

BME
Áramlástan
Tanszék



Kármán Tódor
Szélcsatorna
Laboratórium

TÁVKÖZLÉSI OSZLOPOKRA HATÓ SZÉLERŐ MEGHATÁROZÁSA SZÉLCSATORNA MODELLKÍSÉRLETEKKEL

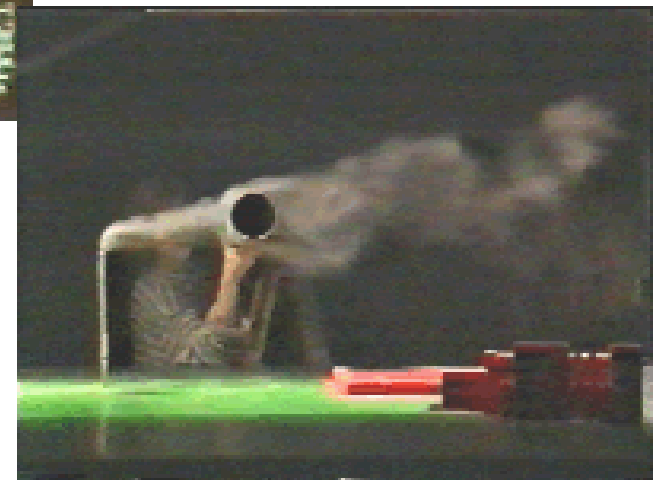
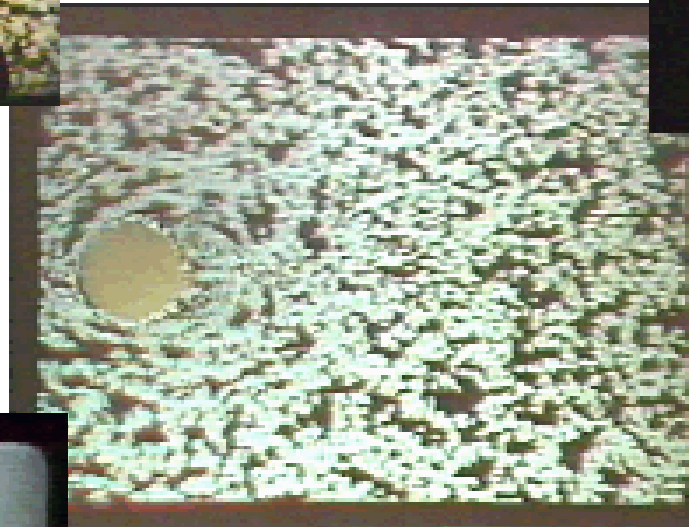
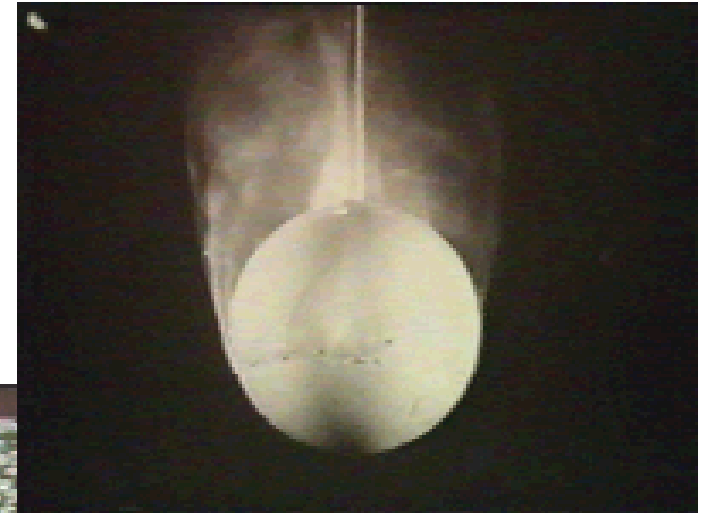
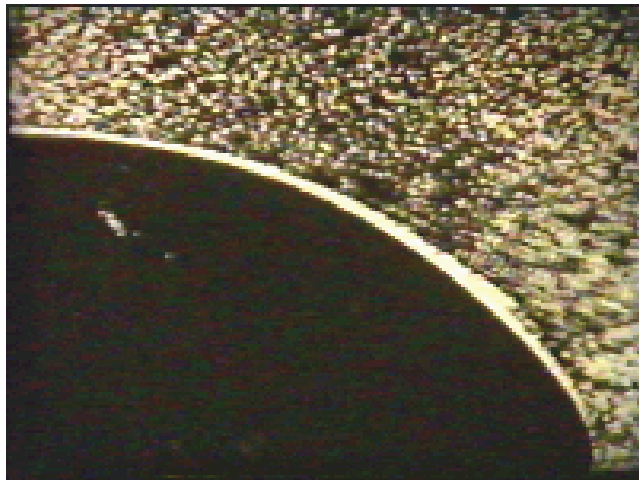
**Budapesti Műszaki és
Gazdaságtudományi Egyetem
Áramlástan Tanszék**

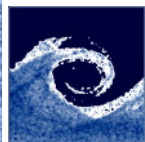
2005. december 12.



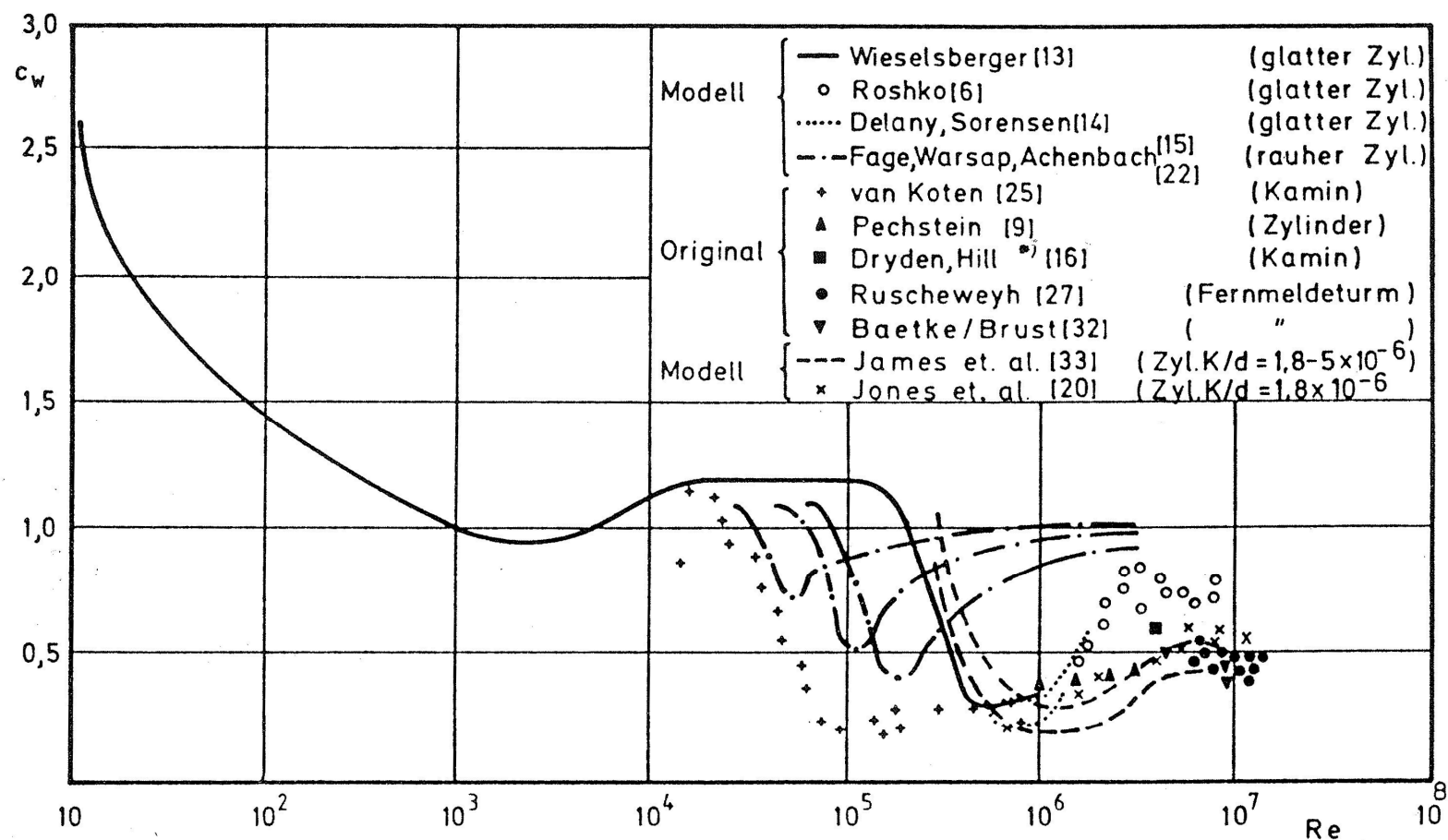
M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

A határréteg leválása

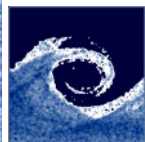




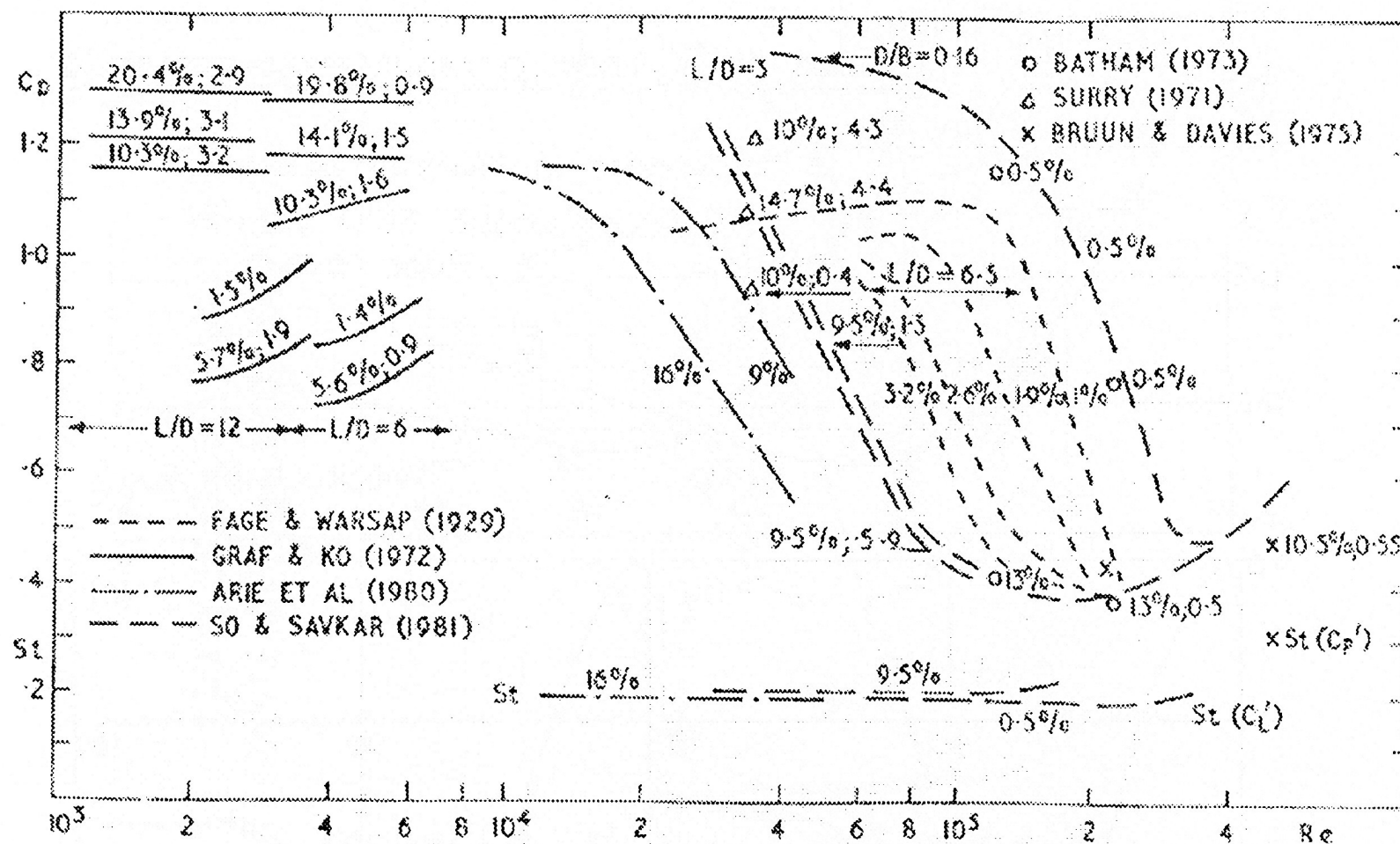
A henger ellenállástényezője a Reynolds szám függvényében

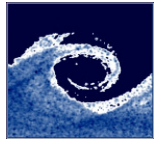


szubkritikus, szuperkritikus és transzkritikus áramlási tartomány



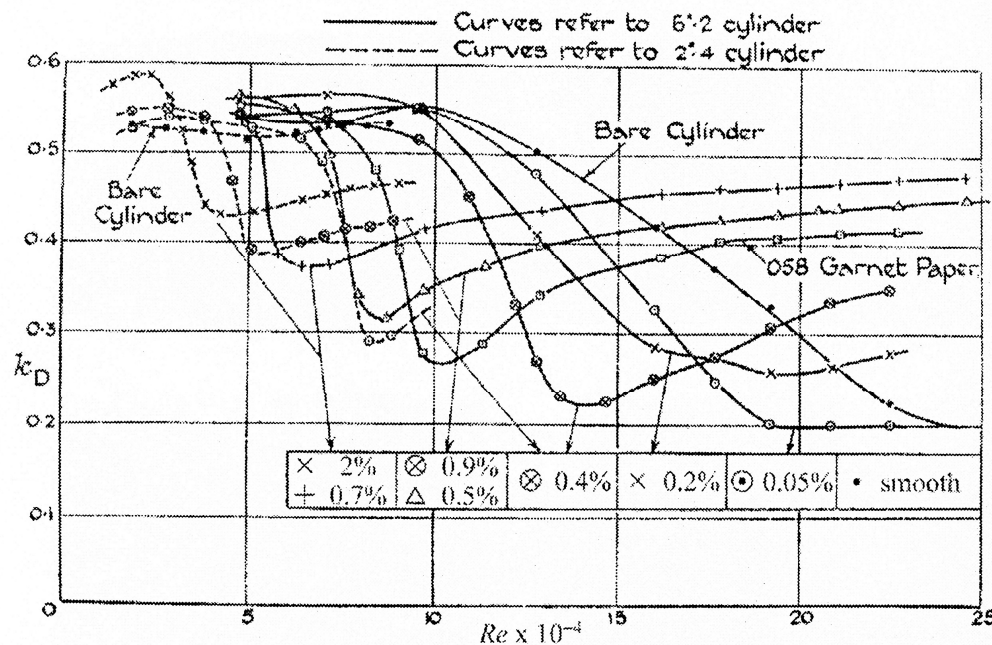
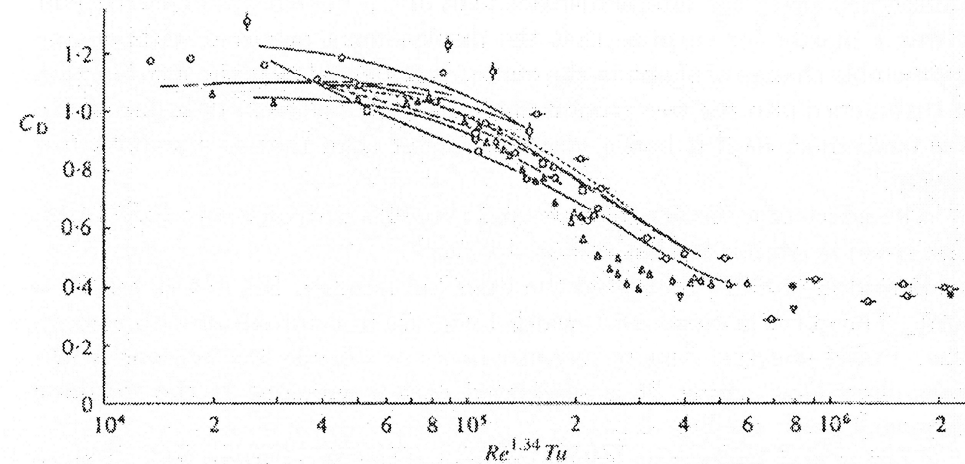
A henger ellenállástényezője a turbulenciafok függvényében



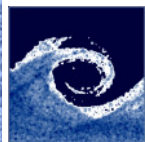


A turbulenciafok és az érdesség hatása

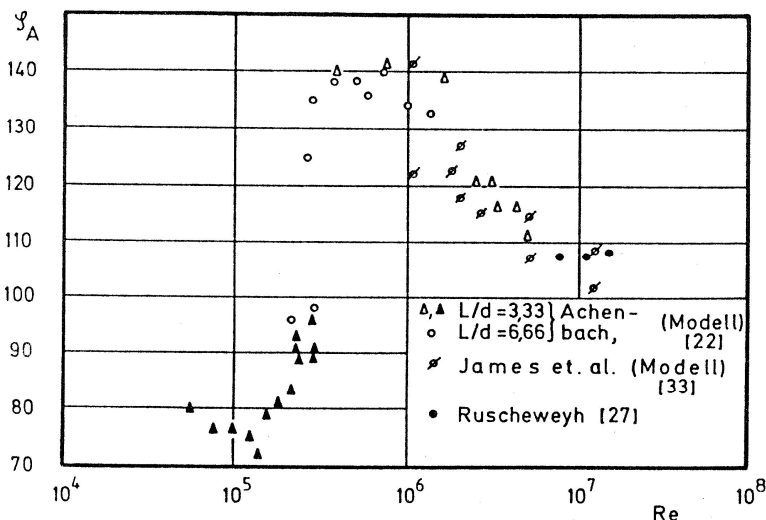
A különböző turbulenciafoknál mért ellenállástényező görbék transzformálása



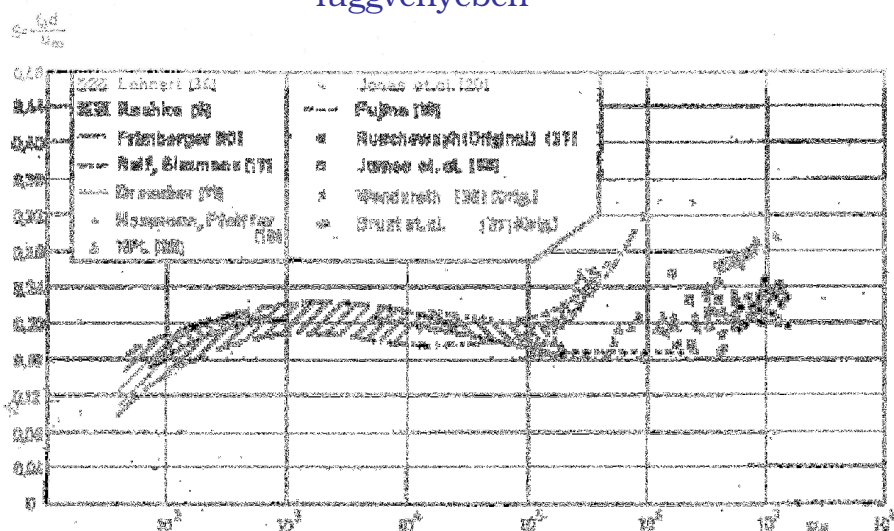
Különböző relatív érdességekhez tartozó ellenállástényező-Reynolds szám görbék



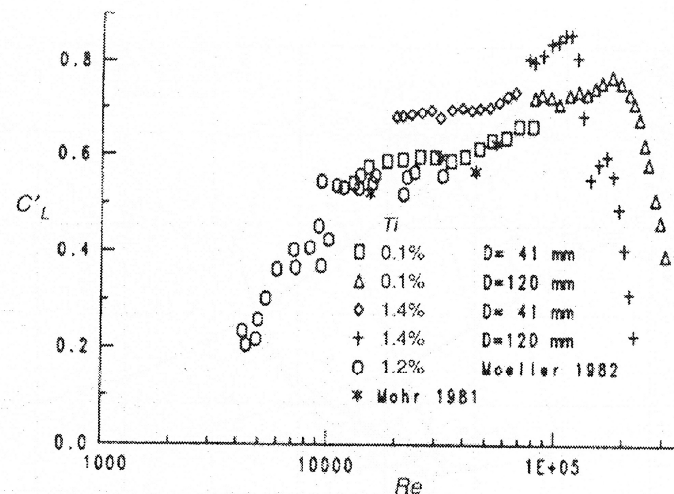
A henger körüli áramlás jellemzői a Reynolds szám függvényében



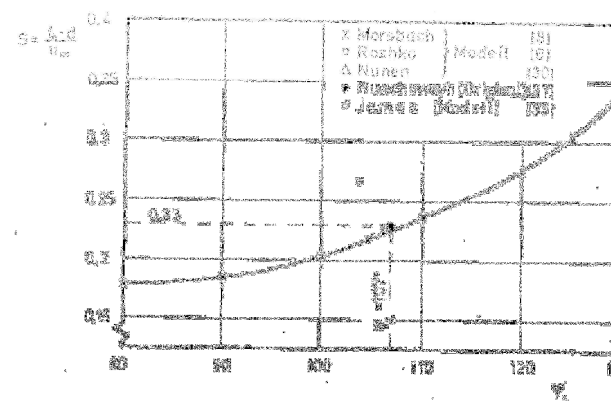
Az (ingadozó) oldalero tényező a Reynolds szám függvényében



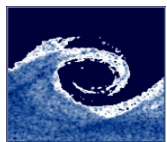
A Strouhal szám alakulása a Reynolds szám függvényében



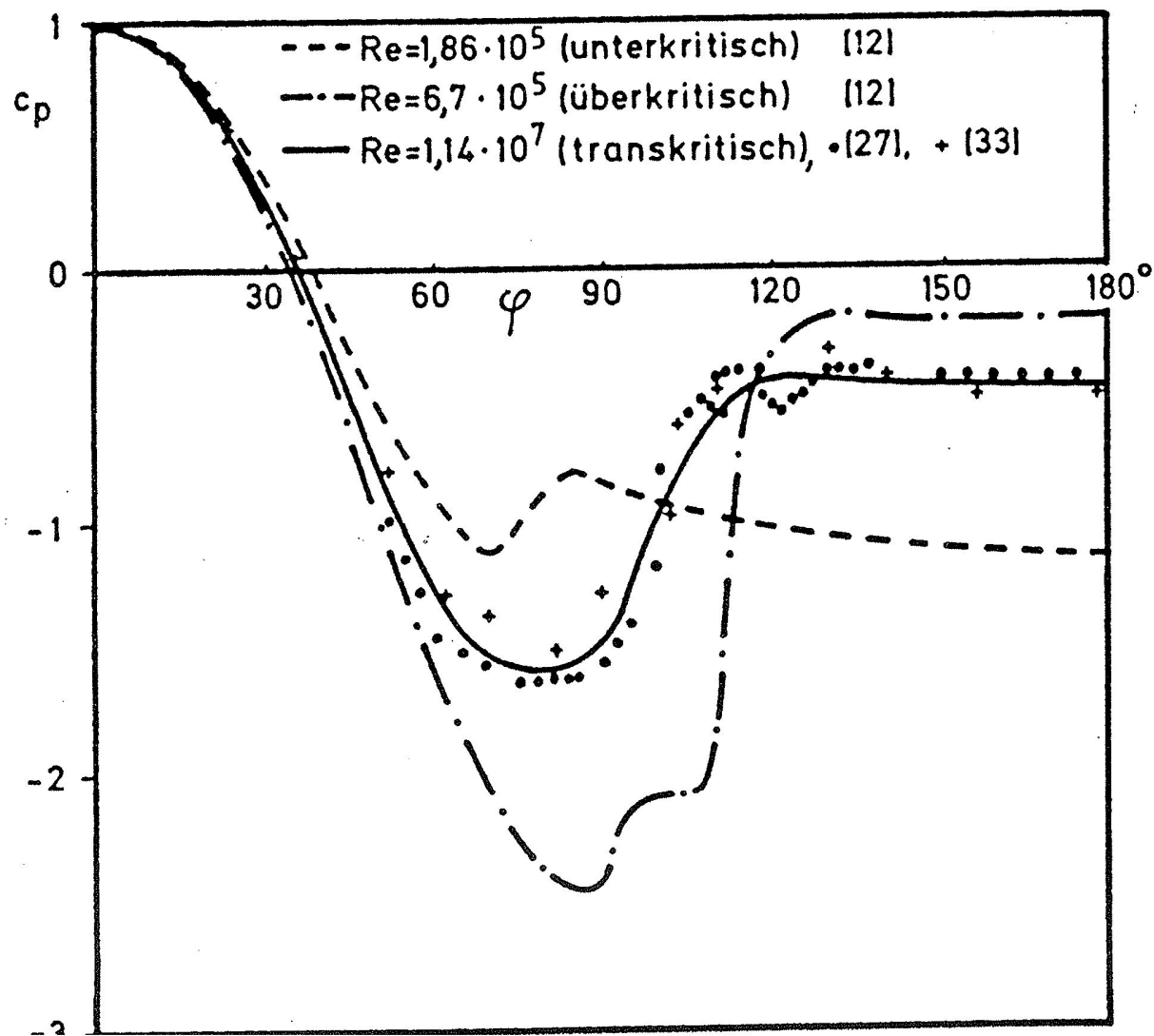
A határréteg leválás helye a henger kerületén (ϕ , torlóponttól mért szög)

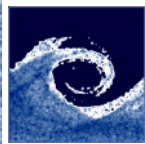


A Strouhal szám függése a határréteg leválás helyétől (a torlóponttól mért szögtől)



A henger körüli nyomásmegoszlás





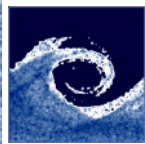
A henger körüli áramlás

Kritikus alatti: $Re < 10^5$: a homlokfalon lamináris határréteg alakul ki, amely $\varphi = 70 - 80^\circ$ -nál leválik, a nyomástényező a hátsó részen viszonylag kicsi (nagy depresszió) $c_p = -1$ körüli, emiatt az ellenállástényező nagy, $c_D = 1,2$ körüli, intenzív periodikus örvényleválás, $Str = 0,2$ körüli érték, jelentős periodikusan ingadozó oldalirányú erők keletkeznek, az oldalerő tényező $c_o = 0,4 - 0,7$.

Kritikus fölötti: $3 \cdot 10^5 < Re < 3 \cdot 10^6$: homlokfalon a kezdetben (és elég hosszan) lamináris határréteg turbulenssé válik. A turbulens határréteg lényegesen hátrább, $\varphi = 130 - 140^\circ$ -nál válik le, a hátfal mögötti leválási buborék mérete sokkal kisebb, mint korábban, és benne a depresszió is radikálisan csökken: a nyomástényező $c_p = -0,2$ körüli, kicsi, $c_D = 0,3 - 0,4$ körüli ellenállástényező. ($10^5 < Re < 3 \cdot 10^5$ tartományban megy végbe az átmenet, amelynél a Re növekedésével monoton csökken az ellenállástényező). Nem figyelhető kimondott frekvenciájú intenzív örvényleválás, az ingadozó oldalirányú erő nagymértékben csökken: $c_o < 0,1$.

Transzkritikus $Re > 3 \cdot 10^6$:

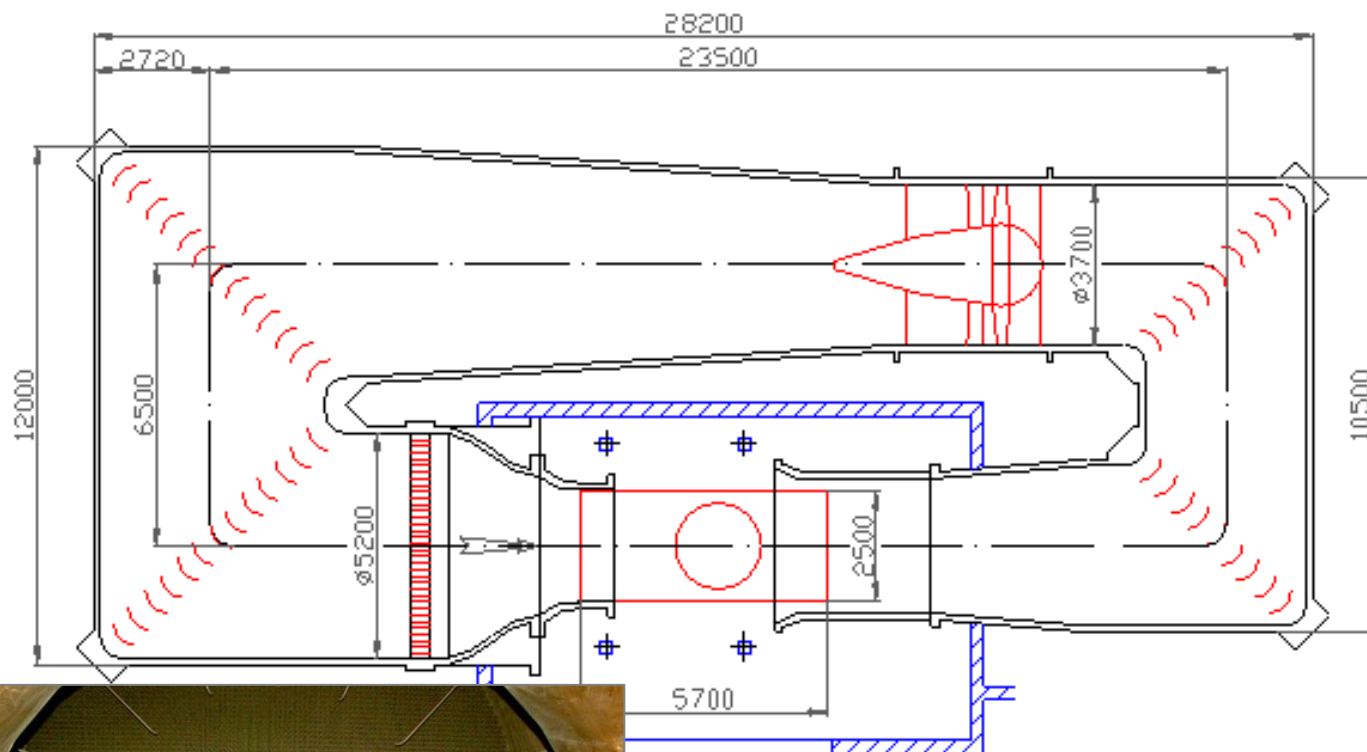
a torlópont után rövid lamináris, majd hosszan turbulens határréteg megvastagszik, ezért hamarabb $\varphi = 100 - 120^\circ$ -nál válik le. Ezért a kritikus fölötti tartományhoz képest nagyobb leválási buborék, nagyobb depresszió, $c_p = -0,4 - -0,9$ körüli nyomástényező a hátsó részen és kissé nagyobb, $c_D = 0,5 - 0,7$ körüli ellenállástényező (a kisebb c_p és nagyobb c_D értékeket szélcsatornában, a nagyobb c_p és kisebb c_D értékeket nagy kivitelen mérték). Intenzív periodikus örvényleválás, $Str = 0,22 - 0,27$, jelentős periodikusan ingadozó oldalirányú erők keletkeznek, az oldalerő tényező $c_o = 0,4 - 0,7$ közötti.



Az Áramlástan Tanszék nagy vízszintes szélcsatornája

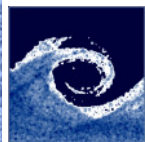


Kármán Tódor
Szélcsatorna
Laboratórium

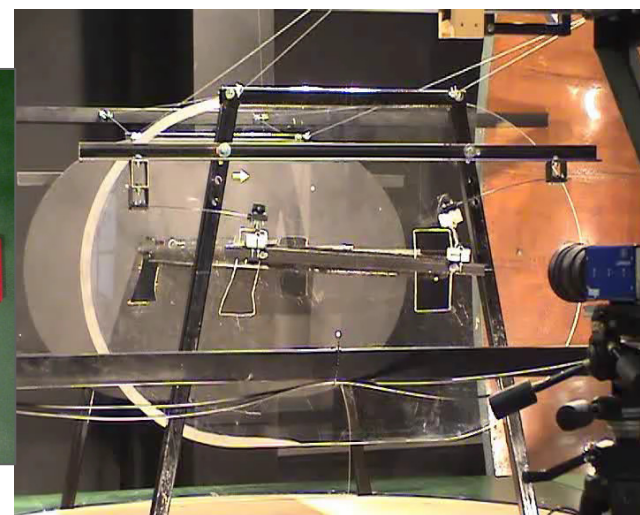
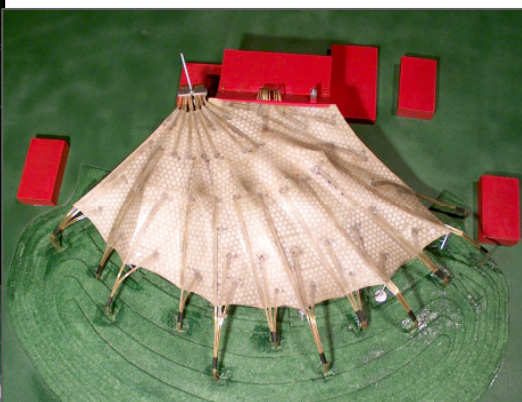
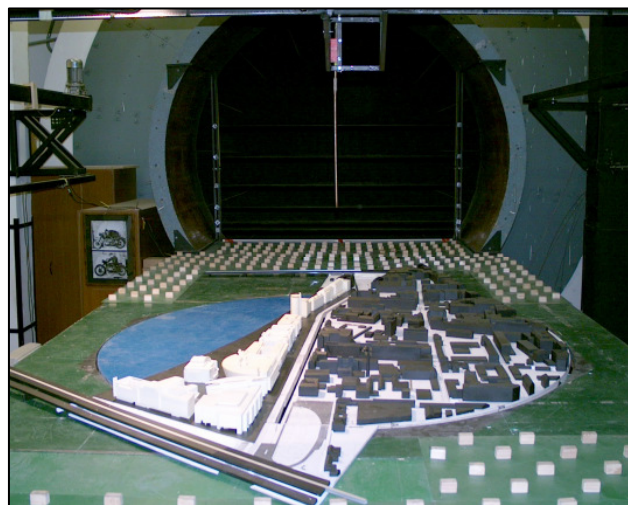
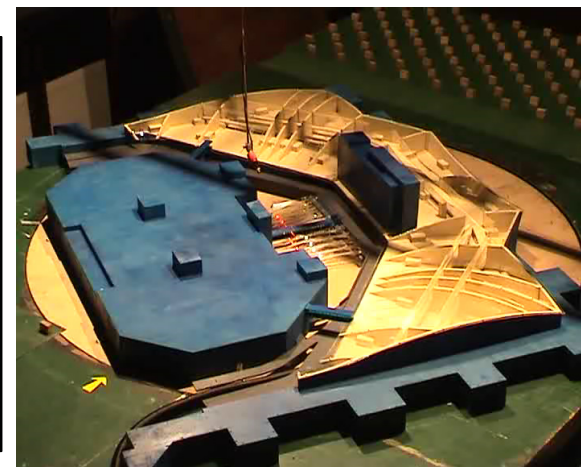
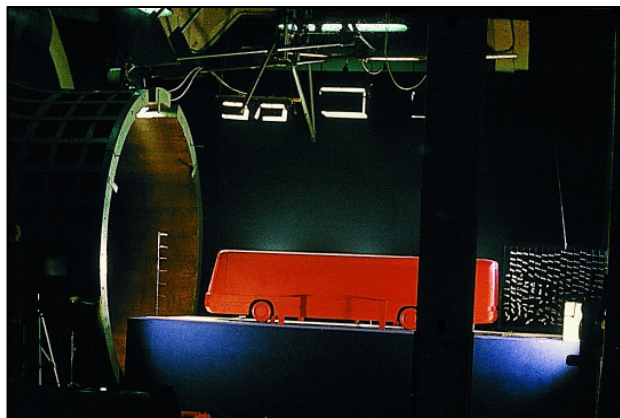


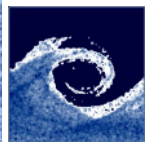
**Sugár átmérő 2.6 m, mérőter hossz 5.7 m,
legnagyobb szésebesség 60 m/s,
turbulenciafok az üres mérőterben 0.5%
600kW motor teljesítmény**

Műegyetem Áramlástan Tanszék 2005



A szélcsatorna korábbi és jelenlegi alkalmazásai

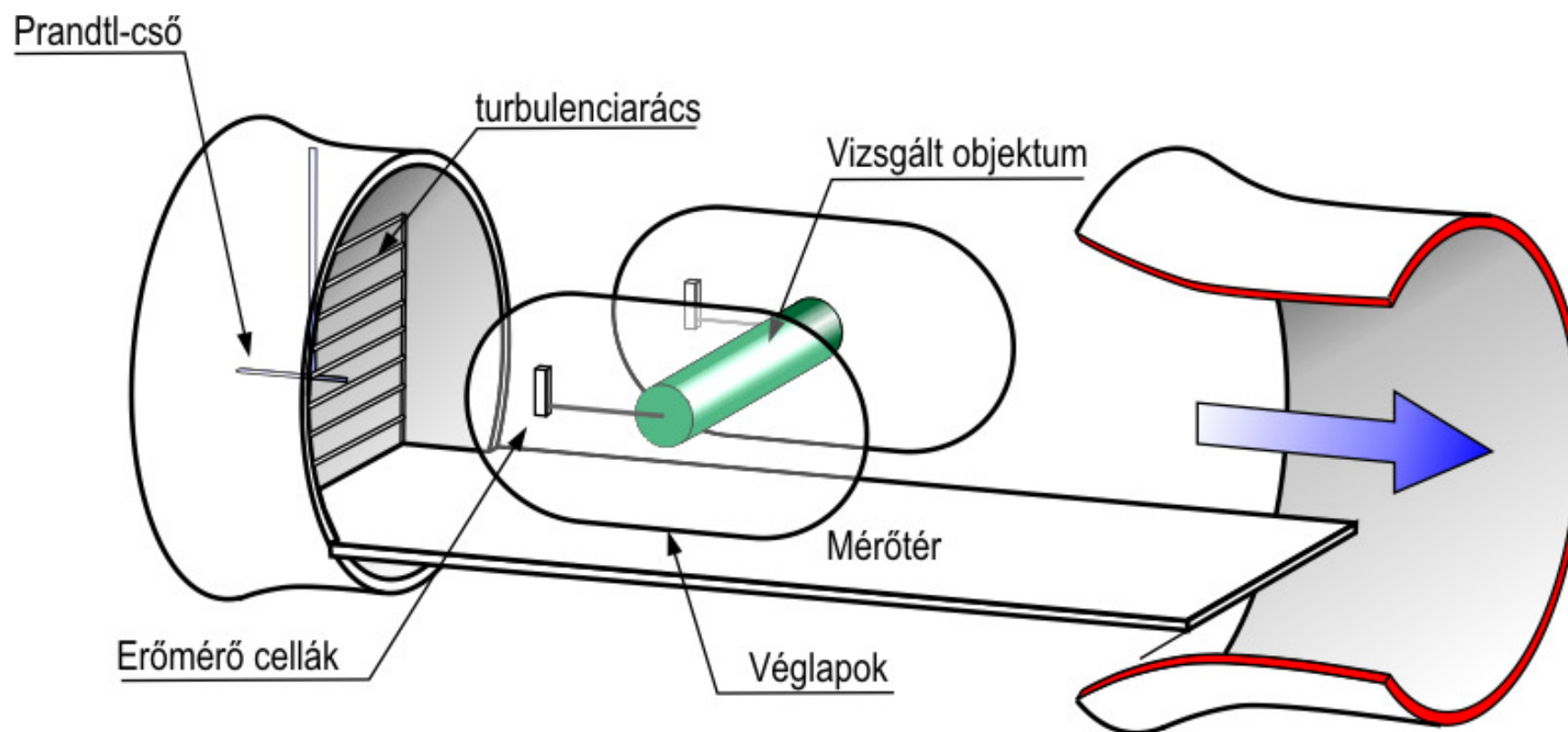


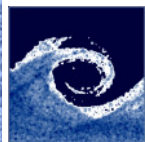


Mérési elrendezés

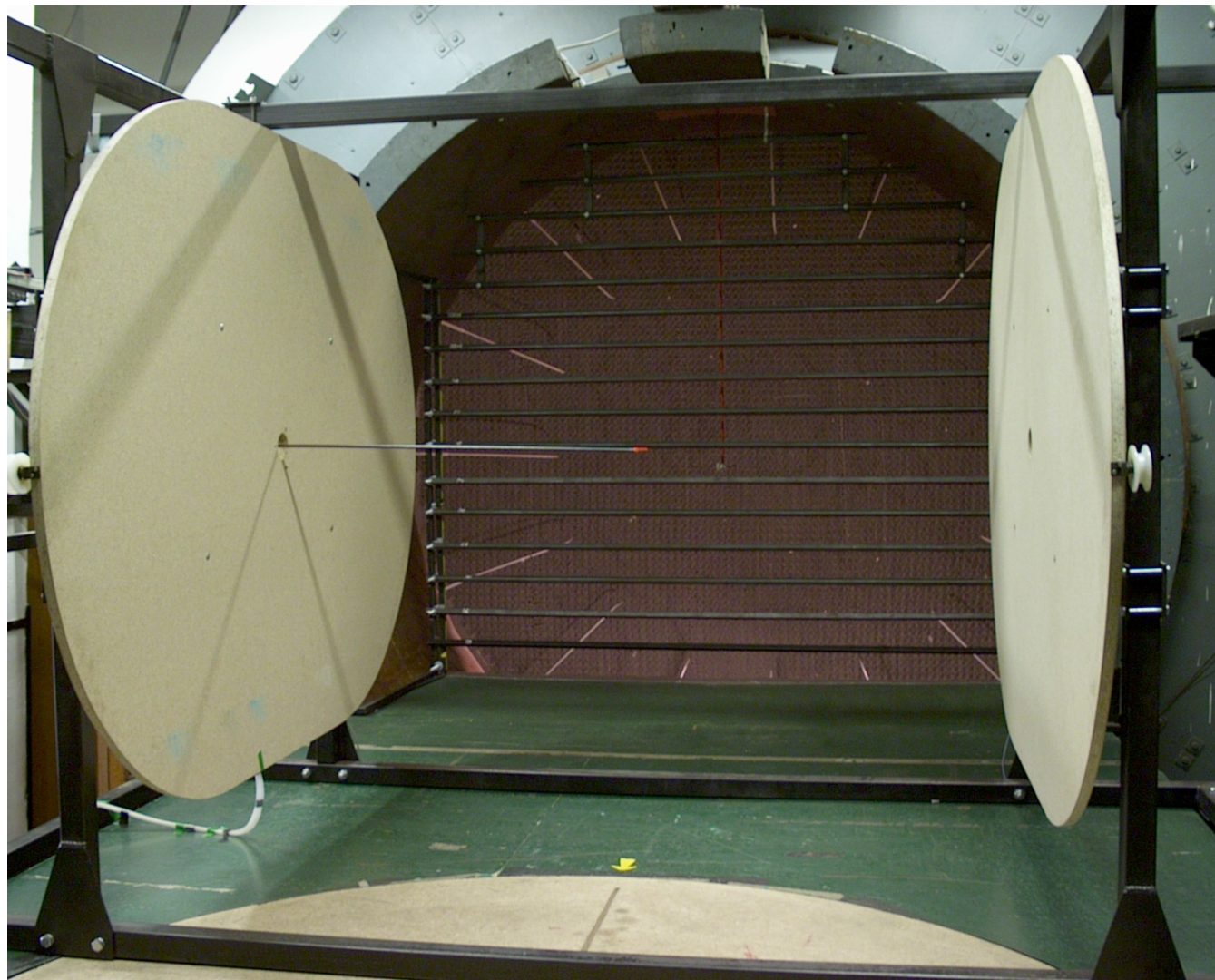


Kármán Tódor
Szélcsatorna
Laboratórium

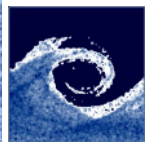




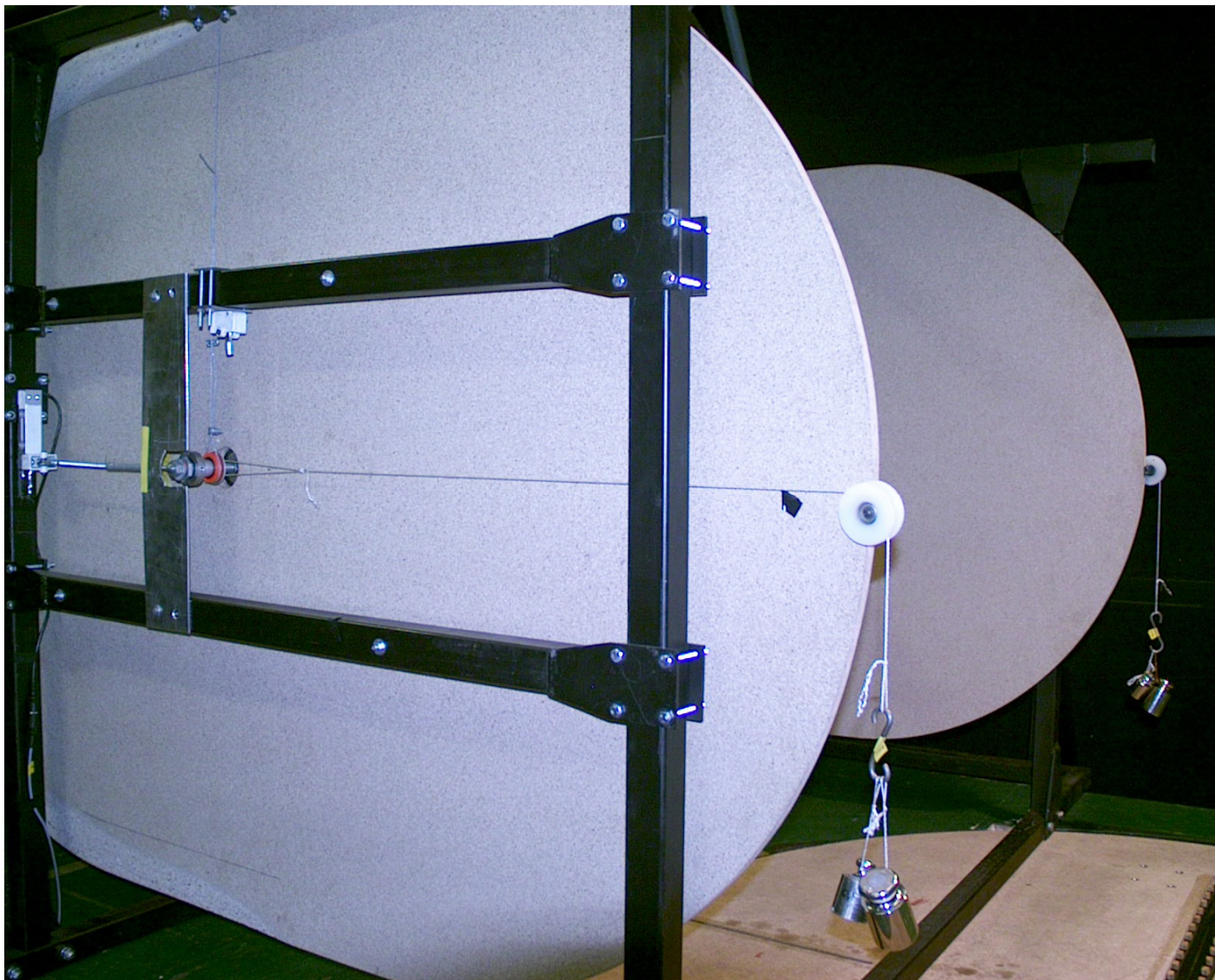
Turbulenciagenerátor rács és síkáramlást biztosító véglapok a mérőtérben



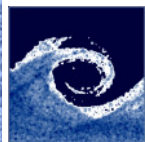
Műegyetem Áramlástan Tanszék 2005



Erőmérés, erőmérő cella kalibrálása



Műegyetem Áramlástan Tanszék 2005

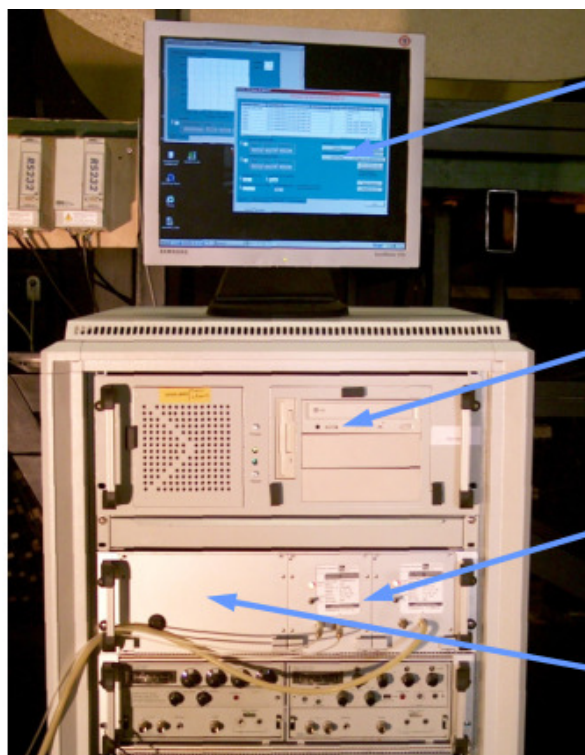


Adatgyűjtés és feldolgozás

Szélcsatorna

Prandtl-cső
Erőmérő cellák
Gáz hőmérő
Barométer

$U_l(t)$ [V]



Adatgyűjtő-és feldolgozó program
(NI Labview 6.1)

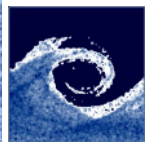
PC National Instruments A/D kártyával

Setra nyomástávadók

Erőmérő cella erősítők

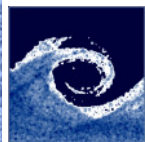
A mérőrendszer





Szélcsatorna mérés





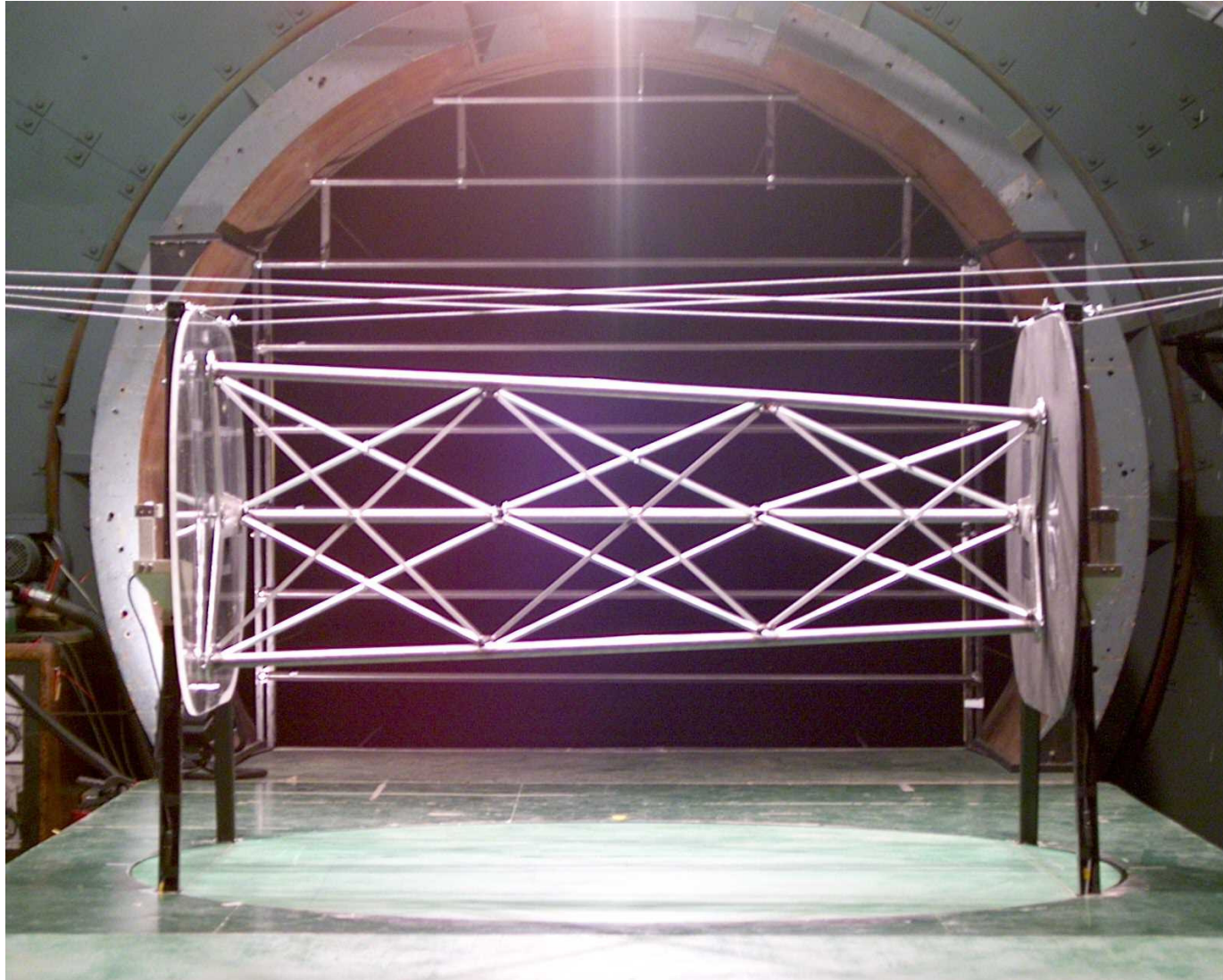
Fontosabb mért változatok

1. méréssorozat

Sor-Szám	Átmérő D[m]	Felület minőség	Relatív érd. k_s/D % Megjegyzés
1	10 m magas toronyszerkezet 1:6 léptékű modellje D=28 mm tartók és 10mm oldalhosszúságú zártszelvény szubkrit. áll.		
2	0,245	festett	
3	0,245	tűzihorganyzott	rel.érd. 0,12
4	0,168	tűzihorganyzott	rel.érd. 0,09
5	0,114	tűzihorganyzott	rel.érd. 0,04
6	0,114	festett	
7	0,114	különböző érdesítések	
8	kábeltartó oszlop, létra, 1 v. 2 kábelköteggel		

a turbulenciafok 0,45, 5, 7,5 % volt

Torony 1:6 léptékű modellje a szélcsatornában

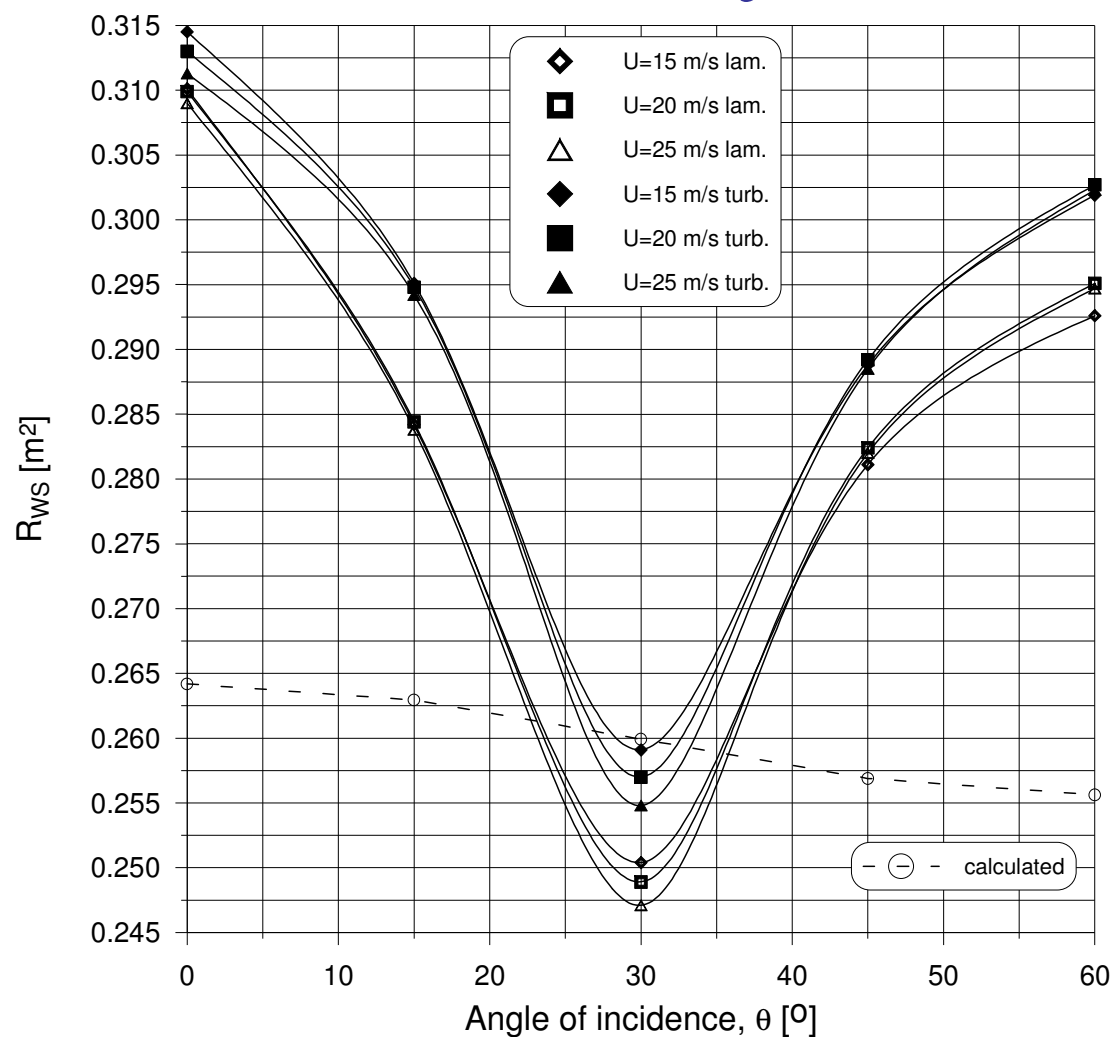


Műegyetem Áramlástan Tanszék 2005

Ellenállás mérések eredménye

$\theta = 0^\circ$ oldalra merőleges
iránnyal bezárt szög,
mérés 3 szélsébségnél
(15; 20; 25 m/s) és
két turbulenciafoknál
($Tu = 0,5\%$; 5%)

$Re = 2,8, 3,7$ és 4.66×10^4
szubkritikus



Szélirány

θ

0

15

30

45

60

$R_{ws} = F_e / p_{din} = A_F \times K_q \times C_N$

R_{ws}

0,264

0,262

0,259

0,256

0,255

Eurocode 3

Saját számolás

0,3

0,245

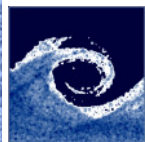
0,3

Mérés

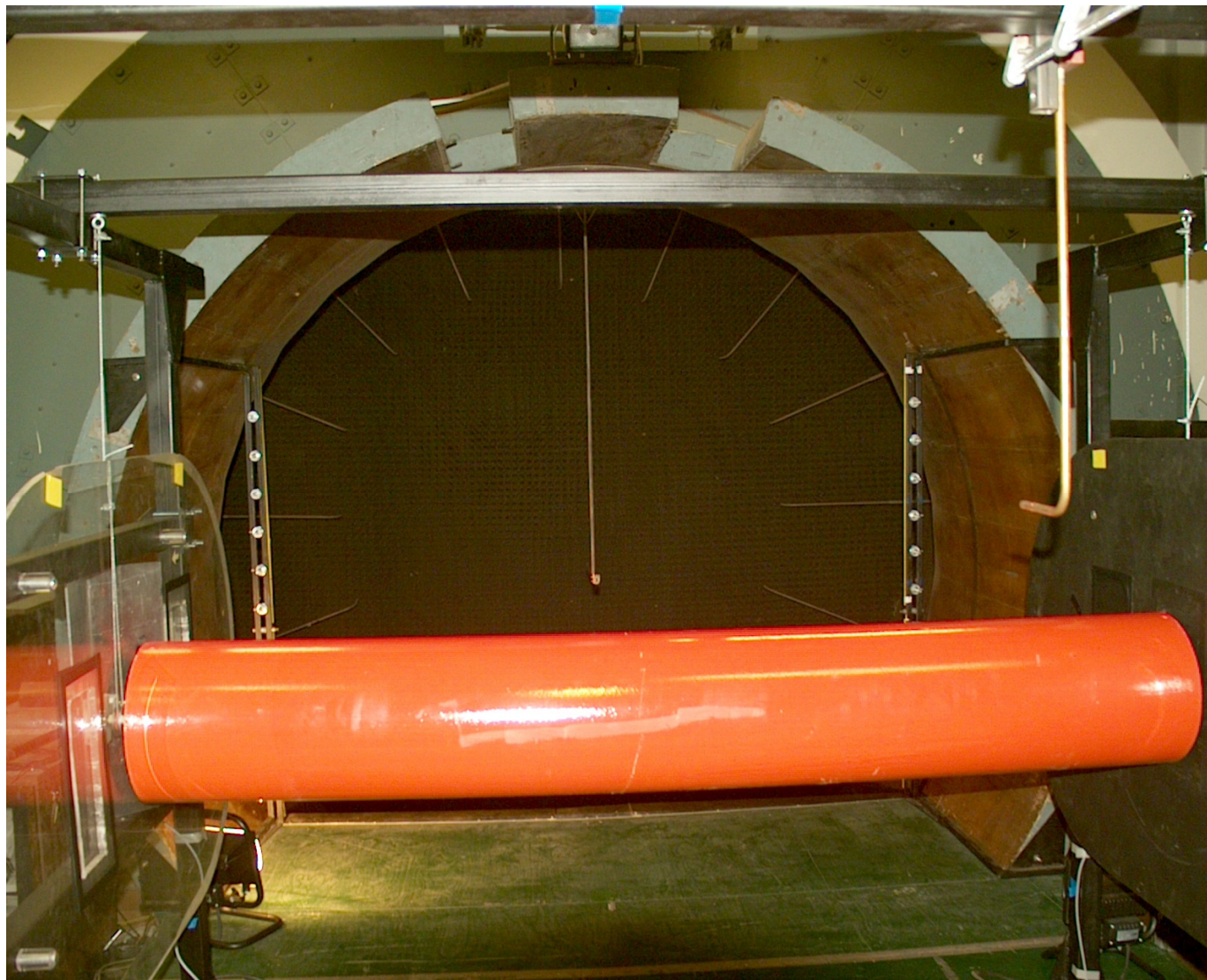
0,308-0,314

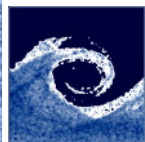
0,247-0,258

0,293-0,305

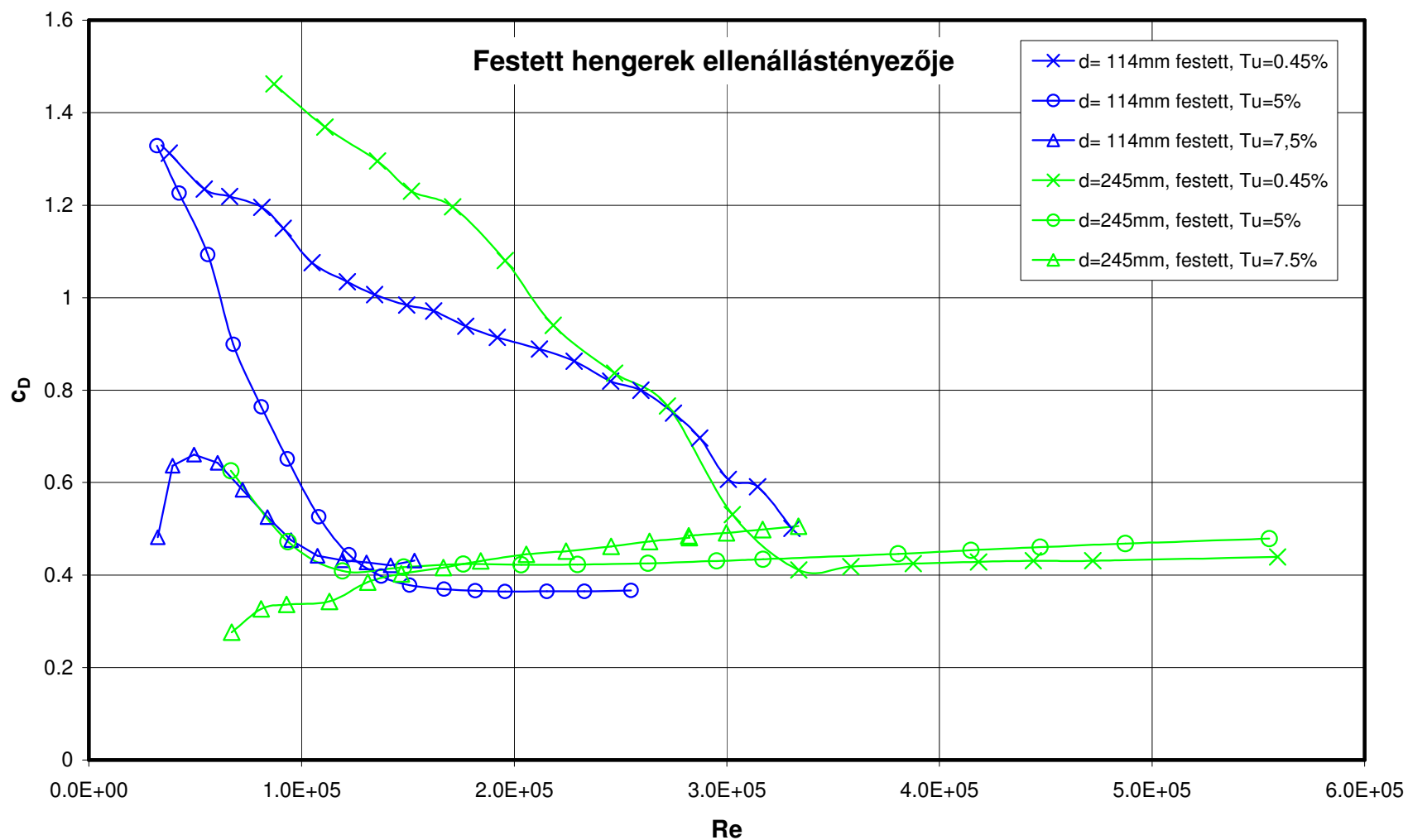


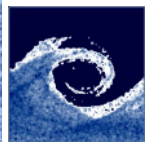
D = 245 mm átmérőjű festett hengeres torony elem a szélcsatornában



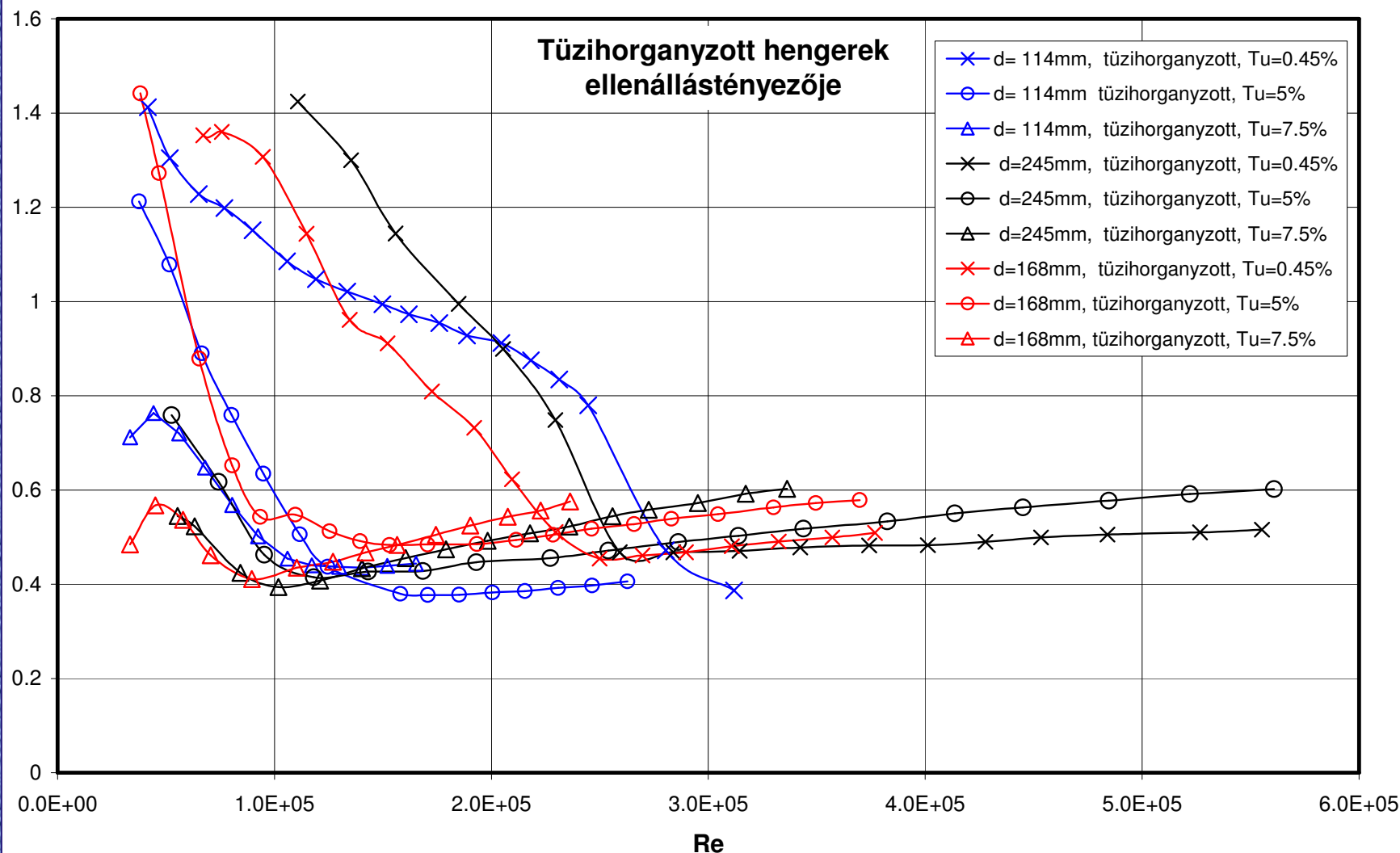


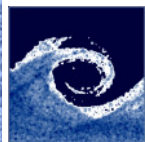
Festett hengerek c_D -Re görbéi különböző turbulenciafokoknál



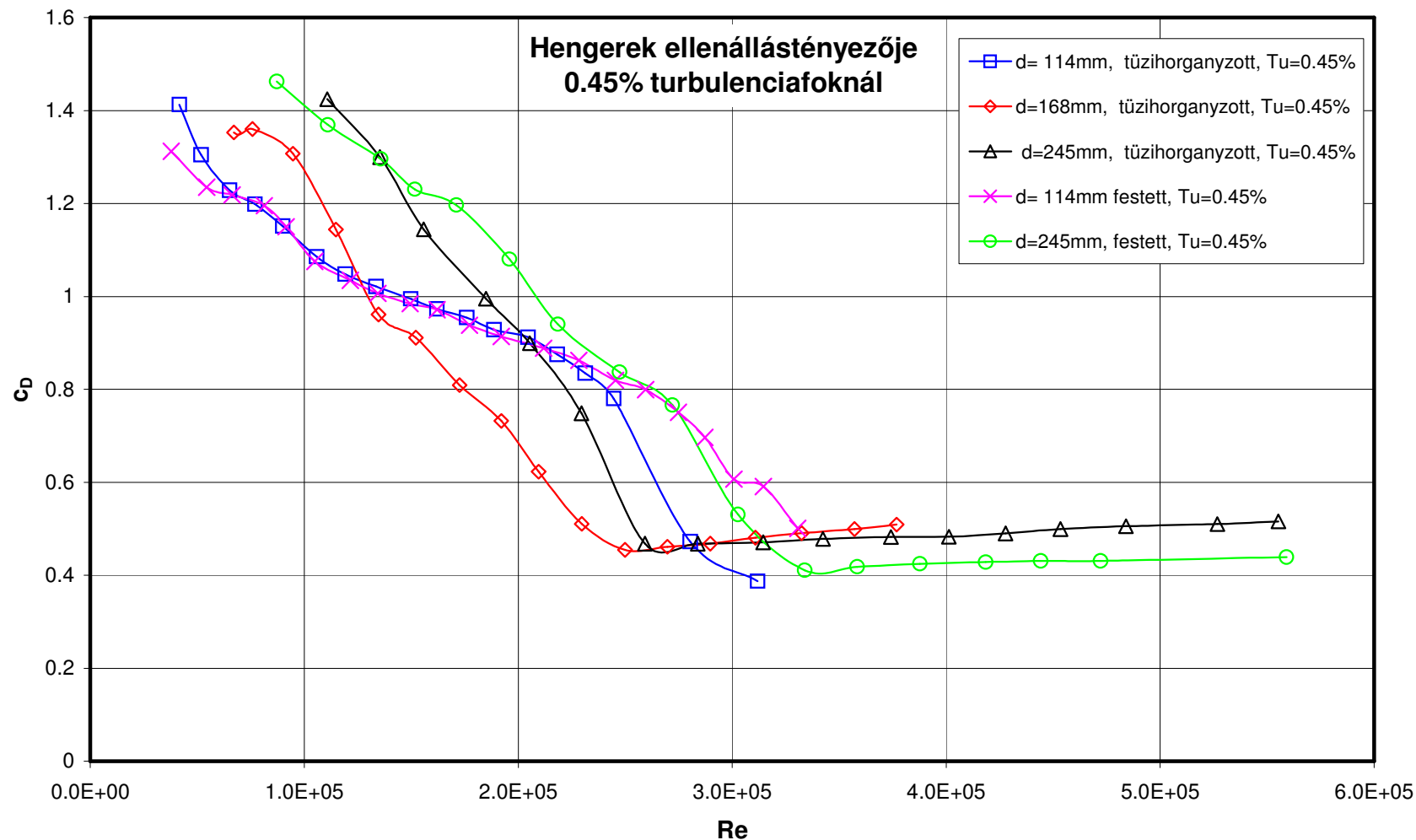


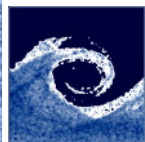
Tűzihorganyzott hengerek c_D -Re görbéi különböző turbulenciafokoknál



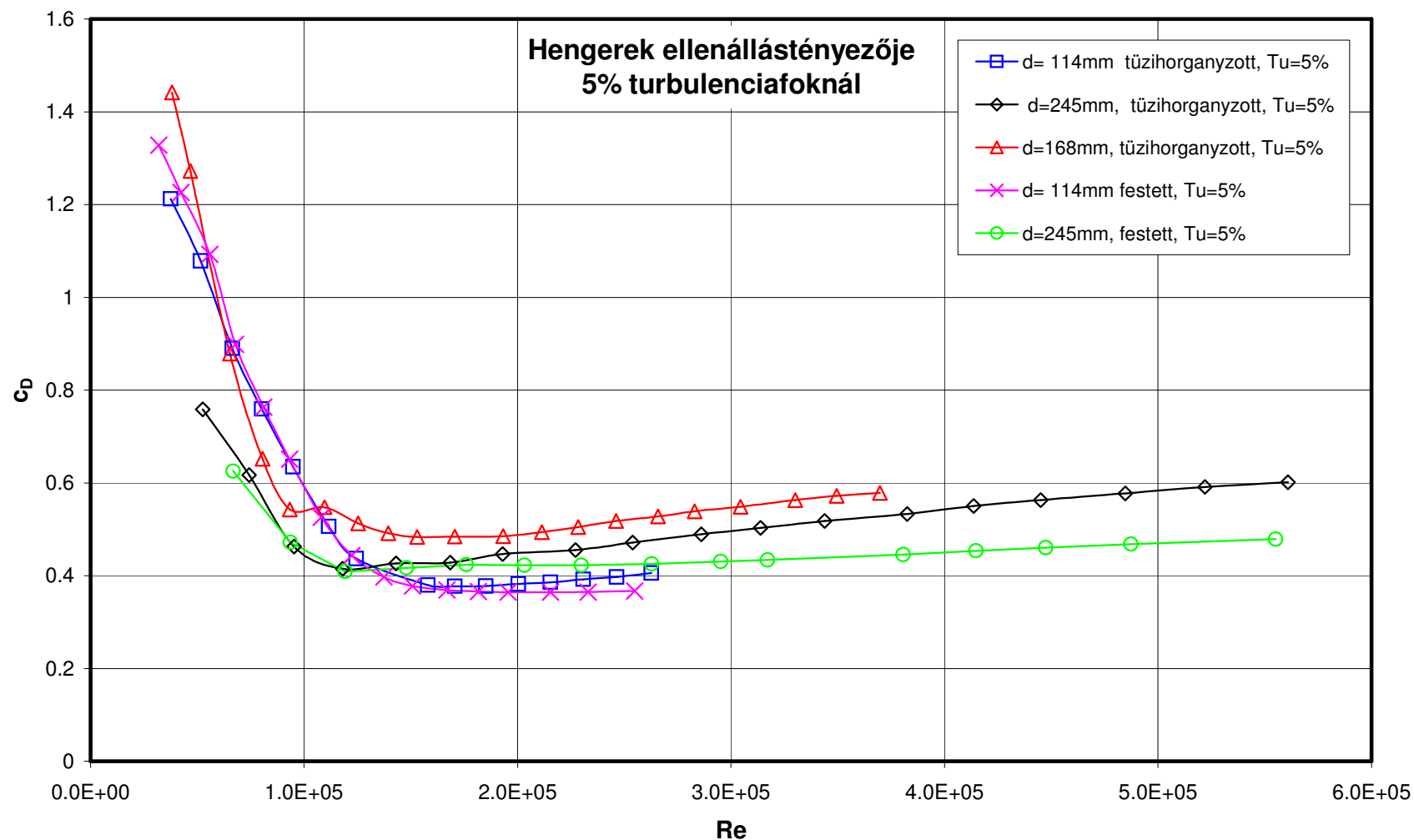


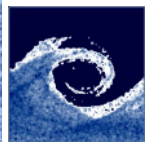
Hengerek c_D -Re göbéi 0,45% turbulenciafokoknál



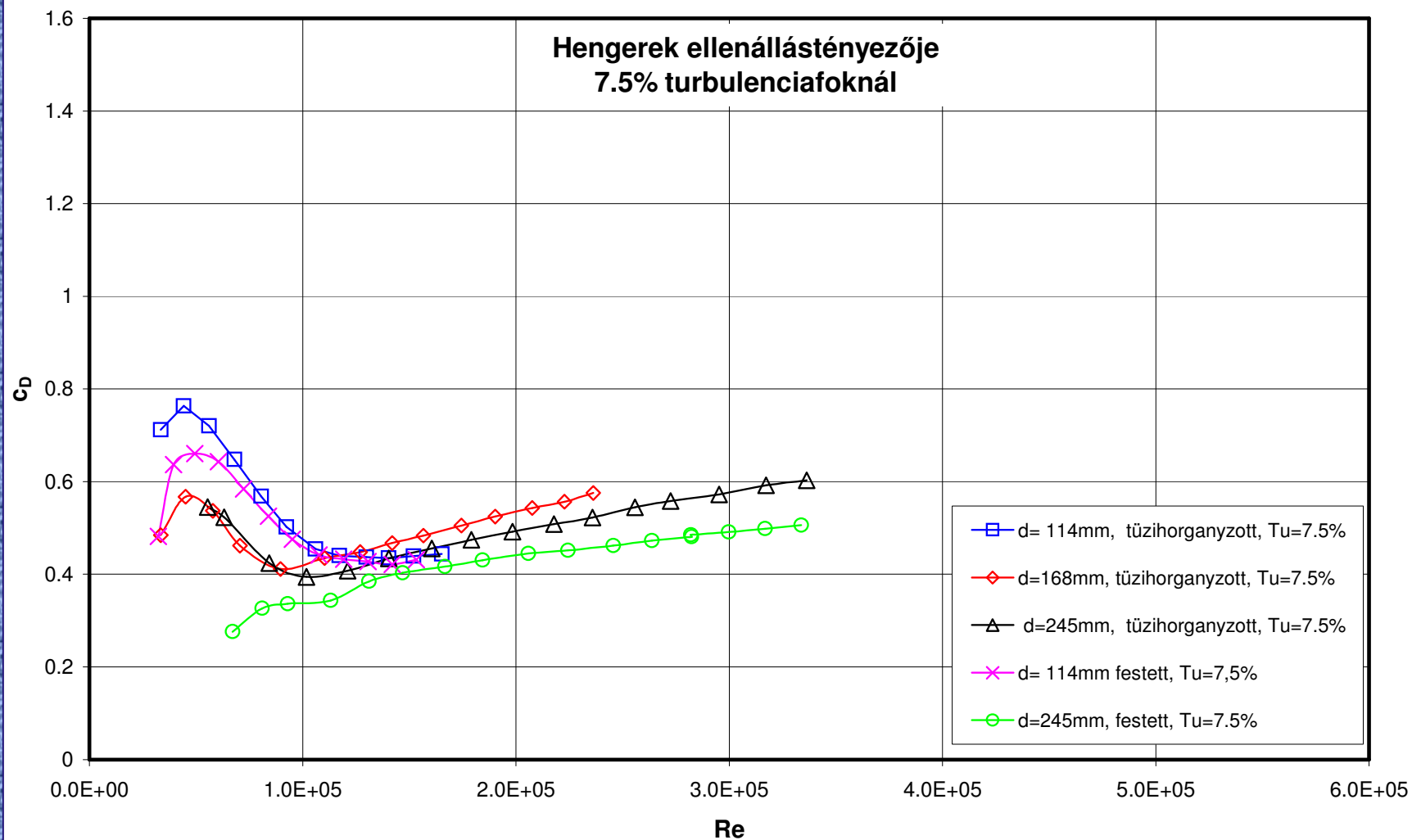


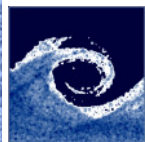
Hengerek c_D -Re görbéi 5% turbulenciafokoknál





Hengerek c_D -Re görbái 7,5% turbulenciafokoknál

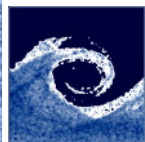




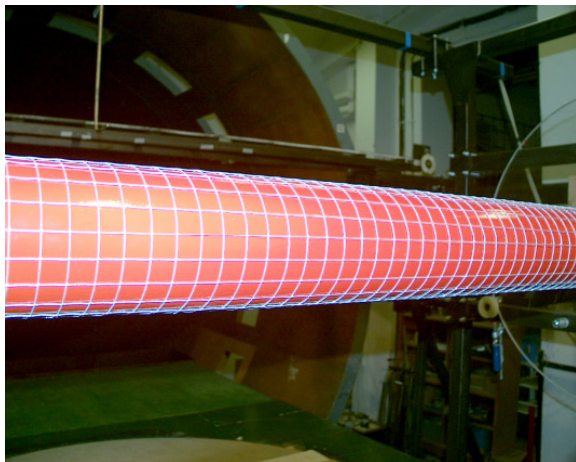
A tartók körüli áramlás jellege a felszín érdessége (beépítettség) függvényében

sup. ($Re > 3 \cdot 10^5$, $c_D < 0,6$)
 Az áramlás a henger körül kis hozzááramlási turbulenciafoknál és festett (sima) felületű hengernél is szuperkritikus.
 sup.5 ($10^5 < Re < 2,5 \cdot 10^5$, $c_D < 0,6$) Az áramlás a festett (sima) felületű henger körül 5 % hozzááramlási turbulenciafoknál is szuperkritikus.

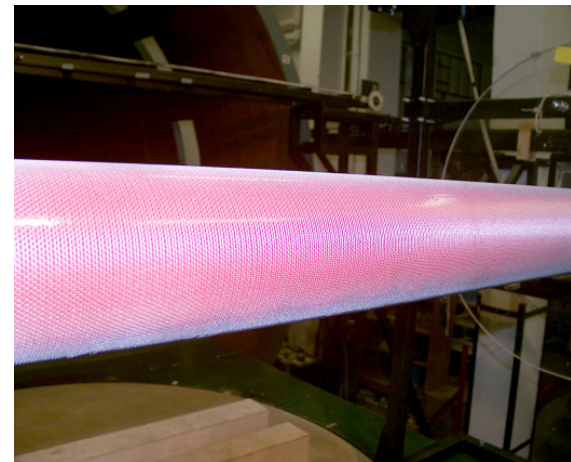
Hengeres tartó D[mm]		245		168		114	
Tartomány határa		-tól	-ig	-tól	-ig	-tól	-ig
Alkalmazás magassága h[m]		0	50	10	70	30	80
I. beépítettségi kategória: Sík felület	Sebesség [m/s]	21,1	28,2	24,9	30,1	27,7	30,6
	$Re \times 10^{-5}$	3,45	4,61	2,78	3,37	2,1	2,32
	Áramlás jellege	Teljes magasságban sup.		Teljes magasságban sup.		Teljes magasságban sup.5	
II. beépítettségi kategória: mezőgazdasági terület.	Sebesség [m/s]	17,5	26,2	21,7	27,5	24,9	28
	$Re \times 10^{-5}$	2,86	4,29	2,43	3,08	1,89	2,13
	Áramlás jellege	Teljes magasságban sup.		Teljes magasságban sup.		Teljes magasságban sup.5	
III. beépítettségi kategória: külváros, Ipartelep	Sebesség [m/s]	12,4	22,5	17,2	24	20,9	24,6
	$<Re \times 10^{-5}$	2,02	3,68	1,93	2,69	1,59	1,87
	Áramlás jellege	5 m-ig sup.5., felette sup.		Teljes magasságban sup.5		Teljes magasságban sup.5	
IV. beépítettségi kategória: Város	Sebesség [m/s]	7,7	17,7	13	20,4	17,1	21
	$Re \times 10^{-5}$	1,26	3,07	1,46	2,28	1,3	1,6
	Áramlás jellege	Teljes magasságban sup.5		Teljes magasságban sup.5		Teljes magasságban sup.5	



Főtartóik érdesítésének módjai



$d = 1 \text{ mm}$ ($d/D = 0,88\%$) 19 mm osztású négyzetes fémhuzal háló



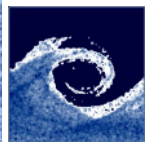
$d = 0,2 \text{ mm}$ ($d/D = 0,18\%$) 2 mm osztású négyzetes fémhuzal háló



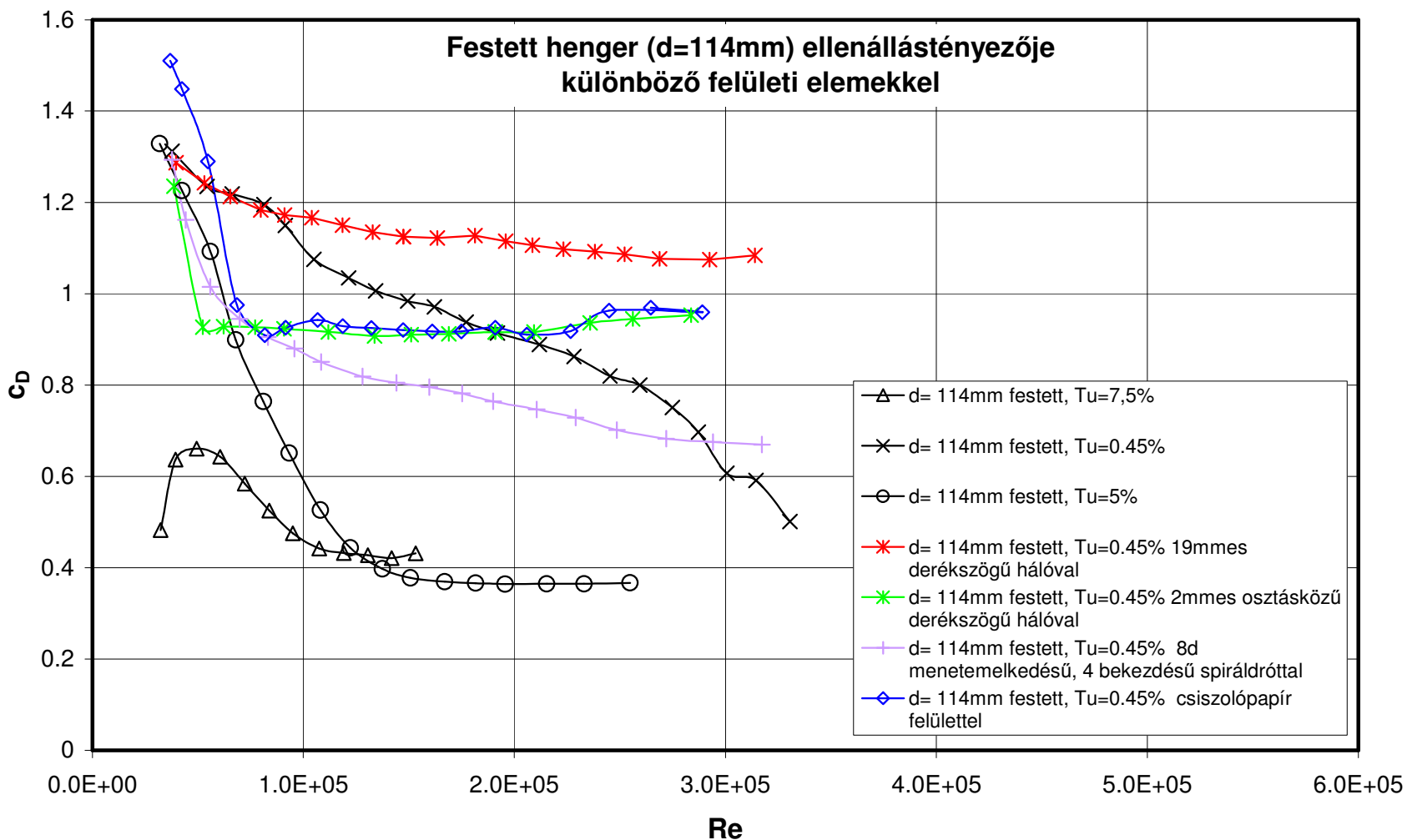
$d = 1 \text{ mm}$ ($d/D = 0,88\%$) fémhuzalból 4 bekezdésű, 8D menetemelkedésű spirál

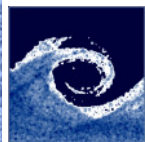


$k_s = 0,4\text{-}0,5 \text{ mm}$ ($k_s/D = 0,4\%$) csiszolópapír

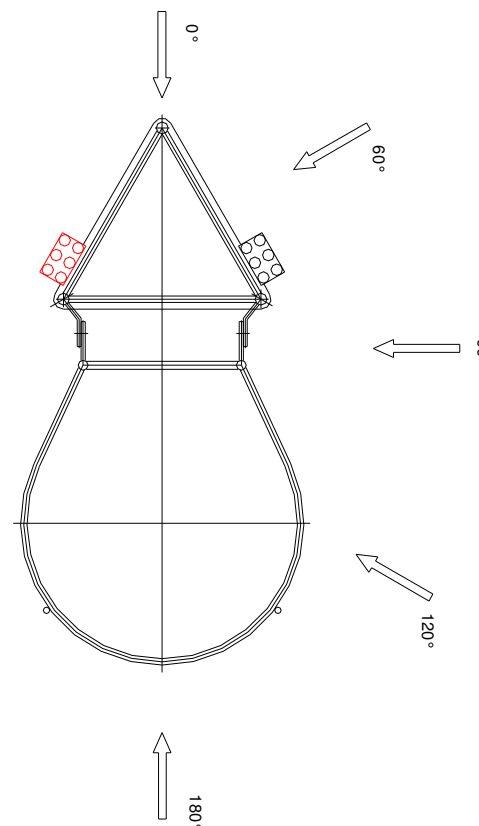
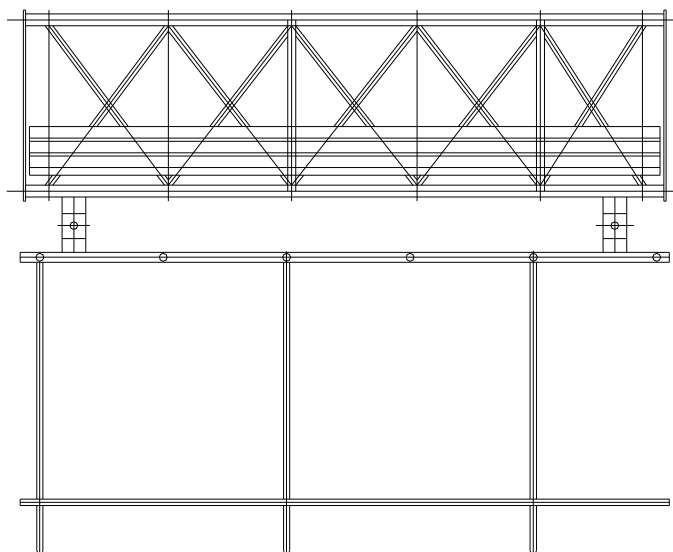


A különböző érdességek hatása a szélérőre

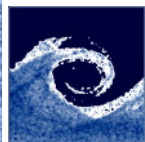




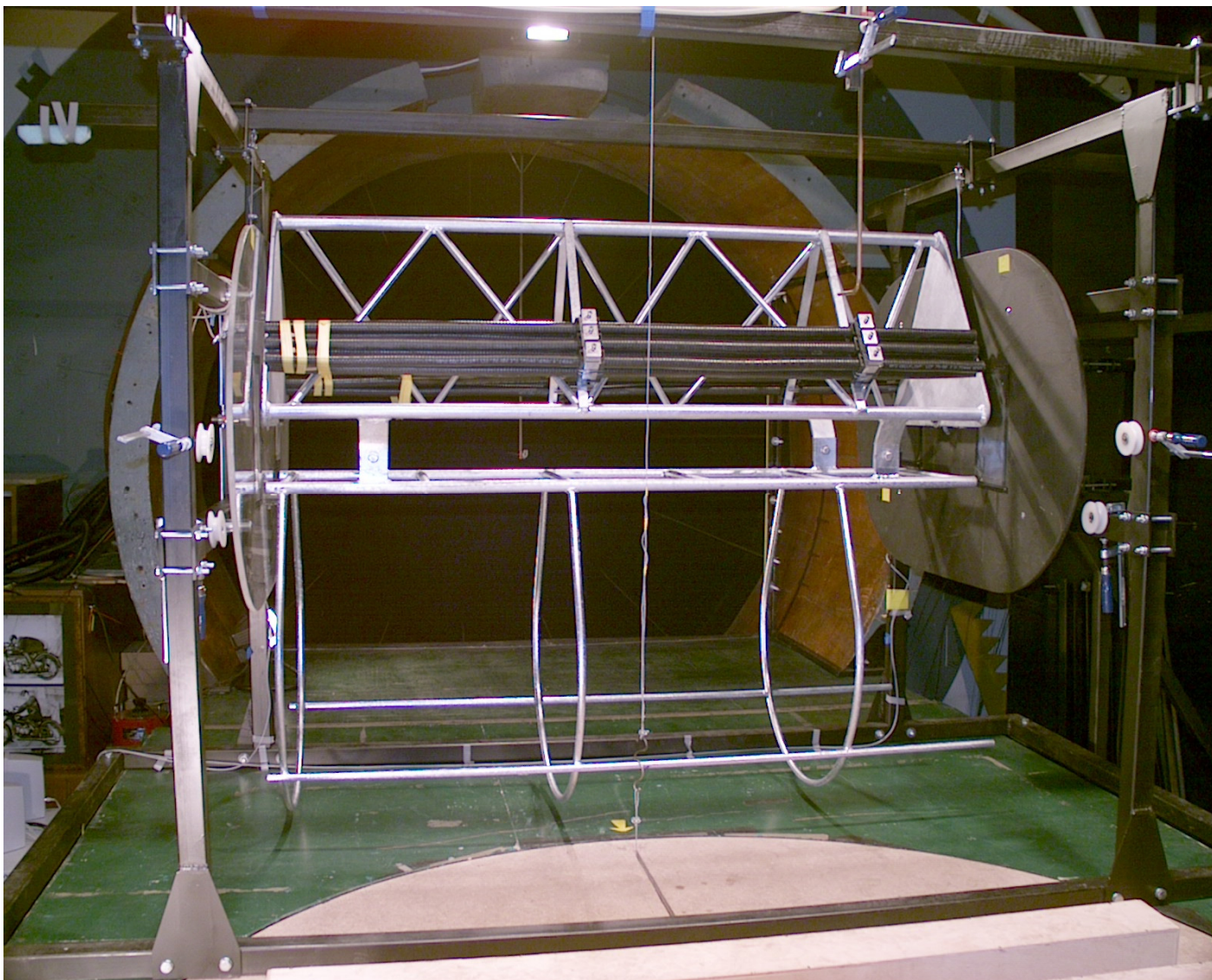
A vizsgált kábeltartó oszlop szakasz, szélirányok

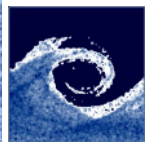


Öt szélirány, $Tu = 0,45\%$ és 5% turbulenciafok, piros kábelek esetenként eltávolítva

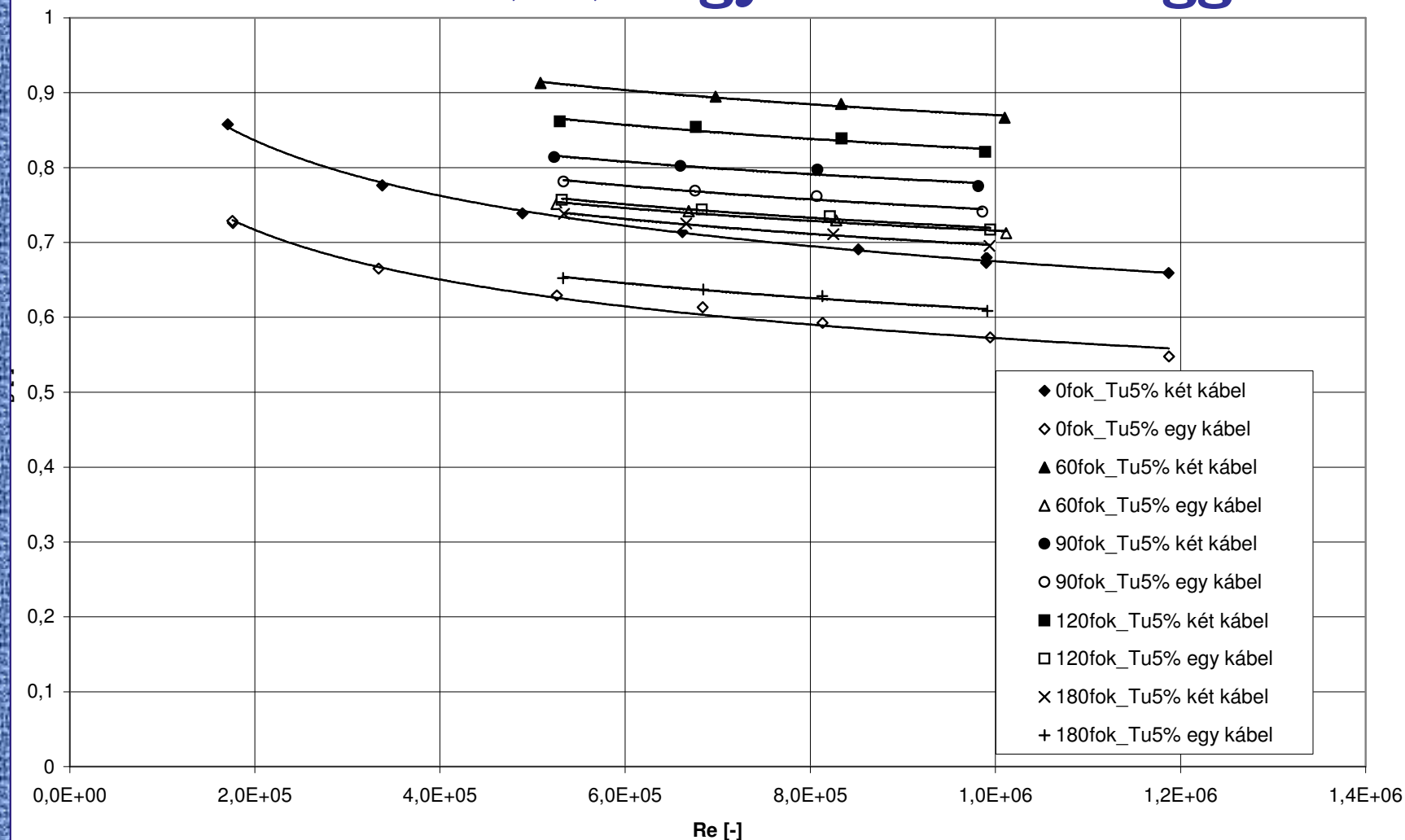


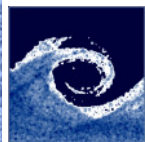
Kábeltartó oszlop szakasz a szélcsatornában



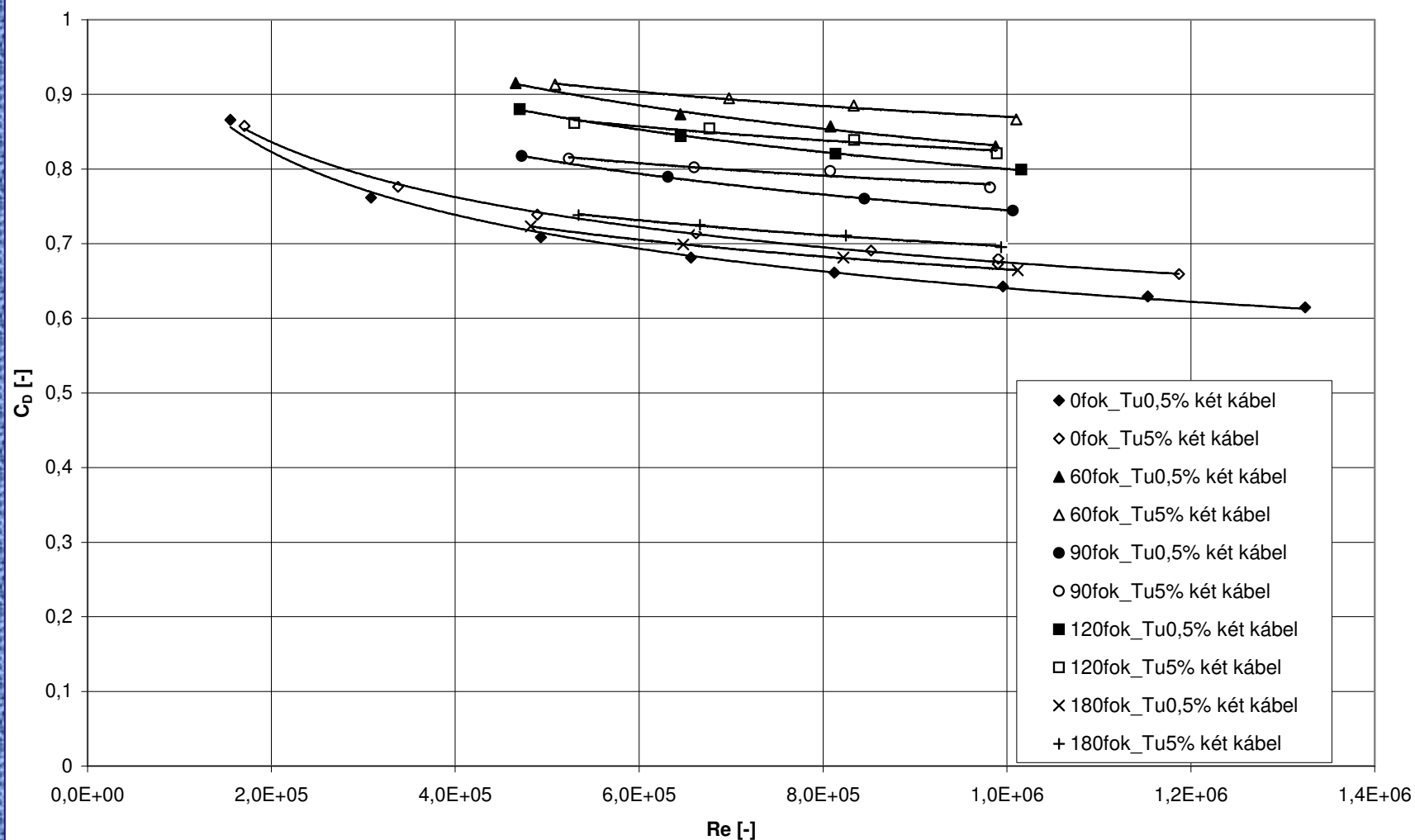


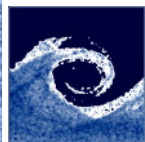
A kábeltartó oszlop (és létra) ellenállástényezője 5% turbulenciafok mellett, 1, vagy 2 kábelköteggel



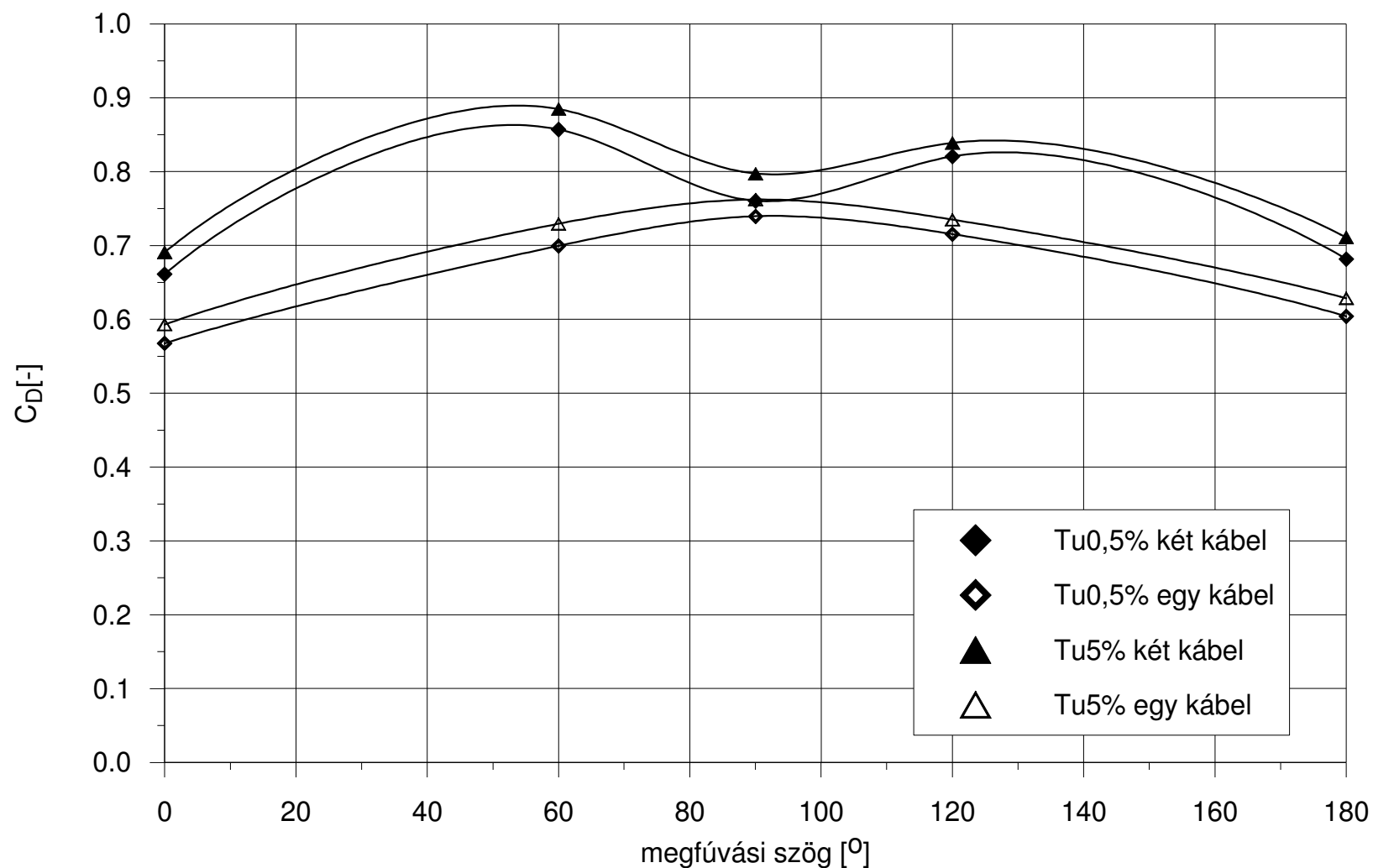


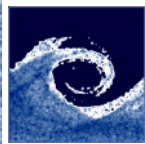
A kábeltartó oszlop (és létra) ellenállástényezője 0,5% és 5% turbulenciafok mellett és 2 kábelköteggel





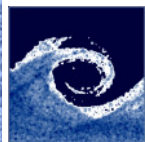
A megfúvási irány, a turbulenciafok és a kábelek számának hatása az ellenállástényezőre





Összefoglalás

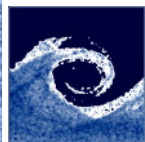
- A) megállapítottuk, hogy a tornyok hengeres főtartói körüli áramlás minden, gyakorlati szempontból fontos esetben szuperkritikus tartományba esik, így a tornyok teherbíró képessége lényegesen meghaladja a szabvány által javasoltat.
- B) megállapítottuk a kábeltartó oszlop és a létra együttes ellenállástényezőjét, és külön a kábelek ellenállástényezőjét.
- C) a hengerek érdesítésével a szakirodalom megállapításaival egybevágóan csak bizonyos Reynolds szám tartományban és csak korlátozott mértékű ellenállástényező csökkenést sikerült elérni. Az érdesítésre a legkisebb átmérőjű tartóknál lehet szükség, ezért ott célszerű lenne az érdesítés technológiáját $k_s = 0,5$ mm szemcsékre kidolgozni.
- D) a mérések arra mutatnak, hogy a szerkezeti elemek közötti kölcsönhatás okozatja a bonyolult szerkezetek esetén az ellenállástényező növekedését a megfúvási turbulencia növekedésével: a kis turbulenciájú hozzááramlás esetén szél felőli hengeres elemeken létrejövő szubkritikus áramlás miatti intenzív örvényleválás következtében nagyobb lehet a turbulencia, mint szuperkritikus viszonyokat okozó nagyobb megfúvási turbulenciafok esetén. Az eddigi vizsgálatok eredményei alapján az alábbi mérések elvégzése látszik indokoltnak.



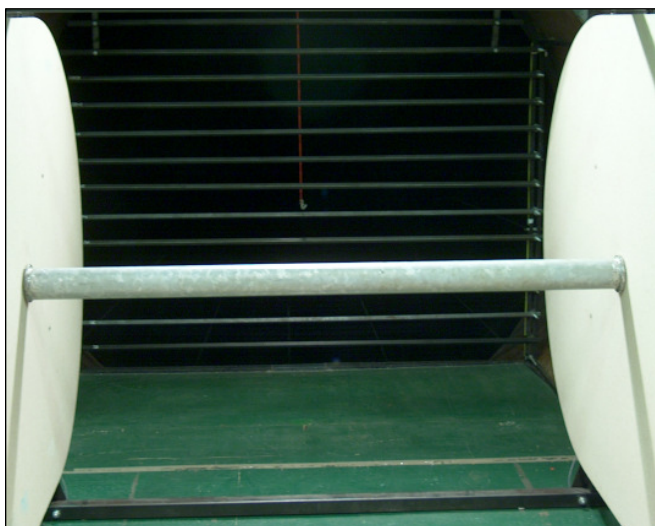
Fontosabb mért változatok

6	48	tűzihorganyzott	
7	89	tűzihorganyzott	
8	60 (zártszelvény)	tűzihorganyzott	3 szélirány
9	133 (+megerősítés bilincsel és anélkül)	festett, kopott	5 szélirány
10	108+75 torony szekció	tűzihorganyzott	4 szélirány

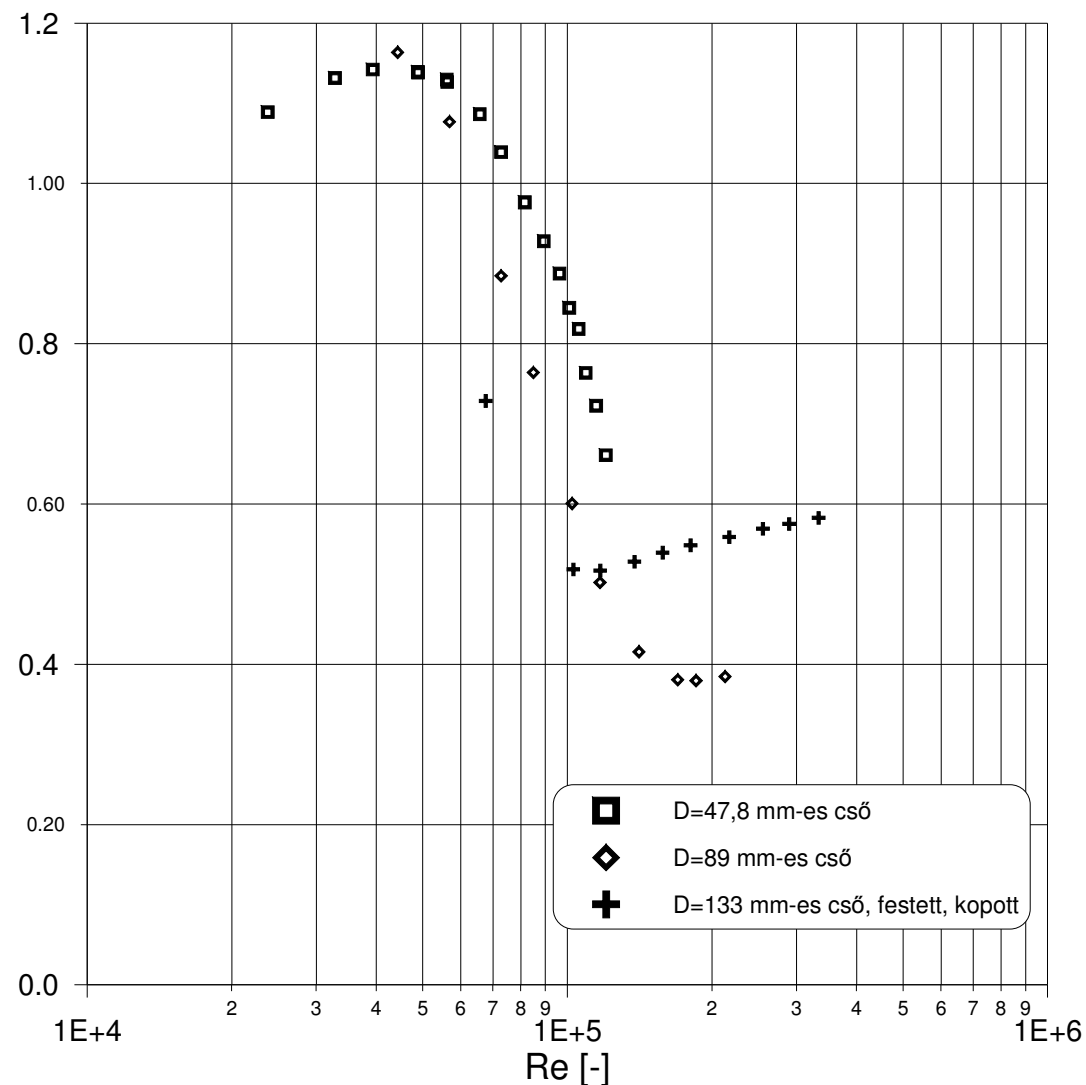
$v_{\max} = 36 \text{ m/s}$, turbulenciafok 5%

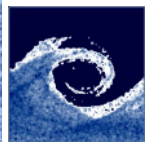


48, 89 és 133 mm átmérőjű kör keresztmetszetű tartókra ható szélterő mérése

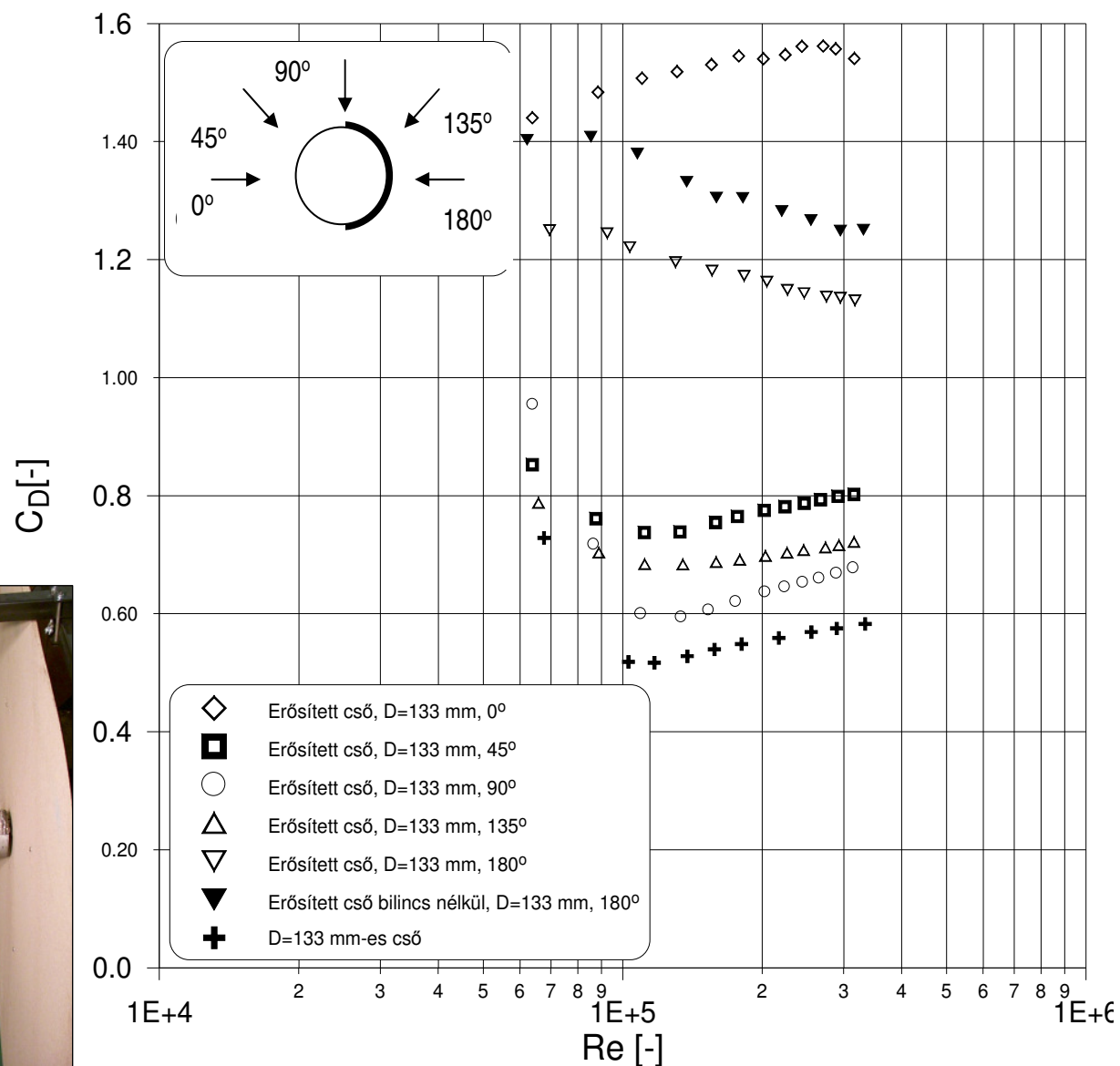
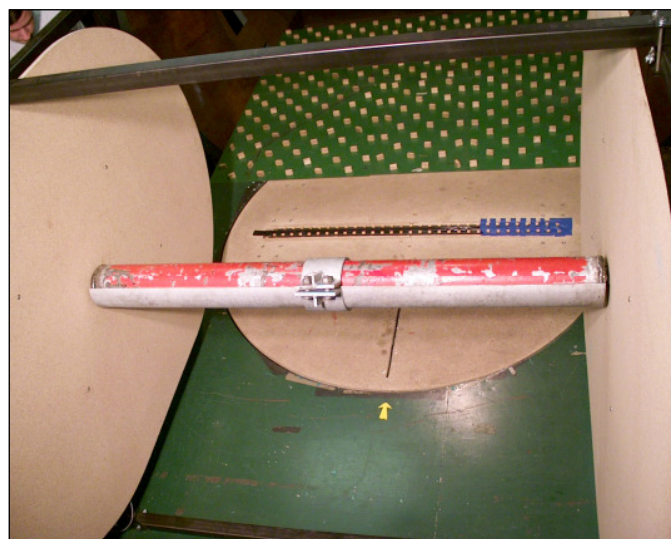


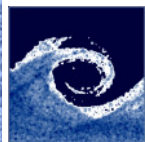
$C_D[-]$



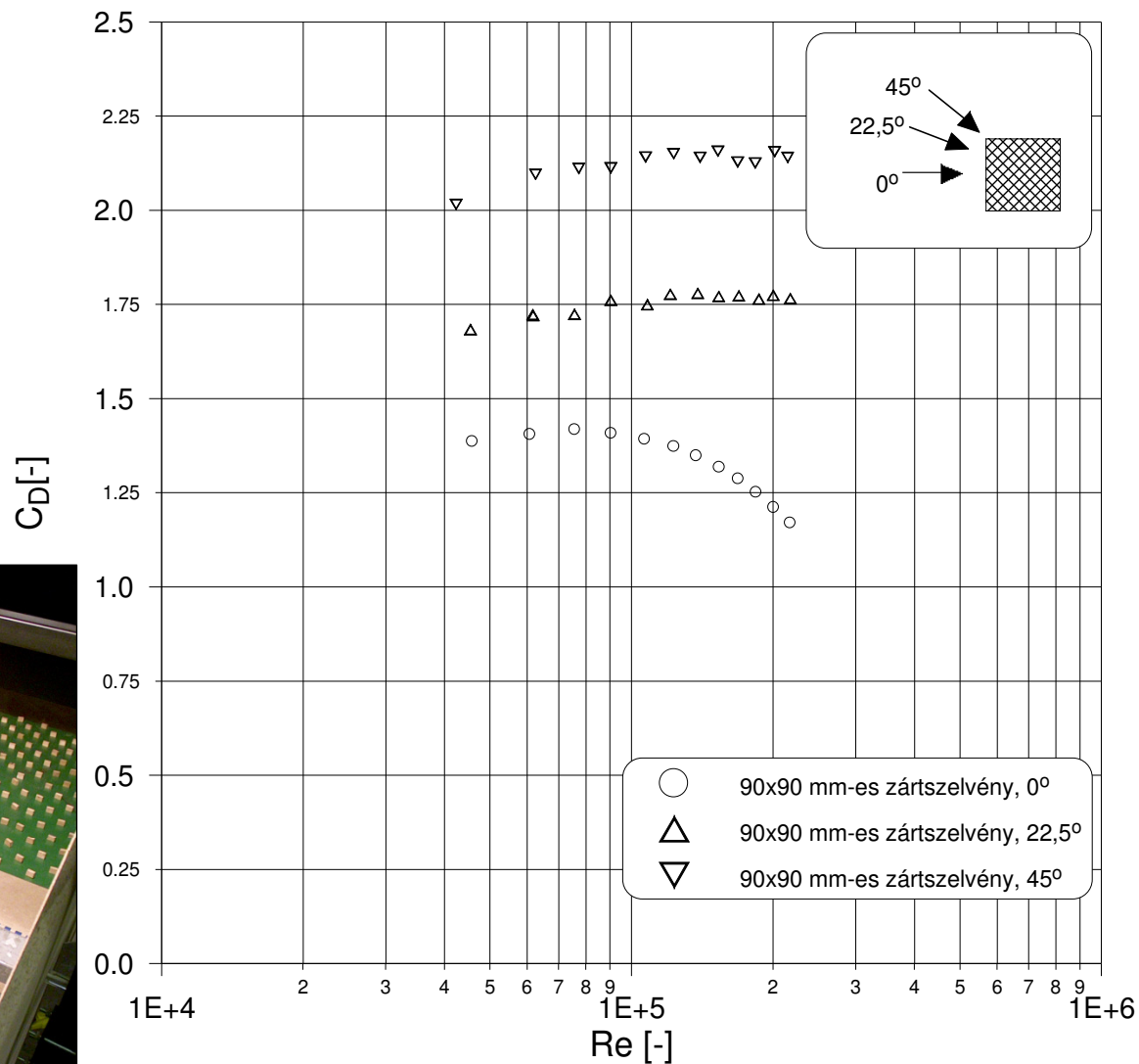
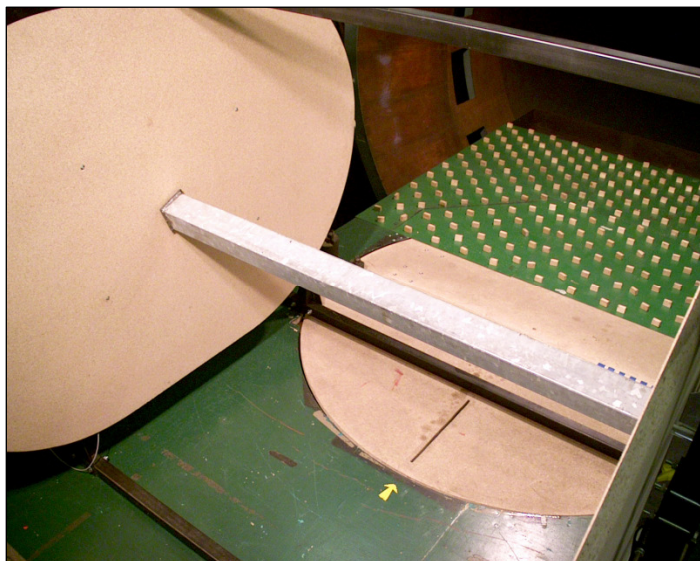


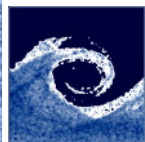
A 133 mm átmérőjű cső, megerősítés és bilincs mérése



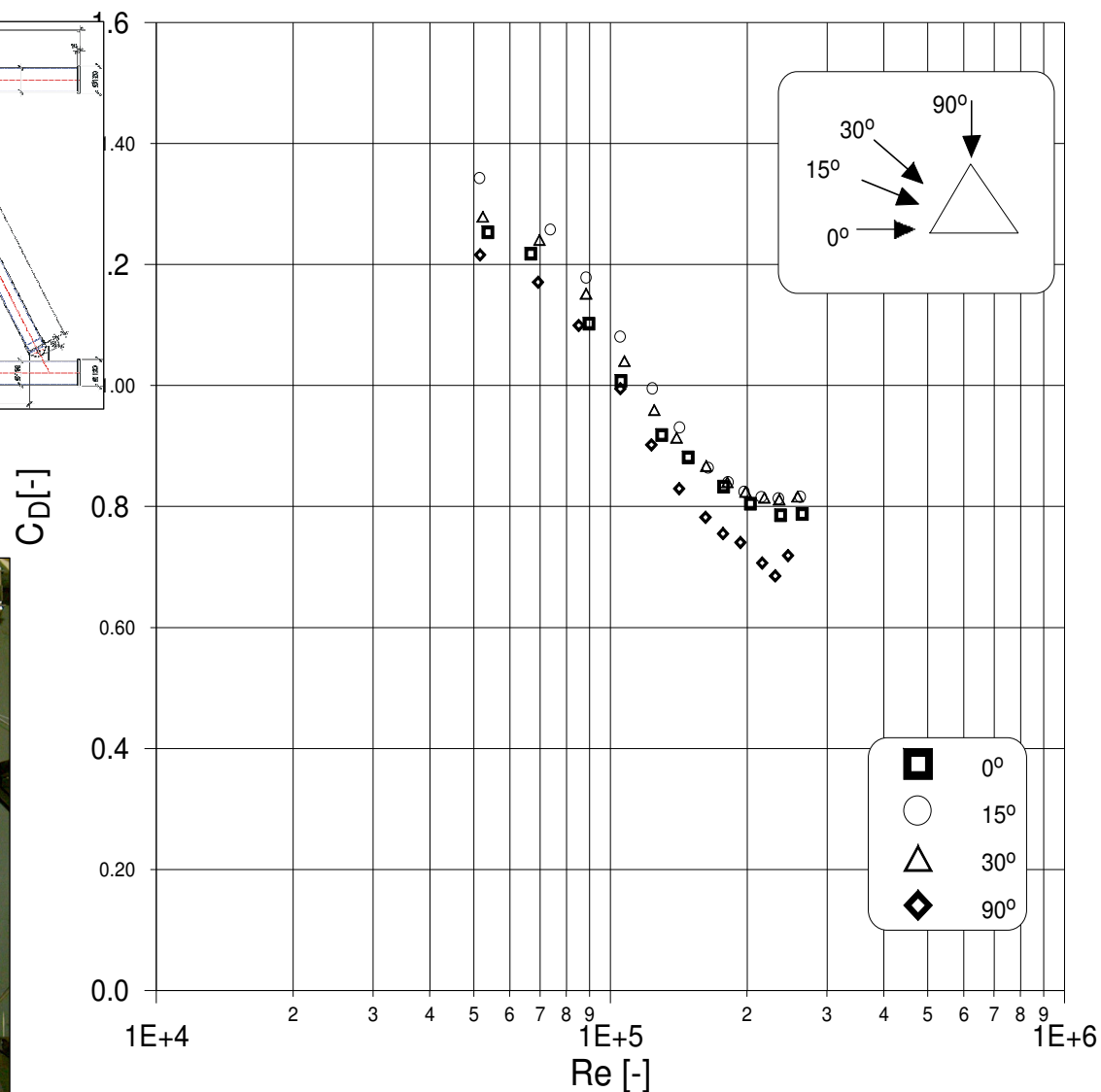
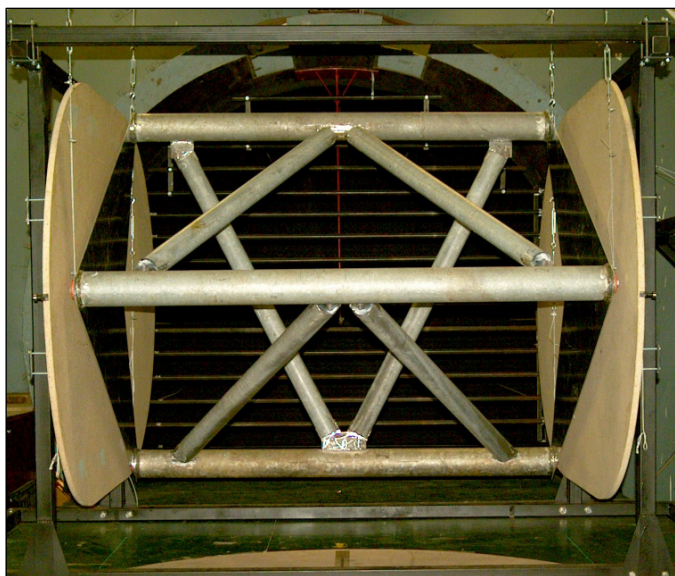
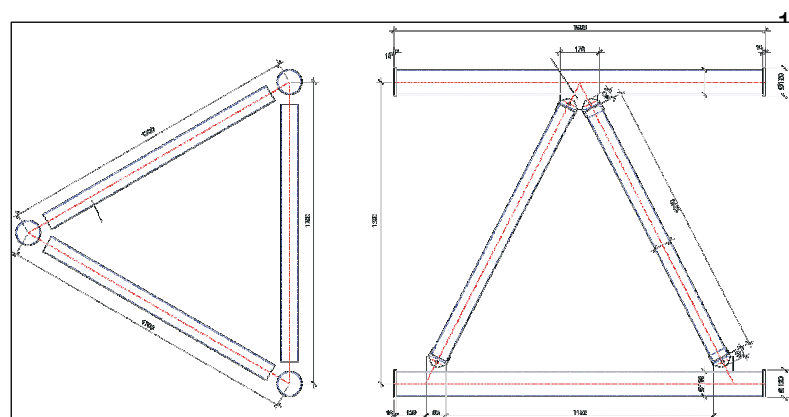


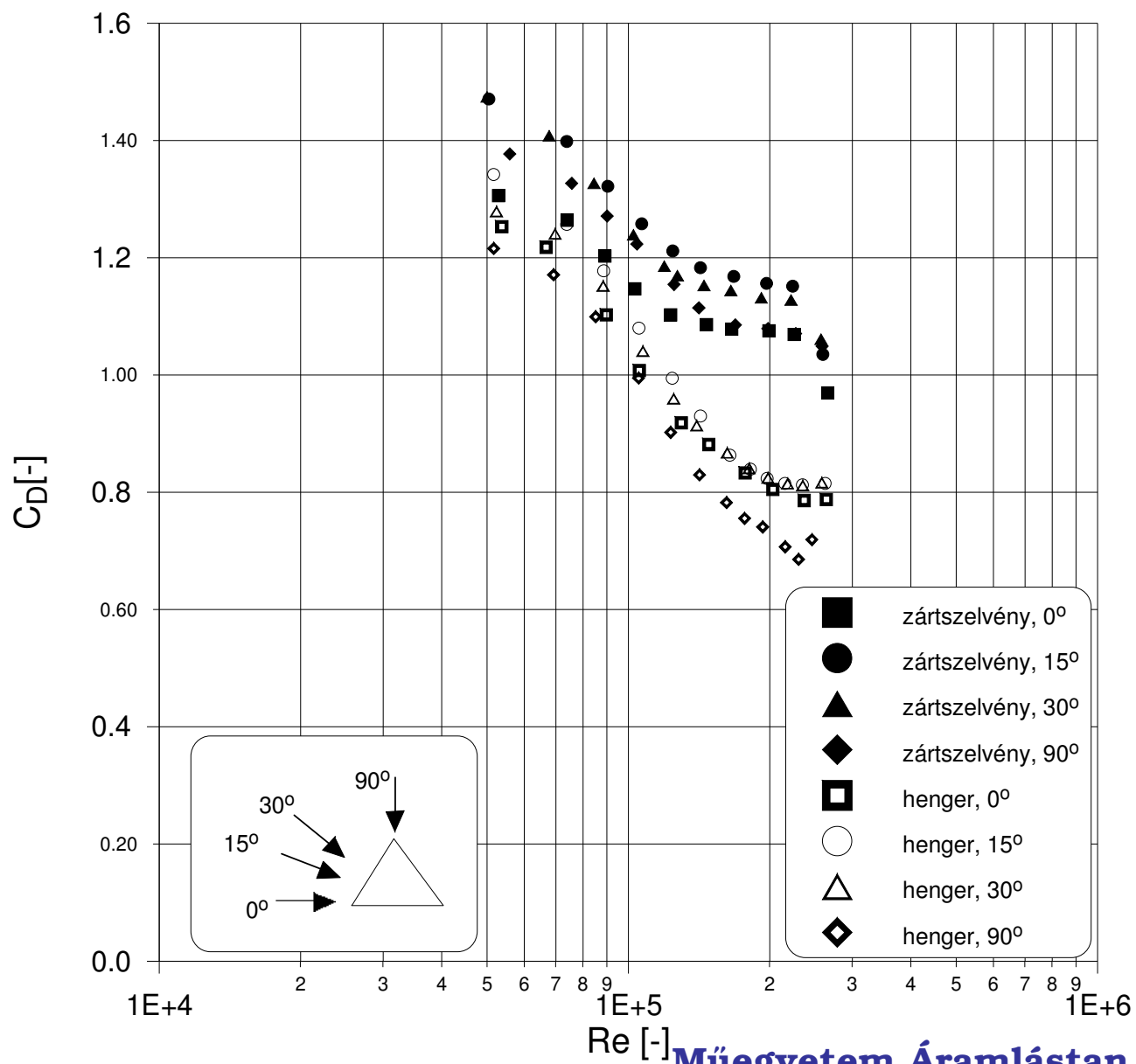
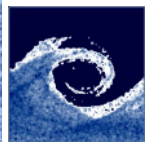
90 mm oldalhosszúságú zárt szelvényre ható ellenállás erő szélerő mérése

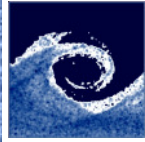




108/75 mm-es torony szekcióra ható szélerő meghatározása

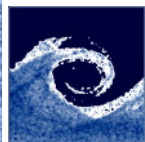






Összefoglalás 1.

- a) A mérési eredmények általánosságban összhangban vannak a szakirodalomban közölt tapasztalatokkal,
- b) A terhelés szempontjából mértékadó 36 m/s körüli szélsősebességnél a 47,8 mm átmérőjű tartó kivételével mindegyik vizsgált (89 és 133 mm és a torony szekció 75 és 108 mm átmérőjű) hengeres tartó a szuperkritikus tartományban van, így 1,2 helyett az ellenállástényező a tartó érdességétől és az áramlás turbulenciafokától függően 0,4 - 0,6 közötti értéket vesz fel.
- c) A szuperkritikus áramlási tartományban, ahol a tartók mögötti leválási buborék, és kisebb sebességű nyom sokkal kisebb kiterjedésű, mint szubkritikus tartományban, kevésbé fontos szerepet játszik a tartók kölcsönhatása, a takarás.



Összefoglalás 2.

1 m hosszú tartóra, ill. oszlop szekcióra ható szélerő

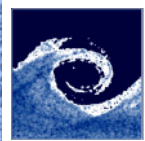
D mm	v_{ref} m/s	10	15	20	25	30	35	$c_D=1,2^{**}$	
47,8	erő N/m	3,24	7,35	12,61	17,20	22,71	22,83	42,16	0,541
89		5,76	8,77	10,68	13,35	17,78	24,85	78,50	0,317
90 zártsz		7,56	17,01	28,72	44,21	60,75	78,05	130,63***	0,598
133		4,46	9,33	16,91	27,43	40,93	56,69	117,31	0,483
Torony*		24,68	46,14	74,44	106,81	150,40	195,40	418,73	0,467

* a torony 1 m hosszúságú darabjára

** $v_{\text{ref}} = 35$ m/s sebességnél $c_D = 1,2$ ellenállástényezővel számolva

*** zártszelvénynél $c_D = 2$ -vel számolva

Az utolsó oszlopban a szélcsatorna kísérletek alapján meghatározott és a $c_D = 1,2$ (ill. zártszelvénynél $c_D = 2$) ellenállástényezővel számolt erők hányadosa látható. Ez a 47,8 mm átmérőjű, kör keresztmetszetű tartónál 54%, a nagyobbaknál és a torony szekciónál: 32 - 46 %. A zártszelvénynél közel 60% adódott, de itt a ferde megfúvás esetén jelentősen nő a szélerő.



BME
Áramlástan
Tanszék



Kármán Tódor
Szélcsatorna
Laboratórium

Köszönöm a figyelmüket!



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Áramlástan Tanszék