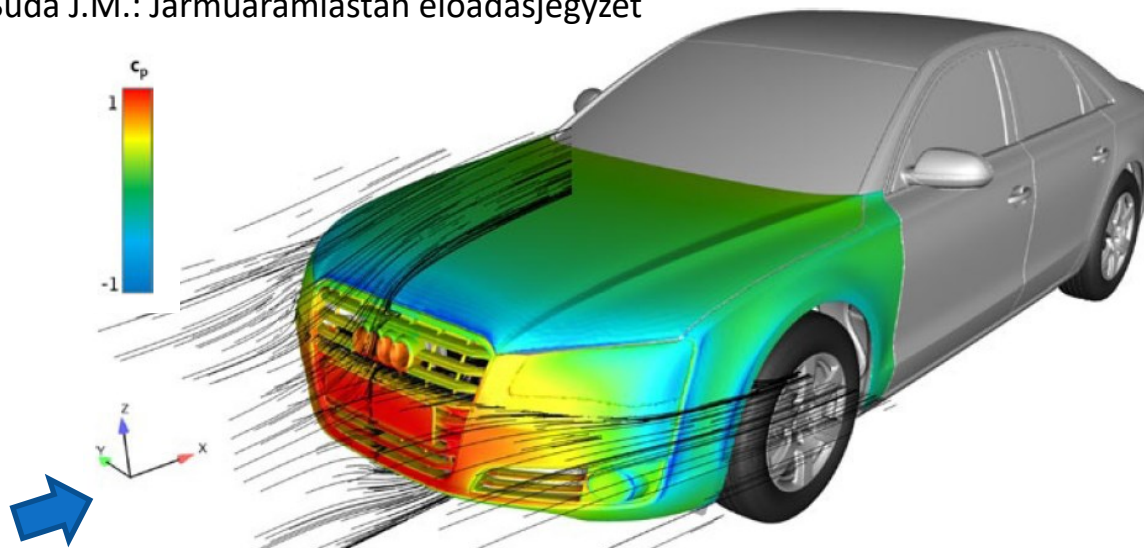




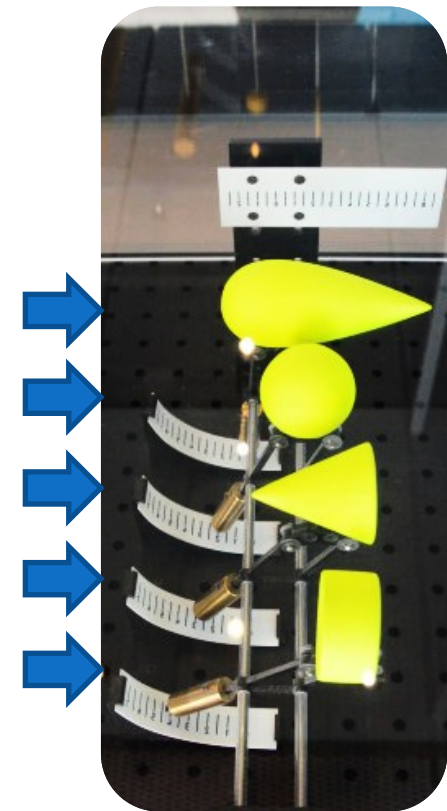
# 11. Áramlásba helyezett testekre ható erő

Áramlás-tanszék előadást kiegészítő prezentáció  
Dr. Suda Jenő Miklós, adjunktus  
BME Áramlás-tanszék

Felhasznált szakirodalom:  
Dr. Lajos T.: Az áramlás-tanszék alapjai tankönyv  
Dr. Suda J.M.: Járműáramlás-tanszék előadásjegyzet



Személyautó front felületén nyomástényező-eloszlás ( $c_p$ ) és áramvonalak



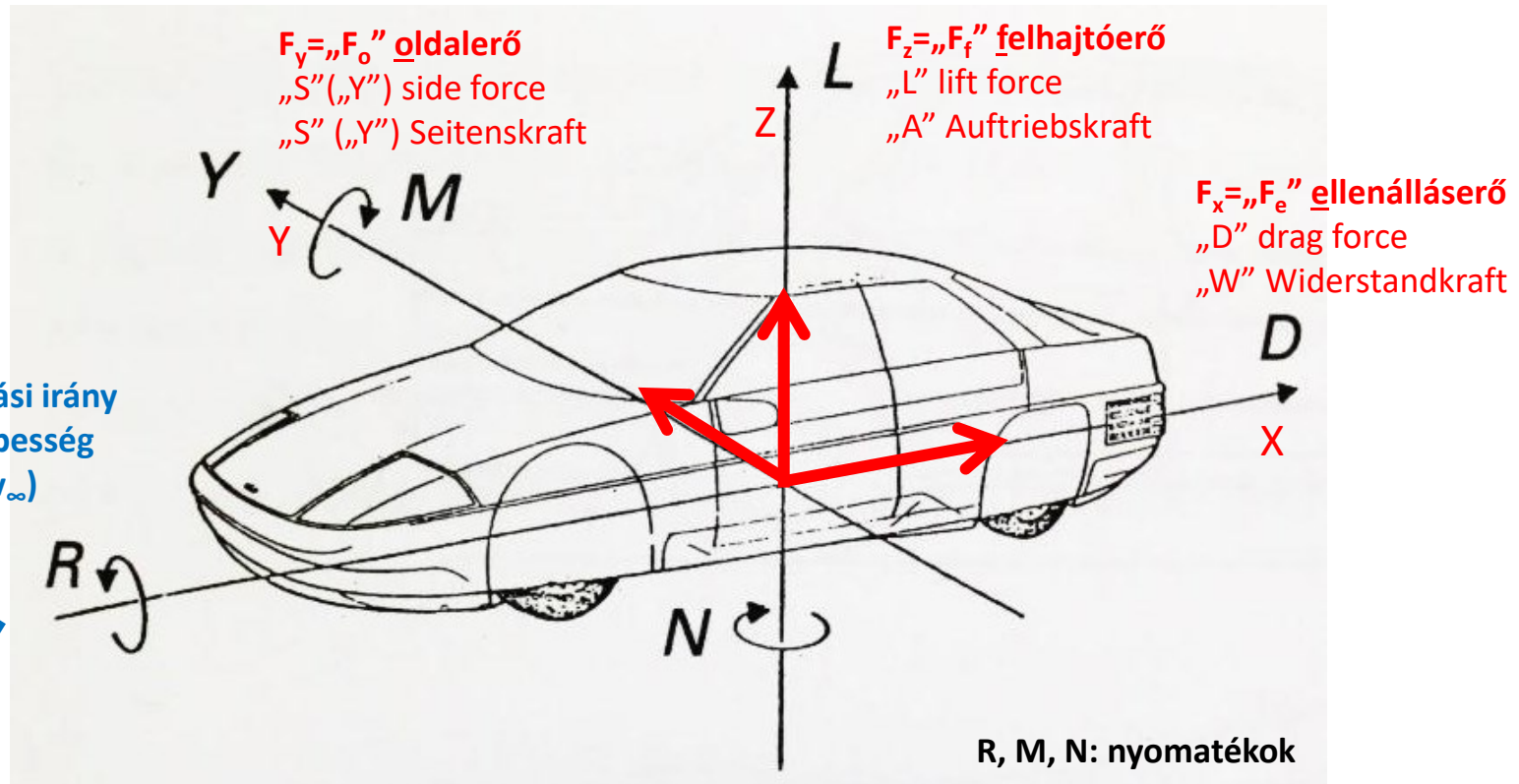


## 11. Áramlásba helyezett testekre ható erő

### $\underline{F}$ aerodinamikai erő vektor komponensei:

$$\underline{F} = F_x \cdot \underline{i} + F_y \cdot \underline{j} + F_z \cdot \underline{k}$$

$$\underline{F} = F_e \cdot \underline{i} + F_o \cdot \underline{j} + F_f \cdot \underline{k}$$





# Aerodinamikai erőtenyezők:

$c_e$  : ellenállástényező

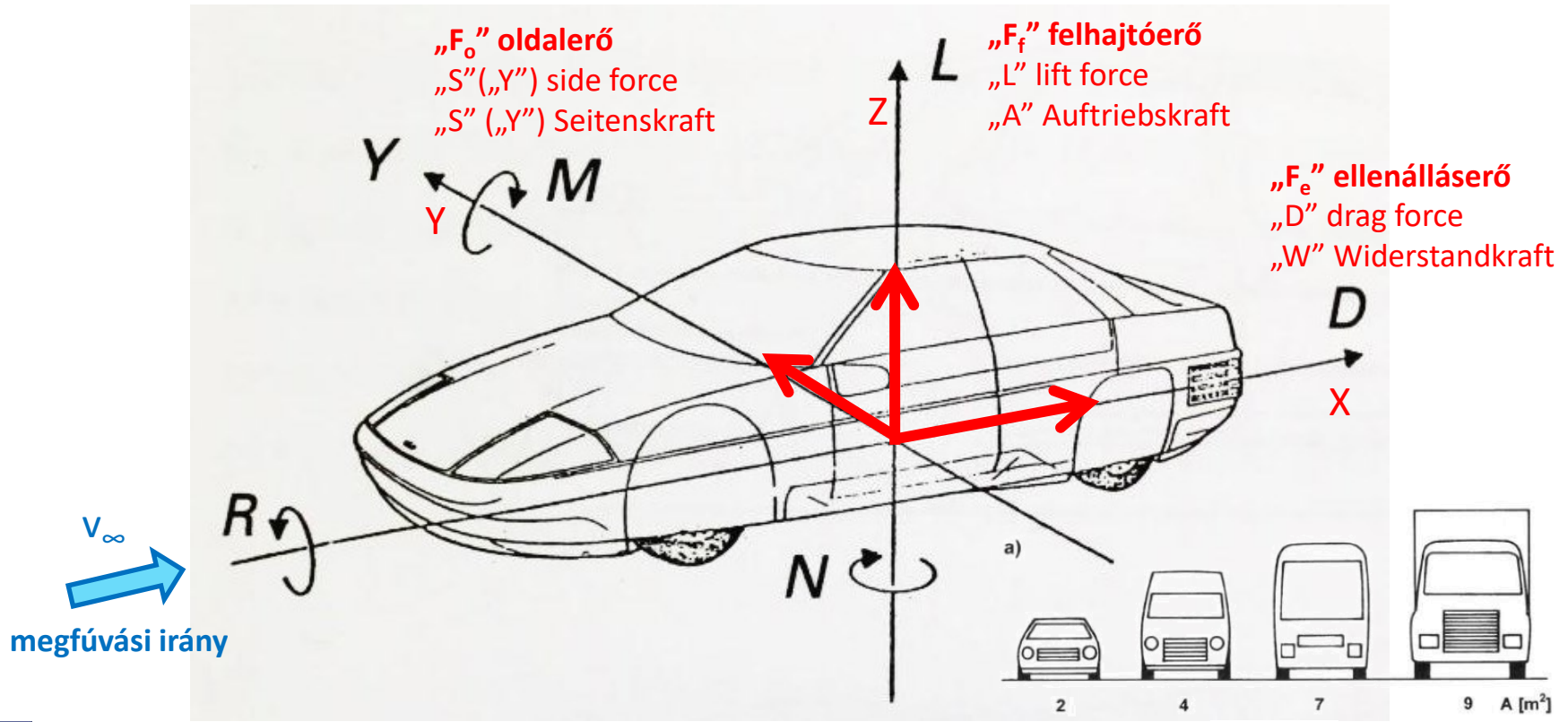
$$c_e = \frac{F_e}{\rho_{din} A_{ref}}$$

$c_o$  : oldalerő-tényező

$$c_o = \frac{F_o}{\rho_{din} A_{ref}}$$

$c_f$  : felhajtóerő-tényező

$$c_f = \frac{F_f}{\rho_{din} A_{ref}}$$





## Aerodinamikai erő (nyomáseloszlásból és súrlódásból)

$$\underline{F} = \underline{F}_p + \underline{F}'_f$$

$$\underline{F}_p = - \int_A p \cdot d\underline{A} \quad \underline{F}'_f = \int_A \tau_0 | d\underline{A} | \underline{e}$$

Bővítés referencia nyomással és referencia sebességgel:

$$0 = \int p_\infty \cdot d\underline{A} \quad \text{és} \quad 1 = p_{din} / p_{din}$$

$$\underline{F}_p = p_{din} \cdot \left[ - \int_A c_p \cdot d\underline{A} \right]$$

$$\underline{F}'_f = p_{din} \cdot \left[ \int_A c'_f | d\underline{A} | \underline{e} \right]$$

$c_p$ : nyomástényező

$$c_p = \frac{(p - p_\infty)}{p_{din}}$$

$$-3 \leq c_p \leq +1$$

$c'_f$ : fali (bőr-)súrlódási tényező

$$c'_f = \frac{\tau_0}{p_{din}}$$

$$10^{-3} < c'_f < 10^{-2}$$

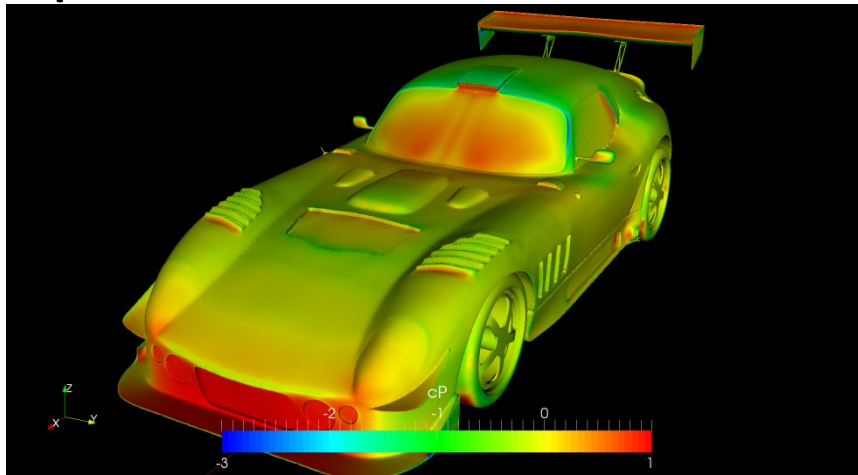


$$\underline{F} = \underline{F}_p + \underline{F}'_f$$

$$\underline{F}_p = F_{p,x} \cdot \underline{i} + F_{p,y} \cdot \underline{j} + F_{p,z} \cdot \underline{k}$$

$$\underline{F}'_f = F'_{f,x} \cdot \underline{i} + F'_{f,y} \cdot \underline{j} + F'_{f,z} \cdot \underline{k}$$

$c_p$  nyomástényező

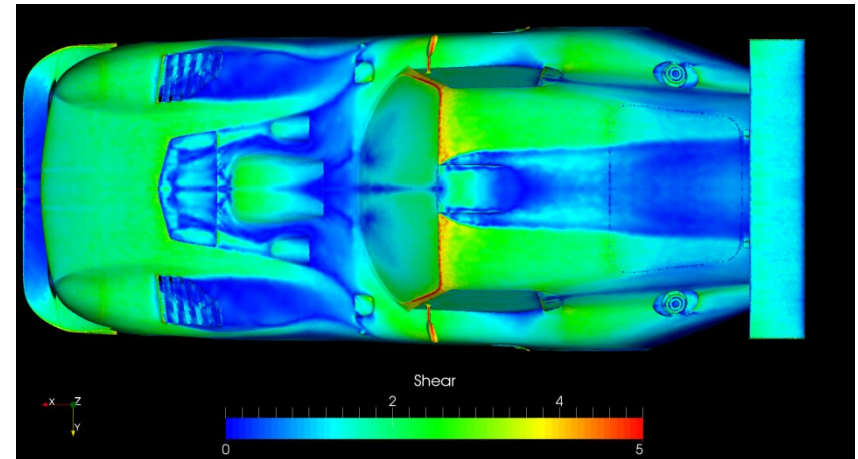


$c_p$   
nyomástényező eloszlás

ábrán a skála:

$$-3 < c_p < +1$$

$\tau_0$  fal csúsztatófeszültség



$\tau_0$  [Pa]  
fali csúsztatófeszültség eloszlás

ábrán a skála:

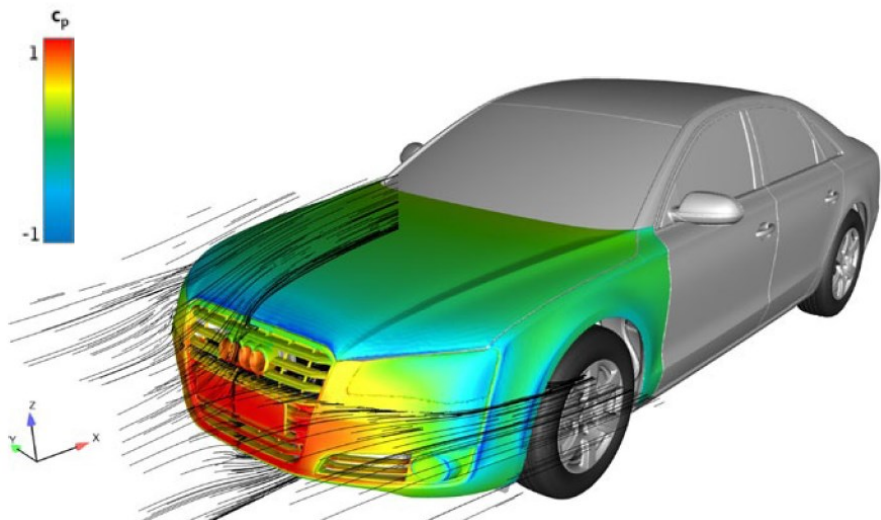
$$0\text{Pa} < \tau_0 < 5\text{Pa}$$



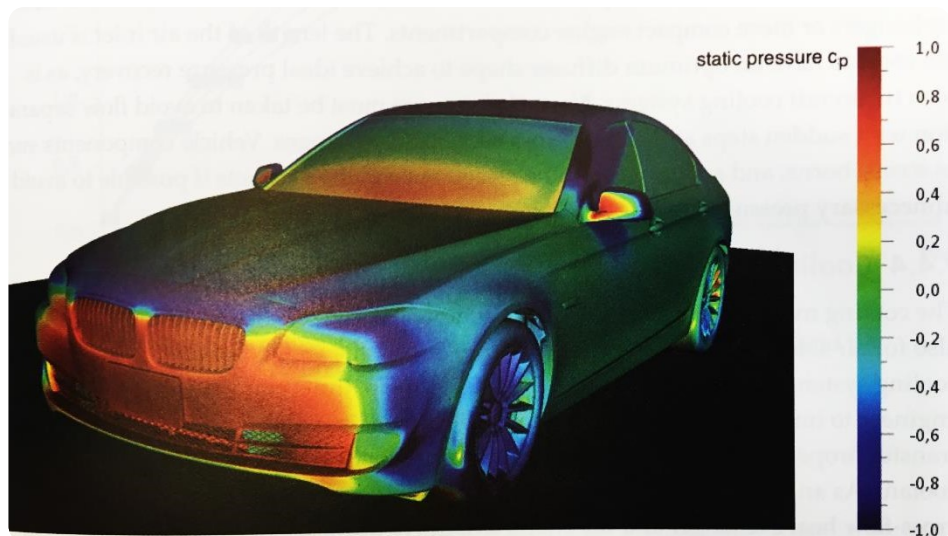




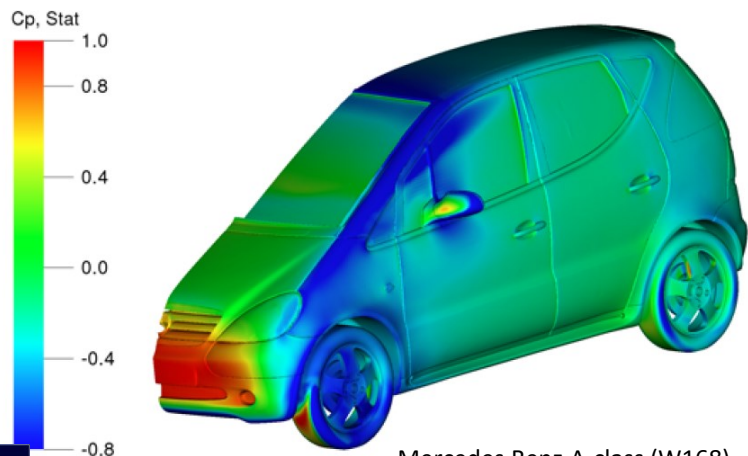
## Nyomástényező-eloszlás karosszérián (v.ö. görbült áramvonalak -> Euler-egyenlet)



Személyautó front felületi nyomástényező-eloszlás ( $c_p$ ) és áramvonalak



Személyautó felületi nyomástényező-eloszlás ( $c_p$ )



Mercedes Benz A-class (W168)

Személyautó felületi nyomástényező-eloszlás ( $c_p$ )



Szélcsatornában áramlás láthatóvá tétele áramvonalakkal



# Ellenállástényező ( $c_e$ ), felhajtóerő-tényező ( $c_f$ ) :

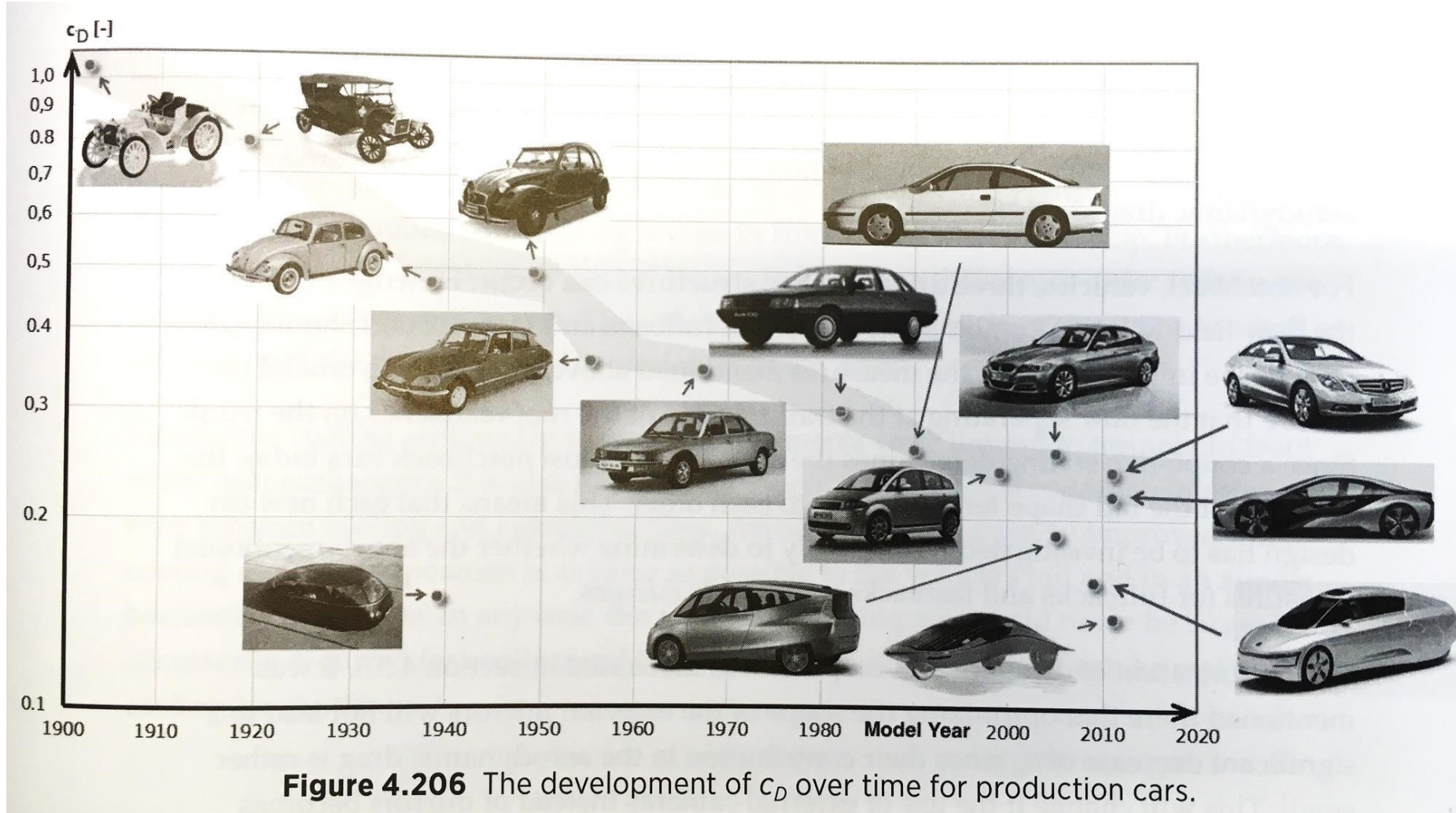
		$c_f$	$c_e$
1	Tengelyszimmetrikus, kis ellenállástényezőjú áramvonalas test (cseppforma)	0	0.04
2	Félcsepp alakú kis ellenállástényezőjú járműforma, kerekkel kiegészítve, talaj közelében	0.18	0.15
3	Generikus személyautó járműalak	0.28	0.35
4	Versenyautó prototípus	-3.00	0.75

**Felhajtóerő-tényező ( $c_f$ ) és ellenállástényező ( $c_e$ )  
tipikus testek ill. járműalakok esetén.**





# Ellenállástényező ( $c_e$ )



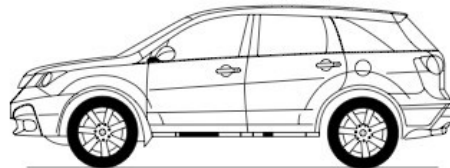
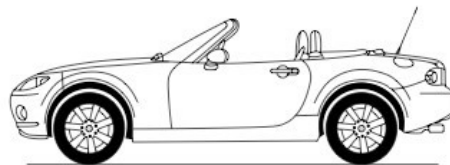
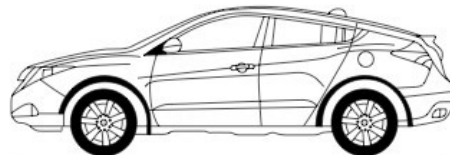
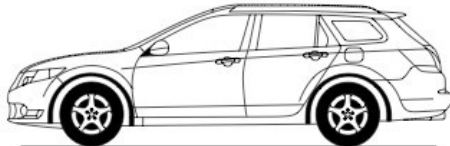
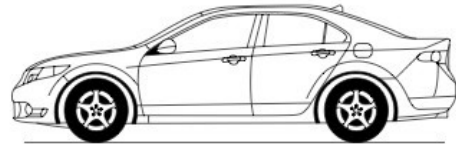




# Ellenállástényező ( $c_e$ ), felhajtóerő-tényező ( $c_f$ ):

f: front

r: rear



	$C_D$	$C_{Lf}$	$C_{Lr}$	$\Delta C_D$ (Open Window)
Sedan	0.32	0.067	0.114	~0.05
Wagon	0.30			~0.04
Hatchback	0.31			~0.03
Convertible	0.40	0.011	0.143	
SUV	0.40 - 0.50			~0.06

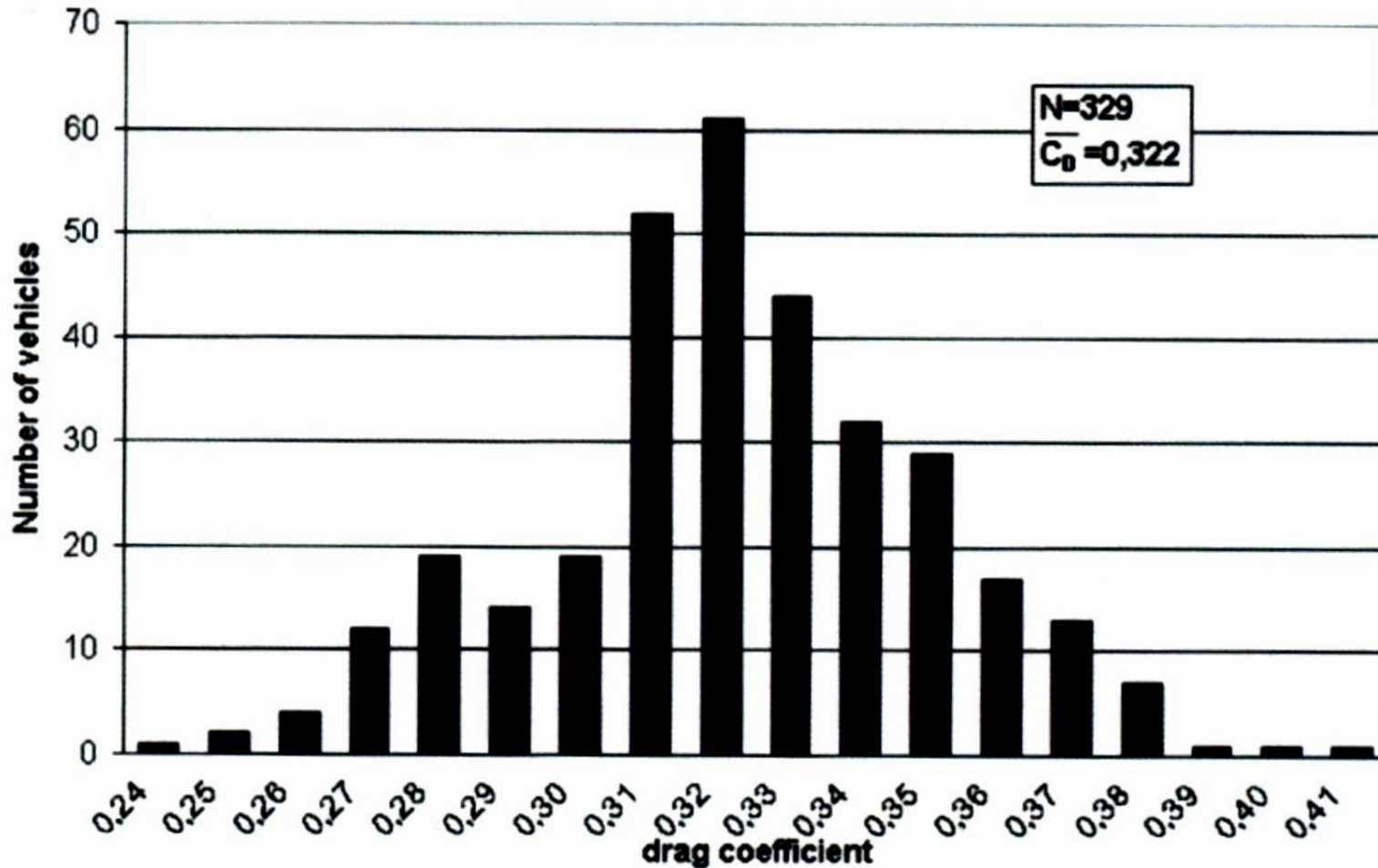
**Table 2.**  
Computed  
breakdown of  
the  
drag  
components on  
a typical sedan.

Feature	$\Delta C_D$
Bodywork	0.050
Rearview Mirror	0.015
Rear Surfaces	0.085
Engine Bay	0.024
Cooling Drag	0.048
Underbody + Chassis	0.085
F Wheel + Suspension	0.025
R Wheel + Suspension	0.023
<b>Total Drag Coefficient</b>	<b>0.355</b>





## Ellenállástényező ( $c_e$ ) értékek eloszlása (2003, EU)



$C_w$  – histogramm of european passenger cars, 2003

**W: Widerstand (ellenállás)**

Dr. Suda Jenő Miklós





# Referencia keresztmetszet ( $A_{ref}$ ), ellenállástényező ( $c_e$ ):

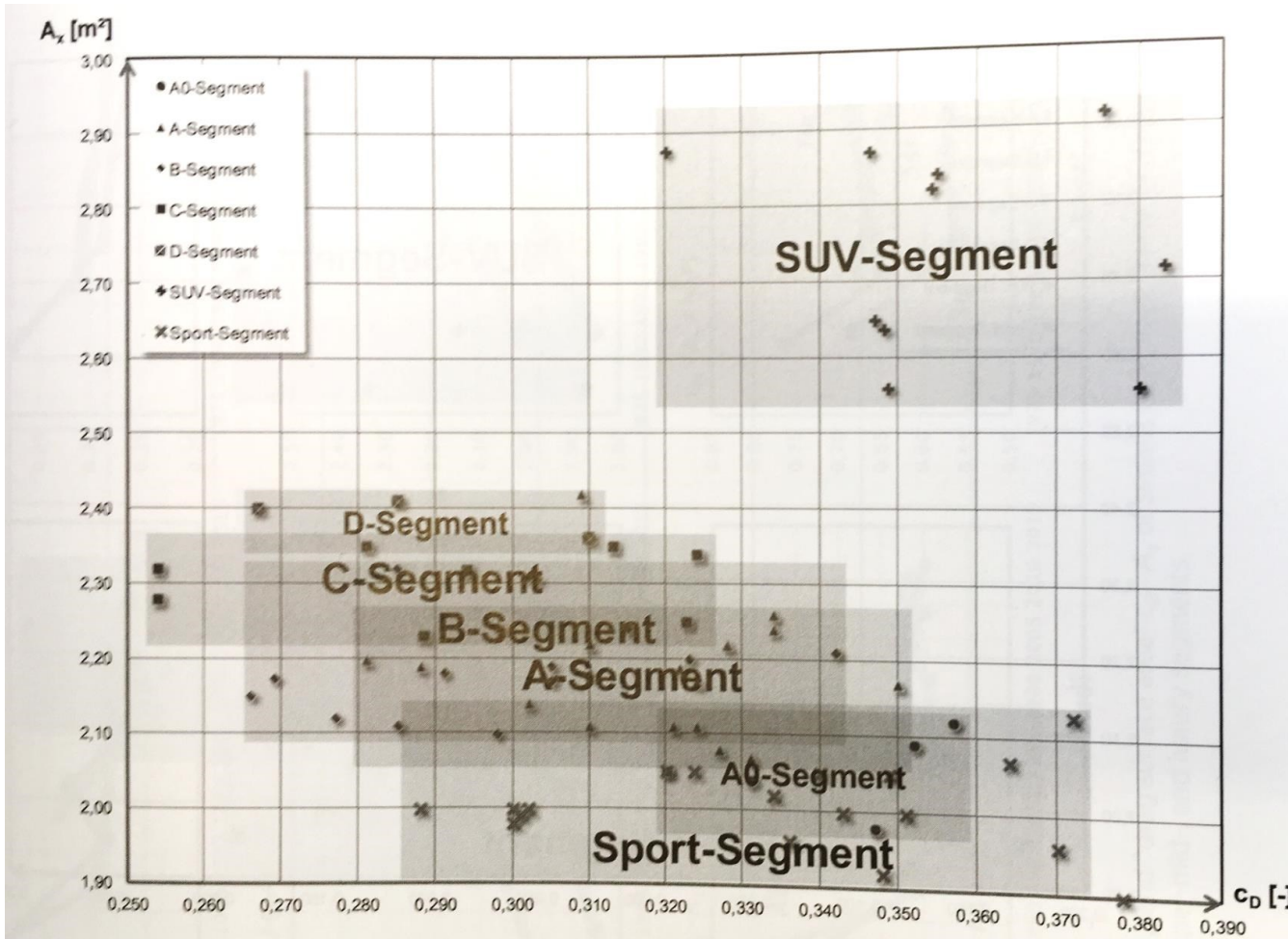
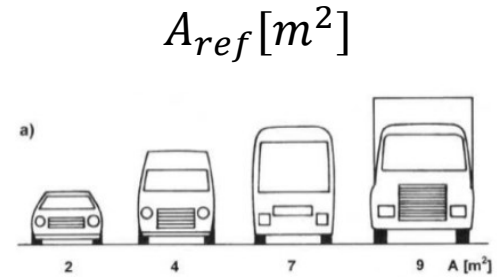


Figure 4.197 Measured aerodynamic drag values for  $N = 79$  vehicles of different market segments, presented on the  $c_D$ - $A_x$  chart.



## VW notations

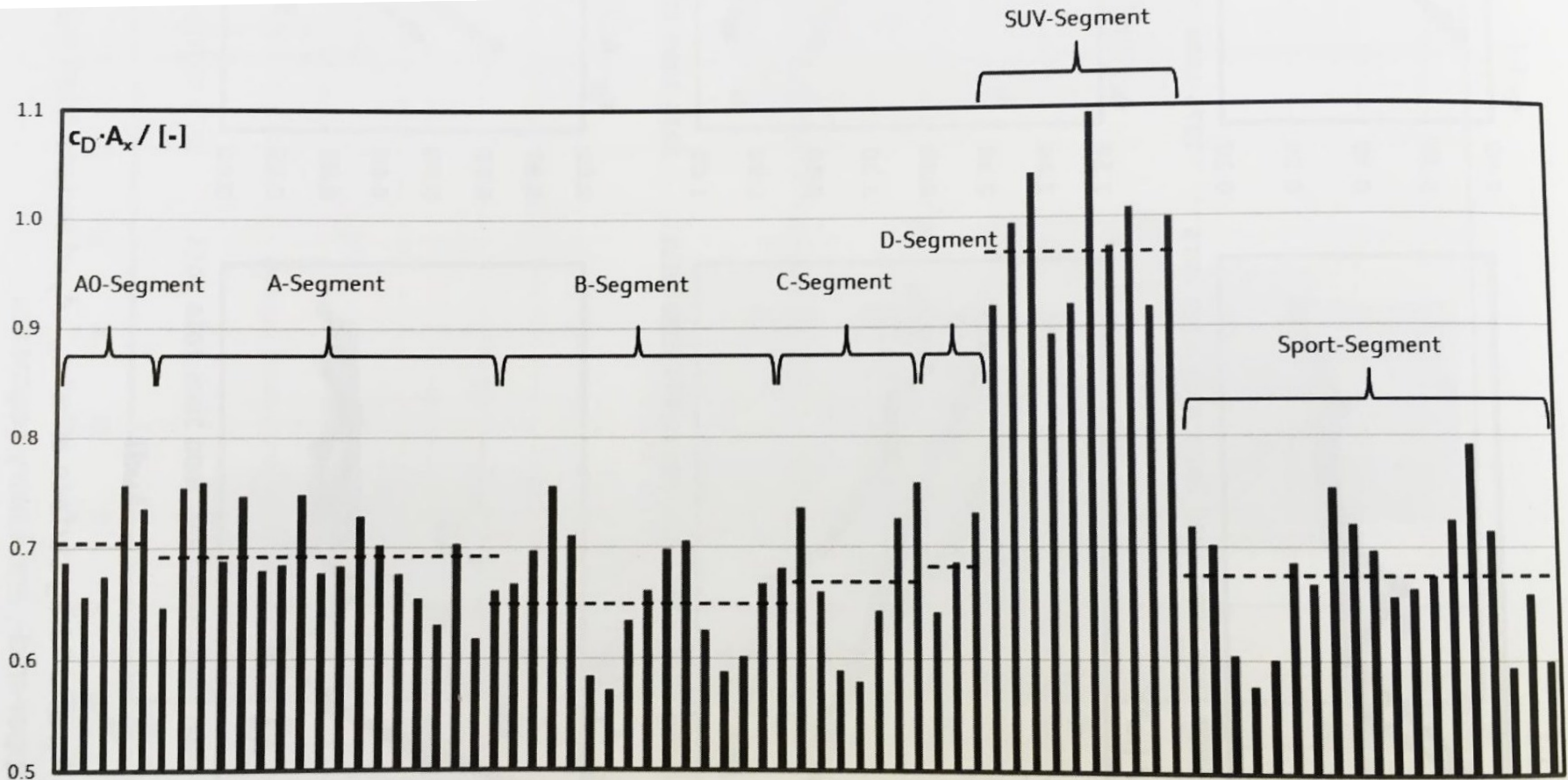
- A0 small cars
- A compact
- B mid-range
- C upper mid-range
- D luxury

- + SUV
- + SPORT





# Ellenállásfelület ( $c_e A_{ref}$ ) /drag area/:



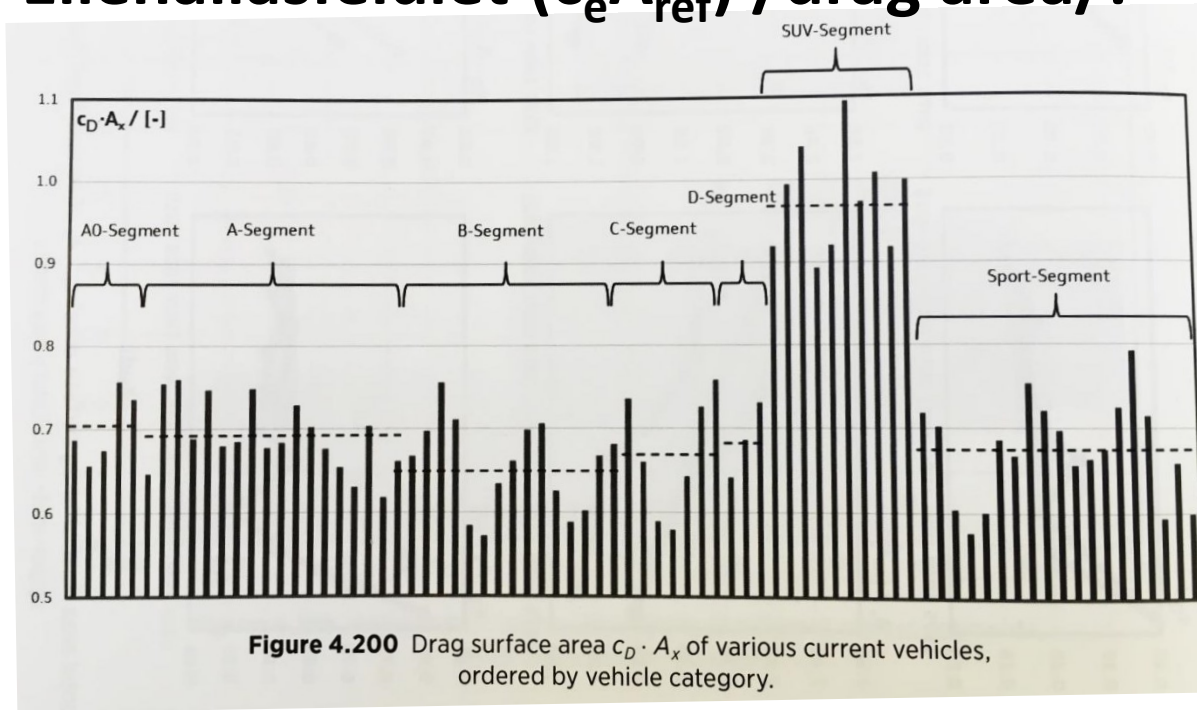
**Figure 4.200** Drag surface area  $c_D \cdot A_x$  of various current vehicles, ordered by vehicle category.







# Ellenállásfelület ( $c_e A_{ref}$ ) /drag area/:



Aerodinamikai veszteségteljesítmény,  $P_{ae}[W] \sim v^3 (!!)$

$$P_{ae} = F_e v_{ref} = (p_{din} c_e A_{ref}) v_{ref} = \frac{\rho}{2} v_{ref}^3 (c_e A_{ref})$$

$$P_{ae, v=130km/h} = \frac{\rho}{2} v_{ref}^3 (c_e A_{ref}) = \frac{1,2 \frac{kg}{m^3}}{2} \left( \frac{130 \frac{km}{h}}{3,6 \frac{h}{m}} \right)^3 (0,32 \cdot 2m^2) \cong 18,1kW$$

$$P_{ae, v=260km/h} \cong 144,7kW$$



# Áramlásba helyezett szárny:

„ $F_e$ ” ellenálláserő

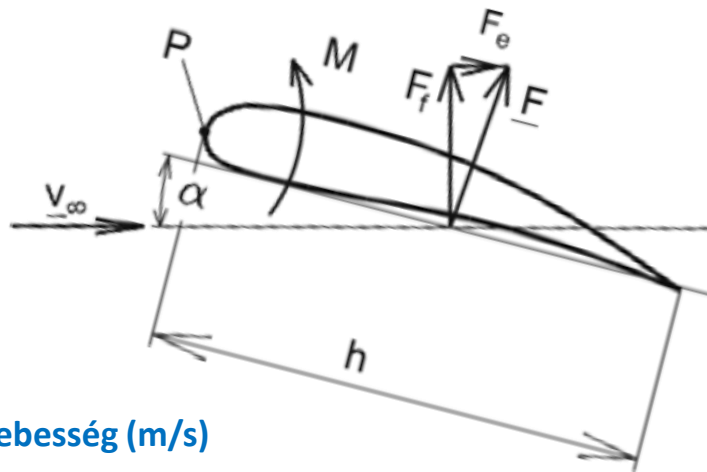
„D” drag force

„W” Widerstandskraft

„ $F_f$ ” felhajtóerő

„L” lift force

„A” Auftriebskraft



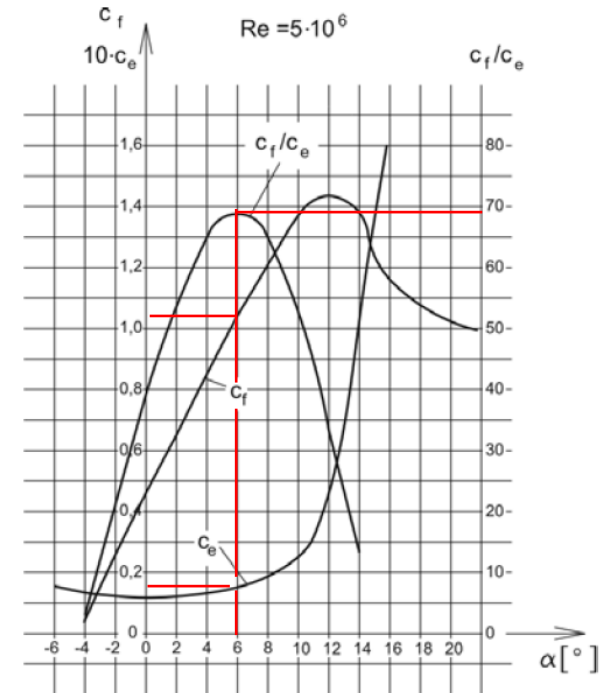
$v_{ref}$  : megfúvási sebesség (m/s)

$\alpha$  : állásszög ( $^\circ$ )

$A_{ref}=h \cdot l$  : jellemző ref. keresztmetszet ( $m^2$ )

$h$  : szárny húrhossz (m)

$l$  : szárny hossz (m)



11.10. ábra

A felhajtóerő- az ellenállástényező és a siklószám változása az állásszög függvényében

## Aerodinamikai erőtényezők:

Ellenállástényező

$$c_e = \frac{F_e}{\rho_{din} A_{ref}}$$

Felhajtóerő-tényező

$$c_f = \frac{F_f}{\rho_{din} A_{ref}}$$

## Siklószám:

$$S(\alpha = 6^\circ) = \frac{c_f}{c_e} = \frac{1,04}{0,015} = 69$$

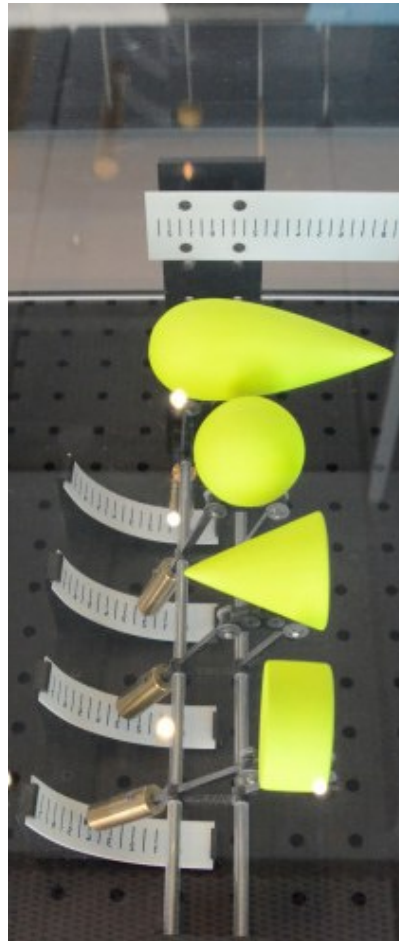
$$S = \frac{c_f}{c_e} = \frac{F_f}{F_e}$$



# Áramlásba helyezett testek ellenállástényezői

Shape	Drag Coefficient
Sphere $V_{ref}$	0.47
Half-sphere	0.42
Cone	0.50
Cube	1.05
Angled Cube	0.80
Long Cylinder	0.82
Short Cylinder	1.15
Streamlined Body	0.04
Streamlined Half-body	0.09

**Measured Drag Coefficients**



Dr. Suda Jenő Miklós

3-Dimension			2-Dimension		
SHAPE	REF.	$C_D$	SHAPE	REF.	$C_D$
	STING SUPPORT	0.47 <sub>y</sub>		—	1.17 <sub>y</sub>
	(c)	0.38		(a)	1.20
	(c)	0.42		(a)	1.16
	(e)	0.59 <sub>y</sub>		(d)	1.60 <sub>y</sub>
	(f)	0.80 <sub>y</sub>		(e)	1.55
	(d)	0.50		(a)	1.55
		1.17			1.98
	(c)	1.17		(a)	2.00
	(b)	1.42		(a)	2.30
	(a)	1.38		(b)	2.20
	(f)	1.05 <sub>y</sub>		(a)	2.05 <sub>y</sub>

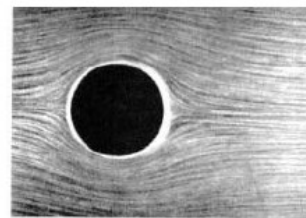
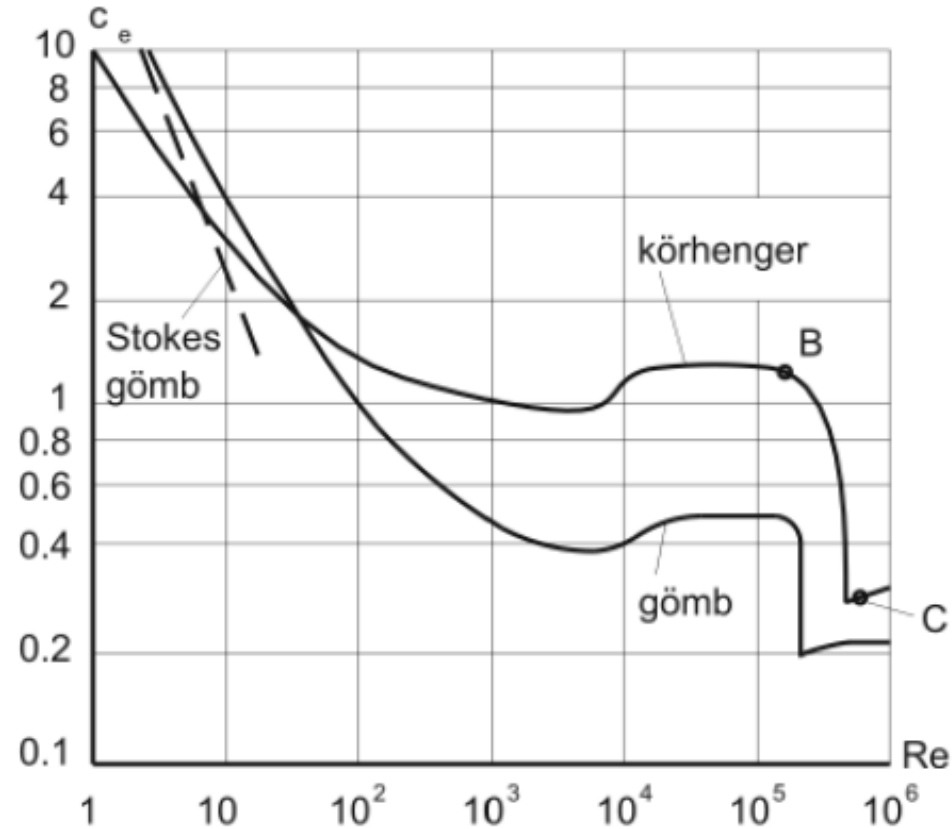




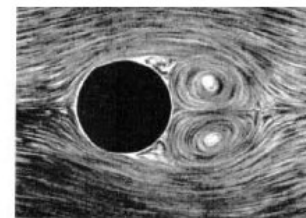
# Áramlásba helyezett testek ellenállástényezői $c_e = f(Re)$

Áramlásba helyezett testek  $c_e$  ellenállástényezője [8] és [16] nyomán.

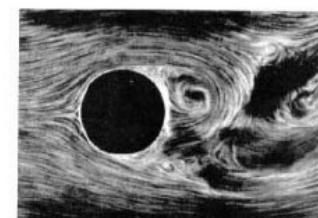
Tengelyére merőlegesen megfújt henger (9.12. ábra)						
Reynoldszám $Re$	Áramlásra merőleges hossz/átmérő ( $l/d$ )					
		1	2	5	10	40
$10^3-10^5$	0,63	0,68	0,74	0,82	0,98	1,2
$> 5 \times 10^5$						0,35
Merőlegesen megfújt lemezcsík (téglalap, 11.7. ábra)						
	Hossz/szélesség ( $l/t$ )					
	1	2	4	10	18	$\infty$
	1,10	1,15	1,19	1,29	1,40	2,01
Áramlásra merőlegesen elhelyezkedő dűcprofil (2.3. ábra)						
	A profil keresztmetszet áramlás irányú/arra merőleges mérete ( $h/d$ , hossz: $\infty$ )					
	2	3	5	10	20	
$> 5 \times 10^5$	0,2	0,1	0,06	0,083	0,094	
Áramlásra merőleges négyzetes hasáb átlóval párhuzamosan megfújva						
	Áramlásra merőleges hossz/keresztmetszet oldalhossz ( $l/a$ )					
	5			$\infty$		
	0,91			1,53		
Forgási ellipszoid a $h$ tengellyel párhuzamosan megfújva						
	Áramlás irányú/arra merőleges tengely ( $h/d$ )					
	1,8	1 (gömb)	0,75	0 (körtárcsa)		
$10^3-10^5$		0,5	0,6	1,1		
$> 5 \times 10^5$	0,09	0,15	0,2	1,1		
Tengely irányban megfújt henger (11.14 ábra)						
	Áramlás irányú hossz/átmérő ( $l/d$ )					
	0 (körtárcsa)	1	2	4	7	
$10^3-10^5$	1,10	0,91	0,85	0,87	0,99	
Fél gömbhéj szimmetriatengellyel párhuzamosan megfújva						
	Domború oldal felől megfújva			Homorú oldal felől megfújva		
	Nyitott		Körlappal zárt	Nyitott		Körlappal zárt
	0,34		0,42	1,33		1,17
Forgástengellyel párhuzamosan megfújt, áramlás irányában táguló kúp						
	Kúpszög ( $\alpha^\circ$ )					
	30			60		
	0,34			0,51		



a)



b)



c)

11.3. ábra

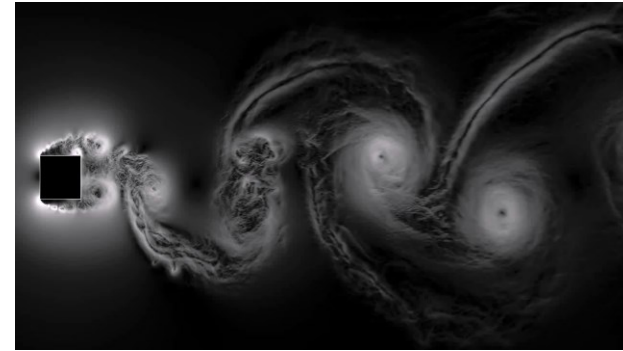
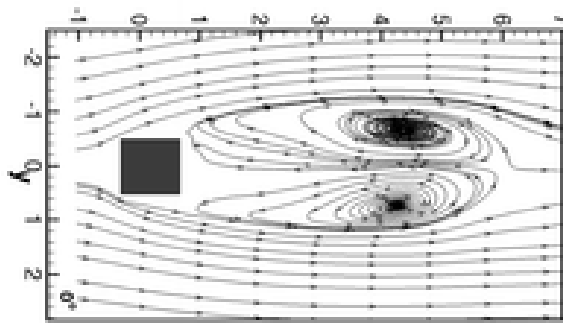
A körhenger és a gömb ellenállástényezője, a henger körüli áramlás



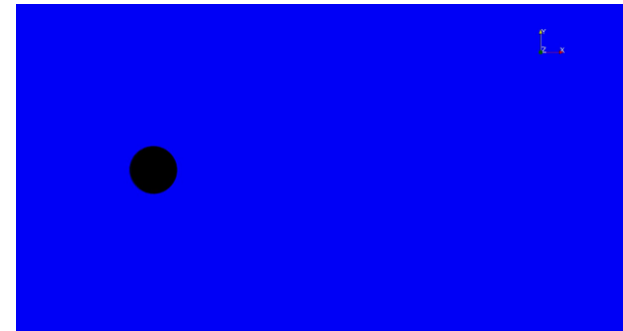
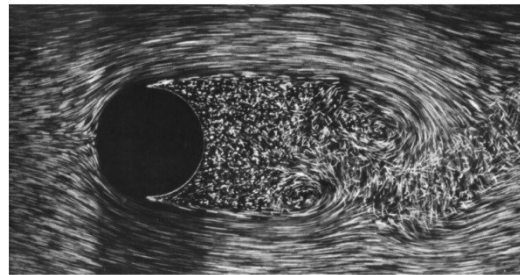



# Áramlásba helyezett testek ellenállástényezői

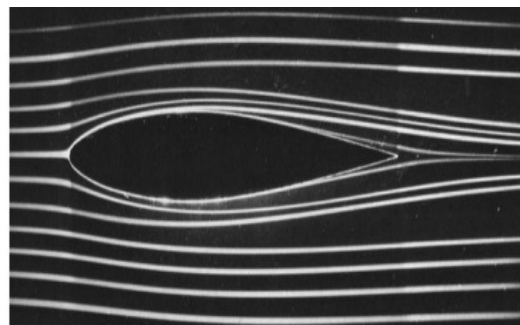
HASÁB → □  $c_D=1,25$



HENGER → ○  $c_D=0,65$



DÚCPROFIL →   $c_D=0,2$



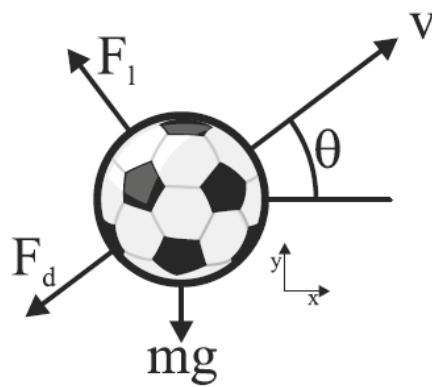


# Áramlásba helyezett testek ellenállástényezői

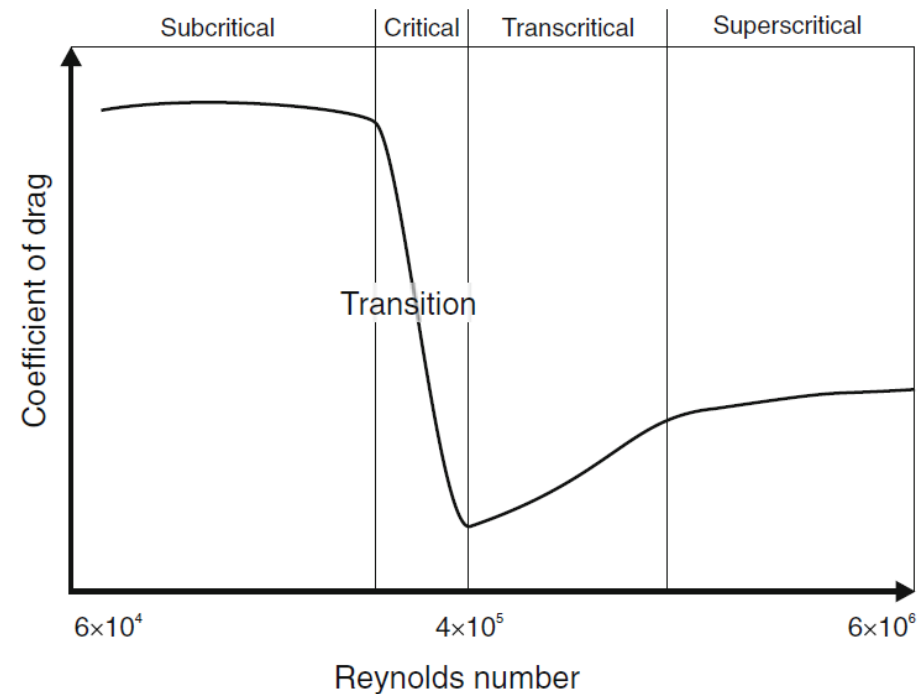
## Focilabda ellenállástényezője $c_e = f(Re)$

**Table 1** A range of aerodynamic properties measured directly in wind tunnel tests by other authors

Subcritical $C_d$	Transition ( $Re \times 10^{-5}$ )	Supercritical $C_d$	Source
0.52	3.8	0.09	[1]
0.40–0.45	1.7–2.5	0.15–0.25	[2]
0.42–0.45	2.5–3.0	0.15–0.20	[5]
0.38–0.43	2.0	0.22–0.23	[6]



**Fig. 2** A free body diagram of a football in flight (adapted from Choppin and Kelley [9])



**Fig. 1** The aerodynamic behaviour of a smooth sphere; the different flow regimes are labelled. (Taken from Passmore et al. [2])



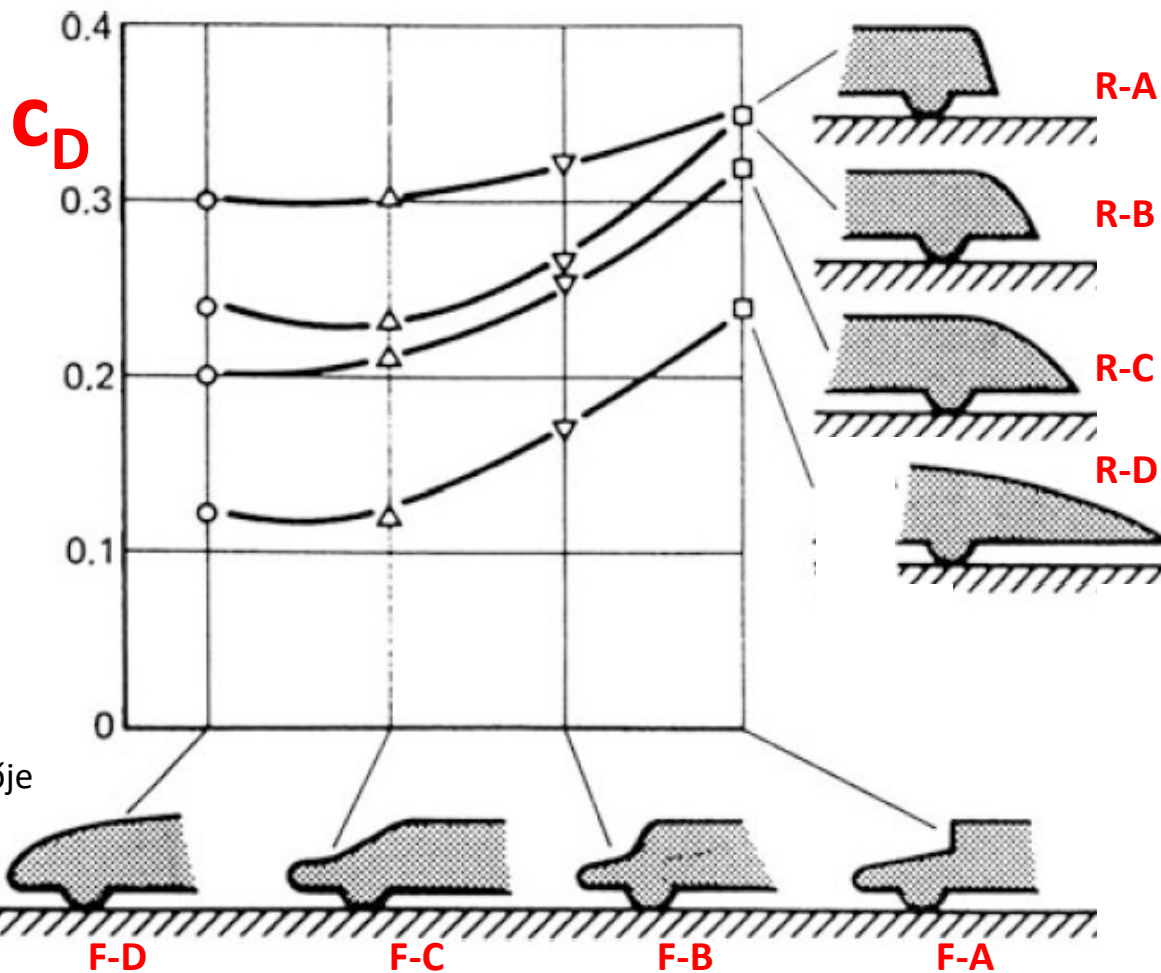
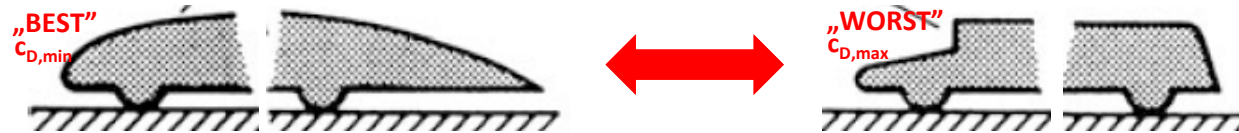


# Járműáramlás

Különböző homlokkal és hátfal kialakítások hatása az ellenállástényezőre.



Karl Schlör áramvonalas autójának („Schlörwagen” 1939) az ellenállástényezője  $c_e=0,15$  értékű volt ( $v_{max}=84$  mph)



Modification of the REAR („R”) section

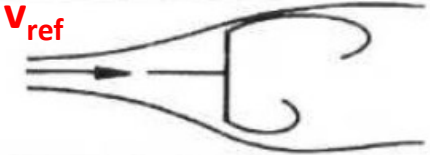
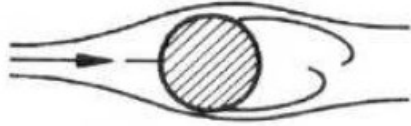
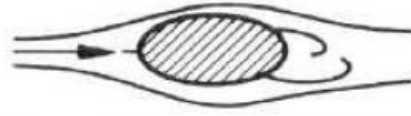

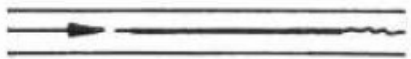
Modification of the FRONT („F”) section





# Járműáramlástan

A testek alakjából adódó nyomáseloszlásból és a fali csúsztatófeszültségből eredő ellenállás %-os megoszlása alaptestekre

ALAPTESTEK	ÖSSZELENÁLLÁS	
	~NYOMÁS	+ ~ SÚRLÓDÁS
	100%	0%
	90%	10%
	60%	40%
	10%	90%
	0%	100%







# Járműáramlás-tan

A  $c_e$  ( $c_D$ ) ellenállás- és  $c_f$  ( $c_L$ ) felhajtóerő tényezők jellemző értékei különböző alaptestekre és járművekre

			$C_L$	$C_D$
1	Circular plate		0	1.17
2	Circular cylinder $L/D < 1$		0	1.15
3	Circular cylinder $L/D > 2$		0	0.82
4	Low drag body of revolution		0	0.04
5	Low drag vehicle near the ground		0.18	0.15
6	Generic automobile		0.32	0.43
7	Prototype race car		-3.00	0.75

Fig. 2-22. Typical lift and drag coefficients for several configurations.





# Járműáramlás-tan

A  $c_e$  (diagramon  $c_D$ )  
ellenállástényező a  
Reynolds-szám ( $Re$ )  
függvényében  
 $c_e = f(Re)$

Valós méretű (1:1) és  
kisminta (1:4 ill. 1:5  
méretarányban  
lekicsinyített) modell  
járműre.

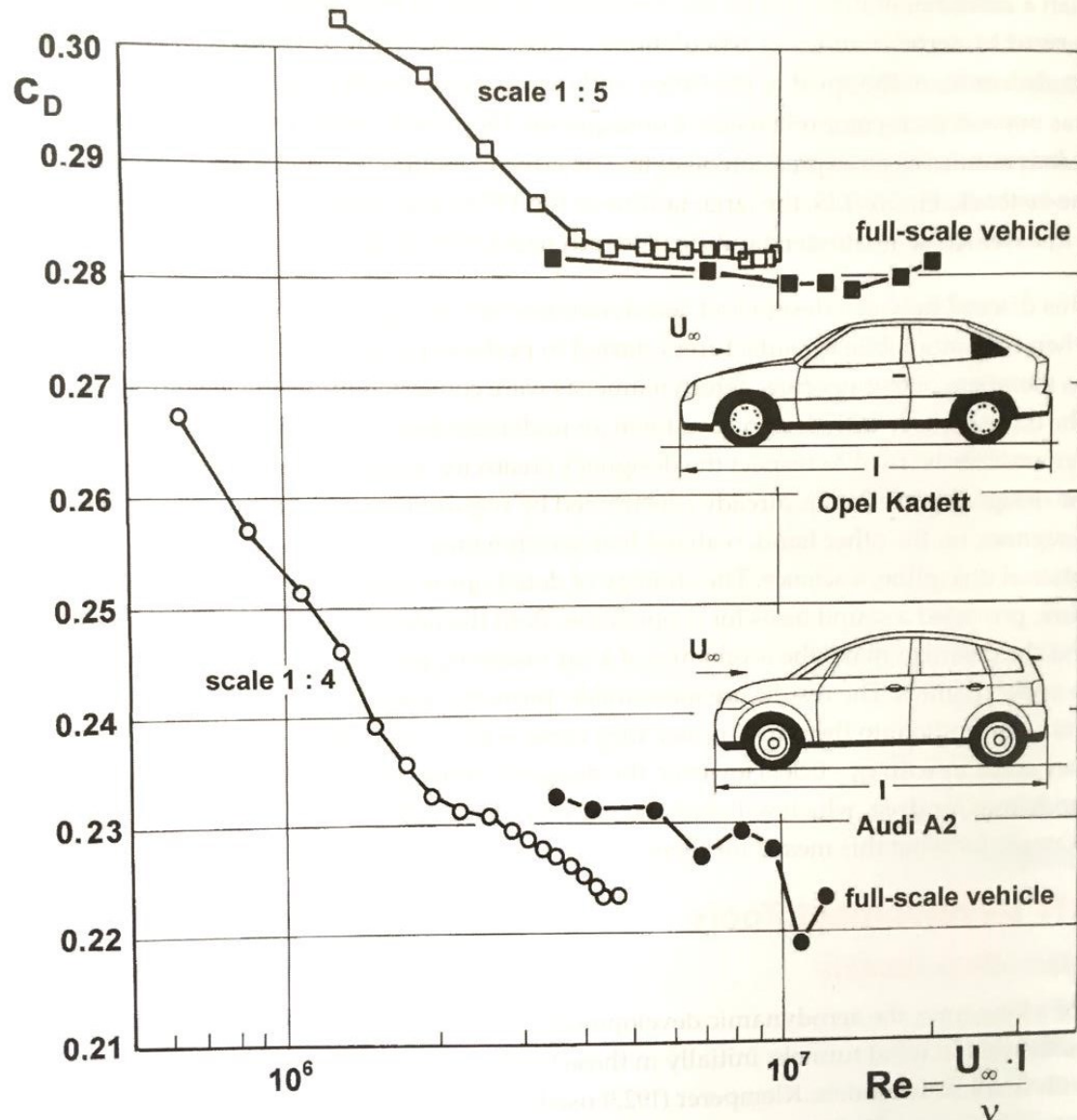


Figure 1.69 Effect of Reynolds number on measured drag coefficient with models in scale 1:5, 1:4, and full-scale cars; from Dietz (2000).





# Járműáramlás-tan

DrivAer járműmodell (3D CAD)

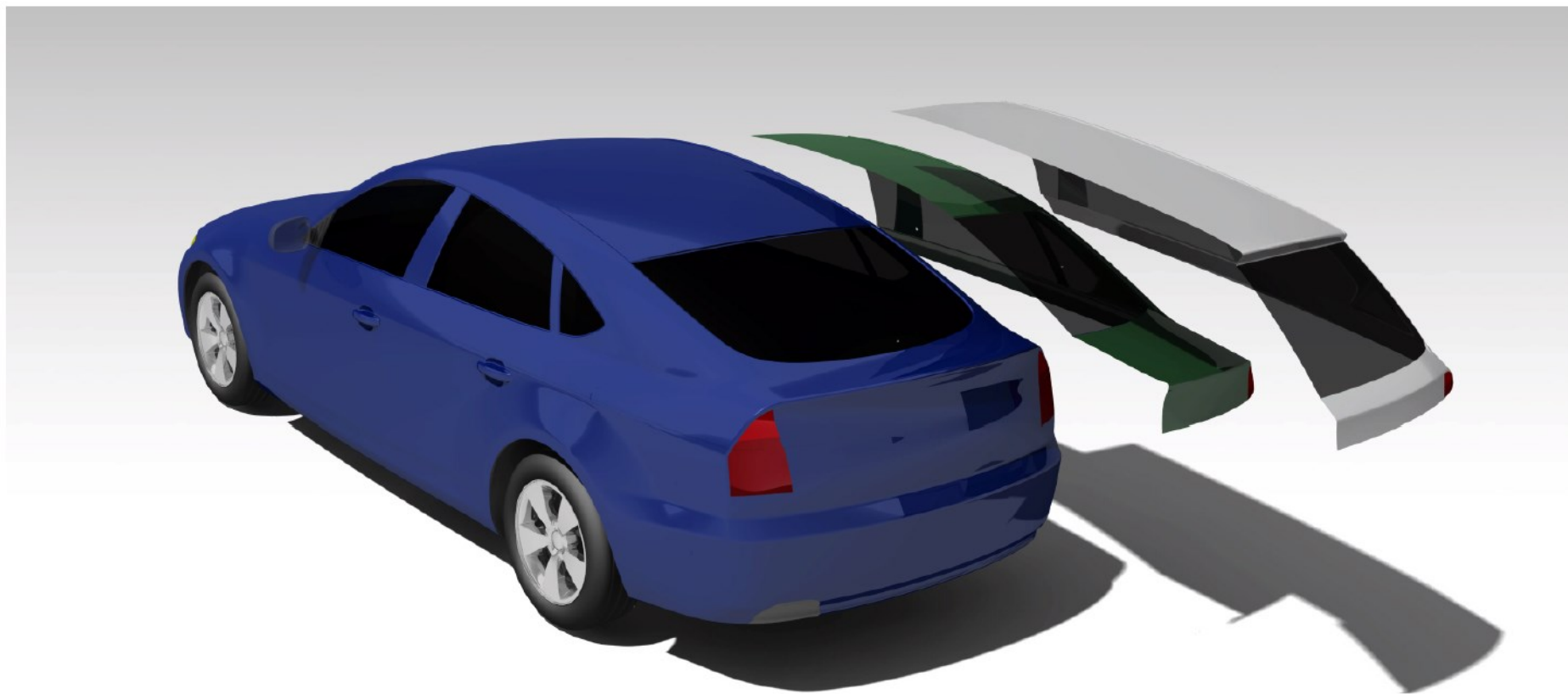


Figure 2: The DrivAer model with its three different rear ends.

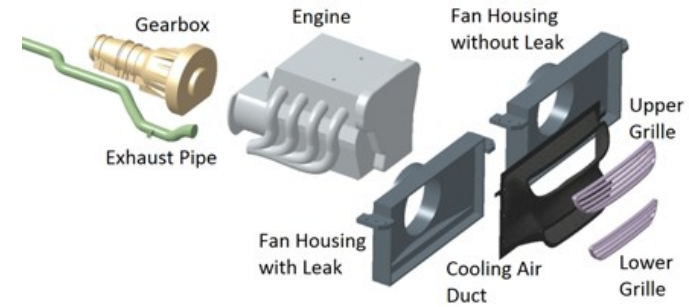
Dr. Suda Jenő Miklós





## Járműáramlástan

### DrivAer járműmodell (3D CAD)







## Járműáramlástan

DrivAer járműmodell (3D CAD)

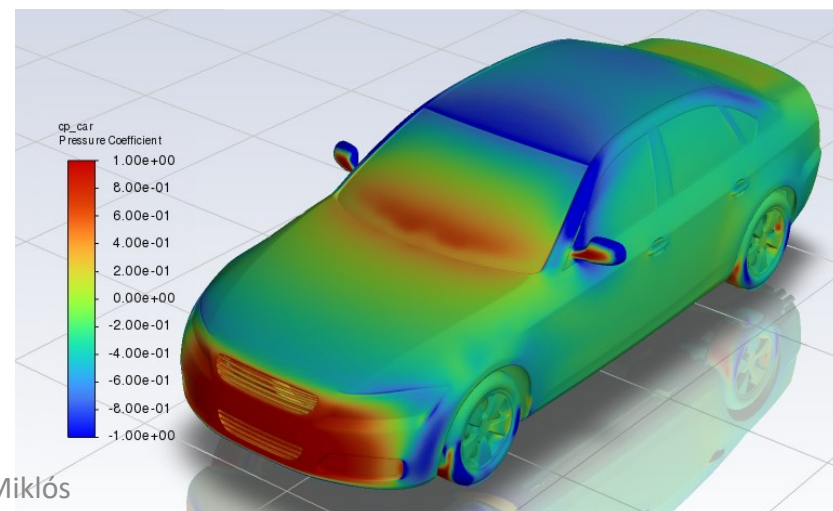
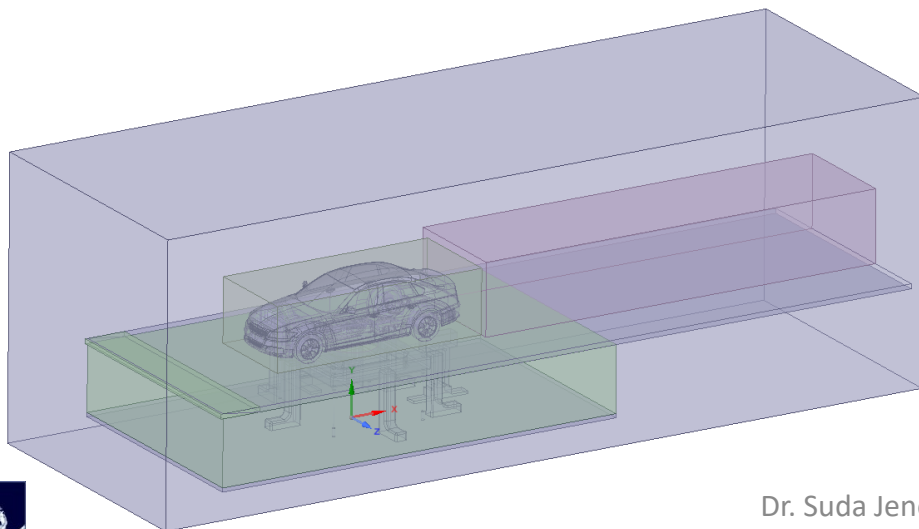
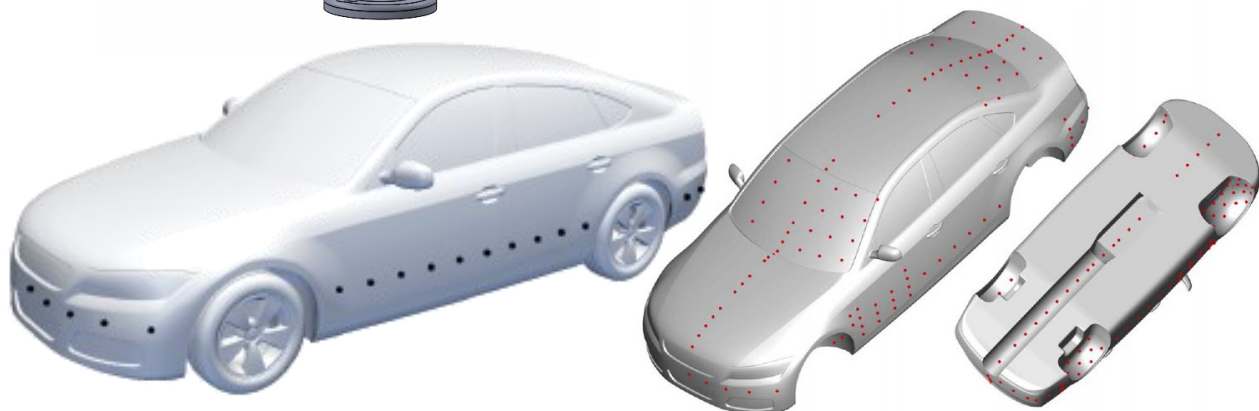
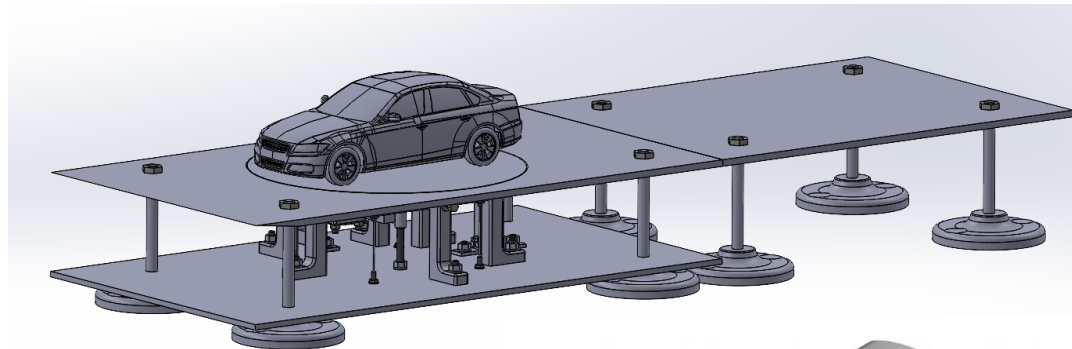
**EXP: SZÉLCSATORNA TESZTELÉS**

1) Aerodinamikai erő mérése

2) Nyomáseloszlás mérés

- függőleges középsíkban
- vízszintes övvezeték mentén

**CFD: numerikus áramlástan  
modellezés (mérések  
megismétlése szimulációval)**





## Járműáramlás-tan

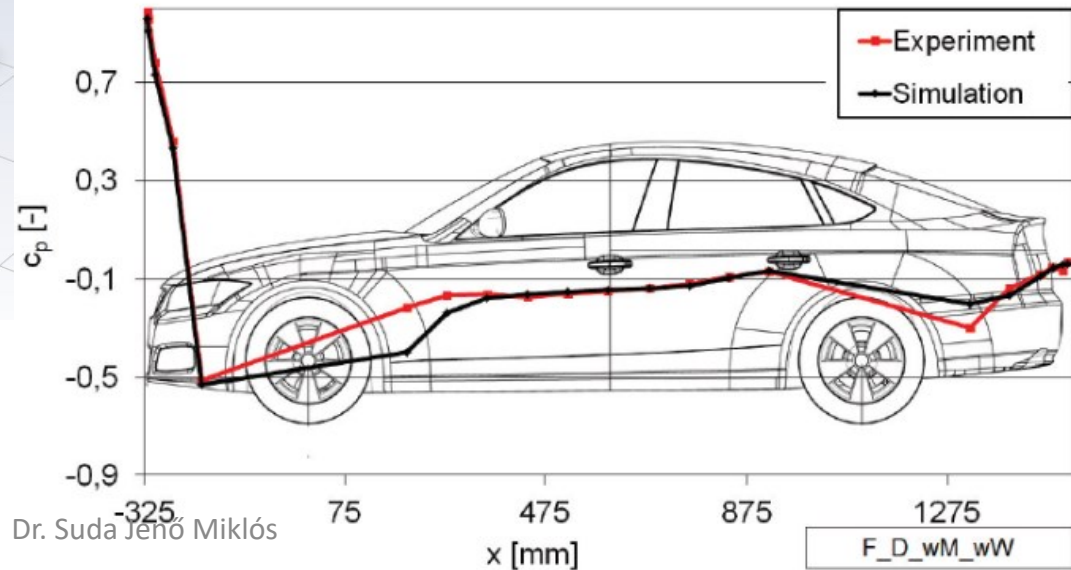
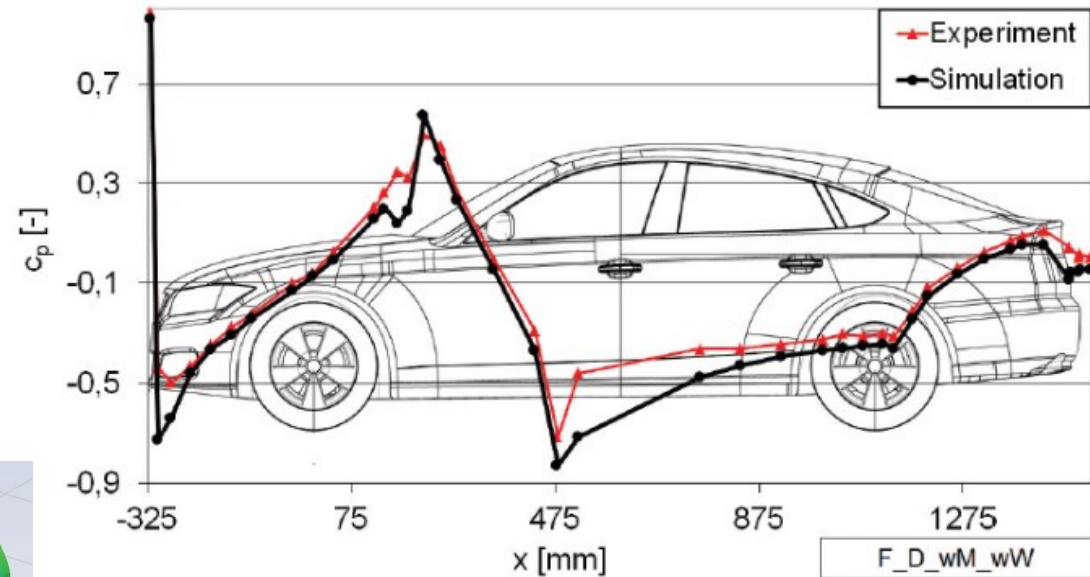
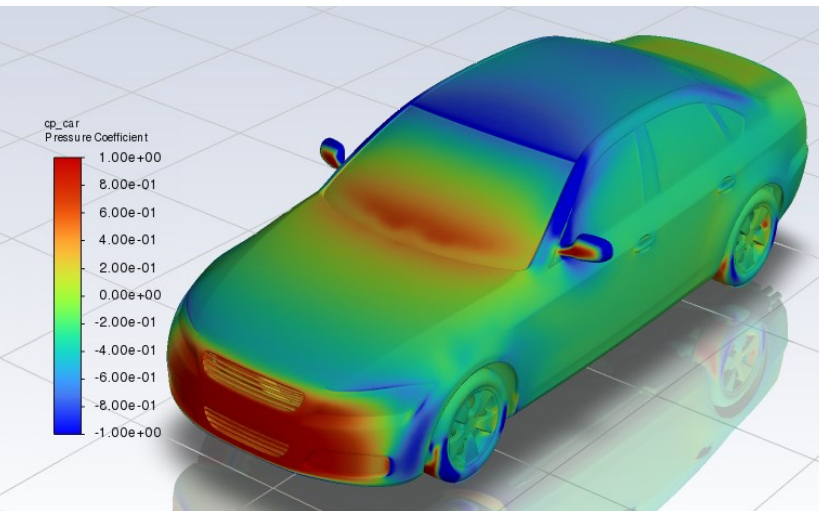
DrivAer járműmodell (3D CAD)

EXP: szélcsatorna mérés

CFD: Computational Fluid Dynamics

Nyomáseloszlás EXP + CFD

- függőleges középsíkban
- vízszintes övvonalon

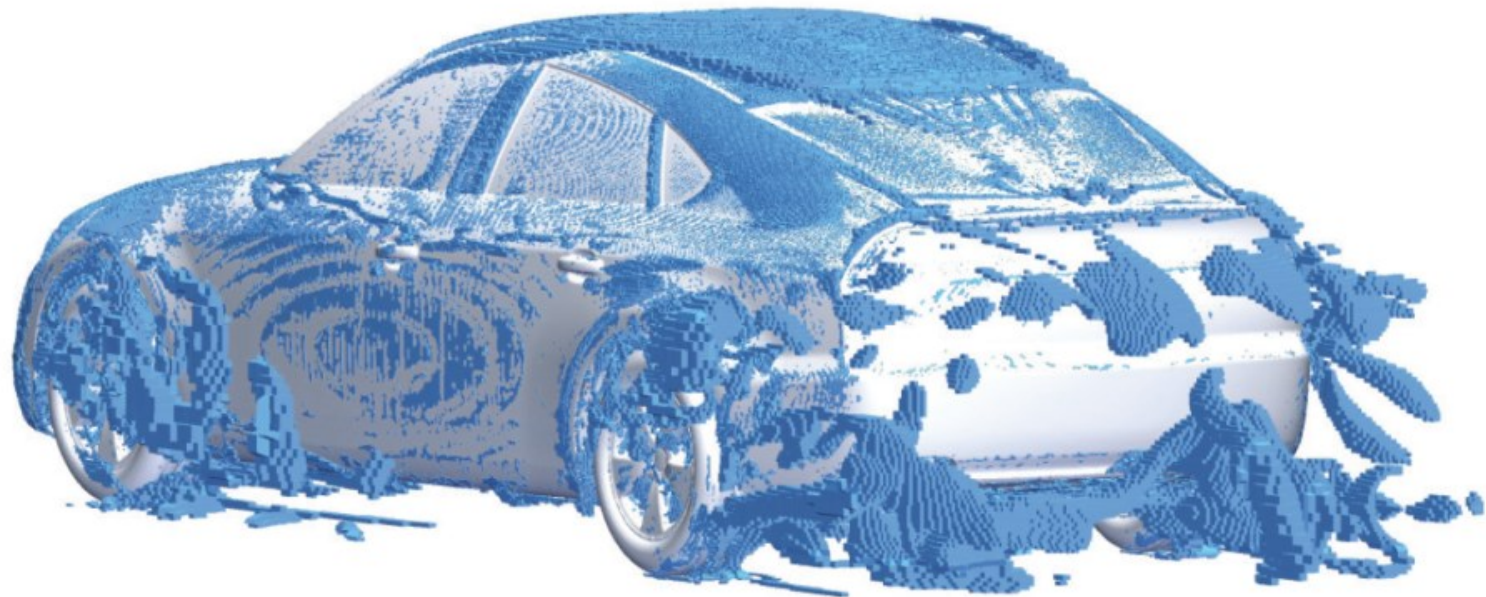




# Járműáramlásan

DrivAer járműmodell (3D CAD)

CFD: Computational Fluid Dynamics



**FIGURE 18.** Q CRITERION ( $Q > 500$ ) AT THE REAR WINDOW OF THE FASTBACK VEHICLE.

Dr. Suda Jenő Miklós







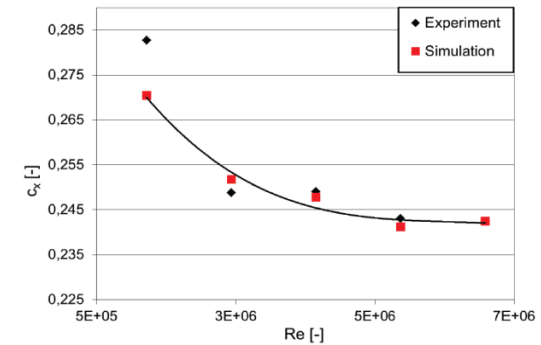
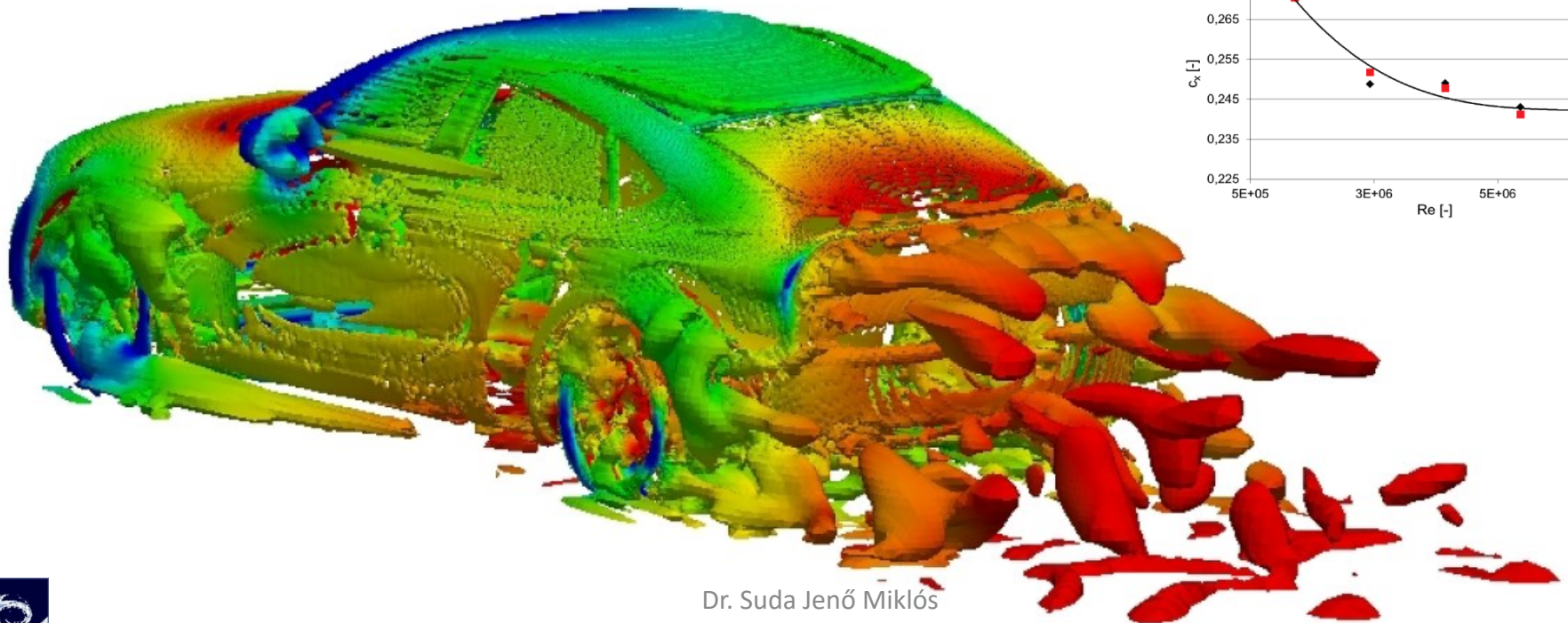
## Járműáramlás

DrivAer járműmodell (3D CAD)

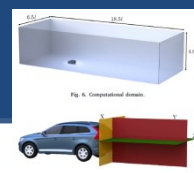
CFD: Computational Fluid Dynamics

Table 2.  $c_D$  value of the DrivAer body in various simulations.

	SST(fine)	SST(int)	SST(coarse)	SST(coarse,hex)	SAS(int)
$c_D$	0.28	0.283	0.317	0.296	0.289







# REAR PRESSURE COEFFICIENT



Fig. 3. Rear view of the smooth extensions, configuration B.

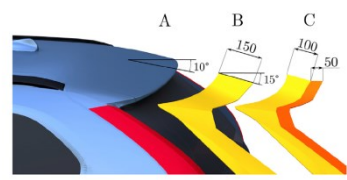


Fig. 2. Close-up of the extensions with measurements in [mm]. The taper angle is referenced to the horizontal plane.

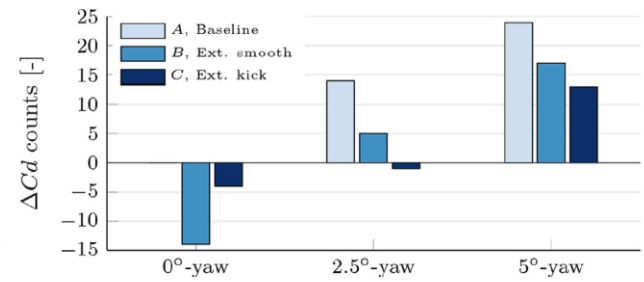


Fig. 12. Delta coefficient of drag relative to the baseline.

$\beta=0^\circ$  (no wind)

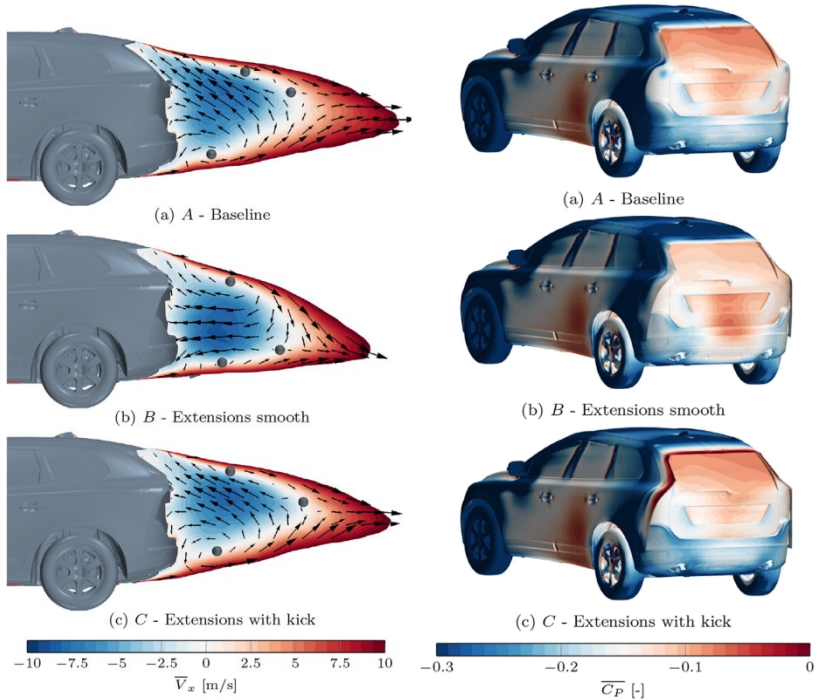


Fig. 13. Mean longitudinal velocity with velocity vectors. Time averaged singular points are marked with a sphere.

Fig. 14. Mean surface pressure coefficient.

$\beta=5^\circ$  (side wind)

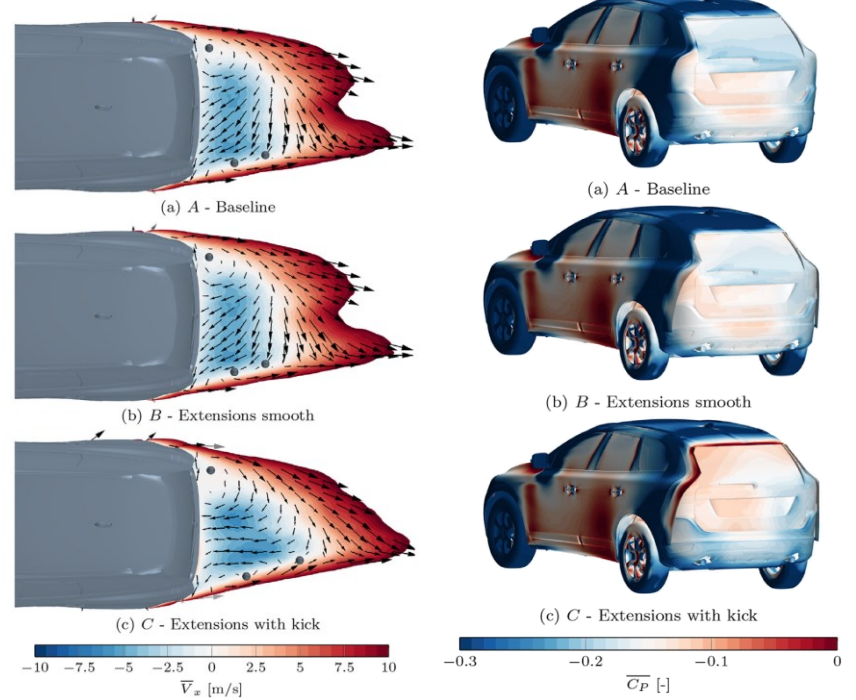


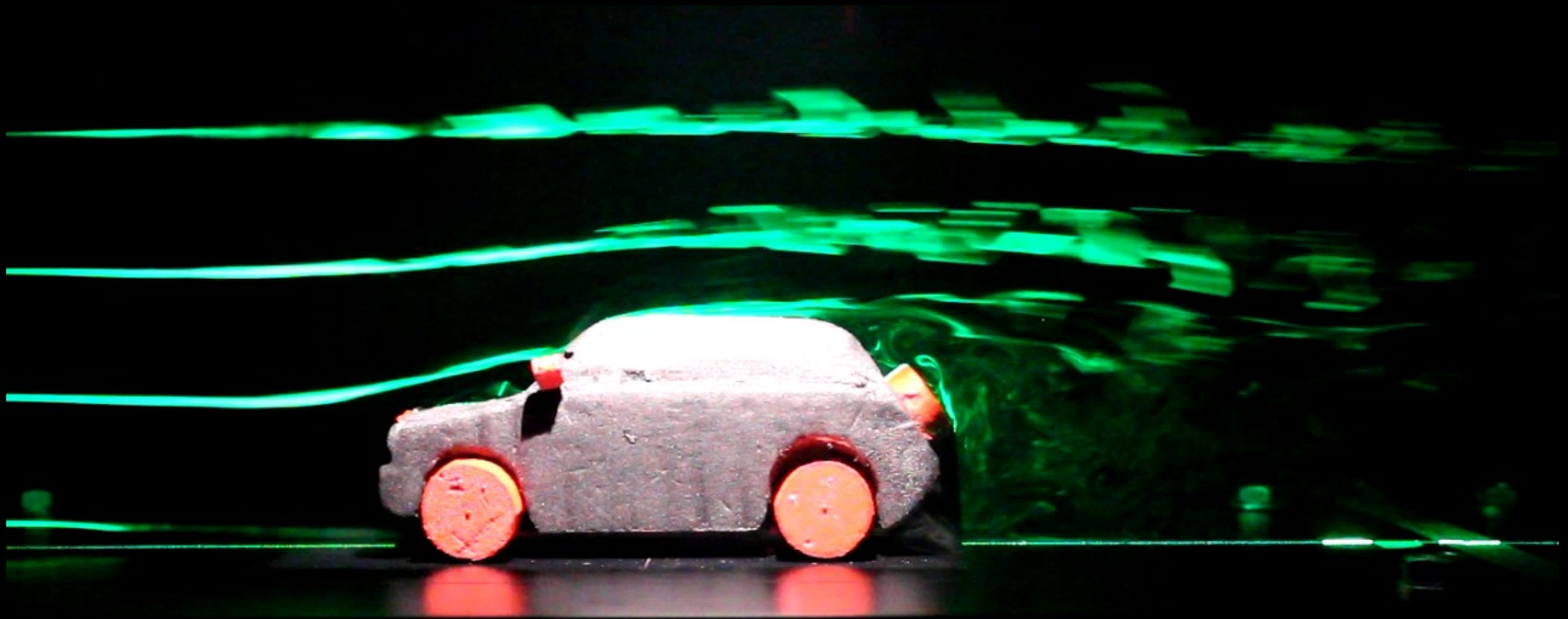
Fig. 25. Mean longitudinal velocity, top view. Time averaged singular points are marked with a sphere.

Fig. 26. Mean surface pressure coefficient.



# Járműáramlásan

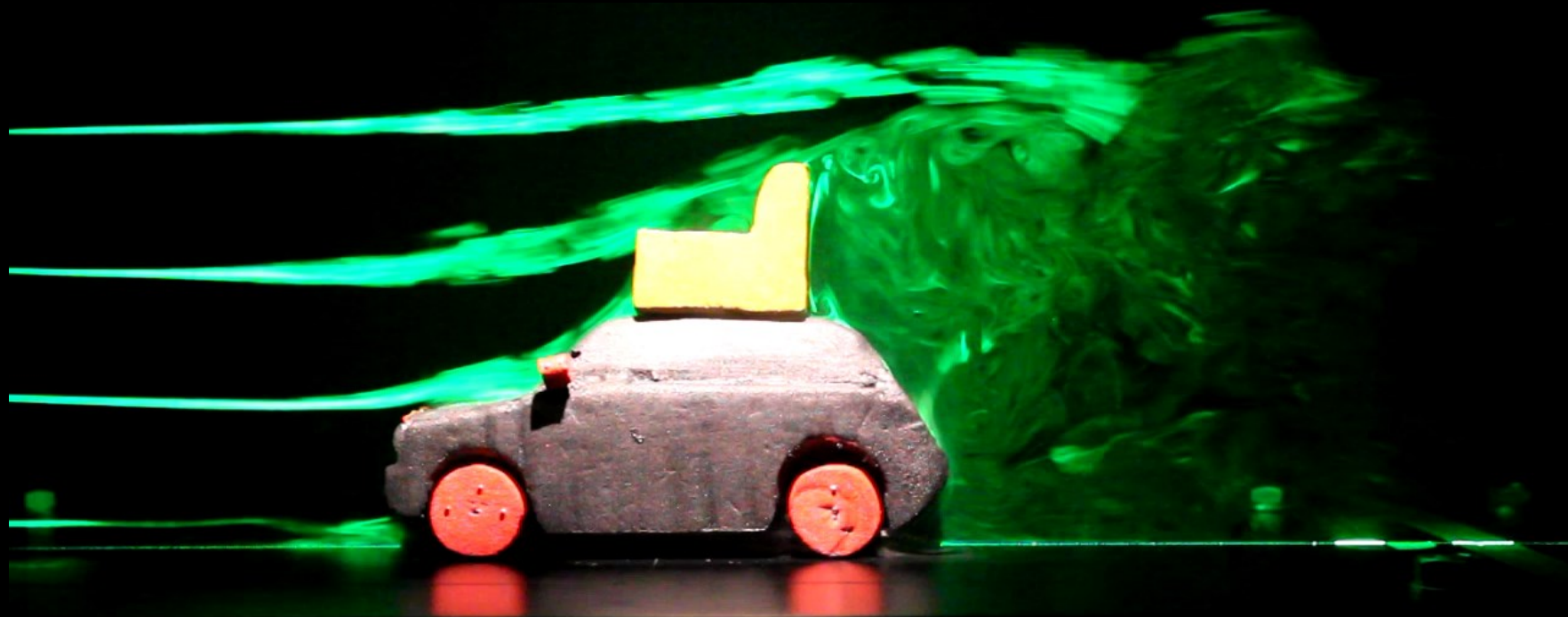
## WIND TUNNEL LABSESSION (MSc)





# Járműáramlás-tan

## WIND TUNNEL LABSESSION (MSc)

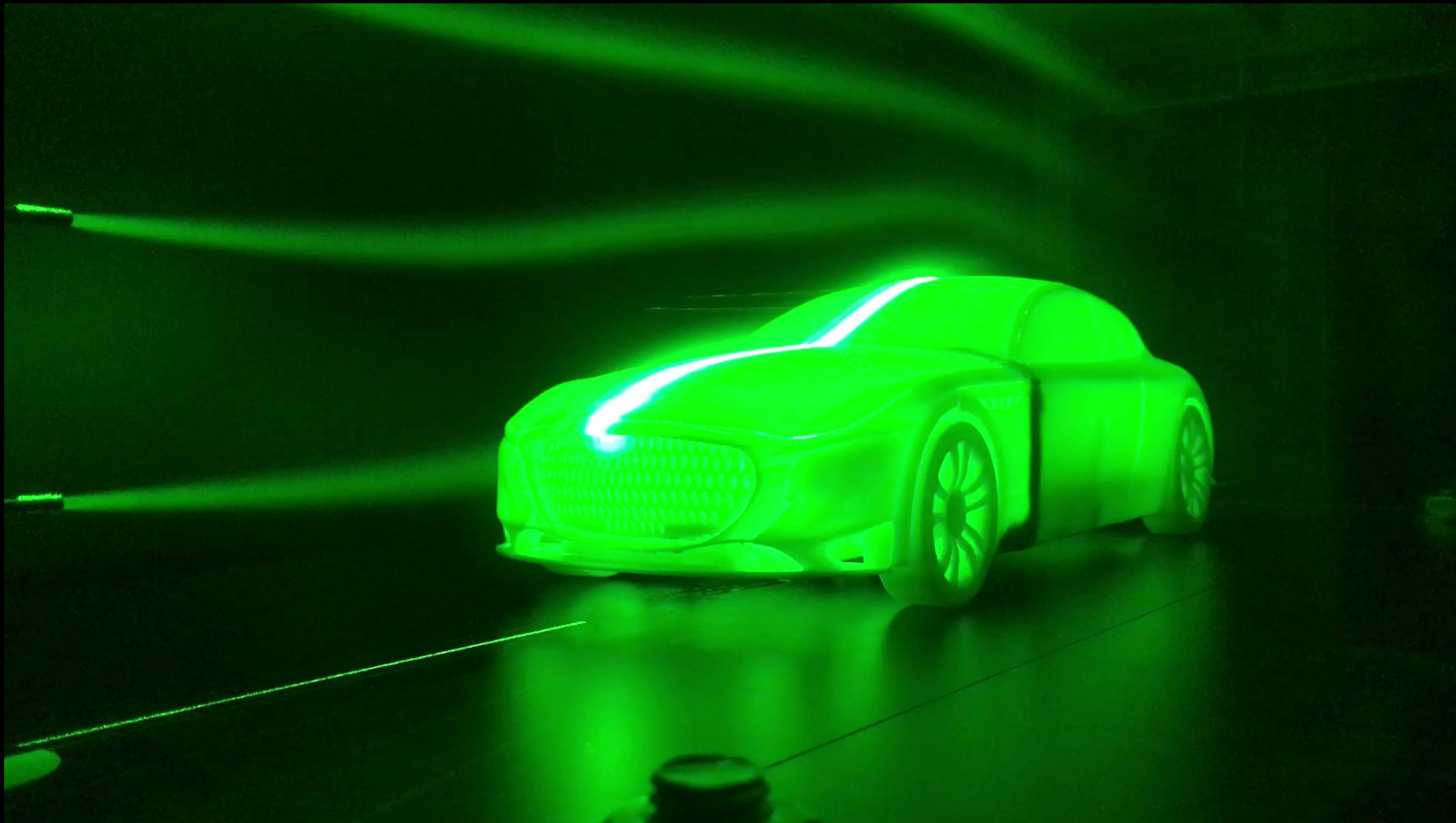






# Járműáramlás

WIND TUNNEL LABSESSION (MSc) DESIGN: Czigány Benedek ipari termék- és formatervező







# Járműáramlás

WIND TUNNEL LABSESSION (MSc) DESIGN: Czigány Benedek ipari termék- és formatervező





# Járműáramlás



1980

2012



LADA. Perfect From The Beginning



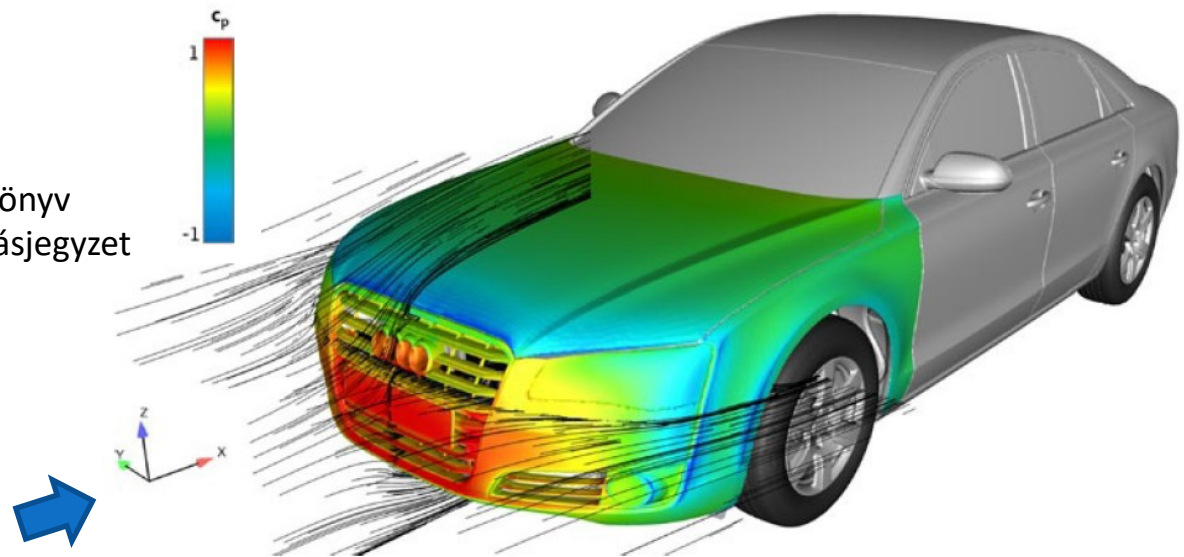


# 11. Áramlásba helyezett testekre ható erő

Köszönöm a figyelmet!

Áramlásban előadást kiegészítő prezentáció  
Dr. Suda Jenő Miklós, adjunktus  
BME Áramlásban Tanszék

Felhasznált szakirodalom:  
Dr. Lajos T.: Az áramlásban alapjai tankönyv  
Dr. Suda J.M.: Járműáramlásban előadásjegyzet





# ÖSSZEFOGLALÁS

**8. Súrlódásos közegek áramlása**

**9. Határrétegek**

**10. Hidraulika**

**11. Áramlásba helyezett testre ható erő**

Áramlás-tanszék előadást kiegészítő prezentáció

Dr. Suda Jenő Miklós, adjunktus

BME Áramlás-tanszék







# ÖSSZEFOGLALÁS

Lajos Tamás: Az áramlástan alapjai (2015) tankönyv alapján

- 1. Folyadékok sajátosságai**
- 2. Kinematika és a folytonosság tétele**
- 3. Az Euler-egyenlet és a Bernoulli-egyenlet**
- 4. Alkalmazások**
- 5. Örvénytételek**
- 6. Áramlástan mérések**
- 7. Az impulzustétel és alkalmazásai**
- 8. Súrlódásos közegek áramlása**
- 9. Határrétegek**
- 10. Hidraulika**
- 11. Áramlásba helyezett testre ható erő**

Áramlástan előadást kiegészítő prezentáció

Dr. Suda Jenő Miklós, adjunktus

BME Áramlástan Tanszék

