|                 | 1,0  | 1,7060 | 1,7172 | 1,7167 | 1,7117 | 1,7042 |
|                 | 1,5  | 1,7066 | 1,7190 | 1,7199 | 1,7134 | 1,7047 |
|                 | 2,0  | 1,7075 | 1,7206 | 1,7203 | 1,7143 | 1,7052 |
|                 | 2,5  | 1,7075 | 1,7200 | 1,7203 | 1,7147 | 1,7053 |
|                 | 3,0  | 1,7085 | 1,7209 | 1,7202 | 1,7154 | 1,7057 |
|                 | 3,5  | 1,7084 | 1,7211 | 1,7199 | 1,7147 | 1,7055 |
|                 | 4,0  | 1,7082 | 1,7215 | 1,7195 | 1,7159 | 1,7059 |
|                 | 5,0  | 1,7085 | 1,7224 | 1,7196 | 1,7159 | 1,7060 |
|                 | 6,0  | 1,7079 | 1,7233 | 1,7191 | 1,7174 | 1,7058 |
|                 | 7,0  | 1,7090 | 1,7242 | 1,7168 | 1,7169 | 1,7057 |
|                 | 8,0  | 1,7080 | 1,7245 | 1,7174 | 1,7166 | 1,7065 |
|                 | 9,0  | 1,7086 | 1,7241 | 1,7167 | 1,7168 | 1,7057 |
|                 | 10,0 | 1,7088 | 1,7248 | 1,7143 | 1,7159 | 1,7058 |

**Graf hodnot pro body 4\_1 až 4\_5**



## Rychlosti ve vzdálenosti 0,0 mm od skla v bodech 1\_1 až 4\_5:

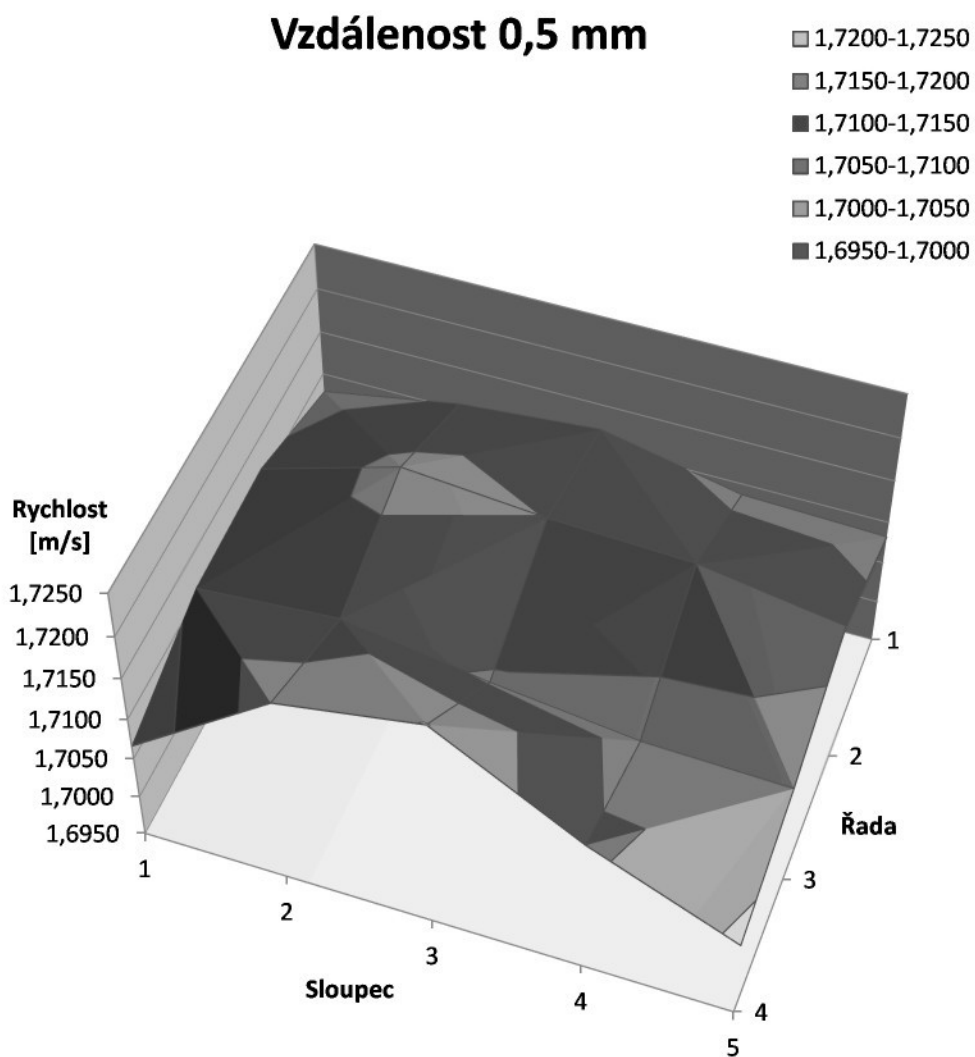
| Vzdálenost 0,0 mm |        |        |        |        |        |
|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Bod               | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      |
| 1                 | 1,7066 | 1,7106 | 1,7118 | 1,7102 | 1,7093 |
| 2                 | 1,7119 | 1,7158 | 1,7140 | 1,7137 | 1,7112 |
| 3                 | 1,7097 | 1,7085 | 1,7086 | 1,7071 | 1,7068 |
| 4                 | 1,7064 | 1,7176 | 1,7198 | 1,7114 | 1,7000 |



Bod 1\_1: u spolujezdce nahoře, bod 4\_5: u řidiče dole.

## Rychlosti ve vzdálenosti 0,5 mm od skla v bodech 1\_1 až 4\_5:

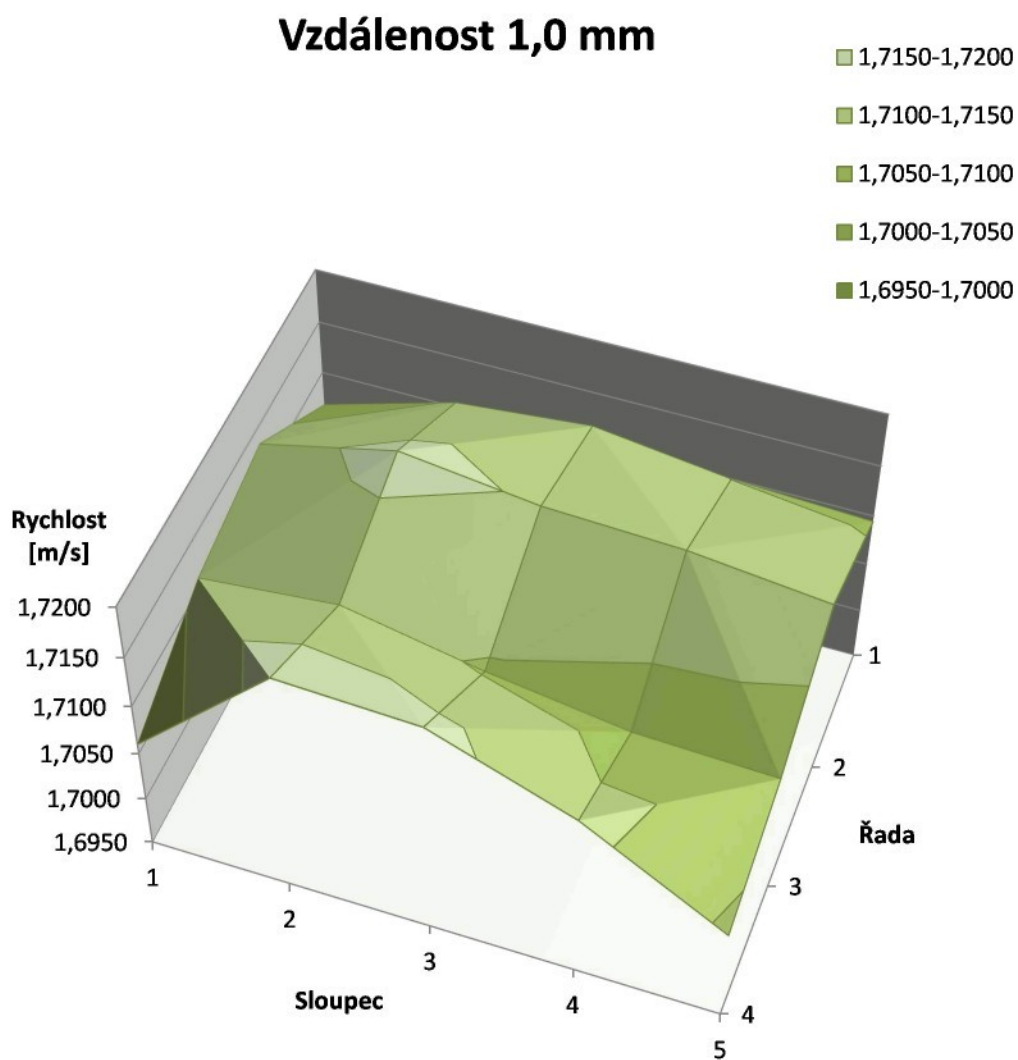
| Vzdálenost 0,5 mm |        |        |        |        |        |
|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Bod               | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      |
| 1                 | 1,7078 | 1,7107 | 1,7120 | 1,7087 | 1,7082 |
| 2                 | 1,7115 | 1,7163 | 1,7149 | 1,7143 | 1,7117 |
| 3                 | 1,7110 | 1,7123 | 1,7096 | 1,7076 | 1,7071 |
| 4                 | 1,7066 | 1,7174 | 1,7202 | 1,7111 | 1,7042 |



Bod 1\_1: u spolujezdce nahoře, bod 4\_5: u řidiče dole.

## Rychlosti ve vzdálenosti 1,0 mm od skla v bodech 1\_1 až 4\_5:

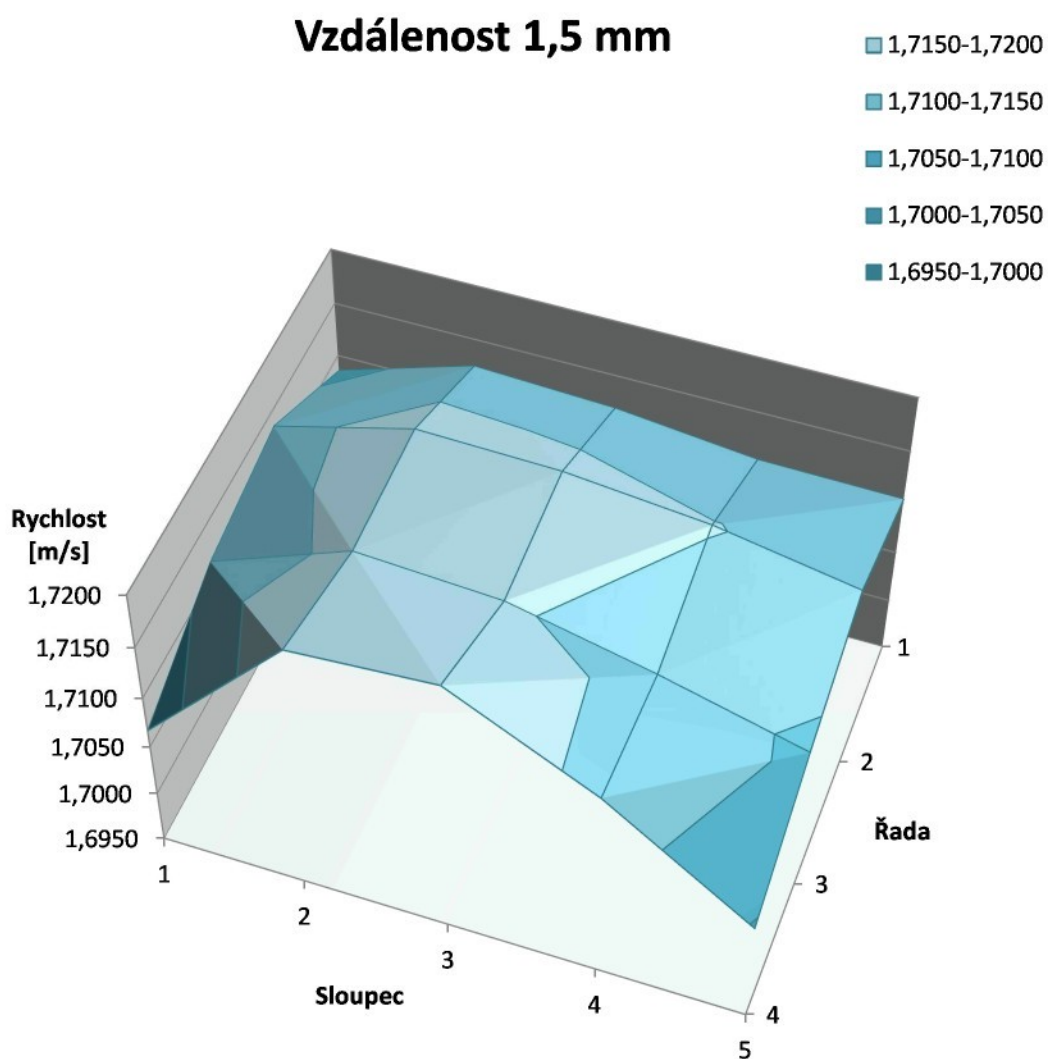
| Vzdálenost 1,0 mm |        |        |        |        |        |
|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Bod               | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      |
| 1                 | 1,7066 | 1,7104 | 1,7117 | 1,7100 | 1,7094 |
| 2                 | 1,7133 | 1,7162 | 1,7146 | 1,7140 | 1,7126 |
| 3                 | 1,7110 | 1,7123 | 1,7096 | 1,7076 | 1,7071 |
| 4                 | 1,7060 | 1,7172 | 1,7167 | 1,7117 | 1,7042 |



Bod 1\_1: u spolujezdce nahoře, bod 4\_5: u řidiče dole.

## Rychlosti ve vzdálenosti 1,5 mm od skla v bodech 1\_1 až 4\_5:

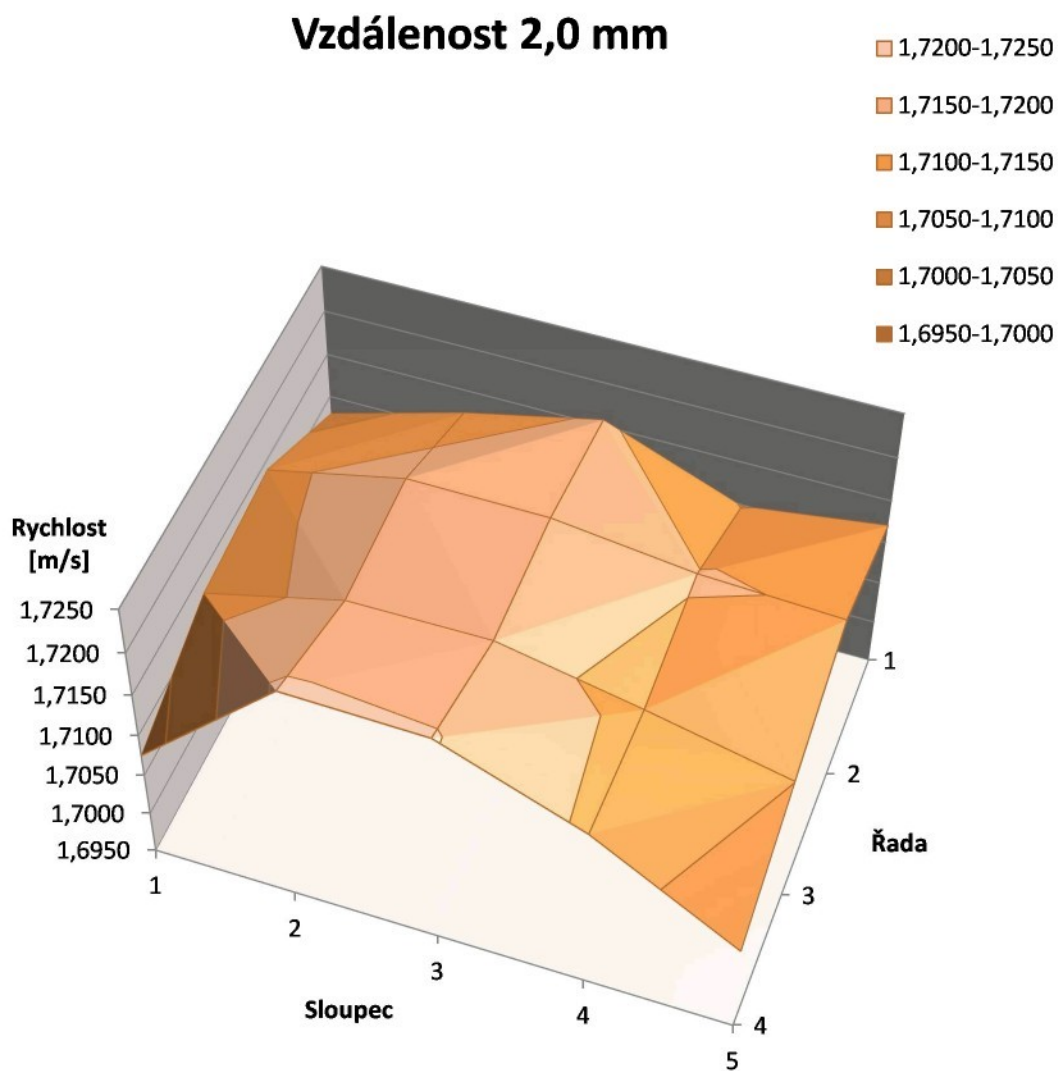
| Vzdálenost 1,5 mm |        |        |        |        |        |
|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Bod               | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      |
| 1                 | 1,7085 | 1,7124 | 1,7119 | 1,7105 | 1,7103 |
| 2                 | 1,7135 | 1,7168 | 1,7165 | 1,7152 | 1,7129 |
| 3                 | 1,7114 | 1,7164 | 1,7156 | 1,7126 | 1,7092 |
| 4                 | 1,7066 | 1,7190 | 1,7199 | 1,7134 | 1,7047 |



Bod 1\_1: u spolujezdce nahoře, bod 4\_5: u řidiče dole.

## Rychlosti ve vzdálenosti 2,0 mm od skla v bodech 1\_1 až 4\_5:

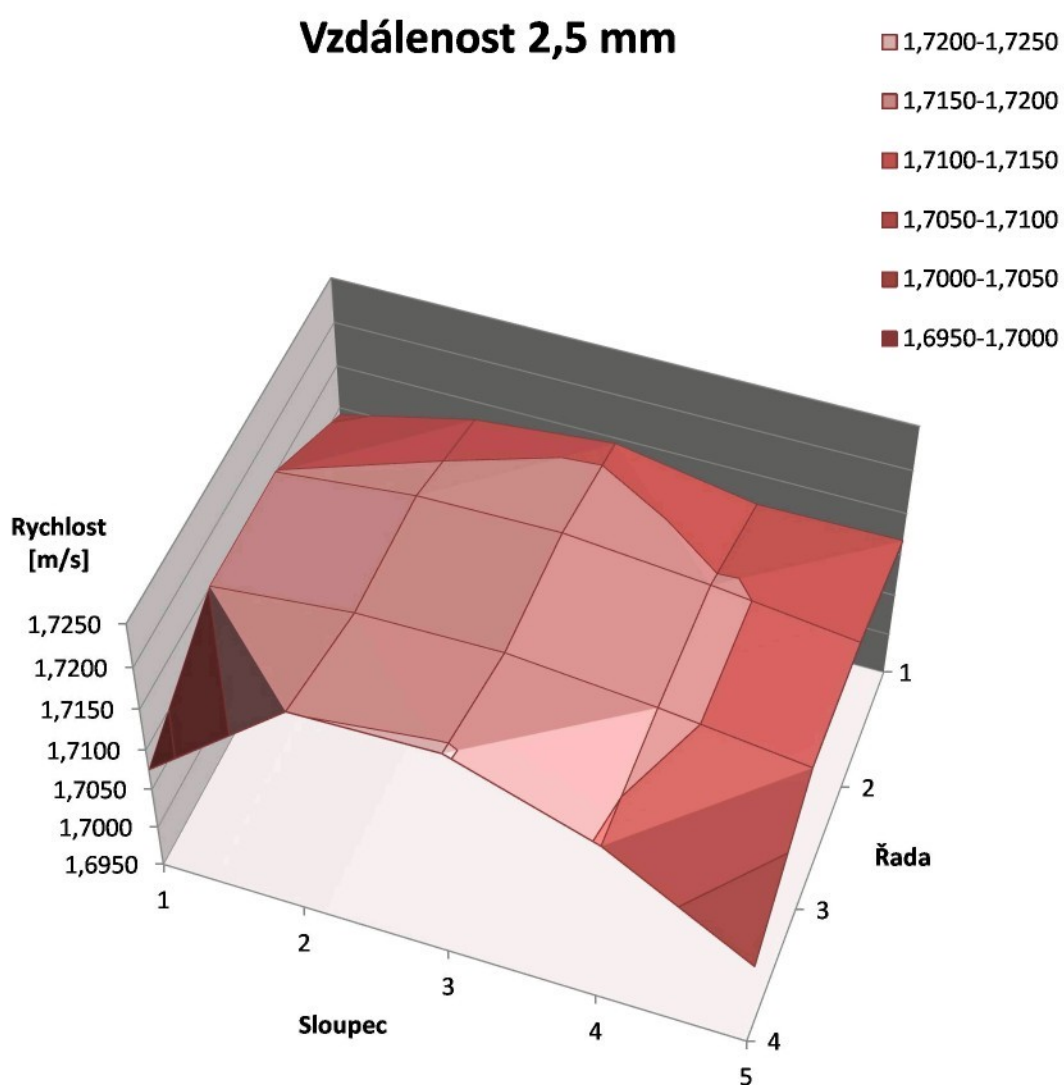
| Vzdálenost 2,0 mm |        |        |        |        |        |
|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Bod               | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      |
| 1                 | 1,7079 | 1,7123 | 1,7157 | 1,7098 | 1,7120 |
| 2                 | 1,7139 | 1,7173 | 1,7172 | 1,7153 | 1,7146 |
| 3                 | 1,7126 | 1,7166 | 1,7168 | 1,7136 | 1,7100 |
| 4                 | 1,7075 | 1,7206 | 1,7203 | 1,7143 | 1,7052 |



Bod 1\_1: u spolujezdce nahoře, bod 4\_5: u řidiče dole.

## Rychlosti ve vzdálenosti 2,5 mm od skla v bodech 1\_1 až 4\_5:

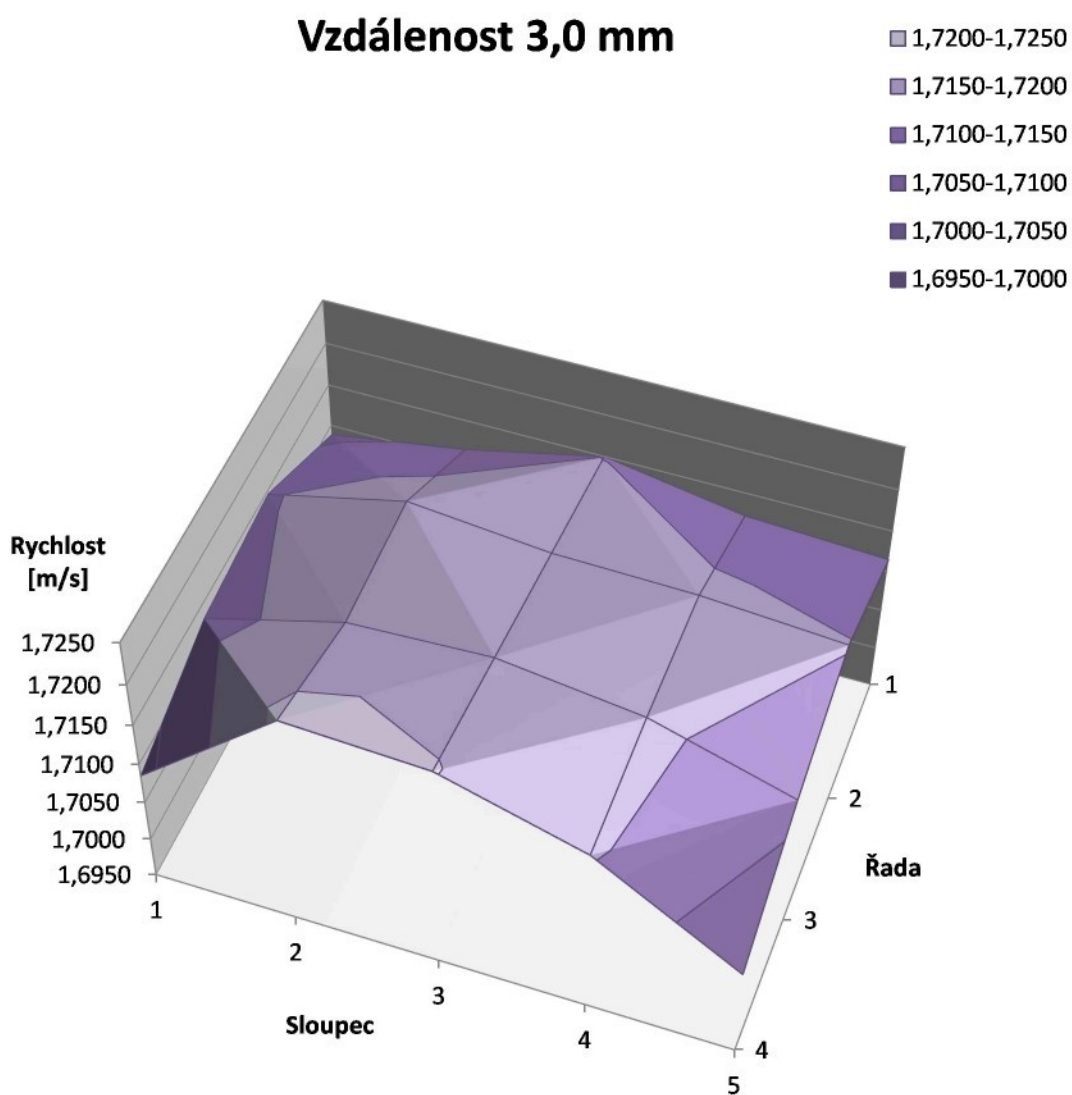
| Vzdálenost 2,5 mm |        |        |        |        |        |
|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Bod               | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      |
| 1                 | 1,7091 | 1,7128 | 1,7143 | 1,7115 | 1,7117 |
| 2                 | 1,7151 | 1,7168 | 1,7170 | 1,7155 | 1,7136 |
| 3                 | 1,7151 | 1,7168 | 1,7170 | 1,7155 | 1,7136 |
| 4                 | 1,7075 | 1,7200 | 1,7203 | 1,7147 | 1,7053 |



Bod 1\_1: u spolujezdce nahoře, bod 4\_5: u řidiče dole.

## Rychlosti ve vzdálenosti 3,0 mm od skla v bodech 1\_1 až 4\_5:

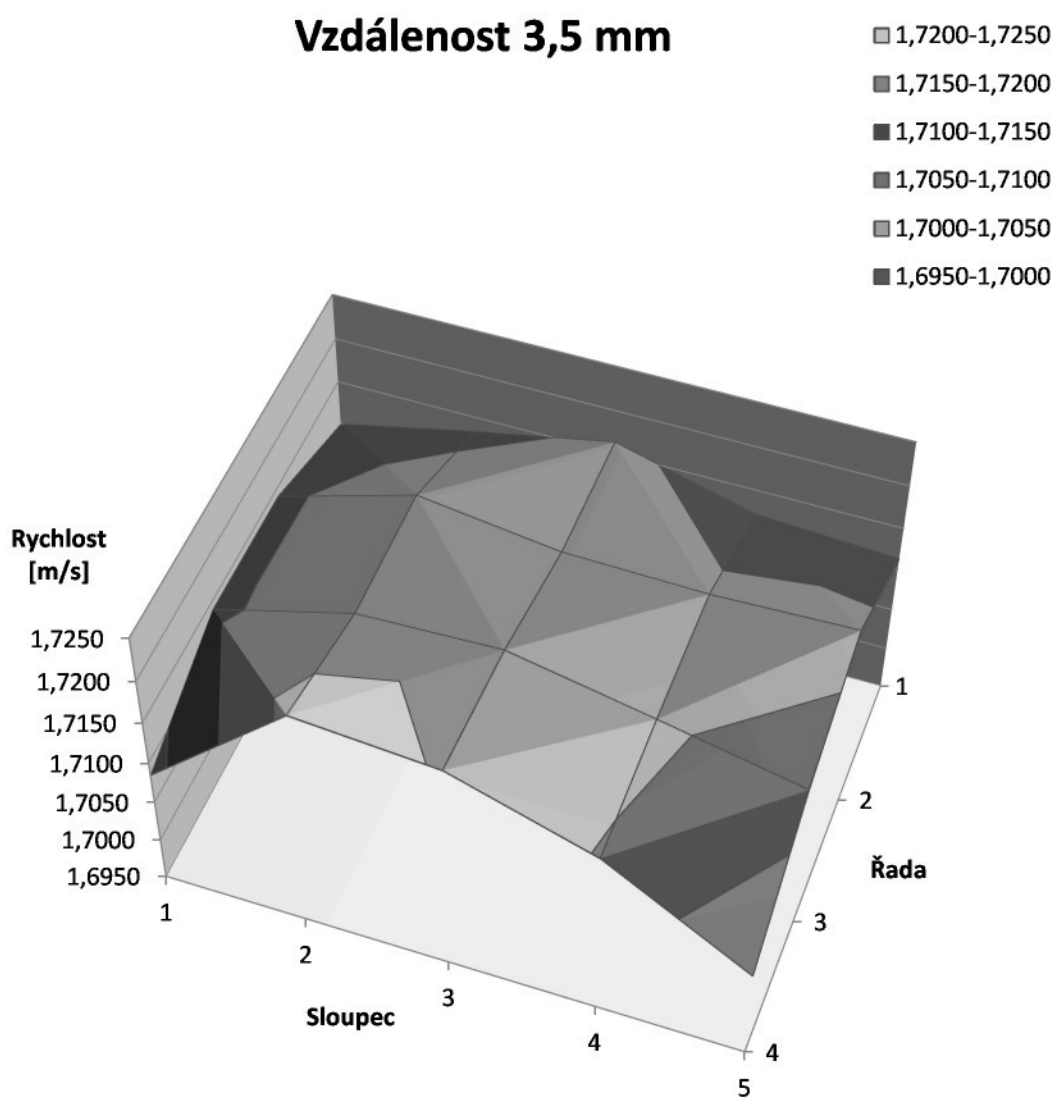
| Vzdálenost 3,0 mm |        |        |        |        |        |
|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Bod               | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      |
| 1                 | 1,7088 | 1,7113 | 1,7149 | 1,7122 | 1,7114 |
| 2                 | 1,7146 | 1,7183 | 1,7167 | 1,7164 | 1,7152 |
| 3                 | 1,7132 | 1,7177 | 1,7184 | 1,7163 | 1,7113 |
| 4                 | 1,7085 | 1,7209 | 1,7202 | 1,7154 | 1,7057 |



Bod 1\_1: u spolujezdce nahoře, bod 4\_5: u řidiče dole.

## Rychlosti ve vzdálenosti 3,5 mm od skla v bodech 1\_1 až 4\_5:

| Vzdálenost 3,5 mm |        |        |        |        |        |
|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Bod               | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      |
| 1                 | 1,7099 | 1,7133 | 1,7163 | 1,7121 | 1,7113 |
| 2                 | 1,7139 | 1,7186 | 1,7165 | 1,7162 | 1,7167 |
| 3                 | 1,7140 | 1,7184 | 1,7190 | 1,7158 | 1,7124 |
| 4                 | 1,7084 | 1,7211 | 1,7199 | 1,7147 | 1,7055 |



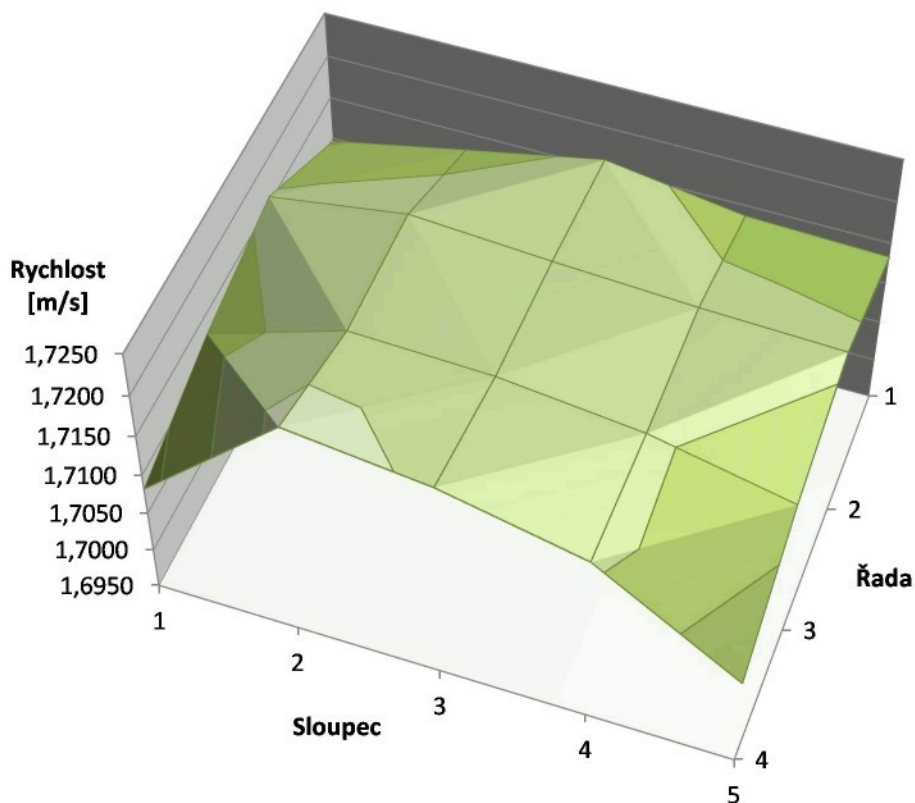
Bod 1\_1: u spolujezdce nahoře, bod 4\_5: u řidiče dole.

## Rychlosti ve vzdálenosti 4,0 mm od skla v bodech 1\_1 až 4\_5:

| Vzdálenost 4,0 mm |        |        |        |        |        |
|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Bod               | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      |
| 1                 | 1,7096 | 1,7129 | 1,7161 | 1,7137 | 1,7133 |
| 2                 | 1,7158 | 1,7182 | 1,7171 | 1,7163 | 1,7158 |
| 3                 | 1,7127 | 1,7181 | 1,7175 | 1,7157 | 1,7121 |
| 4                 | 1,7082 | 1,7215 | 1,7195 | 1,7159 | 1,7059 |

### Vzdálenost 4,0 mm

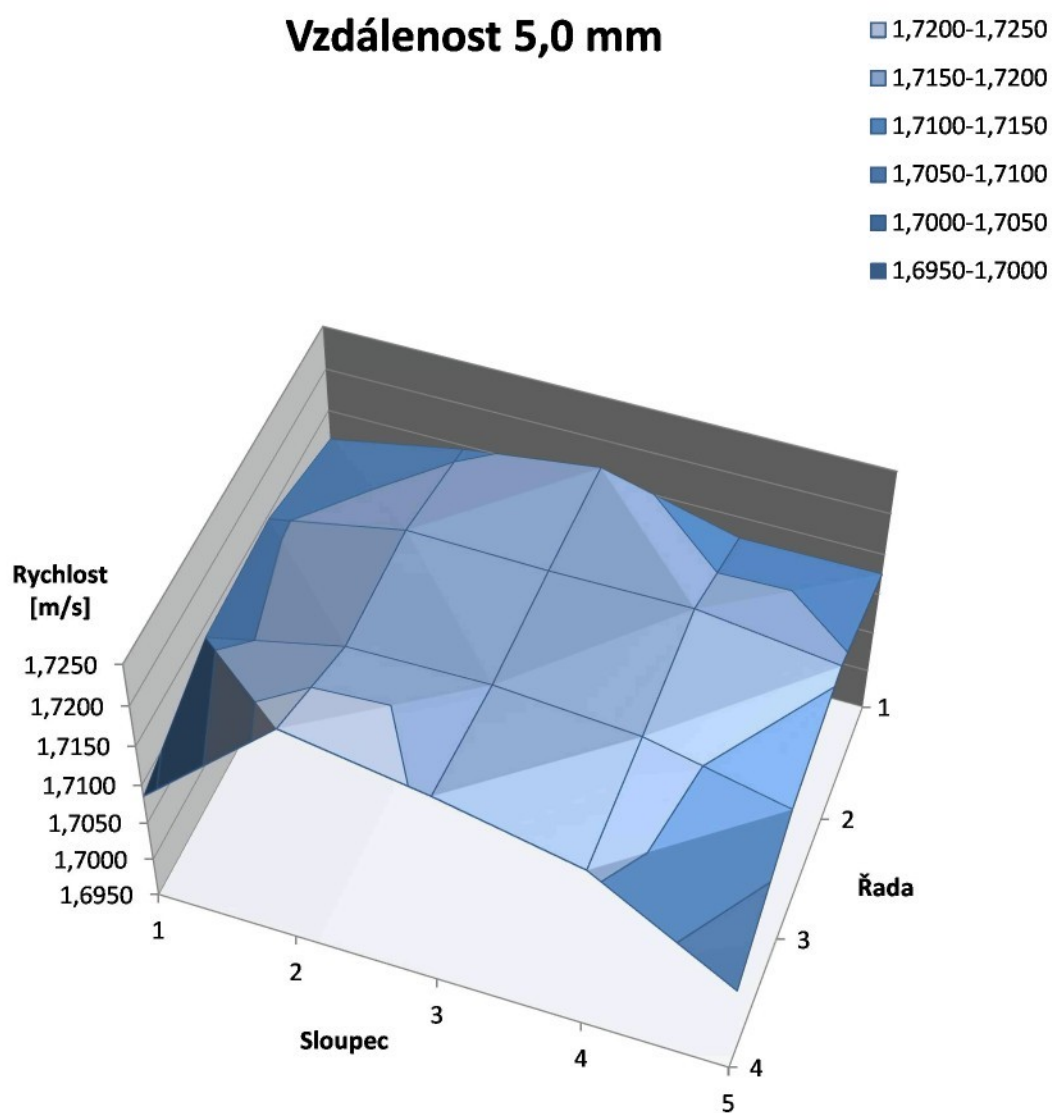
- 1,7200-1,7250
- 1,7150-1,7200
- 1,7100-1,7150
- 1,7050-1,7100
- 1,7000-1,7050
- 1,6950-1,7000



Bod 1\_1: u spolujezdce nahoře, bod 4\_5: u řidiče dole.

## Rychlosti ve vzdálenosti 5,0 mm od skla v bodech 1\_1 až 4\_5:

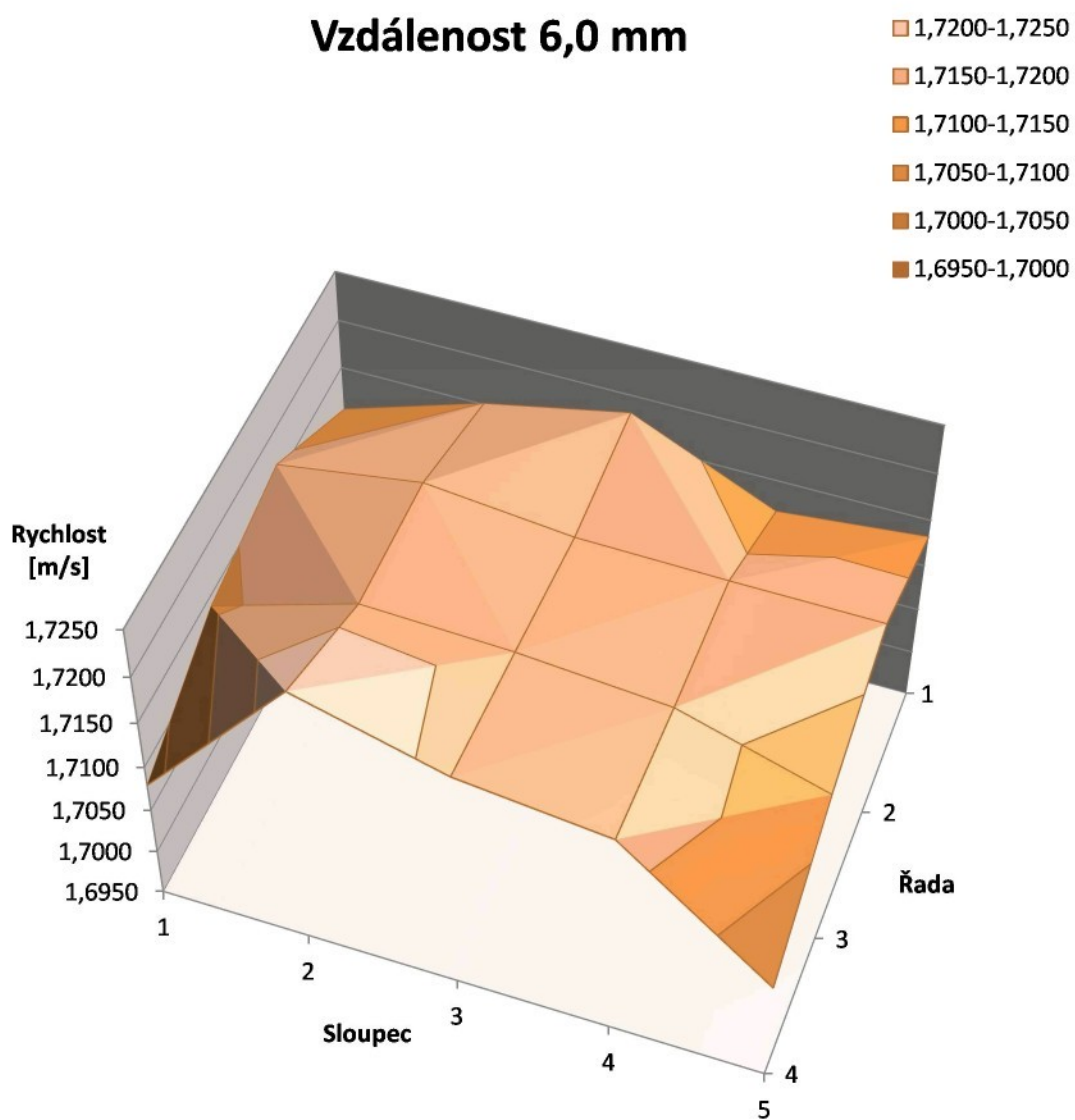
| Vzdálenost 5,0 mm |        |        |        |        |        |
|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Bod               | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      |
| 1                 | 1,7114 | 1,7145 | 1,7166 | 1,7124 | 1,7126 |
| 2                 | 1,7145 | 1,7177 | 1,7174 | 1,7175 | 1,7154 |
| 3                 | 1,7136 | 1,7174 | 1,7178 | 1,7165 | 1,7127 |
| 4                 | 1,7085 | 1,7224 | 1,7196 | 1,7159 | 1,7060 |



Bod 1\_1: u spolujezdce nahoře, bod 4\_5: u řidiče dole.

## Rychlosti ve vzdálenosti 6,0 mm od skla v bodech 1\_1 až 4\_5:

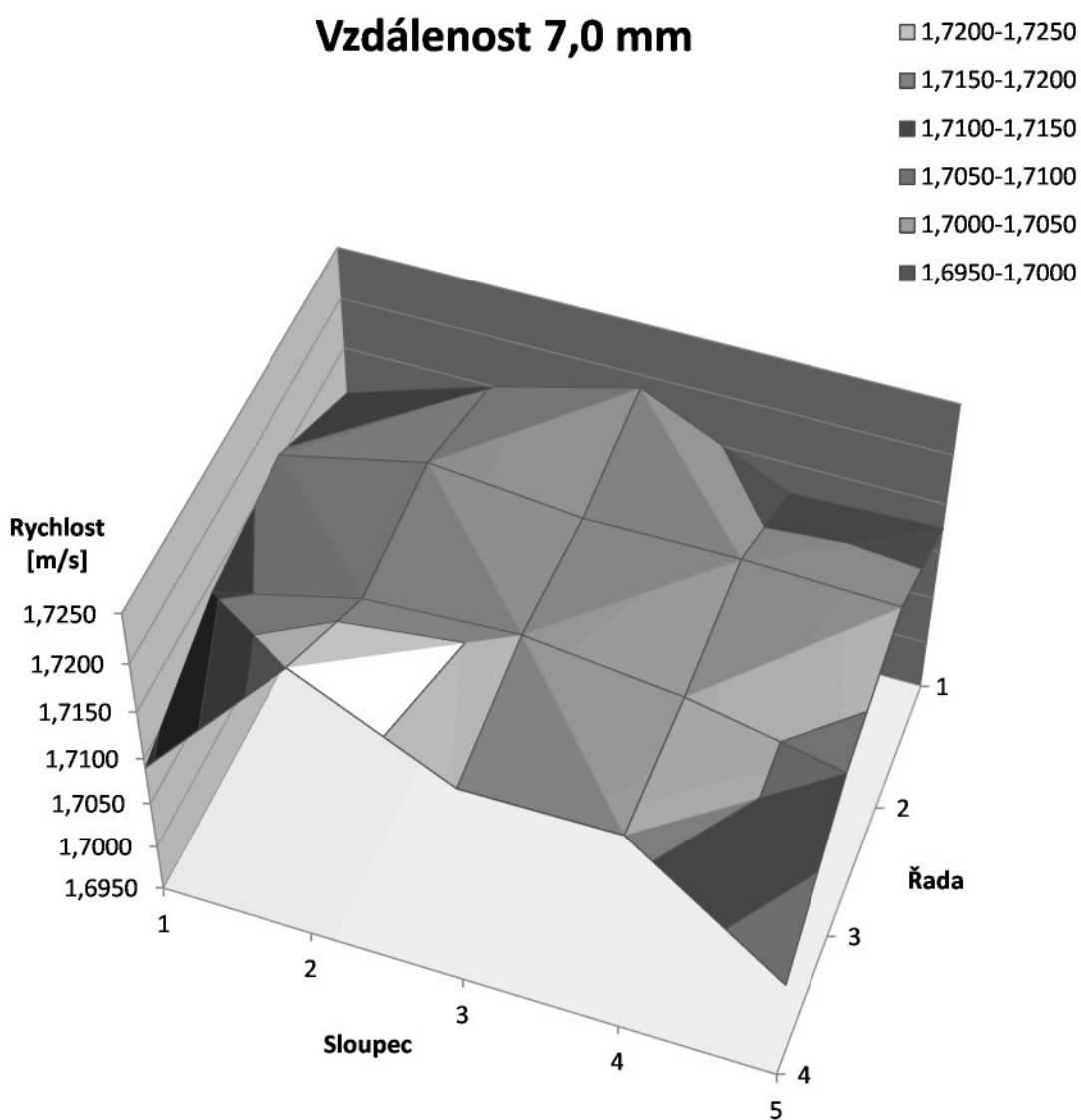
| Vzdálenost 6,0 mm |        |        |        |        |        |
|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Bod               | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      |
| 1                 | 1,7104 | 1,7151 | 1,7181 | 1,7117 | 1,7132 |
| 2                 | 1,7165 | 1,7187 | 1,7172 | 1,7170 | 1,7169 |
| 3                 | 1,7139 | 1,7187 | 1,7182 | 1,7170 | 1,7123 |
| 4                 | 1,7079 | 1,7233 | 1,7191 | 1,7174 | 1,7058 |



Bod 1\_1: u spolujezdce nahoře, bod 4\_5: u řidiče dole.

## Rychlosti ve vzdálenosti 7,0 mm od skla v bodech 1\_1 až 4\_5:

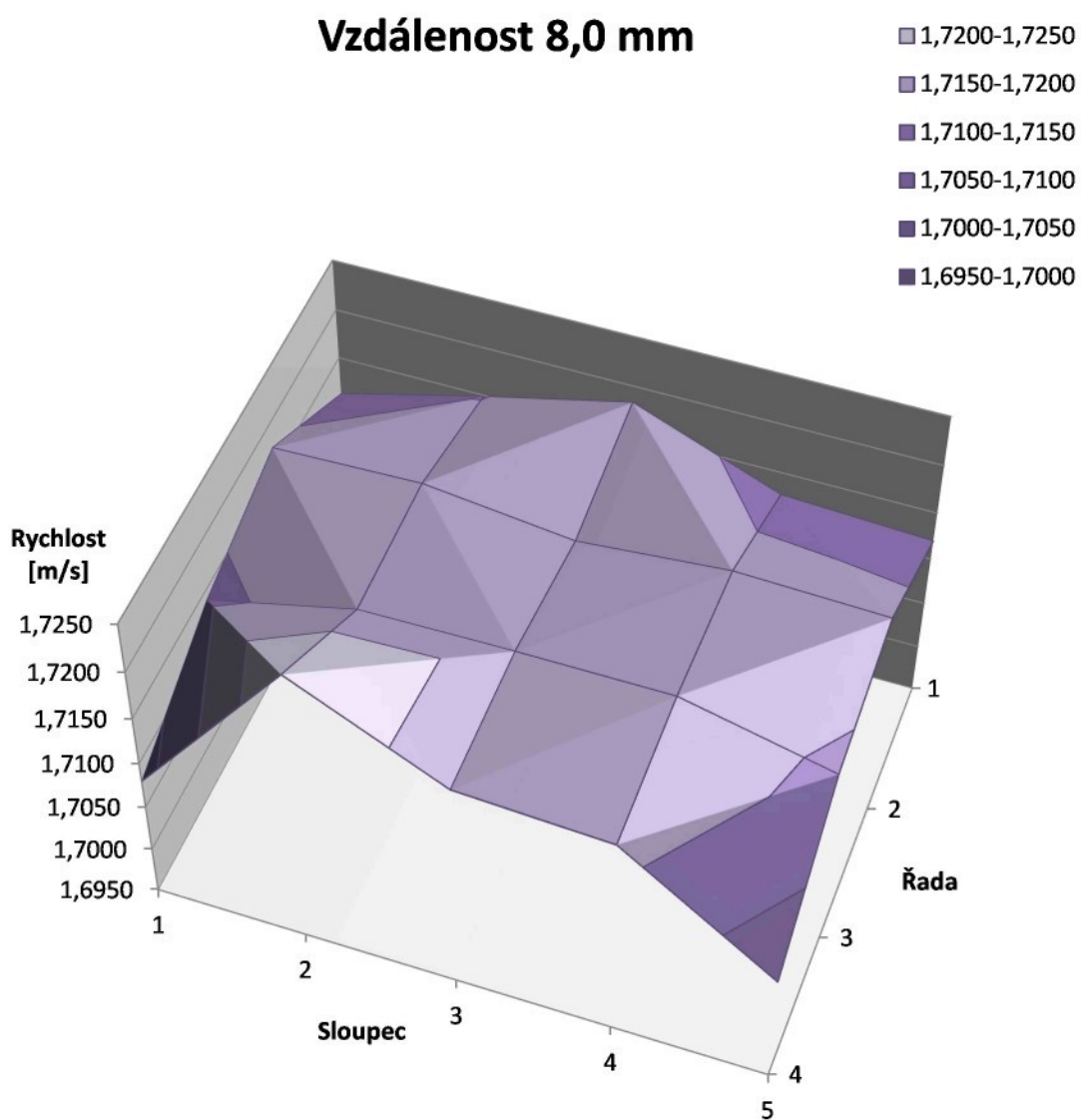
| Vzdálenost 7,0 mm |        |        |        |        |        |
|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Bod               | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      |
| 1                 | 1,7103 | 1,7149 | 1,7187 | 1,7120 | 1,7125 |
| 2                 | 1,7156 | 1,7190 | 1,7175 | 1,7177 | 1,7172 |
| 3                 | 1,7139 | 1,7178 | 1,7186 | 1,7168 | 1,7137 |
| 4                 | 1,7090 | 1,7242 | 1,7168 | 1,7169 | 1,7057 |



Bod 1\_1: u spolujezdce nahoře, bod 4\_5: u řidiče dole.

## Rychlosti ve vzdálenosti 8,0 mm od skla v bodech 1\_1 až 4\_5:

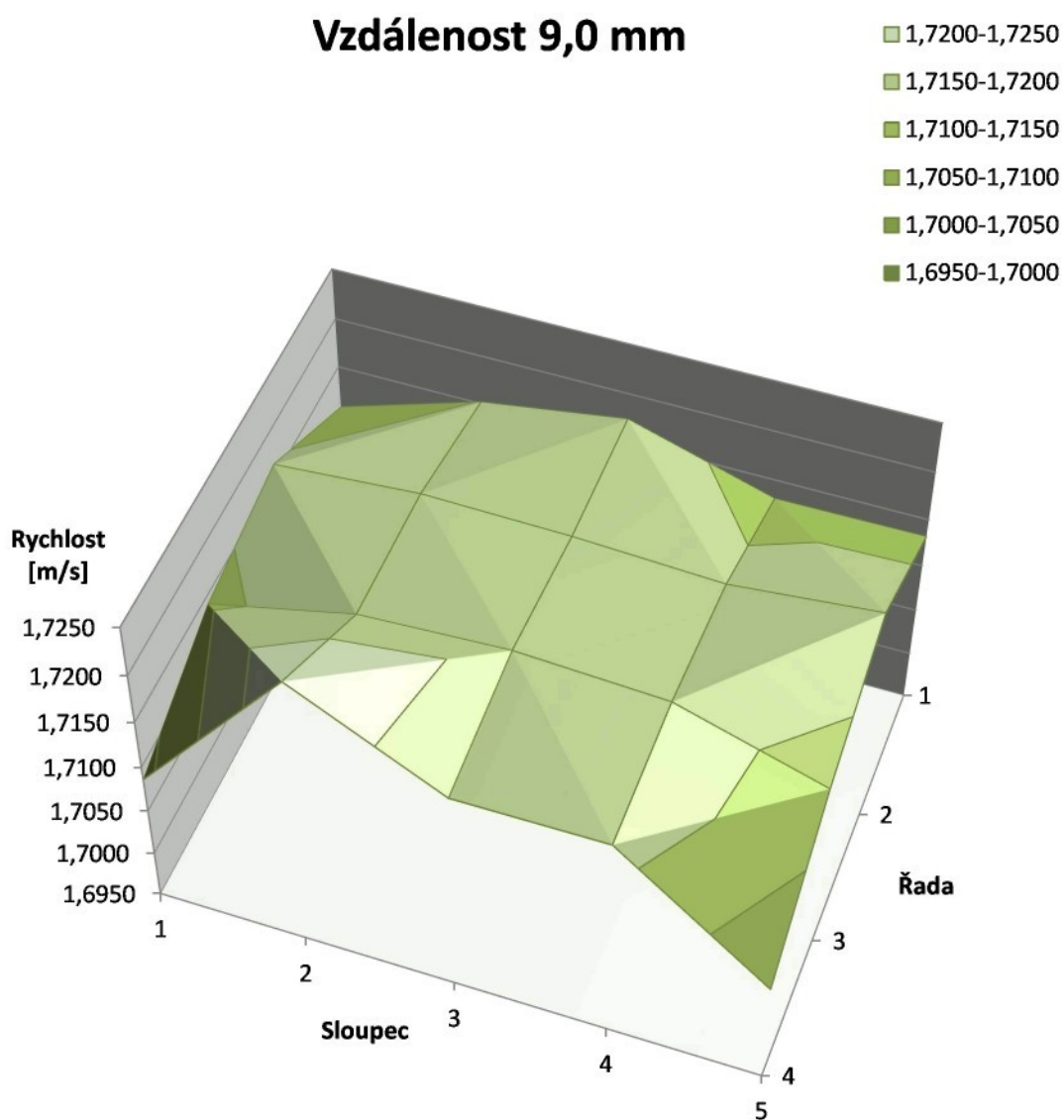
| Vzdálenost 8,0 mm |        |        |        |        |        |
|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Bod               | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      |
| 1                 | 1,7111 | 1,7149 | 1,7183 | 1,7126 | 1,7120 |
| 2                 | 1,7174 | 1,7178 | 1,7161 | 1,7174 | 1,7169 |
| 3                 | 1,7139 | 1,7175 | 1,7178 | 1,7178 | 1,7143 |
| 4                 | 1,7080 | 1,7245 | 1,7174 | 1,7166 | 1,7065 |



Bod 1\_1: u spolujezdce nahoře, bod 4\_5: u řidiče dole.

## Rychlosti ve vzdálenosti 9,0 mm od skla v bodech 1\_1 až 4\_5:

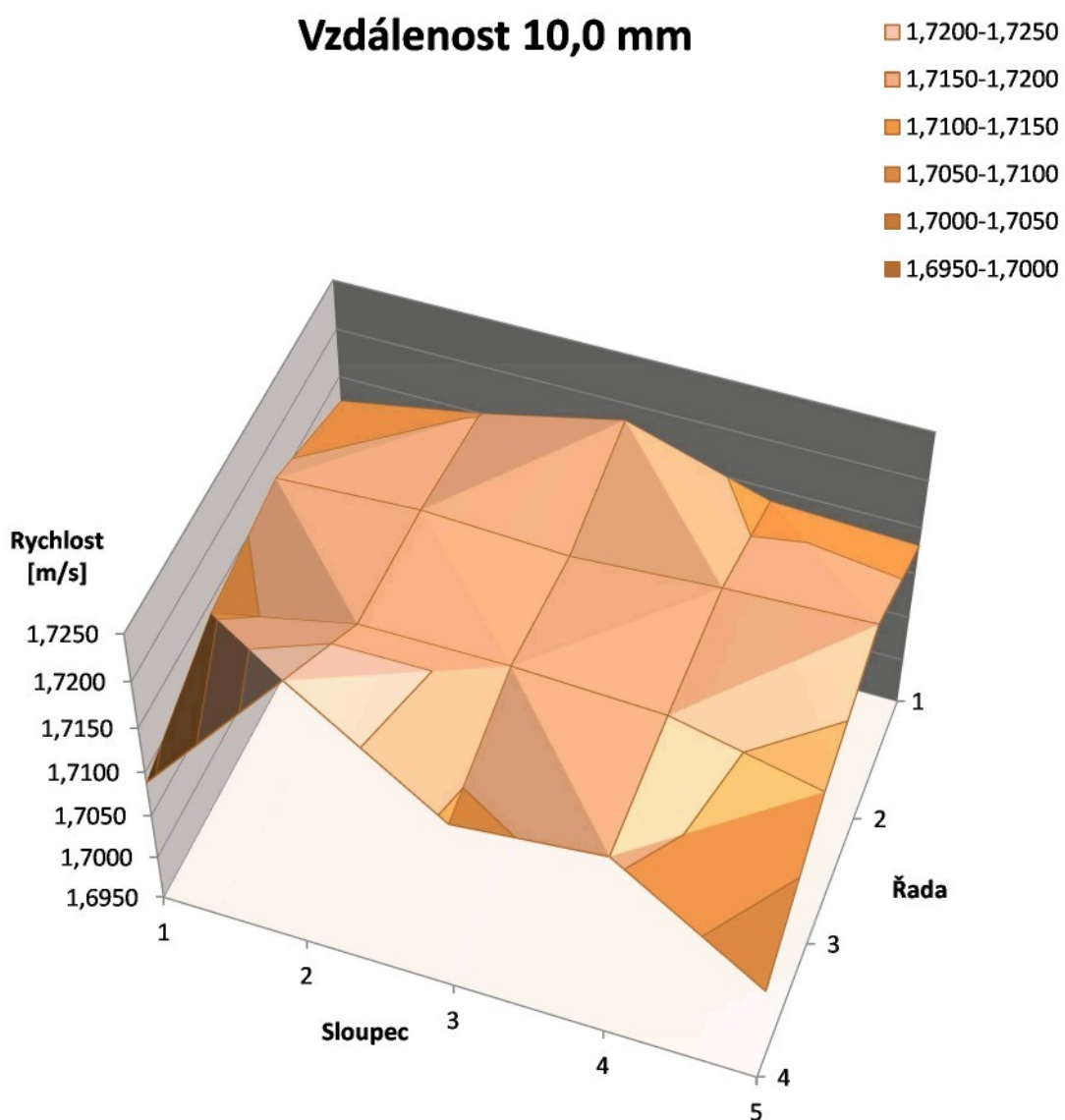
| Vzdálenost 9,0 mm |        |        |        |        |        |
|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Bod               | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      |
| 1                 | 1,7107 | 1,7152 | 1,7174 | 1,7130 | 1,7132 |
| 2                 | 1,7164 | 1,7174 | 1,7172 | 1,7165 | 1,7180 |
| 3                 | 1,7141 | 1,7175 | 1,7183 | 1,7175 | 1,7130 |
| 4                 | 1,7086 | 1,7241 | 1,7167 | 1,7168 | 1,7057 |



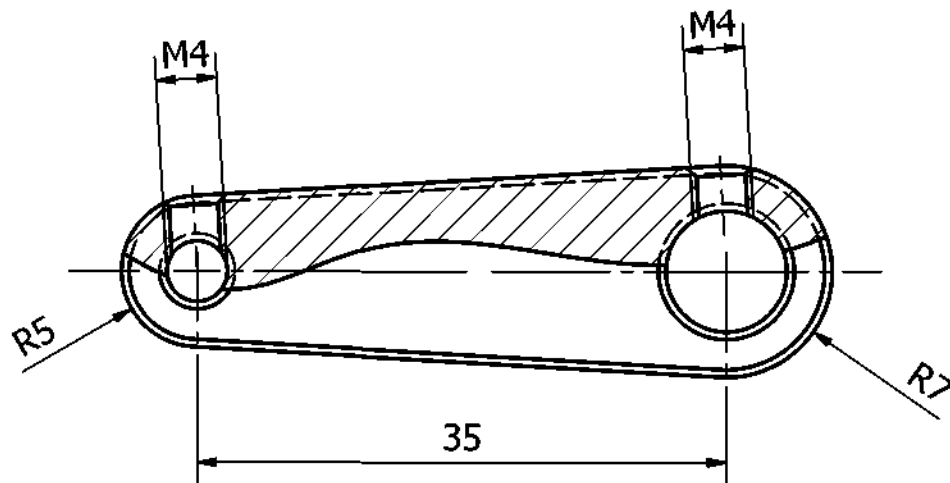
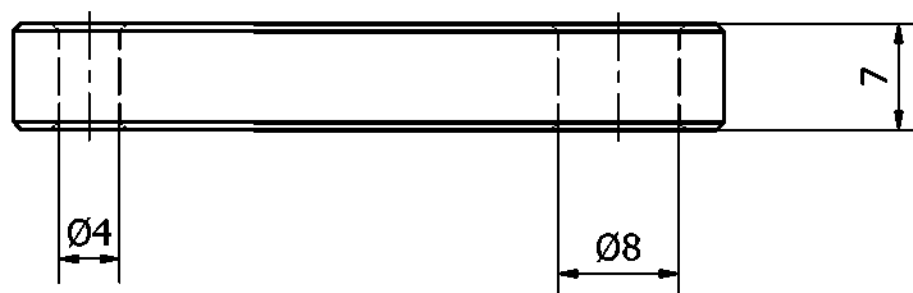
Bod 1\_1: u spolujezdce nahoře, bod 4\_5: u řidiče dole.

## Rychlosti ve vzdálenosti 10,0 mm od skla v bodech 1\_1 až 4\_5:

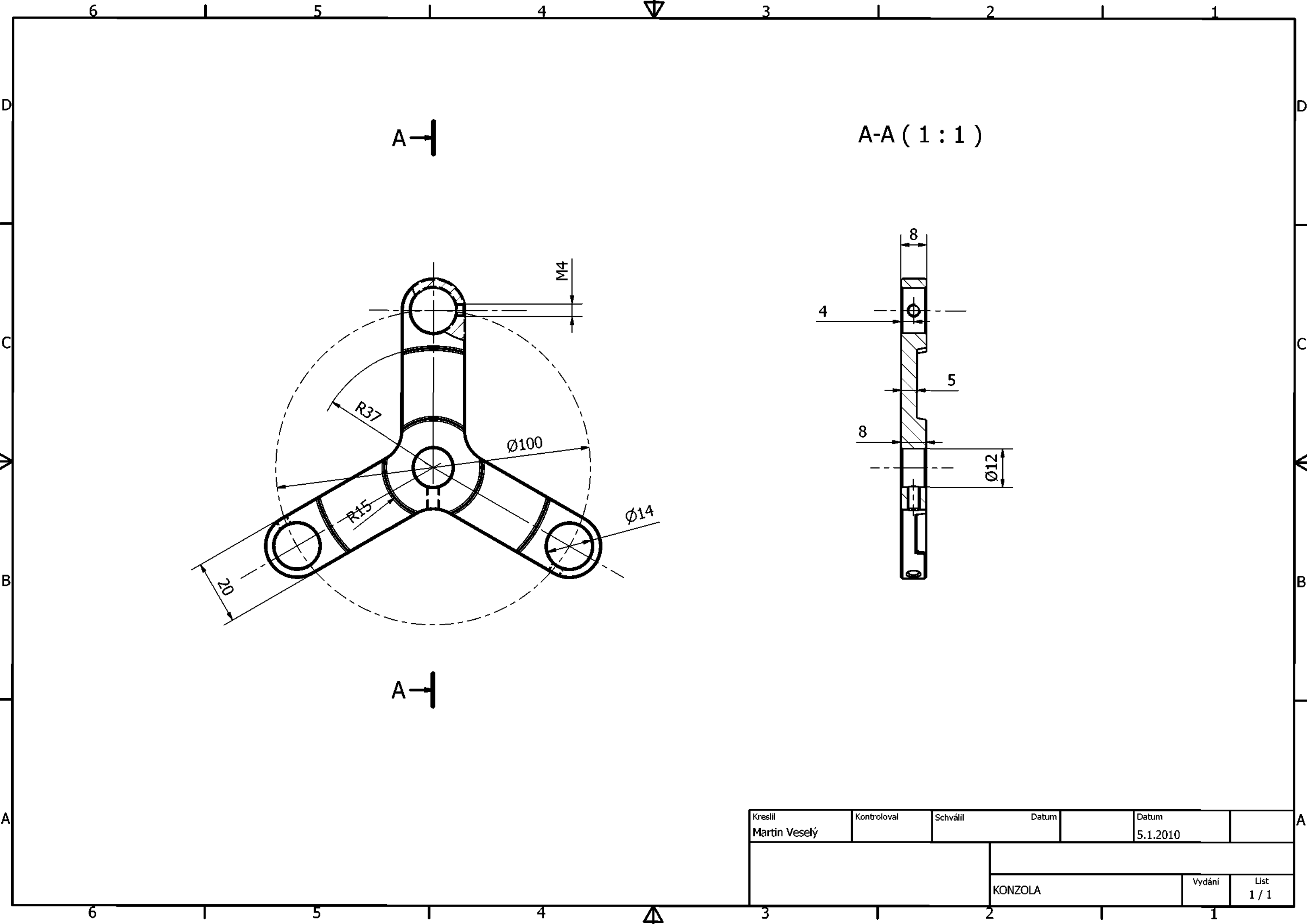
| Vzdálenost 10,0 mm |        |        |        |        |        |
|--------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Bod                | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      |
| 1                  | 1,7123 | 1,7149 | 1,7182 | 1,7136 | 1,7130 |
| 2                  | 1,7159 | 1,7166 | 1,7159 | 1,7169 | 1,7175 |
| 3                  | 1,7139 | 1,7172 | 1,7173 | 1,7167 | 1,7132 |
| 4                  | 1,7088 | 1,7248 | 1,7143 | 1,7159 | 1,7058 |



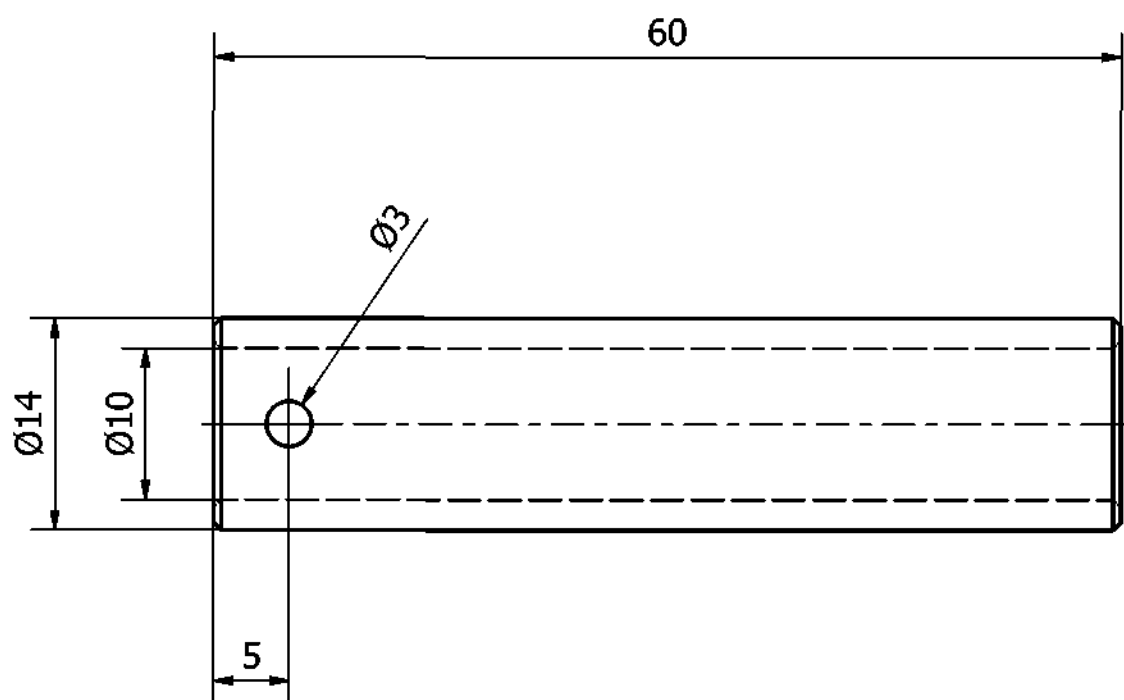
Bod 1\_1: u spolujezdce nahoře, bod 4\_5: u řidiče dole.



|                          |             |          |          |                   |  |
|--------------------------|-------------|----------|----------|-------------------|--|
| Kreslil<br>Martin Veselý | Kontroloval | Schválil | Datum    | Datum<br>6.1.2010 |  |
|                          |             |          | VÝLOŽNÍK |                   |  |
|                          |             |          | Vydání   | List<br>1 / 1     |  |



|                          |             |          |         |                   |  |
|--------------------------|-------------|----------|---------|-------------------|--|
| Kreslil<br>Martin Veselý | Kontroloval | Schválil | Datum   | Datum<br>5.1.2010 |  |
|                          |             |          | KONZOLA |                   |  |
|                          |             |          | Vydání  | List<br>1 / 1     |  |



|                          |             |          |       |                   |               |
|--------------------------|-------------|----------|-------|-------------------|---------------|
| Kreslil<br>Martin Veselý | Kontroloval | Schválil | Datum | Datum<br>5.1.2010 |               |
|                          |             |          |       |                   |               |
|                          |             |          | NOHA  | Vydání            | List<br>1 / 1 |