



11. Áramlásba helyezett testekre ható erő

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

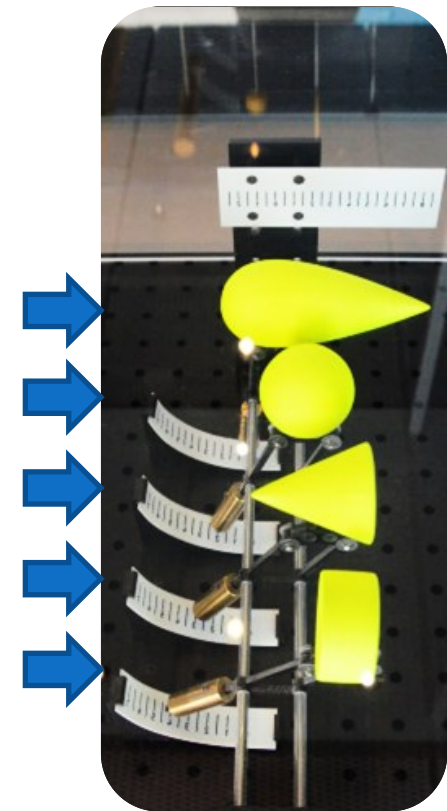
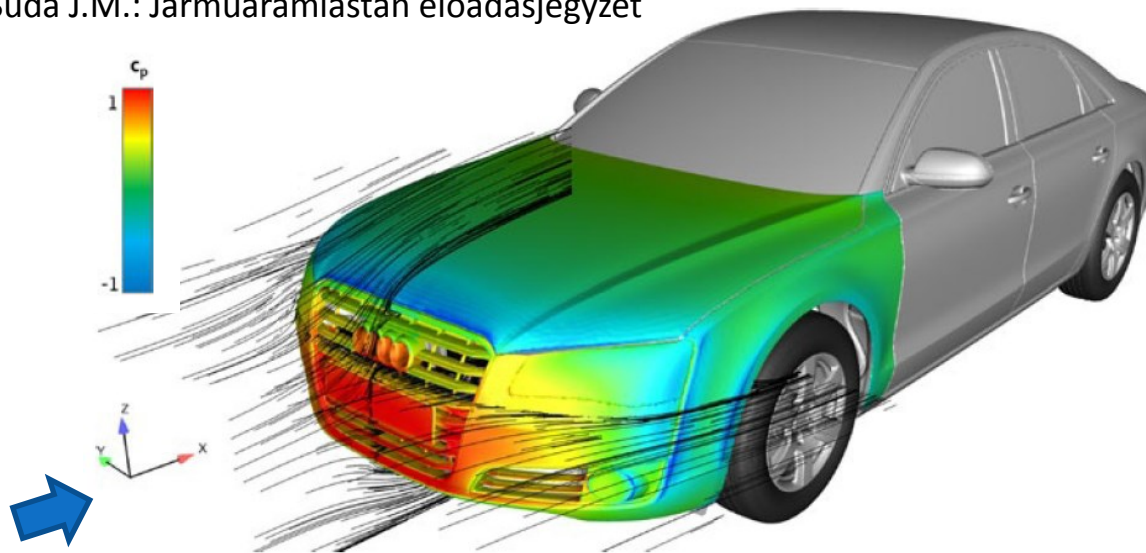


Abb. 4.55 Druckverteilung und Stromlinien am Vorderwagen eines Audi A6

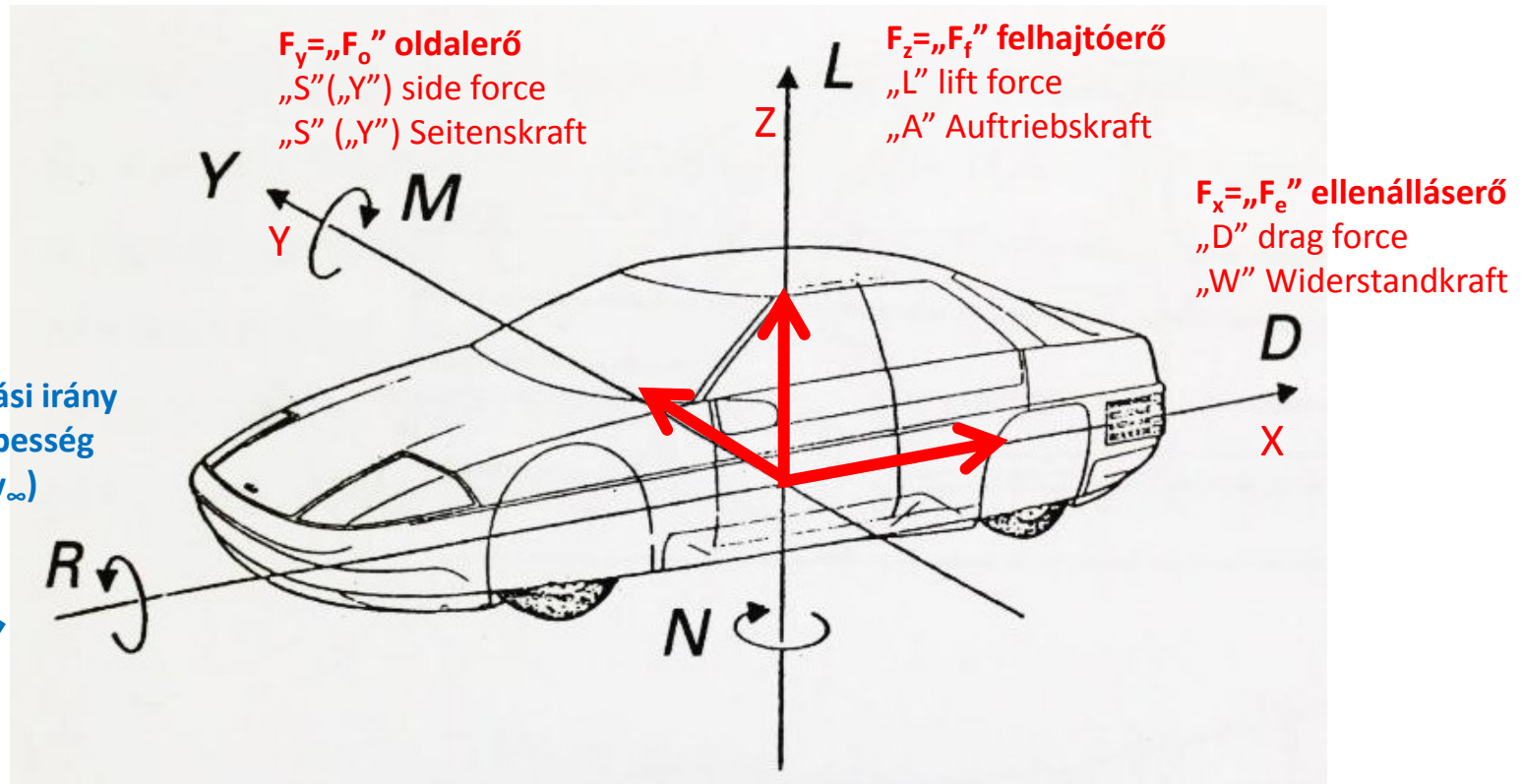


11. Áramlásba helyezett testekre ható erő

\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

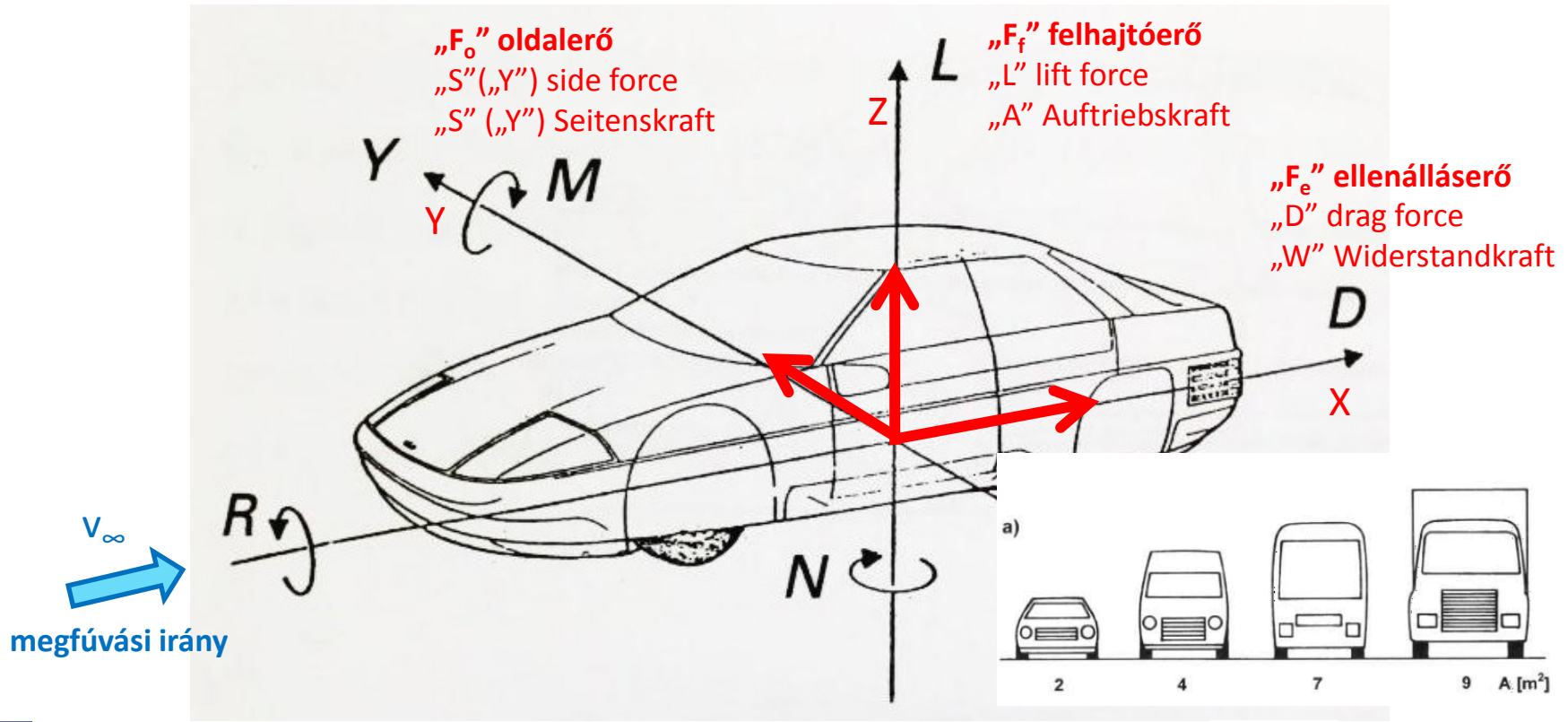
$$c_e = \frac{F_e}{\rho_{din} A_{ref}}$$

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:

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

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

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

c_p : nyomástényező

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

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

c'_f : fali (bőr-)súrlódási tényező

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

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

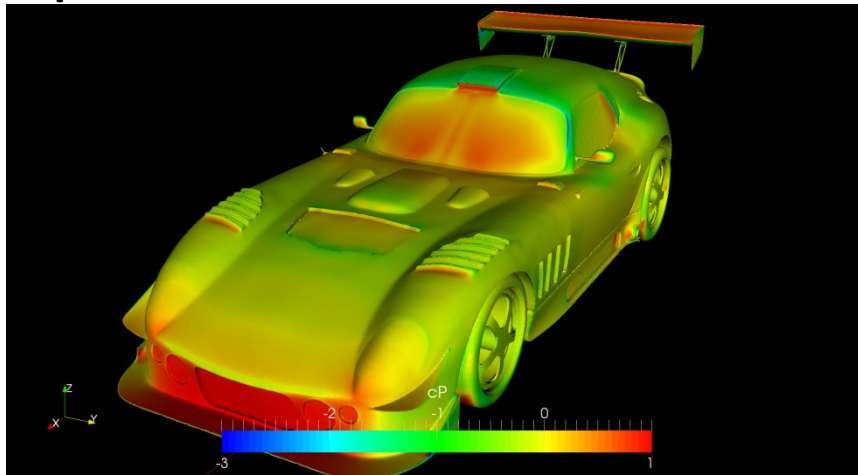


$$\underline{F} = \underline{F}_p + \underline{F}'_f$$

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

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

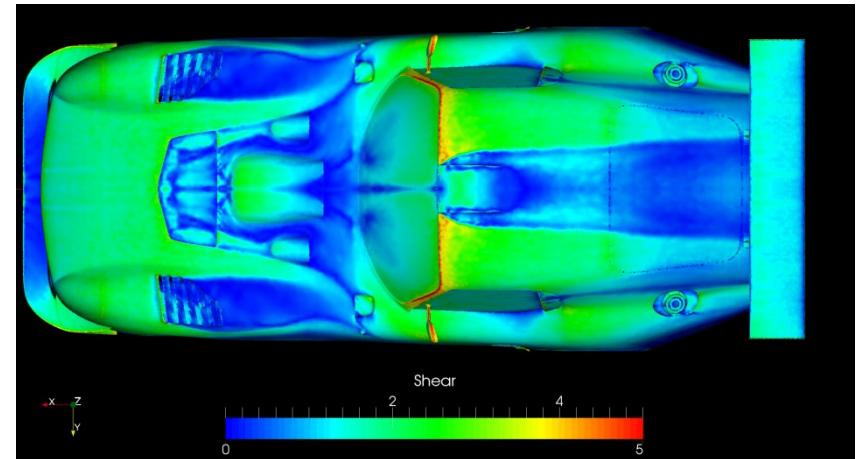
c_p nyomástényező



c_p
nyomástényező eloszlás

ábrán a skála:
 $-3 < c_p < +1$

τ_0 fal csúsztatófeszültség



τ_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)

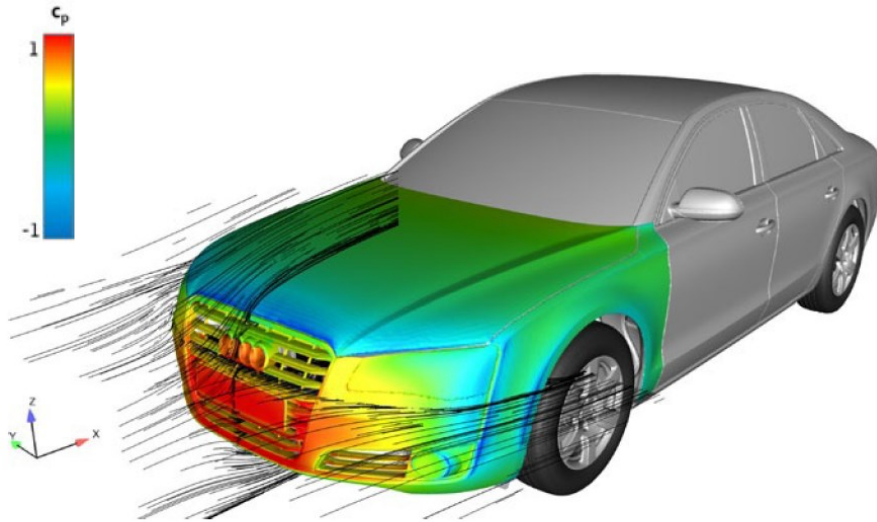


Abb. 4.55 Druckverteilung und Stromlinien am Vorderwagen eines Audi A6

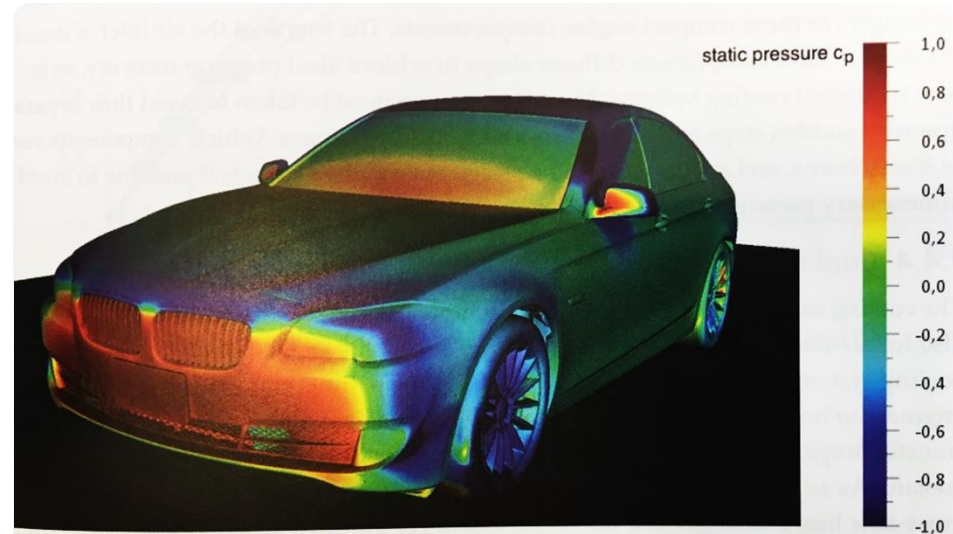
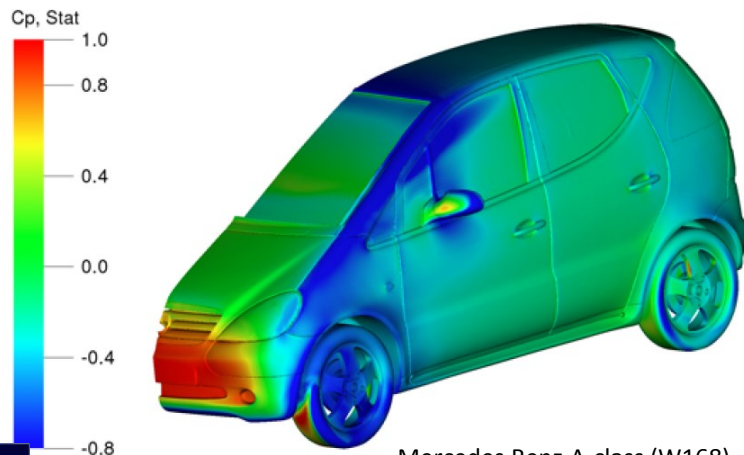


Figure 7.18 Pressure distribution on the vehicle's front.



Mercedes Benz A-class (W168)

Dr. Suda





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

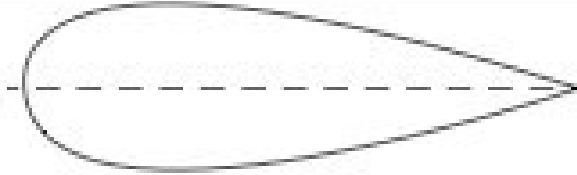

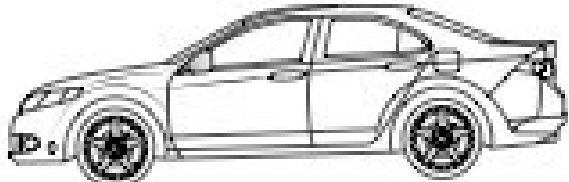
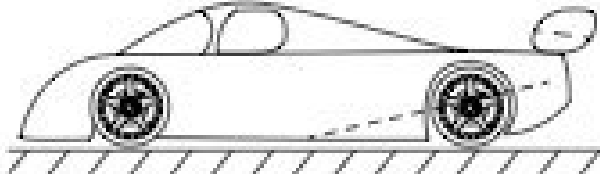
			C_L	C_D
1	Low drag body of revolution		0	0.04
2	Low drag vehicle near the ground		0.18	0.15
3	Generic automobile		0.28	0.35
4	Prototype race car		-3.00	0.75

Figure 2. Range of the lift and drag coefficients (based on frontal area) for generic ground vehicle shapes.





Ellenállástényező (c_e)

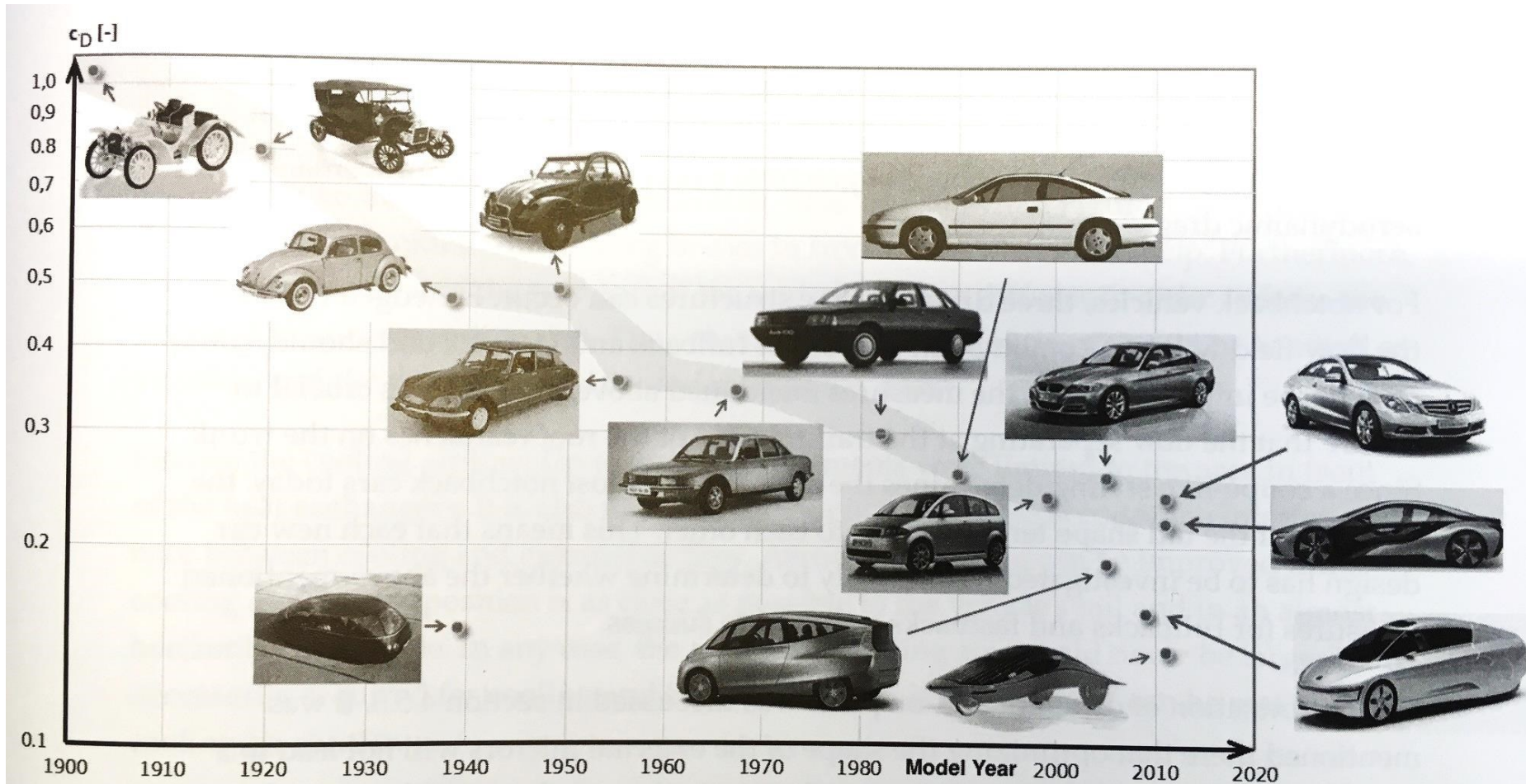
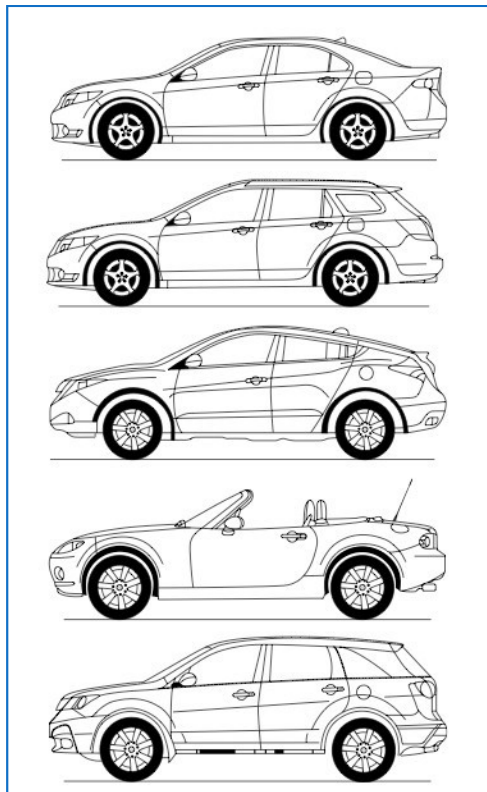


Figure 4.206 The development of c_D over time for production cars.





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



	C_D	C_{Lf}	C_{Lr}	ΔC_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

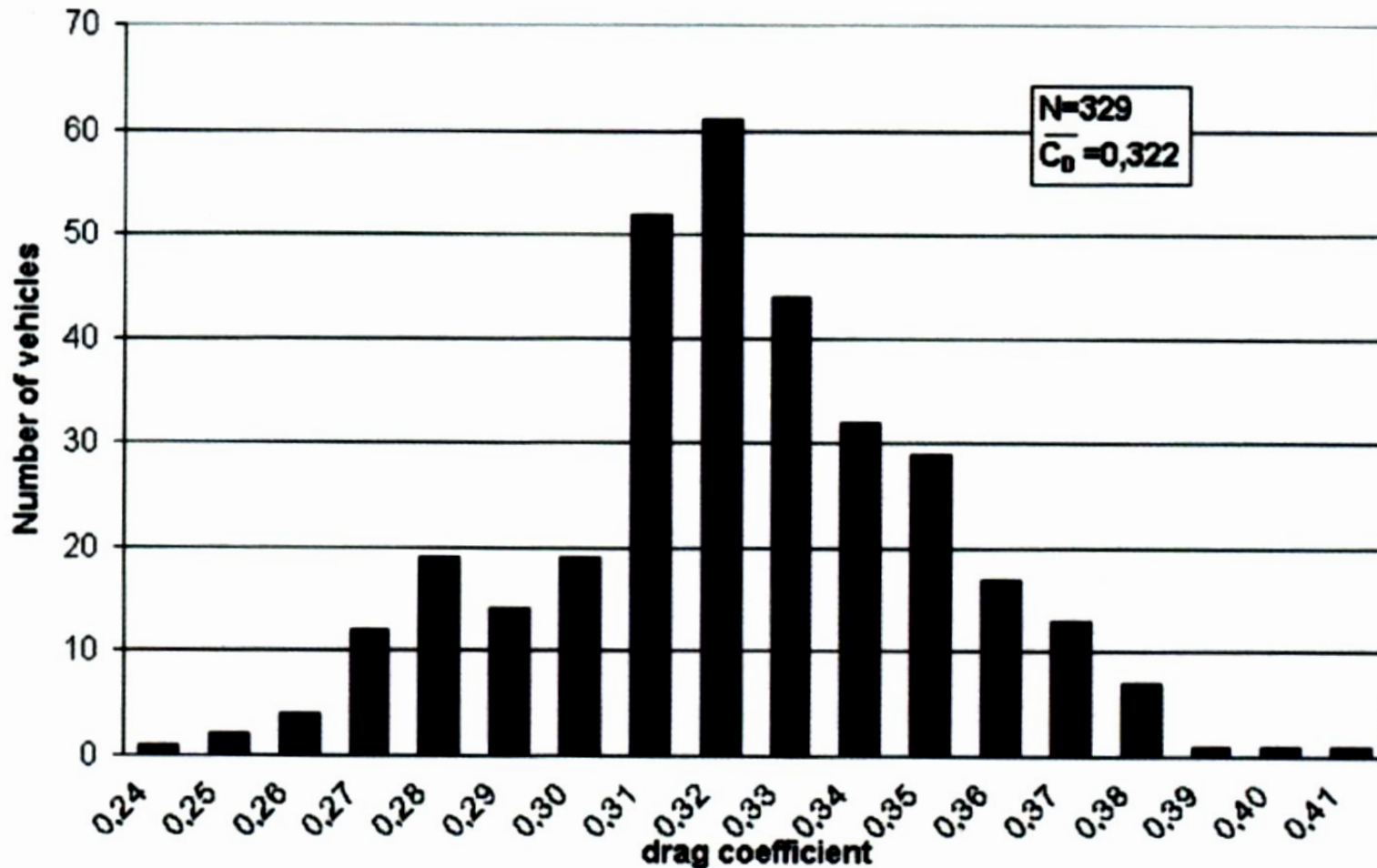
Table 2. Computed breakdown of the drag components on a typical sedan.

Feature	ΔC_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
Total Drag Coefficient	0.355





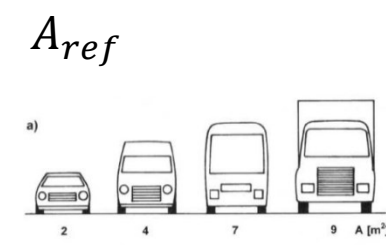
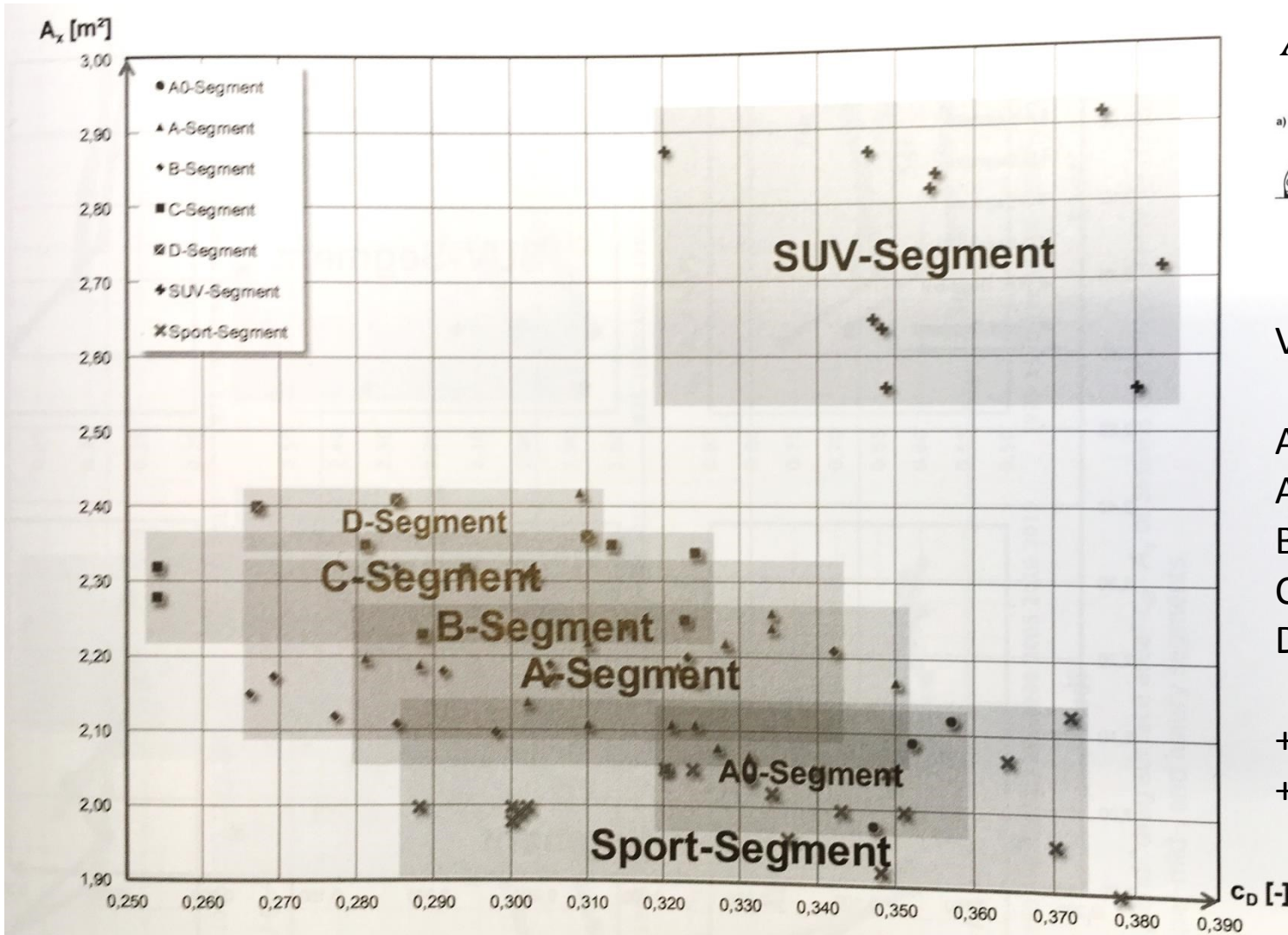
Ellenállástényező (c_e)



C_w – histogramm of european passenger cars, 2003



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



VW notations

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

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



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

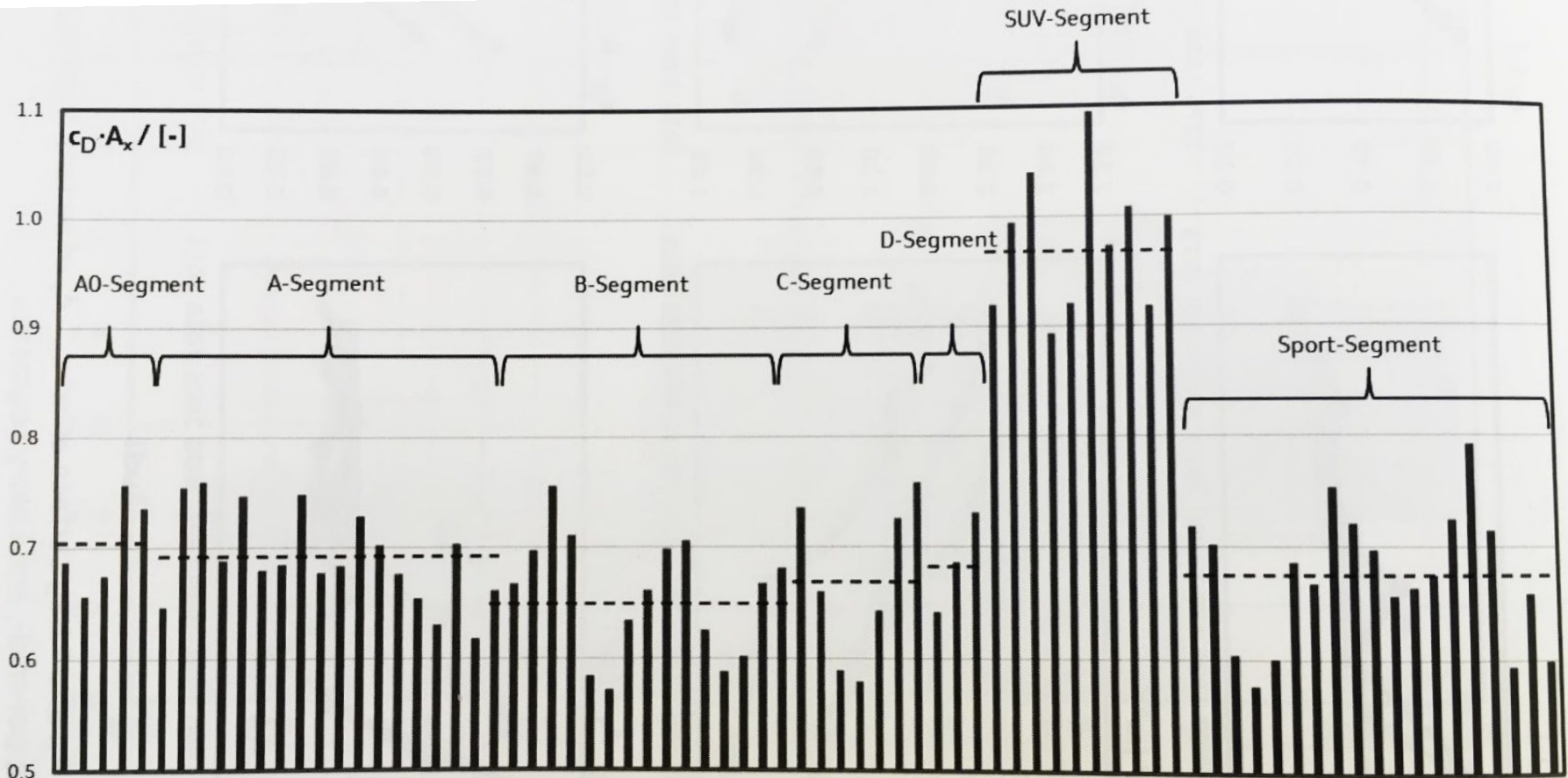
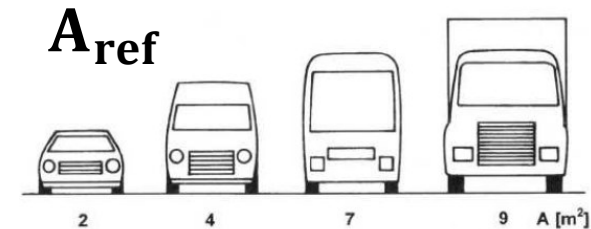
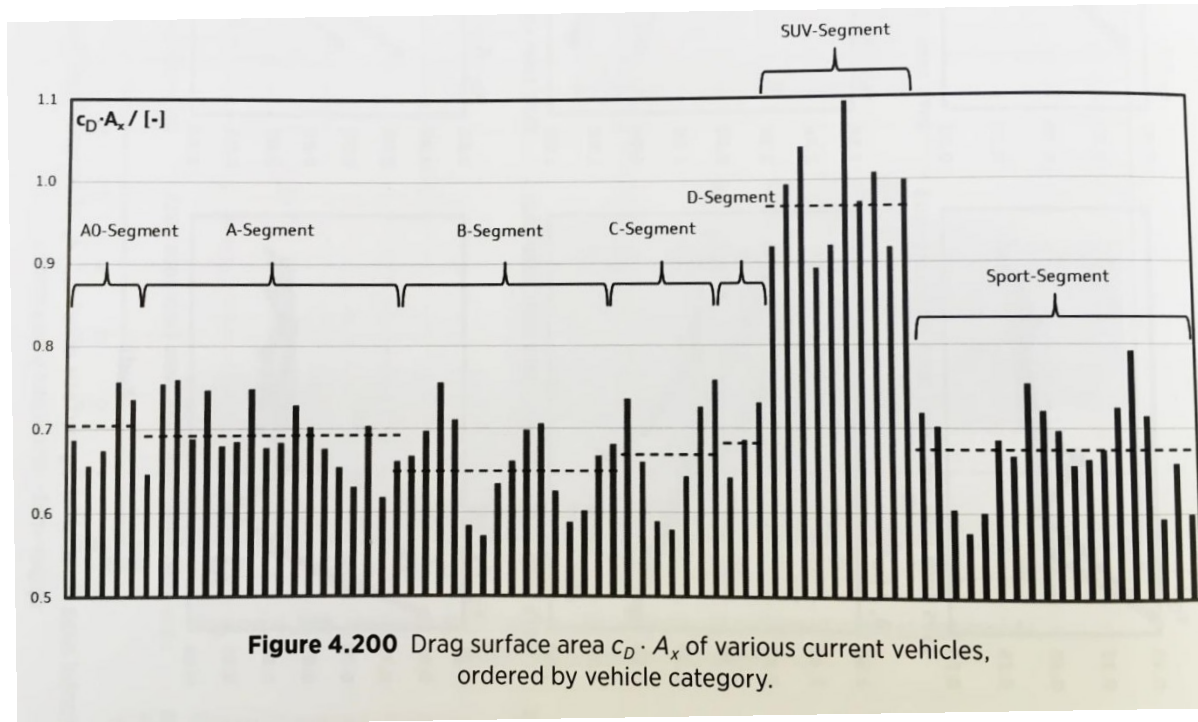


Figure 4.200 Drag surface area $c_D \cdot A_x$ of various current vehicles, ordered by vehicle category.





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



Aerodinamikai veszteségteljesítmény, P_{ae} [W]:

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

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

$$P_{ae}(260km/h) \cong 145kW$$





Áramlásba helyezett szárny:

„ F_e ” ellenálláserő

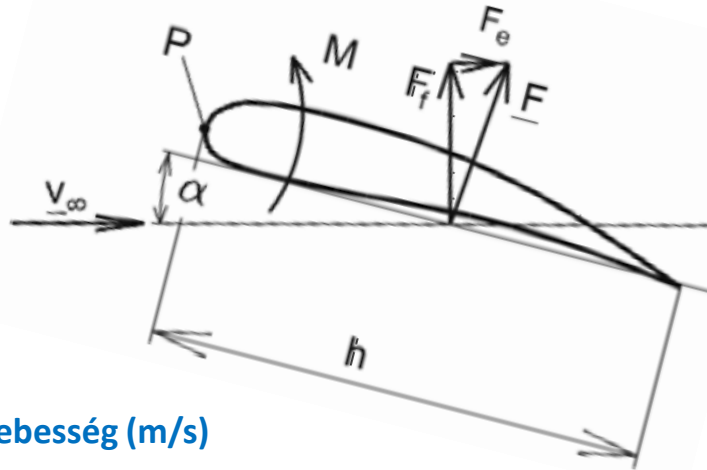
„D” drag force

„W” Widerstandskraft

„ F_f ” felhajtóerő

„L” lift force

„A” Auftriebskraft



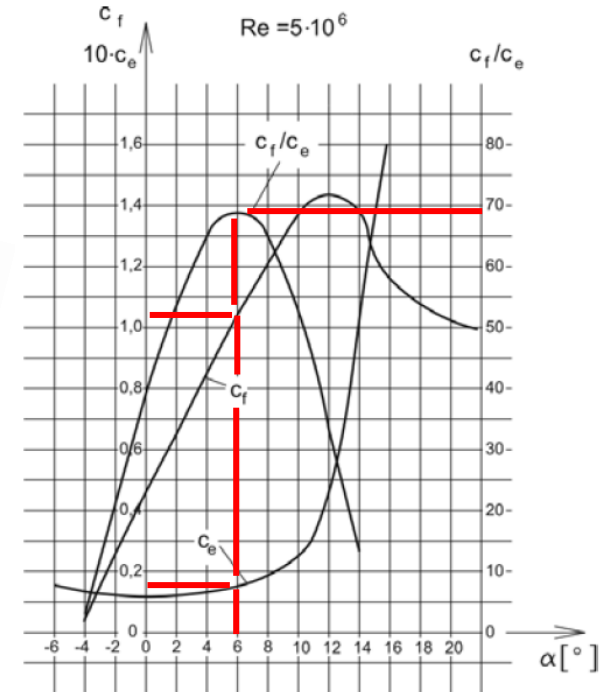
v_{ref} : megfúvási sebesség (m/s)

α : állásszög ($^\circ$)

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

h : szárny húr hossz (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:

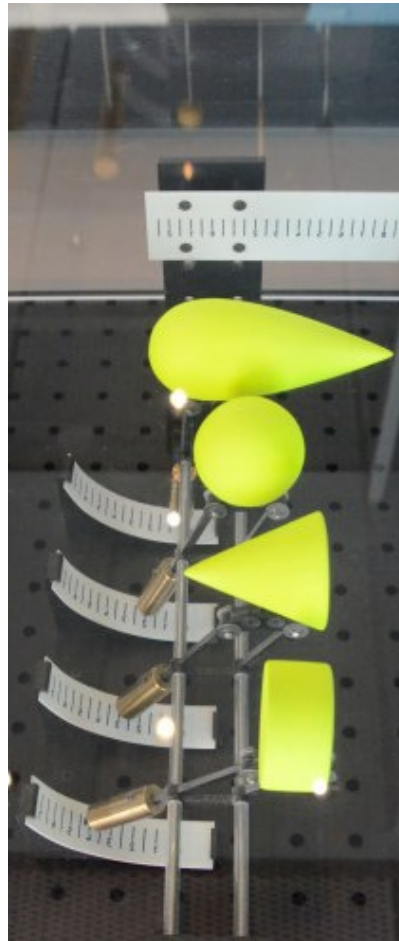
$$S(\alpha = 6^\circ) = \frac{c_f}{c_e} = \frac{1,04}{0,015} = 69$$

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



Áramlásba helyezett testek ellenállástényezői

Shape	V_{ref}	Drag Coefficient
Sphere		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



3-Dimension			2-Dimension		
SHAPE	REF.	C_D	SHAPE	REF.	C_D
	STRING SUPPORT	0.47 _y		—	1.17 _y
	(c)	0.38		(a)	1.20
	(c)	0.42		(a)	1.16
	(e)	0.59 _y		(d)	1.60 _y
	(f)	0.80 _y		(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 _y		(a)	2.05 _y

Measured Drag Coefficients

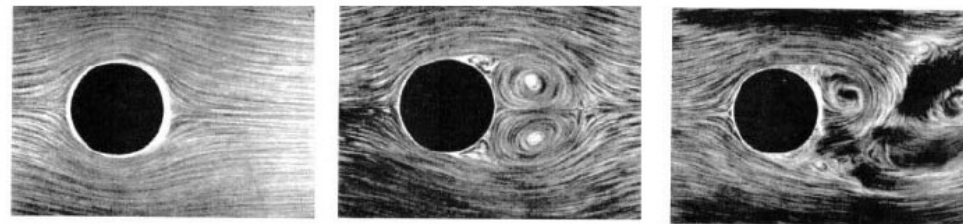
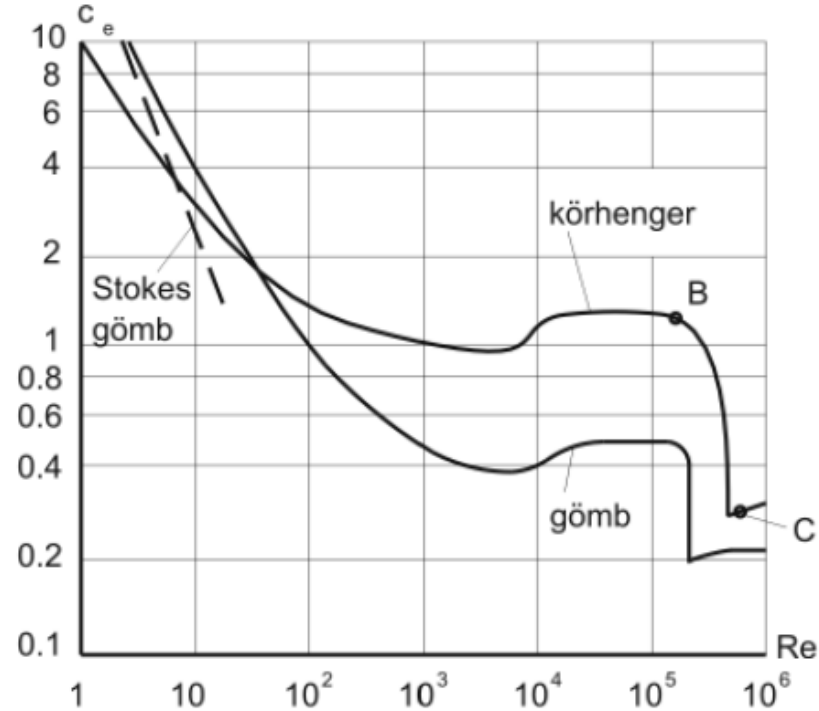




Áramlásba helyezett testek ellenállástényezői

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

Tengelyére merőlegesen megfújt henger (9.12. ábra)						
Reynoldsszám 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 lemezcik (téglalap, 11.7. ábra)						
	Hossz/szélesség (l/t)					
	1	2	4	10	18	∞
	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: ∞)					
	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			∞		
	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 (α°)					
	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

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]

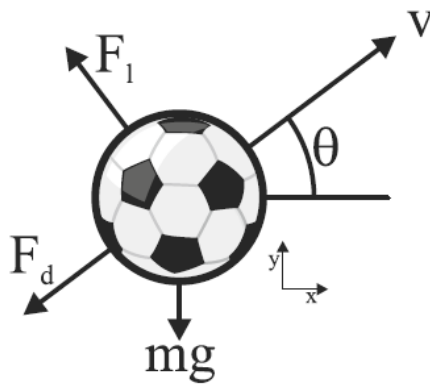


Fig. 2 A free body diagram of a football in flight (adapted from Choppin and Kelley [9])

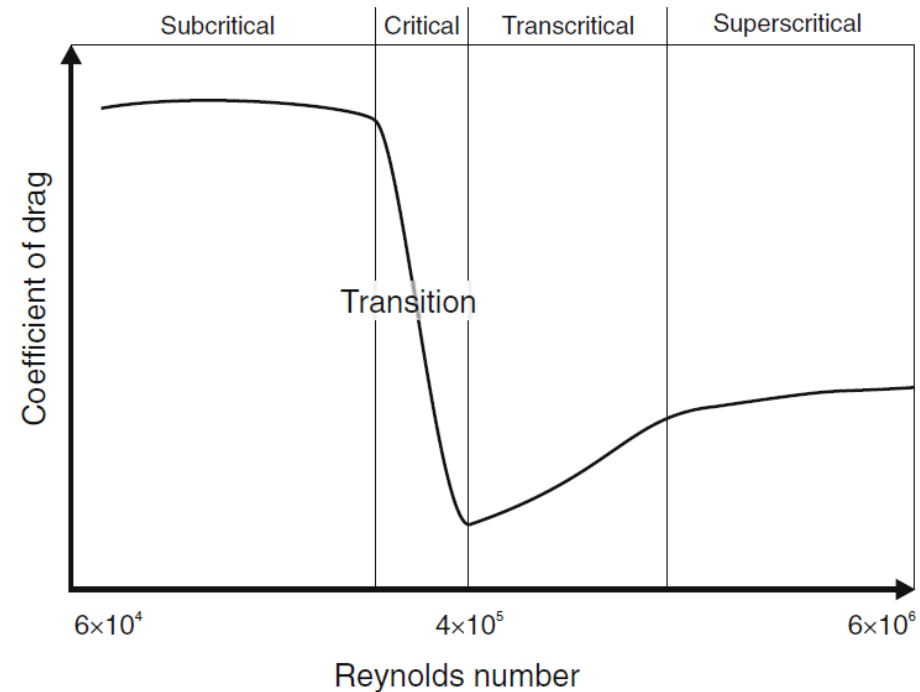


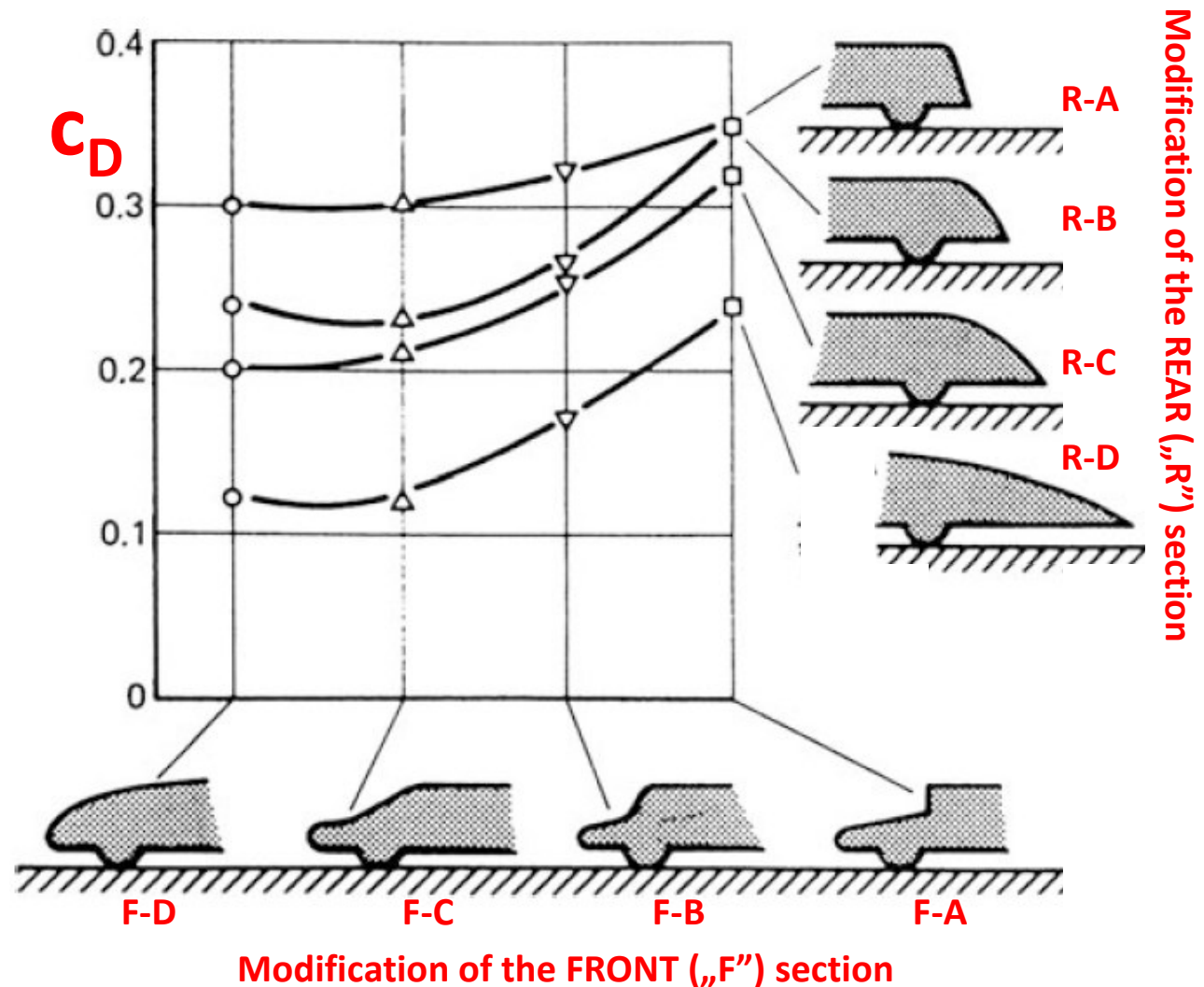
Fig. 1 The aerodynamic behaviour of a smooth sphere; the different flow regimes are labelled. (Taken from Passmore et al. [2])





Járműáramlástan

Különböző homlokfal és hátfal kialakítások hatása az ellenállástényezőre.





Járműáramlás

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

ALAPTESTEK	ÖSSZ-ELLENÁLLÁS	
	~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

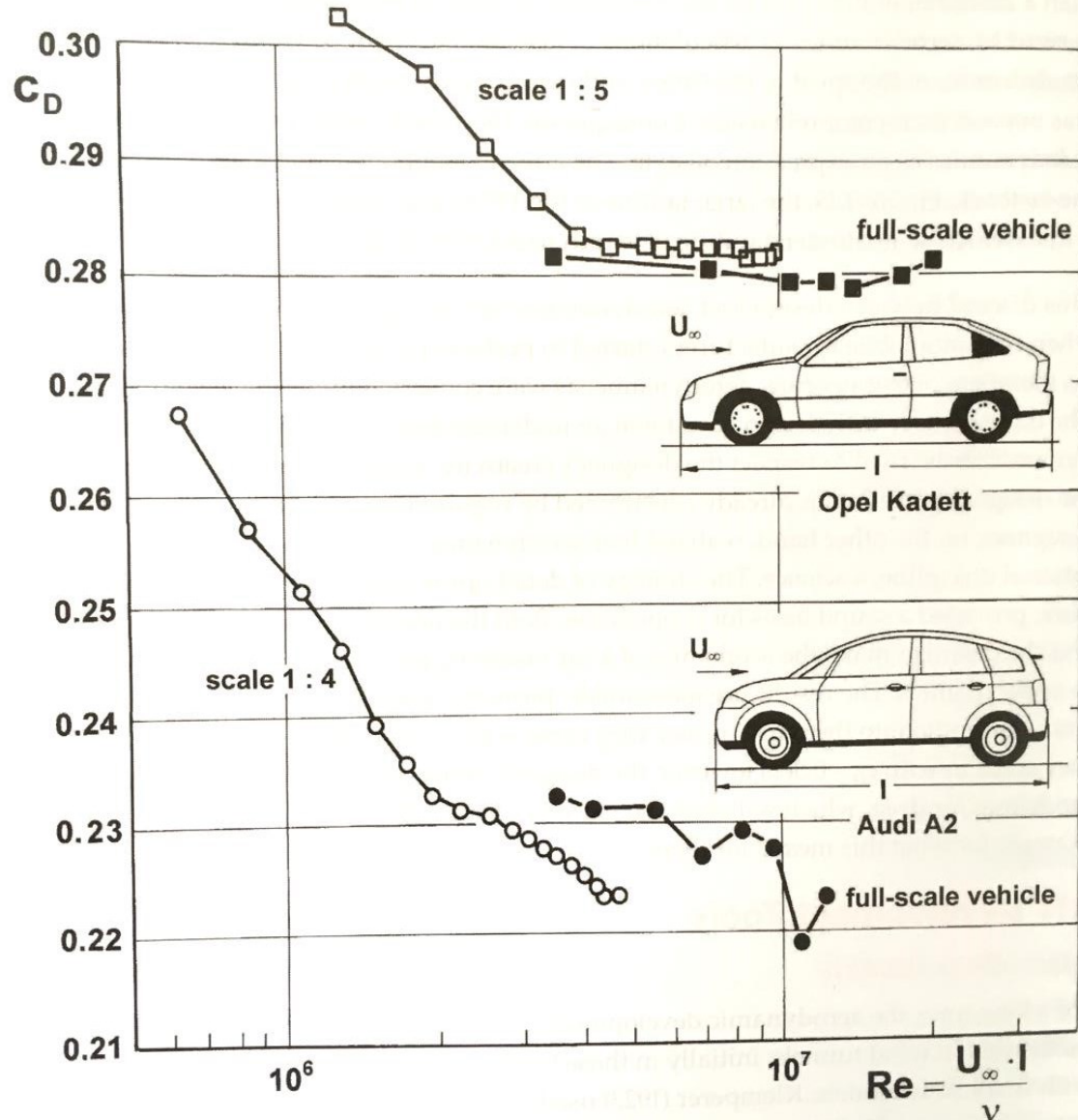


Figure 1.69 Effect of Reynolds number on measured drag coefficient with models in scale 1:5, 1:4, and full-scale cars; from Dietz (2000).





Járműáramlás

DrivAer járműmodell (3D CAD)

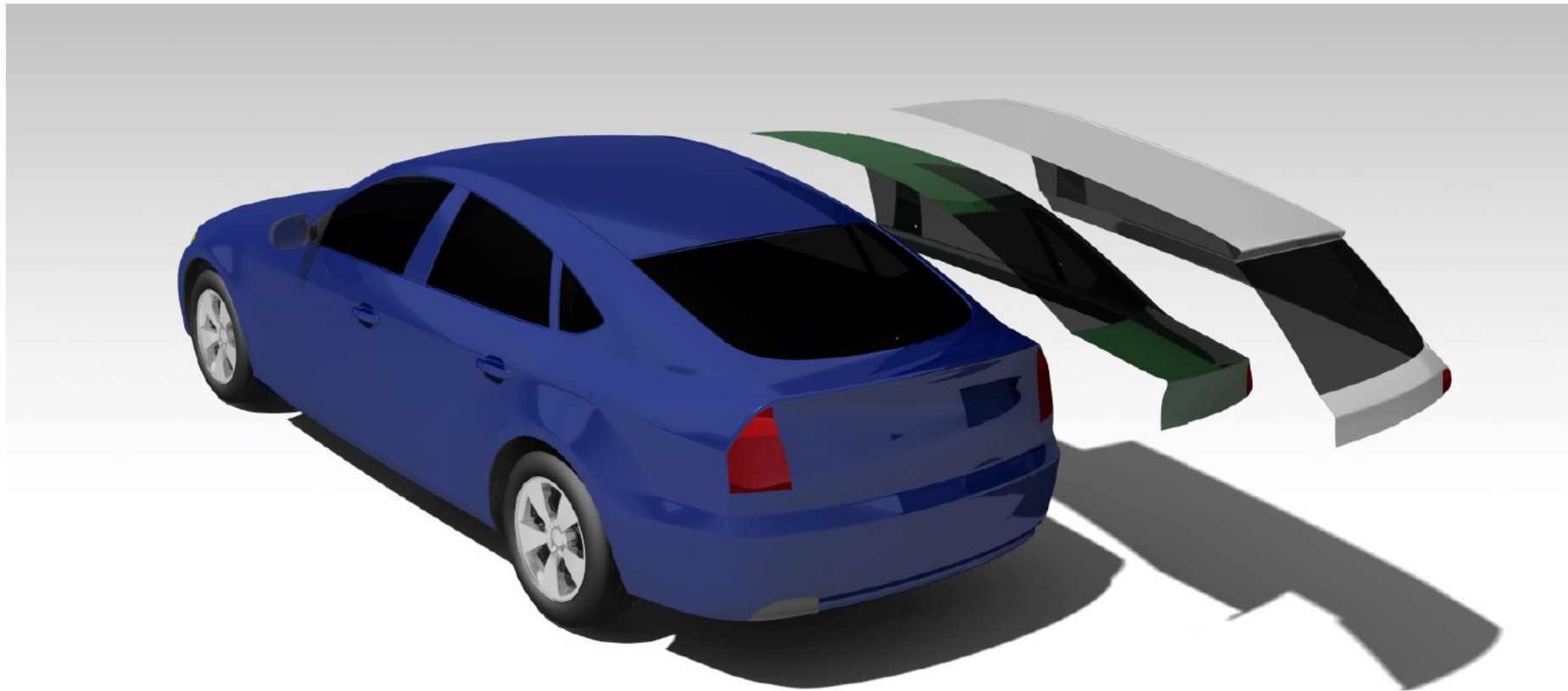


Figure 2: The DrivAer model with its three different rear ends.

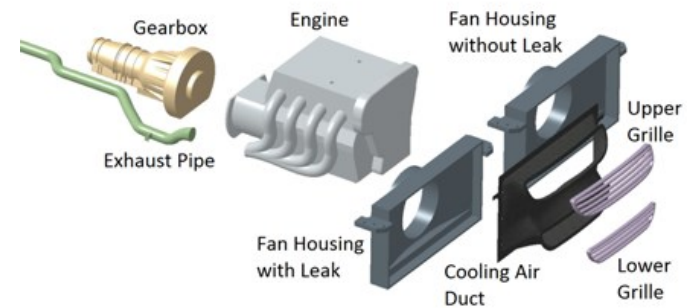
Dr. Suda Jenő Miklós





Járműáramlástan

DrivAer járműmodell (3D CAD)





Járműáramlás

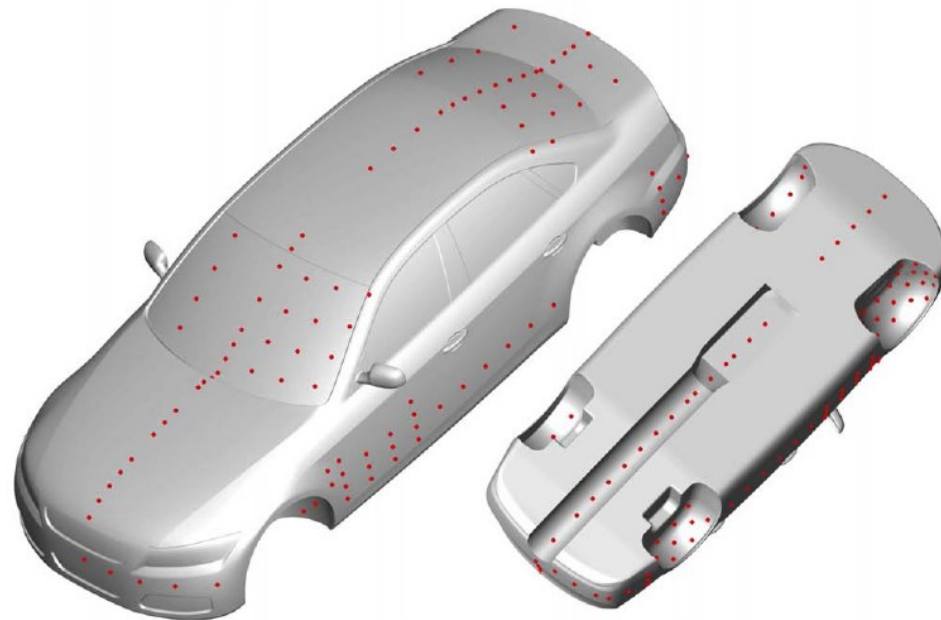
DrivAer járműmodell (3D CAD)

SZÉLCSATORNA TESZTELÉS

1) Aerodinamikai erő mérése

2) Nyomáseloszlás mérés

- függőleges középsíkban
- vízszintes övvonalon





Járműáramlás-tan

DrivAer járműmodell (3D CAD)

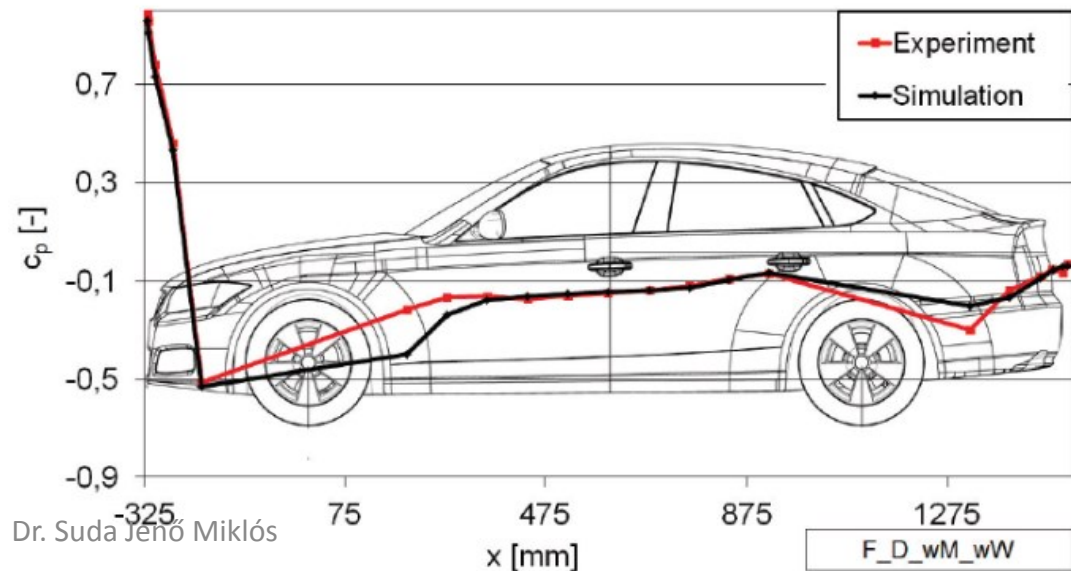
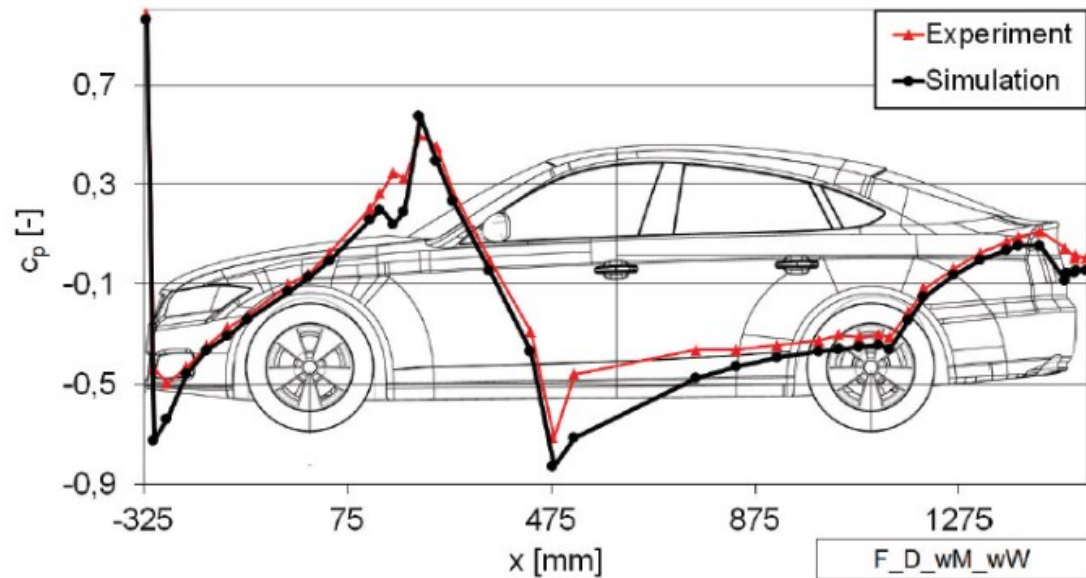
EXP: szélcsatorna mérés

CFD: Computational Fluid Dynamics

Nyomáseloszlás EXP + CFD

- függőleges középsíkban

- vízszintes övvonalon





Járműáramlásan

DrivAer járműmodell (3D CAD)

CFD: Computational Fluid Dynamics

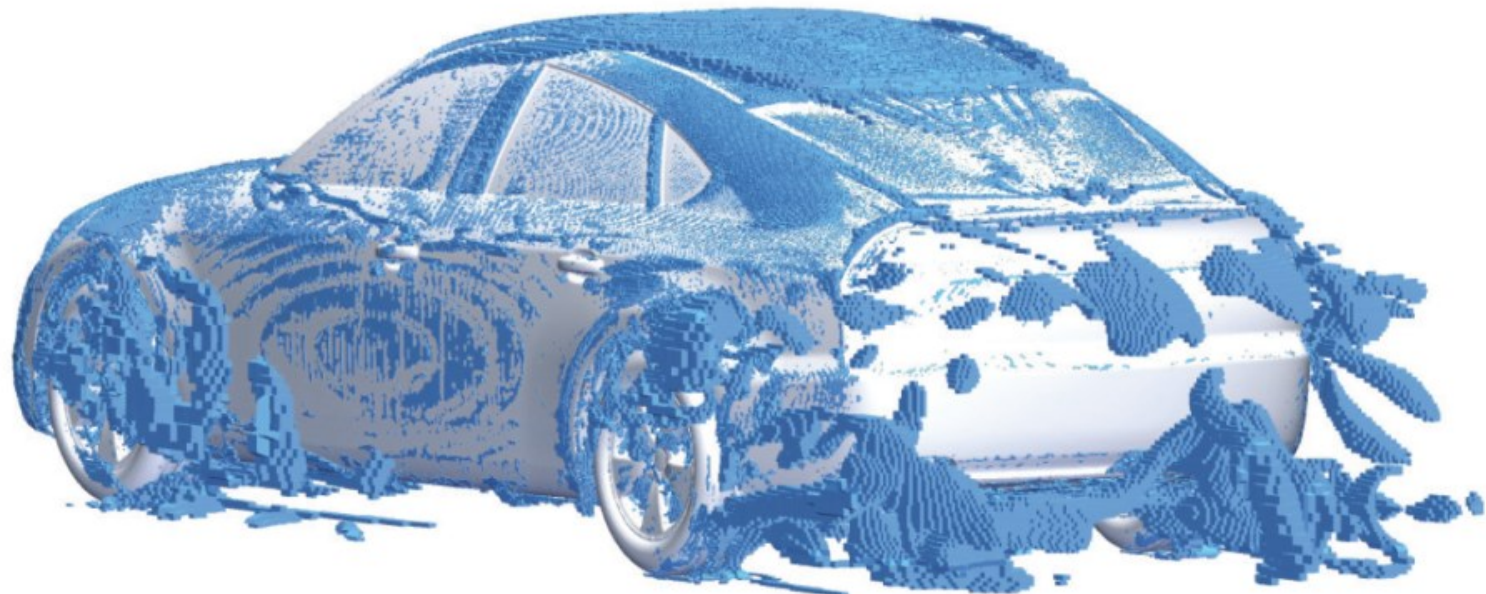


FIGURE 18. Q CRITERION ($Q > 500$) AT THE REAR WINDOW OF THE FASTBACK VEHICLE.

Dr. Suda Jenő Miklós





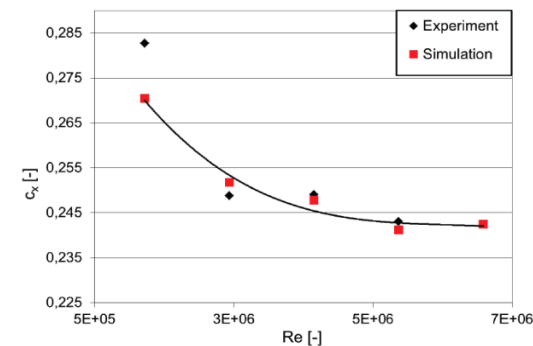
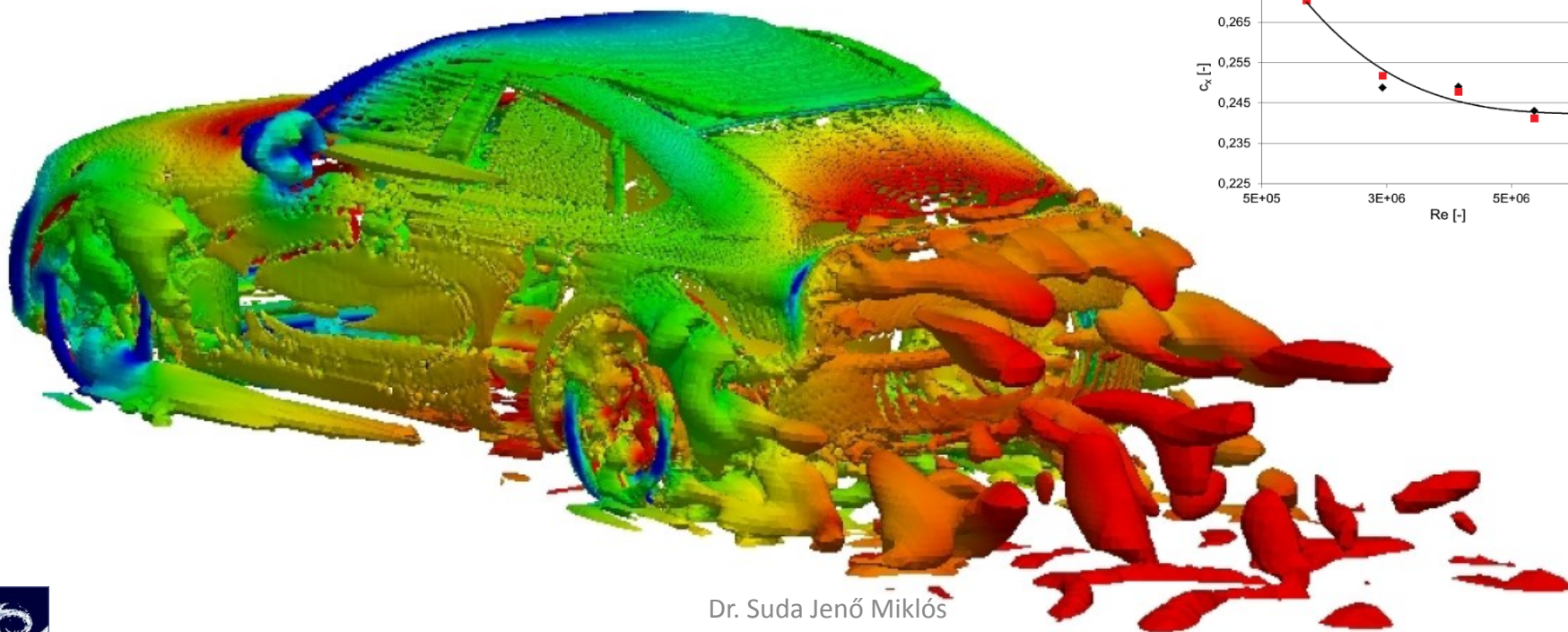
Járműáramlásan

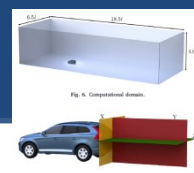
DrivAer járműmodell (3D CAD)

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.

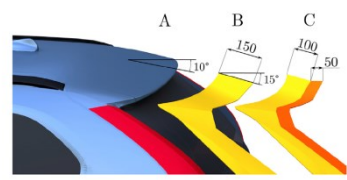


Fig. 2. Close-up of the extensions with measurements in [mm]. The taper angle is referenced to the horizontal plane.

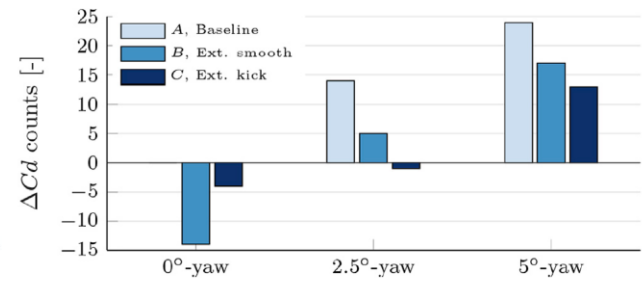


Fig. 12. Delta coefficient of drag relative to the baseline.

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

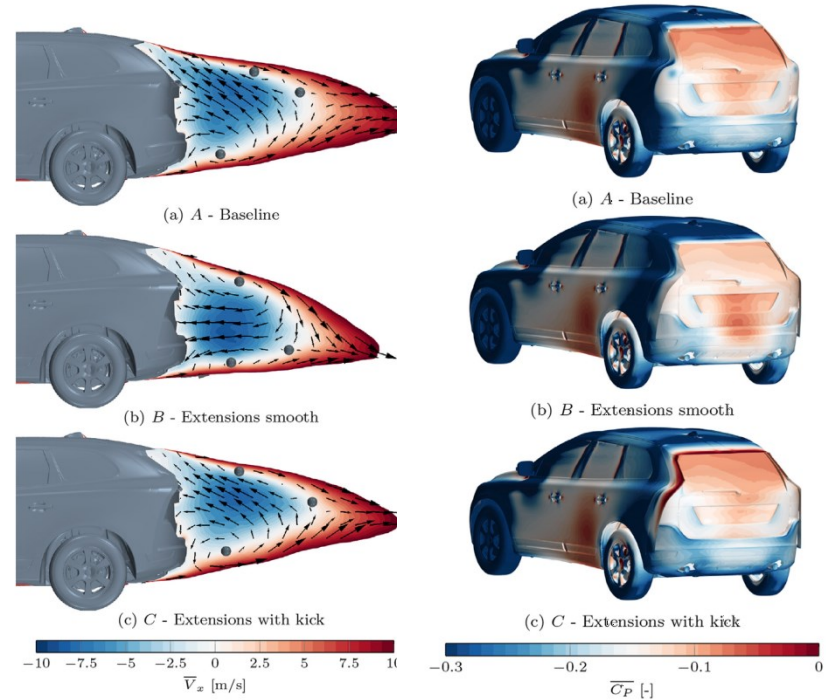


Fig. 13. Mean longitudinal velocity with velocity vectors. Time averaged singular points are marked with a sphere.

Fig. 14. Mean surface pressure coefficient.

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

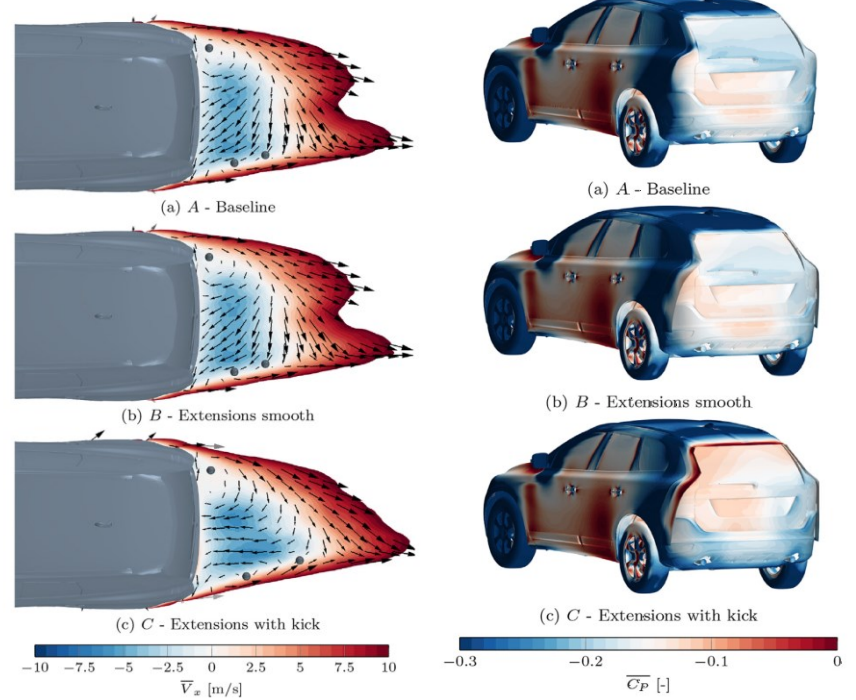


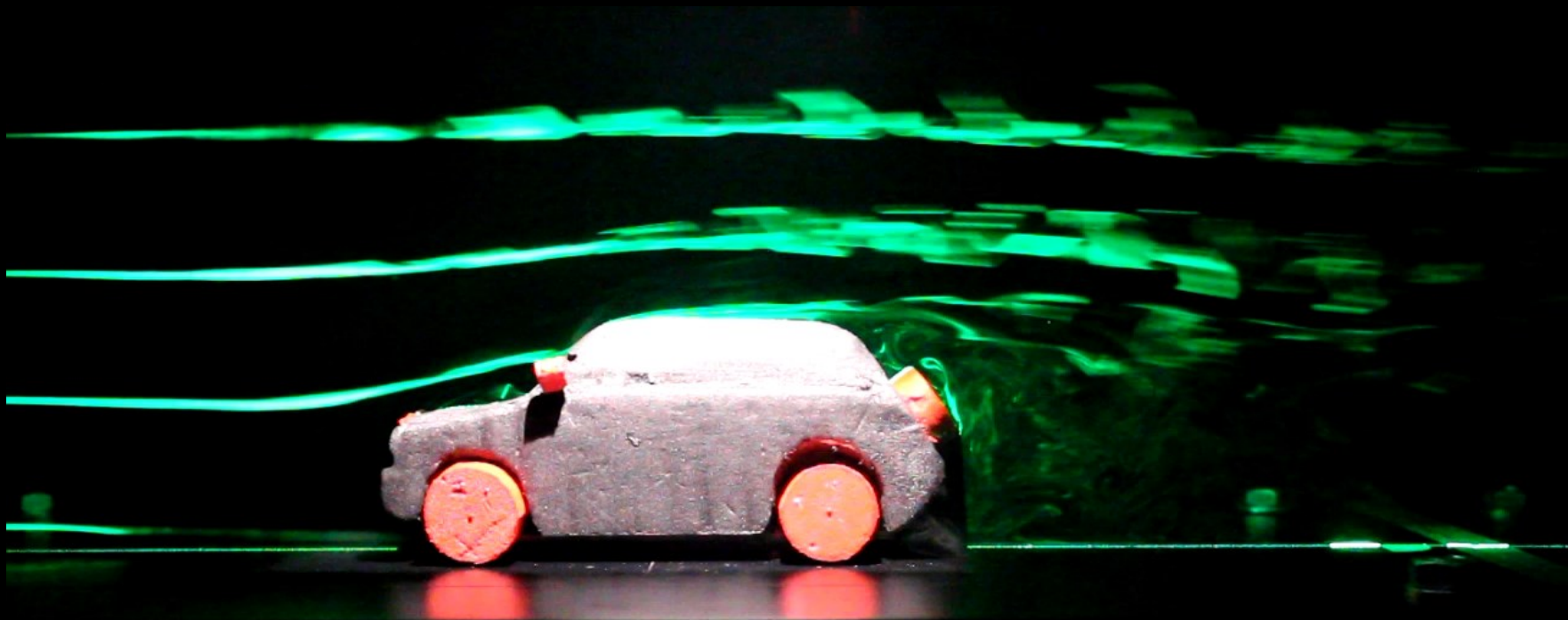
Fig. 25. Mean longitudinal velocity, top view. Time averaged singular points are marked with a sphere.

Fig. 26. Mean surface pressure coefficient.



Járműáramlásintézet

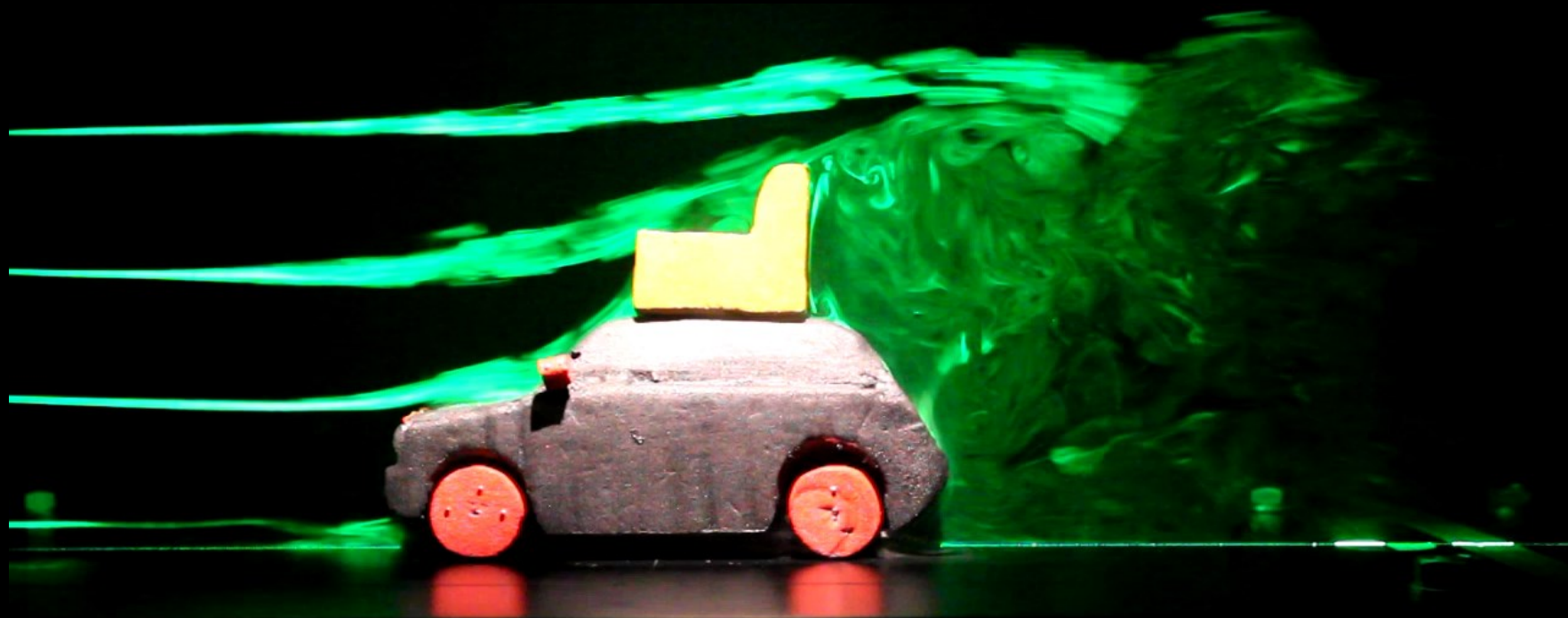
WIND TUNNEL LABSESSION (MSc)





Járműáramlásan

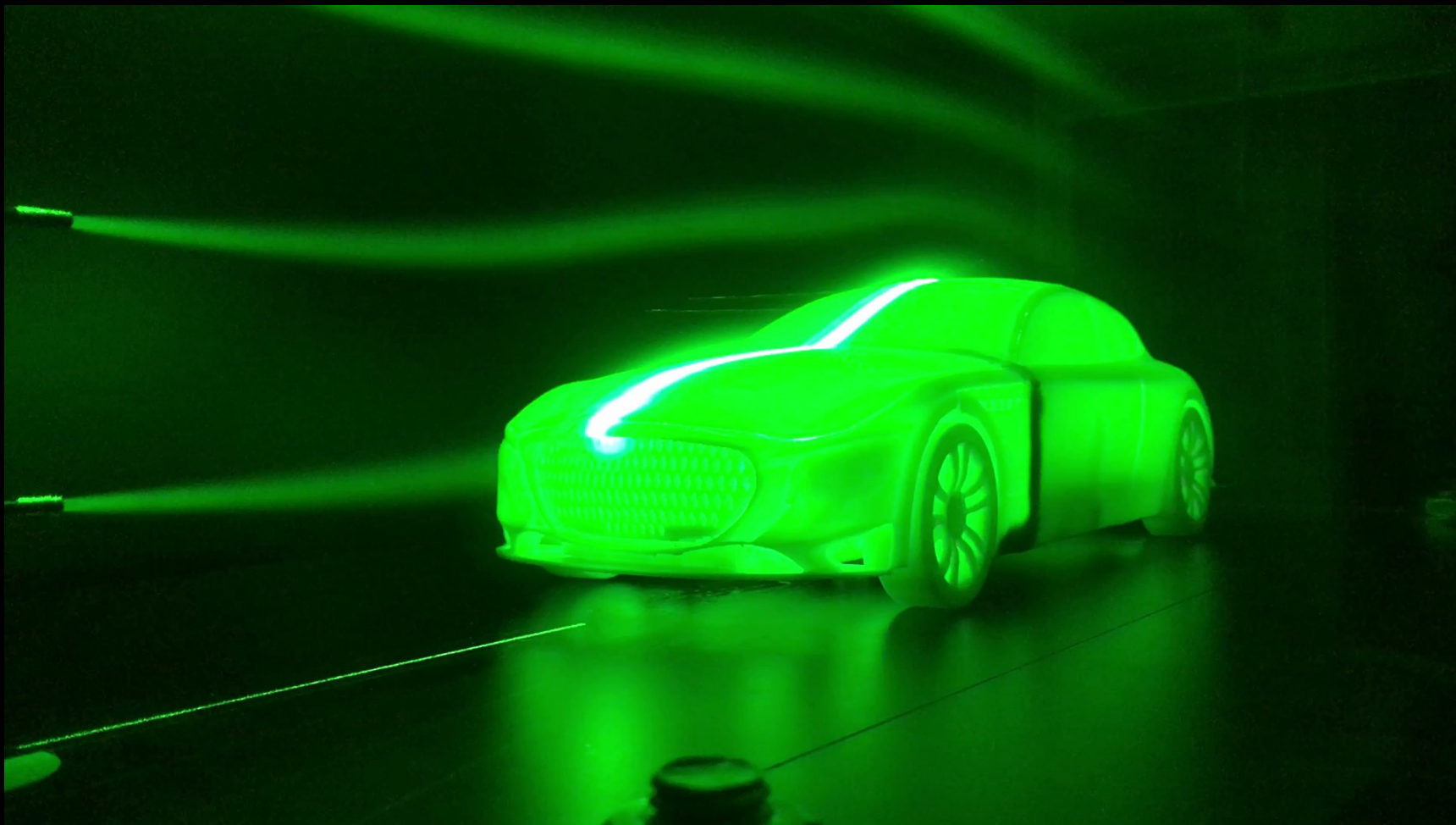
WIND TUNNEL LABSESSION (MSc)





Járműáramlás-tan

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





Járműáramlástan

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





Járműáramlásan



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

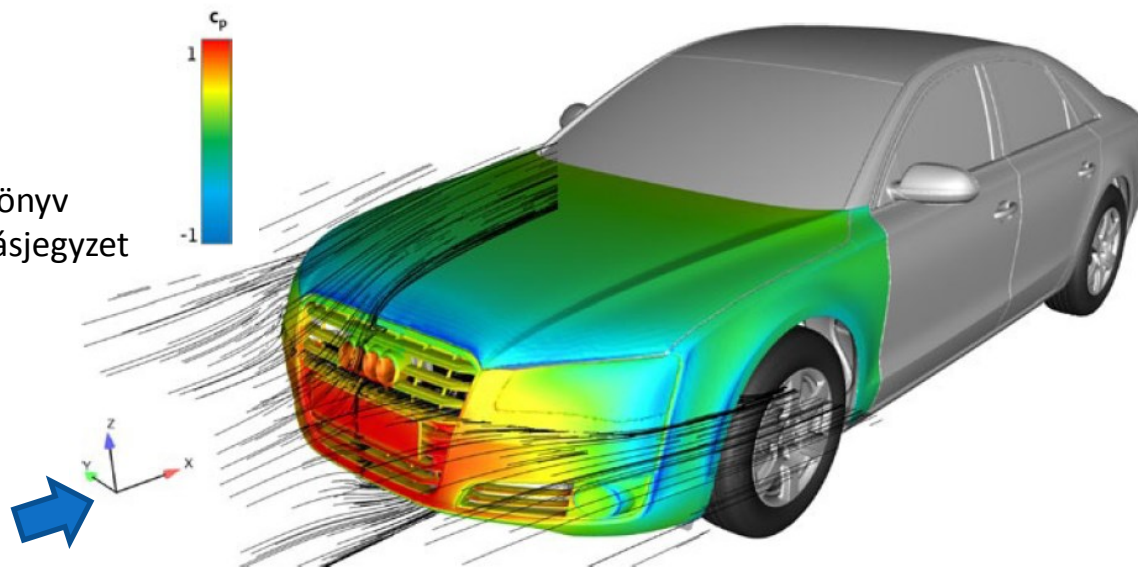


Abb. 4.55 Druckverteilung und Stromlinien am Vorderwagen eines Audi A6





ÖSSZEFOGLALÁS

8. Súrlódásos közegek áramlása

9. Határrétegek

10. Hidraulika

11. Áramlásba helyezett testre ható erő

Áramlás-tan előadást kiegészítő prezentáció

Dr. Suda Jenő Miklós, adjunktus

BME Áramlás-tan 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

