



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

# POROVNÁNÍ VLIVU RŮZNÝCH TYPŮ VÝUSTEK NA INTENZITU PŘENOSU TEPLA KONVEKČÍ Z LIDSKÉHO TĚLA

THE INFLUENCE OF DIFFERENT TYPES OF VENTILATION OUTLETS ON THE HEAT TRANSFER BY  
CONVECTION FROM THE HUMAN BODY

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Ján Zábovský

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Bc. Ing. Jan Fišer, Ph.D.

BRNO 2020

# Zadání diplomové práce

Ústav:	Energetický ústav
Student:	<b>Bc. Ján Zábovský</b>
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Technika prostředí
Vedoucí práce:	<b>Bc. Ing. Jan Fišer, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## **Porovnání vlivu různých typů výustek na intenzitu přenosu tepla konvekcí z lidského těla**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Heating Ventilation and Air-conditioning (HVAC) systém, zajišťuje vytváření vhodného prostředí pro osoby cestující v kabině automobilu. Jedním z podsystémů HVAC je i systém distribuce vzduchu jehož nezbytnou součástí jsou i distribuční výustky. Výsledný efekt proudění vzduchu z výustky na ochlazení/ohřátí lidského těla je dán především konstrukcí a geometrií výustky. Různé konstrukce a nastavení výustek tedy mohou ovlivnit jak efektivně bude výustka fungovat v oblasti vytváření komfortního prostředí v kabině.

### **Cíle diplomové práce:**

Cílem práce je porovnat vliv proudění z několika konstrukčně různých výustek na intenzitu přenosu tepla konvekcí (ochlazování/ohřívání) z/do lidského těla. Pro porovnání bude užito tepelného manekýna v regulačním režimu konstantní povrchová teplota a konstantní tepelný tok + infračervená kamera. Pro naplnění daného úkolu bude nezbytné vyvinout a otestovat vhodné nastavení a uspořádání celého měřicího systému, ověřit a upřesnit jednotlivé parametry měření a provést a vyhodnotit samotné experimenty.

### **Seznam doporučené literatury:**

DALY, Steven. Automotive air-conditioning and climate control systems. Boston: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2006. ISBN 9780750669559.

NILSSON, Hakan a HOLMÉR, Ingvar. Comfort climate evaluation with thermal manikin methods and computer simulation models. *Indoor Air* [online]. 2003, 13(1), 28-37 [cit. 2017-10-24]. DOI: 10.1034/j.1600-0668.2003.01113.x. ISSN 0905-6947. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1034/j.1600-0668.2003.01113.x>

PSIKUTA, Agnes, Jonas ALLEGRINI, Barbara KOELBLEN, et al. Thermal manikins controlled by human thermoregulation models for energy efficiency and thermal comfort research – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2017, 78, 1315-1330 [cit. 2018-10-28]. DOI: 10.1016/j.rser.2017.04.115. ISSN 13640321. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032117306202>

Vehicle thermal management: heat exchangers & climate control. Editor Gursaran D. MATHUR. Warrendale: Society of Automotive Engineers, c2004. PT (SAE). ISBN 0-7680-1445-X.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **Abstrakt**

Diplomová práca sa zaoberá posúdením vplyvu rôznych typov konštrukcie distribučného elementu vetracieho systému automobilu – výustky na intenzitu prenosu tepla konvekciou z ľudského tela. Prvú časť práce tvorí prehľad problematiky zameraný na metabolizmus, termoreguláciu, mechanizmy prenosu tepla, tepelný pocit a teóriou prúdenia. Druhá časť práce obsahuje hlavnú pracovnú hypotézu a návrh experimentu, ktorého cieľom je hypotézu potvrdiť alebo vyvrátiť. Zvolenou metódou bolo meranie s tepelným manekýnom Newtonom a to pomocou dvoch nastavení: na konštantnú povrchovú teplotu a konštantný tepelný tok. Pri prvom nastavení bol ochladzovací účinok v dôsledku intenzívnej konvekcie vplyvom prúdenia z výustky vyhodnocovaný na základe zvýšenia generovaného tepelného toku a to na úrovni jednotlivých segmentov. Pri druhom nastavení sa jednalo o pokles povrchovej teploty manekýna zaznamenaný manekýnom samotným na úrovni segmentov a termokamerou Flir i7 na úrovni detailnejšieho rozdelenia povrchu. Posledná časť práce popisuje priebeh samotného experimentu, prezentuje namerané hodnoty vrátane rozboru neistôt a rozhoduje o potvrdení/ vyvrátení pracovnej hypotézy.

## **Kľúčové slová**

automobilová výustka, tepelný manekýn, prenos tepla konvekciou

## **Abstract**

The aim of this diploma thesis is to investigate the influence of different types of HVAC system outlets on convective heat transfer from a human body. The first part of the thesis consists of an overview of essentials important for understanding the issue, specifically, metabolism, thermoregulation, heat transfer mechanisms, thermal vote and fluid dynamics. The second part defines the main working hypothesis and describes the used experimental approach leading either to confirmation or disproval of the hypothesis. The chosen approach is based on a measurement with thermal mannequin "Newton" using two different configurations: constant surface temperature and constant generated heat flux. In case of the first configuration, the convection intensity indicator was the value of heat flux generated from each of surface segments of the thermal mannequin. Their surface temperature was the indicator when running the experiment using the second configuration. The value was evaluated by the thermal mannequin as well as the thermal camera Flir i7 which provided more detailed division of the surface. The final part of the thesis describes the progress of the experiment itself, represents gathered values involving analysis of contaminants and confirms or disproves the original thesis.

## **Key words**

car ventilation outlet, thermal manikin, convective heat transfer

## **Bibliografická citácia**

ZÁBOVSKÝ, Ján. *Porovnání vlivu různých typů výustek na intenzitu přenosu tepla konvekcí z lidského těla*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/121769>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Jan Fišer.

## **Prehlásenie**

Čestne prehlasujem, že som svoju diplomovú prácu na tému „Porovnaní vlivu různých typů výustek na intenzitu přenosu tepla konvekcí z lidského těla“ vypracoval samostatne, s využitím informačných zdrojov uvedených v zozname.

V Brne dňa:

Podpis:

## **Podakovanie**

Týmto by som sa chcel poďakovať Ing. Bc. Janu Fišerovi, Ph.D. za vedenie mojej diplomovej práce, cenné rady a ústretový, trpezlivý a priateľský prístup. Taktiež by som chcel poďakovať doc. Ing. Josefu Sedlákovi Ph.D. za pomoc pri 3D tlači prechodky, Ing. Ondřeji Pechovi, Ph.D. za pomoc pri dodatočných úpravách výustky a za pomoc s vizualizáciou prúdových polí pomocou dymovej metódy a Ing. Jiřímu Hejčíkovi Ph.D. za pomoc s uvedením ventilátoru do prevádzky. Taktiež som vďačný za možnosť využiť Cabin Simulátor, ktorý bol vytvorený ako súčasť projektu TheMaSys - TJ02000028 TAČR Zéta. V neposlednej rade by som sa chcel poďakovať celej rodine a predovšetkým mamine za nesmiernu podporu počas celého štúdia.

# OBSAH

<b>1</b>	<b>Úvod</b> .....	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>Ciele a limity práce</b> .....	<b>11</b>
<b>3</b>	<b>Metabolizmus, termoregulácia a Tepelný komfort človeka</b> .....	<b>12</b>
3.1	Tepelná bilancia.....	12
3.2	Metabolizmus a termoregulácia .....	13
3.3	Prenos tepla z ľudského tela.....	16
3.3.1	<i>Prenos tepla vedením</i> .....	17
3.3.2	<i>Prenos tepla radiáciou</i> .....	17
3.3.3	<i>Prenos tepla konvekciou</i> .....	18
3.3.4	<i>Prenos tepla vyparovaním (potením)</i> .....	19
3.4	Faktory ovplyvňujúce výsledný tepelný pocit .....	20
3.4.1	<i>Teplota vzduchu</i> .....	21
3.4.2	<i>Radiačná teplota</i> .....	21
3.4.3	<i>Vlhkosť vzduchu</i> .....	22
3.4.4	<i>Rýchlosť prúdenia vzduchu v okolí</i> .....	22
3.4.5	<i>Odev a jeho tepelný odpor</i> .....	23
3.5	Vyhodnocovanie tepelného pocitu v automobiloch .....	25
3.5.1	<i>Model PMV-PPD</i> .....	28
<b>4</b>	<b>Teória prúdenia</b> .....	<b>30</b>
4.1	Rozdelenie prúdení.....	31
4.2	Prúdenie z výustky.....	33
<b>5</b>	<b>Definícia hypotézy a návrh metodiky</b> .....	<b>35</b>
5.1	Meranie odvodu tepla z ľudského tela .....	37
5.2	Vytvorenie stabilného prostredia kabíny automobilu.....	38
5.3	Zostavenie meracej trate .....	39
5.4	Meranie fyzikálnych veličín .....	42
<b>6</b>	<b>Popis experimentu</b> .....	<b>43</b>
6.1	Vytvorenie kontrolovaného prostredia a rozmiestnenie aparatury .....	43
6.2	Nastavenie na konštantnú teplotu povrchu .....	44
6.3	Nastavenie na konštantný tepelný tok .....	45
<b>7</b>	<b>Uskutočnenie experimentu a získané výsledky</b> .....	<b>47</b>
7.1	Overenie metodiky a stanovenie veľkostí prietoku.....	48



7.2	Rozbor neistôt merania.....	51
7.2.1	<i>Metóda typu A</i> .....	51
7.2.2	<i>Metóda typu B</i> .....	52
7.2.3	<i>Príklad výpočtu kombinovanej neistoty</i> .....	53
7.3	Meranie na konštantnú povrchovú teplotu .....	55
7.4	Meranie na konštantný tepelný tok .....	63
<b>8</b>	<b>Diskusia výsledkov</b> .....	<b>73</b>
<b>9</b>	<b>Vizualizácia rýchlostných a prúdových polí</b> .....	<b>75</b>
<b>10</b>	<b>Zhrnutie poznatkov a návrhy do budúcnosti</b> .....	<b>80</b>
<b>11</b>	<b>Záver</b> .....	<b>83</b>
<b>12</b>	<b>Zoznam použitých zdrojov</b> .....	<b>85</b>
	<b>Zoznam použitých symbolov a skratiek</b> .....	<b>90</b>
	<b>Zoznam príloh</b> .....	<b>93</b>

# 1 ÚVOD

Vytvorenie vhodného vnútorného prostredia zabezpečujúceho optimálne životné podmienky na rozdiel od tých v exteriéri, bolo bezpochyby vždy cieľom ľudského úsilia. Spočiatku zabezpečovali takéto prostredie najmä obydlia, ktorými sa postupom času od jaskýň cez rôzne podoby príbytkov stali domy a budovy, ktoré poznáme dnes a v ktorých my, obyvatelia rozvinutých krajín, trávime v priemere až 90 % času [1].

Interiér budov ale nezostal jediným miestom, v ktorom človek trávi nezanedbateľné množstvo času a v ktorom, tak ako v budovách, pociťuje potrebu vytvárať vhodné prostredie s možnosťou riadenia jeho parametrov. V dôsledku neustále zväčšujúcej sa potreby cestovať sa stali takýmto miestom kabíny dopravných prostriedkov. V ich prípade potrebu ochrany pred dažďom a vetrom postupom času rozšírila potreba zabezpečiť primerané odhlučnenie, výmenu vzduchu a najmä zabezpečenie tepelného komfortu cestujúcich.

Tepelný komfort je výsledkom súhry viacerých faktorov, z ktorých niektoré možno cielene ovplyvňovať. Hlavným nástrojom na vytváranie takéhoto vplyvu vo vnútorných priestoroch tak budov, ako aj dopravných prostriedkov sú takzvané HVAC systémy (z anglického heating, ventilation and air conditioning). Ich úlohou je dopravovať potrebné množstvo vzduchu tak, aby bola dodržaná jeho dopredu stanovená kvalita za súčasnej úpravy jeho teploty pomocou vykurovania a chladenia, a úpravy vlhkosti. Ich primeraná hodnota má pozitívny vplyv na výsledný tepelný pocit. Okrem vlhkosti a teploty vzduchu definujú tepelný stav prostredia aj stredná radiačná teplota a rýchlosť s akou sa vzduch v okolí človeka pohybuje. Tesne za výstokom, poslednou časťou distribučného systému vzduchu, je rýchlosť prúdenia daná objemovým prietokom, veľkosťou jej voľnej plochy a konštrukciou výstky. Charakteristiky prúdu vytvoreného výstokom sa ďalej šíria a v bezprostrednej blízkosti ľudského tela ovplyvňujú intenzitu prenosu tepla z jeho povrchu do prúdiaceho vzduchu.

Estetika zohráva v automobilovom priemysle popri funkčnosti taktiež kľúčovú rolu. Tento trend logicky neobchádza ani výstky vetracieho systému. Dizajn celého automobilu sa zväčša nesie v charakteristickom duchu konkrétnej značky, ktorý je zároveň aj jej silnou súčasťou. Preto môžeme dnes sledovať veľmi odlišné konštrukcie výstiek u automobilov rovnakej kategórie rozdielnych značiek. Funkčnosť z hľadiska kúrenia, vetrania a klimatizácie teda nebývajú jediným kritériom, ktoré výrazne ovplyvňuje prácu konštruktérov a dizajnérov. Jej výsledkom je kompromis medzi vzhľadom, funkčnosťou a samozrejme cenou.

Cieľom tejto diplomovej práce je porovnať vplyv rozdielnych konštrukcií výstiek na prenos tepla konvekciou z/do ľudského tela. Predmetom skúmania sú štyri odlišné automobilové výstky, z ktorých tri boli poskytnuté firmou Fischer automotive systems s.r.o. a sú určené pre automobily vyššej cenovej kategórie. Štvrtá, so základnou konštrukciou určená pre cenovo dostupnejšie automobily, bola zvolená s cieľom zistiť, či sa aj cena výstky odráža na výslednej intenzite ochladzovacieho efektu.

## 2 CIELE A LIMITY PRÁCE

Cieľom práce je porovnať vplyv prúdenia z troch konštrukčne odlišných výustiek na intenzitu prenosu tepla konvekciou z a do ľudského tela. Aby bolo možné daný cieľ naplniť, je nutné vyriešiť jednotlivé čiastkové úlohy:

- Rešerš problematiky prenosu tepla, metabolizmu, termoregulácie a tepelného komfortu
- Zvolenie vhodnej metodiky merania nárastu konvektívnej zložky prenosu tepla z ľudského tela za konštantnej teploty okolia rovnajúcej sa teplote privádzaného vzduchu
- Zadefinovanie, vyvinutie, zostavenie a otestovanie meracieho systému
- Spresnenie jednotlivých parametrov merania
- Uskutočnenie a vyhodnotenie samotného experimentu a potvrdenie/vyvrátenie pracovnej hypotézy

Ďalej pre prácu platia nasledujúce limity:

- Teplota privádzaného vzduchu je konštantná a rovná sa teplote okolia.
- Práca sa nezaobrá prechodovými stavmi pri nábehu vykurovania, či chladenia. Zaoberá sa len ustálenými stavmi.
- Práca nerieši vplyv ďalších faktorov prostredia, ako je asymetria radiačnej teploty atď.

### 3 METABOLIZMUS, TERMOREGULÁCIA A TEPELNÝ KOMFORT ČLOVEKA

Ako bolo už v úvode práce spomenuté, úlohou HVAC systémov je modifikovať určité parametre okolitého prostredia za účelom jeho optimalizácie pre pobyt osôb v ňom prebývajúcich. Jedným z hlavných cieľov je zabezpečiť, aby osoby pociťovali tzv. tepelný komfort. Ten je podľa normy ASHRAE 55 definovaný ako „stav mysle, ktorý vyjadruje spokojnosť s tepelnými podmienkami okolia“ [2]. Je to teda stav, pri ktorom osoba nemá potrebu nijako upravovať tepelné podmienky okolitého prostredia.

Podľa Fanger [3] je pre dosiahnutie takéhoto pocitu na celom tele nutné splniť nasledujúce podmienky:

- 1. Telo sa musí nachádzať v tepelnej rovnováhe.*
- 2. Miera potenia je v medziach komfortu.*
- 3. Teplota pokožky je v medziach komfortu.*
- 4. Absencia lokálneho tepelného diskomfortu.*

Efektivita premeny chemickej energie na energiu využiteľnú v bunkách je veľmi malá a vzniká tak relatívne veľké množstvo tepla, ktoré musí byť odvádzané do okolia. Aj pre ľudské telo samozrejme platí druhý zákon termodynamiky, ktorý vraví, že teplo sa môže samovoľne prenášať len z teplejšieho miesta na chladnejšie. Na jeho základe teda možno odhadovať či bude pri určitých okolitých podmienkach výsledný tepelný tok smerovať do, alebo von z tela. Či už to bude tak, alebo onak, na človeka je v tomto prípade nutné pozeráť sa nie len ako na objekt generujúci a uvoľňujúci teplo, ale aj ako na ľudskú bytosť žijúcu v sociálnom kontexte. Tá má svoj pôvod, správanie, genetickú predispozíciu či psychické rozpoloženie. Na to všetko netreba zabúdať pri zaoberaní sa tepelným komfortom. Výsledný tepelný pocit je totiž tvorený súhrou mnohých rozdielnych faktorov.

#### 3.1 Tepelná bilancia

O prvej zo spomínaných Fangerových podmienok pojednáva tepelná bilancia (viď rovnica 1). Teplo produkované v tele je dané ľavou stranou rovnice, ktorá je rozdielom energetickej produkcie metabolizmu zmenšenej o mechanickú prácu svalov (M-W). Pravá strana zase predstavuje všetky druhy prenosu tepla medzi telom a okolím: prúdenie (K), vedenie (C), žiarenie (R) vyparovanie (E), a akumulačný člen (S). Ten nadobúda kladné hodnoty, ak tepelné zisky prevyšujú tepelné straty. Naopak, ak tepelné straty prevyšujú tepelné zisky, S nadobúda záporné hodnoty (fenomén umožňujúci ukladanie tepla, prípadne chladu v prípade hypotermie). Pri oboch z uvedených príkladov dochádza k zakročeniu termoregulačnej sústavy s cieľom vykompenzovať výchylky a udržať stálu teplotu tela.

Vzájomným sčítaním všetkých členov rovnice dostávame celkovú tepelnú bilanciu ľudského tela, ktorá má nasledujúci tvar:

$$M - W = K + C + R + E + S \quad (1)$$

Kde:

**M** je energetická produkcia metabolizmu [W]

**W** je mechanická práca svalov [W]

**K** je celkový tepelný tok prúdením [W]

**C** je celkový tepelný tok vedením [W]

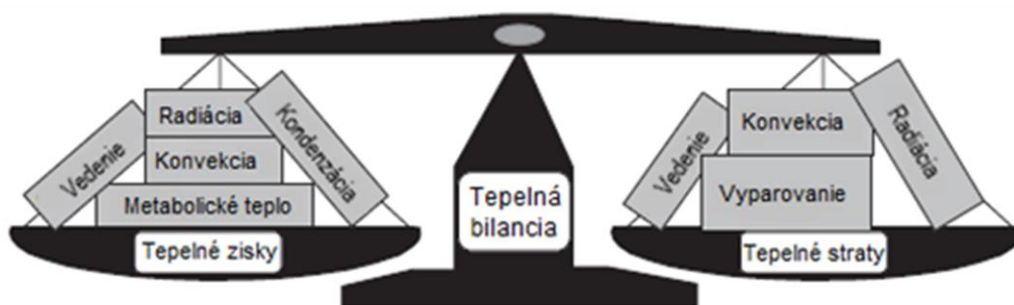
**R** je celkový tepelný tok žiarením [W]

**E** je celkový tepelný tok vyparovaním [W]

**S** je akumulčný člen [W]

O tepelnej rovnováhe hovoríme vtedy, ak je tepelná bilancia blízka nule. Nastáva tak stav blízky rovnováhe medzi produkciou tepla v tele spolu s prípadnými tepelnými ziskami (viď obr. 1) a jeho prenosom do okolia v podobe tepelných strát. Platí vtedy, že:

$$\sum(M, W, S, K, C, R, E) \approx 0 \quad (2)$$



Obr. 1 Znáozornenie tepelnej rovnováhy [4].

### 3.2 Metabolizmus a termoregulácia

Človek, tak ako iné cicavce alebo napríklad vtáky, patrí medzi tzv. teplokrvné alebo taktiež endotermné či homoiotermné živočíchy. To znamená, že ľudské telo si udržuje konštantnú vnútornú teplotu, ktorá by mala v prípade zdravého človeka byť približne 36,6 °C. Hlavným „vykurovacím systémom“ ľudského tela, ktorý napomáha k dosahovaniu danej teploty, je metabolizmus.

Pojmom metabolizmus nazývame sumu všetkých anabolických a katabolických reakcií odohrávajúcich sa v tele organizmu. Katabolické procesy, napr. tie ktoré zabezpečujú bunkové dýchanie, extrahujú energiu uloženú v chemických väzbách molekúl stravy. Jej pôvodným zdrojom je slnko. Elektromagnetické žiarenie z neho

uvoľnené spolu s oxidom uhľičitým a vodou premieňajú rastliny pomocou fotosyntézy na tzv. adenzíntrifosfát (ATP), glukózu a kyslík. Spomínaný adenzíntrifosfát, ktorý je akýmsi nositeľom ľahko uvoľniteľnej energie, zabezpečuje pohon iných pre život buniek nevyhnutných metabolických procesov. Molekuly získané zo stravy sú taktiež stavebnými jednotkami tkaniva organizmov. Z potravy získané proteíny sú metabolickým procesom premieňané na aminokyseliny, ktoré môžu byť použité na budovanie proteínov vnútri buniek samotného organizmu, čím dochádza k ich rastu. Takýto proces rastu buniek je typickým príkladom anabolického procesu. Ak je príjem energie z potravy vyšší ako jej množstvo potrebné pre fungovanie buniek, prebytok je uskladňovaný vo forme glykogénu (reťazec molekúl glukózy) alebo triacylglycerolov (molekúl tuku).

Proces získavania a následného využívania energie však neprebíha so stopercentnou účinnosťou. Energia, ktorá na konci procesu zostáva nevyužitá, sa uvoľňuje najmä v podobe metabolického tepla, čo z metabolizmu činí vyššie spomínaný „vykurovací systém“ tela. Celkové množstvo produkovanej energie sa označuje anglickým pojmom *metabolic rate* alebo po slovensky *metabolickou produkciou tepla*, pričom jej časť je spotrebovaná vo forme mechanickej práce svalov. Logicky potom množstvo metabolického tepla zistíme z ich rozdielu:

$$H = M - W \quad (3)$$

Kde:

**H** je metabolická produkcia tepla [W]

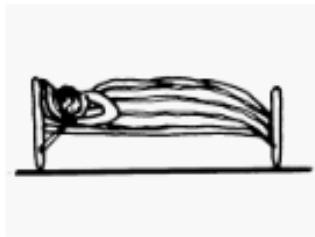
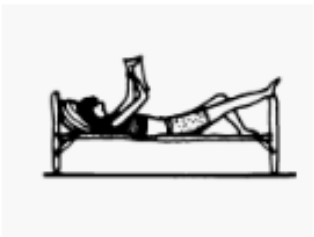

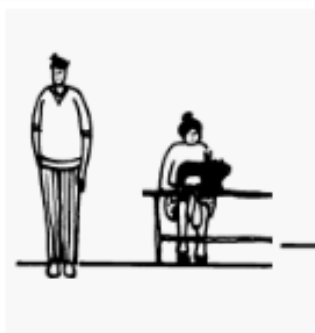





**M** je energetická produkcia metabolizmu [W]

**W** je mechanickej práca svalov [W]

Metabolická produkcia tepla závisí od viacerých faktorov, napr. od intenzity fyzickej aktivity, psychickej pohody, trénovanosti tela a pod. Jej základná úroveň, ktorá je dosahovaná v tepelne neutrálnom prostredí (t. j. v takom, v ktorom telo nemusí vynakladať ďalšiu energiu na udržovanie telesnej teploty), pri pokojnom psychickom rozpoložení bez stresu či iného vzrušenia a bez vykonávania fyzickej aktivity, sa nazýva bazálny metabolizmus alebo po anglicky *basal metabolic rate*. Jeho hodnota sa u priemerného dospelého muža pohybuje okolo 80 W a u priemernej dospeléj ženy okolo 65-70 W [5]. Na vyjadrenie metabolickej produkcie tepla bola zavedená jednotka *met*, pričom hodnota 1 met predstavuje metabolické teplo produkované človekom pri sedavej činnosti vzťahnuté na DuBois plochu (1,9 m<sup>2</sup>), teda 58,2 W/m<sup>2</sup> [6].

Teplo uvoľňujúce sa vďaka metabolickým procesom umožňuje udržiavanie konštantnej telesnej teploty teplokrvných organizmov. Tento proces samotný však nestačí na dlhodobé dosahovanie tzv. homeostázy, rovnovážneho stavu zabezpečujúceho bezproblémové fungovanie tela. Kľúčovú úlohu tu zohráva termoregulačná sústava, ktorej úlohou, ako už z názvu vyplýva, je pomocou rôznych mechanizmov regulovať telesnú teplotu tak, aby zostala v určitom úzkom rozmedzí nezávisle na tepelných podmienkach okolitého prostredia. Jedná sa teda

o dynamický regulačný systém, ktorý reaguje na zmeny (poruchy) vychýľujúce vnútornú teplotu tela z rovnovážneho stavu.

<p>Spaní 0,7 met</p> 	<p>Odpočívání v leže 0,8 met</p> 	<p>Odpočívání v sedě 1,0 met</p> 
<p>Stání, lehká práce v sedě 1,2 met</p> 	<p>Velmi lehká práce ve stoje 1,6 met</p> 	<p>Lehká práce ve stoje 2,0 met</p> 
<p>Středně těžká práce 3,0 met</p> 	<p>Těžká práce 6,0 met</p> 	<p>Velmi těžká práce 7,0 met</p> 

Obr. 2 Příklady hodnôt metabolickej produkcie tepla v jednotkách met [6].

Ak však telesná teplota klesne alebo narastie príliš, môže to rapidne ovplyvniť schopnosť tela správne fungovať s možnými fatálnymi následkami. Pri poklese telesnej teploty na hodnotu 35°C [7] a menej nastáva tzv. hypotermia (podchladenie), ku ktorému zvyčajne dochádza po nadmernom vystavení príliš chladnému prostrediu s intenzívnym odvodom tepla (napr. pri prídlhom zotrvaní v studenej vode). Hypotermia môže mať za následok zástavu srdca, poškodenie mozgu alebo dokonca

smrť. Opačný extrém, hypertermia (prehriatie), nastáva po vystavení extrémnym vonkajším podmienkam, pri ktorých nie je možný dostatočný odvod tepla do okolia. Úzko súvisí s dehydratáciou. Ak telesná teplota v takom prípade vystúpi na hodnotu 42°C [8], taktiež dochádza k poškodeniu mozgu alebo dokonca smrti v dôsledku zlyhania orgánov či poškodenia dôležitých bielkovín v tele.

Riadenie procesu zabraňovania takýmto extrémnym situáciám zabezpečuje časť mozgu, ktorá sa nazýva hypotalamus. Ak receptory centrálnej nervovej sústavy zaznamenajú zmenu telesnej teploty, okamžite vyšlú správu do hypotalamu. Jeho reakciou je následné vyslanie signálov orgánom, žľazám, svalom a koži, ktoré pomocou rady mechanizmov dokážu nežiaduci stav zvrátiť.

Pri vystavení tela chladným podmienkam bez dostatočného tepelného odizolovania od prostredia či dostatočnej fyzickej aktivity dochádza k viacerým obranným mechanizmom. Pomocou tzv. vazokonstrikcie (zúženia ciev) v blízkosti pokožky sa zníži prietok krvi v danej oblasti, čím telo sústreďuje teplo vo svojom vnútri a znižuje úniky smerom von. Vďaka tzv. termogenéze dochádza ku zvýšeniu produkcie tepla orgánmi a svalmi. U svalov dochádza napríklad ku ich chveniu. Ďalším mechanizmom je taktiež hormonálna termogenéza. K tej dochádza vďaka hormónom zámerne vylúčeným štítnou žľazou. Spomínané hormóny totiž zvyšujú metabolickú produkciu tepla a tým aj množstvo tepla takýmto spôsobom uvoľňovaného.

Ak sa však telo nachádza vo veľmi teplom prostredí alebo vykonáva zvýšenú fyzickú aktivitu, jeho teplota sa zvýši. Hypotalamus následne zareaguje vyslaním signálov do potných žliaz, ciev a kapilár v oblasti pokožky. Cievny nahromadené teplo pomocou krvi dopraví do kapilár nachádzajúcich sa priamo pod pokožkou, odkiaľ môže byť uvoľnené do prostredia. S cieľom urýchliť prenos tepla z povrchu tela do okolia dochádza k tzv. vazodilatácii (rozšíreniu ciev) a poteniu (vyučovaniu potu potnými žľazami). Vylúčený pot je odparovaný z povrchovej vrstvy kože, pričom potrebné skupenské teplo vyparovania je odobrané z povrchu ľudského tela, čím vzniká potrebný ochladzovací efekt. Týmto procesom kapiláry vracajú ochladenú krv smerom do vnútra tela a celý proces sa opakuje. Potenie je ale len jedným zo štyroch mechanizmov odovzdávania tepla do okolia. Ďalšími mechanizmami sú prenos tepla radiáciou, konvekciou a vedením.

### **3.3 Prenos tepla z ľudského tela**

Z termodynamiky je známe, že energia nevzniká ani nezaniká. Mení sa nanajvýš jej forma. Prenos tepla je spolu s prácou jedným z dvoch mechanizmov, pomocou ktorých je prenos, alebo premenu formy energie možné uskutočniť. Je taktiež dejom, ktorý je podmienený teplotným gradientom. Ten určuje smer a intenzitu deja. Bez teplotného gradientu by sa prenos tepla nemohol uskutočňovať. Poznáme dve formy prenosu tepla: prenos citelného tepla (konvekcia, vedenie, radiácia) a prenos latentného tepla (prenos tepla pri zmene skupenstva a prenos hmoty).



### 3.3.1 Prenos tepla vedením

Vedenie alebo kondukcia je mechanizmus, ktorý sa odohráva na molekulárnej úrovni. Častice s vyššou energiou, s ktorou je taktiež spojená ich vyššia teplota, odovzdávajú energiu časticiam s energiou nižšou a nikdy naopak. Intenzita samotného deja silno závisí od vzájomných vzdialeností medzi molekulami. Čím bližšie sa molekuly ku sebe nachádzajú, tým intenzívnejšie sa bude energia prenášať a tým menší bude tzv. tepelný odpor resp. väčšia tzv. tepelná vodivosť. Z pohľadu vedenia je teda tepelný odpor logicky podstatne vyšší pri tekutinách v porovnaní s tuhými látkami. V súvislosti s tekutinami hovoríme najmä o procese tzv. tepelnej difúzie, pri ňom dochádza ku samovoľnému presunu častíc z oblasti s vyššou energiou do oblasti s nižšou energiou. Pri tuhých látkach pozorujeme naopak kmitavý pohyb atómov kryštalickej mriežky, prípadne voľných elektrónov.

Všeobecná rovnica pre výpočet veľkosti tepelného toku rovinnou stenou o hrúbke  $L$  v ustálenom stave má tvar:

$$\dot{Q}_C = \lambda S \frac{T_1 - T_2}{L} \quad (4)$$

Kde:

$\dot{Q}_C$  je tepelný tok vedením [W]

$\lambda$  je tepelná vodivosť [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]

$S$  je plocha steny [ $\text{m}^2$ ]

$T_1$  je vyššia z teplôt [K]

$T_2$  je nižšia z teplôt [K]

$L$  je hrúbka steny [m]

V kontexte ľudského tela zohráva vedenie dôležitú úlohu najmä pri odvádzaní tepla z jeho vnútra smerom k povrchu, kde tvorí jeden z mechanizmov prenosu tepla medzi tkanivami. Pri odvode tepla z tela do okolia zohráva významnú úlohu v prípade, že je ľudské telo z dostatočne veľkej časti vo fyzickom kontakte s inými pevnými objektmi s odlišnou povrchovou teplotou.

### 3.3.2 Prenos tepla radiáciou

Prenos tepla radiáciou je jediným mechanizmom prenosu tepla, pri ktorom na jeho uskutočnenie nie je potrebné nijaké sprostredkujúce médium. Môže k nemu teda dochádzať aj v absolútnom vákuu, vďaka čomu k nám týmto spôsobom prúdi teplo z povrchu slnka. Vo všeobecnosti platí, že každé teleso s konečnou nenulovou teplotou emituje a absorbuje radiáciu, pričom pri jej absorpcii nejakým povrchom sa tento povrch zohrieva. Tým sa samotný prenos tepla uskutočňuje. Radiácia je typom elektromagnetického žiarenia, pričom pri vlnových dĺžkach približne medzi  $0,1 \mu\text{m}$  a  $100 \mu\text{m}$  hovoríme o tepelnom žiarení [9]. Je nutné dodať, že telesá neemitujú žiarenie len o jednej vlnovej dĺžke. Emitujú celé spektrum vlnových dĺžok, ktoré je možné popísať pomocou *Planckovho zákona* a veličiny *spektrálnej hustoty žiarivého toku*. Tá má pre jednotlivé teploty (povrchu telies) svoje maximum pri určitej vlnovej

dĺžke. Čím vyššia je teplota telesa, tým sa spomínané maximum posúva smerom ku kratším vlnovým dĺžkam. Táto závislosť sa nazýva *Wienov posunovací zákon*. Pri hodnotení tepelného pocitu u človeka sú preto brané do úvahy dva typy tepelného žiarenia. Krátkovlnné slnečné žiarenia a dlhovlnné žiarenie okolitých povrchov, kde je možné uvažovať ako bežnú maximálnu teplotu do cca 100°C. Vyššie povrchové teploty spôsobujú už silnú asymetriu v strednej radiačnej teplote a tým aj predpoklad k tepelnému diskomfortu.

Vo všeobecnosti je pomerne zložitý určiť výsledný tepelný tok odovzdávaný medzi dvoma telesami. Dost' často však dochádza k tomu, že sa povrch jedného z telies dá považovať za úplne obklopený povrchom druhého. V takomto prípade pre celkový vzájomný tepelný tok platí, že:

$$\dot{Q}_R = \varepsilon \sigma S (T_1^4 - T_2^4) \quad (5)$$

Kde:

$\dot{Q}_R$  je tepelný tok radiáciou [W]

$\varepsilon$  je emisivita [-]

$S$  je plocha menšieho z telies [m<sup>2</sup>]

$\sigma$  je Stefan-Boltzmannova konštanta [5,67.10<sup>-8</sup>  $\frac{W}{m^2K^4}$ ]

$T_1$  je absolútna teplota teplejšieho povrchu [K]

$T_2$  je absolútna teplota chladnejšieho povrchu [K]

### 3.3.3 Prenos tepla konvekciou

Ku prenosu tepla konvekciou dochádza za prítomnosti prúdiacej tekutiny a nejakého povrchu, ktorým je obklopaná, prípadne povrchu, ktorý obklopuje. Samotný dej je výsledkom superpozície dvoch mechanizmov a dochádza pri ňom k vytvoreniu tzv. hydrodynamickej medznej vrstvy v blízkosti povrchu. V nej sa rýchlosť prúdenia tekutiny pohybuje v rozmedzí od nula po rýchlosť, ktorá je označovaná ako rýchlosť voľného prúdu. Kondukciou, prvým z dvoch mechanizmov, dochádza ku ohrevu veľmi jemnej vrstvy tekutiny v bezprostrednej blízkosti povrchu, kde je rýchlosť prúdenia nízka. Ďalší z mechanizmov, advekcia, spočíva v objemovom, makroskopickom pohybe väčšieho objemu molekúl tekutiny s vyššou energiou do oblasti s energiou nižšou. Vzťah pre výpočet merného tepelného toku medzi telesom a obtekajúcou tekutinou poznáme ako tzv. *Newtonov ochladzovací zákon*. Ten má nasledujúci tvar:

$$\dot{Q}_K = \alpha \cdot S \cdot (T_w - T_\infty) \quad (6)$$

Kde:

$\dot{Q}_K$  je tepelný tok konvekciou [W]

$\alpha$  je súčiniteľ prestupu tepla [W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup>]

$S$  je plocha obtekaného povrchu [m<sup>2</sup>]

$T_w$  je absolútna teplota povrchu telesa [K]

$T_\infty$  je absolútna teplota okolia v dostatočnej vzdialenosti od povrchu telesa [K]

Súčiniteľ prestupu tepla závisí od viacerých premenných a preto ho môžeme vyjadriť vo forme nasledujúcej funkcie:

$$\alpha = f(\lambda, c, \rho, L, u, v, \beta) \quad (7)$$

Kde:

$\lambda$  je tepelná vodivosť telesa [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ]

$c$  je merná tepelná kapacita [ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ]

$\rho$  je hustota tekutiny [ $kg \cdot m^{-3}$ ]

$L$  je charakteristický rozmer telesa [m]

$u$  je rýchlosť prúdenia tekutiny [ $m \cdot s^{-1}$ ]

$v$  je kinematická viskozita tekutiny [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ]

$\beta$  je súčiniteľ objemovej rozťažnosti [ $K^{-1}$ ]

V kontexte tejto práce je potrebné zamerať sa hlavne na rýchlosť prúdenia tekutiny a jej fluktuácie, čím sa zároveň dostávame k rozdeleniu. Konvekciu delíme na prirodzenú a nútenú. Ako už z názvoslovvia vyplýva, k nútenej konvekcii dochádza vtedy, ak je prúdenie tekutiny účelovo vyvolávané napr. ventilátorom. Zapnutím, vypnutím, prípadne regulovaním otáčok ventilátora je teda možné vedome riadiť intenzitu prenosu tepla konvekciou z tela.

### **3.3.4 Prenos tepla vyparovaním (potením)**

Vyparovanie je dej, pri ktorom dochádza k zmene skupenstva z kvapalného na plynné. Na uskutočnenie tejto zmeny je nutné dodať kvapaline určité množstvo energie, tzv. skupenské teplo vyparovania  $l_{23}$ . V prípade ľudského tela vylučovaná kvapalina (pot) odoberá spomínané teplo predovšetkým z jeho povrchu, čím ho ochladzuje. Následný odvod vodnej pary do okolitého prostredia prebieha podobným spôsobom ako odvod tepelného toku pri konvekcii. Keďže je hodnota skupenského tepla vyparovania vody pomerne vysoká (približne 2,4 MJ/kg pri teplotách okolo 30°C [10]), hrá potením významnú rolu pri ochladzovaní ľudského tela. Za normálnych podmienok tvorí totiž až 25% tepelných strát [11].

Existujú dva druhy potenia: suché a mokré. Pri suchom potení dochádza k priamej difúzii molekúl vody z epitelových buniek pokožky, pričom sa jedná o neriadený proces, ktorého sa potné žľazy nezúčastňujú. Energeticky významnejšie mokré potenie, ktoré prebieha za pomoci potných žliaz, je organizmom ovládané. Služi na dosahovanie dostatočného odvodu tepla pri teplotách, pri ktorých už ostatné mechanizmy nedostačujú. Pre oba prípady však platí, že so zvyšujúcou sa koncentráciou vodných pár v okolitom prostredí sa znižuje rýchlosť odparovania pričom pri nasýtení okolitého vzduchu vodnými parami (pri rosnom bode) k ďalšiemu odparovaniu už nedochádza. Práve preto je vlhkosť vzduchu jedným z parametrov, ktoré sú pomocou HVAC systémov riadené.

Vzhľadom k určitej korelácii medzi evaporáciou a konvekciou je možné zapísať vzťah pre výpočet hodnoty tepelného toku v nasledujúcom tvare:

$$\dot{Q}_E = 16.5 \cdot S \cdot \alpha \cdot (p_p'' - p_o) \quad [3] \quad (8)$$

Kde:

- $\dot{Q}_E$  je tepelný tok vyparovaním [W]
- $\alpha$  je lokálny súčiniteľ prestupu tepla [ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ]
- $p_p''$  je tlak nasýtenej vodnej pary pri teplote pokožky [Pa]
- $p_o$  je parciálny tlak vodnej pary v okolitom prostredí [Pa]
- $S$  je plocha pokožky [ $m^2$ ]

### 3.4 Faktory ovplyvňujúce výsledný tepelný pocit

Vo všeobecnosti je tepelný pocit chápaný ako výsledný prejav mnohých faktorov. To, v akom podnebnom pásme človek žije, akú má stavbu tela, aké má pohlavie, či je v telesnej kondícii, či prežíva stres alebo pohodu, či jeho telo práve nebojuje s nejakou chorobou, to všetko sa neustále odzrkadľuje na jeho tepelnom pociate a vo výslednom vnímanom komforte alebo diskomforte. Kombinácia vyššie spomínaného každého človeka definuje a činí jedinečným. Vnímanie tepelného pocitu je teda do určitej miery individuálne a existencia dvoch ľudí s absolútne totožným vnímaním je teda veľmi nepravdepodobná.

Aj keď spomínané individuálne faktory zohrávajú svoju úlohu v súvislosti s výsledným tepelným pocitom, nie sú hlavným predmetom skúmania. Tým je totižto istých päť faktorov okolia a jeden osobný faktor, ktorých výsledkom je podľa Fangera [3] samotný tepelný pocit. Jedná sa o:

- teplotu vzduchu
- radiačnú teplotu
- vlhkosť vzduchu
- rýchlosť prúdenia vzduchu v okolí
- metabolickú produkcia tepla
- tepelne izolačné vlastnosti odevu

### 3.4.1 Teplota vzduchu

Vzduchom je v tomto prípade myslená tá jeho časť, ktorá obklopuje ľudské telo a bezprostredne s ním tepelne interaguje. Teplota vzduchu bude teda akosi reprezentatívnou hodnotou, dostatočne slúžiacou na kvalitatívne ohodnotenie prostredia za účelom popisu tepelného toku konvekciou medzi telom a okolím. Nejedná sa teda o teplotu vzduchu príliš vzdialeného od tela, ktorá sa na tepelnom toku podieľa úplne zanedbateľne. Nemožno brať do úvahy ani teplotu vzduchu príliš blízko pri pokožke, pri ktorej sa napr. pri chladných podmienkach vytvára medzná vrstva teplého vzduchu.

### 3.4.2 Radiačná teplota

Ako už bolo pri prenose tepla spomenuté, každé teleso s nenulovou absolútnou teplotou vyžaruje a absorbuje radiáciu. Veľkosť tepelného toku medzi dvoma telesami je okrem iného priamo úmerná rozdielu štvrtých mocnín teplôt ich povrchov. V kontexte tepelného komfortu sa teda jedná o teplotu povrchu ľudského tela v porovnaní s teplotou povrchov, ktoré ho obklopujú.

Avšak, intenzita radiácie od okolitých povrchov býva spravidla v jednotlivých bodoch tzv. radiačného poľa premenná, závislá napr. na čase a smere. Za účelom definovania celkového radiačného poľa nejakého priestoru (napr. miestnosti) sa využíva koncept tzv. *strednej radiačnej teploty*. Stredná radiačná teplota je rovnomerná teplota okolitých plôch, pri ktorej je intenzita prenosu tepla radiáciou rovnaká, ako tá v reálnom nehomogénnom prostredí [12]. Na zistenie strednej radiačnej teploty nejakého priestoru, je vhodné použiť jeden z prístrojov, ktoré sú schopné integrovať nerovnomernú radiáciu z okolitých plôch do strednej hodnoty. Jedným z takých prístrojov je napr. guľový teplomer. Strednú radiačnú teplotu je možné dopočítať pomocou nasledujúceho vzťahu [13]:

$$\bar{t}_r = \sqrt[4]{(t_g + 273)^4 + 1,856 \cdot 10^7 \cdot \alpha_{kg} \cdot (t_g - t_a)} - 273 \quad (9)$$

Kde:

- $\bar{t}_r$  je stredná radiačná teplota okolitých povrchov [°C]
- $t_g$  je teplota guľového teplomeru [°C]
- $t_a$  je teplota okolitého vzduchu [°C]
- $\alpha$  je súčiniteľ prestupu tepla [ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ]

Pričom platí, že [13]:

$$\alpha = 1,4 \cdot \left( \frac{|t_a - t_g|}{D} \right)^{0,25} \quad \text{pre prirodzené prúdenie} \quad (10)$$

$$\alpha = 6,3 \cdot \frac{w^{0,6}}{D^{0,4}} \quad \text{pre nútené prúdenie} \quad (11)$$

Kde:

**w** je rýchlosť prúdenia vzduchu na úrovni gule [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]

**D** je vonkajší priemer gule [m]

### 3.4.3 Vlhkosť vzduchu

Ako už bolo v práci spomenuté, jednou z foriem prenosu tepla a látky, ktorá hrá významnú úlohu pri ochladzovaní ľudského tela je vyparovanie. Kvapalina, v tomto prípade pot, mení svoje skupenstvo a vo forme pary opúšťa ľudské telo a rozptyľuje sa v okolitom vzduchu. Intenzitu tohto deja ovplyvňuje množstvo vodnej pary v jednotkovom objeme vzduchu (obsah vlhkosti). To môže byť vyjadrené viacerými premennými: parciálnym tlakom vodnej pary, teplotou rosného bodu, absolútnou vlhkosťou vzduchu a relatívnou vlhkosťou vzduchu. Hnacou silou spomínaného prenosu je teda rozdiel vlhkosti vzduchu v bezprostrednej blízkosti pokožky a tou okolitého prostredia.

Aj keď z pohľadu tepelného komfortu neexistujú pevne stanovené limity vlhkosti vzduchu, pre prostredie s pokojným ovzduším je snaha udržať hodnoty parciálneho tlaku vodnej pary medzi hodnotami 0,67 a 1,86 kPa. Pri vyššej vlhkosti by dochádzalo k výskytu plesní a pri nižšej by zase mohlo dôjsť k dýchacím problémom, predovšetkým k nadmernému vysychaniu slizníc v nose a ústach a k podráždeniu horných dýchacích ciest [14].

### 3.4.4 Rýchlosť prúdenia vzduchu v okolí

Ako bolo už pri prenose tepla konvekciou a vyparovaním načrtnuté, pohybom vzduchu v okolí človeka je možné dosiahnuť zvyšovanie tepelného toku z a do jeho tela, pričom miera v akej dôjde k ovplyvneniu jeho tepelného komfortu závisí od viacerých faktorov. Tými najzásadnejšími pre tento kontext sú rýchlosť vzduchu a intenzita jej fluktuácií.

Rýchlosť vzduchu v určitom priestore je možné definovať ako časovú zmenu jej intenzity v troch ortogonálnych smeroch. Pre zjednodušenie, za veľkosť rýchlosti vzduchu (skalárna veličina) môže byť považovaná stredná hodnota intenzity rýchlosti vzduchu počas expozičného času, ktorý je predmetom záujmu, integrovaná cez všetky smery. Štúdie, hodnotiace spätnú väzbu od ľudí, napr. hodnotiace diskomfort následkom prievanu, ukázali, že fluktuácie rýchlosti vzduchu hrajú dôležitú rolu pri ovplyvňovaní tepelného pocitu. Práve preto by nie len stredná hodnota rýchlosti vzduchu, ale aj jej smerodajná odchýlka mala byť patrične braná do úvahy. Tie spolu určujú tzv. *intenzitu turbulencie*, t. j. pomer medzi veľkosťou smerodajnej odchýlky ku strednej veľkosti rýchlosti prúdenia vzduchu:

$$Tu = \frac{s}{\bar{w}} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_i (w_i - \bar{w})^2}{n-1}}}{\bar{w}} \quad (12)$$

Kde:

**Tu** je intenzita turbulencie [-]

**s** je smerodajná odchýlka rýchlosti vzduchu [m/s]

$\bar{w}$  je priemerná hodnota rýchlosti vzduchu [m/s]

Je známe, že fluktuácie rýchlosti vzduchu pri prirodzenom vetraní majú priaznivý účinok na tepelný pocit ľudí, na rozdiel od mechanického vetrania, pri ktorom dochádza k ustálenejšiemu prúdeniu a tým aj zvýšenej pravdepodobnosti vzniku nepríjemného prievanu [15]. Ten je definovaný ako nežiaduce lokálne ochladzovanie tela v dôsledku pohybu vzduchu. Aby sa tomu predišlo, stanovuje ASHRAE maximálne prípustné hodnoty rýchlosti vzduchu v okolí ľudského tela pre vnútorné priestory v teplom podnebí, a to nasledovne: 0,2 – 1,5 m/s v závislosti na viacerých parametroch, ako napr. úroveň fyzickej aktivity, pričom hodnota 0,2 m/s spravidla platí pre klimatizované priestory [15].

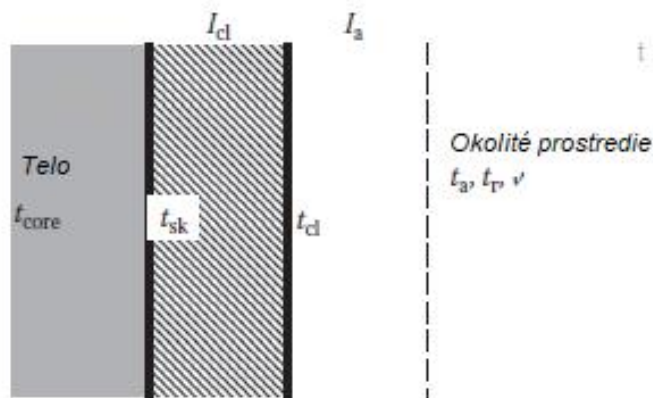
### **3.4.5 Odev a jeho tepelný odpor**

Drvivá väčšina ľudí na zemi má takmer neustále počas svojho života značnú časť tela zakrytú nejakým odevom. Ten funguje ako tepelná ochrana pred okolitým prostredím. Či už vďaka svojej schopnosti tieniť slnečné lúče, ako to je napr. v prípade odevu Tuaregov v púšti, alebo vďaka tepelnému odporu, ktorý znižuje prenos tepla do chladnejšieho okolia, ako to je napr. v prípade odevu Inuitov v polárnych oblastiach. Primárnou úlohou oblečenia je teda udržiavať telo v priaznivom tepelnom stave. Nemenej dôležitú úlohu zastáva v oblasti módy. Odev totižto často odráža a pomáha definovať spoločenský status svojho nositeľa, či už v pracovnej sfére, alebo každodennom živote. Napr. v prípade uniforiem polície či armády je dôležité, aby okrem praktickosti (jednoduché čistenie, dezinfikovanie, údržba) boli ľahko identifikovateľné a aby svojím vzhľadom vzbudzovali rešpekt. Zdravotné sestry by mali zase vo svojej uniforme pôsobiť starostlivým, dôverným a súčasne profesionálnym dojmom. Obchodné stretnutie vyššieho manažmentu nejakej firmy je taktiež nemožné si predstaviť bez oblekov a kravát.

Podľa Goldmana sa oblečenie vyznačuje štyrmi základnými faktormi, tzv. z angl. 4 Fs of clothing [16]. *Fashion (móda)* kvôli ktorej získava oblečenie niekedy až absurdnú podobu. *Feel (pocit)* v dvoch rôznych podobách. Jednou je myslený pocit oblečenia na dotyk a druhou pocit oblečeného, ktorý zahŕňa sčasti pocit na dotyk, schopnosť oblečenia odvádzať vlhkosť do okolitého prostredia či počet a typ stykových bodov oblečenia s telom. *Fit (hodiť sa, sedieť na tele)* zase pojednáva tak o móde ako aj o pocite, veľkosti či nositeľnosti. Posledným faktorom sú *functions (funkcie)*, z ktorých tou hlavnou je ochrana.

Ďalej bolo pri oblečení identifikovaných viacero faktorov ovplyvňujúcich jeho tepelné správanie sa. Jedná sa o: schopnosť tepelne izolovať za sucha, priepustnosť vodnej pary a vlhkosti, prenos tepla do oblečenia, to do akej miery sa stláča (napr. v prípade vetra), priepustnosť vzduchu, držanie tela a iné.




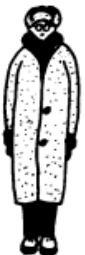







Prvý z uvedených faktorov má zásadný význam pri kvantifikovaní vlastností oblečenia. Pri jeho skúmaní býva využívaný tzv. *simple clothing model* (zjednodušený model oblečenia), vid' obr. 3. Vo vnútri tela generované teplo je viacerými mechanizmami prenosu tepla prenášané k jeho povrchu, z ktorého je následne uvoľňované do okolitého okolia. Pri tomto deji je dosahovaná dynamická rovnováha medzi teplom uvoľneným metabolickými procesmi v tele a teplom uvoľneným z povrchu tela do okolia, pričom teplota telesného vnútra je vyššia ako teplota kože. Tá je zase vyššia ako teplota povrchu oblečenia a tá je zase vyššia ako teplota okolitého prostredia (v dostatočnej vzdialenosti). Jedná sa teda o typickú kaskádu, ktorá definuje gradient teploty a tým aj smer prenosu tepla z jadra tela do jeho okolia.



Obr. 3 Grafické znázornenie zjednodušeného modelu oblečenia [3].

Schopnosť oblečenia tepelne izolovať (veľkosť jeho tepelného odporu  $I_{cl}$  v rozmedzí medzi povrchom tela a jeho povrchom) sa vyjadruje pomocou jednotky *clo*. Tá bola zvolená za účelom nahradenia fyzikálneho rozmeru tepelného odporu  $m^2KW^{-1}$  s cieľom zjednodušiť a dosiahnuť lepšiu predstaviteľnosť. 1 clo by malo predstavovať mieru tepelného odporu, ktorý zaručí tepelný komfort osobe vykonávajúcej sedavú činnosť pri teplote  $21^\circ C$  okolitého vzduchu. Jeho priemerná hodnota býva uvádzaná ako  $0,155 m^2KW^{-1}$  [3].



					
< 0,5	0,6 - 1,2	1,3 - 1,7	1,8 - 2,4	2,5 - 3,4	> 3,5
					

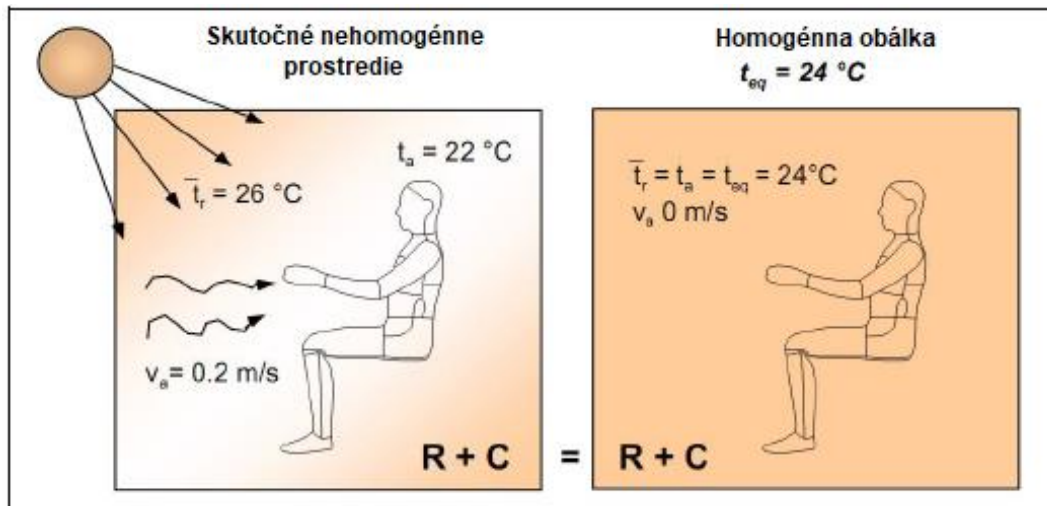
Obr. 4 Príklady hodnôt tepelného odporu v jednotkách clo pre jednotlivé súbory oblečenia [17].

### 3.5 Vyhodnocovanie tepelného pocitu v automobiloch

Značná časť z nasledujúcej kapitoly bola prebraná z dizertačnej práce „Optimalizace mikroklimatu v kabinách malých dopravných letadel“ [18] so súhlasom autora Ing. Bc. Jana Fišera, Ph.D.

Na vyhodnocovanie tepelného pocitu v kabínach dopravných prostriedkov je často využívaná metóda vypracovaná H. O. Nilssonom (NILLSON, 2004), ktorá je založená na určení tzv. ekvivalentnej teploty jednotlivých častí tela a vyhodnotení tepelného pocitu v diagrame komfortných zón. Táto metóda bola neskôr u nás štandardizovaná ako ČSN EN ISO 14505-2 Ergonomie teplého prostrední - Hodnocení tepelného prostředí ve vozidlech (ISO 14505, 2007).

Ekvivalentná teplota je definovaná ako teplota imaginárneho uzavretého priestoru, v ktorom sa radiačná teplota rovná teplote vzduchu, ktorý je pokojný, pričom množstvo odvádzaného tepla z tela do okolia je rovnaké, ako to, ktoré je odvádzané v konkrétnom reálnom prostredí. Uľahčuje teda vyhodnocovanie vplyvov prostredia na prenos tepla z tela do okolia.



Obr. 5 Znáznornenie princípu ekvivalentnej teploty.

Podľa (NILSON, a ďalší, 2000) je možné ekvivalentnú teplotu pre oblečeného človeka určiť pomocou vzťahov:

$$T_s = 36,4 - 0,05 \cdot \dot{q} \quad (13)$$

$$T_{eq} = T_s - R_{cl} \cdot \dot{q} \quad (14)$$

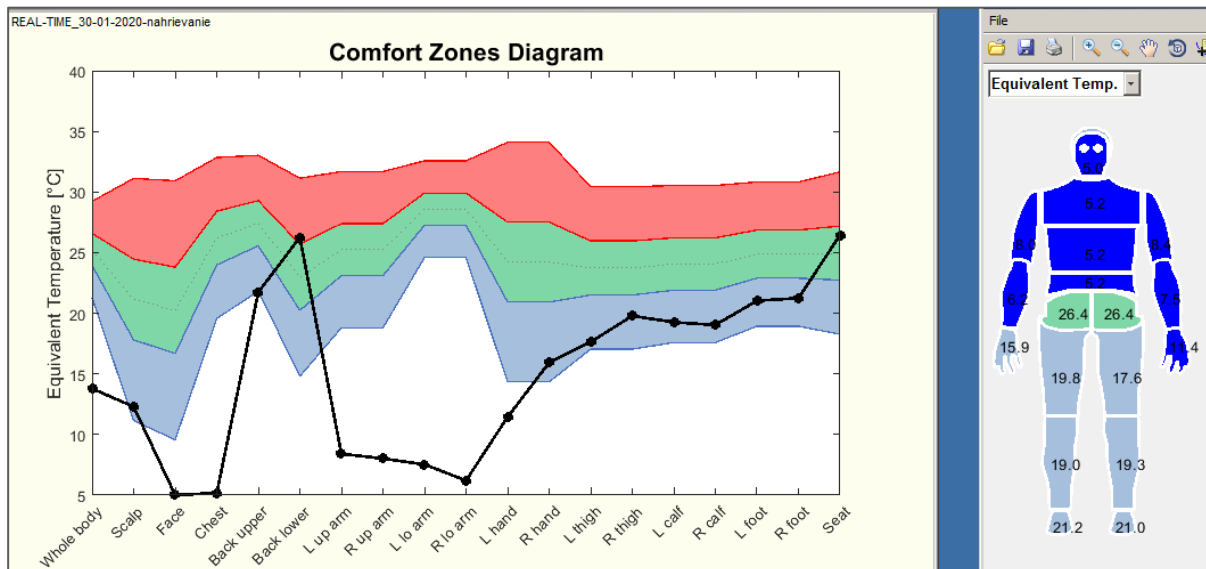
Kde:

- $T_s$  je teplota pokožky [°C]
- $R_{cl}$  je tepelný odpor odevu [ $m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$ ]
- $\dot{q}$  je merný tepelný tok [ $W \cdot m^{-2}$ ]
- $T_{eq}$  je ekvivalentná teplota [°C]

Merný tepelný tok  $\dot{q}$  v rovniciach 13 a 14 zahrňuje tepelnú stratu konvekciou a radiáciou. Pre nájdenie hodnôt merného tepelného toku boli použité výsledky meraní s tepelnými manekýnmi, ktorých povrch bol rozdelený na viaceré segmenty. Tie boli zahrievané na konštantnú teplotu, čím bolo možné získať hodnoty tepelných tokov prenášaných z povrchu na úrovni jednotlivých segmentov. Tepelní manekýni boli spolu s respondentmi vystavovaní rôznym mikroklimatickým podmienkam. Respondenti hodnotili tepelný pocit (Mean Thermal Vote – MTV) jednotlivých častí tela a súčasne bol zaznamenávaný tepelný tok prenášaný zo zhodných častí tepelných manekýnov. Zo zaznamenaných tepelných tokov bola podľa rovnice 13 vyčíslená ekvivalentná teplota a k nej priradený tepelný pocit respondentov (MTV). Ten platí pre určitý interval hodnôt ekvivalentnej teploty, ktorého veľkosť závisí na type, resp. tepelnom odpore oblečenia človeka. Spomínanými typmi (alebo taktiež súbormi) oblečenia môžu byť napr. ľahký letný odev, letný odev (t. j. topánky, dlhé nohavice a krátke tričko, ako to bude v prípade tejto práce), jesenný odev atď. Jednotlivé pásma rozdeľujú tzv. diagram komfortných zón (viď obr. 6) na nasledujúce oblasti podľa tepelného pocitu: neutrálna, chladno, ale príjemne, teplo, ale príjemne, nepríjemne chladno a nepríjemne teplo. Hranica pre neutrálnu oblasť bola stanovená

pre hodnotu  $MTV \pm 0,8$  (80% respondentov spokojných s pocitom na danej časti tela) a oblasti príjemného pocitu tepla a chladu boli stanovené pre hodnotu  $MTV \pm 1,5$ . Na obrázku 6 je uvedený príklad diagramu komfortných zón pre letné oblečenie. Prvý zľava v diagrame je uvedený rozsah ekvivalentných teplôt pre celé telo (časť whole body). Táto teplota sa vyčísľuje na základe ekvivalentných teplôt jednotlivých častí ako vážený priemer všetkých ekvivalentných teplôt, pričom váhami sú veľkosti jednotlivých plôch. Z diagramu je taktiež vidno, že rôzne časti tela majú rôzne rozsahy teplôt pre jednotlivé zóny. Tým je vyjadrená rozdielna citlivosť na zmenu tepelného toku u rôznych častí tela.

Celková tepelná pohoda je z pohľadu definície dosiahnutá, ak sú všetky časti tela vrátane ekvivalentnej teploty pre celé telo v neutrálnej oblasti. Pri aplikácii môže teda nastať prípad, pri ktorom sú všetky časti tela v neutrálnej zóne, ale pretože sa nachádzajú v blízkosti prechodu do zón „chladno, ale príjemne“ prípadne „teplo, ale príjemne“ je celková ekvivalentná teplota mimo neutrálnu zónu. Taký stav nie je možné považovať za stav tepelného komfortu.



Obr. 6 Diagram komfortných zón pre letný odev. Jednotlivé čierne body znázorňujú v akom pásme z hľadiska tepelného pocitu sa daný segment nachádza, pričom zelená znázorňuje neutrálne pásmo ( $MTV = \pm 0,8$ ), červená a modrá znázorňujú pásma teplo/chladno, ale príjemne ( $MTV = \pm 1,5$ ) a bielou sú pásma nepríjemne teplo/chladno.

### 3.5.1 Model PMV-PPD

V praxi hojne používaným a široko validovaným modelom tepelného pocitu a komfortu, založeným na modelovaní prenosu tepla z tela do okolia, je model PMV-PPD zostavený Fangerom v 80. rokoch minulého storočia. Pomocou neho je v praxi možné pre určitú skupinu ľudí vykonávajúcu určitú činnosť za určitých podmienok odhadovať ich spokojnosť s podmienkami okolitého prostredia. Tú je možné číselne vyjadriť pomocou nasledujúcich dvoch indexov.

*Predicted mean vote* ako už z názvu vyplýva, predpovedá akési priemerné ohodnotenie tepelného pocitu. Podľa Fangera [3] závisí úroveň diskomfortu na veľkosti tepelného zaťaženia. To vyjadruje rozdiel medzi vnútornou produkciou tepla a tepelnými stratami do okolia za predpokladu, že priemerná teplota pokožky a množstvo vylučovaného potu neprekročia komfortné limity. PMV bude teda funkciou tepelnej záťaže a fyzickej aktivity. Spomínané ohodnotenie sa vyjadruje pomocou nasledujúcej sedem stupňovej stupnice, pričom jej stredná hodnota vyjadruje tepelnú rovnováhu:

Horúco	+3
Teplo	+2
Mierne teplo	+1
Neutrálne	0
Mierne chladno	-1
Chladno	-2
Veľmi chladno	-3

Na základe experimentov, pri ktorých bolo viac než tisíc respondentov požiadaných, aby hodnotili svoj tepelný pocit vyššie uvedenou stupnicou, bola dokonca odvodená aj rovnica na výpočet PMV, ktorej zjednodušená forma má nasledujúci tvar:

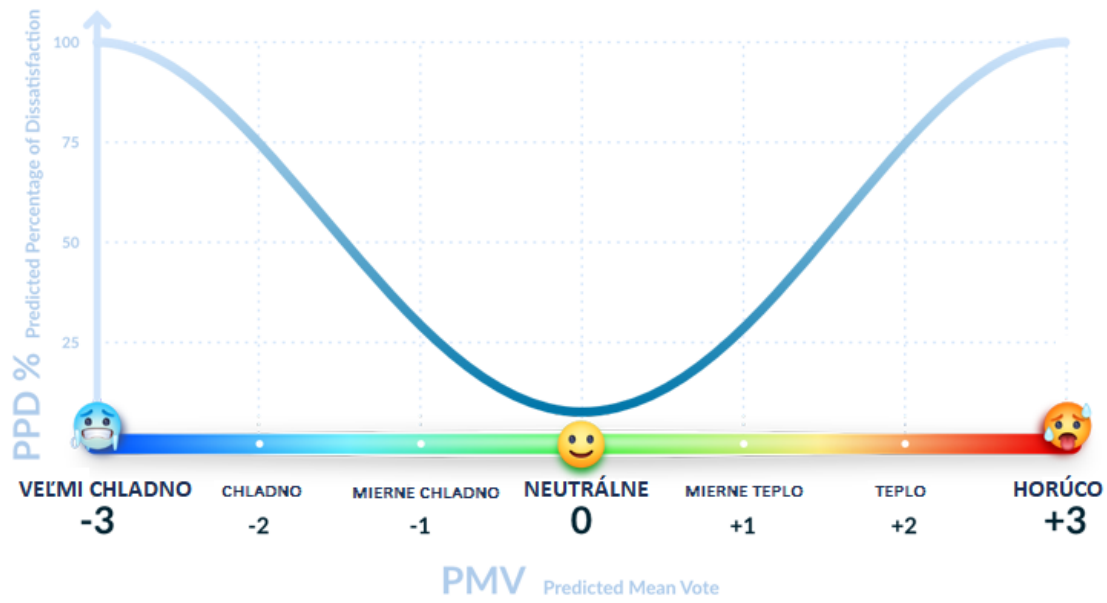
$$PMV = 0,352e^{(-0,0488H)} + (0,0372)(h - l) \quad (15)$$

Kde:

- h** merná metabolická produkcia tepla [W/m<sup>2</sup>]
- l** sú merné tepelné straty do okolitého prostredia [W/m<sup>2</sup>]

Keďže PMV predpovedá len priemernú hodnotu tepelného pocitu určitej skupiny populácie, samotný nepostačuje na dostatočné vykreslenie situácie. Na získanie ucelenejšej predstavy bol PMV doplnený ďalším modelom, ktorého úlohou je odhadovať podiel s tepelným stavom nespokojných osôb, t. j. osôb pociťujúcich nejakú formu tepelného diskomfortu. O diskomforte hovoríme pri hodnotách PMV nachádzajúcich sa mimo intervalu od -0,5 do 0,5 [2]. Vzájomnú závislosť medzi PMD a PPD indexom vyjadruje vzťah:

$$PPD = 100 - 90e^{(-0,03353PMV^4 - 0,2179PMV^2)} \quad (16)$$



Obr. 7 Grafické znázornenie PPD v závislosti na PMV [19].

## 4 TEÓRIA PRÚDENIA

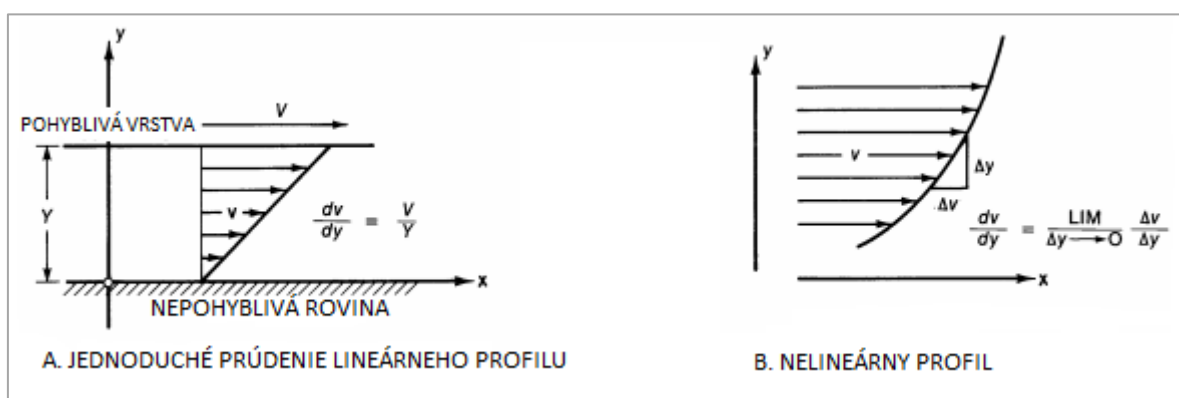
Táto kapitola bola z veľkej časti prebraná z diplomovej práce „Aplikace rychlostní sondy se žhavenými drátky při měření rychlostního pole za automobilovou vyústkou“ [20] so súhlasom autora Ing. Jana Šípa. Zvyšok kapitoly bol doplnený z 2001 Ashrae Handbook: Fundamentals [21].

Prúdením tekutín, t. j. plynov a kvapalín, sa u vykurovania, vetrania, klimatizovania a chladenia uskutočňuje prenos tepla a látky. Tekutiny sa od tuhých látok odlišujú okrem iného ich reakciou na šmykové namáhanie. Zatiaľ čo u pevných látok dôjde k deformácii iba do určitej miery, u tekutín dochádza k nepretržitej deformácii po celú dobu účinkovania šmykového napätia. Pohyb tekutiny môže byť obyčajne popísaný jedným z viacerých zjednodušených modelov. Tým najjednoduchším je model *ideálnej kvapaliny*, pri ktorej sa predpokladá žiadny odpor voči šmykovému namáhaniu. Analýza pomocou ideálnej tekutiny je dobre rozvinutá a pri správnom používaní je vhodné pre široké spektrum aplikácií. Nie vždy je ale možné zanedbať účinok viskózných síl. V takom prípade je možné použiť model tzv. *Newtonskej tekutiny*, pri ktorej je miera deformácie priamo úmerná veľkosti šmykového napätia (napr. voda alebo vzduch). Takáto tekutina sa riadi tzv. *Newtonským zákonom viskozity*, ktorý má tvar:

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy} \quad (17)$$

Kde:

- $\tau$  je šmykové napätie [Pa]
- $\mu$  je absolútna (dynamická) viskozita [Pa·s]
- $\frac{dv}{dy}$  je gradient rýchlosti v smere kolmom na smer pohybu [s]



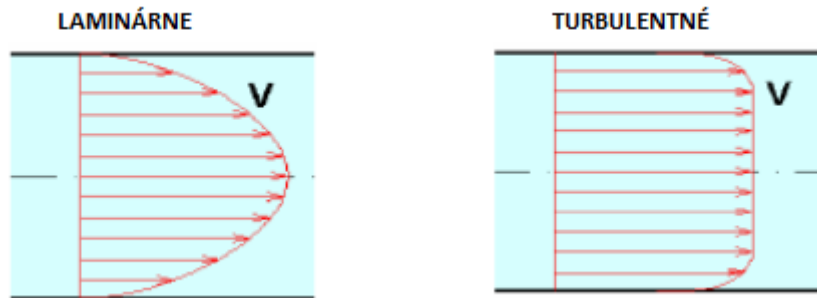
Obr. 8 Rýchlostné profily a gradienty u šmykového toku.

Na matematický popis prúdenia sa v mechanike tekutín používajú zákony zachovania hybnosti, hmoty a energie. Tie sú vo veľkej miere využívané pri numerických simuláciách. Keďže sa nimi ale táto práca nezaobrá, nebudú bližšie popísané.

## 4.1 Rozdelenie prúdení

Prúdenie skutočných tekutín je možné rozdeliť na laminárne, turbulentné a prechodové. Laminárne sa vyznačuje usporiadaným pohybom častíc vo vrstvách pričom nedochádza ku presunu častíc po priereze.

Pri turbulentnom prúdení konajú častice zložený pohyb. Okrem posuvného pohybu konajú častice aj pohyb rotačný, kvôli čomu je turbulentné prúdenie vždy rotačné. Rýchlostné profily jednotlivých typov prúdení je vidno na obr. 9. Rozdiel medzi jednotlivými prúdeniami je evidentný z obr. 10.



Obr. 9 Rýchlostné profily skutočnej tekutiny potrubím [22].

O tom, o aký druh prúdenia sa jedná, je možné rozhodnúť na základe *Reynoldsovho čísla*, t. j. bezrozmerného podobnostného čísla, ktoré je dané pomerom medzi zotrvačnými a trecími silami. *Reynoldsovo číslo* je dané vzťahom:

$$Re = \frac{ud}{\nu} \quad (18)$$

Kde:

- Re** je Reynoldsovo číslo [-]
- u** je rýchlosť prúdenia tekutiny [m/s]
- d** je charakteristický rozmer [m]
- $\nu$**  je kinematická viskozita [m<sup>2</sup>·s<sup>-1</sup>]

Tak, ako to je často v prírode, napr. pri pohybe oblakov či prúdení vody, tak aj pri väčšine inžinierskych aplikácií sa stretávame s turbulentným prúdením. V kontexte tejto práce je výskum turbulencie dôležitý, pretože turbulencia výrazne ovplyvňuje súčiniteľ prenosu tepla  $\alpha$  a tým prenos tepla z povrchu tela, čo ovplyvňuje výsledný tepelný pocit. Je možné ju kvantitatívne charakterizovať pomocou *intenzity turbulencie* (viď kapitola 3.3.4). Samotnú turbulenciu je možné definovať buď zjednodušenou formou ako nepravidelné prúdenie v čase a priestore, pričom sa turbulentné prúdenie riadi teóriou deterministického chaosu<sup>1</sup>. Presnejšou formou definície oproti tej zjednodušenej je výpis vlastností, ktoré sú pre turbulentné prúdenie charakteristické:

<sup>1</sup> Deterministický chaos – ide o proces samoorganizácie zložitých systémov, kde vznikajú systavy koherentných štruktúr, ktoré sa riadia a podľa prírodných zákonov. Z pohľadu jednej určitej štruktúry má vývoj systému prvky náhodnosti, z hľadiska celku ide však o vývoj deterministický, t. j. zákonitý.

- *Náhodnosť* – malé poruchy vznikajúce náhodne majú zosilňujúci charakter a tým sa stáva predpoveď systému nemožnou.
- *Difuzivita* – turbulentné prúdenie sa vyznačuje vysokou difuzivitou systému, čo je v praxi veľmi dôležitou vlastnosťou. Zvýšená difuzivita systému je daná turbulentným transportom.
- *Vírivosť* – turbulentné prúdenie je charakteristické vysokými lokálnymi hodnotami vírivosti. Pole vírivosti je nehomogénne a nestacionárne.
- *Spektrum merítok* – vírové štruktúry, náhodne vznikajúce v turbulentnom prúdovom poli sú charakterizované širokou škálou dĺžkových merítok. Veľkosť týchto štruktúr je zhora obmedzená rozmermi šmykových štruktúr, v ktorých sa vírové štruktúry vytvorili. Zdola je veľkosť vírových štruktúr obmedzená veľkosťou disipatívnych vírov, ktorých rozmery sú dané viskozitou tekutiny.
- *Priestorovosť* – vírové štruktúry sa vyskytujú v priestore v náhodných miestach s náhodnou orientáciou.
- *Disipatívnosť* – kinetická energia tekutiny je na úrovni najmenších vírov premieňaná na teplo, táto premena je dôkazom ďalšej dôležitej vlastnosti turbulencie, konkrétne nenávratnosti.
- *Nelinearita* – turbulentné prúdenie je nelineárne. Vznik turbulencie je dôsledkom uplatnenia nelinearít.



Obr. 10 Stúpajúci dym zo sviečky – prechod laminárneho prúdenia do turbulencie.



## 4.2 Prúdenie z výustky

Ak prúdi vzduch z výustky do voľného priestoru, hovoríme o voľnom prúde. V prípade prúdenia vzduchu z výustky do nejakého obstavaného priestoru hovoríme o prúde *poloohraničenom*, prípade *ohraničenom*, v závislosti na miere obstavania. Ak má vzduch prúdiaci z výustky rovnaké fyzikálne vlastnosti ako ten v priestore, do ktorého prúd vteká, a súčasne, ak je toto prostredie pokojné, jedná sa o prúd zatopený. Ak má teplota privádzaného vzduchu rovnakú hodnotu ako tá okolitého, hovoríme o *izotermnom* prúde.

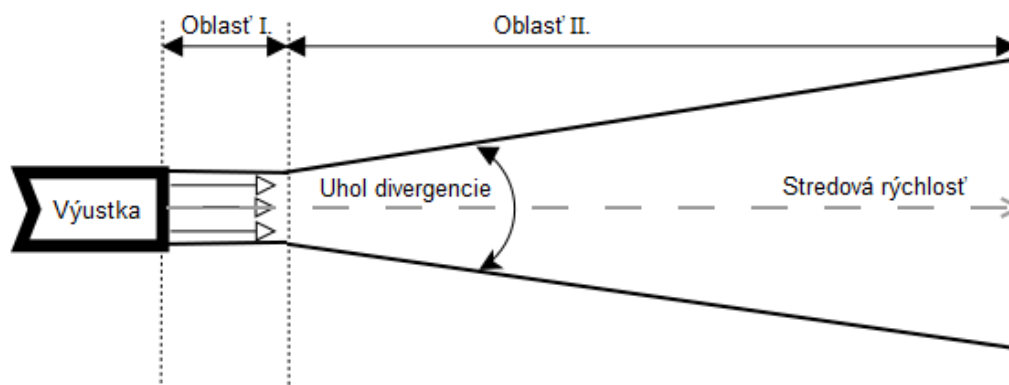
Tvary izotermného prúdu v krátkej vzdialenosti za čelom výustky sú veľmi podobné, či už ide o výustky okrúhle, obdĺžnikové, mriežkové či perforovaný panel. Prúd privedený okrúhly výustkou tvorí expandujúci kužeľ; prúd z obdĺžnikovej výustky prudko prechádza z obdĺžnikového do v priereze eliptického a následne do kruhového tvaru, pričom vzdialenosť na akej sa prúd takto vyvinie je daná pomerom strán spomínaného obdĺžnika. Dokonca aj pri širokouhlých mriežkových a prstencových výustkách tieto podobnosti umožňujú rovnakú výkonnostnú analýzu.

Uhol divergencie (rozbiehavosti) prúdu (viď obr. 11) sa pri výtoku do veľkého otvoreného priestoru pohybuje v rozmedzí 20-24°. Pri blízko umiestnených výustkách klesá hodnota v priemere na 18° a pri výtoku do relatívne malého priestoru dochádza ešte k výraznejšiemu poklesu. V prípadoch, kde je plocha výstupného prierezu prúdu malá v porovnaní s veľkosťou priestoru v normálovom smere prúdu, je možné považovať prúd za voľný, pokiaľ platí, že:

$$X = 1,5\sqrt{A_R} \quad (19)$$

Kde:

$X$  je vzdialenosť medzi bodom v priestore a čelom výustky [m]  
 $A_R$  je plocha prierezu ohraničeného priestoru v normálovom smere voči prúdu [m<sup>2</sup>]



Obr. 11 Charakteristika prúdu vzduchu; uhol divergencie [23].

Ako už bolo načrtnuté, s rastúcou vzdialenosťou od výustky dochádza ku kužeľovitému rozširovaniu prúdu a k postupnému zväčšovaniu objemu tohto prúdu. S rastúcou vzdialenosťou taktiež klesá rýchlosť prúdenia, pričom ak je prúd zatopený, šíri sa priamočiara v smere danom osou výustky. Celková dĺžka prúdu vzduchu v zmysle maxima alebo stredovej rýchlosti vzduchu a v zmysle teplotných rozdielov v rámci prierezu sa delí na štyri oblasti:

- **Oblasť 1:** alebo tiež jadro prúdu, je úsekom o dĺžke asi štvornásobku priemeru alebo šírky výstupného prierezu výustky, v ktorom rýchlosť prúdenia zostáva prakticky nemenná.
- **Oblasť 2:** prechodová oblasť, ktorej dĺžka závisí na type výustky, pomere strán výstupného prierezu, počiatocnej turbulencii prúdu vzduchu atď.
- **Oblasť 3:** oblasť plne vyvinutého turbulentného prúdenia, vo vzdialenosti 25-100 násobku priemeru/šírky strany výstupného prierezu.
- **Oblasť 4:** v nej dochádza k absolútnej degradácii prúdu, pričom rýchlosť prúdu rapídne klesá. Vzdialenosť tejto zóny závisí na vlastnostiach okolitého vzduchu. Na úseku dlhom niekoľko priemerov klesá rýchlosť prúdenia pod 0,25 m/s.

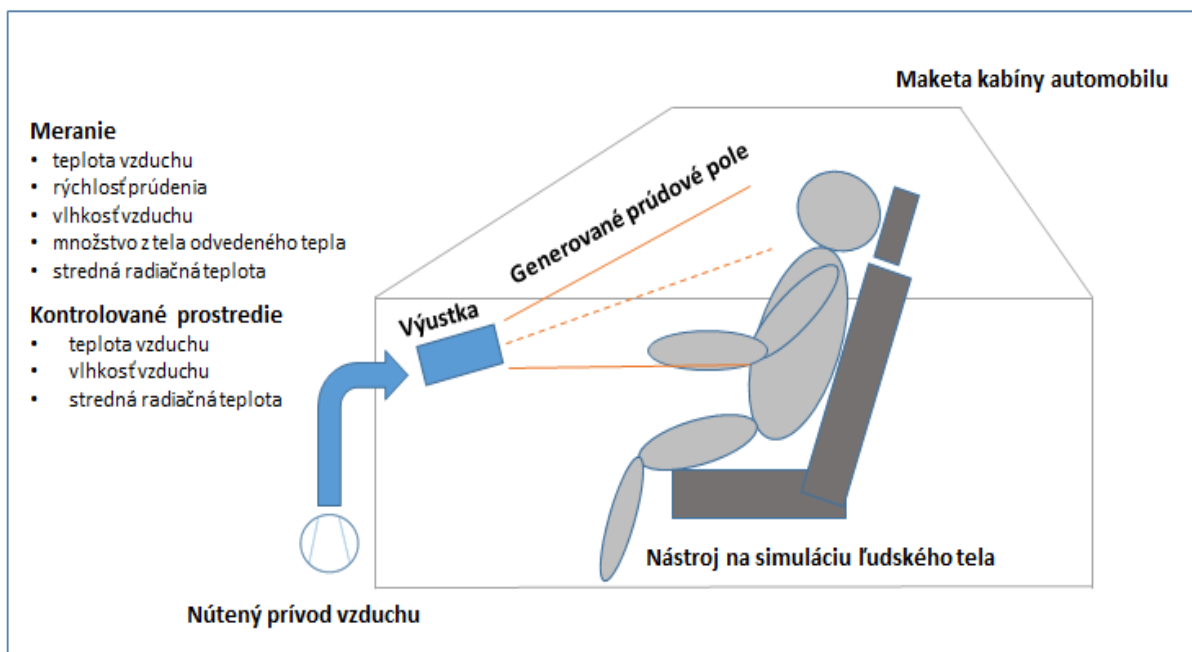
Najkľúčovejšou z hľadiska inžinierskych aplikácií je oblasť 3, pretože práve v tej oblasti prúdu sa osoby najčastejšie nachádzajú.

## 5 DEFINÍCIA HYPOTÉZY A NÁVRH METODIKY

Obsahom tejto kapitoly je formulácia hlavnej pracovnej hypotézy a postupný popis jednotlivých úkonov potrebných na jej potvrdenie alebo vyvrátenie spolu s konkrétnym návrhom experimentu. Pre pripomenutie, hlavným cieľom diplomovej práce je porovnať vplyv prúdenia z niekoľkých konštrukčne odlišných výustiek (viď obr. 13) na intenzitu prenosu tepla konvekciou z ľudského tela. Distribučné výustky, ktorými sa práca zaoberá, sú súčasťou HVAC systému osobného automobilu. Jeho úlohou je okrem zabezpečenia priehľadnosti okenných skiel (odhmlievajúcim) taktiež výmena vzduchu za súčasnej úpravy jeho parametrov s cieľom dosiahnuť tepelný komfort pasažierov. Na ten má okrem iného vplyv aj výsledný efekt prúdiaceho vzduchu, ktorý zvyšuje kovektivnú zložku prenosu tepla a tým aj celkový ochladzovací/ohrievací efekt. Otázkou je, či a do akej miery sa líšia prúdové polia vytvorené prechodom prúdu cez rôzne výustky a zároveň aký vplyv majú tieto potenciálne rozdiely na prenos tepla konvekciou z povrchu ľudského tela. Túto otázku vo forme pracovnej hypotézy je možné formulovať nasledovne:

**Rozdiely v konštrukcii výustky ovplyvňujú generované prúdové pole natoľko, že sa to prejavuje na výslednej intenzite prenosu tepla z ľudského tela.**

Aby bolo možné vyššie definovanú hypotézu overiť či vyvrátiť, je potrebné definovať experiment, ktorý umožní stanovenie prenosu tepla konvekciou z povrchu ľudského tela, v prípade, že je vystavené prúdeniu z konštrukčne rôznych výustiek pre distribúciu vzduchu do kabíny. Základné ideové usporiadanie experimentu a požiadavky na riadenie a meranie sú uvedené na obr. 12.



Obr. 12 Základný ideový návrh experimentu pre potvrdenie/vyvrátenie pracovnej hypotézy.



Obr. 13 Testované výustky určené pre automobily značiek: BMW (vľavo hore), Dacia (vpravo hore), Mercedes (vpravo dole) a Porsche (vľavo dole).

#### **Podmienky a parametre experimentu:**

Na základe poznatkov o prenose tepla z povrchu ľudského tela uvedených v teoretickej časti práce sú parametrami, ktoré je treba pri experimente riadiť a merať, tieto:

- *teplota vzduchu*
- *stredná radiačná teplota okolia*
- *prietok vzduchu výustkou*
- *rýchlosť prúdenia*
- *prenos tepla z povrchu ľudského tela*
- *povrchové teploty tela*
- *vizualizácia prúdenia (nit'ové sondy, dym)*

#### **Nástroje potrebné pre uskutočnenie experimentu:**

Nasledujúci zoznam obsahuje všeobecný popis zariadení, ktoré umožnia meranie a riadenie spomínaných parametrov počas experimentu. Bližší popis konkrétnych zariadení je uvedený v samostatných podkapitolách.

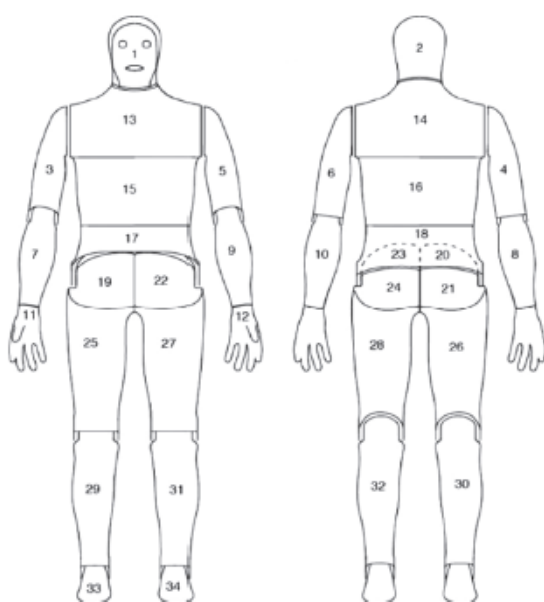
- *zariadenie na meranie odvodu tepla z ľudského tela*
- *zariadenie pre vytvorenie stabilného prostredia pre uskutočnenie experimentu*
- *meraciu trať pre dodávku vzduchu do výustiek*
- *senzory a zariadenia pre meranie teploty vzduchu, rýchlosti prúdenia, prietoku vzduchu a strednej radiačnej teploty*
- *zariadenie na meranie/vizualizáciu povrchových teplôt simulovaného ľudského tela*

## 5.1 Meranie odvodu tepla z ľudského tela

Vhodným nástrojom na meranie a hodnotenie tepelných strát ľudského tela je tzv. tepelný manekýn, pričom OTTP FSI VUT v Brně disponuje konkrétnym modelom Newton. Tepelný manekýn má tvar priemerného ľudského tela a simuluje jeho tepelné správanie sa. Jeho povrch je rozdelený na nezávisle vyhrievané zóny (tvár, hlava, hrudník, brucho atď.), u ktorých je možné zisťovať intenzitu prenosu tepla do okolia vo forme veľkosti generovaného tepelného toku, alebo poklesu povrchovej teploty. Z hodnôt tepelného toku je následne možné dopočítavať hodnoty súčiniteľov prestupu tepla. Je taktiež schopný simulovať dýchanie. Táto funkcia však vzhľadom k neopodstatnenosti nebude v pri práci použitá. Vďaka zisteniam Ing. Miloša Fojtlína Ph.D. možno tvrdiť, že spomínanú intenzitu prenosu tepla je možné určovať pomocou manekýna opakovane a s danou neistotou [24].

*Technické parametre tepelného manekýna [24, 25]:*

- Meranie v rozsahu okolitých teplôt  $-20$  až  $+50^{\circ}\text{C}$
- Presnosť  $\pm 1\%$  z hodnoty pre tep. tok,  $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$  pre teplotu povrchu zóny a teplotu okolia
- 34 nezávisle regulovateľných zón
- 34 nezávisle merateľných zón (povrchová teplota, tepelný tok)
- 2x senzor teploty vzduchu
- 1x senzor relatívnej vlhkosti
- 1x senzor pre meranie rýchlosti vzduchu
- Dýchací mechanizmus
- Filtračné zariadenie pre monitoring vdychovaných častíc



Obr. 14 Tepelný manekýn a rozdelenie jeho povrchu na 34 segmentov [24,25].

## 5.2 Vytvorenie stabilného prostredia kabíny automobilu

Ako už bolo v teoretickej časti práce popísané, prenos tepla z ľudského tela sa uskutočňuje viacerými mechanizmami. Vzhľadom na to, že manekýn Newton neumožňuje simulovanie potenia, prenos tepla do okolia sa u neho uskutočňuje výlučne kovekciou, radiáciou a vedením.

Keďže je ale predmetom záujmu konvektívna zložka prenosu tepla, je potrebné ostatné nejakým spôsobom buď eliminovať, alebo zabezpečiť aby bola ich veľkosť naprieč všetkými meraniami konštantná s určitou minimálnou odchýlkou. Jedine tak je možné považovať nárast tepelného toku/ pokles povrchovej teploty za účinok zväčšenia konvektívnej zložky. Ako bolo už v teoretickej časti práce vysvetlené (viď kapitola 3.3.1), tepelný odpor u vedenia je v prípade tekutín podstatne vyšší ako u pevných látok. Vzhľadom na to, že predmetom záujmu je najmä prenos tepla z tých častí ľudského tela, na ktoré dopadá prúd vzduchu a teda nie sú v kontakte so sedačkou alebo iným pevným telesom, možno predpokladať, že vedenie samotné bude mať na výslednom tepelnom toku len zanedbateľný podiel [26]. Naopak podiel radiačnej zložky prenosu tepla zanedbateľný nebude. Preto by bolo vhodné zabezpečiť stabilné podmienky okolitého prostredia, v ktorom bude jej veľkosť konštantná, na základe čoho bude možné pripísať zmenu v intenzite ochladzovania výlučne nárastu konvektívnej zložky. Ideálnym nástrojom na vytvorenie takéhoto stabilného prostredia je klimatická komora (ďalej len klimakomora), ktorou OTTP FSI VUT v Brně disponuje (viď obr. 15).



Obr. 15 Klimakomora na FSI VUT v Brně [27].

Klimakomora je miestnosť umožňujúca komplexnú simuláciu okolitého prostredia s prípadným solárnym žiarením. Je schopná riadiť tak teplotu, ako aj vlhkosť vzduchu čím je schopná napodobniť vonkajšie atmosférické vplyvy.



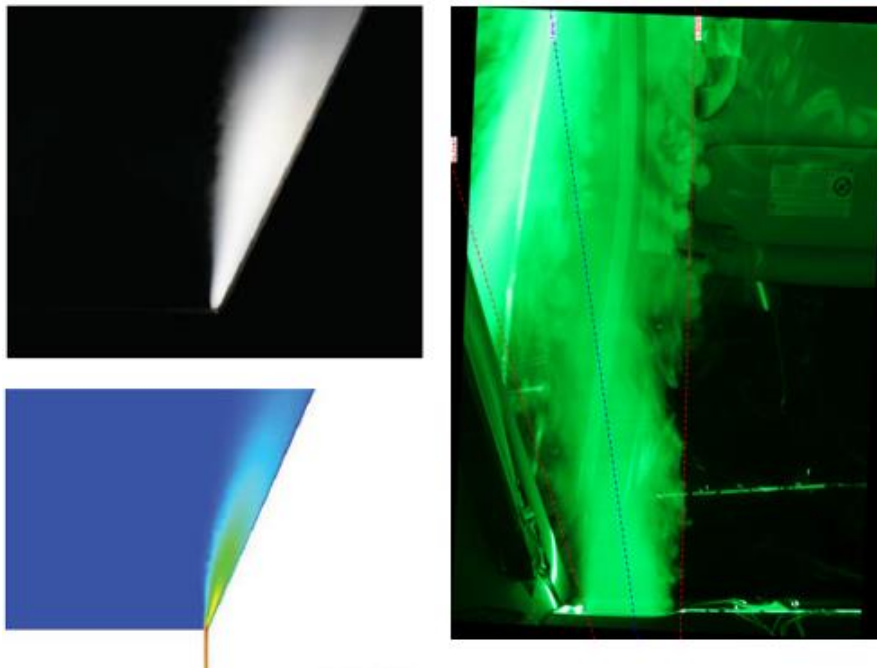
*Technické parametre :*

- *Teplotný rozsah ( bez solárnej simulácie): -40 až +85°C*
- *Vlhkostný rozsah (bez solárnej simulácie): 30 až 95% RH*
- *Stabilita udržovania vlhkosti: +- 5% RH*
- *Rozmery 5 x 8,85 x 3,8 m*

### 5.3 Zostavenie meracej trate

Úlohou meracej trate je vytvoriť podmienky podobné tým, v ktorých sa ľudské telo v kabíne automobilu po zapnutí vetrania s nasmerovaním výustiek na jeho povrch nachádza.

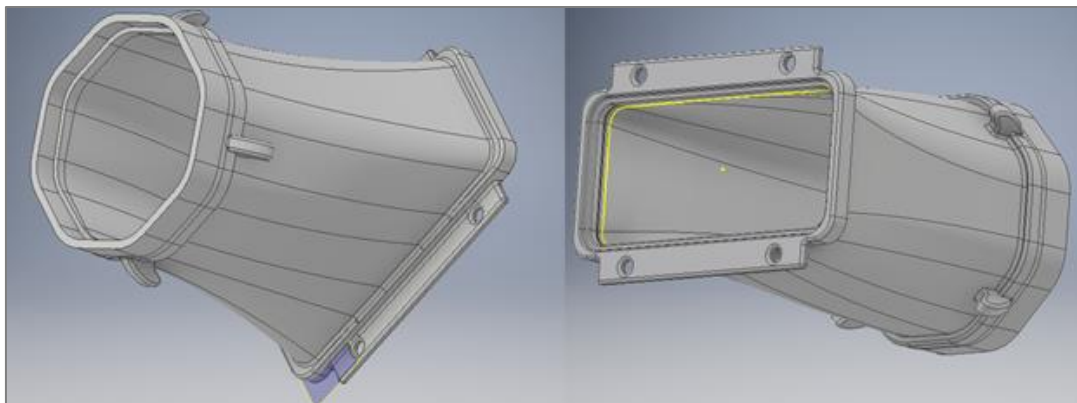
V prvom rade je teda potrebné disponovať akousi obálkou v tvare kabíny automobilu. Prúdové pole sa pri prúdení do voľného priestoru v porovnaní s prúdením do kabíny automobilu môže líšiť v dôsledku či už tvaru vzduchovodov [28], charakteru prúdu (viď kapitola 4.2 uhol divergencie vo voľnom a uzavretom priestore pre izotermný prúd), alebo tzv. *Coandovho efektu*. Ten nastáva, ak prúd vzduchu opúšťajúci výustku prúdi v blízkosti nejakého rovnobežného pevného povrchu. Miera expanzie prúdu vzduchu smerom ku danému povrchu sa znižuje a na okrajoch strhávaný vzduch musí byť získavaný recirkuláciou z prúdu z výustky namiesto vzduchu z okolia. Obmedzenie strhávania okolitého vzduchu spôsobené prítomnosťou pevného povrchu indukuje spomínaný Coandov efekt, pri ktorom prúd k povrchu prilne [21]. Názorný príklad spomínaného efektu možno vidieť na obr. 16. Červenou prerušovanou čiarou sú na pravom obrázku znázornené okraje prúdu a modrou je znázornené jeho jadro. Vzhľadom na to, že výustka bola nasmerovaná v tomto prípade rovno, je tu jasne pozorovateľný odklon prúdu smerom k oknu.



Obr. 16 Odklon prúdu v dôsledku Coandovho efektu ako výsledok CFD simulácie (vľavo dole) spolu s jej experimentálnym overením (vľavo hore) [29] a v kabíne automobilu (vpravo), kde je vizualizované prilnutie prúdu k oknu spolujazdca.

Ďalším nevyhnutným prvkom meracej trate je systém na prívod vzduchu s možnosťou regulácie jeho množstva a s možnosťou pripojenia všetkých troch výustiek. Na generovanie prúdu vzduchu a jeho prívod bola použitá dvojfázová HVAC jednotka Valeo 2 a ventilátor od firmy EBM papst typ Radical 133 v kombinácii so vzduchovodmi, samotnými výustkami a tzv. prechodkou (prechodným dielom). Pre umožnenie napojenia jednotlivých výustiek na distribučný vzduchovod bolo totiž nutné vyrobiť diel, ktorý zabezpečí spojenie a plynulý prechod medzi odlišnými výstupnými prierezmi spomínaného vzduchovodu a prípojného konca výustky. Vzhľadom na to, že tri spomínané prechodky sú predmetom tejto a ďalších 2 diplomových prác (*Porovnaní hlučnosti stranových výustiek odlišných konštrukcií*, Ing. Jan Bernard; *Větrací systém automobilu – Porovnaní vlivu okrajových podmínek na proudění z různých typů*, Bc. Radim Brdečko), súčasťou každej z prác je výroba iba jednej z prechodiek, v prípade tejto práce bola vytvorená prechodka pre výustku Mercedes.

Prechodka bola najskôr vytvorená ako 3D model pomocou softvéru Autodesk Inventor. Vzďialenosť medzi rovinou napojenia na vzduchovod a rovinou, v ktorej prúd vzduchu opúšťa výustku bola stanovená na 15 cm pre všetky tri prechodky.



Obr. 17 3D model prechodky pre výustku značky Mercedes.

Takto vytvorený model bol následne po miernych úpravách vytlačený na 3D tlačiarňami z materiálu ABS s využitím metódy fusion deposition modeling. Vnútna stena výustky bola následne opracovaná brusným papierom so zrnitosťou 220, následne bola nanosená vrstva plniaceho spreju, ktorá bola upravená brusným papierom so zrnitosťou 400. Na záver bola na vnútornú stenu nanosená vrstva čierneho spreja. Konečná drsnosť povrchu bola odhadnutá na hodnotu cca  $R_a = 0,7 \mu\text{m}$ .





Obr. 18 Prechodka pred úpravou vnútorných plôch.

Meracia trať bola zostavená z **cabin simulátoru** (ďalej len CabSim) pozostávajúceho z **makety kabíny** automobilu so zabudovanými **sedáčkami** z automobilu strednej kategórie, **vzduchovodmi**, **prechodkami** a **HVAC jednotkou / radiálnym ventilátorom** na prívod vzduchu. Pri konštruovaní CabSim-u sa vychádzalo z rozmerov kabíny automobilu Volkswagen Caravelle. Rám makety bol zostavený z hliníkových AluTec profilov, steny spolu s výplňami dverí a stropu z penených PVC dosiek, okolo ktorých je umiestnené gumové tesnenie tak, aby nedochádzalo k nežiaducemu úniku vzduchu netesnosťami. Transparentné plochy kabíny sú v makete vytvorené z plexiskla, pretože má pre viditeľné svetlo podobné vlastnosti ako skutočné sklá a je dostatočne odolné a vhodne spracovateľné pri výrobe simulátoru. Podlaha a strop boli vytvorené z vodeodolnej preglejky a hliníkových profilov, na ktorých sú v prípade podlahy umiestnené sedačky. Pre vzduchovody bol použitý bežný vzduchotechnický a inštalatérsky materiál – obdĺžnikové kanály, kruhové trubky, prechodky atď.



Obr. 19 Maketa kabíny automobilu fotená v dobe príprav (strop, prírodné kanály atď. boli neskôr doplnené a výustka bola umiestnená na stred, vid' fotky rozloženia experimentu ďalej v práci).

## 5.4 Meranie fyzikálnych veličín

Ako už bolo v podmienkach a parametroch uvedené, existuje celá rada fyzikálnych veličín, ktoré je potrebné merať za účelom kontroly stability prostredia.

Na meranie časti z nich by postačovali aj senzory, ktoré sú súčasťou výbavy tepelného manekýna (viď kapitola 5.1). Na zmeranie posledných dvoch sú však potrebné ďalšie zariadenia. Pre meranie tak strednej radiačnej teploty, ako aj ostatných fyzikálnych veličín, je vhodný prístroj na meranie klímy Testo 480.

*Merané veličiny a indexy [30]:*

- *rýchlosť prúdenia*
- *teplota vzduchu*
- *vlhkosť vzduchu*
- *atmosférický tlak*
- *stupeň turbulencie*
- *množstvo CO<sub>2</sub>*
- *intenzita osvetlenia*
- *PMV a PPD*

Povrchovú teplotu tela manekýna je schopný merať aj manekýn samotný. Vždy sa ale jedná o jej priemernú hodnotu pre celý segment (napr. predná polovica pravého predlaktia), čo nemusí poskytovať dostatočne podrobný obraz. Pre potreby detailnejšieho rozdelenia povrchu je vďaka svojej schopnosti snímať povrchovú teplotu aj na úrovni jemnejšieho detailu vhodná termokamera Flir i7, ktorou OTTP VUT FSI v Brně disponuje.

*Technické parametre [32]:*

- *rozlíšenie senzoru 140 x 140 pixelov*
- *teplotná citlivosť < 0,1°C*
- *teplotný rozsah -20 až +250°C*
- *zorné pole 29° x 29°*
- *presnosť ±2%*



Obr. 20 Testo 480 [31].



Obr. 21 Flir i7 [33].

## 6 POPIS EXPERIMENTU

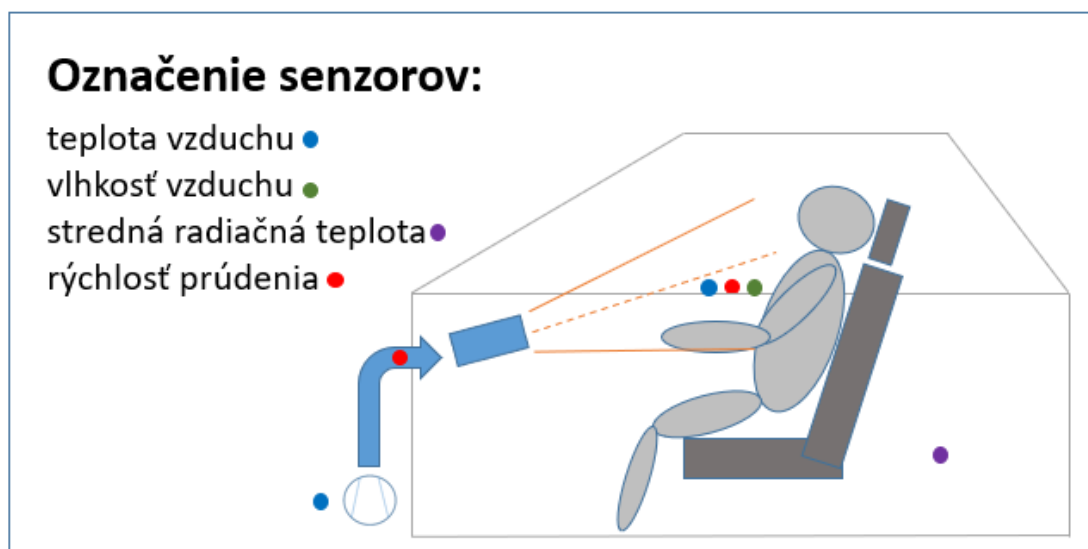
Na uskutočnenie experimentu boli zvolené dve metódy, resp. dve rôzne nastavenia manekýna tak, aby boli na konci k dispozícii výsledky získané rôznymi prístupmi pre vzájomné porovnanie a tým pre získanie vyššej výpovednej hodnoty merania. Dvomi rôznymi prístupmi sú myslené nastavenia na konštantnú teplotu a na konštantný tepelný tok, ktoré budú bližšie popísané. Časť postupu experimentu je ale totožná pre obe nastavenia, preto bude popísaná ako prvá.

### 6.1 Vytvorenie kontrolovaného prostredia a rozmiestnenie aparatúry

Ako bolo už v predošlej kapitole spomenuté, vytvorenie stabilného okolitého prostredia je krokom smerom k fixácii okrajových podmienok experimentu. Na jeho vytvorenie bude využitá klimakomora, ktorej úlohou bude zabezpečiť najmä:

- stabilnú teplotu vzduchu, ktorej bola v tomto prípade podľa odporúčaní zvolená hodnota **24°C** [34]
- konštantnú strednú radiačnú teplotu na úrovni blízkej teplote vzduchu

Ďalej bude do stredu klimakomory umiestnený CabSim spolu s manekýnom na sedačke spolujazdca, keďže sa jedná o pravé výustky, a to vo vzdialenosti **800 mm** od palubnej dosky. Táto hodnota bola stanovená po nameraní vzájomnej vzdialenosti spolujazdca a palubovej dosky v reálnom automobile. Ďalšie zo zariadení budú umiestnené nasledovne: jeden anemometer na úrovni hrudníka pred manekýnom, druhý v prívodnom potrubí (za dostatočne dlhým rovným úsekom potrebným pre ustálenie prúdenia), jeden senzor na meranie teploty spolu so senzorom na meranie vlhkosti v blízkosti anemometra, druhý pred nasávaním ventilátora, a Testo 480 merajúce strednú radiačnú teplotu tak, aby bolo v zákryte voči manekýnovi (viď obr. 22).



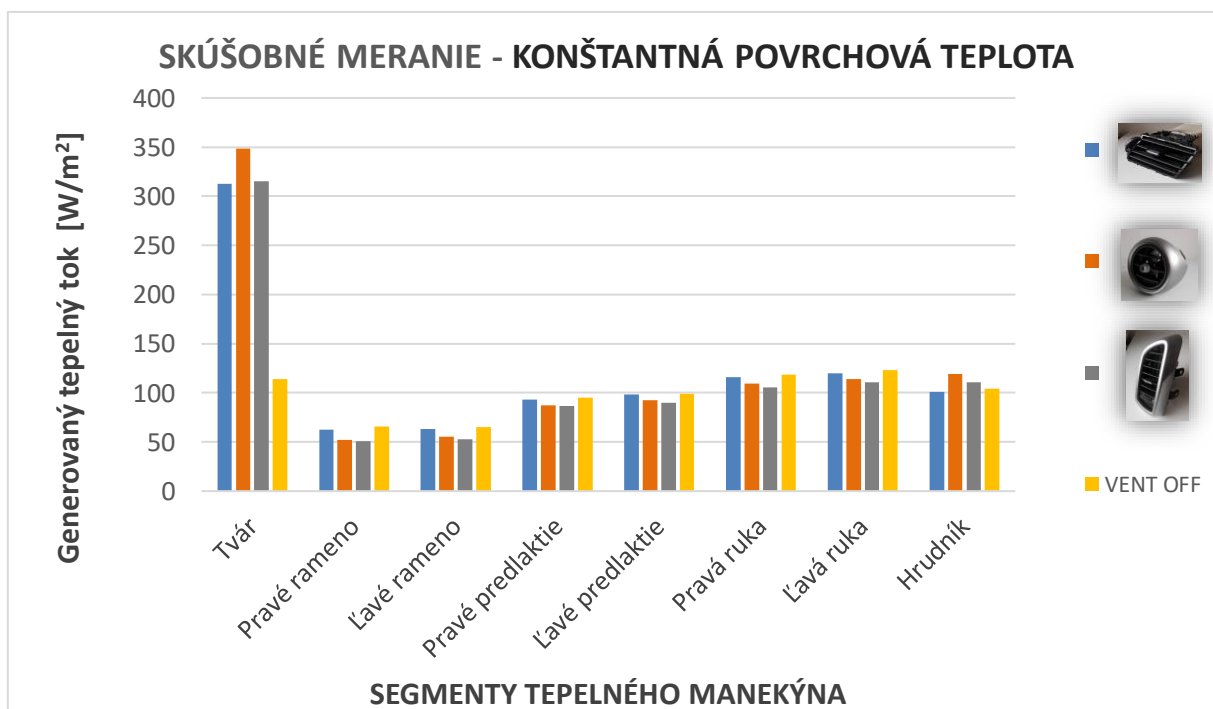
Obr. 22 Nákres umiestnenia meracích senzorov.

## 6.2 Nastavenie na konštantnú teplotu povrchu

Po rozostavení aparátúry v klimacomore vrátane manekýna a ich zapnutí je najskôr potrebné počkať dostatočne dlhú dobu potrebnú na vytvorenie stabilného prostredia klimakomory, nahriatie manekýna a celkové ustálenie stavu (2 hodiny pre ustálenie klimakomory a manekýna, 20-30 minút na ustálenie tepelných tokov po zapnutí ventilátora). Po ustálení bude možné prísť k samotnému meraniu prenosu tepla z tela a to pomocou 48-tich meraní, ktoré vzniknú kombináciou nasledujúcich parametrov:

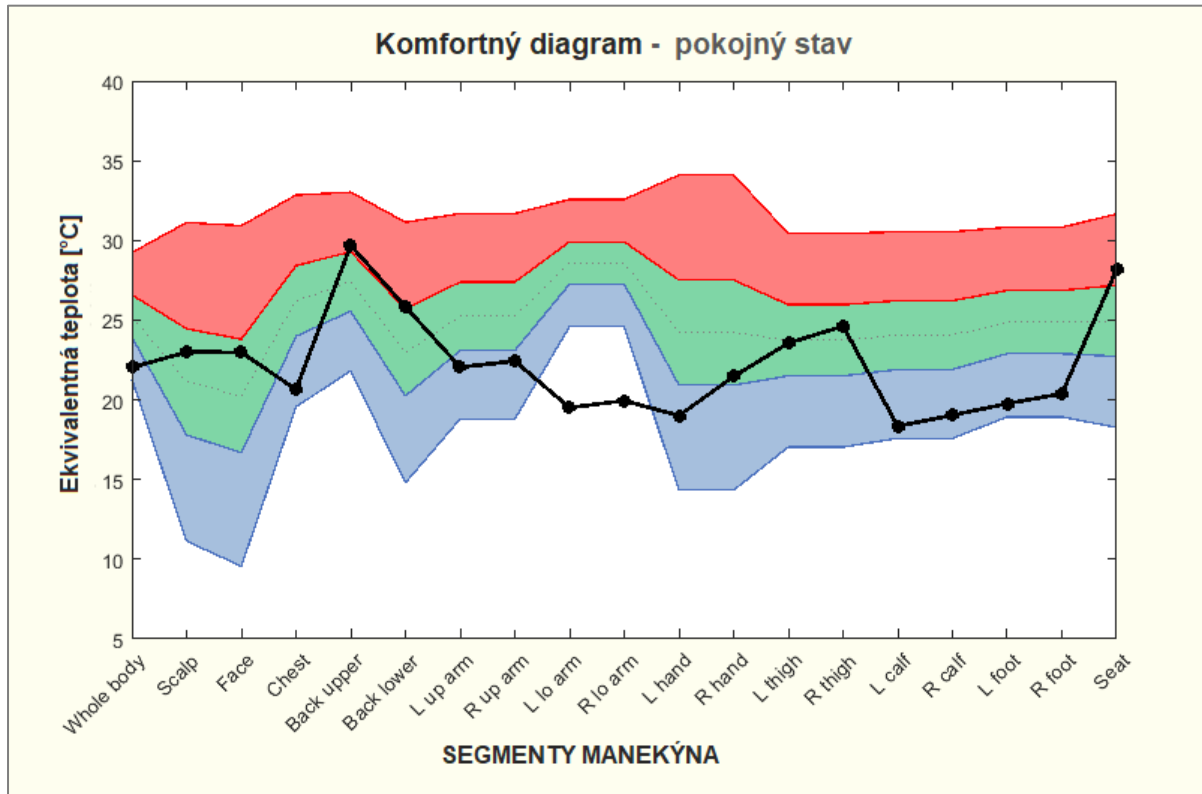
- **2 rôzne smerovania prúdu** (na hlavu, na hrudník)
- **4 rôzne výustky** (Mercedes, BMW, Porsche, Dacia)
- **2 rôzne prietoky** (bežný prevádzkový stav a intenzívna konvekcia)
- **3 opakovania merania**

Pri nastavení na konštantnú povrchovú teplotu (34°C vychádza sa z priemernej hodnoty povrchu človeka pri pokojnom sedení [35]) kompenzuje tepelný manekýn nárast/pokles do okolia uvoľňovaného tepla zo svojho povrchu tým, že zvyšuje alebo znižuje množstvo generovaného Joulovho tepla v jednotlivých odporových elementoch segmentov manekýna a to pomocou modulácie prechádzajúceho elektrického prúdu. Hlavným výstupom z meraní budú teda hodnoty tepelných tokov z jednotlivých segmentov, ktorých vzájomným porovnaním bude možné kvantitatívne zhodnotiť ich nárast spôsobený zvýšením konvektívnej zložky prenosu tepla (viď obr. 23).



Obr. 23 Príklad hodnôt generovaného tepelného toku pre niektoré zo segmentov manekýna získané počas skúšobného merania.

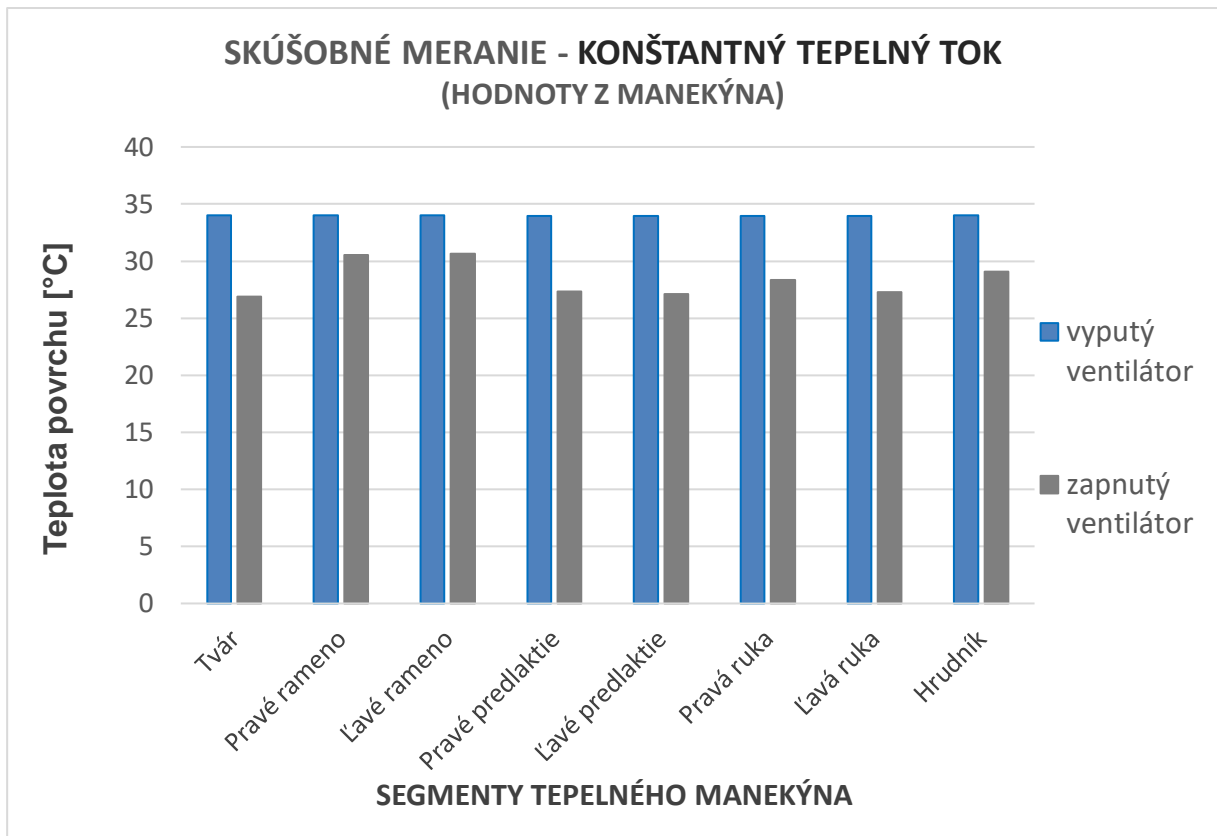
Ďalším spracovaním hodnôt tepelného toku, povrchovej teploty a tepelného odporu oblečenia bude možné vyčísl'ovať ekvivalentnú teplotu pre jednotlivé segmenty (viď rovnica 14) a z nej následne hodnoty MTV. Tie budú v čase vykresľované v diagrame komfortných zón (viď kapitola 3.5) pre jednotlivé výustky a prevádzkové stavy (viď príklad komfortného diagramu na obr. 24).



Obr.24 Komfortný diagram vyhodnotený počas pokojného stavu, t. j. po ustálení manekýna a pred zapnutím ventilátora.

### 6.3 Nastavenie na konštantný tepelný tok

Pri tomto nastavení udržiava tepelný manekýn hodnotu generovaného tepelného toku na konštantnej hodnote, ktorá je po ustálení v rovnováhe s hodnotou tepelného toku, ktorý sa zo segmentu uvoľňuje. K vyrovnaní tepelných tokov dochádza v dôsledku zmeny povrchovej teploty daného segmentu, ktorej hodnota reflektuje intenzitu prenosu tepla medzi povrchom a okolím (viď obr. 25). Priemerné hodnoty povrchovej teploty síce je možné odčítať aj pomocou samotného manekýna, avšak tie reprezentujú len spriemerované hodnoty cez celý segment, hoci detailne lokálne rozloženie teplôt sa môže líšiť. Z toho dôvodu bude za účelom získania detailnejšieho pohľadu použitá aj termokamera Flir i7 (viď kapitola 5.4) a software Flir QuickReport, v ktorom je možné zo snímkov odčítavať povrchové teploty jednotlivých bodov, prípadne dopočítavať priemerné teploty pre užívateľom zadanú oblasť (napr. časť segmentu).



Obr. 25 Priemerné povrchové teploty vybraných segmentov tela manekýna pred a po zapnutí ventilátora získané počas skúšobného merania.



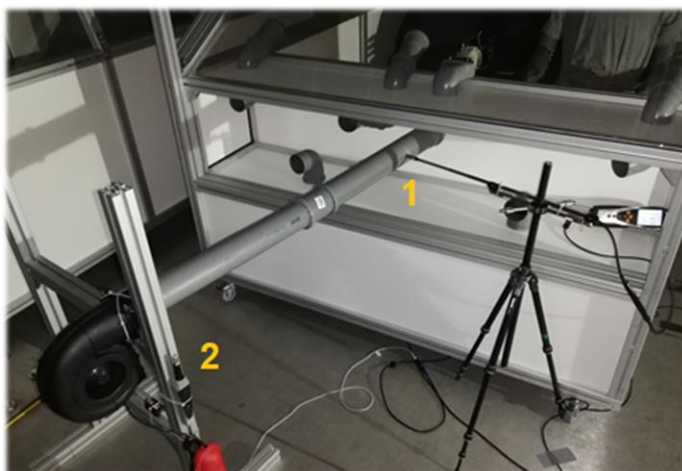
## 7 USKUTOČNENIE EXPERIMENTU A ZÍSKANÉ VÝSLEDKY

Pri uskutočňovaní samotného experimentu bol nasledovaný jeho ideový návrh (viď obr. 12). Do priestoru klimakomory bol umiestnený CabSim, manekýn Newton so všetkými senzormi, radiálny ventilátor od firmy EBM papst Typ RadiCal 133, HVAC jednotka Valeo 2, Testo 480 a termokamera Flir i7 (viď obr. 26, 27). Zariadenia boli v klimakomore rozmiestnené v súlade s ideovým návrhom (viď obr. 22). Avšak, kvôli technickým komplikáciám bolo nutné pri realizácii experimentu pristúpiť k dvom zmenám v porovnaní s jeho návrhom.



Obr. 26 Rozloženie experimentu: 1- Testo 480, 2- senzor teploty vzduchu, 3- anemometer, senzor vlhkosti a senzor teploty vzduchu.

Prvou zásadnou zmenou oproti ideovému návrhu je umiestnenie manekýna na stranu vodiča na rozdiel od plánovaného umiestnenia na stranu spolujazdca. K tejto



Obr. 27 Rozloženie experimentu: 1 – umiestnenie anemometra v potrubí, 2 – umiestnenie senzoru teploty vzduchu nasávaného do ventilátora.

zmene došlo z toho dôvodu, že pri snímkovaní povrchu manekýna pomocou termokamery je nutné od neho dodržať dostatočný odstup tak, aby bolo možné kamerou zaznamenávať požadovanú časť jeho povrchu. Umiestnenie na sedačku spolujazdca by znemožnilo snímokovanie z pravej strany a snímokovanie cez plexisklo je v dôsledku jeho takmer nulovej diatermitivity (preteplivosti) nemožné.

Ďalšou zásadnou zmenou v porovnaní s návrhom experimentu bola čiastočná absencia možnosti vytvoriť kontrolované prostredie. Kvôli poruche chladiaceho systému, ku ktorej došlo začiatkom koronakrízy a ktorú nebolo možné včas opraviť, bolo počas takmer celého experimentu nemožné regulovať teplotu vzduchu v klimacomore. Z toho dôvodu nemohli byť merania uskutočňované pri normou doporučenej stálej teplote 24°C. Skutočná teplota sa pohybovala naprieč všetkými meraniami približne v intervale od 21,1°C do 22,3°C pričom v priebehu jedného meracieho dňa narástla v dôsledku prítomnosti manekýna a obsluhy o približne 0,5 až 1°C. Podobné rozmedzie zmien bolo možné sledovať aj v hodnote strednej radiačnej teploty.

## 7.1 Overenie metodiky a stanovenie veľkostí prietoku

Cieľom prvého z meraní bolo otestovať realizovateľnosť navrhnutej metodiky a dodefinovať konkrétne hodnoty prietoku a spôsob jeho regulácie. Pri návrhu experimentu sa predpokladalo, že sa bude uskutočňovať pri dvoch rozdielnych hodnotách prietoku. Prvou mala byť hodnota predstavujúca bežný prevádzkový stav, v akom HVAC systém počas jazdy pracuje. T. j. HVAC systém je zapnutý a výstkami je do kabíny privádzaný vzduch za účelom úpravy vnútorného prostredia a jedná sa o ustálený stav. Prietok vzduchu je tu stanovený tak, aby nepôsobil obťažujúco, ale aby pokryl bežnú tepelnú záťaž kabíny. Druhá hodnota prietoku mala charakterizovať krátkodobý stav intenzívneho prúdenia, ktorý je požadovaný pri prechodných prevádzkových stavoch, napr. po nastúpení do vyhriateho automobilu.

Na stanovenie konkrétnych hodnôt bola využitá HVAC jednotka Valeo 2. Tá bola zapojená do meracej trate a použitá na prívod vzduchu do výstky (viď obr. 28).



Obr. 28 Zapojenie HVAC jednotky Valeo 2 do meracej trate.

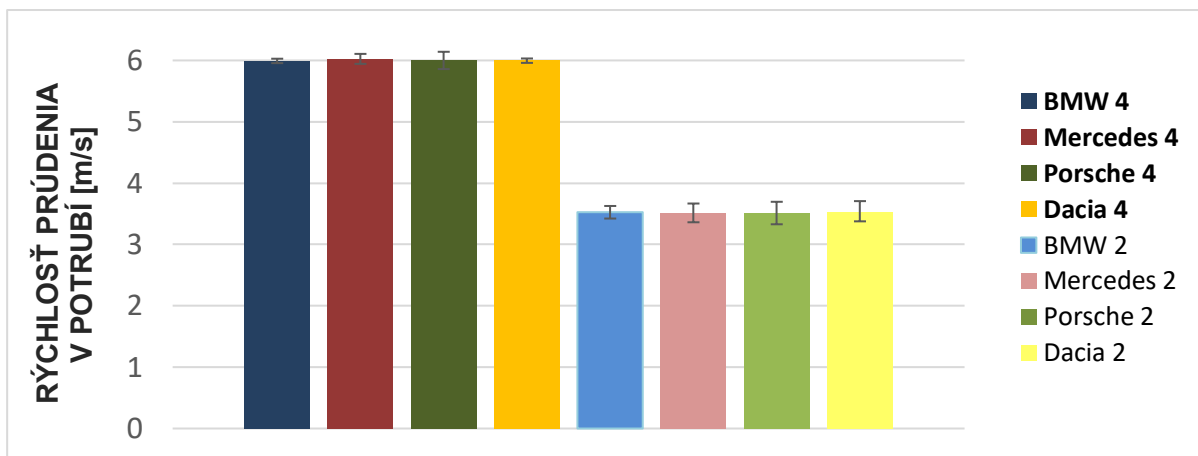


Jej výhodou totiž bolo, že sa regulácia uskutočňuje pomocou riadiaceho panelu tak ako v aute. Na ňom je možné nastaviť 6 rôznych úrovní výkonu ventilátora, ktoré symbolizuje 1 až 6 rozsvietených signalizačných prúžkov. Pre potreby experimentu bolo za nižšiu z hodnôt prietoku zvolených **45 m<sup>3</sup>/hod**, tzn. toľko, koľko dopravoval ventilátor pri zapnutí na úroveň 2 (viď obr. 29). Pri tejto veľkosti prietoku prúdil vzduch v potrubí v mieste odberu rýchlosťou **3,5 m/s**. Za vyššiu z hodnôt bolo zvolených **75 m<sup>3</sup>/hod**, tzn. toľko, koľko dopravoval ventilátor pri zapnutí na úroveň 4. V tomto prípade zase prúdil vzduch v potrubí s rýchlosťou **6 m/s**.



*Obr. 29 Riadiaci panel HVAC jednotky Valeo 2 s nastavením na stupeň 2.*

HVAC jednotku ale nebolo možné použiť na dopravu vzduchu aj počas finálnych meraní. Keďže sa jej regulácia uskutočňuje pomocou zmeny napätia a tým pádom aj príkonu motoru ventilátora a nie nastavením požadovaného dodávaného množstva vzduchu, v dôsledku malých, ale predsa prítomných tlakových strát zostáv prechodka + výustka sa výsledné hodnoty prietoku dopravovaného vzduchu v jednotlivých prípadoch mierne líšili. Bolo teda optimálne použiť lepšie regulovateľný nástroj na dopravu vzduchu. Ideálnou voľbou bol ventilátor od firmy EBM papst, Typ RadiCal 133 so vstavanou reguláciou, ktorý obsahuje PID regulátor s anemometrom a je ho tak možné regulovať na zadanú hodnotu prietoku. Vyššie uvedené hodnoty prietokov zistené pomocou HVAC jednotky boli teda zadávané ventilátoru od firmy EBM papst. Správnosť veľkosti prietoku v potrubí bola počas následných meraní kontrovaná pomocou merania rýchlosti prúdenia v odbernom mieste nachádzajúcom sa v pripojovacom potrubí pred výustkou (viď obr. 27). Vďaka dobrej regulovateľnosti ventilátora bolo možné dosahovať požadovanú rýchlosť prúdenia naprieč všetkými meraniami s dobrou opakovateľnosťou (viď obr. 30).



Obr. 30 Priemerné hodnoty rýchlostí prúdenia v potrubí zaznamenané počas všetkých meraní, kedy bol manekýn nastavený na konštantnú povrchovú teplotu.

Po navrhnutí konkrétnych hodnôt prietokov a spôsobu jeho regulácie bolo potrebné dodefinovať spôsob, akým sa budú výstky smerovať. Ako už bolo pri návrhu experimentu načrtnuté, dve zvolené smerovania boli na tvár a na hrud', pričom snahou bolo smerovať jadro prúdu vždy na stred týchto segmentov. Na vizualizáciu smeru prúdu bola použitá tzv. *niťová sonda*, t. j. jemné vlákno vzniknuté rozpletením dentálnej nite prilepené k lamele výstky (viď obr. 31). S jej pomocou bolo možné prúd nasmerovať na požadovaný segment. Zvyšné jemné doladovanie bolo uskutočňované ručne so snahou dosiahnuť taký stav, pri ktorom začal byť účinok prúdu citeľný na okrajoch segmentov a jeho maximum bolo citeľné v strede segmentu.



Obr. 31 Vizualizácia smerovania prúdu z výstiek pomocou niťovej sondy (hore, vľavo dole – smerovanie na tvár, vpravo dole – smerovanie na hrud').

## 7.2 Rozbor neistôt merania

Neoddeliteľnou súčasťou výsledkov merania je stanovenie ich neistôt. Keďže dokonale presné zmeranie hodnoty nejakej fyzikálnej veličiny nie je možné, súčasťou výsledkov každého experimentálneho merania je údaj o ich presnosti. Neistota merania definuje interval hodnôt v okolí výsledku merania meranej veličiny, v ktorom sa nachádzajú skutočné hodnoty. Neistoty sa podľa metódy ich vyhodnotenia delia na dva typy:

- Neistota typu A –  $u_a$  – neistota súvisiaca so štatistickým spracovaním opakovane nameraných dát
- Neistota typu B –  $u_B$  – neistota súvisiaca s iným než štatistickým spracovaním nameraných dát

### 7.2.1 Metóda typu A

Metóda typu A súvisí najmä s náhodnými a neidentifikovateľnými príčinami chýb. Je aplikovateľná len v prípade, že je možné uskutočniť opakované meranie tej istej veličiny za rovnakých podmienok. Je daná nasledujúcim vzťahom [36]:

$$u_{Ax} = \frac{s}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (20)$$

Kde:

$u_{Ax}$  je neistota typu A meranej veličiny  $x$

$n$  je počet opakovaní merania

$x_i$  je výsledok  $i$ -teho merania

$\bar{x}$  je aritmetický priemer všetkých nameraných hodnôt veličiny  $x$

Ako aj zo samotnej matematickej definície vyplýva, veľkosť neistoty typu A klesá s klesajúcim rozptylom meraných hodnôt a s rastúcim počtom opakovaní. Ak je však počet meraní menší ako  $n = 10$ , je nutné zvoliť mierne odlišný prístup. Vzhľadom na to, že v takom prípade odhad rozptylu nie je dostatočne presný a spoľahlivý, používa sa na jeho rozšírenie tzv. bezpečnostný faktor  $k_{UA}$ . Výsledný vzťah bude mať po úprave nasledujúcu podobu:

$$u_{Ax} = k_{UA} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (21)$$

Pričom bezpečnostný faktor dosahuje v závislosti na počte opakovaní nasledujúce hodnoty [37]:

Tab. 1 Bezpečnostný faktor pre určenie  $u_{Ax}$  v prípade, že  $n < 10$

$n$	2	3	4	5	6	7	8	9	10 a viac
$k_{UA}$	7	2,3	1,7	1,4	1,3	1,3	1,2	1,2	1

## 7.2.2 Metóda typu B

Metóda typu B súvisí, na rozdiel od tej predošlej, so známymi a kvantifikovateľnými zdrojmi chýb. Ich identifikáciu a základné vyhodnotenie má na starosti experimentátor, ktorý meranie vykonával. Štandardná neistota sa odhaduje pomocou jeho racionálneho úsudku založeného na všetkých možných dostupných informáciách. Najčastejšie sa používajú informácie od výrobcu meracej techniky, skúsenosti z predchádzajúcich meraní, skúsenosti s vlastnosťami materiálov a techniky, ako aj poznatky o nich, údaje získané pri kalibrácii a z certifikátu a neistoty referenčných údajov v príručkách. Typickou vlastnosťou neistoty typu B je, že sa jej hodnota s počtom opakovaní merania nemení.

Pri vyhodnocovaní neistoty typu B sa vychádza z čiastkových neistôt jednotlivých zdrojov  $u_{Bzi}$ . Ak je známa maximálna odchýlka  $i$ -teho zdroja neistoty  $z_{imax}$  určí sa neistota  $u_{Bzi}$  podľa nasledujúceho vzťahu [36]:

$$u_{Bzi} = \frac{z_{imax}}{k} \quad (22)$$

Pričom  $k$  je súčiniteľ vychádzajúci zo zákona rozdelení, ktorého hodnota je v prípade normálneho rozdelenia 2. V niektorých prípadoch býva ale rovno známa hodnota  $u_{Bzi}$ .

Výsledná neistota typu B meranej veličiny  $x$  sa pre počet  $n$  zdrojov určí pomocou vzťahu [36]:

$$u_{Bx} = \sqrt{\sum_{i=1}^n A_i^2 \cdot u_{Bzi}^2} \quad (23)$$

Kde

$A_i$  je súčiniteľ citlivosti  $i$ -teho zdroja, kt. je buď známy, alebo sa určí ako parciálna derivácia funkcie  $y$  podľa príslušnej vstupnej veličiny  $x_i$  s využitím vzťahu [36]:

$$A_i = \frac{\partial y}{\partial x_i} = \frac{\partial f(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_m)}{\partial x_i}$$

Keďže sa ale táto práca zaoberá najmä priamym meraním fyzikálnych veličín (tepelný tok, povrchová teplota), jediná veličina, ktorej hodnota je funkciou viacerých meraných vstupných veličín, je stredná radiačná teplota (viď rovnica 9). Zdrojom neistoty typu B v prípade tepelného toku a povrchovej teploty bude vždy len zariadenie, ktorým bola zmeraná (manekýn, termokamera).

V praxi len málokedy stačí vyjadriť neistoty jedným alebo druhým typom samostatne. V takom prípade je nutné stanoviť výsledný efekt kombinovaných neistôt meraní oboch metód. Výsledná kombinovaná neistota  $u_{Cx}$  meranej veličiny  $x$  je daná vzťahom [36]:

$$u_{Cx} = \sqrt{u_{Ax}^2 + u_{Bx}^2} \quad (27)$$

Tam, kde štandardné neistoty nestačia, je nutné rozšíriť ich pomocou koeficientu rozšírenia  $k_r$ . Pôvodne stanovená štandardná odchýlka (a teda aj štandardná neistota) predstavuje u normálneho rozdelenia interval s pravdepodobnosťou približne 68%. Za účelom dosiahnutia lepšieho intervalu pokrytia blížiaceho sa ku 100% je nutné použiť spomínaný koeficient, ktorého význam je v podstate totožný s významom kvantilov u normálneho Gaussovho rozdelenia, kde  $k_r=2$  pre rozšírenie na interval spoľahlivosti 95%. Výsledná neistota bude mať tvar [36]:

$$U_{Cx} = k_r \cdot u_{Cx} \quad (28)$$

V tejto práci budú všetky výsledky meraní prezentované s intervalom neistoty  $2\sigma$ , čiže s pravdepodobnosťou približne 95%. Preto sa  $k_r$  bude rovnať 2.

### 7.2.3 Príklad výpočtu kombinovanej neistoty

Výpočet výslednej kombinovanej neistoty  $u_{Cx}$  nameraných hodnôt pomocou experimentov spojených s touto prácou, by vyzeral nasledovne. Majme meranie výustky BMW pri nastavení na konštantný tepelný tok, prietoku  $75 \text{ m}^3/\text{hod}$  a smerovaní na hrud'. Hodnoty povrchovej teploty tváre manekýna počas troch meraní dosahovali hodnoty:

$$t_1 = 27^\circ\text{C}$$

$$t_2 = 27,8^\circ\text{C}$$

$$t_3 = 28,2^\circ\text{C}$$

Najskôr je potrebné vypočítať aritmetický priemer hodnôt, ktorý dostaneme pomocou vzťahu [38]:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (29)$$

Pre povrchovú teplotu:

$$\bar{t} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 t_i = \frac{27+27,8+28,2}{3} = 27,7^\circ\text{C} \quad (30)$$

Výpočet neistoty typu A:

$$u_{At} = \frac{s}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2} \quad (31)$$

$$u_{At} = \sqrt{\frac{(27-27,7)^2 + (27,8-27,7)^2 + (28,2-27,7)^2}{3 \cdot (3-1)}} = 0,35^\circ\text{C} \quad (32)$$

Po rozšírení bezpečnostným faktorom  $k_{UA} = 2,3$  (viď tabuľka 1):

$$u_{At} = 2,3 \cdot 0,35 = 0,81^\circ\text{C} \quad (33)$$

Predmetom záujmu tejto práce sú priamo merané veličiny a nie veličiny, ktoré by boli odvodené z viacerých nameraných. Z toho vyplýva, že odhad neistoty typu B sa uskutoční pomocou variability jedného známeho zdroja (termokamera, manekýn) a to pomocou vzťahu:

$$u_B = \frac{z_{max}}{k} \quad (34)$$

V prípade tohto ukázkového výpočtu sa bude jednať o (ne)presnosť merania povrchovej teploty pomocou manekýna. Tá je podľa dátového listu manekýna  $\pm 0,1^\circ\text{C}$  (viď kapitola 5.1). Keďže sa v tomto prípade jedná o normálne rozdelenie, bude platiť, že:

$$k = 2 \quad (35)$$

A teda:

$$u_{Bt} = \frac{0,1}{2} = 0,05^\circ\text{C} \quad (36)$$

Výslednú hodnotu kombinovanej neistoty dostaneme s využitím vzťahu:

$$u_{Ct} = \sqrt{u_{At}^2 + u_{Bt}^2} \quad (37)$$

$$u_{Ct} = \sqrt{0,81^2 + 0,05^2} = 0,81^\circ\text{C} \quad (38)$$

Po rozšírení na interval spoľahlivosti 95%:

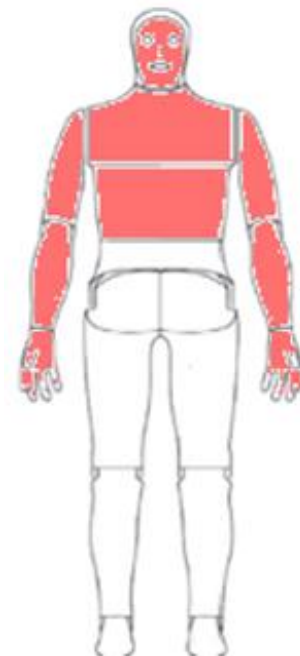
$$U_{Ct} = k_r \cdot u_{Ct} = 0,81 \cdot 2 = 1,62^\circ\text{C} \quad (39)$$

### 7.3 Meranie na konštantnú povrchovú teplotu

Prvým z dvoch nastavení, pri ktorých sa experimenty uskutočňovali, bolo nastavenie na konštantnú povrchovú teplotu (viď popis princípu v kapitole 6.2). Na základe návrhu experimentu a skúseností, ktorými tím klimakomory disponuje, bol zadaný postup merania. Ten bol v priebehu skúšobného merania odskúšaný a pozostával z nasledujúcich krokov:

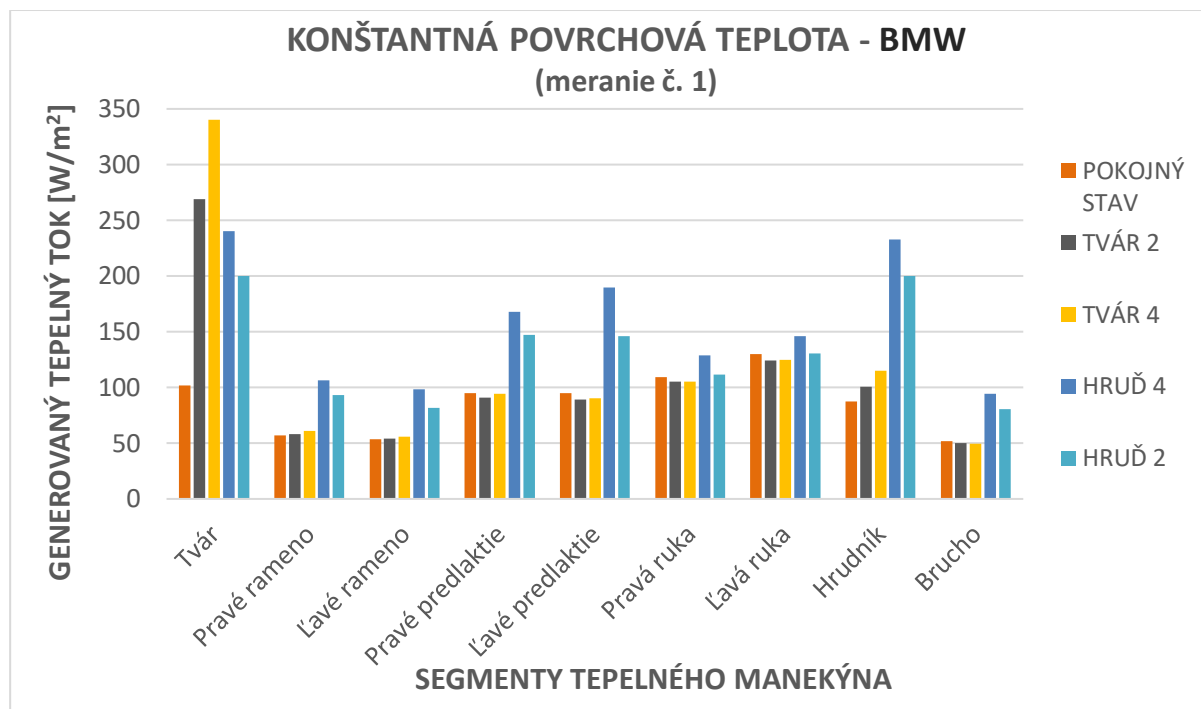
1. Zapnutie manekýna s vyhrievaním všetkých segmentov na teplotu 34°C.
2. Čas na ustálenie dejov 2 hodiny [38].
3. Vykreslenie komfortného diagramu pre celé telo (ďalej len KD) a zapnutie ventilátora s nastavením nižšieho prietoku. Smerovanie buď na tvár alebo hrud'.
4. Čas na ustálenie dejov 20 minút.
5. Vykreslenie KD a nastavenie prietoku na vyššiu hodnotu.
6. Čas na ustálenie dejov 20 minút.
7. Vykreslenie KD a zmena smerovania z tváre na hrud', alebo z hrude na tvár v závislosti na tom, pri ktorom smerovaní meranie začalo.
8. Čas na ustálenie dejov 20 minút.
9. Vykreslenie KD a nastavenie prietoku na nižšiu hodnotu.
10. Čas na ustálenie dejov 20 minút.
11. Vykreslenie KD.

Počas samotného merania bol neustále zaznamenávaný tepelný tok generovaný jednotlivými segmentmi manekýna, teplota a vlhkosť vzduchu v klimakomore, teplota guľového teplomeru a rýchlosť prúdenia v prívodnom potrubí a pred hrudníkom manekýna. Takto zozbierané a následne vyhodnotenú dáta boli použité na popis **piatich skúmaných ustálených stavov** (za účelom prehľadnosti bude nižší z prietokov 45 m<sup>3</sup>/hod ďalej v práci označovaný číslom 2, vyšší z prietokov 75 m<sup>3</sup>/hod číslom 4 a smerovanie názvom segmentu, t. j. hrud' alebo tvár): **pokojný stav**, **tvár 2**, **tvár 4**, **hrud' 2** a **hrud' 4**. Výsledné hodnoty generovaného tepelného toku vznikli spriemerovaním šiestnástich hodnôt zaznamenávaných v desaťsekundových intervaloch od momentu, kedy bol stav považovaný za ustálený. Vyhodnotenie generovaných tepelných tokov bolo uskutočnené len pre tie segmenty, na ktorých povrch mohlo prúdenie aspoň čiastočne dopadať. Jednalo sa o tvár, hrudník, brucho, ruky, predné časti predlaktí a predné časti ramien (viď obr. 32).



Obr. 32 Zobrazenie segmentov manekýna zahrnutých do vyhodnotenia pri nastavení na konštantnú povrchovú teplotu.

Z takto získaných dát bolo možné zostaviť graf veľkostí tepelných tokov generovaných zo segmentov pre jednotlivé ustálené stavy (viď obr. 33).

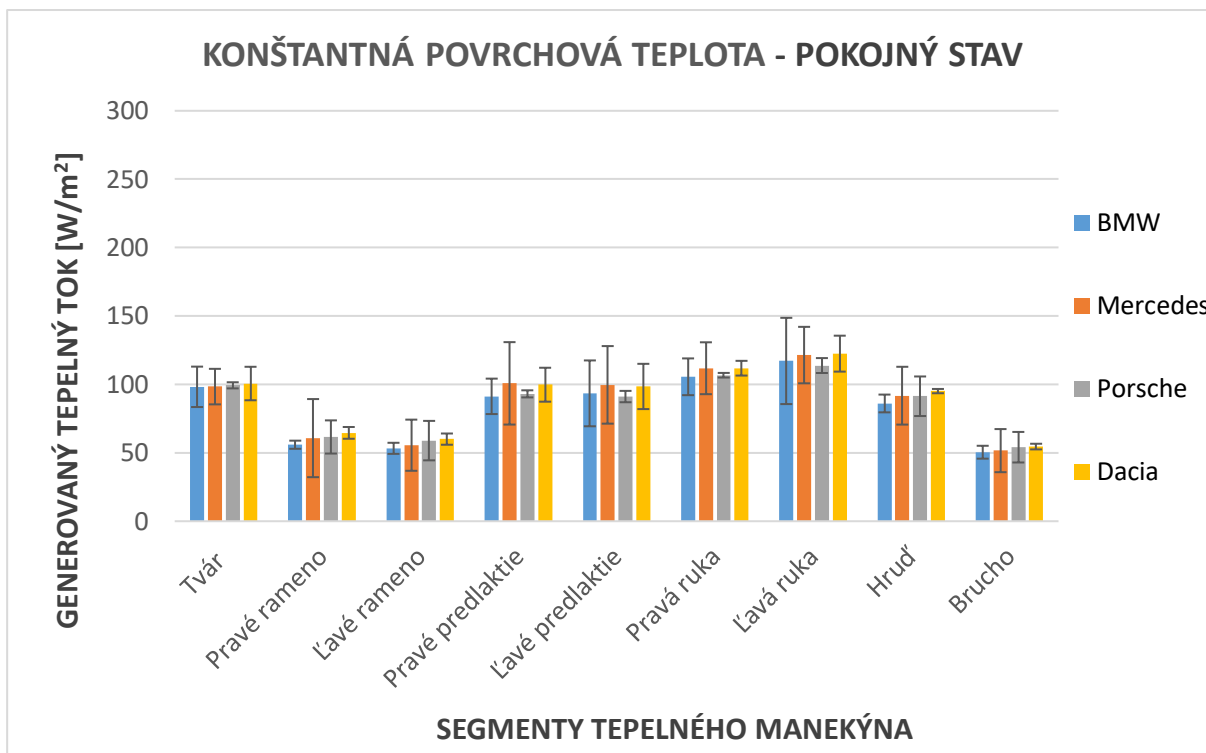


Obr. 33 Príklad vyhodnotenia generovaných tepelných tokov pre pokojný stav a jednotlivé prevádzkové stavy s použitým BMW výustky.

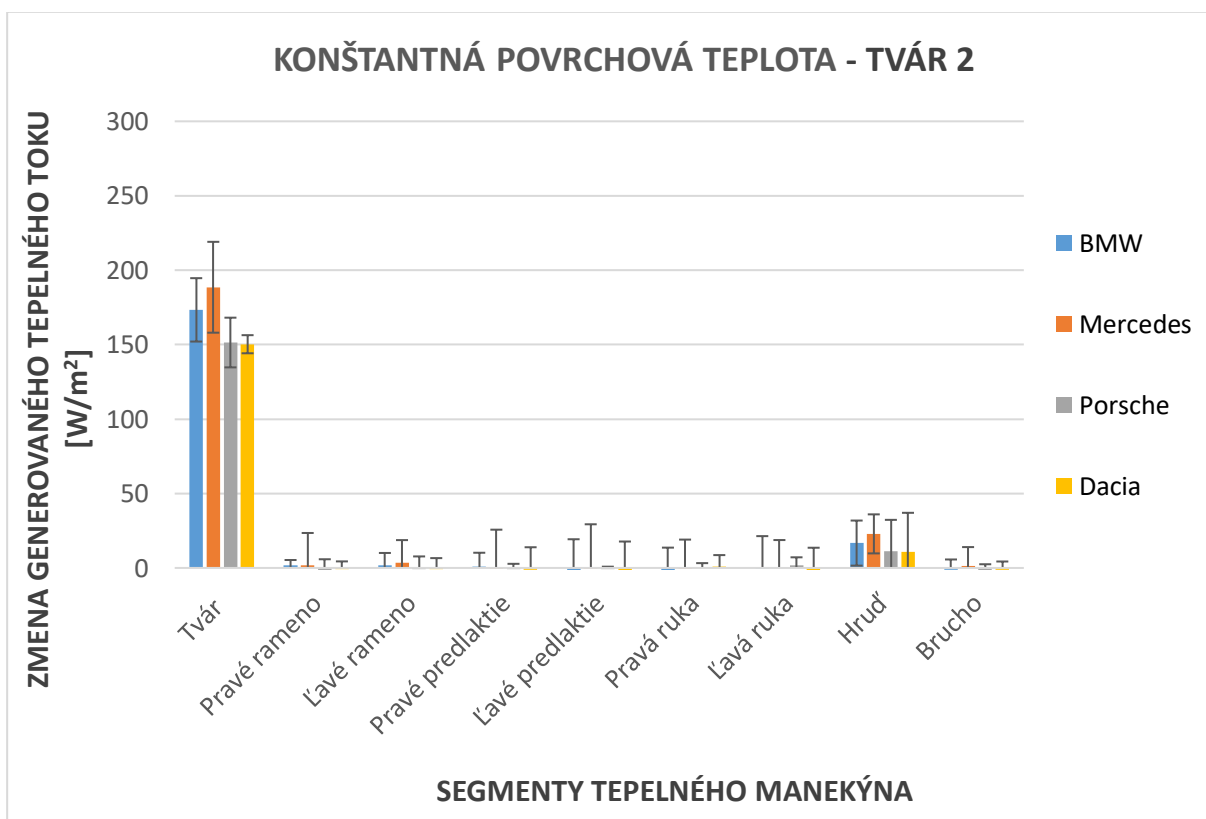
Na uvedenom grafe je zreteľne vidno, ako v dôsledku prúdenia vzduchu v okolí segmentov došlo k nárastu generovaného tepelného toku, ktorý bol nevyhnutný na udržanie konštantnej povrchovej teploty. Za účinok nútenej konvekcie možno teda pokladať rozdiel hodnôt pri jednotlivých prevádzkových stavoch v porovnaní s pokojným stavom.

Vyššie popísaný postup merania predstavuje jedno opakovanie. Pre každú výustku boli pre nastavenie na konštantnú povrchovú teplotu uskutočnené 3 nezávislé opakované merania. Medzi každým z nich bola výustka odmontovaná a znovu namontovaná. Výsledky opakovaní boli pre jednotlivé prevádzkové stavy spriemerované a vykreslené do grafov spolu s neistotami meraní vo forme tzv. chybových úsečiek a to v podobe rozdielov medzi prevádzkovým a pokojným stavom (viď obr. 34 - 38). V prílohách sú pre ilustráciu uvedené aj grafy vo forme celkových generovaných tepelných tokov (nie rozdielov, ako to je v tejto kapitole). Taktiež sa tam nachádzajú grafy hodnôt okolitej teploty vzduchu a strednej radiačnej teploty (viď prílohy A).

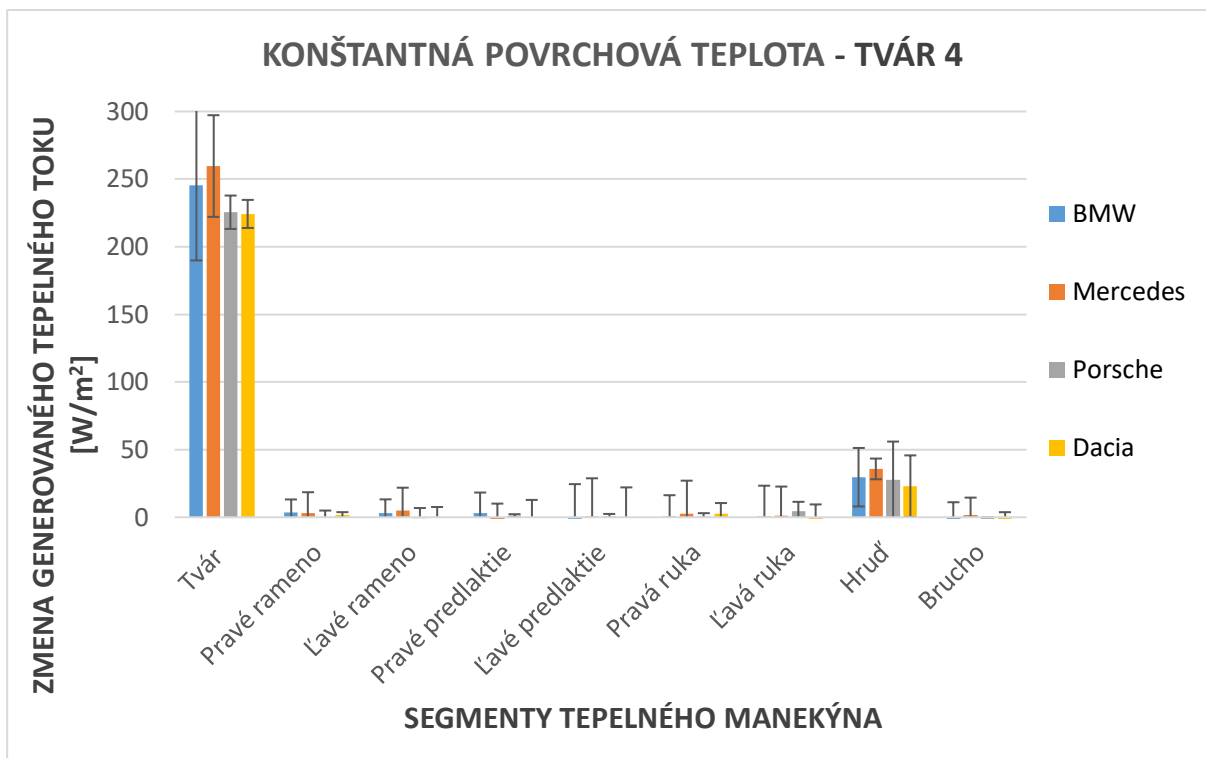




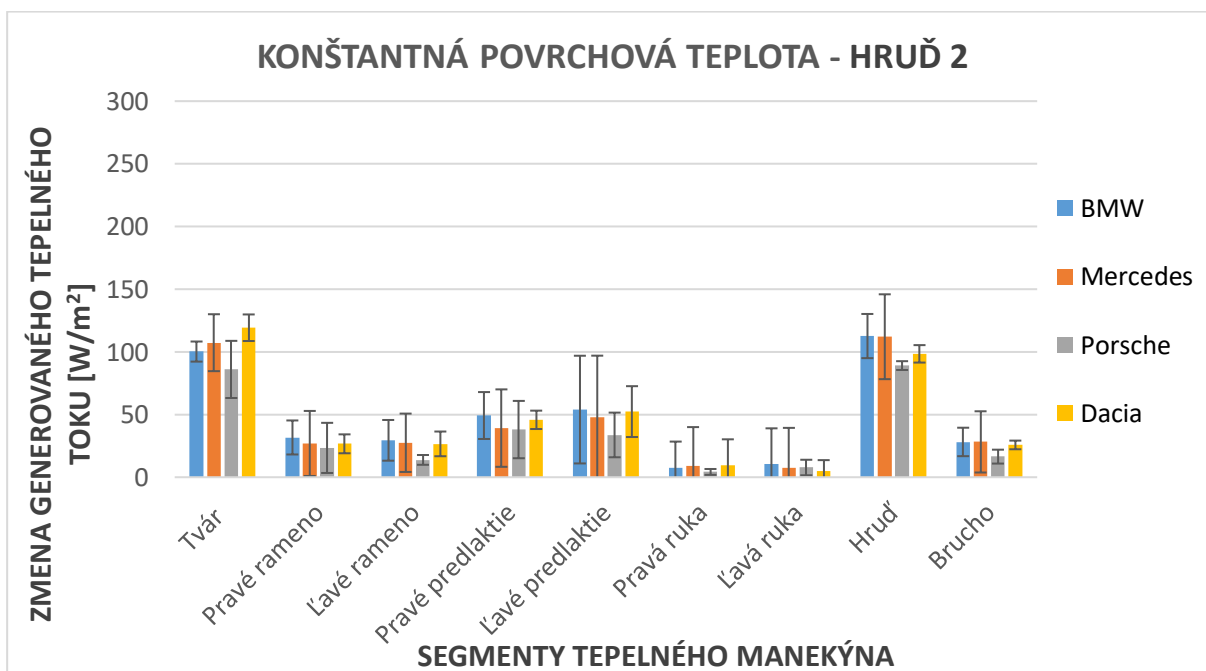
Obr. 34 Výsledné hodnoty generovaného tepelného toku pre jednotlivé segmenty pri pokojnom stave.



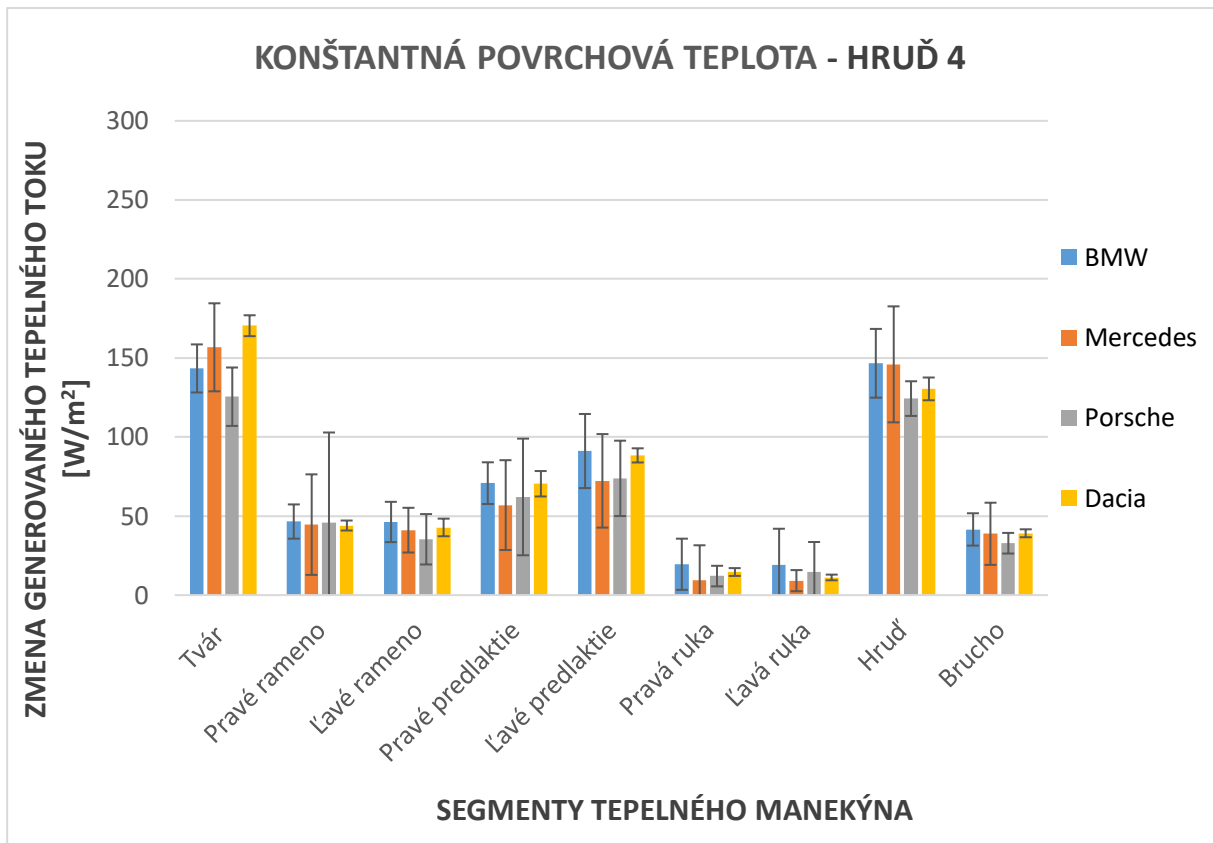
Obr. 35 Zmena hodnôt generovaného tepelného toku pre jednotlivé segmenty pri prevádzkovom stave tvár 2 v porovnaní s pokojným stavom.



Obr. 36 Rozdiel hodnôt generovaného tepelného toku pre jednotlivé segmenty pri prevádzkovom stave tvár 4 v porovnaní s pokojným stavom.

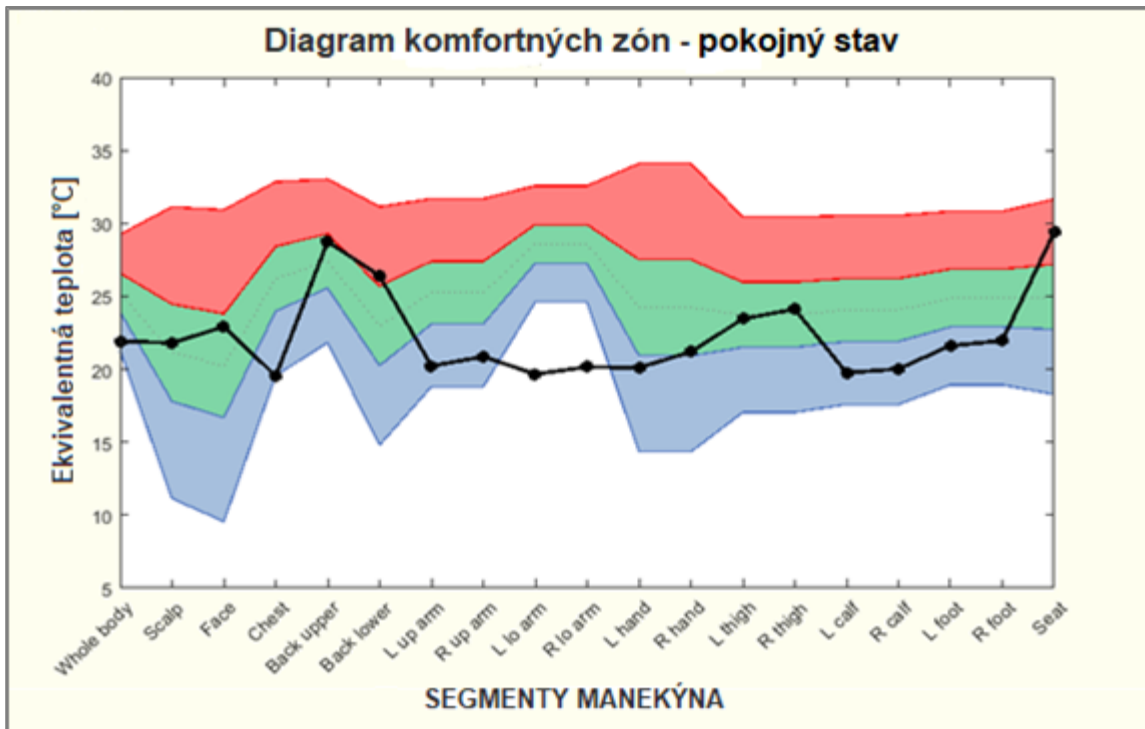


Obr. 37 Rozdiel hodnôt generovaného tepelného toku pre jednotlivé segmenty pri prevádzkovom stave hrud' 2 v porovnaní s pokojným stavom.



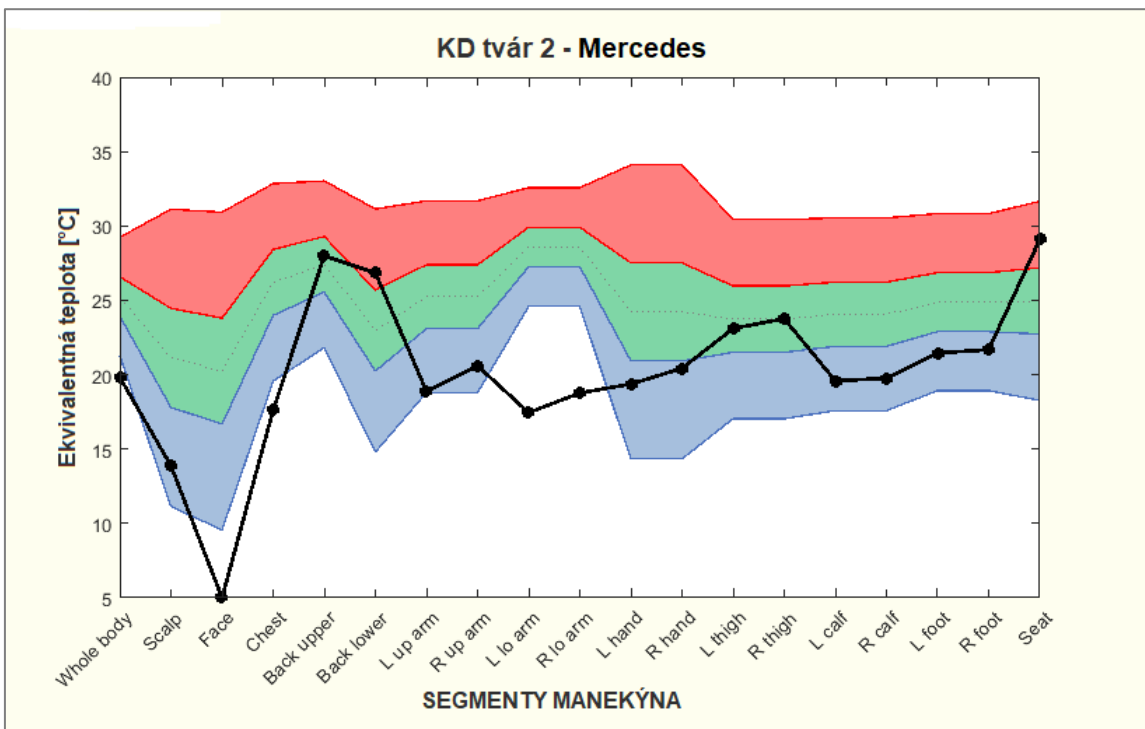
Obr. 38 Rozdiel hodnôt generovaného tepelného toku pre jednotlivé segmenty pri prevádzkovom stave hrud' 4 v porovnaní s pokojným stavom.

Ako bolo v postupe experimentu uvedené, pri každom ustálenom stave bol uložený aj softvérom vykreslený komfortný diagram (viď popis obr. 24). Na KD uvedenom nižšie (viď obr. 39) vidno, v akých pásmach sa nachádzali jednotlivé segmenty z hľadiska tepelného pocitu počas pokojného stavu. Konkrétne predlaktia sa nachádzajú v pásme „neprijemne chladno“, čo je následkom príliš nízkej okolitej teploty v spojení s letným oblečením. Na výskum tepelného pocitu by bolo vhodné uskutočňovať experiment pri vyšších teplotách, čo vzhľadom k nefunkčnosti klimakomory nebolo možné.

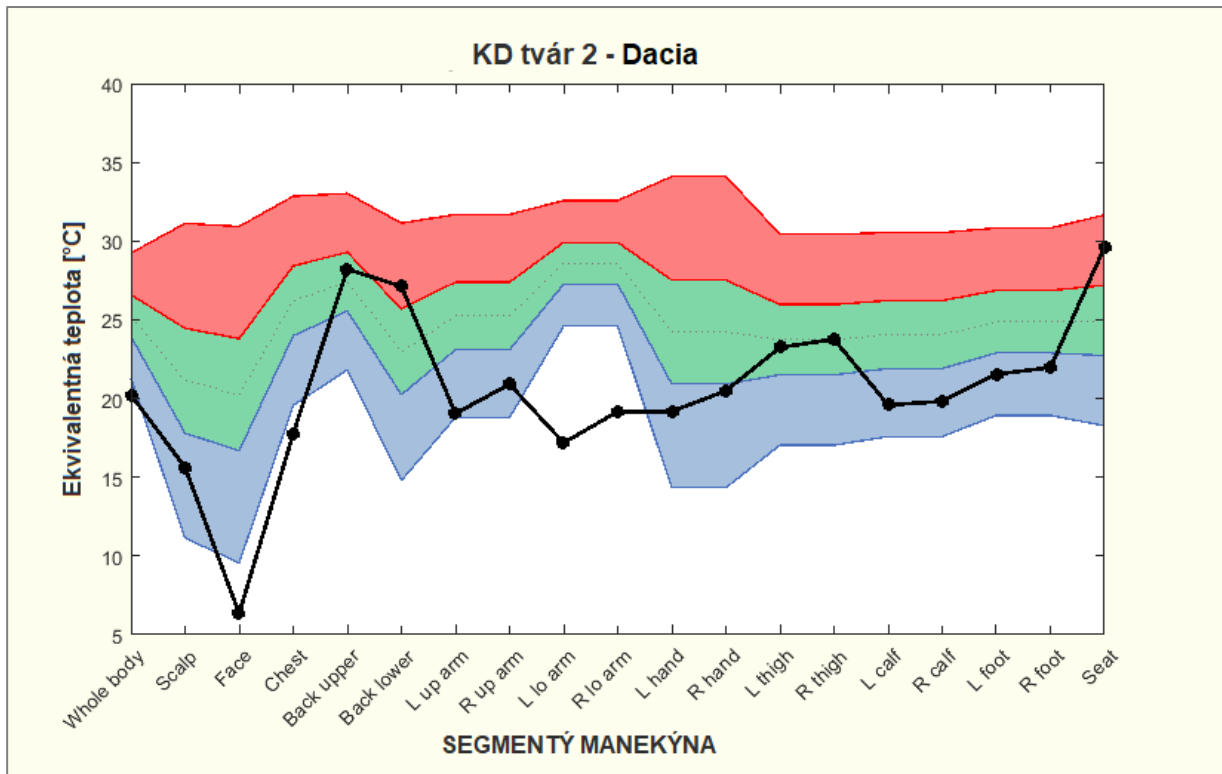


Obr. 39 Diagram komfortných zón vyhodnotený počas pokojného stavu.

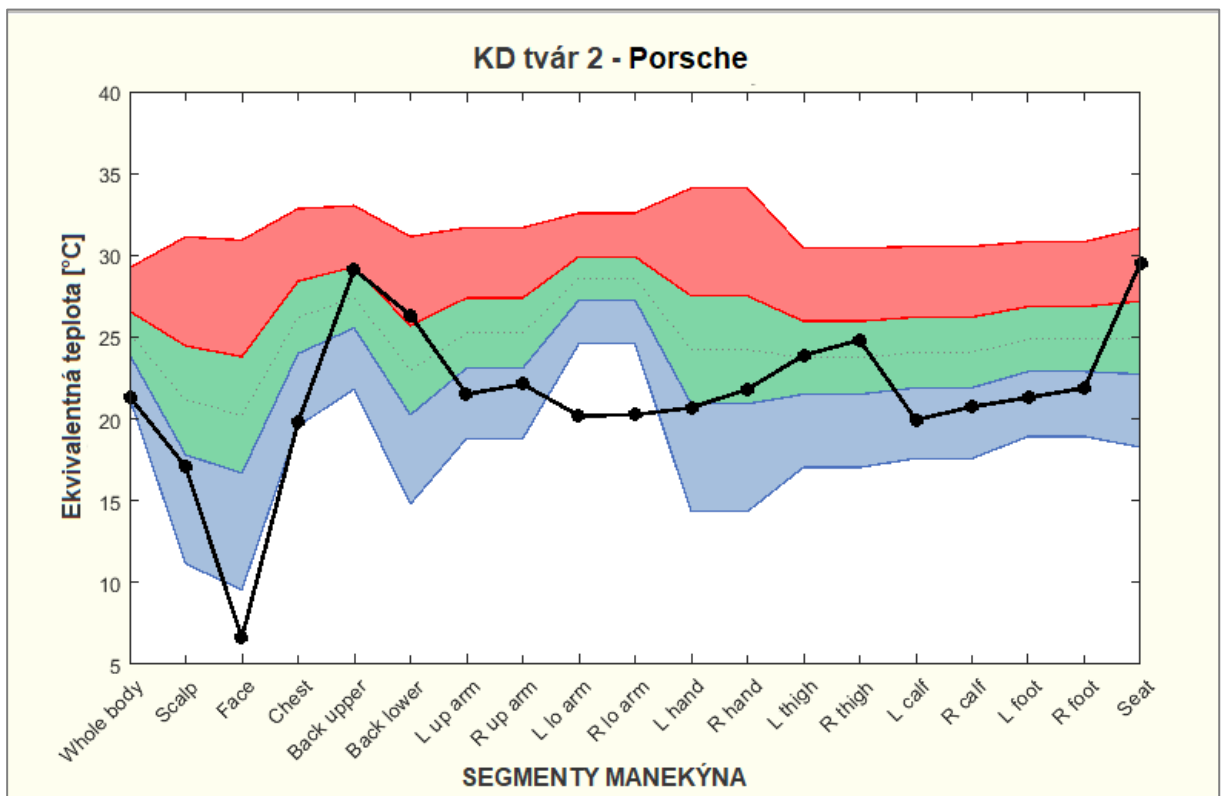
Na nižšie uvedených obrázkoch je porovnanie KD medzi jednotlivými výstkami pre prevádzkový stav tvár 2 (viď obr. 40 - 43). Porovnanie zvyšných prevádzkových stavov je uvedené v prílohách (viď prílohy 11A – 22A).



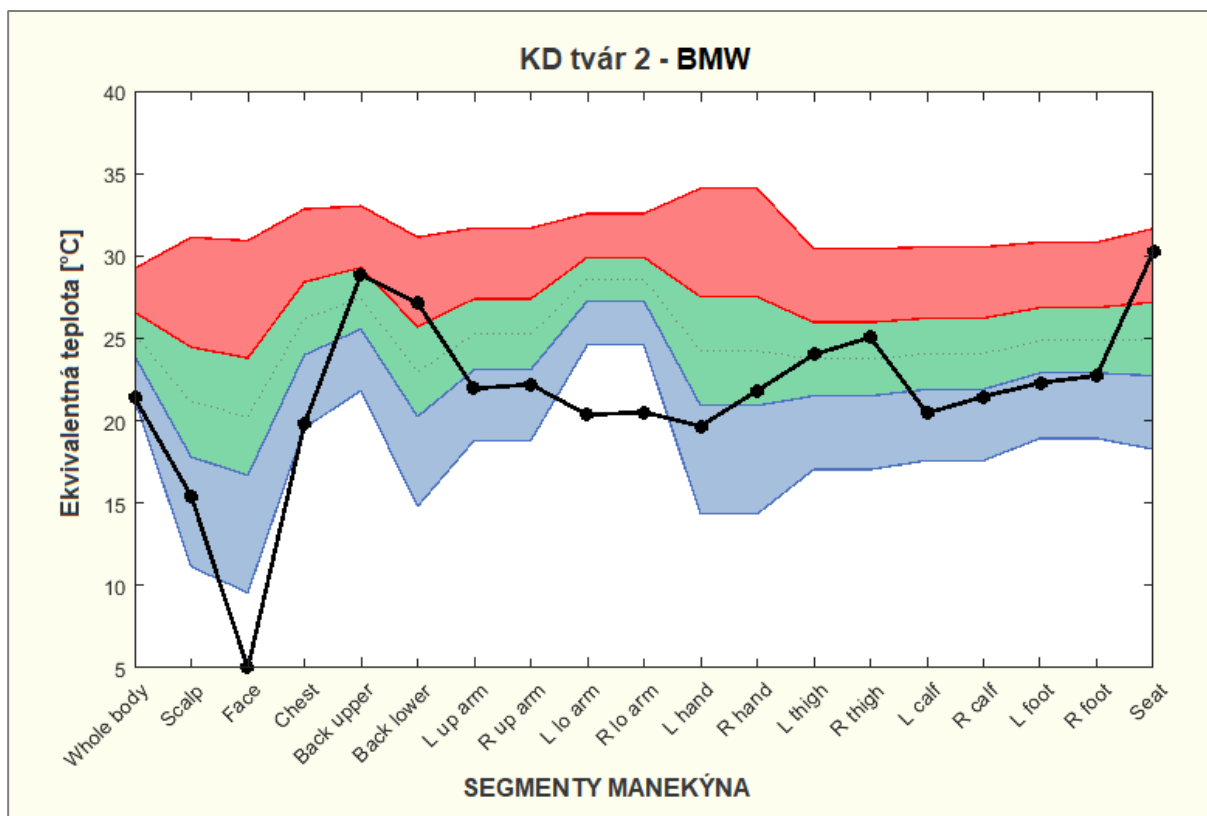
Obr. 40 KD počas prevádzkového stavu tvár 2 za použitia Mercedes výstky.



Obr. 41 KD počas prevádzkového stavu tvár 2 za použitia Dacia výustky.



Obr. 42 KD počas prevádzkového stavu tvár 2 za použitia Porsche výustky.



Obr. 43 KD počas prevádzkového stavu tvár 2 za použitia BMW výustky.

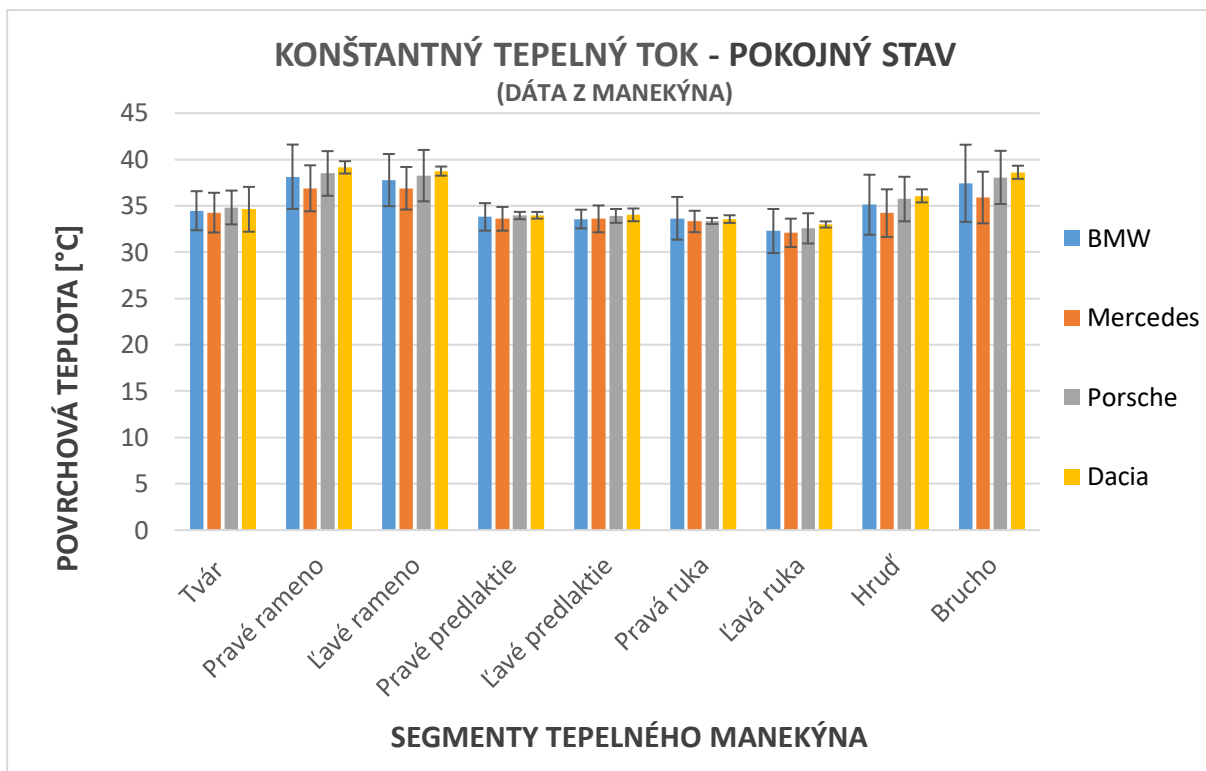
## 7.4 Meranie na konštantný tepelný tok

Druhým z použitých nastavení manekýna bolo nastavenie na konštantný tepelný tok (viď popis princípu v kapitole 6.3). Postup merania bol po vzore toho pre konštantnú povrchovú teplotu zadefinovaný nasledovne:

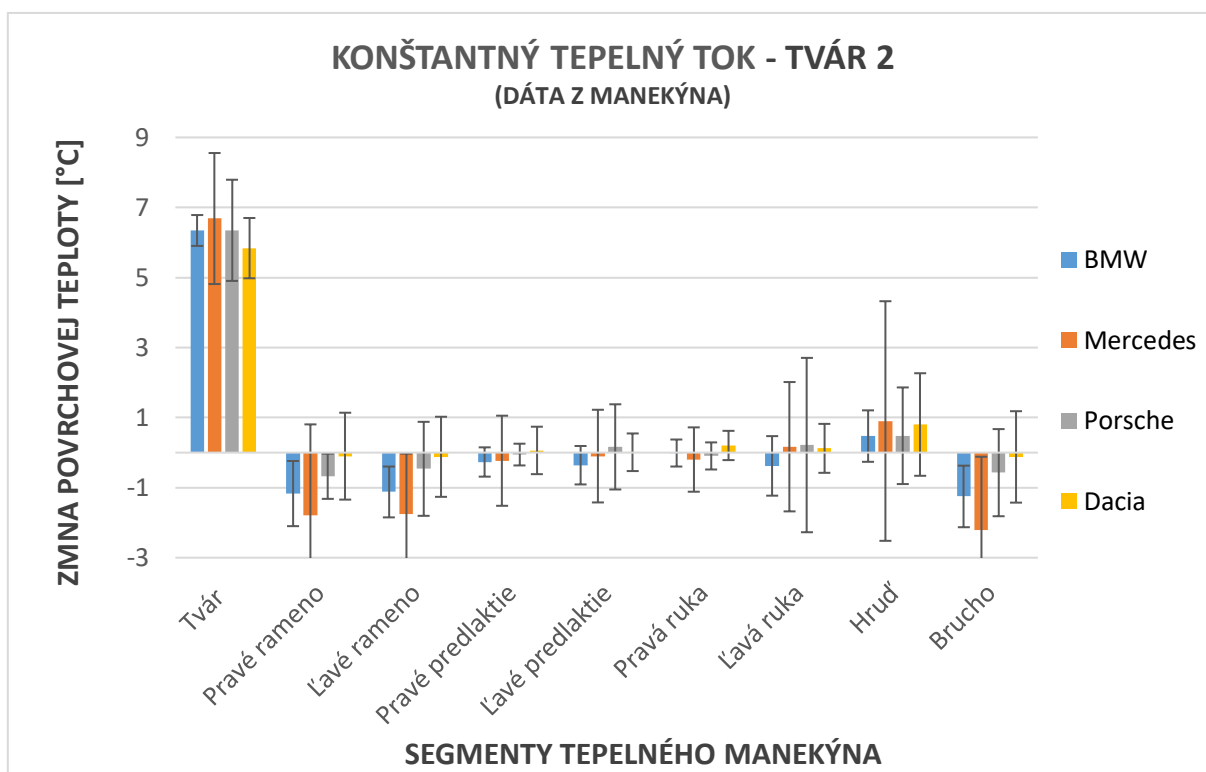
1. *Zapnutie manekýna s vyhrievaním všetkých segmentov výkonom 100W/m<sup>2</sup>.*
2. *Čas na ustálenie dejov 2 hodiny.*
3. *IR snímkovanie skúmaných segmentov a zapnutie ventilátora s nastavením nižšieho prietoku. Smerovanie buď na tvár alebo hrud'.*
4. *Čas na ustálenie dejov 30 minút.*
5. *IR snímkovanie a nastavenie prietoku na vyššiu hodnotu.*
6. *Čas na ustálenie dejov 30 minút.*
7. *IR snímkovanie a zmena smerovania z tváre na hrud', alebo z hrude na tvár v závislosti od toho, pri ktorom smerovaní meranie začalo.*
8. *Čas na ustálenie dejov 30 minút.*
9. *IR snímkovanie a nastavenie prietoku na nižšiu hodnotu.*
10. *Čas na ustálenie dejov 30 minút.*
11. *IR snímkovanie.*

Meranie pri tomto nastavení prebiehalo obdobne, ako pri nastavení predošlom. V priebehu celého jeho trvania bola zaznamenávaná teplota a vlhkosť vzduchu, teplota guľového teplomeru, rýchlosť prúdenia vzduchu v potrubí a na rozdiel od predošlého nastavenia, povrchová teplota manekýna, a to tak pomocou termokamery, ako aj pomocou samotného manekýna. Ako je vidno z vyššie uvedeného postupu, intervaly na ustálenie dejov bolo nutné predĺžiť na 30 minút z dôvodu pomalšieho ustaľovania sa manekýna v prípade zmeny okrajových podmienok. Konkrétna hodnota tepelného toku bola zvolená, pretože sa blíži charakteristickému tepelnému toku z povrchu človeka vykonávajúceho fyzicky nenáročnú činnosť [39]. Na rozdiel od predošlého nastavenia, v tomto prípade boli vyhrievané len skúmané segmenty (viď obr. 32).

Keďže boli použité dve metódy odčítania povrchových teplôt, aj výsledné vyhodnotenie sa skladá z dvoch častí. Tou prvou je vyhodnotenie pomocou údajov z tepelného manekýna (viď obr. 44 - 48). Na grafoch možno vidieť zmenu priemernej povrchovej teploty jednotlivých segmentov v dôsledku zvýšenej intenzity konvekcie pre jednotlivé prevádzkové stavy, pričom kladná zmena predstavuje pokles teploty (zvýšenie súčiniteľa prestupu tepla) a záporná hodnota jej nárast (zníženie súčiniteľa prestupu tepla). V prílohách sa nachádzajú aj grafy celkových povrchových teplôt (viď prílohy BC). Druhá metóda bola navrhnutá za účelom získania detailnejšieho rozdelenia povrchu manekýna. 9 skúmaných segmentov bolo rozdelených na dohromady 18 menších častí (viď obr. 50). Snímkovanie sa uskutočňovalo zo vzdialenosti približne 0,5 m od povrchu a tvorilo ho zakaždým 8 snímok. Jednotlivé časti tela boli do samostatných snímok rozdelené nasledovne: tvár, hrud' s bruchom, pravé rameno s predlaktím, pravá ruka spredu, pravá ruka zozadu, ľavé rameno s predlaktím, ľavá ruka spredu a nakoniec ľavá ruka zozadu.

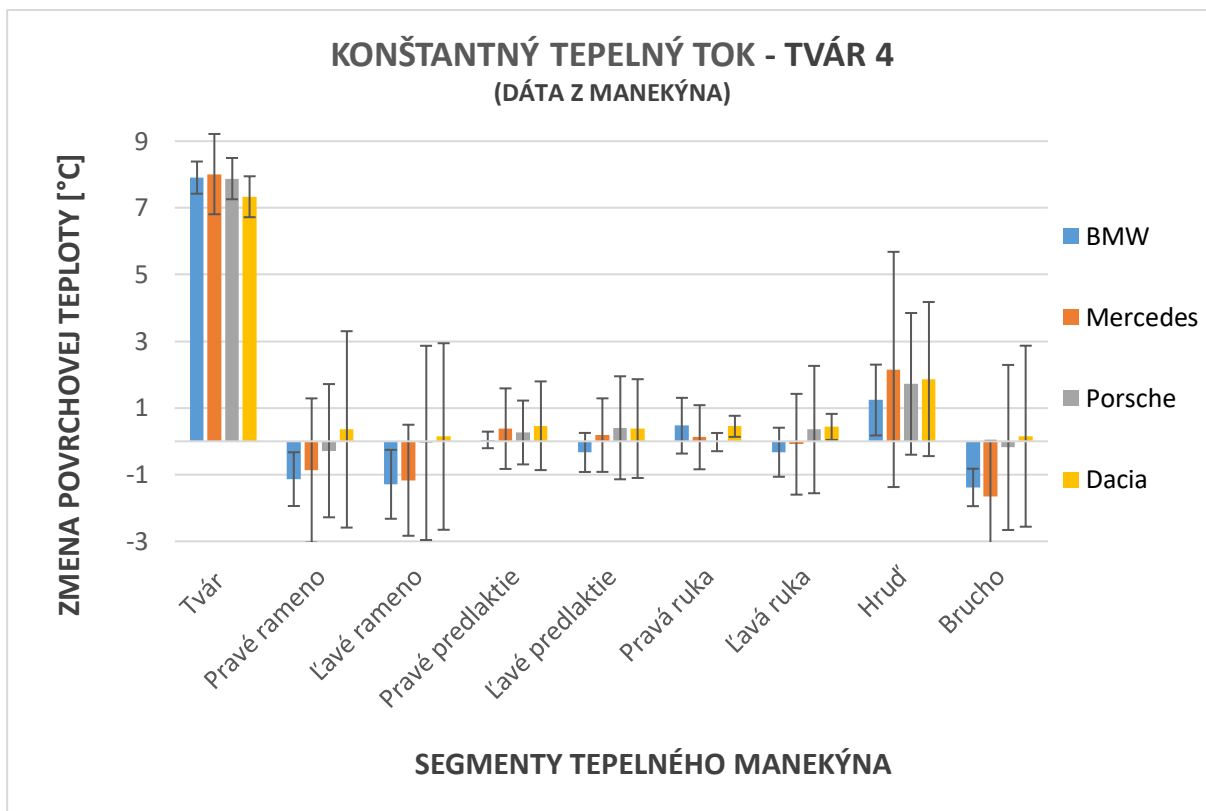


Obr. 44 Hodnoty povrchovej teploty jednotlivých segmentov manekýna pri pokojnom stave.

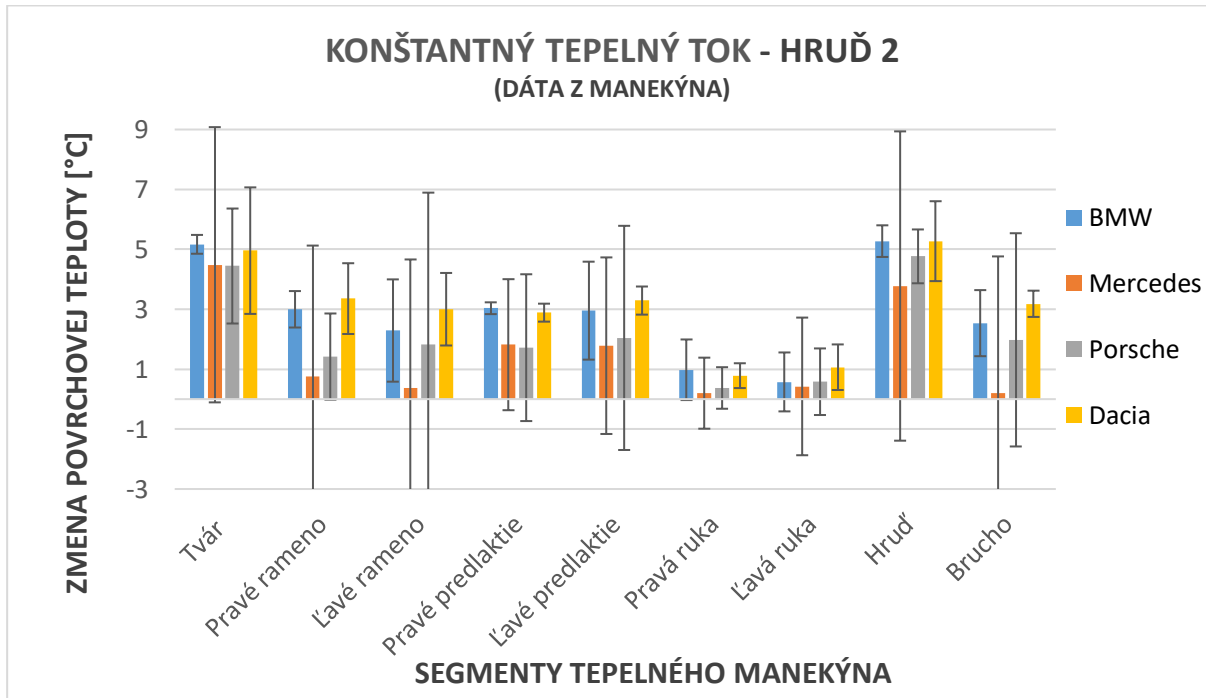


Obr. 45 Zmeny hodnôt povrchovej teploty jednotlivých segmentov manekýna pri prevádzkovom stave tvár 2 v porovnaní s pokojným stavom.

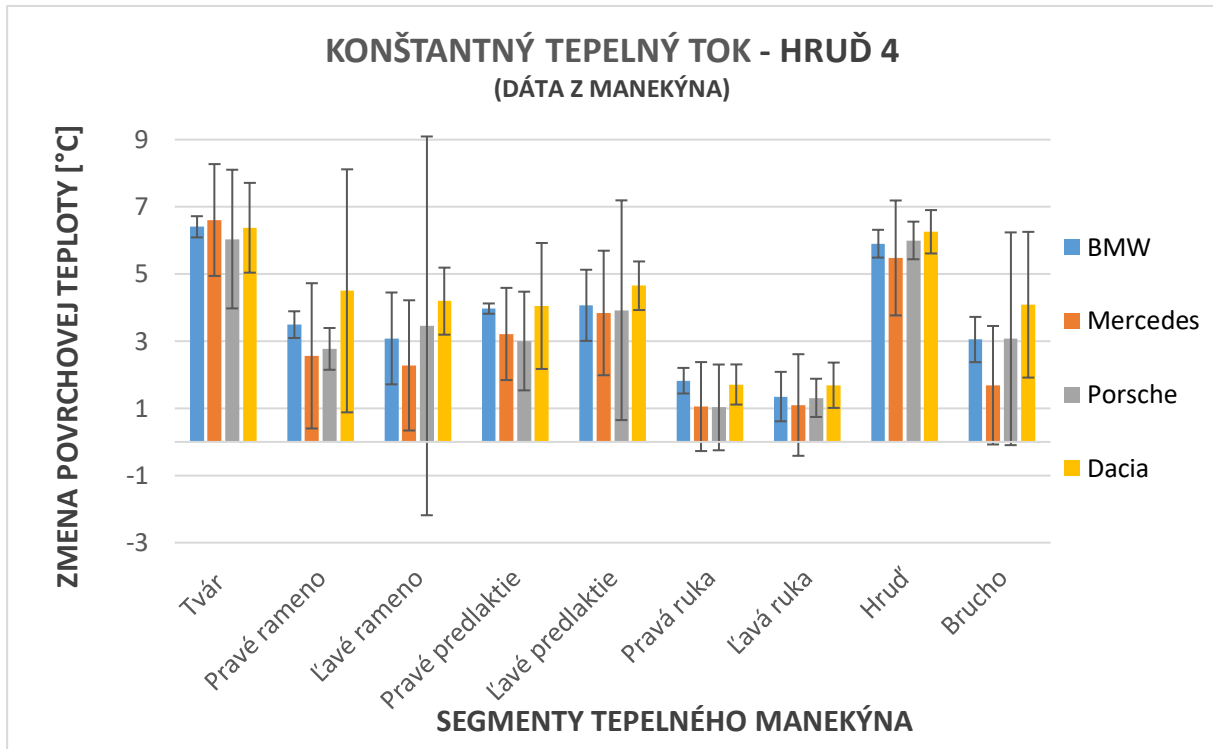




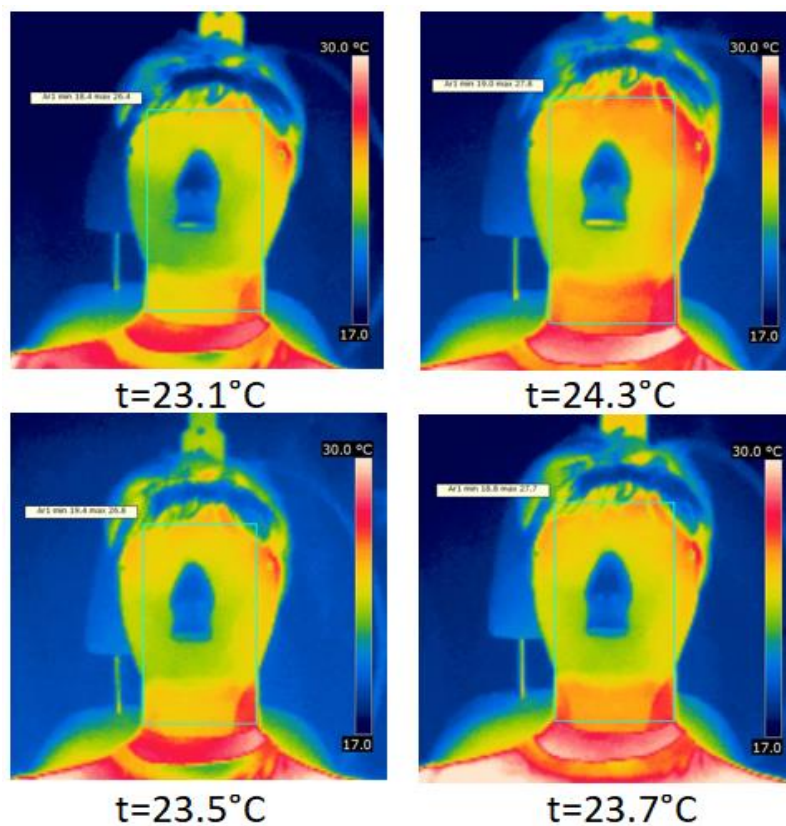
Obr. 46 Zmeny hodnôt povrchovej teploty jednotlivých segmentov manekýna pri prevádzkovom stave tvár 4 v porovnaní s pokojným stavom.



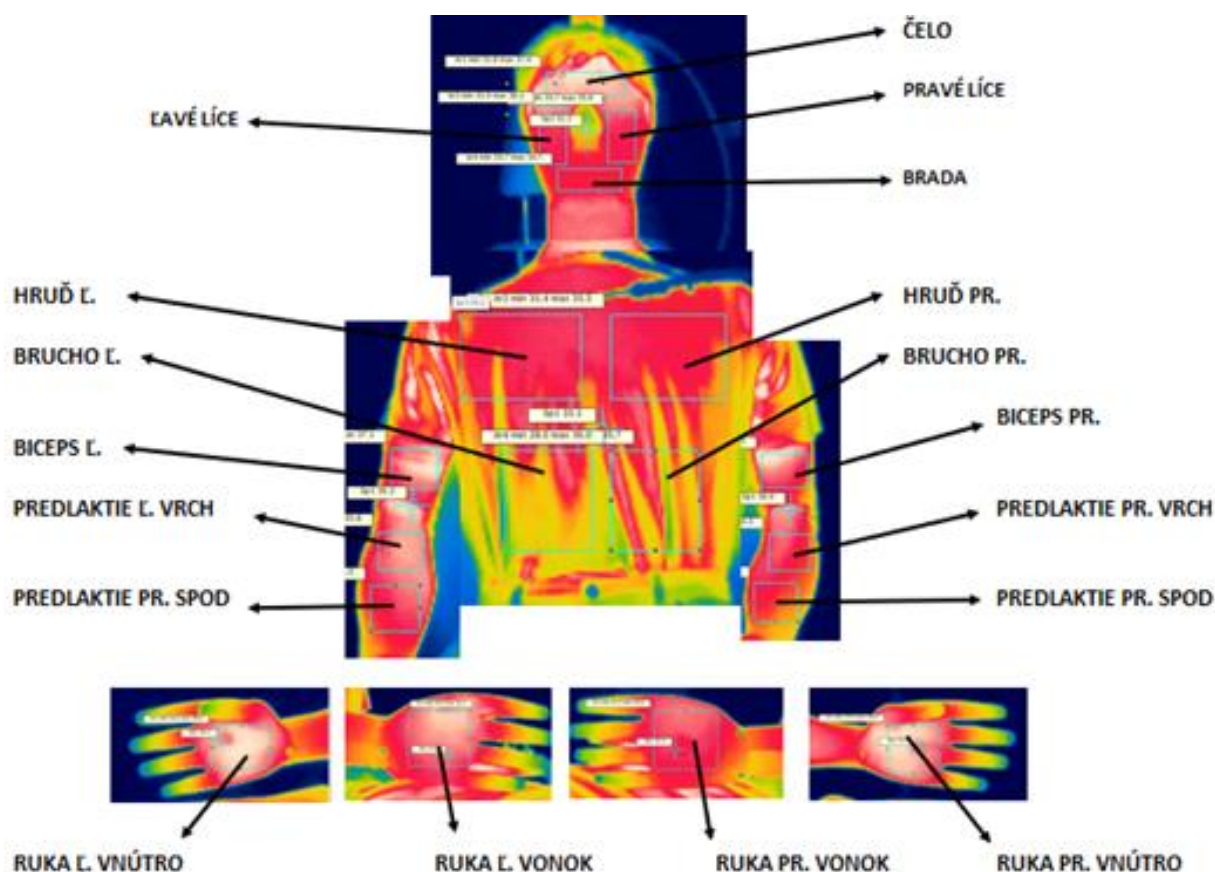
Obr. 47 Zmeny hodnôt povrchovej teploty jednotlivých segmentov manekýna pri prevádzkovom stave hrud' 2 v porovnaní s pokojným stavom.



Obr. 48 Zmeny hodnôt povrchovej teploty jednotlivých segmentov manekýna pri prevádzkovom stave hrud' 4 v porovnaní s pokojným stavom.

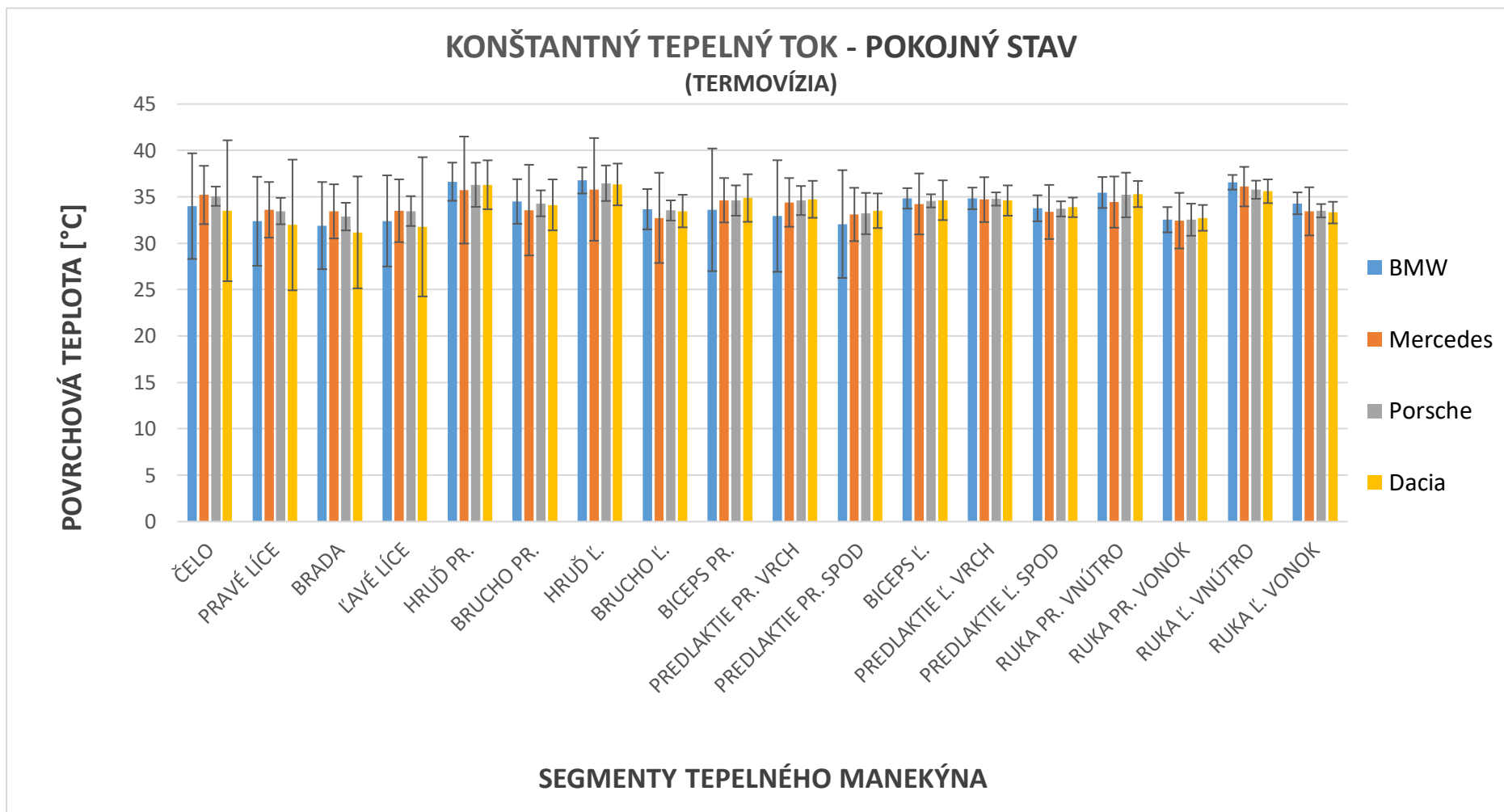


Obr. 49 Porovnanie teplotných polí a priemerných povrchovej teplot tvár medzi jednotlivými výstykmi pri prevádzkovom stave tvár 2. Rozdelenie výstiek na obrázku: BMW - vľavo hore, Dacia – vpravo hore, Mercedes – vľavo dole, Porsche – vpravo dole.

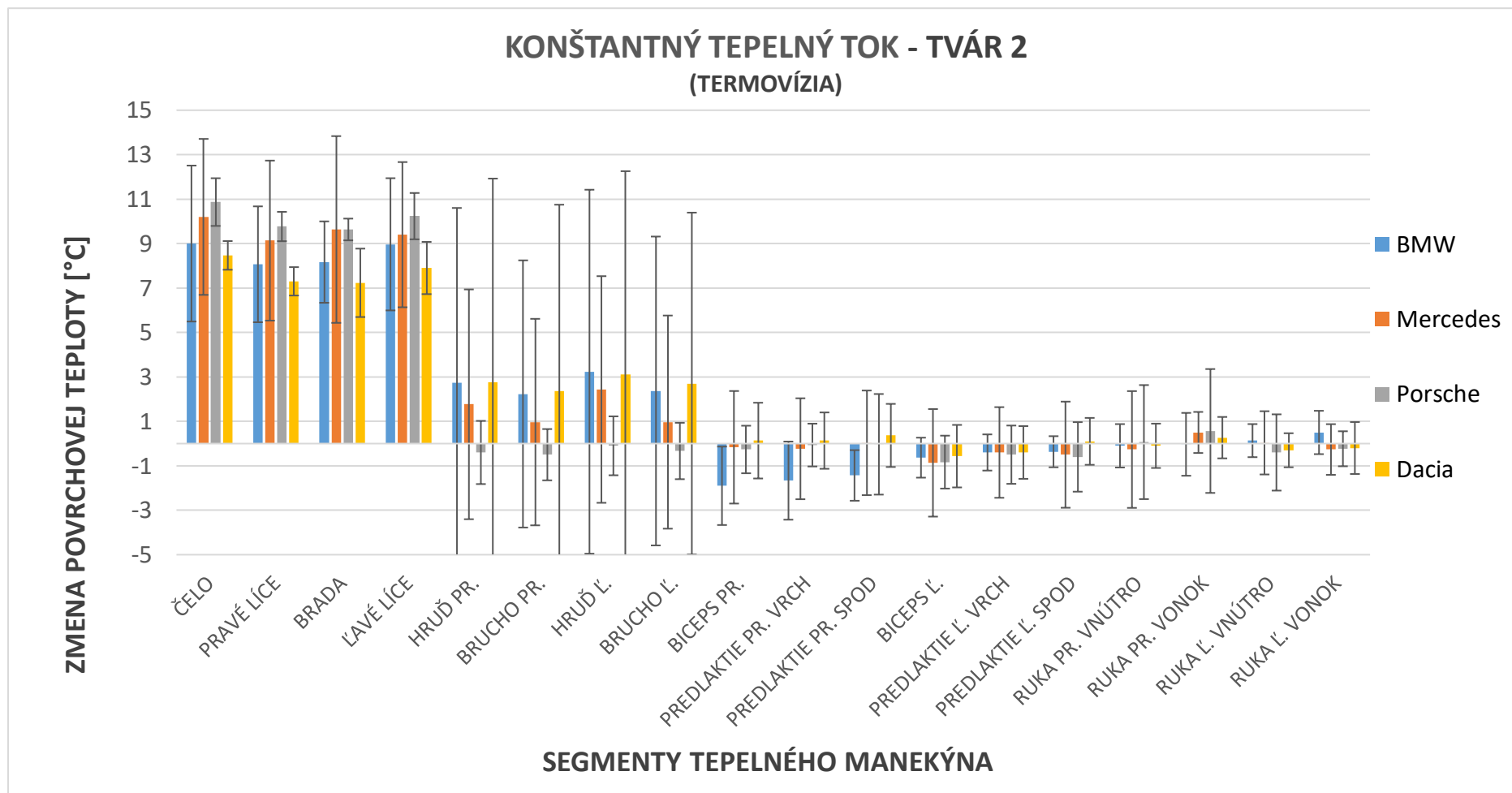


Obr. 50 Rozdelenie segmentov manekýna na menšie časti, pre ktoré bola pomocou termovíznych snímok vyhodnocovaná priemerná povrchová teplota.

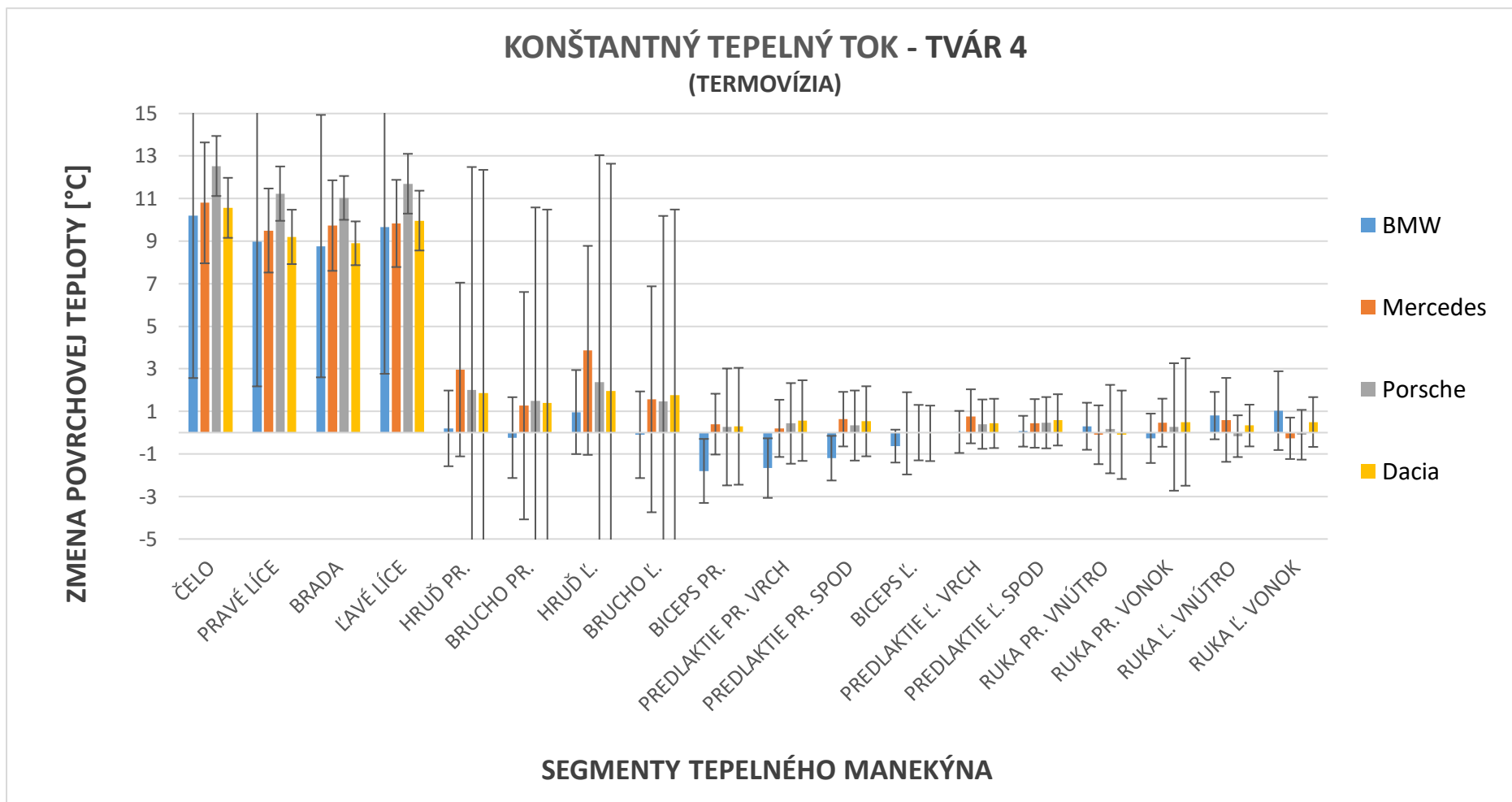
Priemerná povrchová teplota čiastkových častí segmentov bola zo snímok vyhodnocovaná pomocou softvéru Flir Quickreport 1.2 po zadaní okrajových podmienok: emisivity povrchu, teploty vzduchu, strednej radiačnej teploty, vlhkosti vzduchu a vzdialenosti od povrchu. Použité hodnoty emisivity boli pre povrch manekýna 0,97 a pre povrch bavlneného trička 0,77 [40]. Výsledné hodnoty boli vnesené do grafov rovnakým spôsobom, ako to bolo pri údajoch z tepelného manekýna (viď obr. 51 – 55). V prílohách sa nachádzajú aj grafy celkových povrchových teplôt pre jednotlivé prevádzkové stavy (viď prílohy BD). Taktiež sa tam nachádzajú grafy hodnôt okolitej teploty vzduchu a strednej radiačnej teploty (viď prílohy B).



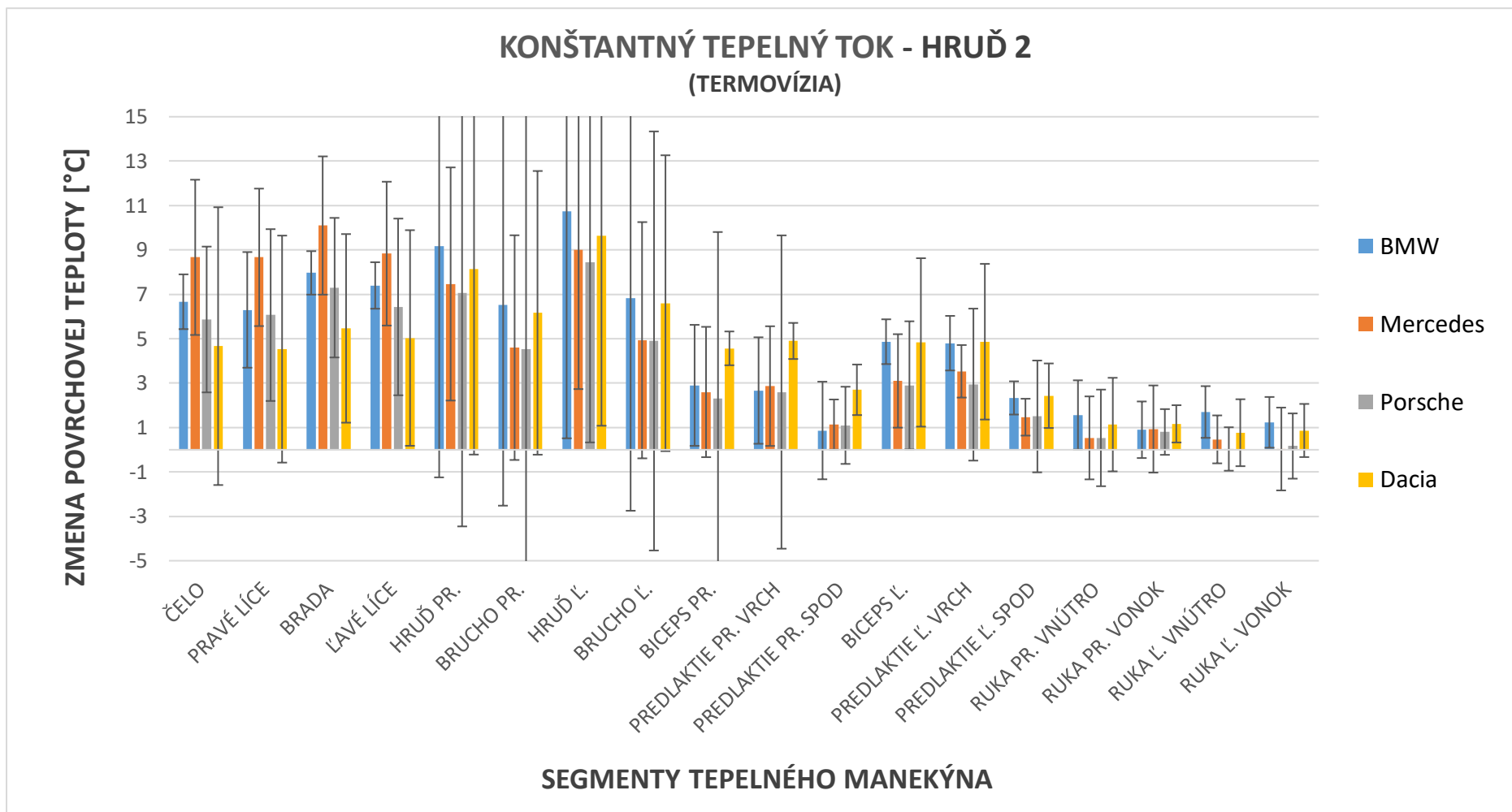
Obr. 51 Hodnoty povrchovej teploty jednotlivých častí segmentov manekýna pri pokojnom stave.



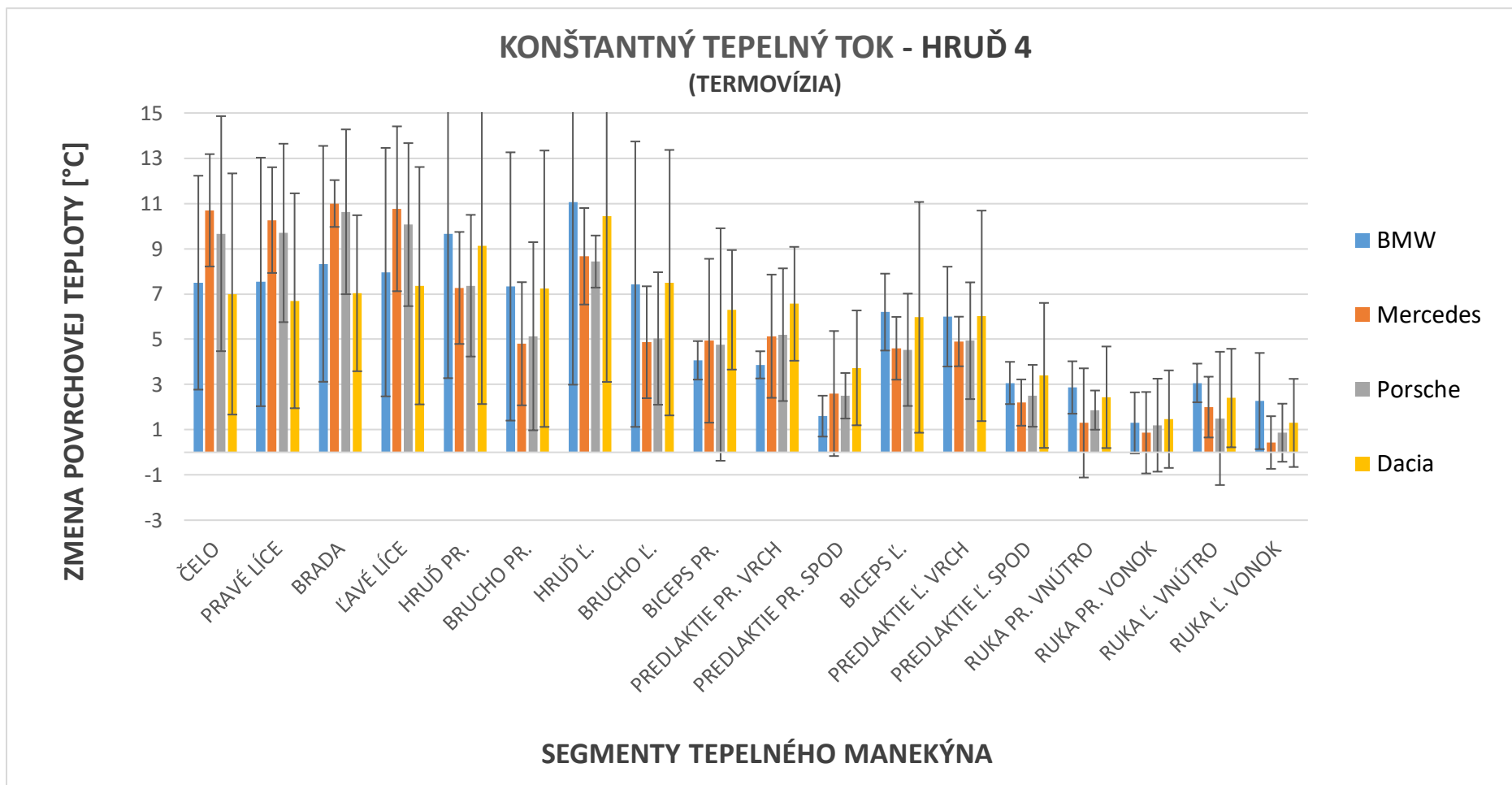
Obr. 52 Zmena hodnôt povrchovej teploty jednotlivých častí segmentov manekýna pri prevádzkovom stave tvár 2 v porovnaní s pokojným stavom.



Obr. 53 Zmena hodnôt povrchovej teploty jednotlivých častí segmentov manekýna pri prevádzkovom stave tvár 4 v porovnaní s pokojným stavom.



Obr. 54 Zmena hodnôt povrchovej teploty jednotlivých častí segmentov manekýna pri prevádzkovom stave hrud' 2 v porovnaní s pokojným stavom.



Obr. 55 Zmena hodnôt povrchovej teploty jednotlivých častí segmentov manekýna pri prevádzkovom stave hrud' 4 v porovnaní s pokojným stavom.



## 8 DISKUSIA VÝSLEDKOV

Hlavné výstupy tejto práce, ktorými je porovnanie ochladzovacieho efektu jednotlivých výustiek dvomi rôznymi metódami, sú znázornené vo forme dvoch typov grafov v závislosti od vyhodnocovanej metódy. Prvou metódou bolo meranie s nastavením na konštantnú povrchovú teplotu, ktorej výstupom sú hodnoty generovaného tepelného toku z jednotlivých segmentov manekýna počas navrhnutých prevádzkových stavov. Jeho nárast v porovnaní s pokojovým stavom reprezentuje spomínaný ochladzovací efekt. Druhou metódou bolo meranie s nastavením na konštantný tepelný tok, u ktorého je ochladzovací efekt reprezentovaný poklesom povrchovej teploty manekýna voči pokojnému stavu. Hodnoty povrchových teplôt boli získavané pomocou manekýna a termovízie.

Pred tým ako je možné z výsledkov vyvodiť konkrétne závery, je potrebné patrične skomentovať neistoty merania, ktoré dosahujú najmä pri hodnotách povrchovej teploty obzvlášť vysoké hodnoty. Prvou z príčin ich vysokých hodnôt je bezpochyby nefunkčnosť klimakomory, ktorá sa odzrkadlila na kolísaní teploty vzduchu a okolitých povrchov. Tento problém bohužiaľ nebolo možné eliminovať, keďže meranie prebiehalo počas najkritickejšieho obdobia koronakrízy a oprava chladiaceho systému nemohla byť včas uskutočnená.

K vysokým neistotám pravdepodobne prispel aj počet opakovaní merania. Ako už bolo povedané, výsledkami sú priemerné hodnoty získané z troch meraní a smerodajná odchýlka v neistote typu A je teda počítaná len z troch hodnôt. Vo veľa prípadoch bol pozorovateľný pomerne veľký a zároveň rovnomerný rozptyl hodnôt (napr. hodnoty tepelného toku pri BMW výustke a prevádzkovom stave tvár 4: 340,2; 324,8 a 366,1 W/m<sup>2</sup>). Otázkou však je, do akej miery takýto rozptyl hodnôt zapríčinila nefunkčnosť klimakomory a teda či rozptyl hodnôt nie je skôr následkom ako príčinou. Nefunkčnosť klimakomory však neovplyvnila bezpečnostný faktor  $k_{UA}$ , ktorý tiež výrazne ovplyvnil veľkosť neistôt. Na základe počtu opakovaní mu bola priradená hodnota 2,3, ktorá by pri vyššom počte opakovaní klesla. Problémom pri vyššom počte opakovaní by bola ale príliš veľká časová náročnosť experimentov.

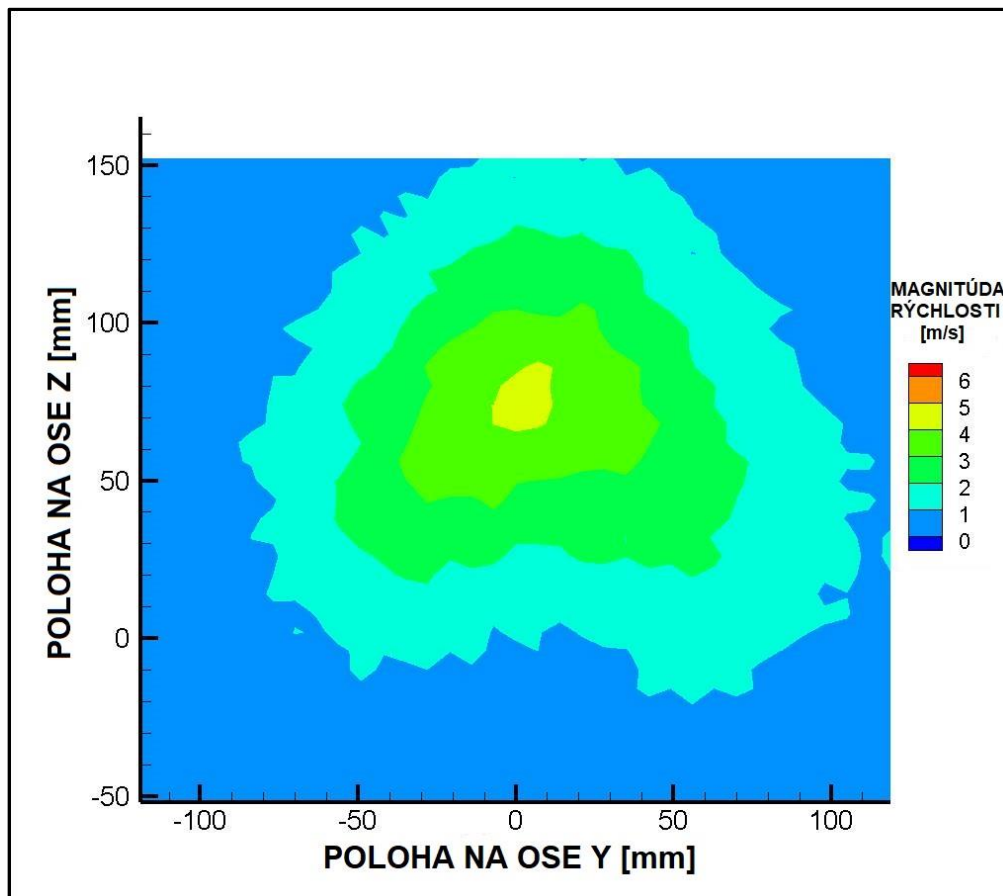
Výsledky z nastavenia na konštantný tepelný tok sú zaťažené ešte väčšími neistotami v porovnaní s tými z nastavenia na konštantnú povrchovú teplotu a to najmä tie získané vyhodnotením termovíznych snímok. Príčin je pravdepodobne viacero. Tou menej zásadnou spôsobujúcou rozdiel v neistotách medzi povrchovými teplotami z manekýna a termovízie je fakt, že presnosť merania povrchovej teploty pomocou termokamery je o niečo menšia v porovnaní s manekýnom ( $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$  vs.  $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ ). Zásadnejším problémom celého merania na konštantný tepelný tok bola doba ustálenia manekýna a smerovanie výustky. Pôvodne navrhnutá doba ustálenia 30 minút sa ukázala ako nedostatočná, čomu nasvedčuje aj fakt, že počas niektorých prevádzkových stavov možno pozorovať dokonca nárast povrchovej teploty segmentov (viď napr. obr. 46, 47), namiesto jej očakávaného poklesu. Nepresnosť smerovania sa prejavila výrazne na výsledkoch z termovízie. Tieto dva javy sú bližšie rozobraté v osobitnej kapitole (viď kapitola 10).

Pri pohľade na výsledky či už vo forme nárastu tepelného toku, alebo vo forme poklesu povrchovej teploty je možné prehlásiť, že ak aj boli pri niektorých prevádzkových stavoch pozorovateľné rozdiely v náraste tepelného toku alebo poklese povrchovej teploty medzi jednotlivými výustkami, v drvivej väčšine prípadov svojou veľkosťou neprekročili pásmo neistôt. Výnimkami boli len tepelný tok z tváre pri prevádzkovom stav hrud' 4, kde možno pozorovať väčší ochladzovací efekt pri Dacia výustke v porovnaní s Porsche (viď obr. 38), a povrchová teplota všetkých štyroch častí tváre pri prevádzkovom stave tvár 2 (viď obr. 52), ktorá naznačuje zase intenzívnejší ochladzovací efekt u Porsche výustky v porovnaní s Dacia výustkou. Taktiež rozdiely v tepelnom pociťe pre jednotlivé segmenty medzi výustkami sú takmer nerozpoznateľné. Tu je však dôležité zdôrazniť, že na testovanie tepelného komfortu neboli dosiahnuté optimálne okrajové podmienky. Podstatne väčšiu výpovednú hodnotu z hľadiska dosahovania tepelného komfortu by komfortné diagramy mali v prípade, že by bola teplota okolia vyššia a cieľom by bolo zmeniť tepelný pocit z nevyhovujúceho na vyhovujúci (a nie naopak, ako to bolo v tomto prípade). V prípade tejto práce slúžia komfortné diagramy ako ukážka vplyvu ochladzovacieho efektu jednotlivých výustiek na výsledný tepelný pocit. Ten bol pri všetkých výustkách prakticky rovnaký, čo koreluje s výsledkami v podobe tepelného toku či povrchovej teploty. Vyššie uvedené tvrdenia nasvedčujú tomu, že hypotézu o vplyve konštrukcie výustky na výsledný ochladzovací efekt (viď kapitola 5) sa nepodarilo potvrdiť. Taktiež je vidno, že vzájomné rozdiely v priemerných hodnotách výsledných tepelných tokov a povrchových teplôt nesledujú nejaký trend, na základe ktorého by sa dalo očakávať, že pri opakovanom meraní a zmenšení neistôt by rozdiely v ochladzovacom efekte medzi výustkami boli pozorovateľné. Je teda nepravdepodobné, že by sa po odstránení nedostatkov merania dospelo k odlišnému záveru.

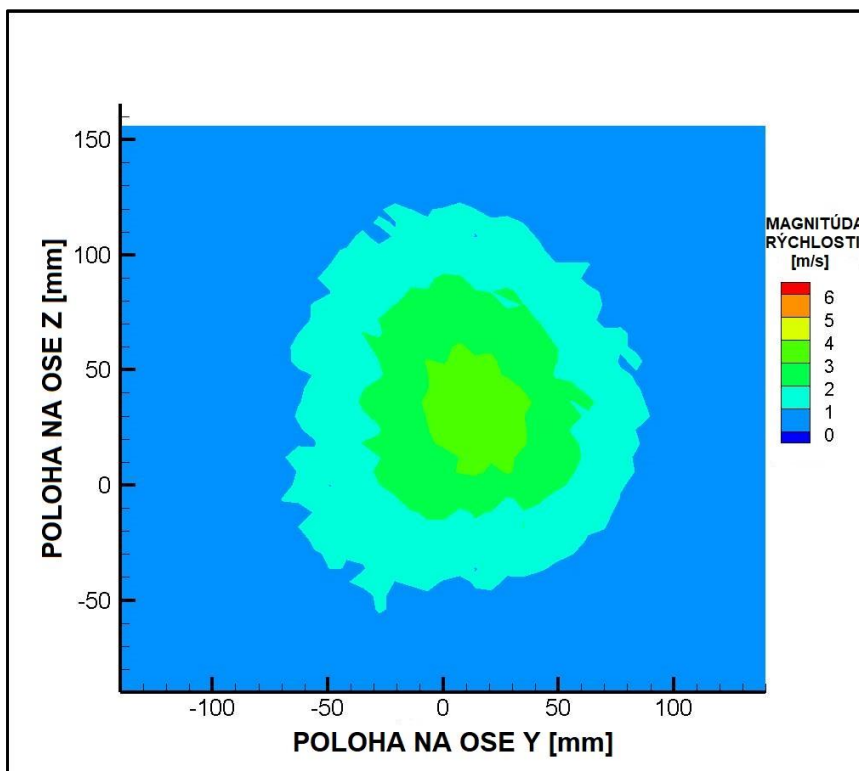
Ďalším zistením, ktoré vyplýva z výsledkov získaných pri smerovaní na tvár, je, že výsledný prúd je bez ohľadu na použitú výustku silne smerový. Ochladzovací efekt je totiž pri tomto smerovaní pozorovateľný len na tvári a do určitej miery na hrudi. Pri smerovaní na hrud' je síce ochladzovací efekt pozorovateľný na väčšine segmentov, no na hrudi a tvári je najvýraznejší. Smerovosť výsledného prúdenia neskôr potvrdili aj výsledky vizualizácie prúdenia (viď kapitola 9).

## 9 VIZUALIZÁCIA RÝCHLOSTNÝCH A PRÚDOVÝCH POLÍ

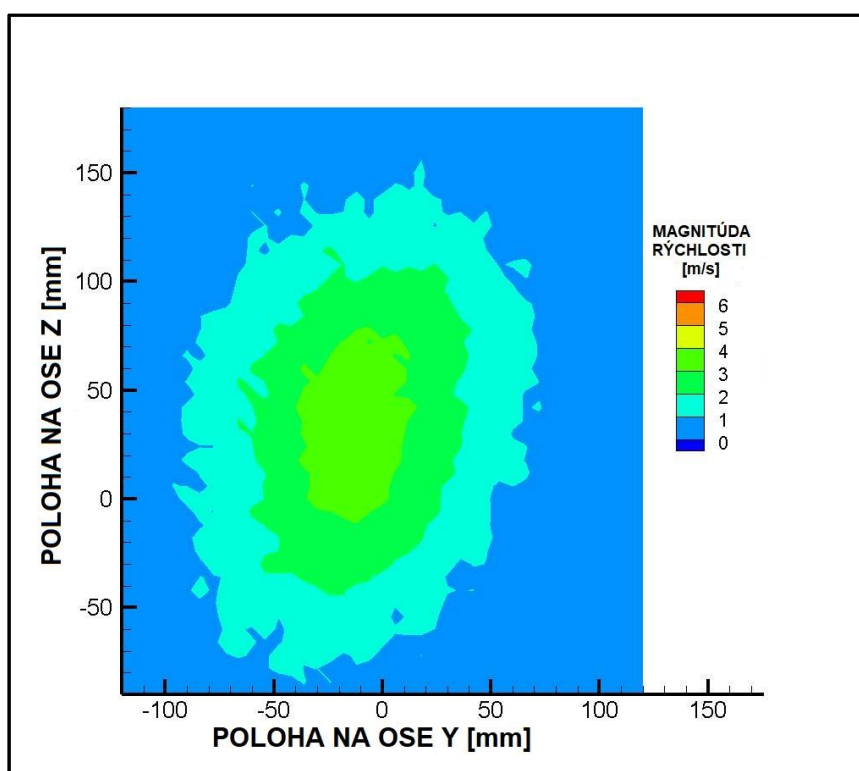
Výsledky, ku ktorým sa dospelo pomocou meraní s tepelným manekýnom, nasvedčujú tomu, že rozdielna konštrukcia výstky nemá zásadný vplyv na výsledný ochladzovací účinok spôsobený zvýšením konvektívneho tepelného toku v dôsledku nútenej konvekcie. Tomuto zisteniu nasvedčovalo aj tvrdenie načerpané z odbornej literatúry, že už v krátkej vzdialenosti od výstupného prierezu výstky nadobúdajú prúdové polia kruhový tvar, nezávisle na tom, akého geometrického tvaru výstupný prierez výstky je (viď kapitola 4.2). Nasledujúce vizualizácie rýchlostných polí, ktoré sú výsledkom DP Bc. Radima Brdečku [41] to taktiež naznačujú.



Obr. 56 Rýchlostné pole vo vzdialenosti 500 mm pred BMW výstkou pri prietoku  $60 \text{ m}^3/\text{hod}$  v rovine kolmej na smer prúdu.



Obr.57 Rýchlostné pole vo vzdialenosti 500 mm pred Mercedes výstokou pri prietoku  $60 \text{ m}^3/\text{hod}$  v rovine kolmej na smer prúdu.



Obr.58 Rýchlostné pole vo vzdialenosti 500 mm pred Porsche výstokou pri prietoku  $60 \text{ m}^3/\text{hod}$  v rovine kolmej na smer prúdu.

Na uvedených vizualizáciách je viditeľné, že aj napriek určitým rozdielom sa tvar všetkých prúdových polí podobá kruhovému. Okrem toho sa jedná o rýchlostné polia vo vzdialenosti 500 mm od výstky, pričom manekýn bol umiestnený ešte o 300 mm ďalej. Je teda možné predpokladať, že rozdiely medzi rýchlostnými poľami boli v bezprostrednej blízkosti manekýna ešte zanedbateľnejšie. Je taktiež nutné spomenúť, že kolega Bc. Radim Brdečko prispôbil hodnotu prietoku možnostiam Laboratória pre vizualizáciu prúdení. V jeho prípade sa jednalo o hodnotu 60 m<sup>3</sup>/hod, t. j. hodnotu o 15 m<sup>3</sup>/hod vyššiu ako bola hodnota prietoku 2 a o 15 m<sup>3</sup>/hod nižšiu, ako bola hodnota prietoku 4, ktoré boli použité pri experimentoch s manekýnom. Na základe vyššieho prietoku v porovnaní s prietokom 2 možno predpokladať, že oblasť prúdu ovplyvnená tvarom výstky siahala do väčšej vzdialenosti ako v prípade meraní s manekýnom. To znamená, že v prípade meraní s manekýnom pri prietoku 2 by rozdiely v tvaroch rýchlostných polí boli pravdepodobne ešte menej detekovateľné. Otázkou však bolo, do akej vzdialenosti bude výstykou ovplyvnená oblasť prúdu siahť pri prietoku 4. Aj to bolo dôvodom na uskutočnenie vizualizácie dymom (viď nasledujúce odstavce).

Okrem tvaru prúdového poľa, treba upozorniť na samotné rozmery plochy meraného rezu prúdu, ktoré boli vo všetkých troch prípadoch približne 200 x 200 mm, čo nasvedčuje tomu, že výsledný prúd je silne smerový a mohol výrazne zasiahnuť len ten konkrétny segment, na ktorý bol nasmerovaný. Túto skutočnosť potvrdzujú aj výsledky z tepelného manekýna.

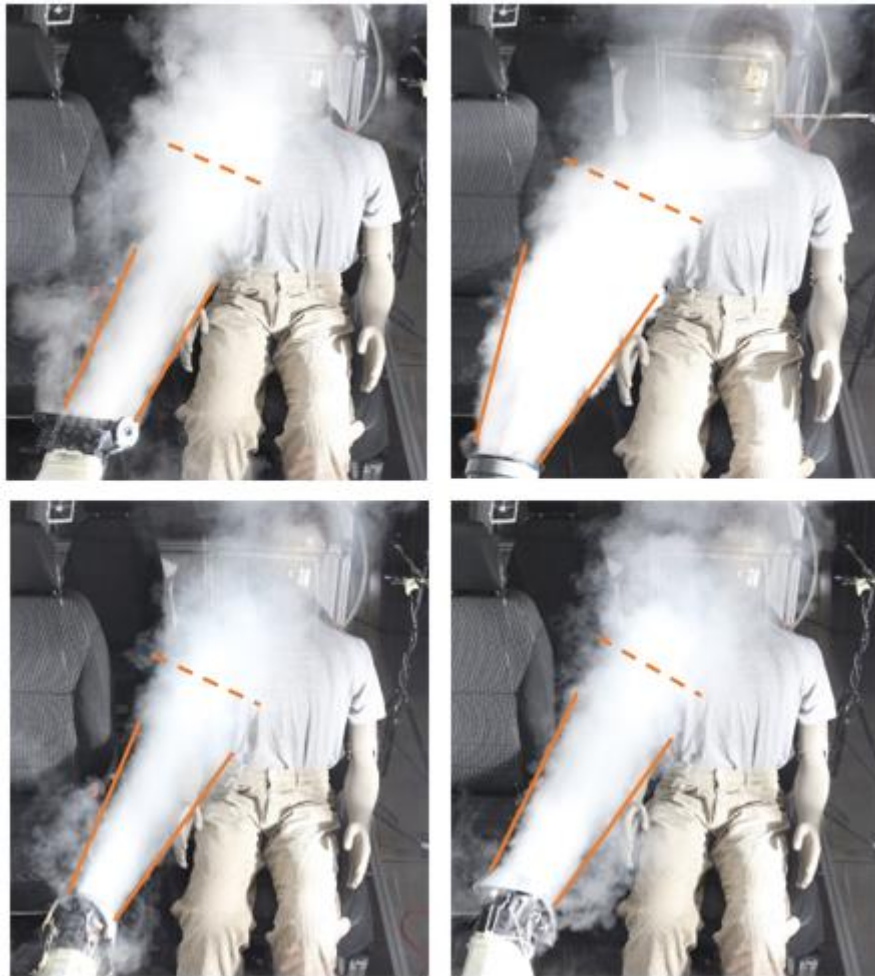
Za účelom preskúmania charakteru prúdu pri prietoku 4 a potvrdenia doposiaľ nadobudnutých výsledkov a záverov, bol navrhnutý doplnkový experiment. Jeho predmetom bolo vizualizovať tvary prúdových polí pomocou dymovej metódy a následne ich porovnať. Experiment bol uskutočnený v klimacomore a pôvodné rozloženie bolo doplnené o potrebné zariadenia (viď obr. 59).



Obr. 59 Rozloženie experimentu: 1 – generátor dymu, 2 – fotoaparát Canon 100, 3 – zdroj svetla, 4 – odsávanie dymu.



V priebehu experimentu bol prietok nastavený na hodnotu 4. Prúd dymu bol presvietený zdrojom svetla a zábery boli snímané spredu (viď obr. 60) a z boku (viď obr. 61).



*Obr. 60 Vizualizácia prúdových polí vytvorených jednotlivými výstkami pomocou dymovej metódy, pohľad spredu. Výstky: vľavo hore – BMW, vpravo hore Dacia, vľavo dole Mercedes, vpravo dole Porsche.*

Vyššie na obrázku sú oranžovou nepretržovanou čiarou približne vyznačené okraje prúdu. Ako možno vidieť, konštrukcia výstky jasne formuje tvar prúdového poľa do určitej vzdialenosti. Treba ešte zdôrazniť, že svoju úlohu zohrávajú nie len rozdiely v tvare, ale aj rozdiely vo veľkosti výstupnej plochy výstky. Z definície objemového prietoku je totiž zrejmé, že v prípade menšej výstupnej plochy výstky z nej vzduch prúdi väčšou rýchlosťou [42]. Výstupná plocha je v prípade Porsche výstky najväčšia, čo vidno tak na šírke prúdu (viď obr. 61) ako do istej miery aj na rýchlostnom poli (viď obr. 58). Prerušovanou čiarou je naznačený začiatok oblasti, v ktorej už vplyv konštrukcie výstky na tvár prúdu prestáva byť pozorovateľný. Rovnaký charakter prúdenia možno pozorovať aj pri záberoch z boku (viď obr. 61).



Obr. 61 Vizualizácia prúdových polí vytvorených jednotlivými výstkami pomocou dymovej metódy, pohľad z boku. Výustky postupne zhora: BMW, Dacia, Mercedes, Porsche.

## 10 ZHRNUTIE POZNATKOV A NÁVRHY DO BUDÚCNA

Ako už bolo v kapitole 8 načrtnuté, smerovanie a navrhnutá doba ustálenia sa zásadným vplyvom podpísali na výsledných neistotách merania. Z vizualizácií dymom je pozorovateľné, že sa manekýn nachádzal mimo oblasti výrazne ovplyvnenej konštrukciou výustky. V tejto oblasti bolo prúdenie silne turbulentné, čo sťažovalo nájdenie jadra prúdu a tým aj presné doladenie smerovania výustky. Taktiež pri pohľade na porovnanie teplotného poľa tváre medzi jednotlivými výustkami pri prevádzkovom stave tvár 2 (viď obr. 49) je rozpoznateľnosť miesta, kam dopadalo jadro prúdu, len veľmi malá. Avšak, táto miera presnosti sa nejavila ako problém pri získavaní dát z tepelného manekýna. Povrchová teplota jeho segmentov je výsledkom integrácie cez celú ich plochu. Vzhľadom na silnú smerovosť prúdu sa jemné odchýlky smerovania výustky na hodnotách povrchovej teploty celého segmentu prejavili len minimálne. Hlavnou príčinou neistôt tu bola nefunkčnosť klimakomory. To dokazuje aj fakt, že v prípade výustiek Dacia a Porsche menší rozptyl hodnôt teploty vzduchu a strednej radiačnej teploty koreluje s nižšími hodnotami neistôt generovaného tepelného toku, pretože v dobe ich merania bola komora v činnosti a teplota okolia mala pre všetky opakované merania len minimálny rozptyl. Presne naopak je to v prípade Mercedes výustky (viď celé prílohy A).

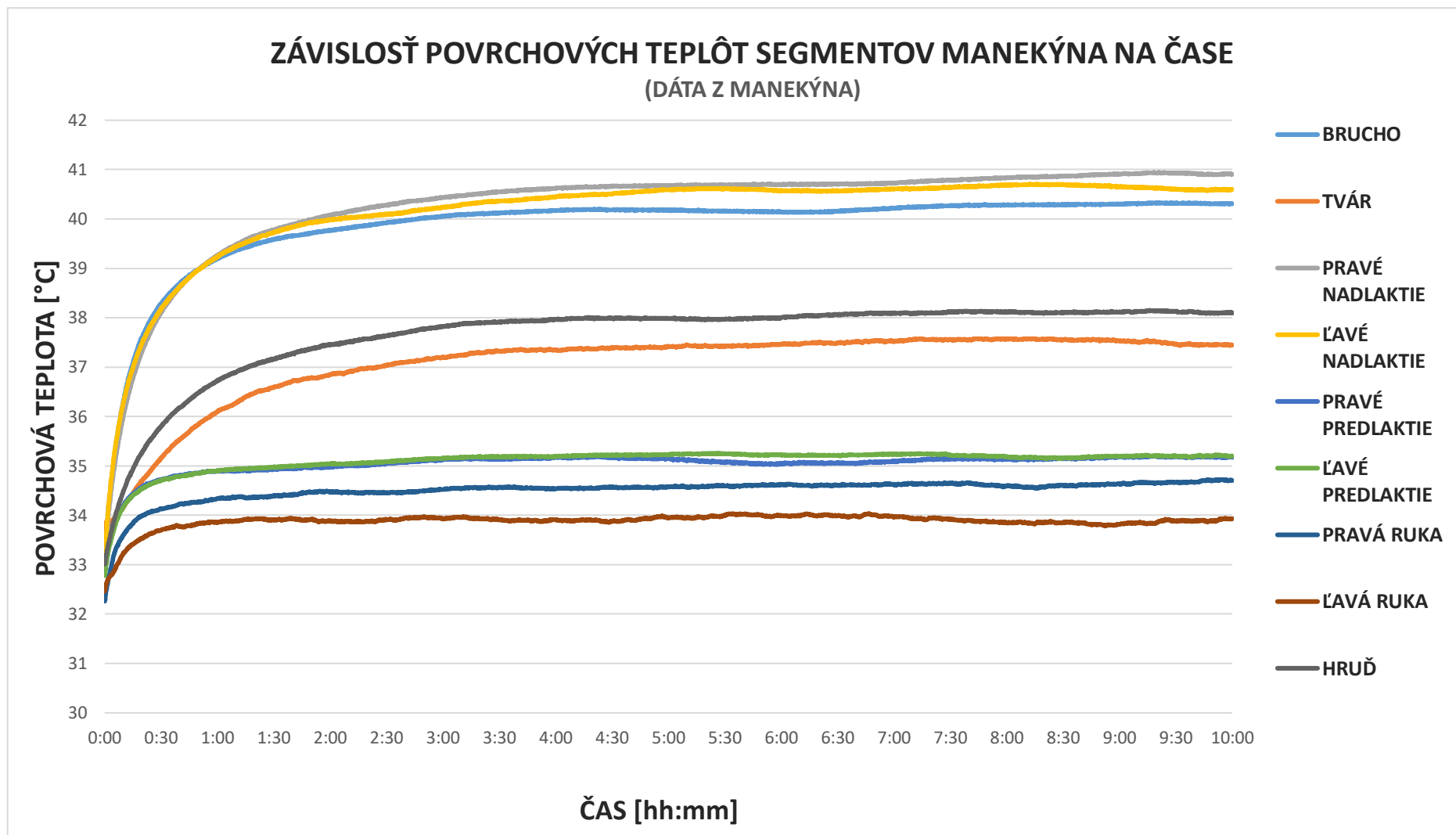
Inak to bolo ale pri výsledkoch z termovízie. Úmysel získať údaje z detailnejšie rozdeleného povrchu manekýna sa ukázal v dôsledku nedostatočnej možnosti smerovania výustky v rámci segmentu ako neuskutočiteľný. To je dobre pozorovateľné na povrchových teplotách hrude, brucha a tváre (viď prílohy BD).

Hlavným nedostatkom merania na konštantný tepelný tok bola však nedostatočná doba na ustálenie manekýna. Na obr. 39 a 40 vidno, ako povrchová teplota na prúdom nezasiahnutých segmentoch v priebehu experimentu ešte narástla. Za účelom zistiť, koľko reálne trvá konečné ustálenie manekýna, boli vykreslené povrchové teploty v závislosti na čase získané meraním, počas ktorého bol manekýn zapnutý na konštantný tepelný tok počas celej noci. Graf predstavuje časových úsek predstavujúci prvých 10 hodín z merania (viď obr. 62). Meranie sa uskutočnilo bezprostredne po inom meraní s nastavením na konštantnú povrchovú teplotu, kvôli čomu začínajú povrchové teploty na hodnote 34°C. Pre predstavu koľko by trvalo nahriať manekýna z teploty rovnajúcej sa teplote okolia, t. j. približne 20°C, je potrebné pripočítať k uvedeným časom ešte 2 hodiny (v prípade nahrievania spôsobom 2 hodiny konštantná povrchová teplota + zvyšok času konštantný tepelný tok). Ako je vidno z grafu obr. 62, povrchové teploty predlaktí a rúk boli ustálené približne po 1 hodine od začiatku merania (3 hodiny pri uvažovaní nahrievania z teploty rovnajúcej sa teplote okolia). V prípade ostatných segmentov k tomu došlo až po približne 3 hodinách od začiatku merania (5 hodinách pri nahrievaní z teploty rovnajúcej sa teplote okolia).

Na základe vyššie uvedeného možno prehlásiť, že časový interval potrebný na prvotné nahriatie manekýna pri nastavení na konštantný tepelný tok predstavuje aspoň 5 hodín. Čo sa týka časového intervalu potrebného na ustálenie pri zmenách prevádzkových stavov, ten by bolo vhodné experimentálne stanoviť. Je však pravdepodobné, že v tejto DP definovaný interval 30 minút nebol dostatočný.



Problémom, ktorý by však pri predĺžení doby na ustálenie nastal, by bola prílišná časová náročnosť experimentov a to najmä v porovnaní s nastavením na konštantnú povrchovú teplotu. Z tohto dôvodu je možné považovať túto metódu za nevyhovujúcu pre experimenty takéhoto charakteru. Taktiež podľa konzultácie s vedúcim DP sa v priemyselnej praxi práve z dôvodu časovej náročnosti táto metóda prakticky nepoužíva, pretože časová náročnosť a cena experimentov by boli neúnosné a to najmä pri meraniach uskutočňovaných u zákazníka (napr. meranie kvality prostredia v kabíne vozidla v klimacomore u zákazníka).



Obr. 62 Časová závislosť povrchových teplôt jednotlivých segmentov manekýna zaznamenaná počas nočného merania pri nastavení na konštantný tepelný tok a pokojnom stave (ventilátor a klimakomora vypnuté).

## 11 ZÁVER

Cieľom tejto diplomovej práce bolo overiť, či odlišná konštrukcia výustiek vetracieho systému automobilu má vplyv na výslednú hustotu konvektívneho tepelného toku z ľudského tela do jeho okolia. Predmetom skúmania boli tri výustky poskytnuté firmou Fischer Automotive Systems s.r.o. určené pre vozidlá značiek BMW, Mercedes a Porsche, a jedna referenčná výustka určená pre vozidlá značky Dacia, ktorou OTTP disponuje.

Úvodná časť práce sa zaoberá popisom dejov odohrávajúcich sa na pozadí nie len človeka cestujúceho v automobile. Začína metabolickými procesmi, ktoré sú zdrojom tepla vnútri ľudského tela. Na tie nadväzuje mechanizmami prenosu tepla, ktorými sa toto prenáša z vnútra tela do jeho okolia. Ďalej vysvetľuje, aký to má vplyv na tepelný pocit človeka, aké ďalšie faktory naň majú vplyv (napr. rýchlosť prúdenia vzduchu v okolí človeka) a akými termoregulačnými mechanizmami sa telo usiluje o dosiahnutie optimálneho stavu. Úvodnú časť uzatvára teória prúdenia popisujúca typy prúdení, predovšetkým v prípade prívodu vzduchu do uzavretého priestoru, tak ako to je v prípade kabíny automobilu. Dôležitým zistením nadobudnutým štúdiom odbornej literatúry je, že bez ohľadu na tvar výstupného prierezu výustky, v určitej vzdialenosti od nej nadobudne prúd kruhovitý tvar.

V druhej časti práce bola zadefinovaná hlavná pracovná hypotéza a navrhnutá séria experimentov, ktorých úlohou bolo hypotézu potvrdiť alebo vyvrátiť. Návrh metodiky zahrňoval návrh meracej trate, popis jednotlivých jej komponentov a popis výroby prechodky spájajúcej výustku s prívodným vzduchovodom. Pre túto diplomovú prácu bolo zvolené meranie s tepelným manekýnom Newton v nastavení na konštantnú povrchovú teplotu a v nastavení na konštantný tepelný tok. Výstupom merania pri prvom nastavení boli hodnoty generovaného tepelného toku, resp. ich nárast v porovnaní s pokojovým stavom v dôsledku zvýšenej intenzity konvekcie. Pri druhom nastavení boli zase výstupom povrchové teploty segmentov manekýna, resp. ich pokles. Tie boli odčítané pomocou manekýna samotného a pre detailnejšie rozdelenie povrchu bola použitá termokamera a softvér Flir Quickreport.

Tretia časť práce sa venuje popisu priebehu samotného experimentu, prezentuje namerané výsledky a aplikuje ich na pracovnú hypotézu. Nadobudnuté výsledky, predovšetkým hodnoty povrchových teplôt boli zaťažené pomerne veľkými neistotami. Tie boli spôsobené najmä nefunkčným chladením klimakomory, čo spôsobilo kolísanie teploty vzduchu a teploty okolitých povrchov. Ďalšími príčinami bola presnosť smerovania, ktorá sa javila ako nedostatočná v prípade rozdelenia povrchu na časti menšie, ako sú segmenty manekýna. Hlavnou príčinou neistôt pri nastavení na konštantný tepelný tok bola však príliš krátka doba na ustálenie manekýna pri nahrievaní, zmene intenzity ventilácie či zmene smerovania. Jej predĺženie by však muselo byť niekoľkonásobkom doby 30 minút zvolenej v DP, čo by spôsobilo prílišnú časovú náročnosť, kvôli ktorej sa táto metóda nejaví ako vhodná na experimenty tohto charakteru.

Z výsledkov práce je vidno, že v drvivej väčšine prípadov rozdiely v ochladzovacom efekte medzi jednotlivými výustkami spadali do intervalu neistôt

merania. Autor práce si je vedomý zásadných faktorov, ktoré prispeli ku zvýšeniu neistôt merania (nefunkčnosť klimakomory, neistota smerovania prúdu, doba nahrievania manekýna pri metóde na konštantný tepelný tok), avšak priemerné hodnoty tepelných tokov a povrchových teplôt nesledujú nejaký trend, na základe ktorého by sa dalo predpokladať, že pri zmenšení neistôt merania by boli jednoznačné rozdiely v ochladzovacom efekte medzi jednotlivými výustkami pozorovateľné. Za účelom potvrdenia alebo vyvrátenia týchto záverov boli výsledky tejto práce porovnané s výsledkami diplomovej práce Bc. Radima Brdečku. Ním poskytnuté vizualizácie vektorových polí popisujúce magnitúdu rýchlosti v reze kolmom na smer prúdu vo vzdialenosti 500 mm od výustky dokazovali, že v takej vzdialenosti sú si prúdové polia svojim tvarom a veľkosťami rýchlostí v jednotlivých bodoch už veľmi podobné. Okrem toho bol manekýn umiestnený ešte o 300 mm ďalej od výustiek, čím sa dostal do oblasti, v ktorej sú rozdiely v jednotlivých prúdových poliach pravdepodobne ešte menej významné. Na overenie tohto predpokladu a na ďalšie potvrdenie všetkého vyššie uvedeného bola uskutočnená vizualizácia dymom. Zo snímok prúdových polí vidno, že parametre prúdových polí vytvorených jednotlivými výustkami sú v blízkosti manekýna veľmi podobné a neboli pozorované žiadne zásadné rozdiely, ktoré by súviseli s konštrukčnými vlastnosťami jednotlivých výustiek.

Z vyššie uvedených výsledkov je možné považovať hlavnú pracovnú hypotézu za nepotvrdenú. Z doposiaľ získaných dát je možné usudzovať, že rozdiely v konštrukcii výustky neovplyvňujú generované prúdové pole natoľko, že by sa to prejavovalo na výslednej intenzite prenosu tepla z ľudského tela.

Pre prípadné pokračovanie v tejto experimentálnej téme by bolo nutné zopakovať experimenty pri striktnom dodržaní navrhnutých parametrov experimentu a vylepšiť predovšetkým metódu opakovateľného presného nastavenia smerovania prúdu z rôznych konštrukčných typov výustiek. Ďalej by sa vzhľadom k časovej náročnosti mali opakované experimenty sústrediť na metódu konštantnej povrchovej teploty, pretože metóda s konštantným tepelným tokom je z dôvodu neúmernej časovej náročnosti prakticky nepoužiteľná.

## 12 ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

- [1] HÖPPE, Peter. Different aspects of assessing indoor and outdoor thermal comfort. *Energy and Buildings* [online]. 2002, July 2002, 34(6), 661-665 [cit. 2020-01-15]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778802000178>
- [2] ANSI/ASHRAE. (2017). ANSI/ASHRAE Standard 55-2017: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. *ASHRAE Inc.*, 2017, 66. <https://doi.org/ISSN 1041-2336>
- [3] PARSONS, Ken. *Human Thermal Environments*. 3. Boca Raton, FL 33487-2742: Taylor & Francis Group, 2002. ISBN 978-1466595996.
- [4] Znárodnenie tepelnej rovnováhy. In: PARSONS, Ken. *Human Thermal Environments*. 3. Boca Raton, FL 33487-2742: Taylor & Francis Group, 2002. ISBN 978-1466595996.
- [5] RYE, Connie et al. *Biology*. Houston, Texas: OpenStax, 2013. ISBN 978-1-947172-02-9.
- [6] Hodnota metabolismu. In: *Tzbinfo* [online]. Praha: Topinfo, 2001 [cit. 2020-03-07]. Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/vnitri-prostredi/569-hodnota-metabolismu>
- [7] OSILLA, Eva V. a Sandeep SHARMA. *Physiology, Temperature Regulation* [online]. 16 March 2019 [cit. 2020-03-25]. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK507838/>
- [8] HOLLAND, Kimberly. *Thermoregulation* [online]. 22 September 2016 [cit. 2020-03-25]. Dostupné z: <https://www.healthline.com/health/thermoregulation>
- [9] Meseguer, J., Pérez-Grande, I., Sanz-Andrés, A., Meseguer, J., Pérez-Grande, I., & Sanz-Andrés, A. (2012). Thermal radiation heat transfer. *Spacecraft Thermal Control*, 73–86. <https://doi.org/10.1533/9780857096081.73>
- [10] Engineering ToolBox, (2010). *Water - Heat of Vaporization*. [online] Dostupné z: [https://www.engineeringtoolbox.com/water-properties-d\\_1573.html](https://www.engineeringtoolbox.com/water-properties-d_1573.html) [cit. 2020-01-15].
- [11] Prispěvatelé WikiSkript, *Tepelné ztráty organismu* [online], , c2018, Datum poslední revize 18. 06. 2018, 17:05 UTC, [citováno 15. 01. 2020] Dostupné z: [https://www.wikiskripta.eu/index.php?title=Tepeln%C3%A9\\_ztr%C3%A1ty\\_organismu&oldid=407678](https://www.wikiskripta.eu/index.php?title=Tepeln%C3%A9_ztr%C3%A1ty_organismu&oldid=407678)

- [12] ČSN EN ISO 7726: 2002. Ergonomie tepelného prostředí – Přístroje pro měření fyzikálních veličin. Praha: Český normalizační institut, 2002. 56s.
- [13] KOŠÍKOVÁ, J. Soustava hodnocení tepelného stavu prostředí a analýza jejich nejistot měření. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 149 s. Vedoucí disertační práce Ing. František Vdoleček, CSc..
- [14] DJAMILA, Harimi, Chi-Ming CHU a Sivakumar KUMARESAN. Effect of Humidity on Thermal Comfort in the Humid Tropics. *Journal of Building Construction and Planning Research* [online]. 2014, (2), 109-117 [cit. 2020-01-15]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/276039303\\_Effect\\_of\\_Humidity\\_on\\_Thermal\\_Comfort\\_in\\_the\\_Humid\\_Tropics](https://www.researchgate.net/publication/276039303_Effect_of_Humidity_on_Thermal_Comfort_in_the_Humid_Tropics)
- [15] Indraganti, Madhavi, Ryoza Ooka and Hom B. Rijal. "Significance of air movement for thermal comfort in warm climates : A discussion in Indian context." [online] (2012). Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/paper/Significance-of-air-movement-for-thermal-comfort-in-Indraganti-Ooka/4e0a887ca8c5ab379d697f27c4b93c699160977e#citing-papers>
- [16] GOLDMAN, Alvin I. a Board of Governors Professor of Philosophy and Cognitive Science Alvin I Goldman. *Simulating Minds: The Philosophy, Psychology, and Neuroscience of Mindreading*. New York: Oxford University Press, 2006. ISBN 9780195138924.
- [17] Ing. Vyoralová. In: *tzv-info.cz* [online] 14.6.2001 [cit. 2020-01-16] Dostupné z: <https://vetrani.tzv-info.cz/vnitri-prostredi/576-izolace-obleceni>
- [18] FIŠER, Jan. *Optimalizace mikroklimatu v kabinách malých dopravních letadel*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav, Odbor termomechaniky a techniky prostředí, 2011. 162 s. 7 příloh, Disertační práce. Vedoucí práce prof. Ing. MIROSLAV JÍCHA, CSc.
- [19] Guenther Sebastian. [*Grafické znázornění PPD v závislosti na PMV*]. In: *simscale.com* [online] November 7th, 2019 [cit. 2020-01-16] Dostupné z: <https://www.simscale.com/blog/2019/09/what-is-pmv-ppd/>
- [20] ŠÍP, J. *Aplikace rychlostní sondy se žhavenými drátky při měření rychlostního pole za automobilovou vyústkou*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 103 s. Vedoucí diplomové práce Ing. František Lízal, Ph.D.
- [21] *2001 ASHRAE Handbook Fundamentals*. SI. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating & A-C Engineers, 2001. ISBN 1-883413-88-5.

- [22] RYŠKA, V. *Numerické modelování šíření znečišťujících látek v ovzduší*. Ostrava: Technická Universita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, 2015. 59 s. Vedoucí diplomové práce doc. Mgr. Vít Vondrák, Ph.D.
- [23] YASSINE, Tsa, Nizar QUARTI a Ammi MEHDI. *Psychophysical study of air jet based tactile stimulation: World Haptics Conference (WHC), 2013* [online]. In: . s. 640 [cit. 2020-03-19]. DOI: 10.1109/WHC.2013.6548483. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/261234748\\_Psychophysical\\_study\\_of\\_air\\_jet\\_based\\_tactile\\_stimulation](https://www.researchgate.net/publication/261234748_Psychophysical_study_of_air_jet_based_tactile_stimulation)
- [24] FOJTLÍN, Miloš, Jan FIŠER a Miroslav JÍCHA. Determination of convective and radiative heat transfer coefficients using 34-zones thermal manikin: Uncertainty and reproducibility evaluation. *Experimental Thermal and Fluid Science* [online]. 2016, 77, 257-264 [cit. 2020-03-02]. DOI:0.1016/j.expthermflusci.2016.04.015. ISSN 08941777. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0894177716300917>
- [25] FIŠER, Jan. Tepelný manekýn Newton. *Energetické fórum* [online]. b.r. [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: <http://www.energetickeforum.cz/fsi-vut-v-brne/pristrojove-vybaveni/tepelny-mankyn-newton>
- [26] FOJTLÍN, M. Stanovení součinitelů přenosu tepla radiací a konvekci z povrchu tepelného manekýna. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 63 s. Vedoucí diplomové práce Bc. Ing. Jan Fišer, Ph.D.
- [27] ŠTĚTINA, Josef. Klimatická komora. *Energetické fórum* [online]. b.r. [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: <http://www.energetickeforum.cz/fsi-vut-v-brne/laboratore/klimaticka-komora>
- [28] LÍZAL, František, Ondřej PECH, Jan JEDELSKÝ, Ján TUHOVČÁK a Miroslav JÍCHA. *The automotive ventilation test case: Investigation of the velocity field downstream of a benchmark vent using smoke visualization and hot-wire anemometry* [online]. 17 April 2018, , 2146-2160 [cit. 2020-03-19]. DOI: 10.1177/0954407018776137. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/325593605\\_The\\_automotive\\_ventilation\\_test\\_case\\_Investigation\\_of\\_the\\_velocity\\_field\\_downstream\\_of\\_a\\_benchmark\\_vent\\_using\\_smoke\\_visualization\\_and\\_hot-wire\\_anemometry](https://www.researchgate.net/publication/325593605_The_automotive_ventilation_test_case_Investigation_of_the_velocity_field_downstream_of_a_benchmark_vent_using_smoke_visualization_and_hot-wire_anemometry)
- [29] FIŠER, Jan, Jan JEDELSKÝ, Tomáš VACH, Matěj FORMAN, and Miroslav JÍCHA. "Comparison of CFD simulations and measurements of flow affected by coanda effect." [online] In *EPJ Web of Conferences*, vol. 25, p. 01015. EDP Sciences,2012. [cit. 2020-06-12] Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/256076908\\_Comparison\\_of\\_CFD\\_simulations\\_and\\_measurements\\_of\\_flow\\_affected\\_by\\_coanda\\_effect](https://www.researchgate.net/publication/256076908_Comparison_of_CFD_simulations_and_measurements_of_flow_affected_by_coanda_effect)

- [30] *Testo 480 - prístroj na meranie klímy* [online]. [cit. 2020-03-07]. Dostupné z: <https://www.testo.com/sk-SK/testo-480/p/0563-4800>
- [31] *Testo 480 multifunkční přístroj pro měření klimatu*. [online]. In: . [cit. 2020-03-07]. Dostupné z: <https://www.geoserver.cz/meridla-velicin-testo-teplota-tlak-analyzatory-sondy/anemometry/testo-480-multifunkcni-pristroj-pro-mereni-klimatu-testo-480>
- [32] *COMPACT INFRARED CAMERAS* [online]. [cit. 2020-03-07]. Dostupné z: [https://cz.mouser.com/datasheet/2/461/FLIRi3\\_i5\\_i7FLIR-1310543.pdf](https://cz.mouser.com/datasheet/2/461/FLIRi3_i5_i7FLIR-1310543.pdf)
- [33] *FLIR i7 Building and Industrial Thermal Imagers* [online]. In: . [cit. 2020-03-07]. Dostupné z: <https://www.tequipment.net/fliri7.html>
- [34] *ISO 14505 ČSN EN: Ergonomie tepelného prostředí - Hodnocení tepelného prostředí ve vozidlech*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [35] VAN SOMEREN, Eus J.W. *Handbook of the Biology of Aging*. Eight Edition. Amsterdam: Elsevier Science Publishing Co, 2015. ISBN 9780124115965.
- [36] PALENČÁR, Rudolf, František VDOLEČEK a Martin HALAJ. Nejistoty v měření I: vyjádřování nejistot. *Automa: časopis pro automatizaci a techniku* [online]. Ústí nad Labem, 2001, 2001(7-8), 5 [cit. 2020-05-21]. ISSN ISSN 1210-9592. Dostupné z: [http://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf\\_articles/10960.pdf](http://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/10960.pdf)
- [37] NĚMEČEK, Pavel. *Nejistoty měření*. Praha: Česká společnost pro jakost, 2008. ISBN 978-80-02-02089-9.
- [38] DOČEKAL, Martin. Experimentální zjištění doby nahřívání tepelného manekýna pro dosažení tepelné rovnováhy s okolním prostředím Brno, 2019, 79 s. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117305>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Jan Fišer.
- [39] GOODFELLOW, Howard D. a Esko TÄHTI. *Industrial Ventilation Design Guidebook*. San Diego: Academic Press, 2001. ISBN 978-0-12-289676-7.
- [40] Engineering ToolBox, (2003). *Emissivity Coefficients Materials*. [online] Dostupné z: [https://www.engineeringtoolbox.com/emissivity-coefficients-d\\_447.html](https://www.engineeringtoolbox.com/emissivity-coefficients-d_447.html) [cit. 2020-06-09].
- [41] BRDEČKO, Radim. Větrací systém automobilu - porovnání vlivu okrajových podmínek na proudění z různých typů vyústek. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/121459>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce František Lízal.



- [42] HALAJ, Martin a Eva KUREKOVÁ. Meranie prietoku, pretečeného množstva. *ATP Journal: Princípy automatizácie* [online]. 2011, 11/2011, 2011(11), 18 [cit. 2020-05-25]. ISSN ISSN 1336-233X. Dostupné z: <https://ooze.fberg.tuke.sk/wp-content/uploads/2017/12/prietok-1.pdf>

# ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK

## Symbole

$\bar{t}_r$	stredná radiačná teplota okolitých povrchov	[K]
$\dot{Q}_C$	tepelný tok kondukciou	[W]
$\dot{Q}_E$	tepelný tok vyparovaním	[W]
$\dot{Q}_K$	tepelný tok konvekciou	[W]
$\dot{Q}_R$	tepelný tok radiáciou	[W]
$\frac{dv}{dy}$	gradient rýchlosti v smere kolmom na smer pohybu	[s]
$p_o$	parciálny tlak vodnej pary v okolitom prostredí	[Pa]
$p_p''$	tlak nasýtenej vodnej pary pri teplote pokožky	[Pa]
$\dot{q}$	merný tepelný tok	[W·m <sup>-2</sup> ]
$u_{Ax}$	neistota typu A meranej veličiny x	[podľa veličiny]
$\bar{w}$	priemerná hodnota rýchlosti vzduchu	[m·s <sup>-1</sup> ]
$\bar{x}$	aritmetický priemer všetkých nameraných hodnôt	[podľa veličiny]
$x_i$	výsledok i-teho merania	[podľa veličiny]
$\alpha$	súčiniteľ prestupu tepla	[W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
$A_i$	súčiniteľ citlivosti zdroja neistoty typu B	[-]
$A_R$	plocha prierezu ohraničeného priestoru v normálovom smere voči prúdu	[m <sup>2</sup> ]
$C$	celkový tepelný tok vedením	[W]
$c$	merná tepelná kapacita	[J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
$d$	charakteristický rozmer	[m]
$D$	vonkajší priemer gule	[m]
$E$	celkový tepelný tok vyparovaním	[W]
$e$	emisivita	[-]
$h$	merná metabolická produkcia tepla	[W·m <sup>-2</sup> ]
$I_{cl}$	tepelný odpor	[m <sup>2</sup> ·K·W <sup>-1</sup> ]
$K$	celkový tepelný tok prúdením	[W]
$k$	súčiniteľ vychádzajúci zo zákona rozdelení	[-]
$k_r$	koeficient rozšírenia intervalu neistôt	[-]
$k_{UA}$	bezpečnostný faktor	[-]
$I$	merné tepelné straty do okolitého prostredia	[W·m <sup>-2</sup> ]
$L$	hrúbka steny, charakteristický rozmer telesa	[m]
$l_{23}$	skupenské teplo vyparovania	[J]
$M$	energetická produkcia metabolizmu	[W]
$\nu$	kinematická viskozita	[m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> ]
$R$	celkový tepelný tok žiarením	[W]
$R_a$	drsnosť povrchu	[μm]
$R_{cl}$	tepelný odpor odevu	[m <sup>2</sup> ·K·W <sup>-1</sup> ]
$Re$	Reynoldsovo číslo	[-]

S	plocha menšieho z telies	[m <sup>2</sup> ]
S	plocha obtekaného povrchu	[m <sup>2</sup> ]
S	akumulačný člen	[W]
S	plocha steny	[m <sup>2</sup> ]
s	smerodajná odchýlka rýchlosti vzduchu	[m·s <sup>-1</sup> ]
T <sub>1</sub>	vyššia z teplôt, teplota teplejšieho povrchu	[K]
T <sub>2</sub>	nižšia z teplôt, teplota chladnejšieho povrchu	[K]
T <sub>∞</sub>	absolútna teplota okolia v dostatočnej vzdialenosti od povrchu telesa	[K]
t <sub>a</sub>	teplota okolitého vzduchu	[K]
T <sub>eq</sub>	ekvivalentná teplota	[°C]
t <sub>g</sub>	teplota guľového teplomeru	[K]
T <sub>s</sub>	teplota pokožky	[°C]
T <sub>u</sub>	intenzita turbulencie	[-]
T <sub>w</sub>	absolútna teplota povrchu telesa	[K]
u	rýchlosť prúdenia tekutiny	[m·s <sup>-1</sup> ]
u <sub>Bzi</sub>	neistota typu B i-teho zdroja	[podľa veličiny]
u <sub>Cx</sub>	kombinovaná neistota meranej veličiny x veličiny x	[podľa veličiny] [podľa veličiny]
W	rýchlosť prúdenia vzduchu na úrovni gule	[m·s <sup>-1</sup> ]
W	mechanická práca svalov	[W]
X	vzdialenosť medzi bodom v priestore a čelom výstky	[m]
Z <sub>imax</sub>	maximálna výchylka i-teho zdroja	[podľa veličiny]
β	súčiniteľ objemovej rozťažnosti	[K <sup>-1</sup> ]
λ	tepelná vodivosť telesa	[W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
ν	kinematická viskozita tekutiny	[m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> ]
ρ	hustota tekutiny	[kg·m <sup>-3</sup> ]
n	počet opakovaní merania	[podľa veličiny]
μ	absolútna (dynamická) viskozita	[Pa·s]
σ	Stefan-Boltzmannova konštanta	[5,67·10 <sup>-8</sup> $\frac{W}{m^2K^4}$ ]
τ	šmykové napätie	[Pa]

## Skratky

4 Fs	štyri základné faktory módy
ABS	akrylonitrilbutadiénstyrén
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
ATP	adenozíntrifosfát
CabSim	cabin simulator
clo	zaužívaná jednotka tepelného odporu
CO <sub>2</sub>	oxid uhličitý
ČSN	česká státní norma

DP	diplovová práca
EN	európska norma
FSI	Fakulta strojního inenrstv
HVAC	heating ventilation and air-conditioning
ISO	International Organisation for Standardization
KD	komfortn diagram
met	metabolick produkcia tepla
MTV	mean thermal vote
OTTP	Odbor termomechaniky a techniky prosted
PMV	predicted mean vote
PPV	predicted percentage of dissatisfied
PVC	polyvinylchlorid
RH	relative humidity
VUT	Vysok učení technické v Brně

## ZOZNAM PRÍLOH

Prílohy **A** súvisia s meraním na **konštantnú povrchovú teplotu**.

- 1A Hodnoty teploty vzduchu v interiéri klimakomory v momente pokojného stavu pri meraní na konštantnú povrchovú teplotu.
- 2A Hodnoty teploty vzduchu v interiéri klimakomory počas prevádzkového stavu tvár 2 pri meraní na konštantnú povrchovú teplotu.
- 3A Hodnoty teploty vzduchu v interiéri klimakomory počas prevádzkového stavu tvár 4 pri meraní na konštantnú povrchovú teplotu.
- 4A Hodnoty teploty vzduchu v interiéri klimakomory počas prevádzkového stavu hrud' 4 pri meraní na konštantnú povrchovú teplotu.
- 5A Hodnoty teploty vzduchu v interiéri klimakomory počas prevádzkového stavu hrud' 2 pri meraní na konštantnú povrchovú teplotu.
- 6A Hodnoty strednej radiačnej teploty v interiéri klimakomory počas celého merania na konštantnú povrchovú teplotu.
- 7A Hodnoty celkového generovaného tepelného toku pre jednotlivé segmenty manekýna počas prevádzkového stavu tvár 2.
- 8A Hodnoty celkového generovaného tepelného toku pre jednotlivé segmenty manekýna počas prevádzkového stavu tvár 4.
- 9A Hodnoty celkového generovaného tepelného toku pre jednotlivé segmenty manekýna počas prevádzkového stavu hrud' 2.
- 10A Hodnoty celkového generovaného tepelného toku pre jednotlivé segmenty manekýna počas prevádzkového stavu hrud' 4.
- 11A Komfortný diagram počas prevádzkového stavu tvár 4 za použitia Dacia výustky.
- 12A Komfortný diagram počas prevádzkového stavu tvár 4 za použitia Mercedes výustky.
- 13A Komfortný diagram počas prevádzkového stavu tvár 4 za použitia Porsche výustky.
- 14A Komfortný diagram počas prevádzkového stavu tvár 4 za použitia BMW výustky.
- 15A Komfortný diagram počas prevádzkového stavu hrud' 4 za použitia Dacia výustky.
- 16A Komfortný diagram počas prevádzkového stavu hrud' 4 za použitia Mercedes výustky.

- 17A Komfortný diagram počas prevádzkového stavu hrud' 4 za použitia Porsche výustky.
- 18A Komfortný diagram počas prevádzkového stavu hrud' 4 za použitia BMW výustky.
- 19A Komfortný diagram počas prevádzkového stavu hrud' 2 za použitia Dacia výustky.
- 20A Komfortný diagram počas prevádzkového stavu hrud' 2 za použitia Mercedes výustky.
- 21A Komfortný diagram počas prevádzkového stavu hrud' 2 za použitia Porsche výustky.
- 22A Komfortný diagram počas prevádzkového stavu hrud' 2 za použitia BMW výustky.

Prílohy **B** súvisia s meraním na **konštantný tepelný tok**.

- 1B Hodnoty teploty vzduchu v interiéri klimakomory počas pokojného stavu pri meraní na konštantný tepelný tok.
- 2B Hodnoty teploty vzduchu v interiéri klimakomory počas prevádzkového stavu tvár 2 pri meraní na konštantný tepelný tok.
- 3B Hodnoty teploty vzduchu v interiéri klimakomory počas prevádzkového stavu tvár 2 pri meraní na konštantný tepelný tok.
- 4B Hodnoty teploty vzduchu v interiéri klimakomory počas prevádzkového stavu hrud' 2 pri meraní na konštantný tepelný tok.
- 5B Hodnoty teploty vzduchu v interiéri klimakomory počas prevádzkového stavu hrud' 4 pri meraní na konštantný tepelný tok.
- 6B Hodnoty strednej radiačnej teploty interiéri klimakomory počas celého merania na konštantný tepelný tok.

Prílohy **BC** obsahujú vyhodnotenie manekýnom nameraných dát z merania na **konštantný tepelný tok**.

- 1BC Hodnoty povrchovej teploty jednotlivých segmentov manekýna pri prevádzkovom stave tvár 2.
- 2BC Hodnoty povrchovej teploty jednotlivých segmentov manekýna pri prevádzkovom stave tvár 4.
- 3BC Hodnoty povrchovej teploty jednotlivých segmentov manekýna pri prevádzkovom stave hrud' 4.

4BC Hodnoty povrchovej teploty jednotlivých segmentov manekýna pri prevádzkovom stave hrud' 2.

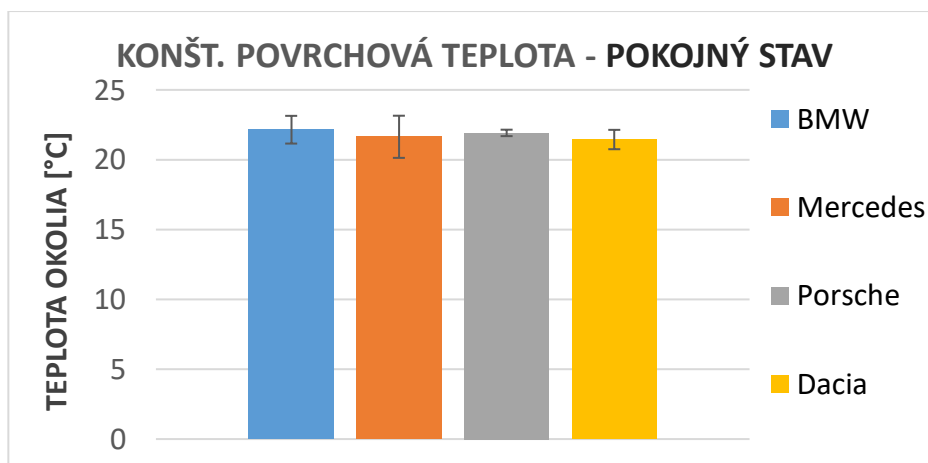
Prílohy **BD** obsahujú dáta vyhodnotenú termovíziou z merania na **konštantný tepelný tok**.

1BD Hodnoty povrchovej teploty jednotlivých častí segmentov manekýna pri prevádzkovom stave tvár 2 počas merania na konštantný tepelný tok.

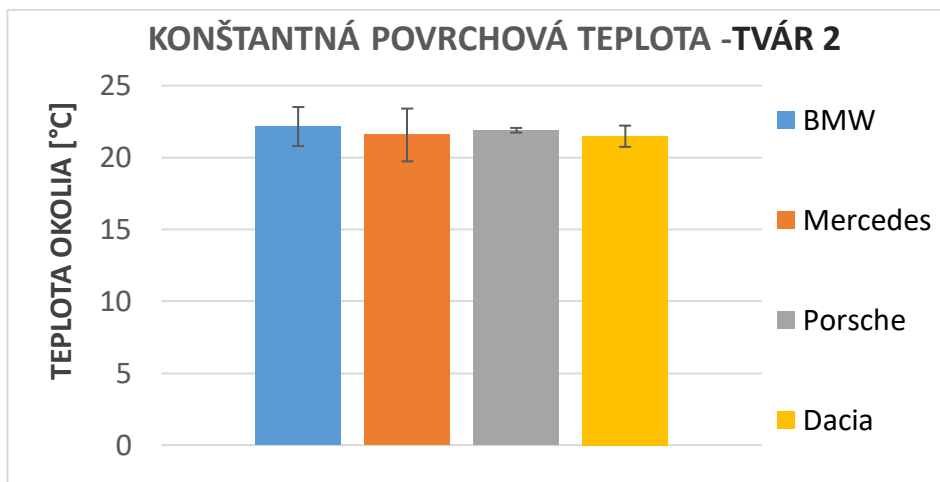
2BD Hodnoty povrchovej teploty jednotlivých častí segmentov manekýna pri prevádzkovom stave tvár 4 počas merania na konštantný tepelný tok.

3BD Hodnoty povrchovej teploty jednotlivých častí segmentov manekýna pri prevádzkovom stave hrud' 2 počas merania na konštantný tepelný tok.

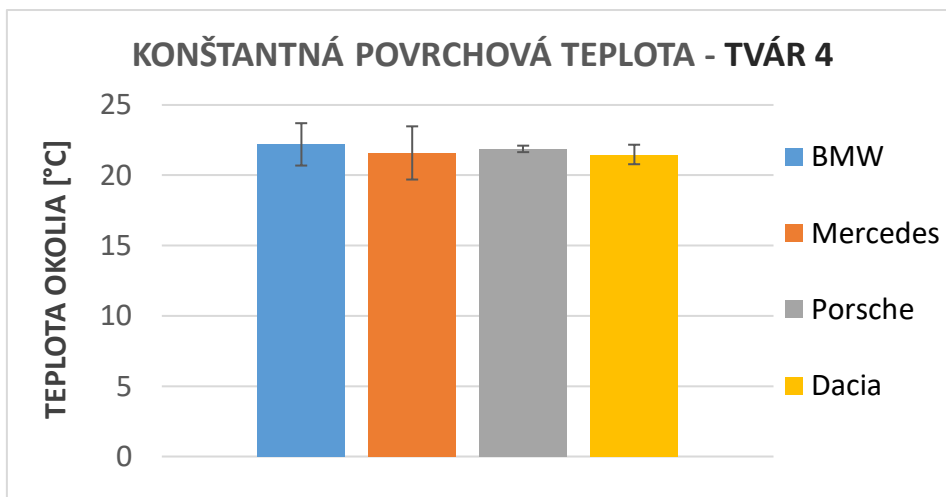
4BD Hodnoty povrchovej teploty jednotlivých častí segmentov manekýna pri prevádzkovom stave hrud' 4 počas merania na konštantný tepelný tok.



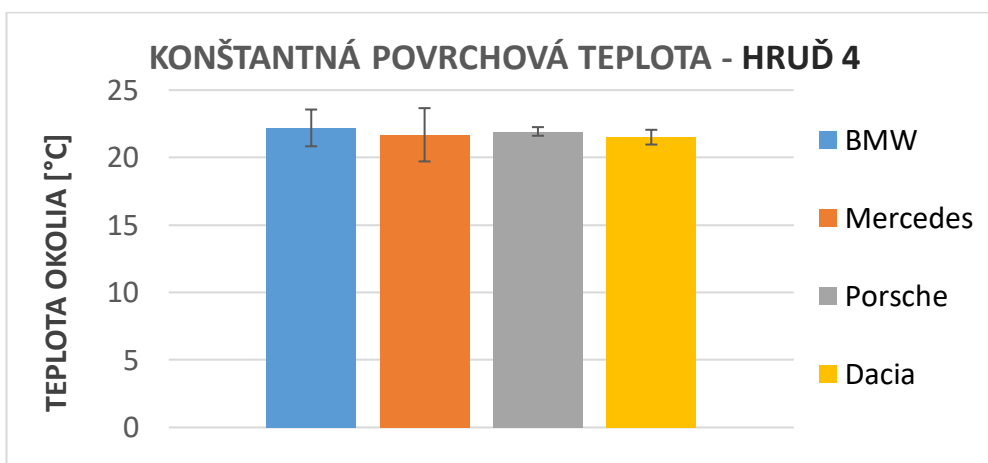
Pr. 1A Hodnoty teploty vzduchu v interiéri klimakomory v momente pokojného stavu pri meraní na konštantnú povrchovú teplotu.



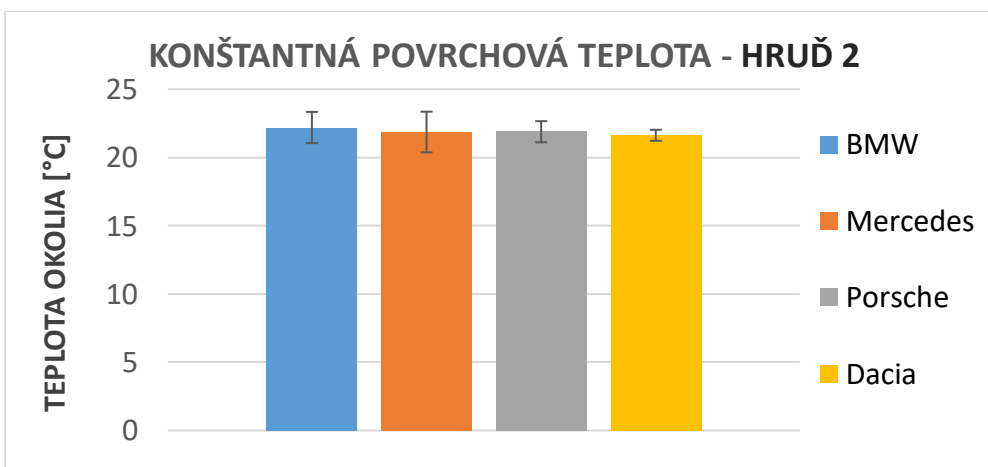
Pr. 2A Hodnoty teploty vzduchu v interiéri klimakomory počas prevádzkového stavu tvár 2 pri meraní na konštantnú povrchovú teplotu.



Pr. 3A Hodnoty teploty vzduchu v interiéri klimakomory počas prevádzkového stavu tvár 4 pri meraní na konštantnú povrchovú teplotu.

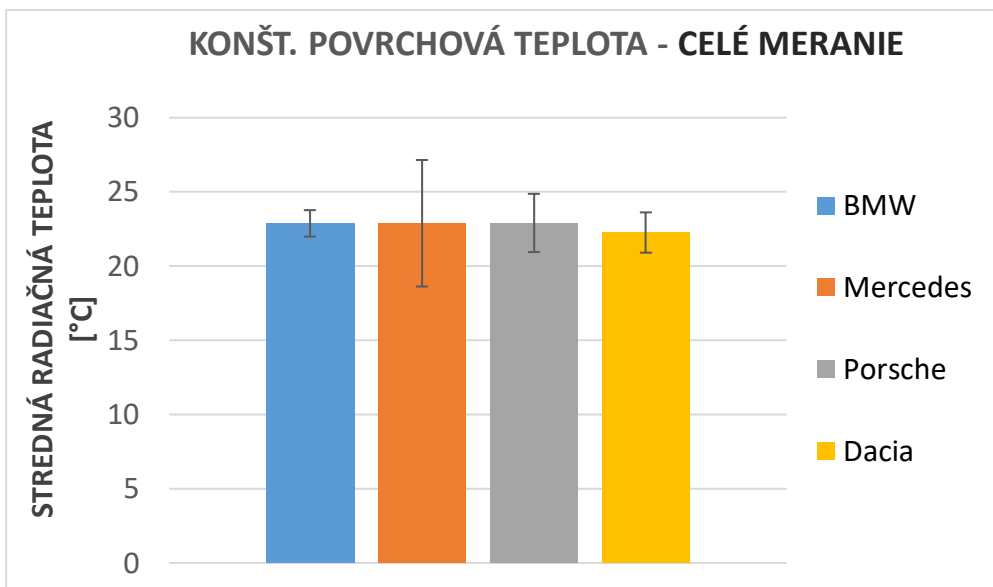


Pr. 4A Hodnoty teploty vzduchu v interiéri klimakomory počas prevádzkového stavu hrud' 4 pri meraní na konštantnú povrchovú teplotu.

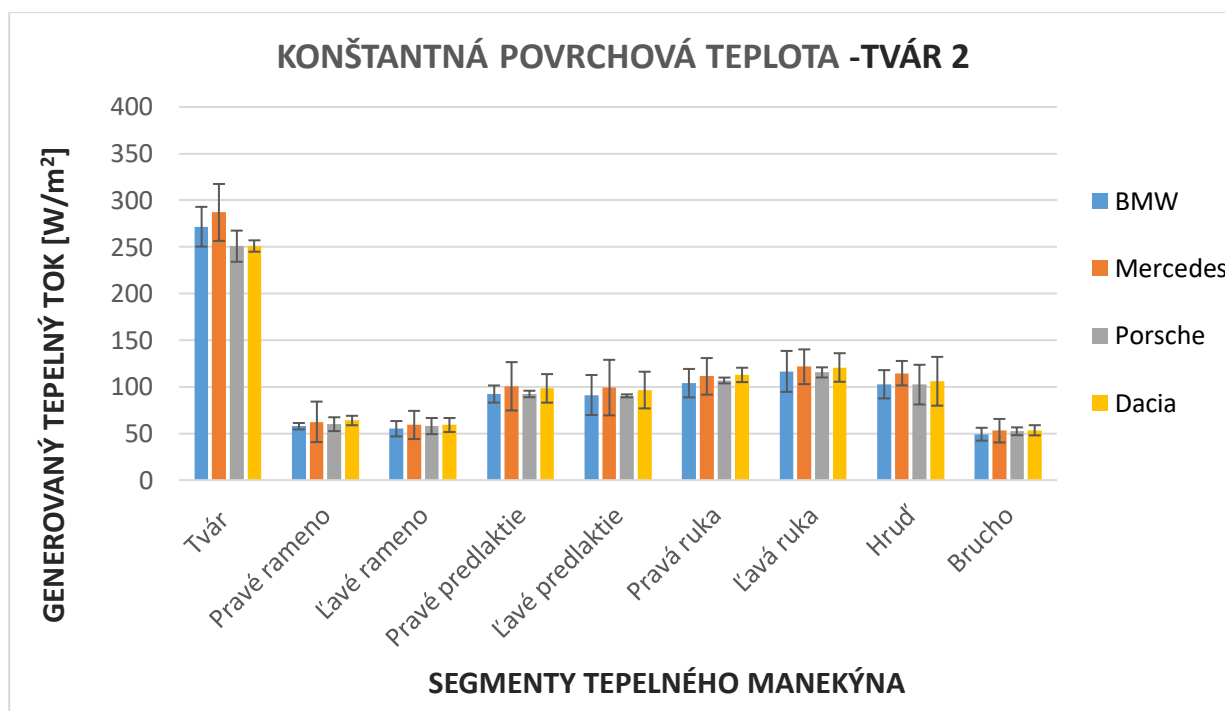


Pr. 5A Hodnoty teploty vzduchu v interiéri klimakomory počas prevádzkového stavu hrud' 2 pri meraní na konštantnú povrchovú teplotu.

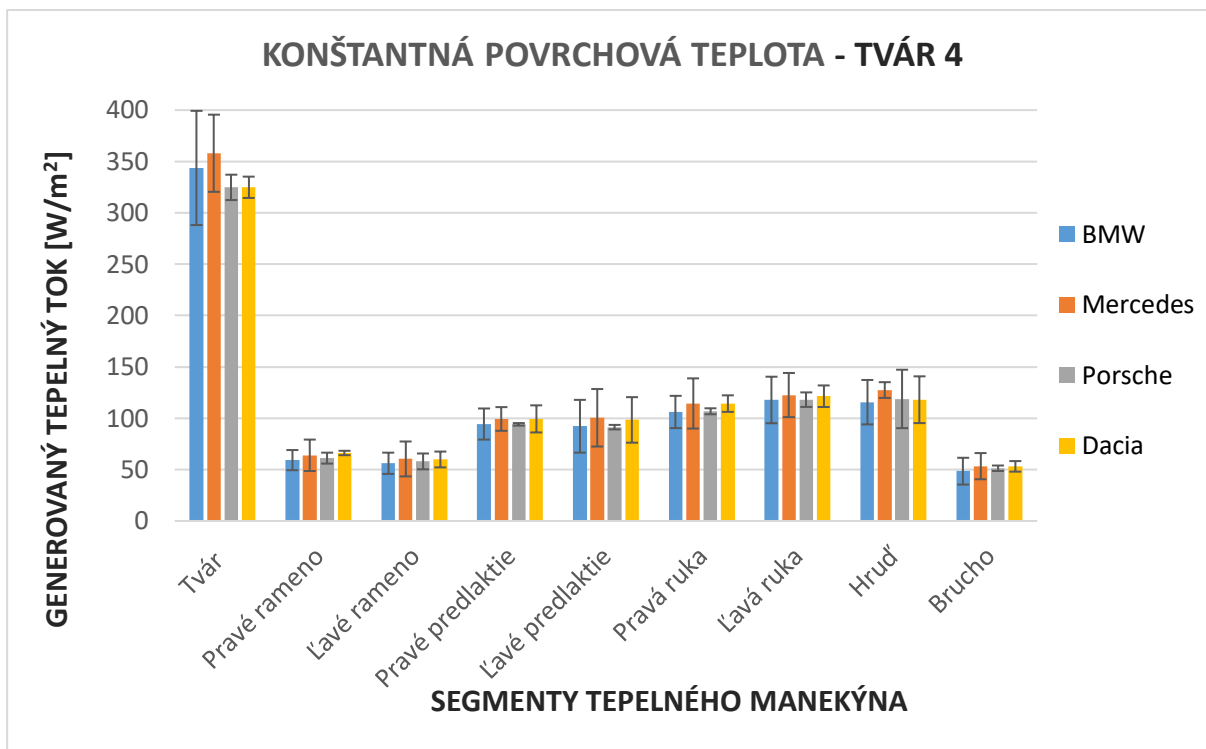




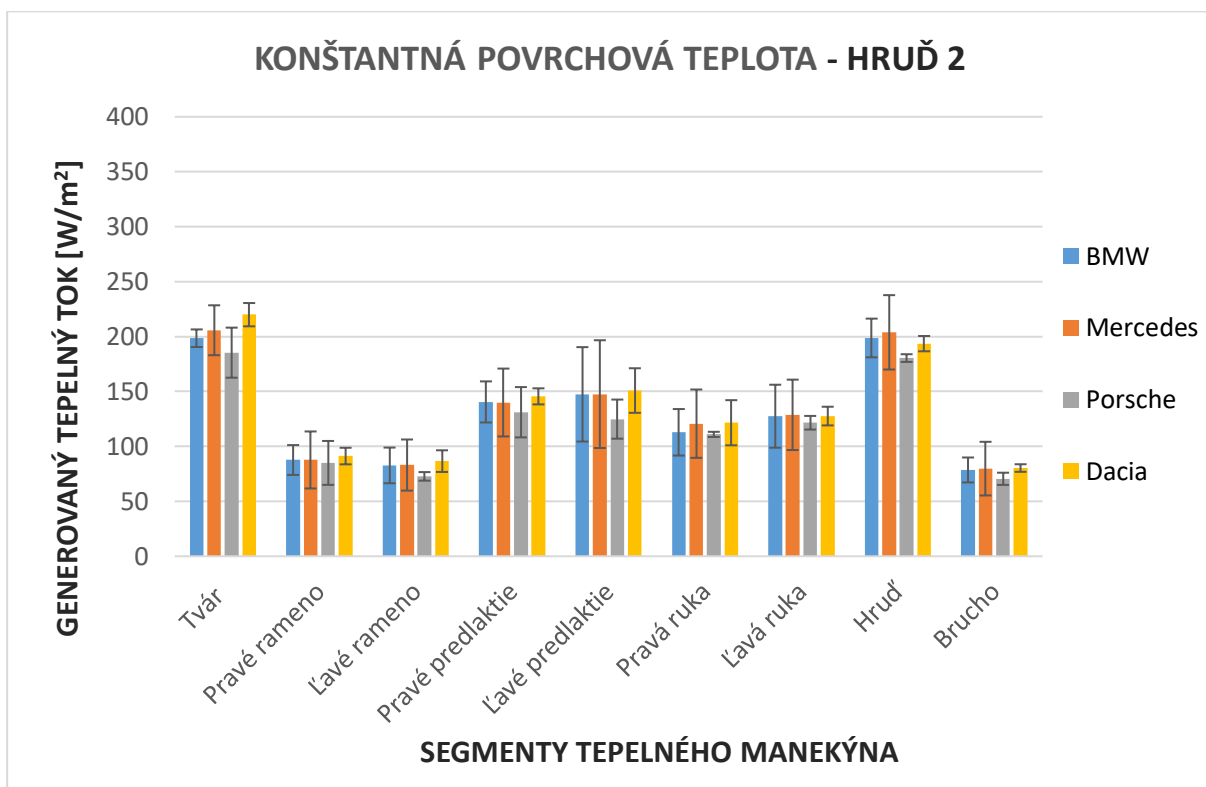
Pr. 6A Hodnoty strednej radiačnej teploty v interiéri klimakomory počas celého merania na konštantnú povrchovú teplotu.



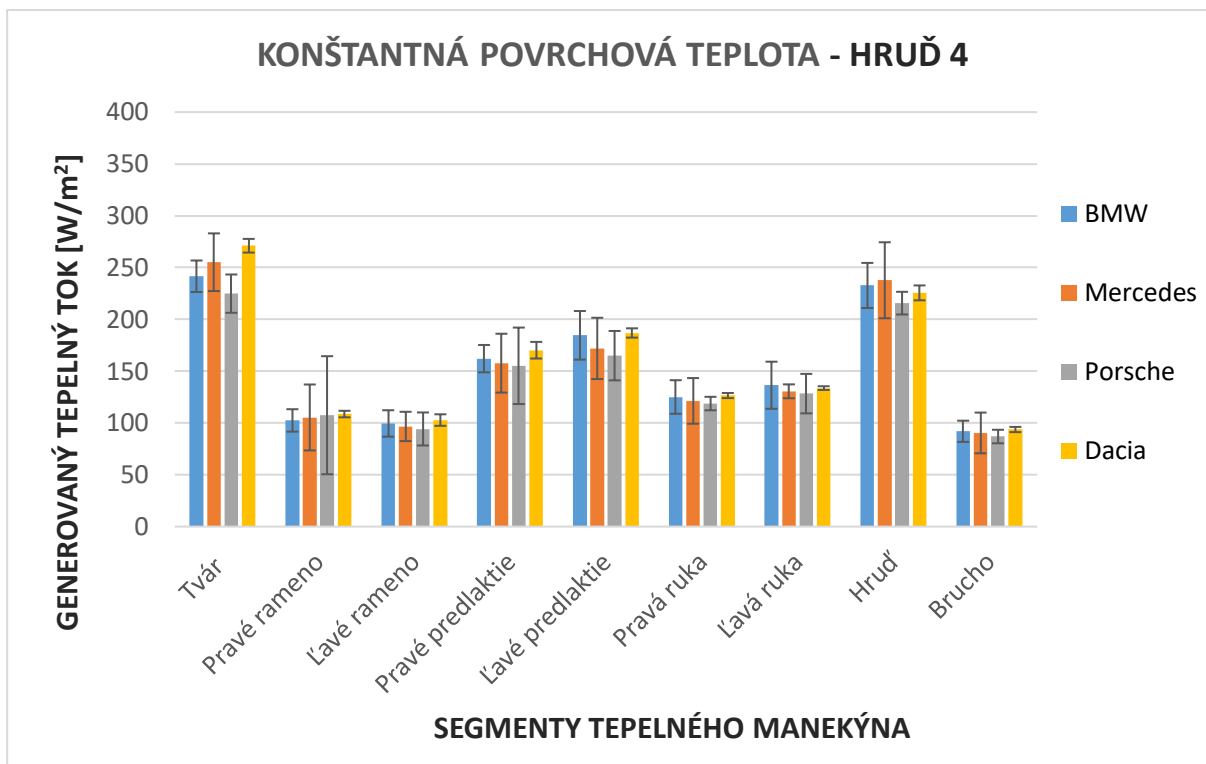
Pr. 7A Hodnoty celkového generovaného tepelného toku pre jednotlivé segmenty manekýna počas prevádzkového stavu tvár 2.



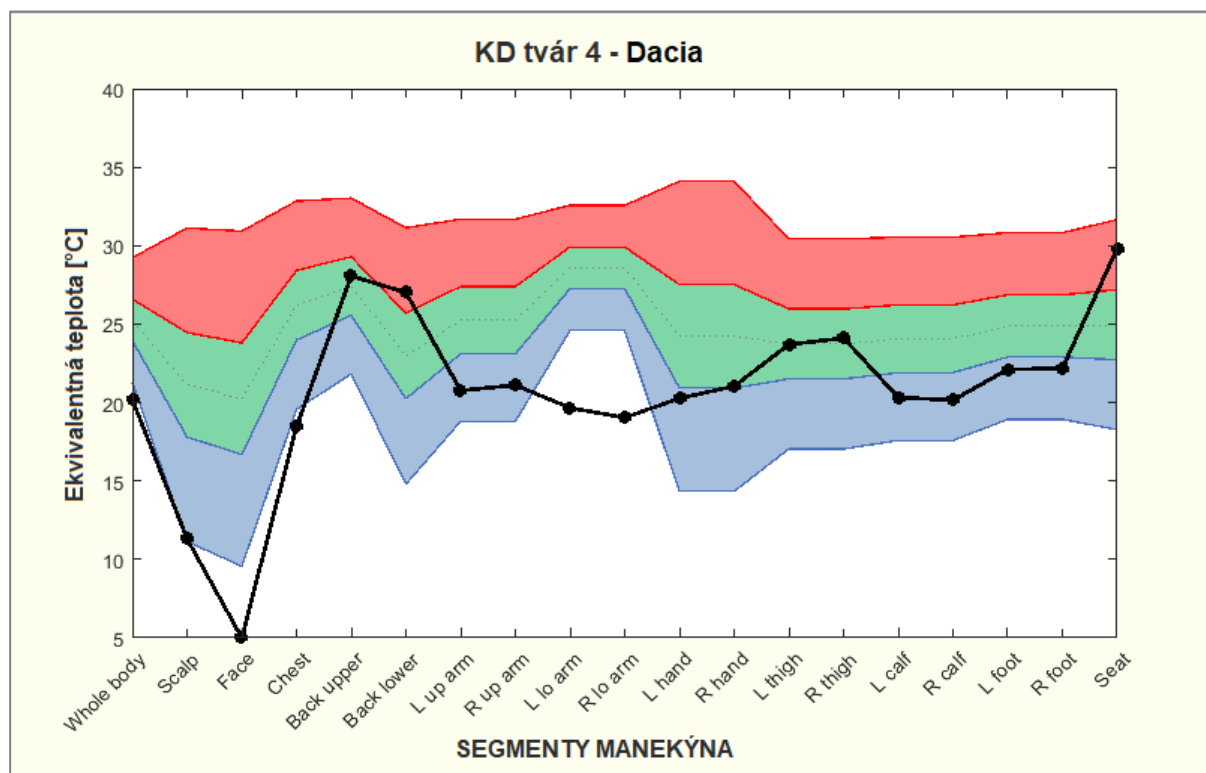
Pr. 8A Hodnoty celkového generovaného tepelného toku pre jednotlivé segmenty manekýna počas prevádzkového stavu tvár 4.



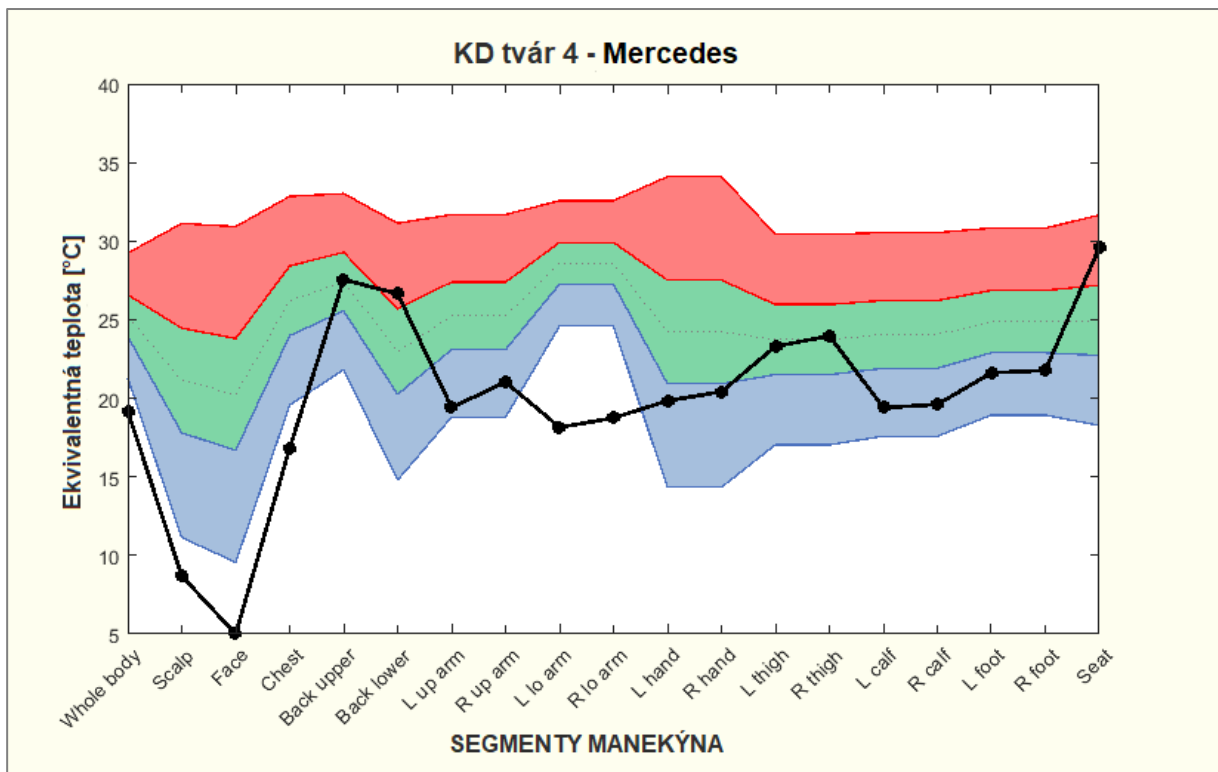
Pr. 9A Hodnoty celkového generovaného tepelného toku pre jednotlivé segmenty manekýna počas prevádzkového stavu hrud' 2.



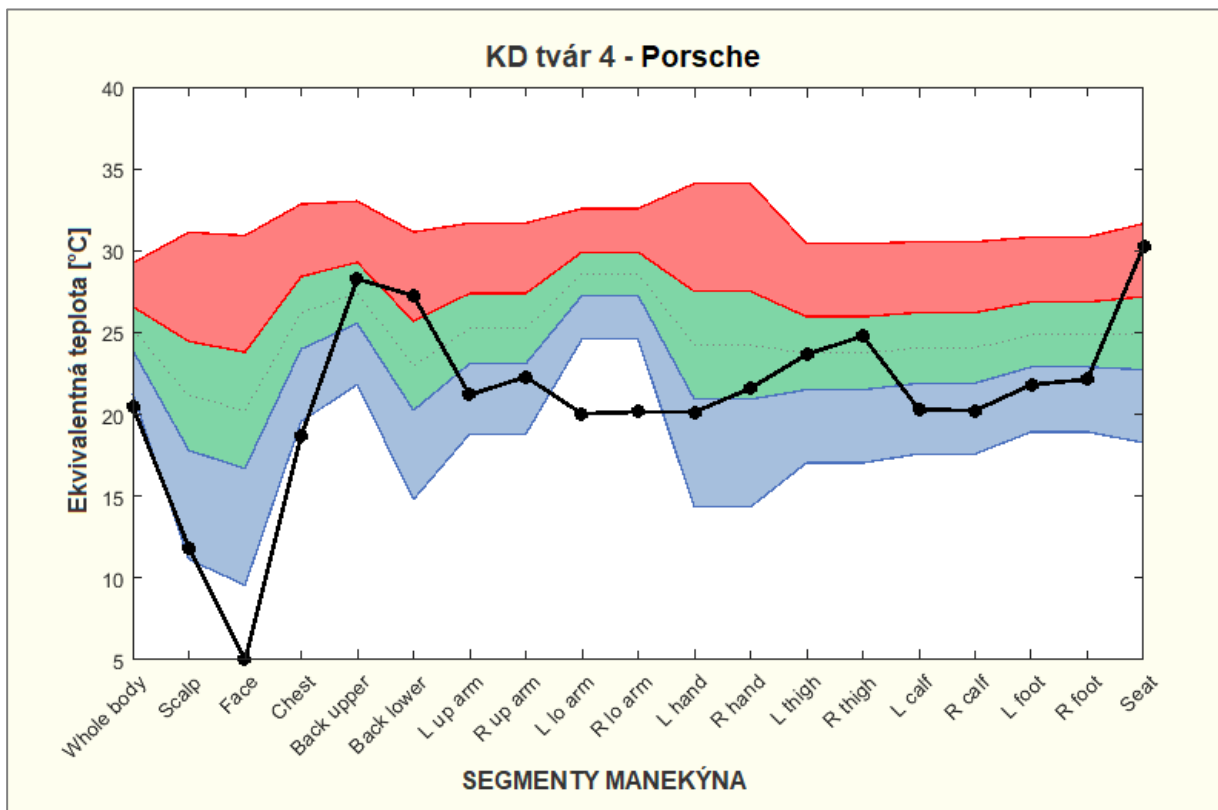
Pr. 10A Hodnoty celkového generovaného tepelného toku pre jednotlivé segmenty manekýna počas prevádzkového stavu hrud' 4.



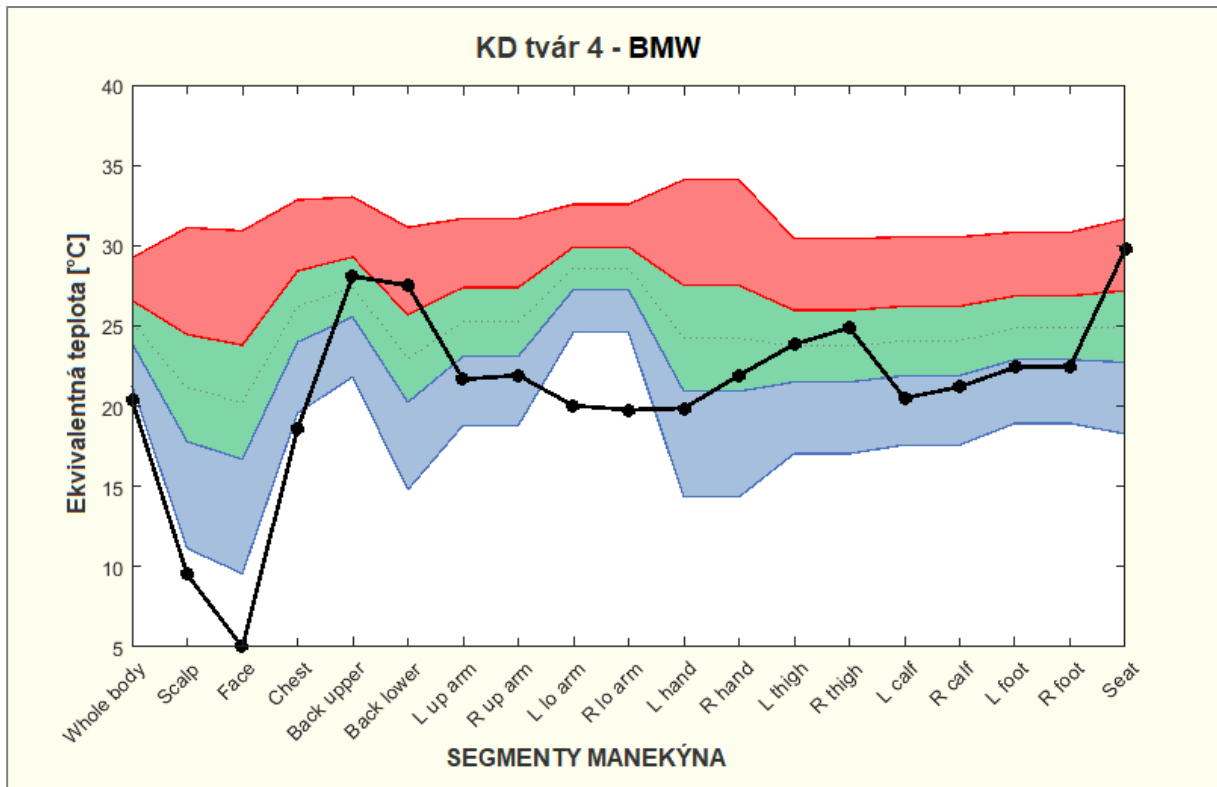
Pr. 11A Komfortný diagram počas prevádzkového stavu tvár 4 za použitia Dacia výustky.



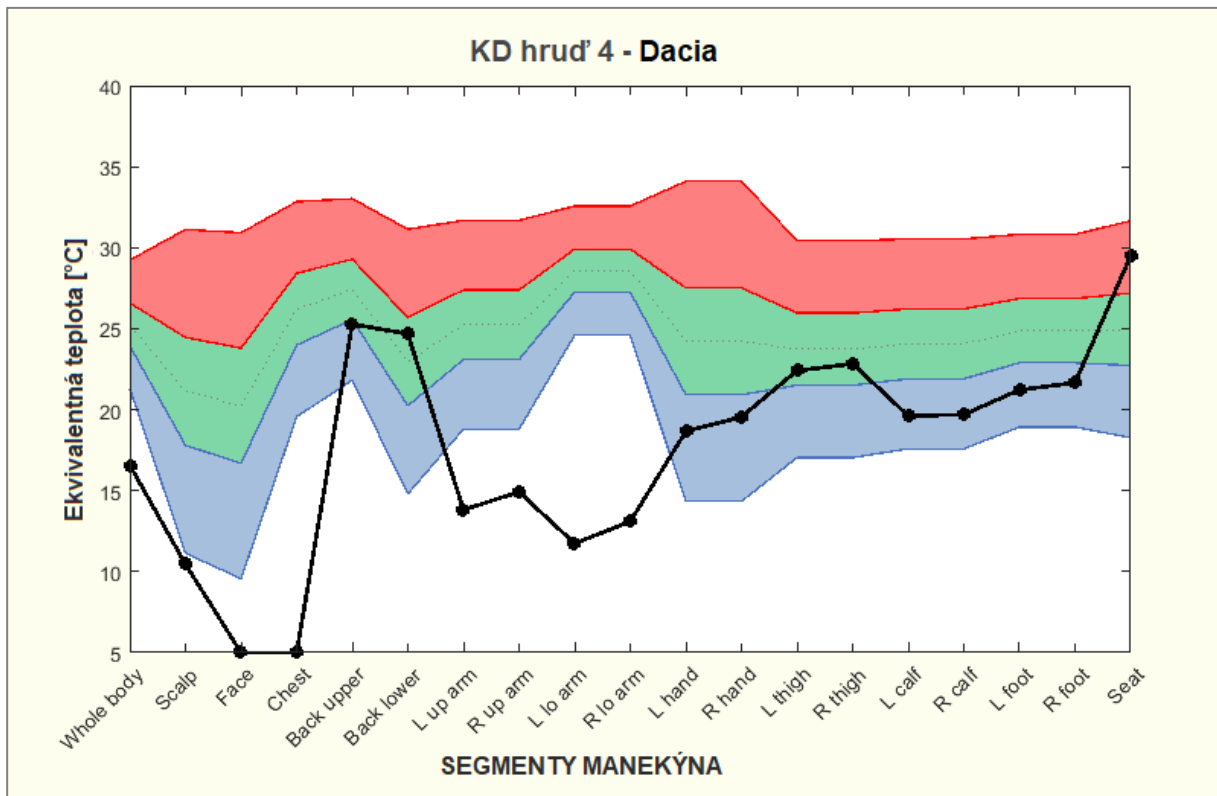
Pr. 12A Komfortný diagram počas prevádzkového stavu tvár 4 za použitia Mercedes výustky.



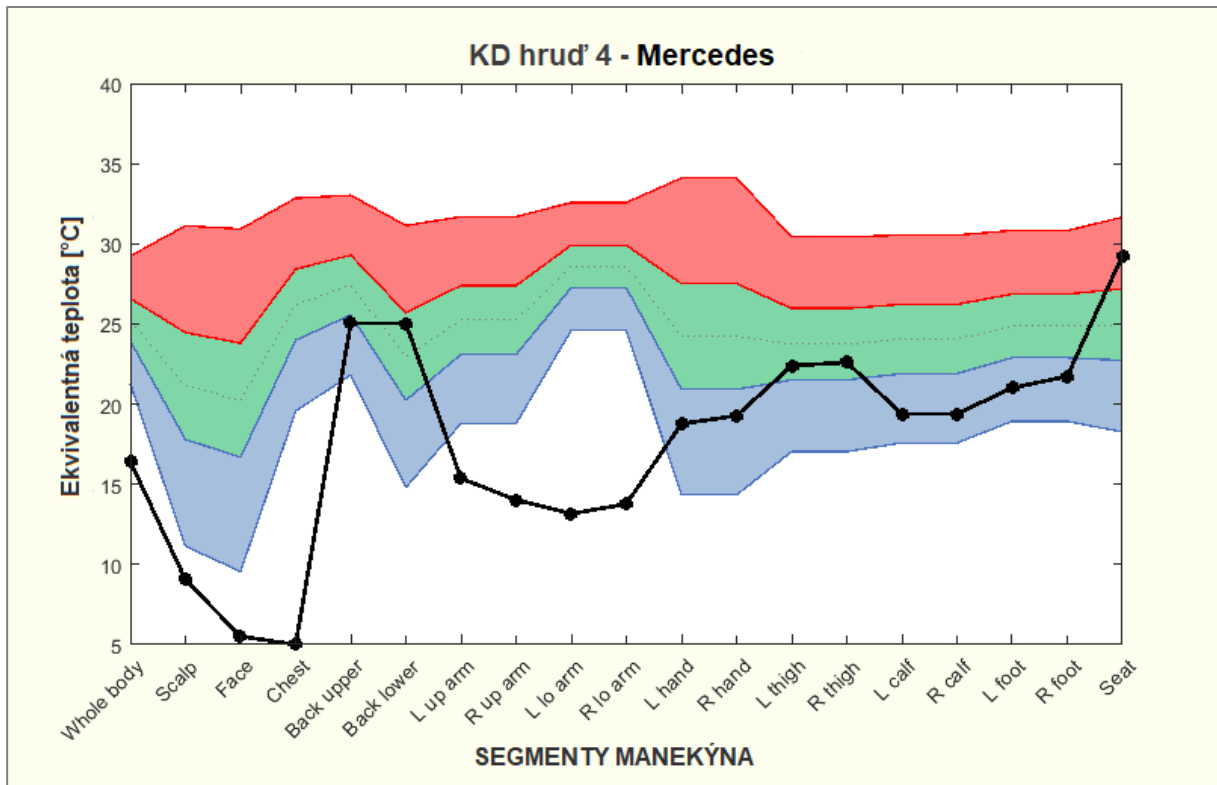
Pr. 13A Komfortný diagram počas prevádzkového stavu tvár 4 za použitia Porsche výustky.



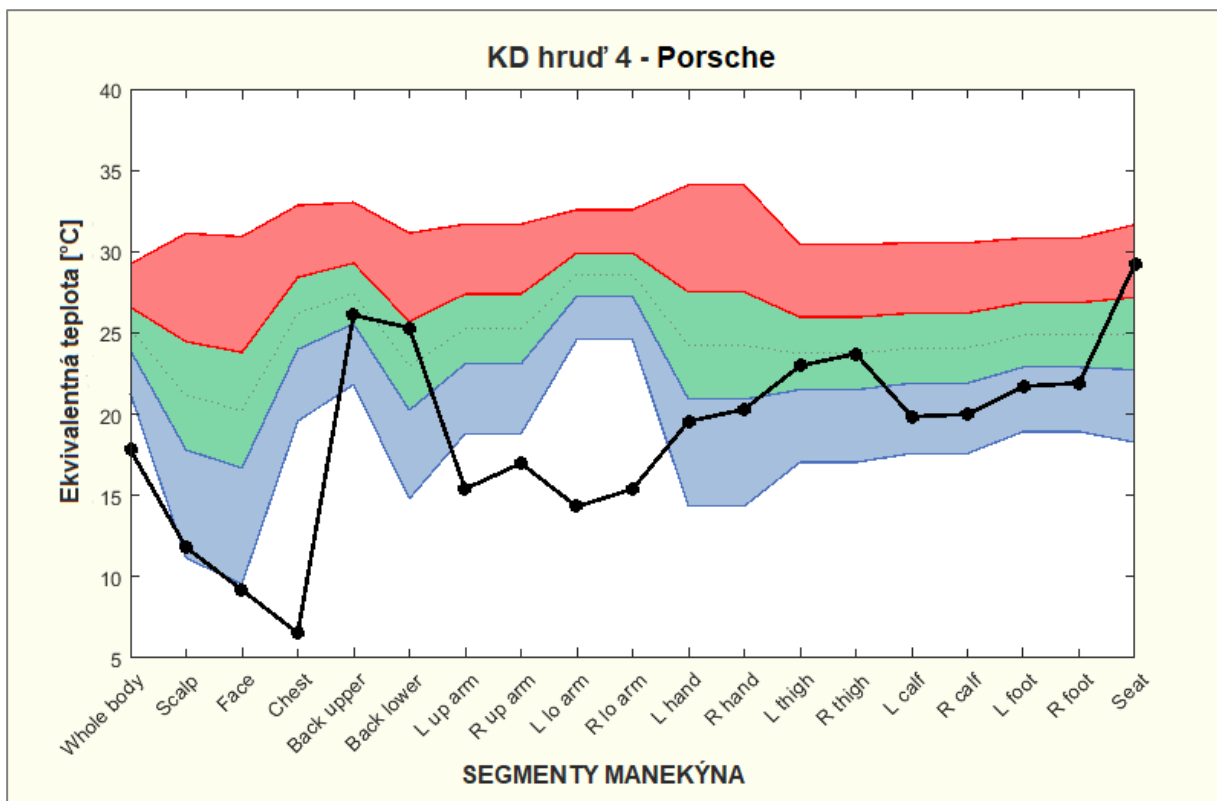
Pr. 14A Komfortný diagram počas prevádzkového stavu tvár 4 za použitia BMW výustky.



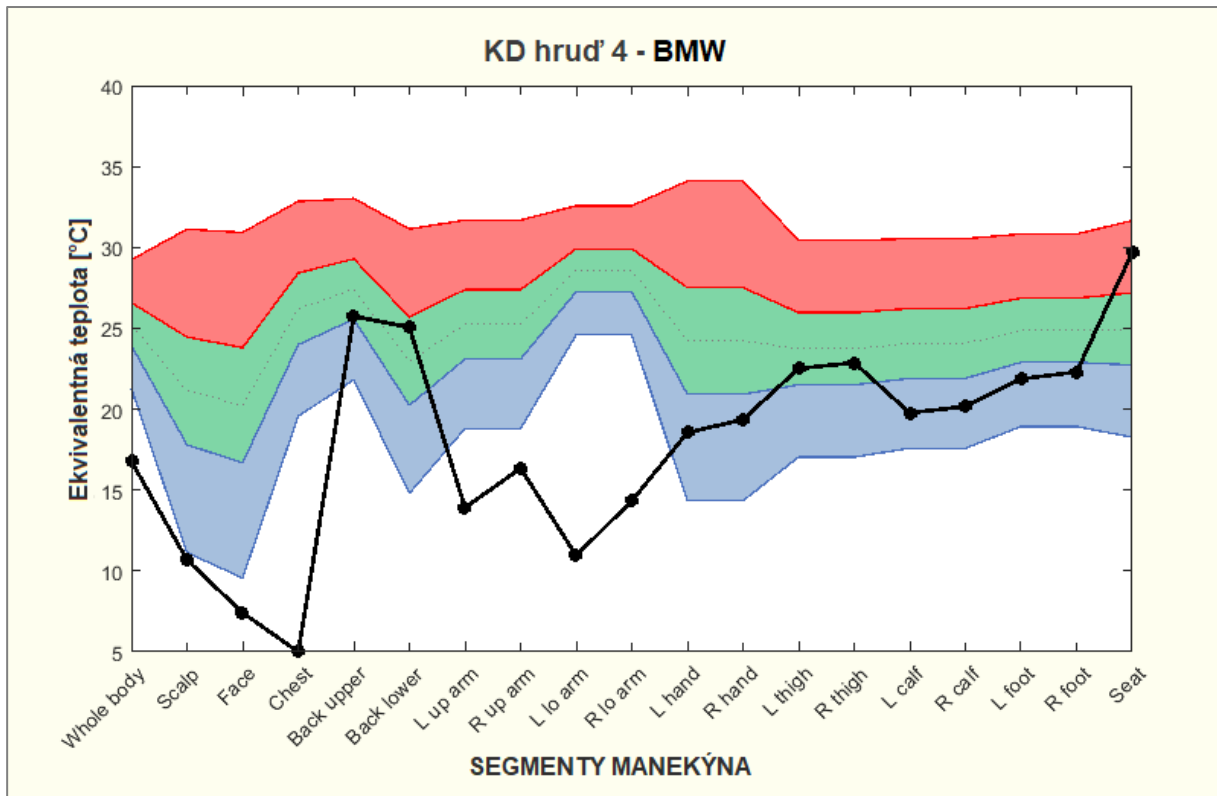
Pr. 15A Komfortný diagram počas prevádzkového stavu hrud' 4 za použitia Dacia výustky.



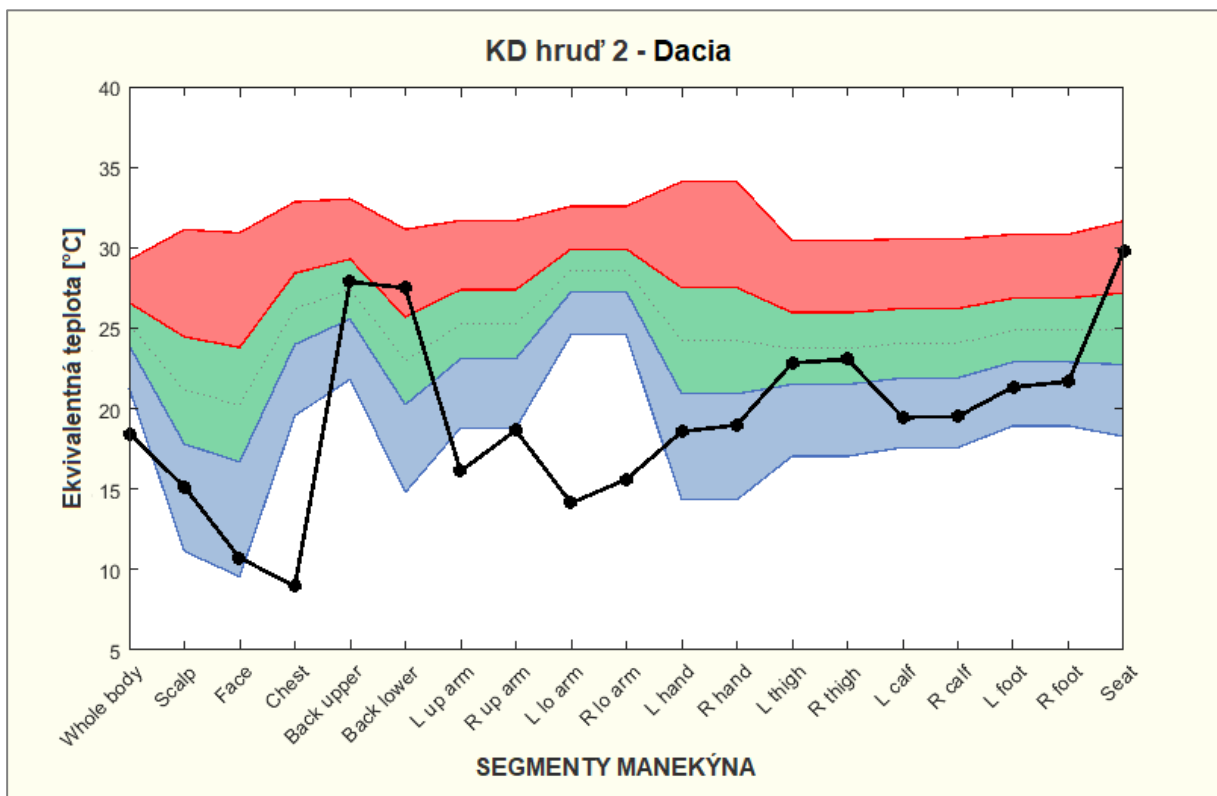
Pr. 16A Komfortný diagram počas prevádzkového stavu hrud' 4 za použitia Mercedes výustky.



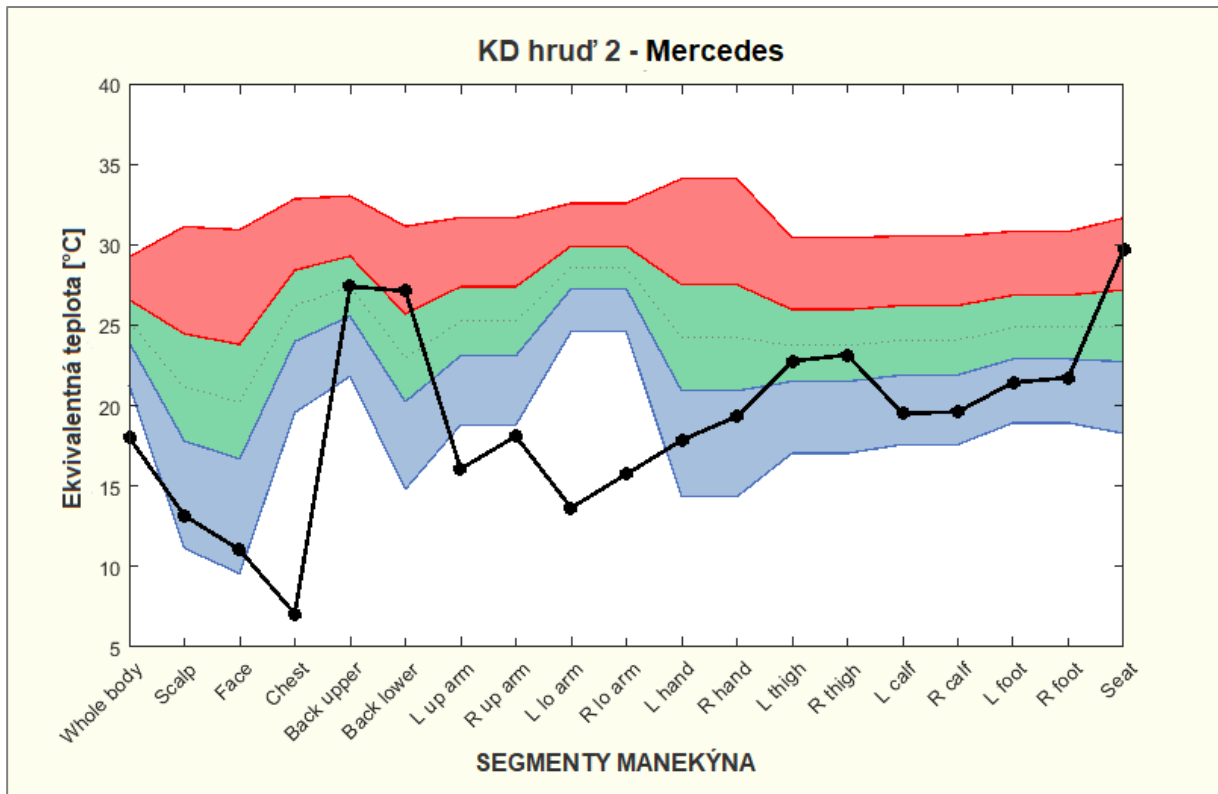
Pr. 17A Komfortný diagram počas prevádzkového stavu hrud' 4 za použitia Porsche výustky.



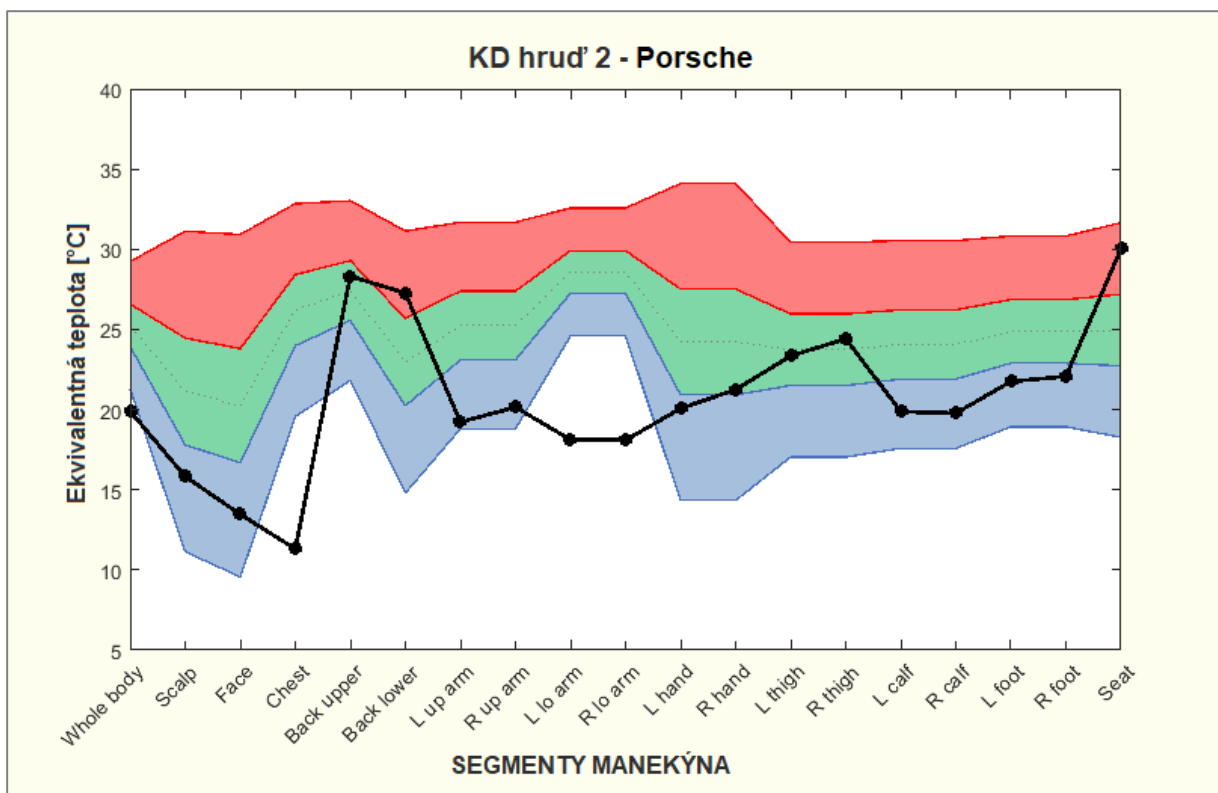
Pr. 18A Komfortný diagram počas prevádzkového stavu hrud' 4 za použitia BMW výustky.



Pr. 19A Komfortný diagram počas prevádzkového stavu hrud' 2 za použitia Dacia výustky.

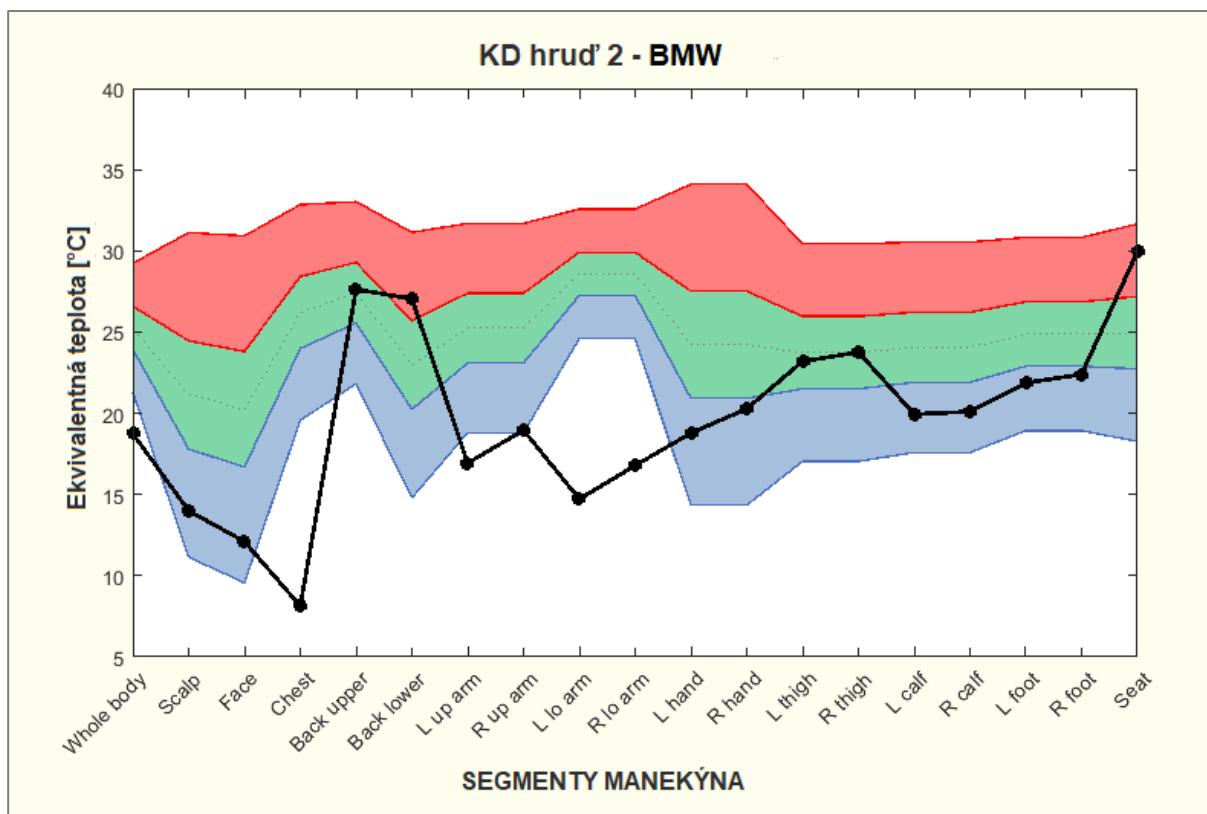


Pr. 20A Komfortný diagram počas prevádzkového stavu hrud' 2 za použitia Mercedes výustky.

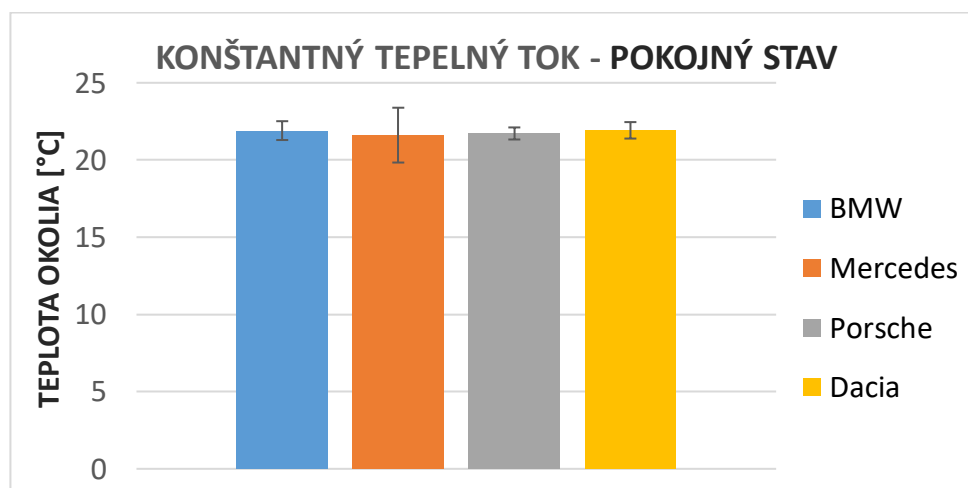


Pr. 21A Komfortný diagram počas prevádzkového stavu hrud' 2 za použitia Porsche výustky.

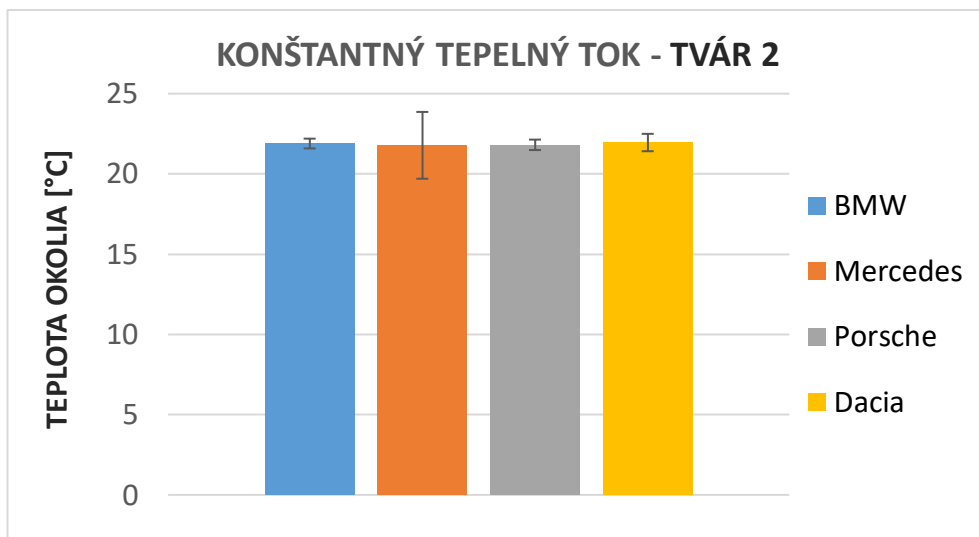




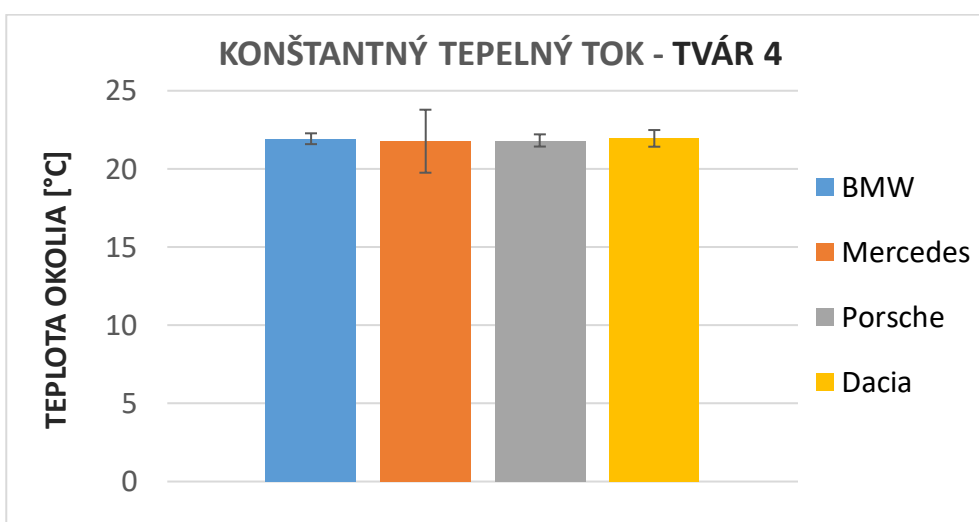
Pr. 22A Komfortný diagram počas prevádzkového stavu hrud' 2 za použitia BMW výustky.



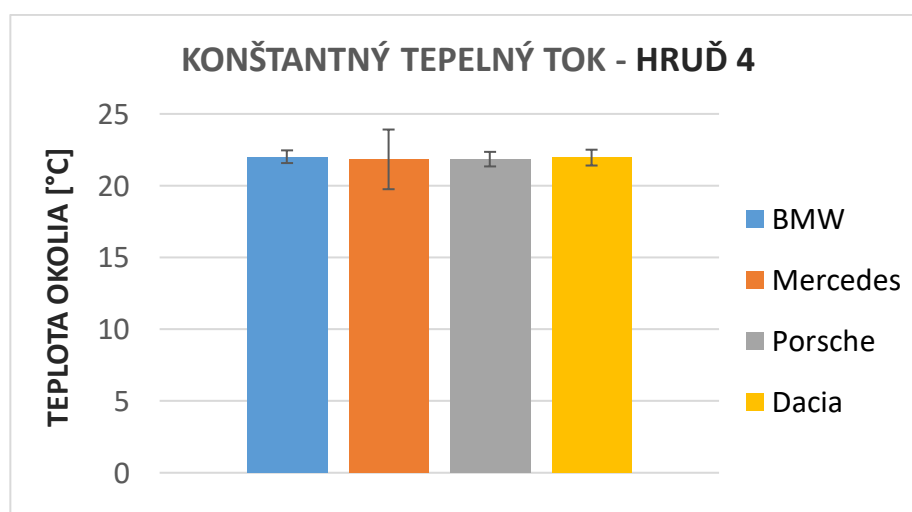
Pr. 1B Hodnoty teploty vzduchu v interiéri klimakomory počas pokojného stavu pri meraní na konštantný tepelný tok.



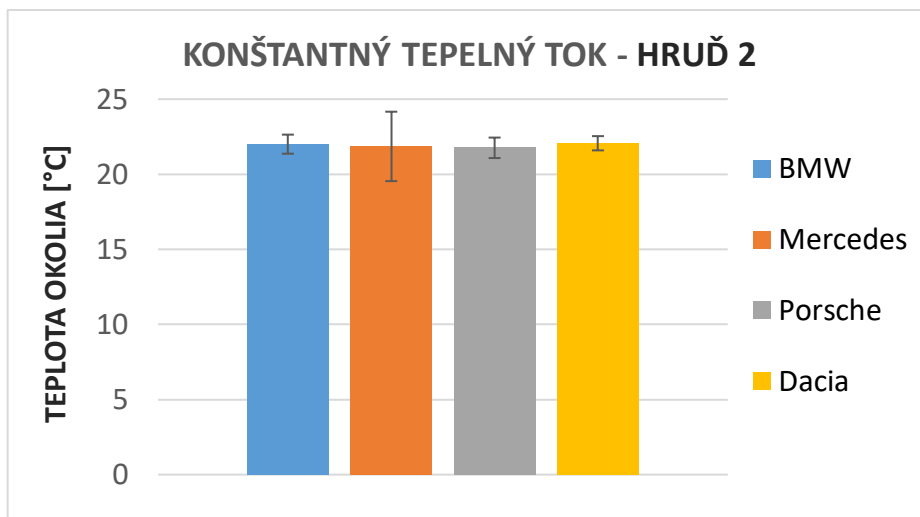
Pr. 2B Hodnoty teploty vzduchu v interiéri klimakomory počas prevádzkového stavu tvár 2 pri meraní na konštantný tepelný tok.



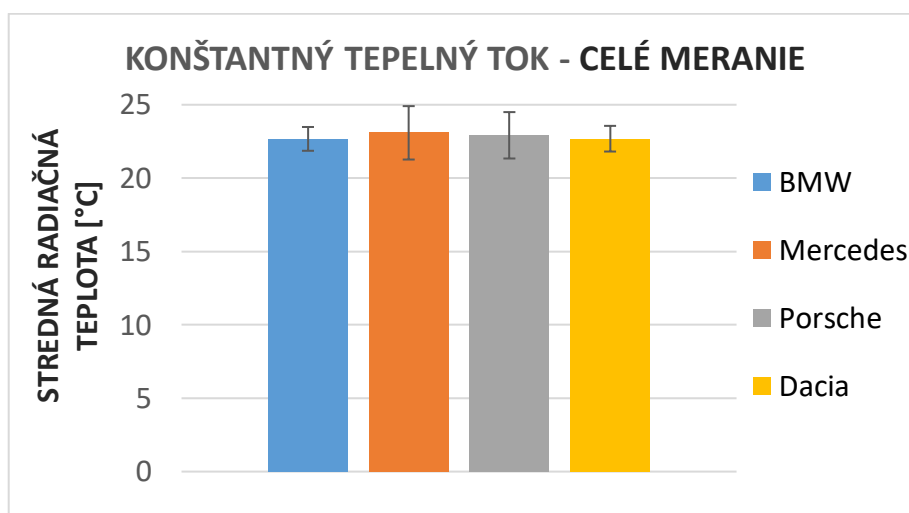
Pr. 3B Hodnoty teploty vzduchu v interiéri klimakomory počas prevádzkového stavu tvár 4 pri meraní na konštantný tepelný tok.



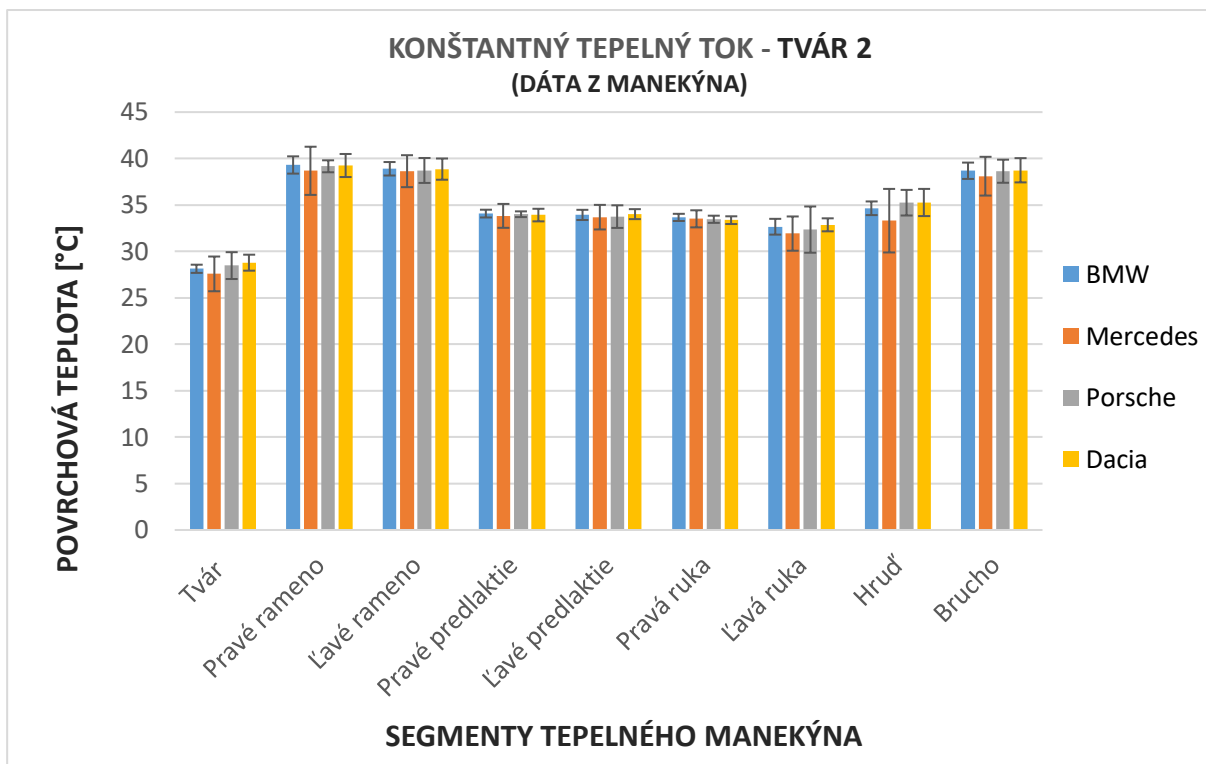
Pr. 4B Hodnoty teploty vzduchu v interiéri klimakomory počas prevádzkového stavu hrud' 4 pri meraní na konštantný tepelný tok.



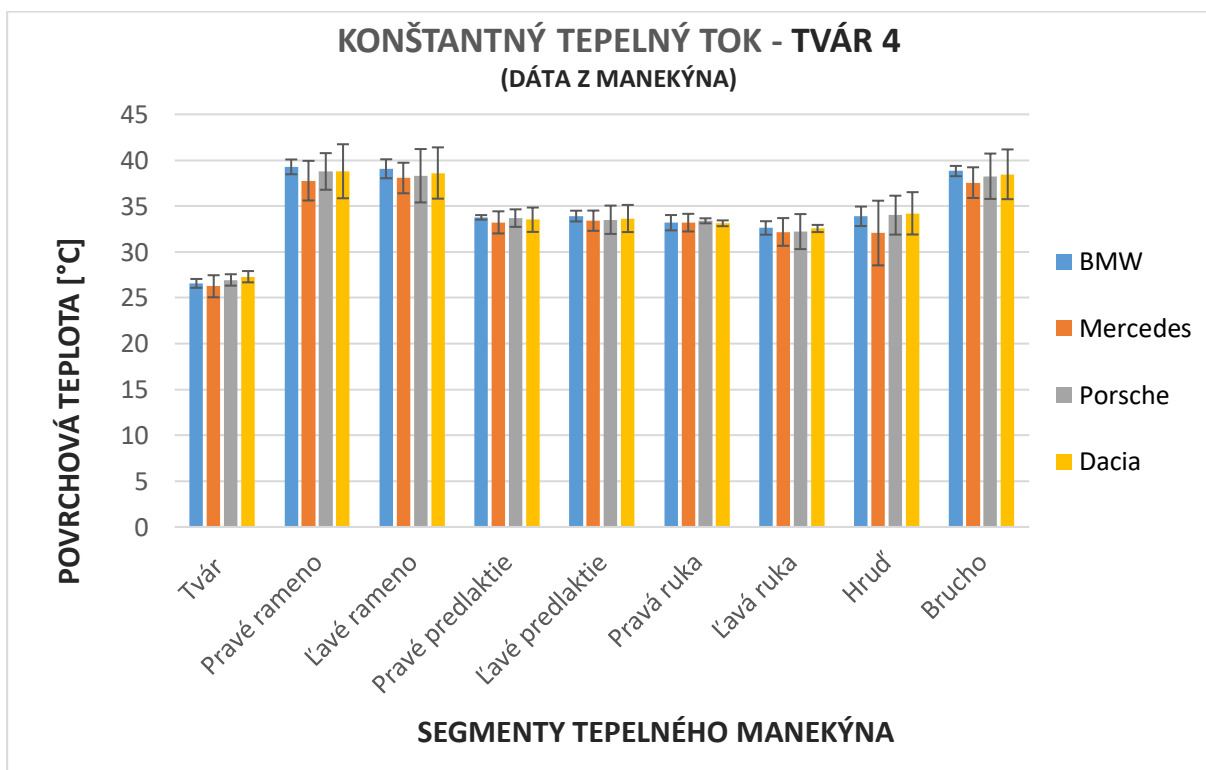
Pr. 5B Hodnoty teploty vzduchu v interiéri klimakomory počas prevádzkového stavu hrud' 2 pri meraní na konštantný tepelný tok.



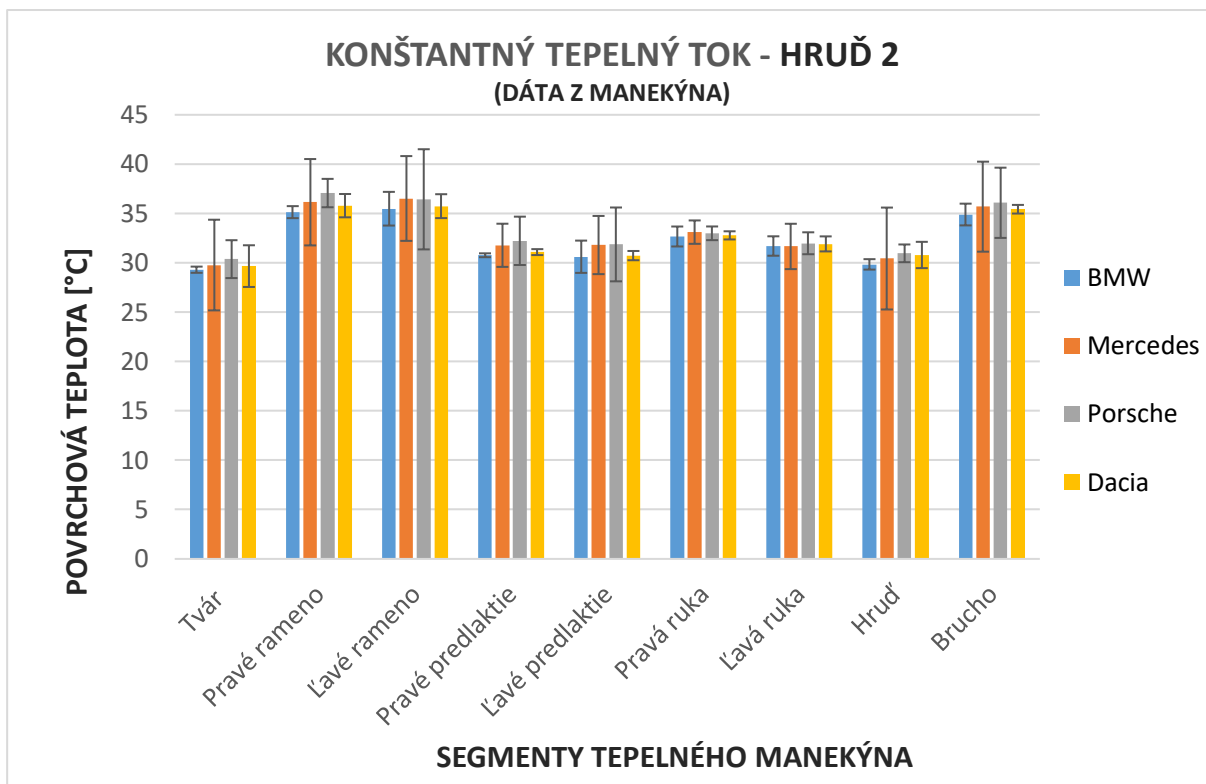
Pr. 6B Hodnoty strednej radiačnej teploty interiéri klimakomory počas celého merania na konštantný tepelný tok.



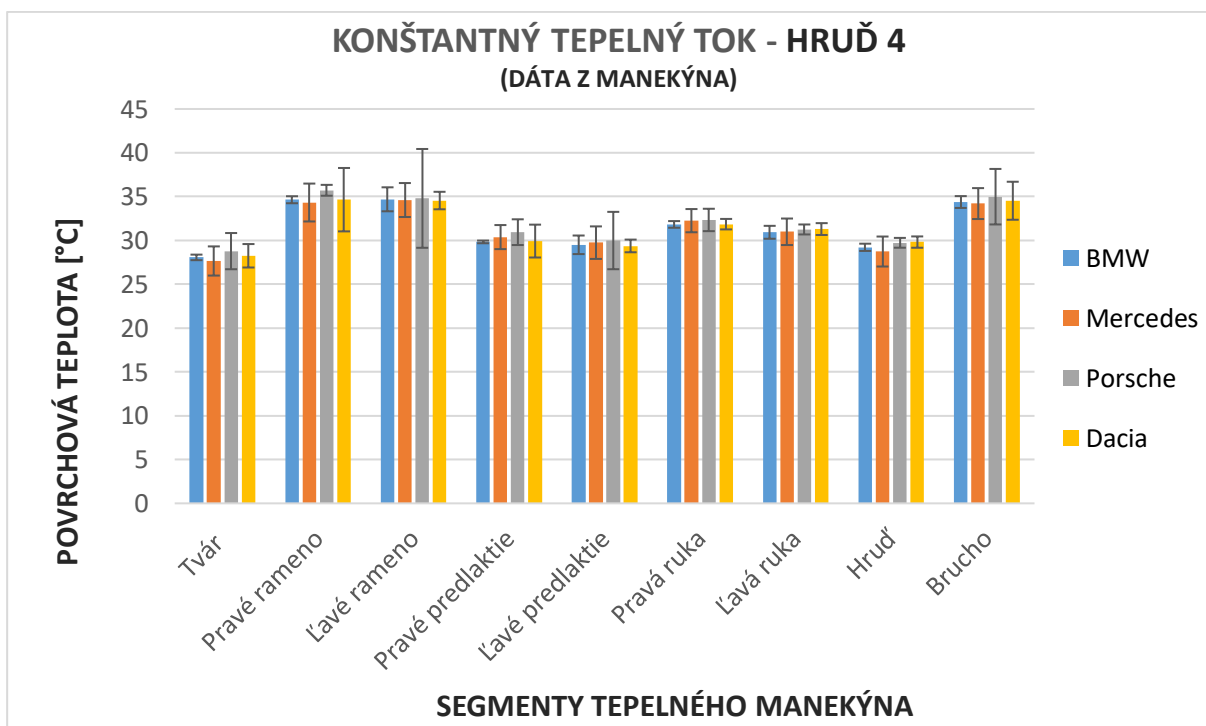
Pr. 1BC Hodnoty povrchovej teploty jednotlivých segmentov manekýna pri prevádzkovom stave tvár 2.



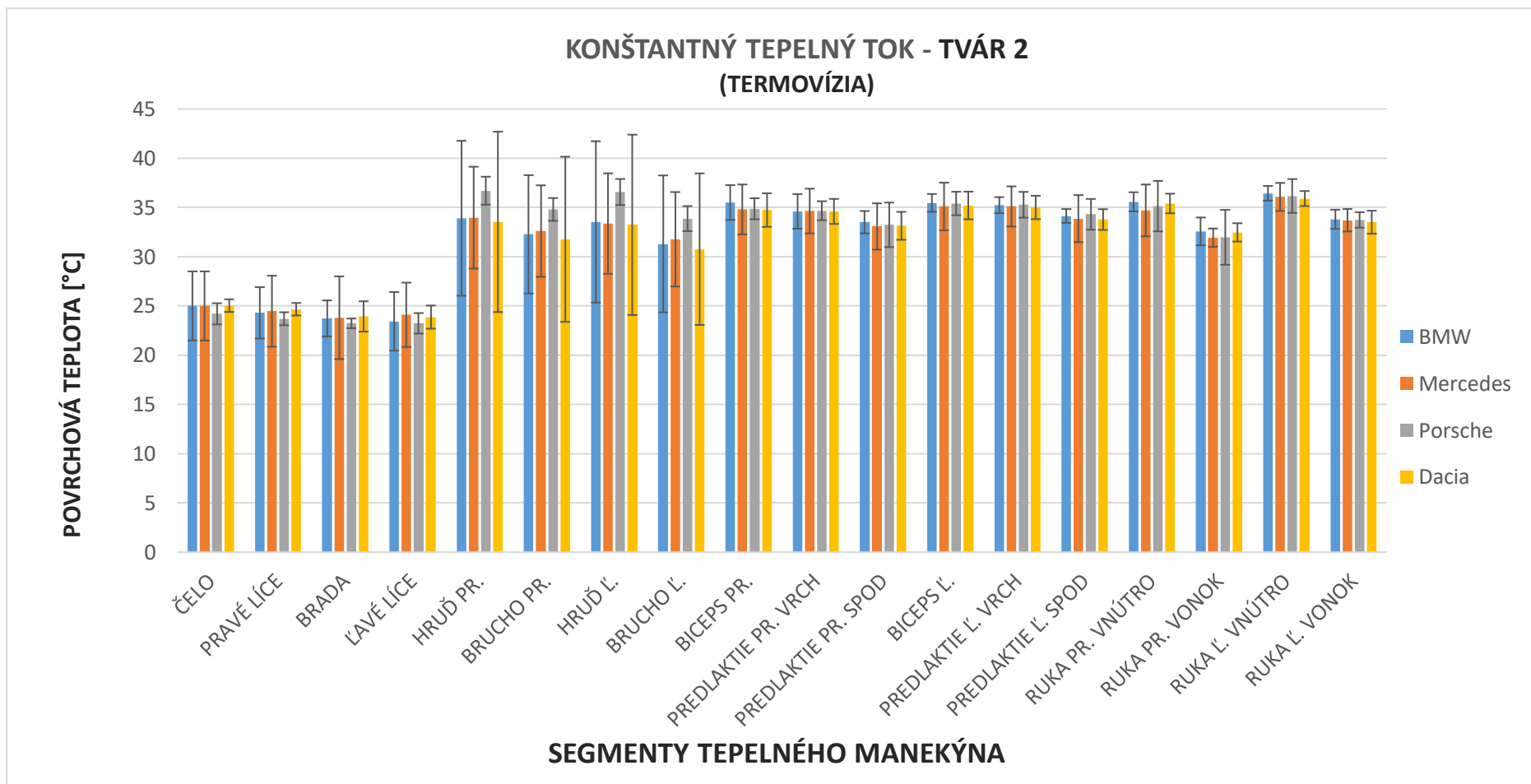
Pr. 2BC Hodnoty povrchovej teploty jednotlivých segmentov manekýna pri prevádzkovom stave tvár 4.



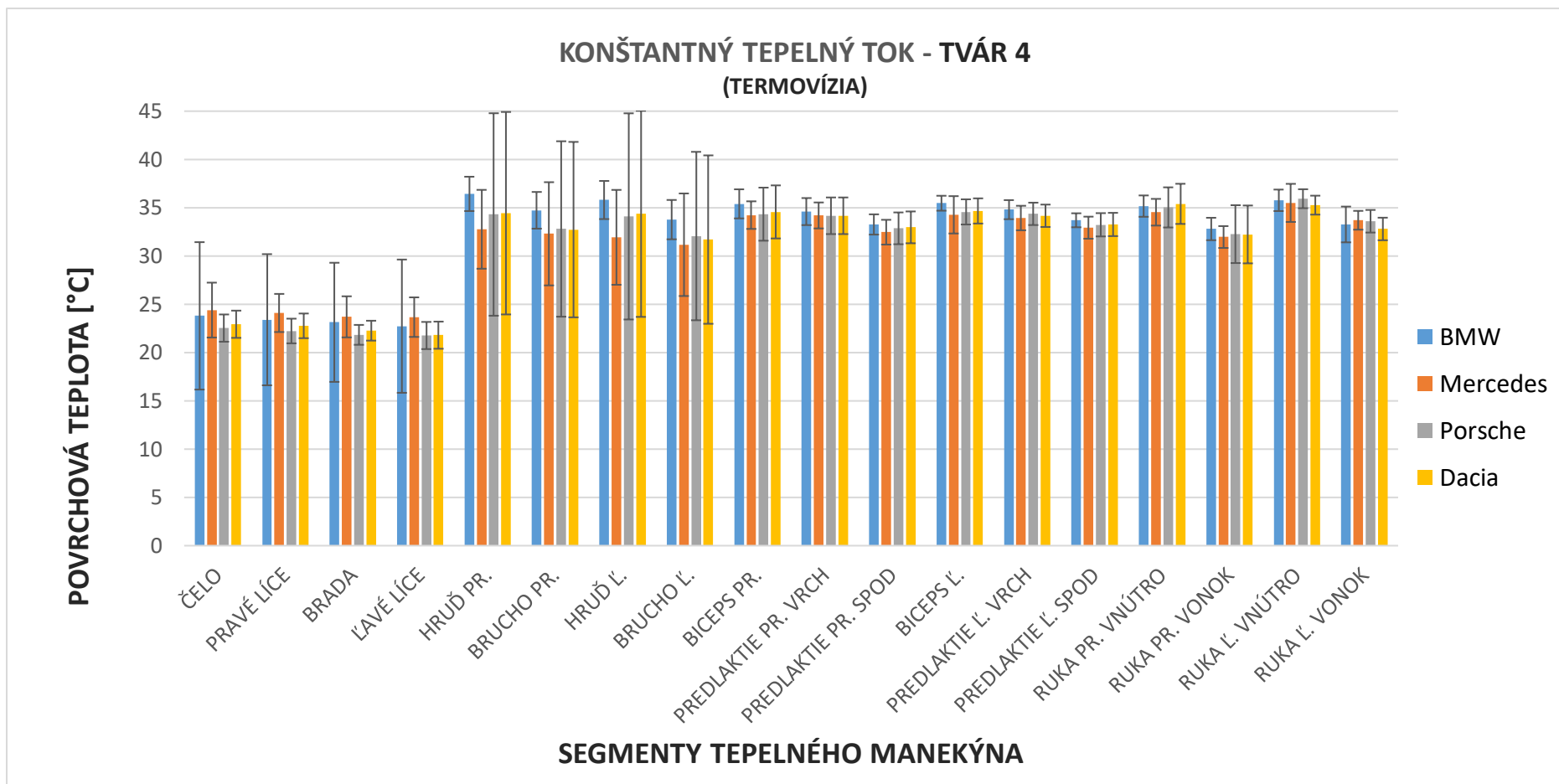
Pr. 3BC Hodnoty povrchovej teploty jednotlivých segmentov manekýna pri prevádzkovom stave hrud' 2.



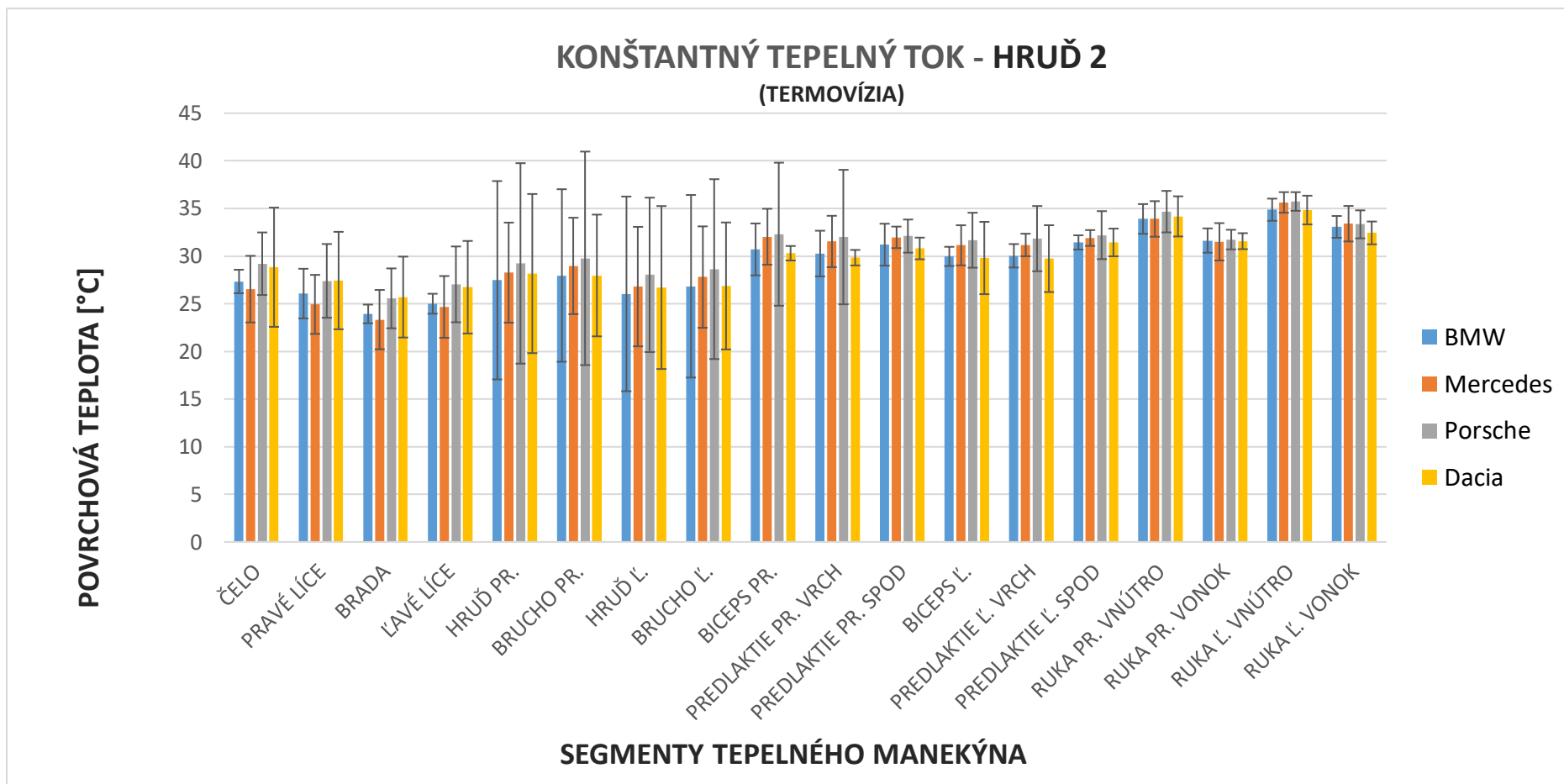
Pr. 4BC Hodnoty povrchovej teploty jednotlivých segmentov manekýna pri prevádzkovom stave hrud' 4.



Pr. 1BD Hodnoty povrchovej teploty jednotlivých častí segmentov manekýna pri prevádzkovom stave tvár 2 počas merania na konštantný tepelný tok.



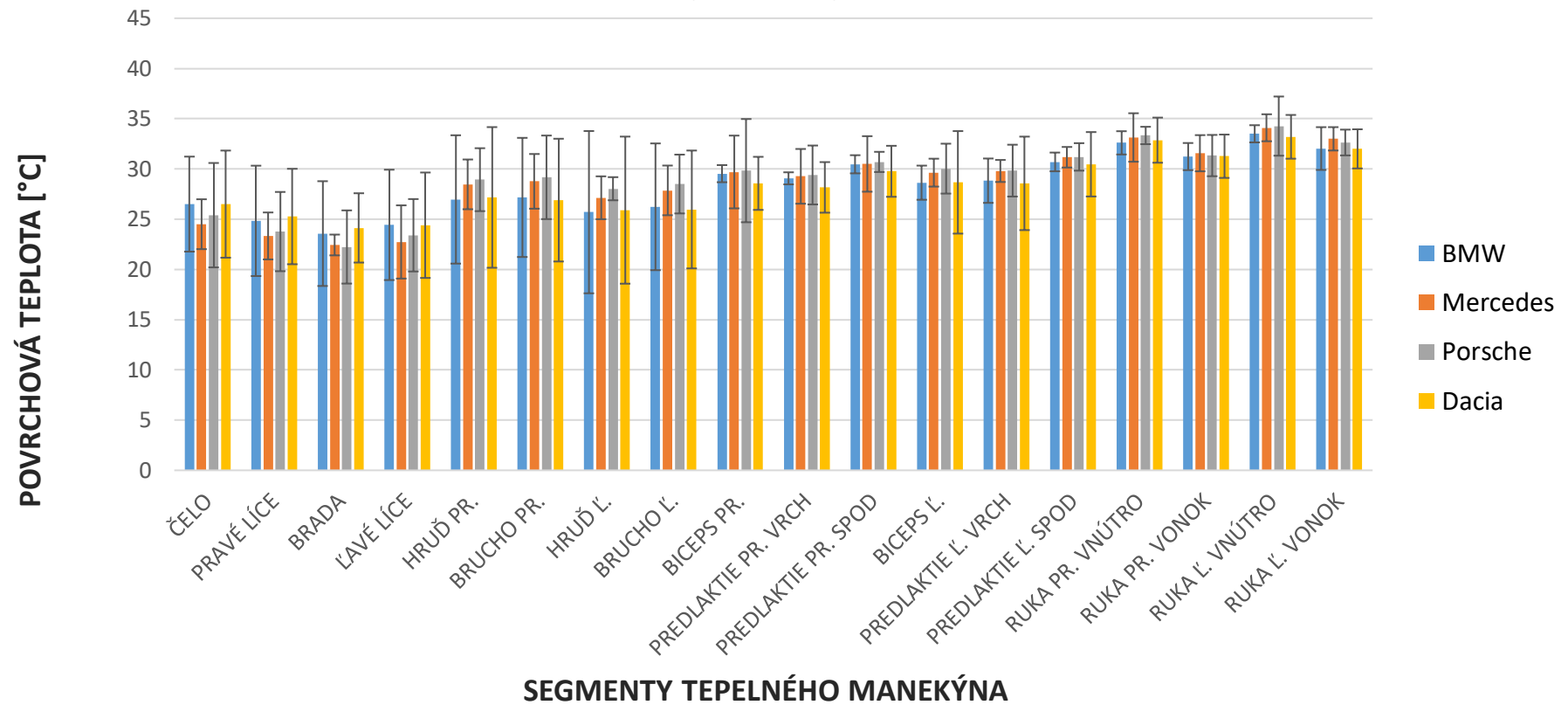
Pr. 2BD Hodnoty povrchovej teploty jednotlivých častí segmentov manekýna pri prevádzkovom stave tvár 4 počas merania na konštantný tepelný tok.



Pr. 3BD Hodnoty povrchovej teploty jednotlivých častí segmentov manekýna pri prevádzkovom stave hrud' 2 počas merania na konštantný tepelný tok.



## KONŠTANTNÝ TEPELNÝ TOK - HRUĎ 4 (TERMOVÍZIA)



Pr. 4BD Hodnoty povrchovej teploty jednotlivých častí segmentov manekýna pri prevádzkovom stave hrud' 4 počas merania na konštantný tepelný tok.