

## MÉRÉSI SEGÉDLET

## LAB-SESSION GUIDE

BEVEZETÉS	INTRODUCTION
<p>A hallgatók mérőcsoportokat hoznak létre: csoportonként egy-egy 1:20 méretarányú saját járműmodellt készítenek el. Az alapverzió és annak legalább 3 módosított geometriai változatára szélcsatornában mérésekkel határozzák meg az aerodinamikai paramétereket; illetve ködgenerátor+lézersík segítségével áramlás láthatóvátétellel vizualizálják a modell körül kialakuló áramkápét. A mérési eredményeket kiértékelik (összehasonlító elemzés és hibaszámítás kötelező!), majd minden csoport az utolsó laboron prezentálja eredményeit.</p>	<p>Lab groups of students are to be formed. Each group creates its own 1:20 scaled vehicle model. The aerodynamic parameters are to be measured in the wind tunnel and visualisation of the flow structure is to be performed using fog generator+ laser sheet illumination. The measured data for the base version + at least 3 modifications are to be evaluated. Detailed comparison with uncertainty analysis is a must. The results are to be presented by the labgroup members in the last lab session course event of the semester).</p>
JÁRMŰMODELLEZÉS	VEHICLE MODELLING
<p>A csoport rendelkezésére állnak egy saját felsorszámozott modellező dobozban az alábbi eszközök és alapanyagok:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- styrofoam* (kék) modell habtömb, méret 100×100×250</li> <li>- gyurma</li> <li>- kérésre: 4db kerék (ØD=25-28-30-35mm), szélesség? W=?</li> <li>- eszközök (ragasztó, sniccer, smirgli, ecset, kesztyű stb.)</li> <li>- 4db mágnes (ötféle Ød×H áll rendelkezésre)</li> </ul> <p><b>*: Figyelem! Csak vízbázisú ragasztó vagy festék alkalmazható a hab esetében!</b></p> <p>A cél egy kb. 1:20 méretarányú járműmodell elkészítése. (Az áramlástanilag megfelelő méretarány a később tárgyalt ún. blokkolási tényező értékétől is függ.) A jármű típusa szabadon megválasztható, de javasolt egy valós személyautó modellezése, mivel ezekre általában a 2D/3D geometria (pl. neten letölthető tervrajz) és aerodinamikai paraméterek (<math>C_D</math>, <math>A_{vet}</math>) rendelkezésre állnak az interneten. Ezeket ellenőrizze döntés előtt!</p> <p>Azért javasolt a 1:20 méretarány, mert az ekkora modelljármű már elég nagy, hogy a járműre ható (<math>F_x</math>) ellenállás- és (<math>F_z</math>) felhajtó- és (<math>F_y</math>) oldalero komponensek is pontosan mérhető legyen, de a blokkolási tényező is 5% közeli vagy azalatti marad a szélcsatorna mérés során.</p> <p>A modell kerekek alsó felületébe kell a mágneseket beépíteni: így mágnessel tud csatlakozni a modellautó az erőmérő mérleghez. Mégnesekről lásd a külön dokumentumot.</p> <p><b>Alapverzió + legalább 3 módosítás kötelező!</b> Az alapformán (jelölje ezt „MOD-0”) túl legalább három („MOD-1”; „MOD-2”; „MOD-3”) módosított geometriai változat elkészítése kötelező. (Pl. első-hátsó szélvédő döntési szög-változatok, diffúzor, lökhárító, homlokkal kialakítás, él-lekerékítések, addicionális első-hátsó spoilerok, szárnyak, tetőtartó, tetőbox, oldaltükrök, stb.). Az autómódellet feketére, a módosított geometriai elemeket pedig célszerű pl. színes vízbázisú festékkel lefesteni. A módosításokat úgy kell elkészíteni, hogy az autómódel szélcsatorna mérlegről való leszerelése nélkül azok fel- és eszerelése egyszerűen megtehető legyen és a rögzítésük is elegendően merev legyen, hogy ellenálljon a szélterhelésnek.</p> <p><b>Kerekek:</b> Adott ØD=25-28-30-35 mm farúdból fix W=10mm szélességre levágott kerekek állnak rendelkezésre. Ha ez a méret nem megfelelő, akkor készítsen saját modelljéhez megfelelő méretű kerekeket habból! Ügyeljen a tengelytávra és a megfelelő kerék / kerékház térfogatarányra. Javasolom, hogy Ön készítse el a kerekeket. A 4db mágnes is az aljára kell csavarozni.</p> <p><b>Vetület keresztmetszet:</b> A jármű <math>A_{vet}</math> megfúvásra merőleges vetület keresztmetszetét meg kell határozni/lemérni. Ez változhat a létrehozott módosítások függvényében.</p> <p><b>Reynolds-hatás:</b> A modell homlokfali élein ún. „botlódrót” (turbulencia generátor, „trip wire”) használata javasolt annak érdekében, hogy elősegítsük a határreteg mielőbbi laminárisból turbulensé történő átmenetét, a Reynolds-független tesztelését.</p>	<p>Each group will receive their own numbered modelling toolbox with the following materials and tools for vehicle modelling:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- styrofoam* (blue) modelling foam block of 100×100×250</li> <li>- plasticine</li> <li>- upon request: 4 wheels (ØD=28mm), provide width W=?</li> <li>- tools (glue, scalpel, sandpaper, brush etc.)</li> <li>- 4db magnets (five different sizes Ød×H available)</li> </ul> <p><b>*:Note! Only water-based glue and paint can be applied for the foam!</b></p> <p>The aim is to create a vehicle of approx. 1:20 scale. The vehicle type is free of your choice, but a passenger car is preferred since its 2D-3D geometry files (blueprints, sketches) and aerodynamic data (<math>C_D</math> and <math>A_{proj}</math>) are usually available online. It is suggested to choose such a real vehicle whose technical drawing or 3D CAD model is available online. That allows for easier modelling. Check it online before the decision is made. It is suggested to create a 1:20 scale model-vehicle since it is large enough for the precise <math>F_x</math> (drag), <math>F_z</math> (lift) and <math>F_y</math> (side) force components measurement and also, the blockage ratio will be near or below 5% when testing it in the wind tunnel closed test section.</p> <p>The small magnets are to be mounted into the wheels; these magnets ensure the proper connection to the balance system. About the available magnets, see in separate document.</p> <p><b>Base version + at least 3 modifications are a must!</b> Beyond the base version min. 3 modifications is to be created &amp; tested (denoted by “MOD-0”, “MOD-1”, “MOD-2”, “MOD-3”). It is suggested to use e.g. front/rear/side/wheel spoilers, mirrors, side skirts, roof-rack system, top-box, changed angles, rounding-up edges, shortening, tail elongation, side skirt, rear diffuser, cutting out of the wheel arch, other excrescences, attachments, spoilers, wings, mirrors etc. Note that the additional elements must be prepared to allow easy mounting/dismounting to the base vehicle without removing the vehicle fixed to the balance system. Also, note that they must hold against the wind load.</p> <p><b>Wheels:</b> Wheels are available (wooden rods of ØD=25-28-30-35 mm with W=100mm). If the wheels are not appropriate for your vehicle model, then prepare your own wheels from styrofoam! Take care of the wheel distance and the proper wheel / wheelhouse volume ratio! Preferable to do your own wheels and also 4 magnets are to be fixed by screws on the bottom of the wheels.</p> <p><b>Projected area:</b> The <math>A_{ref}</math> (reference projected frontal area) of the model car has to be determined/measured. Not that it may change according to the applied modifications!</p> <p><b>Reynolds-effect:</b> It is suggested to use turbulence trip (transition) wire on the edges of the front surface to force the laminar-to-turbulent transition of the boundary layer since the Reynolds-effect must be taken into account. (Thin steel wire is available and is to be fixed to the front edges).</p>

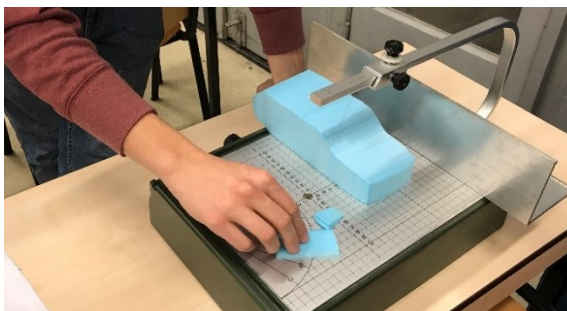
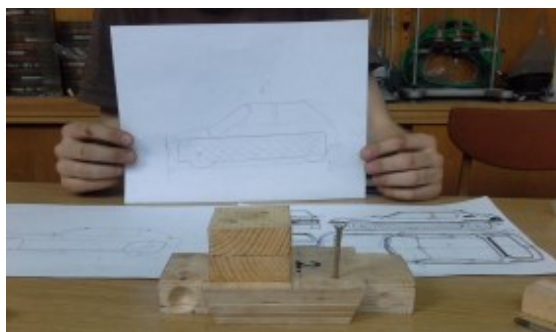
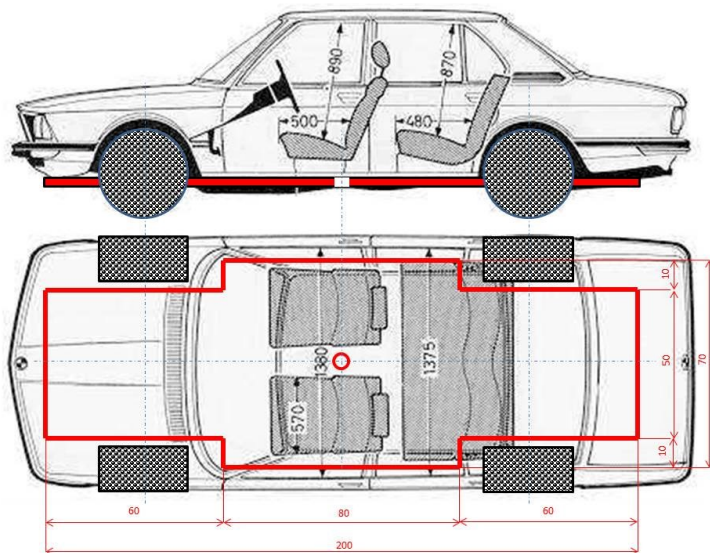
(Ehhez egy vékony acélhuzal áll rendelkezésre, amelyet a homlokfali élre kell rögzíteni).

**Fotók, vízbázisú festés:** Ne felejtse el fényképeket készíteni a modellezés menetéről! A láthatóvá tételi vizsgálatokhoz a modellt feketére fesse le, módosításokat pedig színesre.

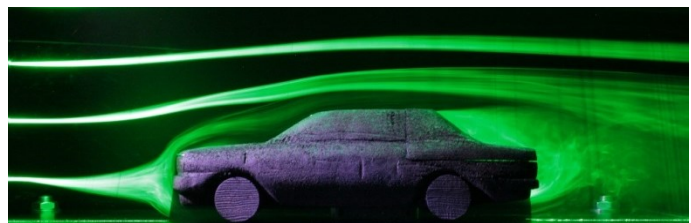
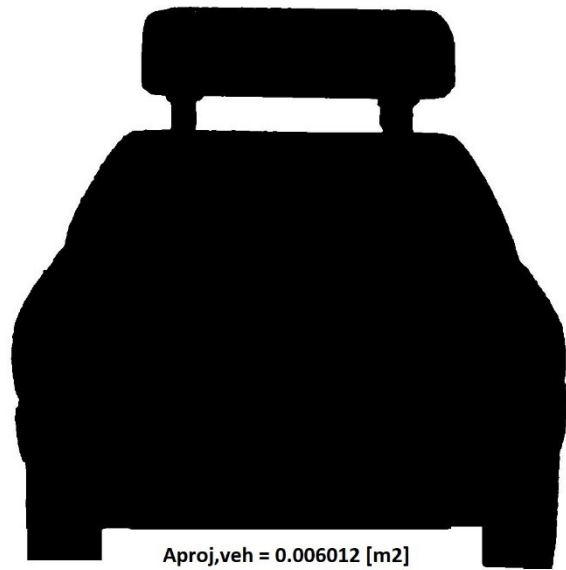
**Photo, water-based painting:** Do not forget to document the vehicle manufacturing process by making photographs! Finally, the vehicle is to be painted black to allow good contrast for flow visualisation. Colour paints are available for modifications.

## PÉLDÁK: JÁRMŰMODELL ÉPÍTÉSÉRE

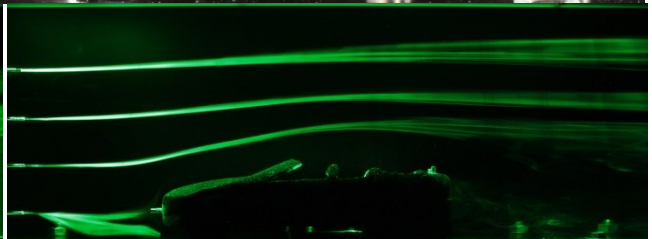
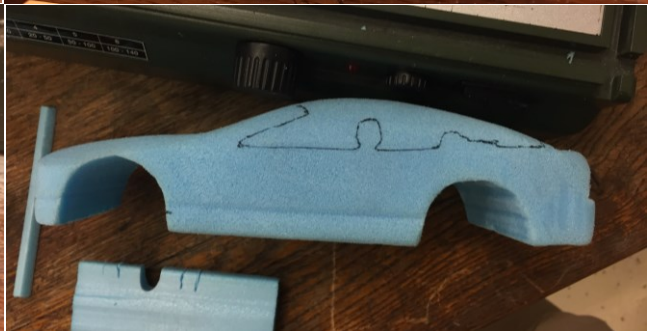
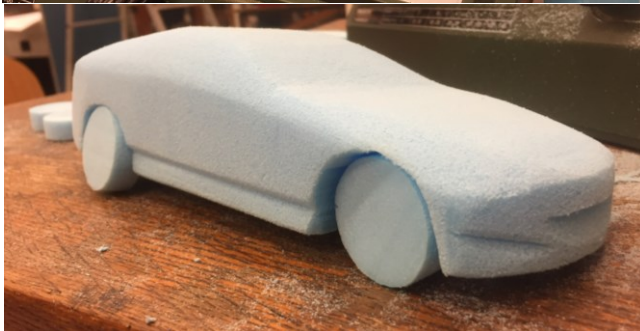
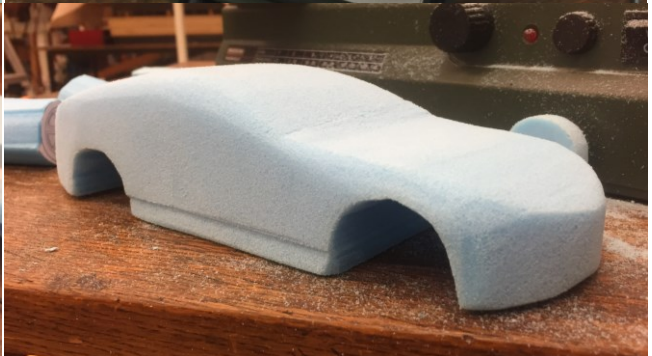
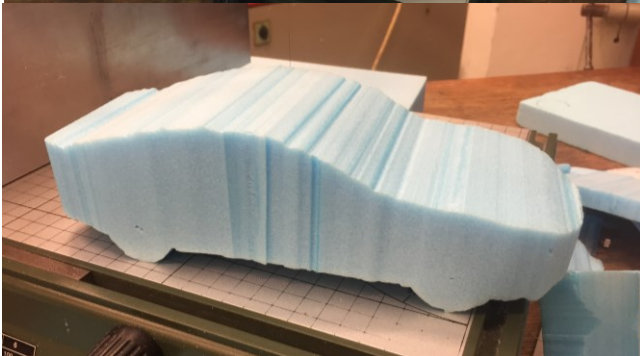
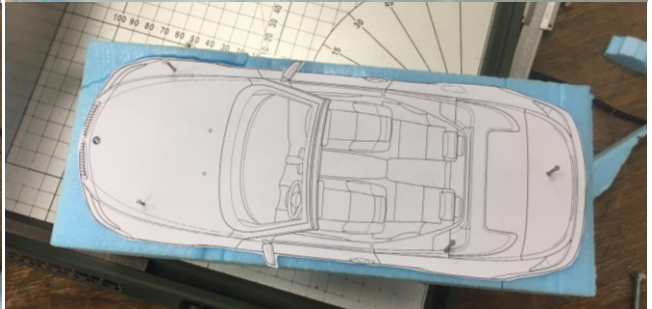
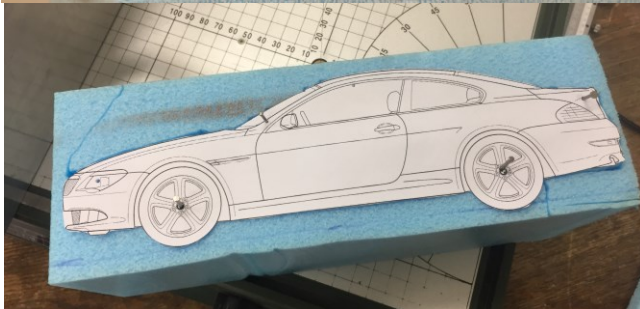
## EXAMPLES: MODEL VEHICLE BUILDING











## SZÉLCSATORNA TESZTEK

A méréseket (kb. 120 perc/csoport) a 11.-13. heteken kell elvégezni csoportonként előzetesen egyeztetett időpontban ([suda.jeno.miklos@gpk.bme.hu](mailto:suda.jeno.miklos@gpk.bme.hu)). A mérésekre előzetesen készüljön fel, gondolja át mit/hogyan kell mérni.

## Szélcatorna és mérőrendszer adatok:

- „Feketerigó I.” szélcatorna (4,8kW;  $v_{max}=25\text{m/s}$ ; nyomott üzemű, zárt mérőtér:  $H \times W \times L = 350\text{mm} \times 350\text{mm} \times 1000\text{mm}$ )
- aerodinamikai mérleg: háromkomponensű ( $x, y, z$ ) erőmérés 3 azonos erőmérő cellával ( $x, y, z$  mindegyik max.3kg)
- mozgó talaj szimulációs módszer: a határrétegből ki(meg)emelt alaplappal (tehát nem forognak a járműkerekek, nem mozog a talaj)
- megfúvási sebesség (dinamikus nyomás) mérése Prandtl-csővel (KIMO NPL gyártmány) történik (max.  $\pm 250\text{Pa}$  SETRA nyomástávadóra csatlakoztatva)
- adatgyűjtés, feldolgozás: „Pressure & Force” LabView software (Áramlástan Tanszéki fejlesztés), megfúvási referencia dinamikus nyomás ( $p_{dyn,ref}$ ) mérése SETRA nyomástávadóval Betz-manométerhez kalibrálva, erőmérő cellák kalibrálása szabvány súlyokkal ( $F_x$ ;  $F_y$ ;  $F_z$ ).
- áramlás láthatóvátétel: 500mW zöld dióda lézerekkel (az x-z függőleges középsíkben, ködgenerátor, digitális fényképezőgép, saját telefon javasolt stb.

## A 120 perc mérési idő felosztása:

**A) Mintegy 60 perc szükséges aerodinamikai erőkomponensek ( $F_x=F_{drag}$ ,  $F_y=F_{side}$  and  $F_z=F_{lift}$ ) mérésére:** legalább öt különböző Reynolds-szám (azaz áramlási sebesség) esetén a  $10 \div 22,5$  m/s tartományban stb) esetén. (kb. max. ekkora megfúvási érhető el a autómódel és mérleg által fojtott mérőtérben)

A mozgó talaj szimulációja a fali határrétegből kiemelt síklappal történik, tehát nincs se tényleges mozgó talaj, se forgó kerekek. A talajhatás nagyon fontos aerodinamikai tényező, így az autó hasmagasságának párhuzamosságának stb. beállítása, a talajhoz mágnessel kapcsolódó rögzített (nem forgó) kerékekkel szerelt autómódel pozicionálása során nagy gondossággal kell eljárni. A megfúvási irány (autómódel z tengely körüli forgatásával történő) beállításra is ügyeljen! A helyszínen erre még kitérünk.

**B) Mintegy 60 perc szükséges az áramlás láthatóvá tételi vizsgálatokra:**

Az erőmérés után a módel-változatok körüli áramlást láthatóvá kell tenni és arról kép/videó felvételeket kell készíteni a középsíkbeli áramvonalakkal. Lézersík (zöld, 532nm@500mW) és ködgenerátor, és 4-5 áramvonal létrehozására alkalmas „fésű”, valamint tanszéki CANON EOS-1100D kamera + állvány (MANFROTTO) áll rendelkezésre. + saját telefonjuk kamerája pedig ennél sokkal jobb, így azt ajánlom használni fotó és videó felvételekhez.

Vakut **NE** használjon, ügyeljen a helyes fókuszt, mélységélesség, fényérzékenység, rekesz és záradó beállításokra!

Minden módosítást, az alapvezirő és a három módosítás változat körüli áramlást is láthatóvá kell tenni, dokumentálni és elemezni a prezentáció során!

## WIND TUNNEL TESTING

For wind tunnel testing approx. 120 min/group is available for each group between 11<sup>th</sup> to 13<sup>th</sup> weeks based on email appointment ([suda.jeno.miklos@gpk.bme.hu](mailto:suda.jeno.miklos@gpk.bme.hu)). Please be prepared for the lab session (what & how to measure)!

## Wind tunnel, equipment &amp; devices data:

- „Blackbird-I.” wind tunnel (4,8kW;  $v_{max}=25\text{m/s}$ ; blower type, closed test section:  $H \times W \times L = 350\text{mm} \times 350\text{mm} \times 1000\text{mm}$ )
- aerodynamic balance system: 3-components ( $x, y, z$ ) measurements with 3 load cells ( $x, y, z$  cells each max.3kg)
- moving ground simulation method: “elevated ground” is used in the test section (neither rotating wheels nor using a moving belt is not available)
- flow velocity (dynamic pressure) is measured by a standard Pitot-static tube (i.e. Prandtl-tube, KIMO NPL type) connected to max.  $\pm 250\text{Pa}$  SETRA pressure transducer
- data acquisition/processing: „Pressure & Force” LabView software (developed by Dept. Fluid Mechanics), the reference dynamic pressure ( $p_{dyn,ref}$ ) is measured by SETRA pressure transducer calibrated to Betz-type manometer; load cells are calibrated by standard weights ( $F_x$ ;  $F_y$ ;  $F_z$ )
- flow visualisation technique: 500mW laser light sheet (mid-center plane of x-z is illuminated) & fog generator, digital photo camera, your own phone’s camera is suggested to use

## Allocation of 120min measurement time:

**A) Approx. 60 minutes for measurement of the aerodynamic force components ( $F_x=F_{drag}$ ,  $F_y=F_{side}$  and  $F_z=F_{lift}$ ):** at least at five different Reynolds-number (i.e. flow velocity setting in the range of  $10 \div 22,5\text{m/s}$  etc.). The flow velocity maximum is reduced due to blocked test section.

For moving ground modelling, a horizontal ground (elevated) plate is used in the wind tunnel test section. The plate is elevated above the wall boundary layer (BL). The ground effect is a significant aerodynamic effect, hence setting the vertical position underbody height etc. of the vehicle of stationary wheels using magnets to attach the ground plate. Careful positioning and levelling parallel to the x (streamwise) axis is a must! “How to?” will be guided during the lab session.

**B) Approx. 60 minutes are needed for flow visualisation study:**

Diode laser light sheet (green, 532nm@500mW) & fog generator and a rake (creating 4-5 streamlines) are provided. The digital camera (CANON EOS-1100D) and stand (MANFROTTO) can be used, but mainly your own smartphone camera is the highly suggested for photo and video documentation. Visualisation of the streamlines around the vehicle and the location & size of the separation bubbles, reattachment zones, wake region downstream of the car, effect of spoilers, etc. or other additional attachments, and soiling of the rear face of the vehicle etc., can be recorded. Take care of proper focusing, ISO settings and shutter speed!

Do **NOT** use a flashlight!

The flow field around the base version and each modifications need to be visualised and evaluated during your presentation.



**MÉRÉSI SEGÉDLET****LAB-SESSION GUIDE****Eredmények prezentációja**

A mérőcsoportok az elvégzett munkáról a félév utolsó hetén prezentáció keretében számolnak be. A mérési eredményeket összefoglaló kb. 10-15 perces prezentációt (ami egyben a mérési jegyzőkönyv is) legkésőbb a 14. heti utolsó óra előtti napon kell emailen szerkeszthető (pptx) és pdf) formátumban emailen ([suda.jeno.miklos@gpk.bme.hu](mailto:suda.jeno.miklos@gpk.bme.hu)) beküldeni. Adatfile: xlsx.

A járművükre mért adatok alapján a kiszámított aerodinamikai paramétereket kérem, hasonlítsák össze a valós jármű szakirodalomban, ill. online fellelhető adataival! Elemezzék és értékeljék az eredményeiket! Végezzenek mérési hibaszámítást minden mért erőténytényezőre! Enélkül a mérési jegyzőkönyv ill. prezentáció nem elfogadható.

A labormérések értékelésénél az alábbi szempontokat veszem figyelembe (megfelelően súlyozva):

- 1) ÖTLET & KREATIVITÁS: járműválasztás eredetisége
- 2) JÁRMŰ MODELLEZÉS MINŐSÉGE: gondosság & geometriai hasonlóság
- 3) GEOMETRIAI VÁLTOZATOK: milyen módosításokat hoztak létre (legalább 3 változat az alapkövetelmény)
- 4) ADATGYŰJTÉS és ÖSSZEHASONLÍTÁS: a valós és mért aerodinamikai paraméterek összehasonlítása
- 5) KÍSÉRLETI (LABOR) MUNKA MINŐSÉGE: általános értékelés
- 6) ÁRAMLÁSI TÉR MODELLEZÉS MINŐSÉGE: Reynolds-hatás figyelembe vétele, értékelése
- 7) MÉRT ADATOK KIÉRTÉKELÉSÉNEK MINŐSÉGE: helyes számítás és kiértékelés
- 8) HIBASZÁMÍTÁS MINŐSÉGE: eredmények értékelése
- 9) EREDMÉNYEK ÉRTÉKELÉSÉNEK MINŐSÉGE: aerodinamikai következtetések levonása, összehasonlító elemzés
- 10) VIZUALIZÁCIÓ MINŐSÉGE: a jármű aerodinamikai viselkedésének bemutatása, minden módosításra
- 11) JELENTÉS, PREZENTÁCIÓ, DOKUMENTÁCIÓ minősége
- 12) EREDMÉNYEK BEMUTATÁSÁNAK MINŐSÉGE: diagramok, táblázatok, adatok, ábrák, jelmagyarázatok stb.
- 13) ELŐADÁS minősége, kérdésekre adott válaszok. stb.

**Presentation of results**

The results of the lab session are to be presented by each group on the last labcourse event of the semester. 10-15 minutes long presentation (it also serves as the lab report) is to be submitted on the day before the presentation. Please send me your presentation in editable (pptx) and in pdf format by email to [suda.jeno.miklos@gpk.bme.hu](mailto:suda.jeno.miklos@gpk.bme.hu). Your datafile format: xlsx.

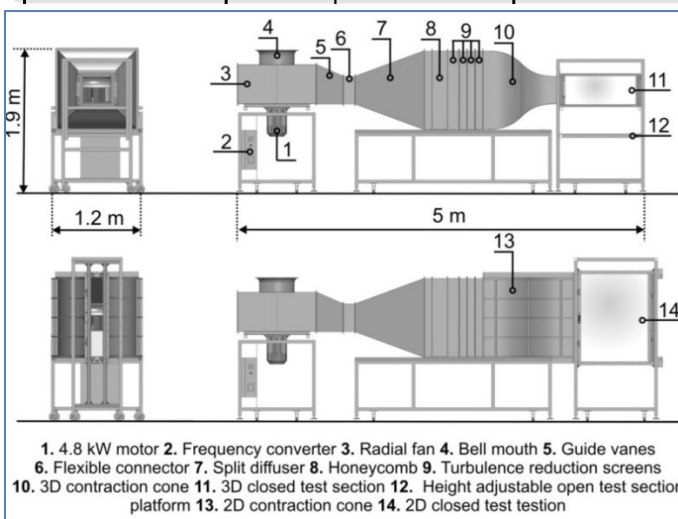
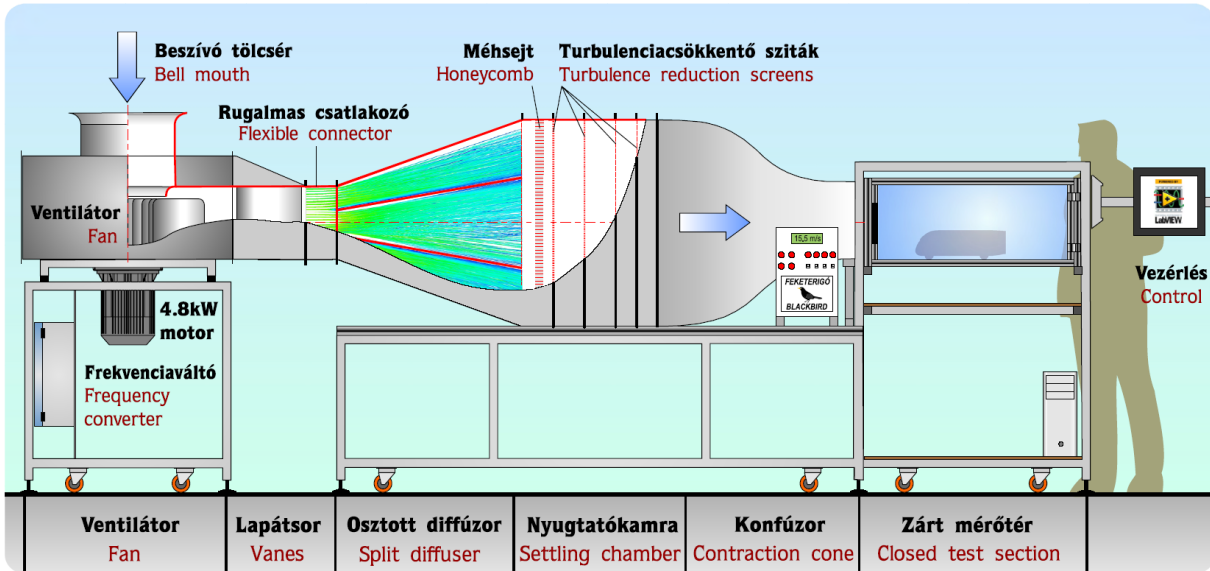
Please compare your measured and calculated aerodynamic data to the literature available for your vehicle. Analyse and evaluate your results! Perform uncertainty analysis (i.e. calculate measurement error) for the measured aerodynamic force coefficients! Without such uncertainty analysis, your report/presentation is not acceptable.

The following parameters (weighted appropriately) will be taken into account during the evaluation of your lab session work:

- 1) IDEA & CREATIVITY: originality of choosing a vehicle
- 2) QUALITY OF PHYSICAL MODELLING OF THE VEHICLE: carefulness & geometrical similarity
- 3) GEOMETRICAL VARIATION: what kind of variants, add-on devices are tested (3 variants are the minimum)
- 4) COLLECTING and COMPARING DATA: comparison of the measured to real parameters
- 5) QUALITY OF EXPERIMENTAL WORK: general evaluation
- 6) QUALITY OF FLOW FIELD MODELLING: taking into consideration of the Reynolds-effect, evaluation
- 7) QUALITY OF ANALYSING of the MEASURED DATA: proper calculation and evaluation
- 8) QUALITY OF ERROR ESTIMATION: error analysis is a must!
- 9) QUALITY OF EVALUATION OF RESULTS: aerodynamic conclusions
- 10) QUALITY OF FLOW VISUALISATION: illustrating the aerodynamic behaviour of your vehicle for all modifications
- 11) QUALITY of the REPORT, PRES & DOCUMENTATION
- 12) QUALITY of DATA VISUALISATION: diagrams & data tables, explanations, figures, captions etc.
- 13) QUALITY of the oral presentation & answers to questions. etc.

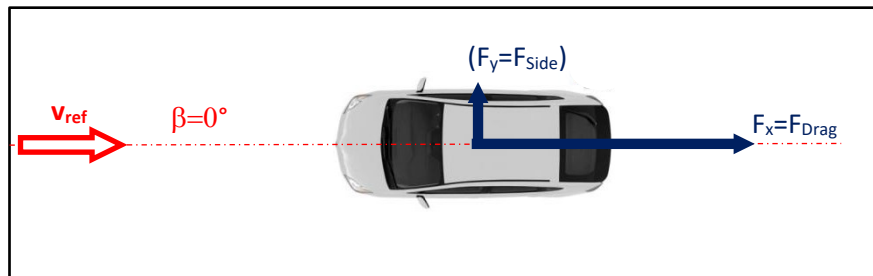
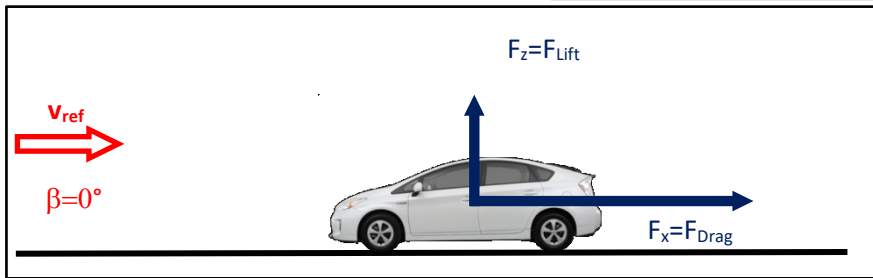
**MÉRÉSI SEGÉDLET**

**LAB-SESSION GUIDE**

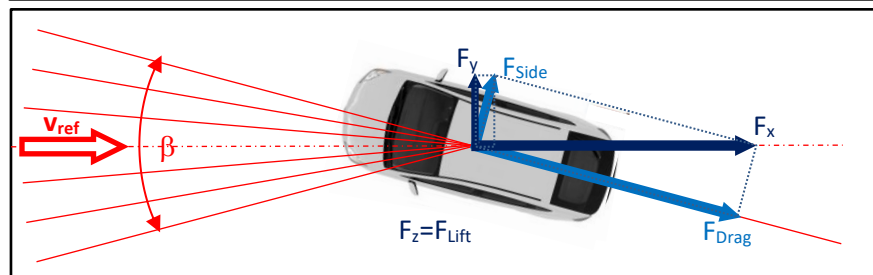


<b>Típus</b> Type	nyomóüzemű blower
<b>Mérőtér</b> Test section	nyitott vagy zárt open or closed
<b>Motorteljesítmény</b> Motor power	4.8 kW
<b>Befoglaló méretek</b> Dimensions	4 x 1.2 x 1.9 m
<b>Turbulenciaintenzitás</b> Turbulence intensity	0.8 %
<b>Mérőterek és max. sebességek</b> Test sections and peak velocities	
Kicsi / small:	0.35 x 0.35 m (24 m/s)
Nagy / large:	0.4 x 0.5 m (15 m/s)
2D:	0.15 x 1 m (20 m/s)

1. 4.8 kW motor 2. Frequency converter 3. Radial fan 4. Bell mouth 5. Guide vanes  
6. Flexible connector 7. Split diffuser 8. Honeycomb 9. Turbulence reduction screens  
10. 3D contraction cone 11. 3D closed test section 12. Height adjustable open test section platform 13. 2D contraction cone 14. 2D closed test section



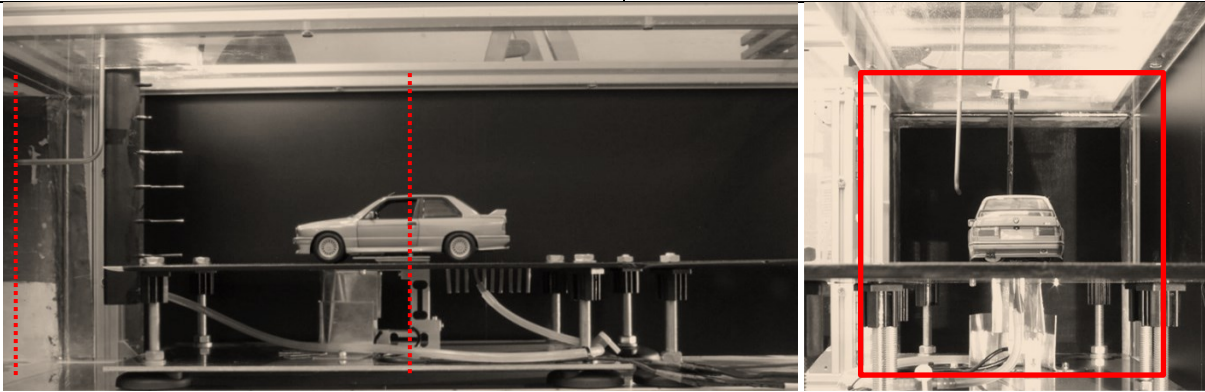
don't need to perform side wind tests!



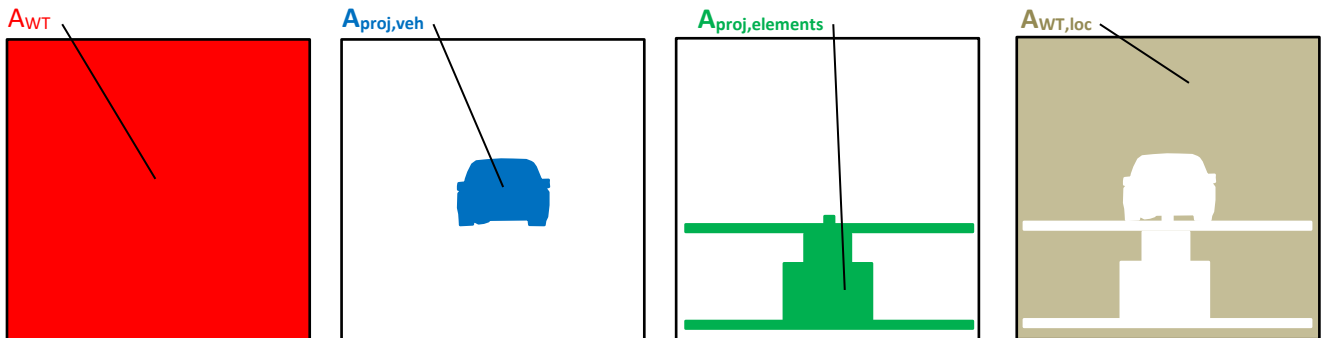
**MÉRÉSI SEGÉDLET**

**LAB-SESSION GUIDE**

<p><b>MÉRT ADATOK KIÉRTÉKELÉSE: Figyeljen az átváltásra! Az adattáblában az erőkomponensek grammal szerepelnek!</b></p>	<p><b>EVALUATION OF MEASURED DATA: Note the units! The force components are given in grams in the data tables!</b></p>
<p><b>3) BLOKKOLÁSI TÉNYEZŐ (Korrigálja mérési adatait a blokkolás miatt!)</b></p>	<p><b>3) BLOCKAGE RATIO (Use blockage correction for the measured data!)</b></p>
<p>Az alábbi fotókon egy járműmodell (M=1:18, BMW e30 M3) látható a szélcsatorna zárt mérőterében a korábbi erőmérő rendszerre rögzítve. A mozgó talaj hatását a határrétegből kiemelt síklapra helyezéssel modellezzük (ún. „kiemelt talaj” módszere). Az erőmérő rendszer az ettől független alsó síklapra van rögzítve. A kiemelt síklap beállító csavarokkal manuálisan pozícionálható. A mérőtér belépő keresztmetszetét és a tesztelt modell helyi keresztmetszetét piros szaggatott vonalakkal jelöltük az alábbi ábrán.</p>	<p>In the photos below, the closed test section is shown with a vehicle model (1:18 scaled BMW e30 M3) fixed on the balance system. The “elevated ground” method is used for moving ground simulation, i.e. the horizontal ground plate is elevated above the lower wall boundary layer. The balance system is fixed to the separate lower base plate. The elevated ground plate can be levelled manually by four screws. The dotted red line indicates the inlet cross-section and the local cross-section where the vehicle is placed.</p>



Az alábbi ábrákon a fontos vetület keresztmetszetek láthatók: Important projected areas are shown in the images below:



<p>A szélcsatorna <u>mérőtér teljes belépő szabad keresztmetszete.</u></p>	<p><math>A_{WT}=350\text{mm} \times 350\text{mm}=0,1225 \text{ m}^2</math></p>	<p>The <u>full free inlet cross-section</u> area of the test section</p>
<p>Az adott <u>autómodell vetület keresztmetszete.</u> (Használja a saját autóját!)</p>	<p><math>A_{proj,veh}=? \text{ m}^2</math></p>	<p>The <u>projected area of the given model vehicle.</u> (Use the data of your own vehicle!)</p>
<p>Az egyéb összes többi elem <u>vetület keresztmetszete</u> (autó helyén). Az aktuális mérlegrendszer vetületi képét lásd az alábbi ábrán!</p>	<p><math>A_{proj,elements}= 0,01943275 \text{ m}^2</math></p>	<p>The <u>projected area of all other elements</u> (in the transversal midplane of the vehicle’s position)   *The image of the projected area of the actual balance system is shown in the figure below!</p>
<p>A levegő <u>maradék szabad áramlási keresztmetszete</u> (kiadódó méret).</p>	<p><math>A_{WT,loc}=A_{WT}-(A_{proj,veh}+A_{proj,elements})=? \text{ m}^2</math></p>	<p>It is the remaining <u>free airflow cross-section</u> area (calculated result)</p>

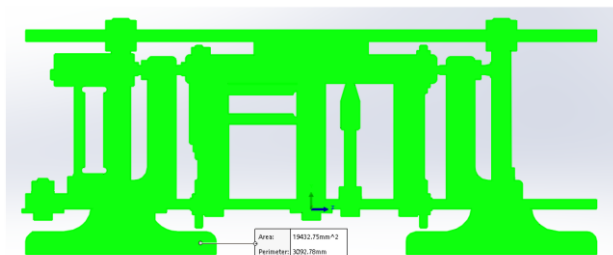


Figure 3.27. – The projected are of the balance

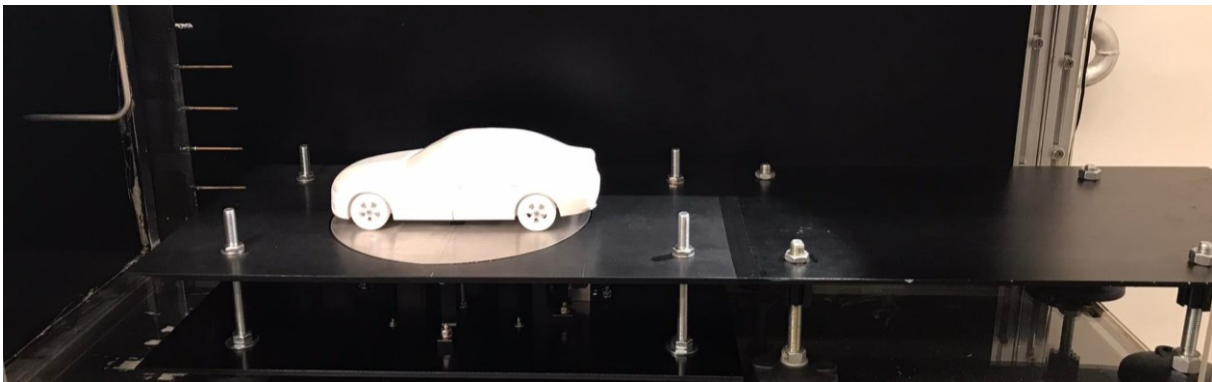


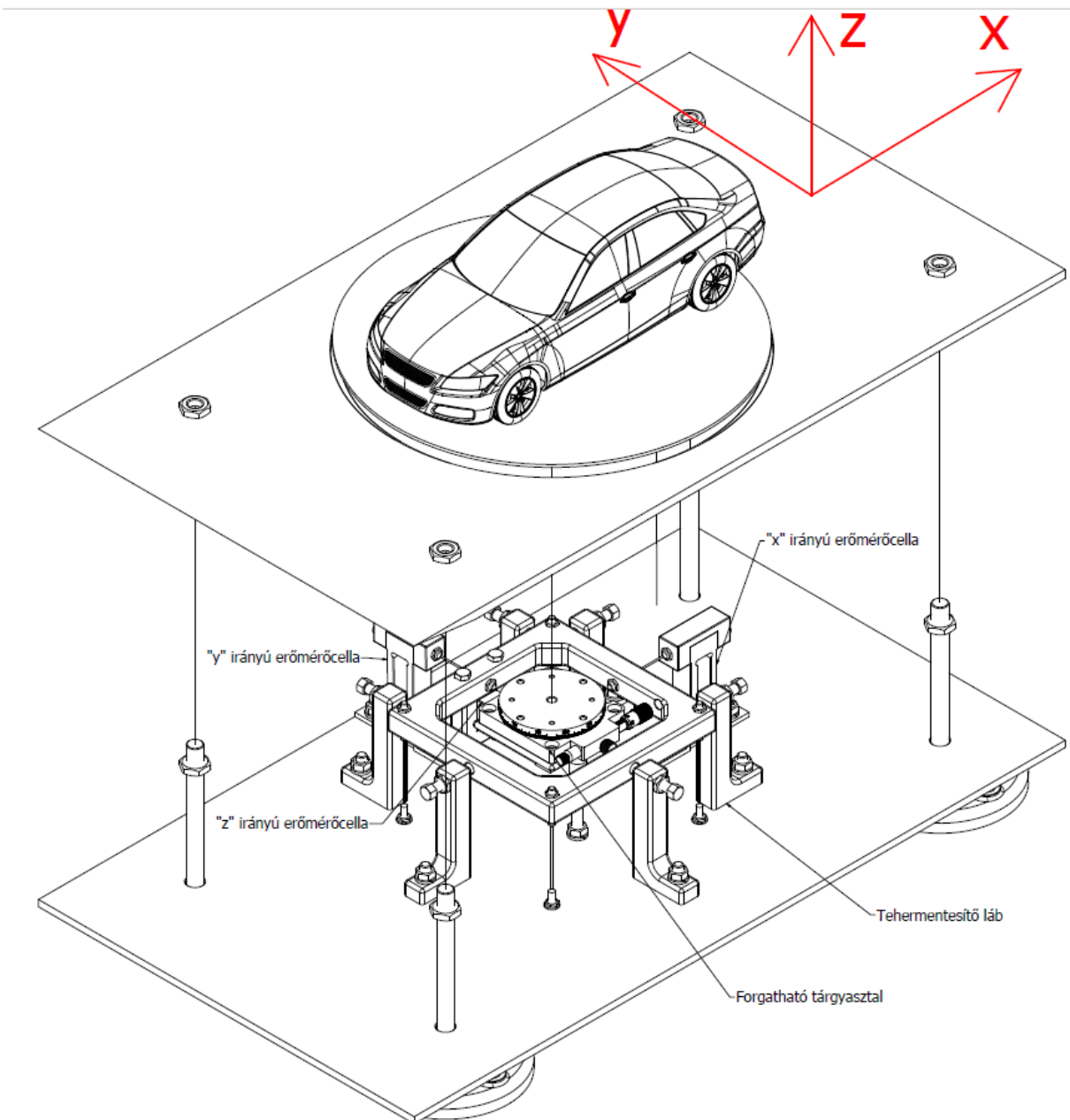
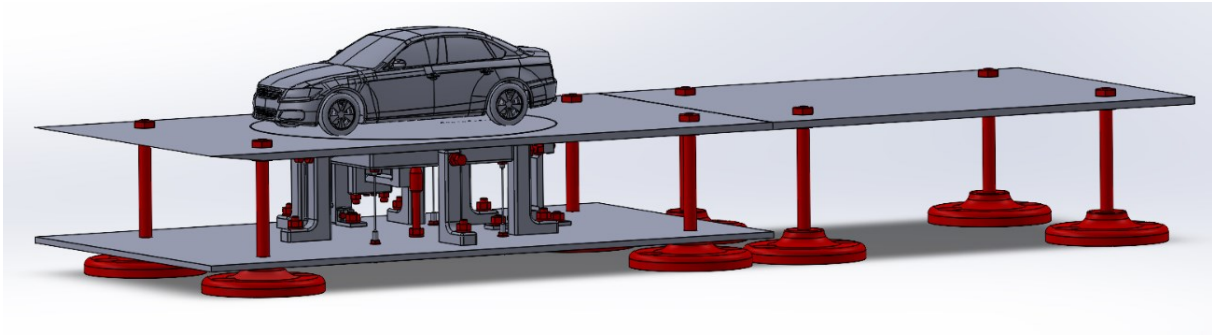
**AERODINAMIKAI MÉRLEG A MÉRŐTÉRBE**

Az alábbi ábrákon az aerodinamikai mérleg látható.

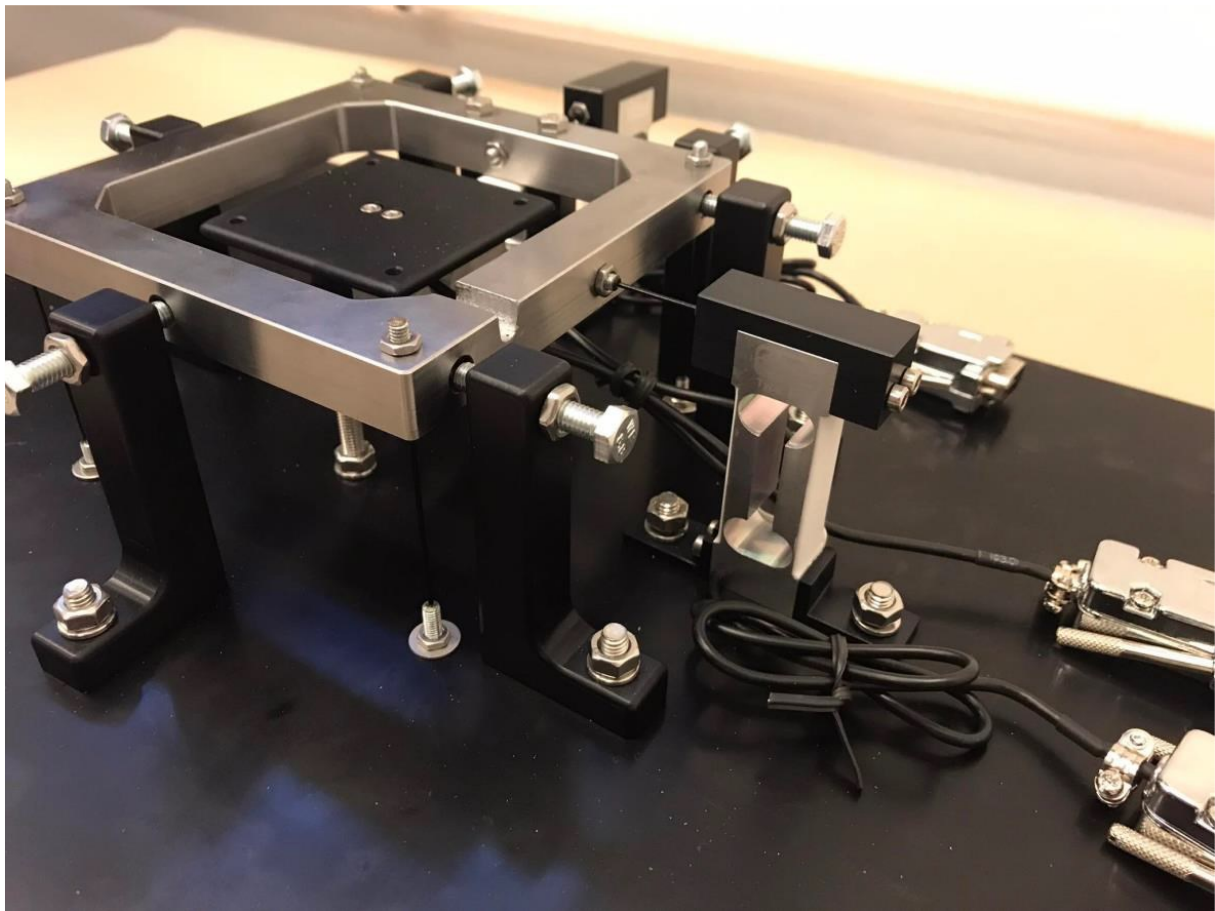
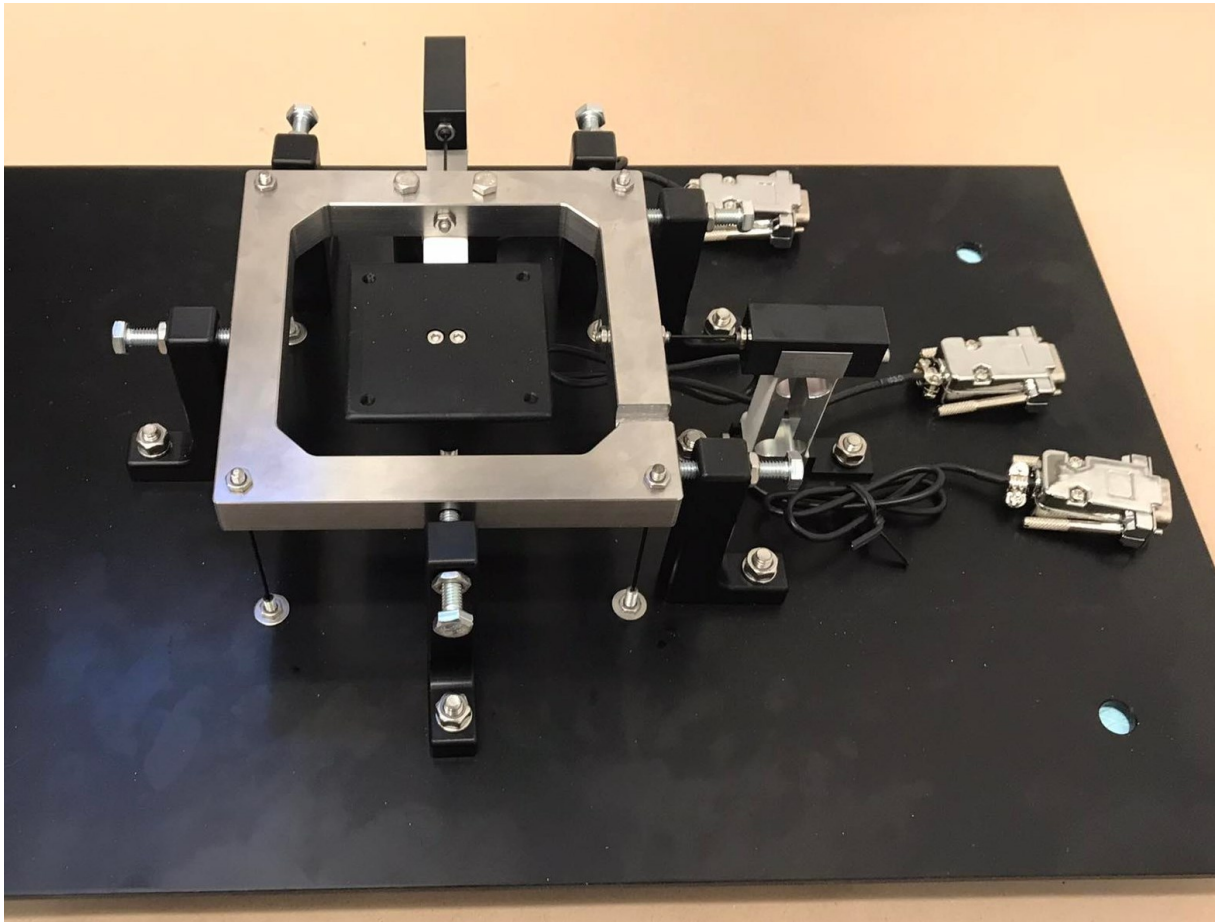
**AERODYNAMIC BALANCE IN THE TEST SECTION**

In the images below, the test section with the balance is shown.

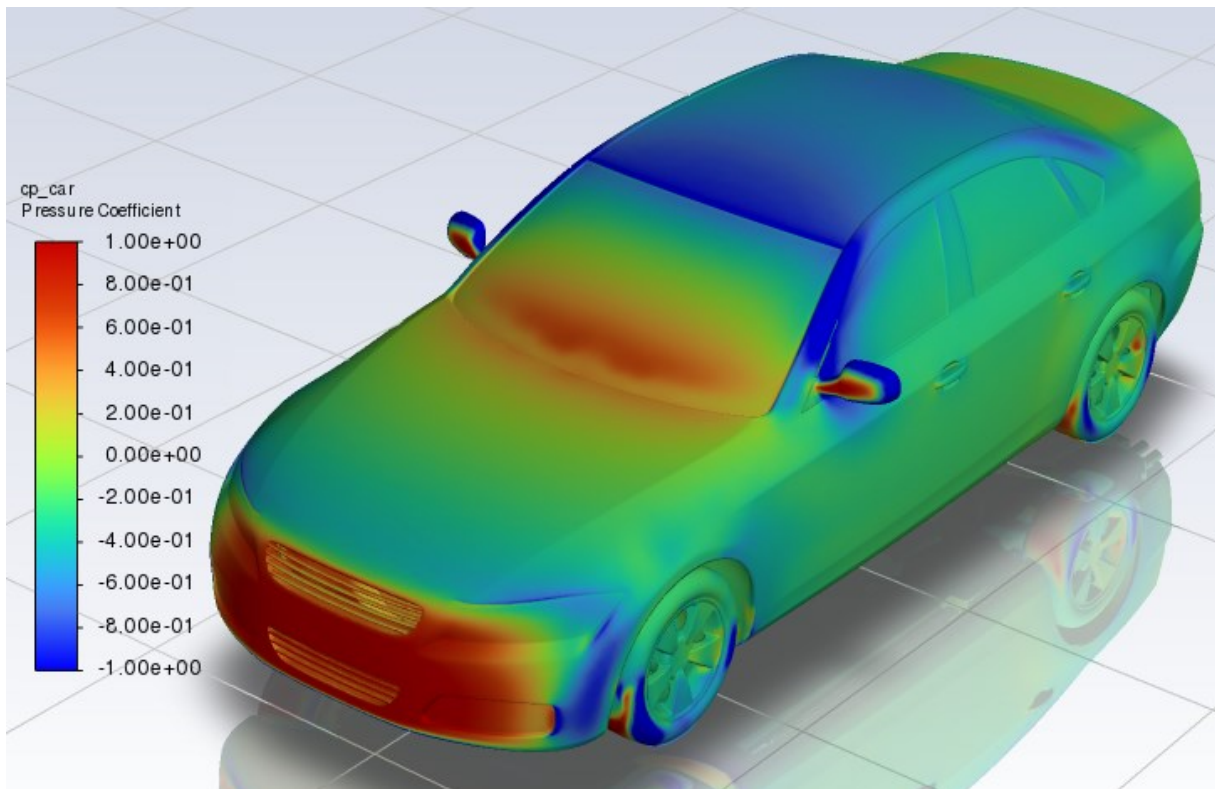
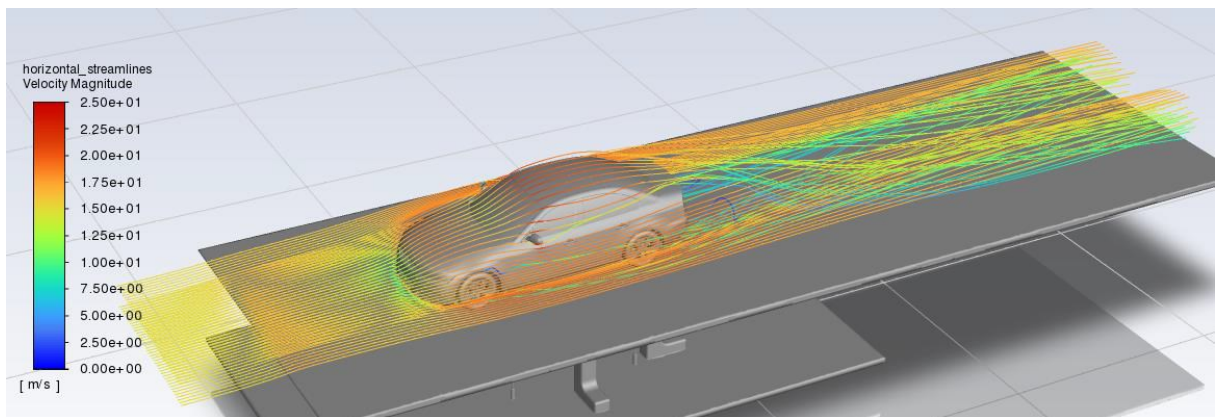
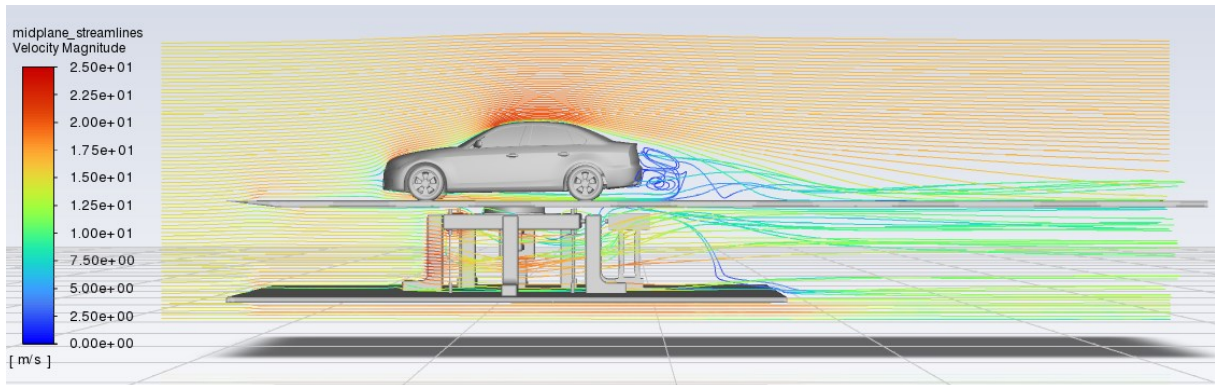












**PÉLDA:**

A valós autó vetület keresztmetszete  $A_{\text{proj,veh,real}}=1,86\text{m}^2$ .

A modell méretaránya 1:18, ezért a modell vetület keresztmetszete  $A_{\text{proj,veh}}=1,86\text{m}^2/(18^2)\approx 0,005741\text{m}^2$ .

A modellezésben rendszerint sokféle méretarány létezik. A járműáramlásban tipikusan alkalmazott 1:2, 1:3, 1:4, 1:5, 1:10 méretarányokon túl az 1:12, 1:18, 1:20, 1:24, 1:32, 1:43, 1:48, 1:64, 1:72, 1:87, 1:88 arányok is előfordulnak.

Járműáramlásban a modellmérések elsődleges célja, hogy a valós autó aerodinamikai paramétereire kapjunk megbízható adatot. A jármű aerodinamikai tényezői Reynolds-szám függők (lásd a következő ábrát pl. az ellenállástényező Reynolds-szám függésére, mely ábra 1:1 és 1:4 ill. 1:5 méreket mutat), így ennek figyelembe vétele igen fontos.

**EXAMPLE:**

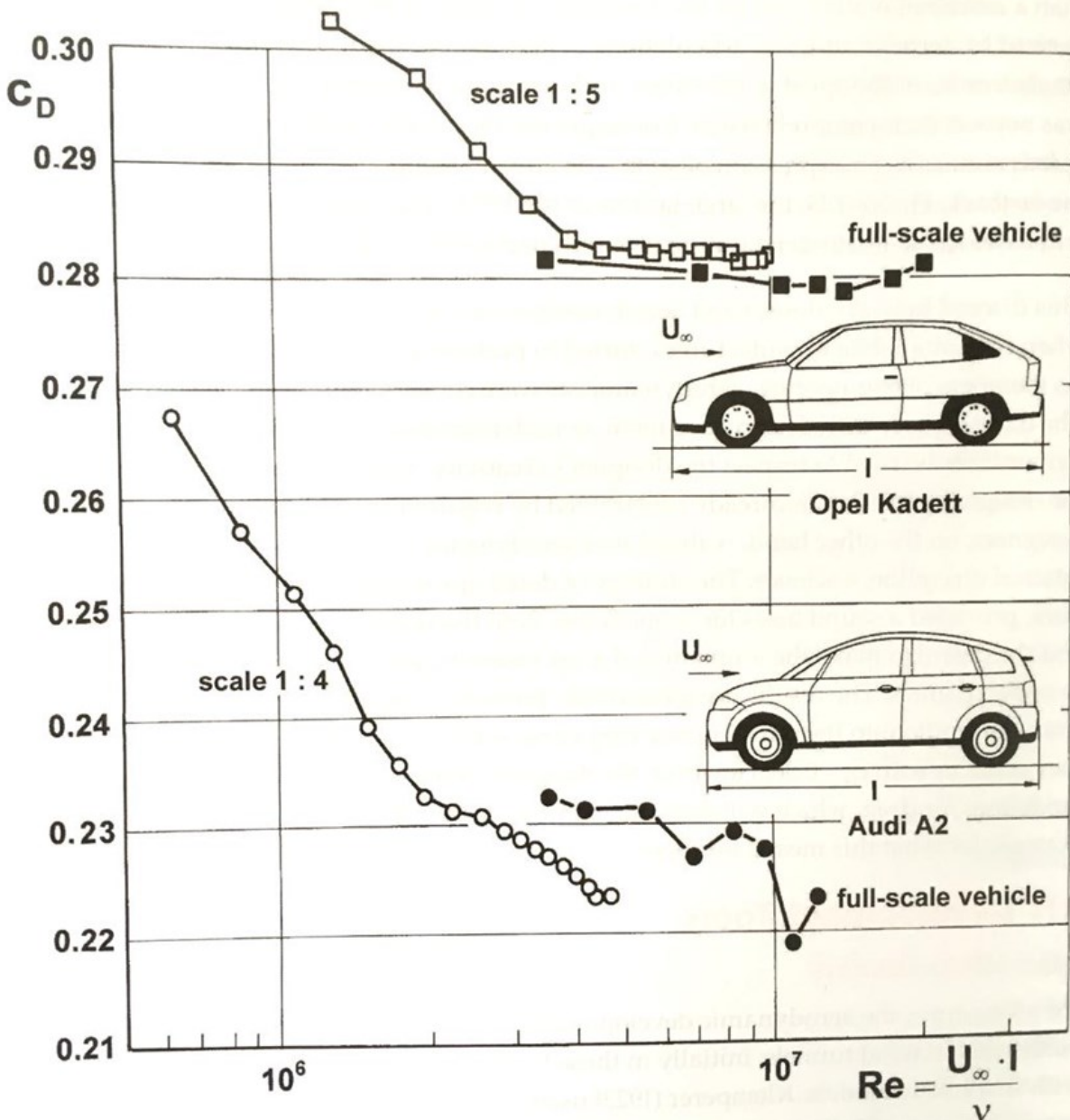
The projected area of the real vehicle is  $A_{\text{proj,veh,real}}=1,86\text{m}^2$ .

Hence  $A_{\text{proj,veh}}=1,86\text{m}^2/(18^2)\approx 0,005741\text{m}^2$  is for this vehicle model according to the present model scale of 1:18.

Basically many scales are used in modelling. The scales 1:2, 1:3, 1:4, 1:5, 1:10 are the mostly applied ones in vehicle aerodynamics, but 1:12, 1:18, 1:20, 1:24, 1:32, 1:43, 1:48, 1:64, 1:72, 1:87, 1:88 scales are also available.

In vehicle aerodynamics, the main aim is that the wind tunnel test results are used to obtain data for the real vehicle.

The aerodynamic parameters of a vehicle depend on the Reynolds-number, as it is shown in the next Figure, where drag coefficient test results are plotted using 1:1, 1:4 and 1:4 vehicles.



**Figure 1.69** Effect of Reynolds number on measured drag coefficient with models in scale 1:5, 1:4, and full-scale cars; from Dietz (2000).

Reynolds-hatás mellett, az adott szélcsatornában az ún. blokkolási tényező értéke határozza meg, hogy adott szélcsatornában melyik méretarány a megfelelő.

Jelen esetben a szélcsatornánk mérőterének teljes szabad belépő keresztmetszete  $A_{WT}=0,1225\text{m}^2$ .

A modell autón túl más szilárd testek is gátolják a légáramot: mint pl. a megemelt talaj és az aerodinamikai mérleg részei, az erőmérő cellák körüli légtérelő lemezek (ha vannak), az alaplemez stb. amelyek mind csökkentik a szabad légáramlási keresztmetszetet.

Ezen elemek vetület keresztmetszeteinek összege:

$A_{proj,elements} = 0,01943275 \text{ m}^2$  (a jelenlegi rendszerre)

Fentiek miatt a szabad áramlási keresztmetszet:

$A_{WT,loc} = A_{WT} - (A_{proj,veh} + A_{proj,elements}) = 0,10681\text{m}^2$ .

Ez jelentősen (-12,8%) kisebb, mint a mérőtér  $A_{WT}=0,1225\text{m}^2$  teljes szabad keresztmetszete. Az  $A_{WT,loc}/A_{WT}$  hányados értéke **87,2%** jelen mérési összeállításra, tehát az ún. geometriai blokkolási tényező  $BR_{geom} = 1 - A_{WT,loc}/A_{WT} = 12,8\%$  értékű, ami azt jelenti, hogy a mérőtér modell autó helyén vett keresztmetszetében a levegő 12,8%-kal kisebb keresztmetszeten való átáramlásra kényszerül, így a helyi sebesség a folytonosság tétele értelmében megnő.

Ennek következtében az autón kialakuló nyomás- és fali csúsztatófeszültség-eloszlás, valamint az autóról leváló (indukált) örvények is eltér(het)nek a valóstól. Utóbbit a mérőtér hossza is nagyban befolyásolhatja, tehát az autómodell utáni megfelelő mérőtér hosszt is szükséges biztosítani, és a statikus nyomás változását sem lehet sokszor figyelmen kívül hagyni.

A zárt mérőtérben a modell körüli megváltozott áramlási tér miatt a  $BR_{geom}$  értékétől függő az ún. aerodinamikai blokkolási tényezővel ( $BR_{ae}$ ) kell korrigálnunk a mérési adatokat  $/BR_{ae}=f(BR_{geom})/$ .

Besides the Reynolds-effect, for a given wind tunnel test section geometry, the choice for appropriate scale is depending on the blockage ratio.

In the present case, the wind tunnel test section has an  $A_{WT}=0,1225\text{m}^2$  full free inlet cross-sectional area.

Besides the model vehicle, there are also other "solid blockage" elements (e.g. elevated ground, elements of the balance system, guide plates, base plate etc.) in the test section. Due to these elements, the free local cross-section of the airflow is also reduced.

The sum of the projected area of these elements is:

$A_{proj,elements} = 0,01943275 \text{ m}^2$  (for the actual balance system)

Therefore the local airflow cross section area is:

$A_{WT,loc} = A_{WT} - (A_{proj,veh} + A_{proj,elements}) = 0,10681\text{m}^2$ .

This is significantly (-12,8%) smaller than the  $A_{WT}=0,1225\text{m}^2$  full area of the test section. Ratio of  $A_{WT,loc}/A_{WT}$  is **87,2%** for the present set-up. The value of **12,8%** is the so-called geometrical (or solid) blockage ratio ( $BR_{geom}$ ), i.e. the local average air velocity is higher here where the free cross-section is smaller by 12,8% than the free test section, see continuity.

Due to these effects the pressure and wall shear distribution, moreover, the induced vortices may differ from the real conditions. Latter may be well influenced by also the length of the test section, i.e. long enough test section is to be used where the longitudinal pressure gradient cannot be neglected either.

In closed test sections the flow field around the vehicle is influenced by the solid blockage. Hence, the measured aerodynamic parameters need to be corrected using the so-called aerodynamic blockage ( $BR_{ae}$ ) ratio that is dependent on the solid blockage  $/BR_{ae}=f(BR_{geom})/$ .



## MÉRÉSI SEGÉDLET

## LAB-SESSION GUIDE

3.1 Aerodinamikai blokkolási tényező ( $BR_{ae}$ ):	3.1 Aerodynamic blockage ratio ( $BR_{ae}$ ):
<p>Amikor a valós jármű <math>v_{ref}</math> állandó sebességgel halad szélcsendben, vízszintes, egyenes úton, menetirányban egyenesen előre, akkor egy végtelen (fél)tér veszi körül.</p> <p>A szélcsatorna mérés során ezt az állapotot modellezzük, viszont a jelen esetben a <u>zárt mérőtérű</u> szélcsatorna tesztelés során az autó körüli légáramlás keresztmetszete nem végtelen, hanem limitált és a modell méretétől (méretarányától, vetület keresztmetszetétől) nagyban függ. A zárt mérőtérben aerodinamikai mérlegre szerelt autómodell körüli áramlási tér</p> $A_{WT,loc}$ <p>keresztmetszete kisebb, mint a mérőtér – jelen esetben</p> $A_{WT}=350\text{mm} \times 350\text{mm}=0,1225\text{m}^2$ <p>teljes belépő keresztmetszete.</p> <p>Ezt a mérőtérbeli szilárd testek (járműmodell és az egyéb mérőtérbeli elemek, pl. megemelt talaj síklap, mérleg mérőtérben lévő részegységei stb.) vetület keresztmetszetei miatti kitakarás (blokkolás) okozza.</p> $A_{WT,loc}=A_{WT}-(A_{proj,veh}+A_{proj,elements})$ <p>Ennek következtében a zárt mérőtérbeli modell körüli átlagsebesség helyileg nagyobb (lásd folytonosság tétele) mint a <math>v_{ref}</math> megfúvási sebesség, a modell körüli áramlási tér (sebesség-, felületi nyomás-, és fali csúsztatófeszültség-eloszlás stb.) módosul. Emiatt a mért aerodinamikai (ellenállás- és felhajtó-) erők eltérnek a valós esetben ható erőktől.</p> <p>Mivel a modell keresztmetszetében a módosult áramlási átlagsebesség tökéletes kimérése igen nagy nehézségekbe ütközik, így továbbra is a zárt mérőtér belépő, teljes, szabad, autómodell előtti zavartalan belépő keresztmetszetében célszerű mérni a <math>v_{ref}</math> megfúvási referencia sebességet, de a mérés alapján számolt aerodinamikai (ellenállás- és felhajtóerő) tényezőket majd utólag korrigálnunk kell egy <math>K_{corr}</math> korrekciós tényezővel.</p> $C_{i,corr}=C_{i,meas} \cdot K_{corr}$ <p>A <math>K_{corr}</math> korrekciós tényező meghatározása:</p> <p>A <math>K_{corr}</math> korrekciós tényező meghatározása során jelen esetben egyszerűsített módon járunk el: csak vetület keresztmetszeteket veszünk figyelembe, így egyebeket pl. a zárt mérőtér hossza menti statikus nyomás változását, az indukált örvények hatását, vagy a fali határréteg-növekedés stb. miatti korrekciókat nem vesszük figyelembe.</p> <p>Tekintsük először az alábbi kifejezéssel definiált ún. aerodinamikai blokkolási tényezőt (<math>BR_{ae}</math>), mely a járműmodell vetület keresztmetszete (<math>A_{proj,veh}</math>) és a járműmodell nélküli helyi szabad áramlási keresztmetszet (<math>A_{WT}-A_{proj,elements}</math>) hányadosa.</p>	<p>When a real vehicle is moving with a constant <math>v_{ref}</math> velocity on a horizontal flat road in still ambient (at no wind condition) there is an infinite (half)space around the vehicle.</p> <p>During the wind tunnel testing these conditions are to be modelled but in case of a <u>closed test section</u> the local free fluid flow cross-section</p> $A_{WT,loc}$ <p>of the test section around the vehicle mounted on the balance is not an infinite space, but even smaller than the inlet full free cross-section</p> $A_{WT}=350\text{mm} \times 350\text{mm}=0,1225\text{m}^2$ <p>of the test section. The local free fluid flow cross-section area depends on the size (model scale or projected reference area) of the model vehicle.</p> <p>The decrease in the fluid flow area – blockage – is due to the total projected area of solid elements (vehicle and others like elevated ground plate, balance system, base plate etc.) that are placed in the closed test section.</p> $A_{WT,loc}=A_{WT}-(A_{proj,veh}+A_{proj,elements})$ <p>According to this blockage the local average velocity in the vehicle's cross section is higher than the <math>v_{ref}</math> reference velocity (see continuity), and the flow field (velocity, pressure, wall shear stress etc.) distribution is modified due to the blockage. hence, the measured aerodynamic (drag &amp; lift) forces differ from the real forces.</p> <p>Since the proper measurement of the local (modified) average velocity of the vehicle model is a very problematic task, therefore it is suggested to measure the <math>v_{ref}</math> reference velocity in the full free inlet cross section of the test section (in the undisturbed cross section upstream of the model vehicle), but we must apply a <math>K_{corr}</math> correction factor for the calculated aerodynamic (drag and lift) coefficients to get blockage corrected values.</p> $C_{i,corr}=C_{i,meas} \cdot K_{corr}$ <p>Calculation of the <math>K_{corr}</math> correction factor:</p> <p>We apply a simplified method for the derivation of <math>K_{corr}</math> correction factor: it is based on only the projected area, hence, we do not take into consideration e.g. the effect of the longitudinal change in static pressure in the closed test section, induced vortices, neither evolution of the wall boundary layer thickness.</p> <p>First, let's consider the aerodynamic blockage ratio (<math>BR_{ae}</math>) defined by the expression below. It is the ratio of the projected reference cross section of the vehicle (<math>A_{proj,veh}</math>) to the local free fluid flow cross section without the vehicle (<math>A_{WT}-A_{proj,elements}</math>).</p>
$BR_{ae} = \frac{A_{proj,veh}}{(A_{WT} - A_{proj,elements})} = \frac{A_{proj,veh}}{(A_{WT,loc} + A_{proj,veh})}$	
<p>A cél minél kisebb aerodinamikai blokkolási tényező (<math>BR_{ae} \rightarrow 0</math>) elérése, amelyet egy minél kisebb méretű járműmodellel</p>	<p>Aiming as low as possible aerodynamic blockage ratio (<math>BR_{ae} \rightarrow 0</math>), an appropriate scaled-down (possible the smallest sized) model</p>

## MÉRÉSI SEGÉDLET

## LAB-SESSION GUIDE

<p>megvalósíthatunk, de nem szabad megfeledkezünk arról a tényről, hogy minél kisebb az áramlásba helyezett mérendő test mérete, annál kisebb a rá ható erő nagysága is. (mérési hiba nő!)</p> <p>Méréstechnikai szempontból általánosan elmondható, hogy adott mérőrendszer esetén pl. az erőmérés mérési bizonytalansága (relatív hibája, %) annál nagyobb, minél kisebb a mért mennyiség (itt a mért erő) értéke.</p> <p>A gyakorlatban az aerodinamikai blokkolási tényezőre <math>BR_{ae} &lt; 5\%</math> érték megfelelőnek tekinthető.</p> <p>A jármű modell méretarányát alapvetően ezen <math>BR_{ae} &lt; 5\%</math> feltétel szerint célszerű megválasztani.</p> <p>Fentiek alapján kimondható, hogy adott erőmérő rendszer és adott szélcsatorna és zárt mérőtér esetén meg kell találnunk a megfelelő kompromisszumot a megfelelő modell méretarány megválasztása és az elérni kívánt mérési pontosság tekintetében. (lásd változatok összehasonlíthatósága)</p> <p>További modell méretarányt befolyásoló fontos szempont, hogy pl. a mérésünk Reynolds-független legyen (Reynolds-hatás figyelembe vétele), vagy minimalizáljuk a modellkészítés költségeit stb., melyeket később tárgyalunk.</p>	<p>vehicle is to be used, but we must also take into account the very important fact that the smaller is the vehicle, the smaller is the measured force, too! (the measurement uncertainty increases!)</p> <p>Generally, it is valid for all measurements that in case of a given set-up, the smaller is measured quantity (here the measured force), the higher is the uncertainty (relative error, %) of the force measurements.</p> <p>Practically, values of <math>BR_{ae} &lt; 5\%</math> ensures for satisfyingly small aerodynamic blockage.</p> <p>Basically, the scale factor of the model vehicle is to be chosen according to this rule of <math>BR_{ae} &lt; 5\%</math>.</p> <p>It can be stated based on the aforesaid considerations that in case of a given aerodynamic balance system and a closed test section of a given wind tunnel a compromise must be found between the model scale of the vehicle and the measurement uncertainty. (see comparing model variations)</p> <p>Further important parameters to be taking into account are e.g. the Reynolds-effect (Reynolds-independent measurement), or aiming the possible lowest production costs for the model vehicle etc. These also will be mentioned later.</p>
<p><b>Ellenőrizze a járművére az alábbiakat!</b></p>	<p><b>Check these data for your vehicle!</b></p>
<p><math>A_{proj,veh}</math> = ..... <math>m^2</math></p> <p><math>A_{WT}</math> = <b>0,1225</b> <math>m^2</math></p> <p><math>A_{proj,elements}</math> = <b>0,01943275</b> <math>m^2</math></p> <p><math>BR_{ae} = \frac{A_{proj,veh}}{(A_{WT} - A_{proj,elements})} = \dots\dots\dots</math></p>	<p>(is to be measured/determined for <u>your</u> vehicle)</p> <p>(=350mm × 350mm, cross section of the present test section)</p> <p>(measured data for the actual elements in the test section)</p> <p>(<math>BR_{ae} &lt; 5\%</math>, is to be calculated)</p>
<p>Az előírt kb. <b>1:20</b> modell méretarány általában megfelelő (<math>BR_{ae} &lt; 5\%</math>) blokkolási korrekciós értéket eredményez tipikus személyautó modellek esetében a jelen szélcsatornára, de kérem, számolja ki és ellenőrizze a saját modellezett járművére vonatkozó <math>BR_{ae}</math> értéket! A mérések kiértékelés során ezt vegye figyelembe!</p>	<p>The prescribed model scale of <b>approx. 1:20</b> is usually an appropriate (<math>BR_{ae} &lt; 5\%</math>) blockage correction value for typical passenger car models in the present wind tunnel test section and set-up, but you need to calculate and check the value of <math>BR_{ae}</math> for your own modelled vehicle! Keep in mind this during the data analysis!</p>
<p><b>3.2 Geometriai (szilárd) blokkolási tényező (<math>BR_{geom}</math>):</b></p>	<p><b>3.2 Geometrical (solid) blockage ratio (<math>BR_{geom}</math>):</b></p>
<p>Az aerodinamikai blokkolási-tényező mellett az ún. <math>BR_{geom}</math> geometriai (szilárd test) blokkolási tényező is meghatározható, amely a folytonosság tétel alapján a referencia megfúvási sebességtől eltérő helyi áramlási átlagsebesség illetve ez alapján számolhat helyi dinamikus nyomás korrekcióját segíti.</p> <p>A <math>BR_{geom}</math> geometriai blokkolási tényező az alábbi összefüggéssel definiálható, mely szerint a <math>BR_{geom}</math> a járműmodell és a különböző elemek vetület keresztmetszetei összegének (<math>A_{proj,veh} + A_{proj,elements}</math>) és a teljes belépő mérőtér keresztmetszet (<math>A_{WT}</math>) hányadosa. Az átalakított kifejezésben <math>A_{WT,loc}</math> a helyi maradék szabad áramlási keresztmetszetet jelöli.</p>	<p>Besides the aerodynamic blockage we need to consider also a geometrical blockage (represented by <math>BR_{geom}</math> the geometrical or solid blockage ratio) that allows for correction of the measured inlet reference dynamic pressure (or for the measured inlet reference flow velocity).</p> <p>The <math>BR_{geom}</math> geometrical (or solid) blockage ratio defined by the expression below is the ratio of the projected reference cross-sections of the vehicle and the elements (<math>A_{proj,veh} + A_{proj,elements}</math>) to the inlet free full cross-section of the test section (<math>A_{WT}</math>). In the other form the <math>A_{WT,loc}</math> represents the local free fluid flow cross-section.</p>
$BR_{geom} = \frac{A_{proj,veh} + A_{proj,elements}}{A_{WT}} = \frac{(A_{WT} - A_{WT,loc})}{A_{WT}} = 1 - \frac{A_{WT,loc}}{A_{WT}}$	
<p>Összenyomhatatlan közeg stacioner áramlását feltételezve a mérőtér belépő és az járműmodellt tartalmazó helyi</p>	<p>Assuming stationary flow and constant air density, according to the continuity between the inlet cross-section and the local</p>

## MÉRÉSI SEGÉDLET

## LAB-SESSION GUIDE

keresztmetszete között felírt folytonosság tétel értelmében a levegő térfogatárama azonos:	cross-section of the test section with vehicle we can write that the volumetric flow rates are identical:
$V_{ref,meas} \cdot A_{WT} = V_{ref,loc,corr} \cdot A_{WT,loc}$	
Ebből következően a járműmodell helyére vonatkoztatott korigált helyi áramlási átlagsebesség ( $V_{ref,loc,corr}$ ) nagyobb, mint a belépő mért referencia sebesség ( $V_{ref,meas}$ ), amelyet a mérőtér belépő keresztmetszetében elhelyezett Prandtl-csővel mérünk. A geometriai (vetület keresztmetszet) adatokat ismerve kifejezhető a $BR_{geom}$ segítségével a $K_{corr,v}$ helyi sebességi korrekciós tényező.	Consequently, the corrected local average flow velocity ( $V_{ref,loc,corr}$ ) in the free local cross-section of the test section is higher than the measured reference velocity ( $V_{ref,meas}$ ) in the full free inlet cross-section where the Pitot-static tube is placed. Knowing the geometrical (projected area) data, we get the $K_{corr,v}$ correction factor for the local velocity using $BR_{geom}$ .
$V_{ref,loc,corr} = V_{ref,meas} \cdot \frac{A_{WT}}{A_{WT,loc}}$ $V_{ref,loc,corr} = V_{ref,meas} \cdot \frac{1}{1 - BR_{geom}}$ $V_{ref,loc,corr} = V_{ref,meas} \cdot K_{corr,v}$	
ahol $K_{corr,v}$ helyi sebességi korrekciós tényező az alábbi:	where the $K_{corr,v}$ correction factor for the local velocity is:
$K_{corr,v} = \frac{1}{1 - BR_{geom}}$	
Miután közvetlenül a $p_{dyn,ref,meas}$ referencia dinamikus nyomást mérjük a Prandtl-csővel, kiszámítható a helyi korigált referencia dinamikus nyomás ( $p_{dyn,ref,corr}$ ) illetve az erre vonatkozó korrekciós tényező ( $K_{corr,p}$ ) is az alábbiak szerint.	Since the $p_{dyn,ref,meas}$ reference dynamic pressure is measured directly with a Pitot-static tube, we can calculate the corrected reference dynamic pressure ( $p_{dyn,ref,corr}$ ) using the geometrical blockage ratio as follows.
$p_{dyn,ref,meas} = 0,5 \cdot \rho_{air} \cdot V_{ref,meas}^2$ $p_{dyn,ref,corr} = 0,5 \cdot \rho_{air} \cdot V_{ref,loc,corr}^2$ $p_{dyn,ref,corr} = 0,5 \cdot \rho_{air} \cdot (V_{ref,meas} \cdot K_{corr,v})^2 = 0,5 \cdot \rho_{air} \cdot V_{ref,meas}^2 \cdot K_{corr,v}^2$ $p_{dyn,ref,corr} = p_{dyn,ref,meas} \cdot K_{corr,v}^2 = p_{dyn,ref,meas} \cdot K_{corr,p}$	
ahol $K_{corr,p}$ helyi dinamikus nyomás korrekciós tényező:	where $K_{corr,p}$ correction factor for the local dynamic pressure:
$K_{corr,p} = (K_{corr,v})^2 = \left(\frac{1}{1 - BR_{geom}}\right)^2$	
A modell jármű aerodinamikai erőtényezői: az ellenállás- ( $i=D$ ), a felhajtóerő- ( $i=L$ ), oldalero- ( $i=S$ ) tényezők mind a belépő keresztmetszetben mért $p_{dyn,ref,meas}$ referencia dinamikus nyomás (azaz a $(V_{ref,meas}^2)$ függvényei. Ennek következményeképp minden aerodinamikai erőtényezőt korigálnunk kell a blokkolás miatt.	The vehicle's aerodynamic force coefficients /drag( $i=D$ ), lift( $i=L$ ), side( $i=S$ ) coefficients/ depend on the $p_{dyn,ref,meas}$ measured reference dynamic pressure, hence on the reference velocity ( $V_{ref,meas}^2$ ). Consequently, all aerodynamic force parameters must be corrected due to the blockage effect.
$C_{i,meas} = \frac{F_{i,meas}}{p_{dyn,ref,meas} \cdot A_{proj,veh}}$	
Az aerodinamikai erőtényezők erre vonatkozó $K_{corr}$ korrekciós tényezőjét az alábbiak szerint kaphatjuk:	The $K_{corr}$ correction factor for the force coefficients can be derived as follows:
$C_{i,corr} = C_{i,meas} \cdot K_{corr}$ $C_{i,corr} = C_{i,meas} \cdot \frac{1}{(K_{corr,v})^2} = C_{i,meas} \cdot \frac{1}{K_{corr,p}} = C_{i,meas} \cdot (1 - BR_{geom})^2$	
Tehát az aerodinamikai erőtényezők $K_{corr}$ korrekciós tényezőjét többféle formában is felírhatjuk, de végeredményképpen $BR_{geom}$ geometriai blokkolási tényező függvénye, mely egyszerűen az ismert vetület keresztmetszetek alapján meghatározható:	Consequently, $K_{corr}$ correction factor for the force coefficients can be written in various forms, see below, but finally we come to the conclusion that $K_{corr}$ depends on $BR_{geom}$ geometrical (or solid) blockage ratio that can be determined easily by the known projected areas.
$K_{corr} = \frac{1}{(K_{corr,v})^2} = \frac{1}{K_{corr,p}} = (1 - BR_{geom})^2 = \left(\frac{A_{WT,loc}}{A_{WT}}\right)^2 = \left(\frac{A_{WT} - (A_{proj,veh} + A_{proj,elements})}{A_{WT}}\right)^2$	



## MÉRÉSI SEGÉDLET

## LAB-SESSION GUIDE

<p><b>Végezetül, válaszoljunk az alábbi három kérdésre!</b></p> <p><b>A)</b> „Mi a <math>BR_{ae}=f(BR_{geom})</math> kapcsolat az aerodinamikai és a geometriai blokkolási -tényező között, azaz hogyan számítható át a két tényező?”</p> <p><b>B)</b> „Mikor <b>egyezik meg</b> a két tényező értéke?”</p> <p><b>C)</b> „Milyen <b>méretarányú</b> modellt válasszunk?”</p>	<p><b>Finally, let's find the answer to the three questions below:</b></p> <p><b>A)</b> „What is the link between aerodynamic and geometric blockage? <math>BR_{ae}=f(BR_{geom})</math> i.e. How can the two factors be connected?”</p> <p><b>B)</b> “In what condition are these factors <b>identical</b>?”</p> <p><b>C)</b> “What <b>scale</b> of model vehicle would be appropriate?”</p>
<p><b>A)</b> „Mi a <math>BR_{ae}=f(BR_{geom})</math> kapcsolat az aerodinamikai és a geometriai blokkolási -tényező között, azaz hogyan számítható át a két tényező?”</p>	<p><b>A)</b> „What is the <math>BR_{ae}=f(BR_{geom})</math> connection between aerodynamic and geometric blockage, i.e. how can the two factors be translated?”</p>
<p>Ennek érdekében alakítsuk át a <math>BR_{ae}</math> tényezőre felírt eredeti kifejezést úgy, hogy az tartalmazza a <math>BR_{geom}</math> tényezőt!</p>	<p>Let's transform the initial expression of <math>BR_{ae}</math>, and try to include the expression for <math>BR_{geom}</math>!</p>
$BR_{ae} = \frac{A_{proj,veh}}{(A_{WT} - A_{proj,elements})} = \frac{A_{proj,veh}}{(A_{WT,loc} + A_{proj,veh})}$ $\frac{1}{BR_{ae}} = \frac{(A_{WT} - A_{proj,elements})}{A_{proj,veh}} = \frac{(A_{WT,loc} + A_{proj,veh})}{A_{proj,veh}} = \frac{A_{WT,loc}}{A_{proj,veh}} + 1$ $\frac{1}{BR_{ae}} = \frac{A_{WT}}{A_{proj,veh}} - \frac{A_{proj,elements}}{A_{proj,veh}} = \frac{1}{BR_{geom} - \frac{A_{proj,elements}}{A_{WT}}} - \frac{A_{proj,elements}}{A_{proj,veh}}$ $BR_{ae} = \frac{1}{\frac{1}{BR_{geom} - \frac{A_{proj,elements}}{A_{WT}}} - \frac{A_{proj,elements}}{A_{proj,veh}}}$ $BR_{ae} = \frac{1}{\frac{A_{WT}}{BR_{geom} \cdot A_{WT} - A_{proj,elements}} - \frac{A_{proj,elements}}{A_{proj,veh}}}$	
<p><b>B)</b> „Mikor egyezik meg a két tényező értéke?”</p> <p>Megvizsgálva a fenti kifejezést láthatjuk, hogy ha olyan erőmérő rendszerünk lenne, amikor a mérőtérben a modell autón kívül semmilyen más elem nincs, tehát ha</p>	<p><b>B)</b> “In what condition are the two factors identical?”</p> <p>If we analyse the expression above, it can be stated that if we consider a wind tunnel test facility without any additional elements in the test section but the vehicle itself, i.e. if</p>
$A_{proj,elements} = 0$	
<p>akkor az alábbi kapjuk:</p>	<p>than we get:</p>
$BR_{ae} = \frac{1}{\frac{A_{WT}}{BR_{geom} \cdot A_{WT} - 0} - \frac{0}{A_{proj,veh}}} = BR_{geom}$	
<p>Tehát, ez esetben az aerodinamikai és a geometriai blokkolási -tényező értéke azonos: <math>BR_{ae} = BR_{geom}</math>.</p>	<p>Consequently, in this case the aerodynamic blockage ratio and the geometrical blockage ratio is identical <math>BR_{ae} = BR_{geom}</math>.</p>
$BR_{ae} = BR_{geom} = \frac{A_{proj,veh}}{A_{WT}}$	
<p><b>C)</b> „Milyen méretarányú modellt válasszunk?”</p> <p>Minél kisebb a méretarány, annál kisebb a blokkolási tényező. Azonban ezzel együtt a mérhető erő értéke is csökken, hiszen minél kisebb testet helyezünk az áramlási térbe, annál kisebb a rá ható és mérendő erő. Mivel az erőmérésünk pontosságát szeretnénk növelni (azaz a mérési hibát minimalizálni), egy minél</p>	<p><b>C)</b> “What scale of model vehicle would be appropriate?”</p> <p>The smaller is the model scale, the smaller is the blockage ratio. But also note that the smaller is the model scale, the smaller is the acting force on the body immersed in the flow! Since we need to measure the force precisely (i.e. with as small as possible uncertainty), a larger scale model vehicle is preferable.</p>

## MÉRÉSI SEGÉDLET

## LAB-SESSION GUIDE

<p>nagyobb méretű modell jármű lenne a megfelelő. Nagyobb mért erő érték egy adott mérőrendszer esetén kisebb mérési bizonytalanságot jelent. De egy nagyobb modell (és annak módosításainak / változatainak stb.) legyártása meg drágább, nem beszélve a nagyobb mérőterű szélcsatorna magasabb áráról vagy üzemeltetési / bérleti díjáról.</p> <p>Járműáramlástan szélcsatorna tesztelés esetében meg kell találnunk a megfelelő kompromisszumot az alábbi egymással ellentétes célfüggvények tekintetében.</p> <p><u>A lehető legkisebb:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- gyártási / mérési / tesztelési / üzemeltetési költség,</li> <li>- mérési bizonytalanság,</li> <li>- aerodinamikai blokkolási tényező.</li> </ul>	<p>Larger acting force means usually smaller uncertainty of the force measurements. But the production costs for a large model vehicle (also with geometrical modifications) is much higher, too. Furthermore, the larger is the test section and wind tunnel the larger are the production / testing / operating costs.</p> <p>For wind tunnel measurements in vehicle aerodynamics we need to find the right compromise for the following contradictory target functions.</p> <p><u>The possible lowest:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- production costs and testing / operating costs,</li> <li>- measurement uncertainty and</li> <li>- aerodynamic blockage effect.</li> </ul>
<b>PÉLDA</b>	<b>EXAMPLE:</b>
<p>A fényképen látható BMW e30 M3 (1:18) autó eredeti valós vetület keresztmetszete <math>A_{proj,veh,real}=1,86m^2</math>, így a modell vetület keresztmetszete <math>A_{proj,veh}=1,86m^2/(18^2)\approx 0,005741m^2</math>. Kiszámolva mond az aerodinamikai, mind a geometriai blokkolási tényezőt az alábbi értékeket kapjuk:</p> <p style="text-align: center;"><u>aerodinamikai blokkolási tényező:</u>  <math>BR_{ae}\approx 5,1\%</math>  (a 1:18 méretarány az 5% határérték feletti blokkolást okoz!)</p> <p style="text-align: center;"><u>geometriai blokkolási tényező</u>  <math>BR_{geom}\approx 12,8\%</math>.</p> $K_{corr,p} = (K_{corr,v})^2 = \left(\frac{1}{1-BR_{geom}}\right)^2$ <p>A folytonosság alapján kiszámolt <math>K_{corr,v}\approx 1,147</math> és <math>K_{corr,p}\approx 1,315</math> helyi sebesség és dinamikai nyomás korrekciós tényezőt kapunk. Jelen esetben tehát nem elhanyagolható ez a korrekció (<math>K_{corr,p}=1,315!</math>). Pl. a mért adatok alapján számolt ellenállástényezőt <math>K_{corr}=0,76</math> tényezővel korrigálni kell. Ez jelentősen eltérő végeredményt ad:</p> $C_{D,corr}=C_{D,meas}\cdot 0,76!$ <p>A blokkolás figyelembe vevő korrigált ellenállástényező tehát mindössze 76%-a a mért adatok alapján korrekció nélkül számoltnak. Látható, hogy zárt mérőtér esetén elengedhetetlen a blokkolás alapú ellenállás- és felhajtóerő-tényező korrekció!</p>	<p>In the photo there is a BMW e30 M3 (1:18) model vehicle in the test section. The real vehicle's projected area is <math>A_{proj,veh,real}=1,86m^2</math>, while the model's is <math>A_{proj,veh}=1,86m^2/(18^2)\approx 0,005741m^2</math>. Both aerodynamic and geometric blockage ratios are calculated and we get:</p> <p style="text-align: center;"><u>aerodynamic blockage ratio:</u>  <math>BR_{ae}\approx 5,1\%</math>  (hence the 1:18 scale is slightly above the 5% limit value!)</p> <p style="text-align: center;"><u>geometrical blockage ratio:</u>  <math>BR_{geom}\approx 12,8\%</math>.</p> $K_{corr,p} = (K_{corr,v})^2 = \left(\frac{1}{1-BR_{geom}}\right)^2$ <p>Due to the continuity, a <math>K_{corr,v}\approx 1,147</math> and a <math>K_{corr,p}\approx 1,315</math> correction factors must be applied for the velocity and for the dynamic pressure measurements, respectively. In the example here, this correction is crucial (<math>K_{corr,p}=1,315!</math>). It is non-negligible since the corrected coefficients, e.g. the drag coefficient differs from the measured with <math>K_{corr}=0,76</math>:</p> $C_{D,corr}=C_{D,meas}\cdot 0,76!$ <p>The blockage corrected drag coefficient is 76% of the measured drag coefficient. We see that taking into consideration of the blockage effect i.e. the blockage correction is a must when measuring the drag &amp; lift coefficients in a closed test section!</p>

## MÉRÉSI SEGÉDLET

## LAB-SESSION GUIDE

Tesztelési költségekre és mérési bizonytalanságra vonatkozó további megfontolások	Further considerations and analysis of testing costs and uncertainty			
<p>A)Egy 1:18 méretarányú modellautó ~100.-EUR-ba kerül. A jelen kis (4,8kW), nyomóüzemű, zárt 350mm×350mm mérőterű szélcsatorna erőmérő rendszerrel együtt ~15000.-EUR-ba kerül. Az üzemeltetés (villamos energia) költsége kevesebb, mint 1.-EUR/h.</p> <p>B)Ha egy 1:5 méretarányú járműmodellt használnánk, amely ~1000.-EUR-kerül, és a nagy (650kW), D=2,6m nyitott mérőterű Göttingen típusú szélcsatornában mérnénk, amelynek a mérőrendszerrel (hardver + szoftver) együttes költsége ~5000000.-EUR, akkor annak üzemeltetési költsége ~100.-EUR/h (vagy ~1000.-EUR/nap lenne).</p> <p>Az alábbi táblázat a fenti "A" ill. "B" tesztelési verziók adatait foglalja össze.</p> <p>A "B" verzió sokkal jobb, azaz sokkal kisebb (×1/30) mérési bizonytalanságot eredményezne, valamint sokkal jobb, azaz kisebb (×1/4) aerodinamikai blokkolási tényezőjű lenne, de sokkal nagyobb (×10!) lenne a modell gyártási költsége és sokkal nagyobb (×100!) lenne a tesztek üzemeltetési költsége.</p>	<p>A)The 1:18 scale vehicle model costs ~100.-EURO. This small (4,8kW) blower type wind tunnel with 350mm×350mm cross-section with a balance system (hardware + software) costs ~15000.-EUR. The operational cost of the wind tunnel is less than 1.-EUR/h.</p> <p>B)If we would test a 1:5 scale vehicle model that would cost ~1000.-EURO and we would use the large (650kW) wind tunnel with 2,6m×2,6m cross-section with a balance system (hardware + software) costs ~ 5 000 000.-EUR, the operational cost of the wind tunnel would be ~100.-EUR/h (or ~ 1 000.-EUR/day).</p> <p>The table below summarizes the above mentioned "A" and "B" testing scenarios.</p> <p>The "B" measurement results would be characterized by much better i.e. lower (×1/30) measurement uncertainty and much better i.e. lower (×1/4) aerodynamic blockage effect but with a 10×(cost of vehicle model production) and 100×(costs of testing &amp; operating in wind tunnel).</p>			
	<b>Parameters</b>	<b>case "A"</b> <b>TESTING IN A SMALL WIND TUNNEL</b>	<b>case "B"</b> <b>TESTING IN A LARGE WIND TUNNEL</b>	<b>ratio of B/A</b> <b>B = A × ?</b> <b>(rounded values)</b>
	real vehicle type	BMW M3 (e30) 1990		-
	$A_{proj,veh,real}$	=1,86m <sup>2</sup>		-
	model scale	=1:18	=1:5	×3,6
	$A_{proj,veh}$	=1,86m <sup>2</sup> /(18 <sup>2</sup> )≈0,005741m <sup>2</sup>	=1,86m <sup>2</sup> /(5 <sup>2</sup> )≈0,0744m <sup>2</sup>	×13
	prize of the model	≈~100.-EUR	≈~1000.-EUR	×10
	wind tunnel type	small, closed test section, with additional elements	large, open test section, no additional elements	-
	top speed $v_{max}$	= 25m/s	= 70m/s	×3
	$Re_{max}$	= 1,3 × 10 <sup>5</sup>	= 1,3 × 10 <sup>6</sup>	×10
	wind tunnel $A_{WT}$	= 0,1225m <sup>2</sup> (350mm×350mm)	= 5,31m <sup>2</sup> (∅D=2,6m)	×43
	$BR_{ae}$	≈ 5,1%	≈ 1,4%	×1/4
	$BR_{geom}$	≈ 12,8%	≈ 1,4%	×1/9
	power	= 4,8kW	= 650 kW	×135
	hardware& software	≈ ~15000.-EUR	≈ ~ 5 000 000.-EUR	×333
	operational cost	≈ ~1.-EUR/h	≈ ~100.-EUR/h	×100
	meas. uncertainty	≈ ±3%	≈ ±0,1%	×1/30
<p><b>PÉLDA:</b></p> <p><b>KÉRDÉS:</b> Mekkora "M" méretarány (1:M) lenne megfelelő, ha az aerodinamikai blokkolási tényezőre <math>BR_{ae} \leq 5\%</math> feltételt írunk elő? A jelenlegi 1:18 méretarány (azaz M=18) helyett keressük azt az M'=? méretarány értéket, amelyre igaz <math>BR_{ae} \leq 5\%</math> feltétel!</p> <p><b>MEGOLDÁS:</b></p> <p>Mivel a modellezendő BMW e30 M3 jármű vetület keresztmetszetét a <math>A_{proj,veh}=1,86m^2/M'^2</math> alapján számoljuk, ezt beírva a <math>BR_{ae}</math> definíciójába,</p> $BR_{ae} = A_{proj,veh} / (A_{WT} - A_{proj,elements})$ <p>Ha <math>BR_{ae} \leq 5\%</math> a feltétel, akkor</p> $0,05 \geq (1,86m^2/M'^2) / (0,1225m^2 - 0,00995m^2)$ <p>megoldva megkapjuk M' értékére: <math>M' \geq 18,2</math>. Jelen esetben egy, pl. M'=20 (1:20 méretarányú) kisebb modell aerodinamikai blokkolási tényezője már megfelelő, <math>BR_{ae}=4,1\%</math> értékű, amely 5% alatti. Mindemellett a 1:18 helyett 1:20 modell mérésekor a kisebb méret csak kis csökkenést okoz a mért erőkből, így a mérési bizonytalanság értéke sem változik számottevően.</p>	<p><b>EXAMPLE:</b></p> <p><b>PROBLEM:</b> What "M" model scale (1:M) would be appropriate according to the <math>BR_{ae} \leq 5\%</math> limiting value of aerodynamic blockage? Instead of the present scale of 1:18 (M=18), please find the M'=? model scale aiming <math>BR_{ae} \leq 5\%</math>!</p> <p><b>SOLUTION:</b></p> <p>Since the model BMW e30 M3 vehicle' projected area has to be <math>A_{proj,veh}=1,86m^2/M'^2</math>, we can rewrite the equation for <math>BR_{ae}</math> using M'.</p> $BR_{ae} = A_{proj,veh} / (A_{WT} - A_{proj,elements})$ <p>If <math>BR_{ae} \leq 5\%</math> is needed, we can solve this equation for M'.</p> $0,05 \geq (1,86m^2/M'^2) / (0,1225m^2 - 0,00995m^2)$ <p>Solving this equation for M' we get <math>M' \geq 18,2</math>. For example in case of a smaller vehicle model, e.g. in case of M'=20 (model scale 1:20) the aerodynamic blockage will be appropriate: <math>BR_{ae}=4,1\%</math> and also the uncertainty remains nearly the same as it was for the larger (M=18 scale) vehicle since the aerodynamic forces won't change too much.</p>			



## MÉRÉSI SEGÉDLET

## LAB-SESSION GUIDE

4) HIBASZÁMÍTÁS	4) UNCERTAINTY ANALYSIS
<p>Megjegyzés: a mérési adatfile-ban megtalálhatók mind a mért átlag és mind a mért <i>rms</i> értékek (nyomás, sebesség, erő stb.) Az <i>rms</i> értékek az áramlásra jellemző értékek, ezek nem az abszolút hiba értékei. A dinamikus nyomás vagy erőkomponensek mért pillanatnyi értékei alapján számolt átlag és <i>rms</i> értékek az áramlás jellegzetességeivel kapcsolatos mennyiségek.</p> <p>“Minden mérés bizonytalansággal (mérési hibával) terhelt, így egy mérési eredmény közlése csak akkor lehet teljes, ha megadjuk a mérési eredményhez tartozó mérési bizonytalanság értékét is.”</p> <p>Mivel a számított mennyiségeink mind adott mérési hibával (bizonytalansággal) terhelt mért mennyiségekből számoltak, ezért a mennyiségeinkre mindig hibaszámítást kell végezni. Ilyen mennyiségek jelen esetben a jármű aerodinamikai erőténytényezői: az ellenállás-, felhajtóerő- és az oldalerő-tényező (<math>c_D</math>, <math>c_L</math> és <math>c_Y</math>).</p> <p>Tekintsük például az ellenállástényezőt, amelyre eredményül a <math>c_D</math> számított értékét és <math>\delta c_D</math> mérési bizonytalanság értékét adjuk meg <math>c_D \pm \delta c_D</math> formában, ahol <math>c_D</math> értéke a számított érték, és <math>\delta c_D</math> a mérési bizonytalanság (abszolút hiba) értéke. Például az eredményeket az alábbi formában kell közölni:</p>	<p>Note: The measured data file contains the <i>mean</i> and <i>rms</i> values of the measured quantities (i.e. the <i>mean</i> and <i>rms</i> value of the measured dynamic pressure &amp; force components etc.). Do not treat the <i>rms</i> data as being the uncertainty of the measurements! It characterizes the instantaneous and fluctuating fluid flow field!</p> <p>“All measurements are subject to uncertainty (to measurement error) and a measurement result is complete only when it is accompanied by a statement of the associated measurement uncertainty.”</p> <p>Since you are calculating aerodynamic parameters based on uncertain measurements you need perform an “error analysis” or “uncertainty analysis” for your results. You must calculate the uncertainty for the drag, lift &amp; side force coefficients (<math>c_D</math>, <math>c_L</math> and <math>c_Y</math>) to evaluate your own measurement uncertainty!</p> <p>For example let’s consider the drag coefficient that is given in form of <math>c_D \pm \delta c_D</math> where <math>c_D</math> is the calculated value and <math>\delta c_D</math> is the measurement uncertainty (absolute error).</p> <p>For example the results must be presented in form of:</p>
$c_D=0,40\pm 0,02$	
<p>mely alak azt jelenti, hogy <math>c_D=0,40</math> értékű az ellenállástényező, amely mérési eredményre <math>\delta c_D=\pm 0,02</math> értékű <u>abszolút hiba</u> (azaz mérési bizonytalanság) jellemző, és így a <u>relatív hiba</u> (mérési bizonytalanság) <math>\delta c_D/c_D = \pm 0,02/0,40 = \pm 5\%</math> értékű.</p> <p>Minden mérési pontra az alábbiakban leírtak szerint kell számítani és közölni hibával terhelt mérési eredményeket!</p>	<p>It means that <math>c_D=0,40</math> drag coefficient is measured by an <u>absolute</u> error (abs. meas. uncertainty) of <math>\delta c_D=\pm 0,02</math>, hence it can be characterized by a <u>relative</u> error (rel. meas. uncertainty) of <math>\delta c_D/c_D = \pm 0,02/0,40 = \pm 5\%</math>.</p> <p>The measurement uncertainty is to be calculated for each data points as presented below!</p>
<p><b>Hogyan számoljunk mérési bizonytalanságot?</b> Ehhez először az <math>R</math> számolt mennyiség (itt a <math>c_D</math> a kimenő adat) kiszámításához használt <math>R=f(X_i)</math> összefüggést kell definiálnunk, és be kell azonosítanunk az <math>X_i</math> bemenő mért adatokat, amelyektől <math>R</math> függ.</p>	<p><b>How to perform uncertainty analysis?</b> Let’s now define the <math>R</math> output quantity (here <math>c_D</math>) by an expression in form of <math>R=f(X_i)</math> and identify the <math>X_i</math> input quantities on which <math>R</math> depends. <math>R=f(X_i)</math></p>
$R=f(X_1; X_2; X_3\dots X_N),$	here $c_D = \frac{F_x}{p_{dyn} \cdot A_{proj}}$
<p>A jelen példában szereplő <math>c_D</math> ellenállástényező (kimenő adat) számos mérési bizonytalansággal terhelt <math>X_i</math> jelű mért mennyiség (bemenő adat) alapján számolandó. Ezek jelen esetben:  <math>X_1=F_x</math> ellenálláserő, mint bemenő adat  <math>X_2=p_{dyn}</math> dinamikus nyomás, mint bemenő adat  <math>X_3=A_{proj}</math> vetület keresztmetszet, mint bemenő adat</p>	<p>The <math>c_D</math> drag coefficient as being our output quantity is calculated based on several uncertain measured <math>X_i</math> quantities, that are the input quantities. Here the inputs are:  <math>X_1=F_x</math> is the measured drag force as input,  <math>X_2=p_{dyn}</math> is the measured dynamic pressure as input and  <math>X_3=A_{proj}</math> is the measured projected area as input</p>
<p>Mindhárom (<math>X_1; X_2; X_3</math>) mért mennyiség külön-külön adott <math>\pm \delta X_i</math> mérési bizonytalanságokkal terhelt mennyiség. A továbbiakhoz minden <math>X_i</math> mért mennyiség <math>\pm \delta X_i</math> mérési bizonytalanságát ismernünk kell.</p>	<p>All three (<math>X_1; X_2; X_3</math>) measured <math>X_i</math> quantities are characterized by an <math>\pm \delta X_i</math> uncertainty itself. For next step we need to quantify the <math>\pm \delta X_i</math> measurement uncertainty for all measured <math>X_i</math> quantities</p>
$X_i \pm \delta X_i$	
<p>Mivel mérési bizonytalansággal terhelt több mért mennyiség alapján számoljuk az ellenállástényező értékét, az mérési hibával (mérési bizonytalansággal) terhelt számolt érték.</p> <p><b>Hogyan összegezzük több <math>X_i</math> mért mennyiség <math>\pm \delta X_i</math> mérési bizonytalanságát?</b> Metrológiában a mérési hiba a hibaterjedés szabályai szerint az alábbi kifejezés segítségével számítandó.</p>	<p>We need to take into account that the calculated value of the drag coefficient is an uncertain value, depending on the uncertainly measured values of the drag force, the dynamic pressure and the projected area.</p> <p><b>How to “sum” these <math>\pm \delta X_i</math> uncertainties of multiple measured <math>X_i</math> quantities?</b> In metrology, the measurement uncertainty is calculated as follows.</p>

**MÉRÉSI SEGÉDLET**

**LAB-SESSION GUIDE**

Bármely R számított mennyiség $\delta R$ abszolút hibáját (mérési bizonytalanságát) az alábbi kifejezéssel adhatjuk meg.	The $\delta R$ absolute uncertainty for any R calculated (output) quantity is defined by expression below.
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------

$$\delta R = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^N \left( \delta X_i \frac{\partial R}{\partial X_i} \right)^2}$$

Alkalmazzuk ezt a jelen esetben kiszámítandó ellenállástényezőre:	Let's apply this for the absolute uncertainty of the calculated drag coefficient:
-------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------

$$\delta c_D = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^N \left( \delta X_i \frac{\partial c_D}{\partial X_i} \right)^2}$$

Három (N=3) mért mennyiségünk van (ellenálláserő, dinamikus nyomás és vetület keresztmetszet). Behelyettesítve ezeket az alábbi alakot kapjuk:	There are N=3 measured quantities (drag force, the dynamic pressure and the projected area). Rewriting it in the following forms we get:
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

$$\delta c_D = \pm \sqrt{\left( \delta X_1 \frac{\partial c_D}{\partial X_1} \right)^2 + \left( \delta X_2 \frac{\partial c_D}{\partial X_2} \right)^2 + \left( \delta X_3 \frac{\partial c_D}{\partial X_3} \right)^2}$$

$$\delta c_D = \pm \sqrt{\left( \delta F_x \frac{\partial c_D}{\partial F_x} \right)^2 + \left( \delta p_{dyn} \frac{\partial c_D}{\partial p_{dyn}} \right)^2 + \left( \delta A_{proj} \frac{\partial c_D}{\partial A_{proj}} \right)^2}$$

A tagok mérési bizonytalanságai ( $\delta F_x=0,002N$ ; $\delta p_{dyn}=0,1Pa$ ) az alábbi táblázatból a mérőrendszerre ismertek, míg a $\delta A_{proj}$ vetület keresztmetszet mérési bizonytalansága a saját jármű és terület mérési módszertől függ, amely egyedi.	The uncertainties ( $\delta F_x=0,002N$ ; $\delta p_{dyn}=0,1Pa$ ) are listed in table below, while $\delta A_{proj}$ is needed to be calculated/estimated for your own projected area measurement method.
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

A $\frac{\partial c_D}{\partial X_i}$ parciális deriváltak paraméteres meghatározása a következő lépés és ezután már számítható a mérési hiba.	Next step is the parametric formulation of the $\frac{\partial c_D}{\partial X_i}$ partial derivatives, hence measurement error can be calculated.
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Fentiek behelyettesítése után az ellenállástényező $c_D$ számított értékét terhelő $\pm \delta c_D$ mérési bizonytalanság értékét kapjuk.	After substitution, we can easily get the value of $\pm \delta c_D$ measurement uncertainty for the calculated $c_D$ drag coefficient.
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Ne felejtse el mindegyik ( $c_D$ , $c_L$ , $c_Y$ ) tényező minden mérési pontbeli értékére elvégezni a hibaszámítást! A módosítások összehasonlításakor ez elengedhetetlen!	It is needed to determine the uncertainty for all coefficients ( $c_D$ , $c_L$ , $c_Y$ ) and for all data points, especially when comparing data for your vehicle modifications!
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Mért mennyiségek: közeg légköri nyomása és hőmérséklete, dinamikus nyomás és erő komponensek. A mennyiségek mérési bizonytalanságait az alábbi táblázat tartalmazza.	Measured quantities are the ambient pressure and the air temperature, the dynamic pressure and force components. Uncertainties listed in the table below can be used.
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

mennyiség / quantity	abszolút hiba /absolute uncertainty, $\delta X_i$	mértékegység/unit	
$p_0$	$\delta p_0$	$\pm 100$	Pa
$T_0$	$\delta T_0$	$\pm 0,1$	K
$p_{dyn}$	$\delta p_{dyn}$	$\pm 0,1$	Pa
$F_i$	$\delta F_i$	$\pm 0,006$	N
$A_{proj}$	$\delta A_{proj}$	?	m <sup>2</sup>

(meghatározandó! /to be determined!)

DATA OF THIS SECTION IS TO BE UPDATED DURING THE MEASUREMENTS !

DATA for DIFFERENTIAL PRESSURE MEASUREMENT DEVICE ( $p_{dyn}$ ):

**name/type:** SETRA 239/4  
**range:**  $\pm 250Pa$  (check it on site which one is used!)  
**uncertainty:**  $\delta p_{FS} = \pm 0,35Pa$  ( $\delta p_{FS} = \pm 0,14\%$ ) (here, the value of  $\delta p = \pm 0,1Pa$  is suggested to use.)  
 "FS" means at full scale

DATA for FORCE MEASURING DEVICE ( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ), load cells:

	<b>x component (drag):</b>	<b>y component (side):</b>	<b>z force component (lift):</b>
<b>type:</b>	EMALOG	EMALOG	EMALOG
<b>range:</b>	$F_{x,max} = \pm 3kg$	$F_{y,max} = \pm 3kg$	$F_{z,max} = \pm 3 kg$
<b>uncertainty:</b>	$\delta F_{x,FS} = \pm 0,02\%$	$\delta F_{y,FS} = \pm 0,02\%$	$\delta F_{z,FS} = \pm 0,02\%$

The  $\pm 0,02\%$  data for the uncertainty at "FS" (full scale) means that it is valid for the max limit measured value, e.g. if we would measure  $3kg$  ( $=3 \times 9,81 = 29,43N$  force), the rel. uncertainty of  $\pm 0,02\%$  would result  $\delta F_x = \pm 0,005886 N$  (i.e. approx.  $\pm 0,6g$ ).

**MÉRÉSI SEGÉDLET**

**LAB-SESSION GUIDE**

Eredmények közlése, adatok ábrázolása	Representation of results, data visualization
1) Alkalmazzon blokkolás korrekciót a mérési eredményeire! Adja meg a blokkolási tényező értékét! 2) Minden konfigurációra hibásávokkal ábrázolja az aerodinamikai erőtevényezőket! 3) Az adatpontokra illesszen görbét! (amennyiben lehetséges) 4) A valós járműre jellemző Reynolds-számig extrapoláljon! (amennyiben lehetséges) 5) Összehasonlító diagramokon elemezze a mérési eredményeket: az összehasonlítást célszerű relatív szemléletben megtenni! (pl. $\Delta c_D/c_D$ , $\Delta c_L/c_L$ , $\Delta c_s/c_s$ értékeket is közölni) 6) Értékelje eredményeit azt is szem előtt tartva, hogy az aerodinamikai paraméterek mért változása átültethető a megvalósítható üzemanyagfogyasztás-változásra!	1) Apply blockage correction to your measured data! Present the data of your blockage correction factor! 2) Plot all measured data points for all of your modifications with uncertainty data! 3) Fit trendlines to your data points! 4) Extrapolate your results up to the real vehicle's Reynolds number! (if possible!) 5) Use comparison graphs to present your measured/calculated data! Evaluate your results in comparison graphs! Calculate relative changes in % ! (e.g. $\Delta c_D/c_D$ , $\Delta c_L/c_L$ , $\Delta c_s/c_s$ ) 6) Try to evaluate your results keeping in mind that the change in fuel consumption is influenced by the change in the measured aerodynamic parameters!

