

Lézeroptikai mérési módszerek az áramlástechnikában

Dr. Suda Jenő Miklós
egyetemi adjunktus
suda@ara.bme.hu

Áramlástan Tanszék

Meghívott előadók:
Balczó Márton tudományos segédmunkatárs
Bella Szabolcs műszaki igazgató (LaserSystems Kft.)

- 1.) Gépészmérnök MSc / Áramlástechnika szakirány hallgatóinak
(Lézeroptikai mérési módszerek az áramlástechnikában BMEGEÁTMG19)
- 2.) Mechatronikai mérnök BSc / Gépészeti modellezés szakirány hallgatóinak
Korszerű áramlásmérés (BMEGEÁTAM03, AM13) labor tárgy rész

TARTALOM (tervezet)

Hét	Előadó	Téma
1.	Suda J.M.	Bevezetés I., probléma felvetés /"mit-miért-mióta-mivel..?", „mit kell tudni az ...-ról?„/
2.	Suda J.M.	Bevezetés I. (folyt.)
3.	Bella Sz.	Iparban alkalmazott lézer fényforrások jellemzői, fajtái, osztályozása, lézervédelem
4.	Bella Sz.	Ipari lézer-alkalmazások (mérés, jelölés, mikromegmunkálás, vágás, hegesztés)
5.	Suda J.M.	Áramlásba juttatott részecskék optikai / dinamikai jellemzése és alkalmazhatósága I.
6.	Suda J.M.	Különböző lézer-optikai mérési módszerek elmélete, elvi felépítése és működése, sebességtér 1D-2D-3D mérése, igények „felhasználói” oldalról, II.
7.	Balczó M.	LDA: Lézer Doppler Anemométer (LDA) I.
8.	Balczó M.	LDA: Lézer Doppler Anemométer (LDA) II.
9.	Balczó M.	LDA: Lézer Doppler Anemométer (LDA) laborbemutató
10.	Suda J.M.	PDA: Fázis Doppler Anemométer (PDA), alkalmazásra példák
11.	Suda J.M.	PIV: Particle Image Velocimetry (PIV) és Particle Tracking Velocimetry and Sizing /PTV(S)/, alkalmazásra példák
12.	Suda J.M.	PIV: Particle Image Velocimetry (PIV) és Particle Tracking Velocimetry and Sizing /PTV(S)/, alkalmazásra példák
13.	Suda J.M.	Zárthelyi
14.	Suda J.M.	Feladat konzultáció

Megjegyzés: Ne lepődjenek meg a Gépész MSc hallgatók, mert lézer Doppler sebességmérés (LDV) ismereteket Dr. Paál György: Az áramlástechnika válogatott fejezetei (BMEGEVGMG01) c. tárgy keretében is előadja.

1. Előadás /BMEGEÁTMG19 Lézeroptikai mérési módszerek az áramlástechnikában/

Jegyzet, tankönyv, felhasználható irodalom:

Az Áramlásan Tanszék weblapján a tárgyhoz tartozó letölthető anyagok helye:

<http://www.ara.bme.hu/oktatas/tantargy/NEPTUN/BMEGEATMG19>

<http://www.ara.bme.hu/oktatas/tantargy/NEPTUN/BMEGEATAM03> illetve AM13

Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics

(Eds.: Tropea, Yarin, Foss), ISBN 978-3-540-25141-5 (Springer-Verlag Berlin 2007)

Measurement Techniques in Fluid Dynamics – An Introduction

(VKI Lecture Series 2001)

Advanced measurement techniques

(VKI Lecture Series, 1998.)

Optical velocity measurements

(VKI Lecture Series 1994.)

Laser Doppler Velocimetry

(Dantec website: www.dantecdynamics.com)

Particle Image Velocimetry - A Practical Guide

(Eds.: Raffel/Willart/Kompenhans) Springer-Verlag, Berlin 1998, ISBN 978-3-540-72307-3

Flow Visualization - Techniques and Examples

(Eds.: Smits&Lim), Imperial College Press, London, 2003

Laser Doppler and Phase Doppler Measurement Techniques

(Albrecht, Damaschke, Borys, Tropea: Springer-Verlag)

Laser Techniques and Applications in Fluid Mechanics

(Springer Verlag ISBN 3-540-56879-4)

Speckle Metrology (Eds: R.S. Sirohi, , Marcel Dekker, New York, 1993, ISBN 0-82478-932-6

Holographic Interferometry: Principles and Methods

(Kreis) Akademie Verlag, 1996, ISBN 3-05501-644-0

Handbook of Holographic Interferometry

(Kreis) Wiley-VCH, Weinheim 2005, ISBN 3-527-40546-1

Optical Measurement Techniques and Applications

(Ed. Pramod K. Rastogi); Artech House 1997, ISBN 0-89006-516-0

Bevezetőként az első előadásokon a tárgyban felmerülő alapvető kérdésekről lesz szó:

- a) Mit szeretnénk egyáltalán mérni?
- b) Mely mennyiségek mérésére alkalmas az áramlástechnikában?
- c) Miért használjunk épp lézeroptikai módszeren alapuló méréstechnikát?
- d) Mióta lehet használni?
- e) Melyek az előnyök / hátrányok?
- f) Méréstechnika korlátai?
- g) Mit mérünk?
- h) Seeding / tracer problematika?
- i) 1D / 2D / 3D
- j) Mit kell tudni a lézer fényforrásról?
- k) Mit kell tudni áramlástanból?
- l) Mit kell tudni optikából?
- m) Mit kell tudni kétfázisú áramlásokról?
- n) Mit kell tudni szemcsedinamikából?
- o) Mit kell tudni méréstechnikából? (adatgyűjtés, -feldolgozás, -kiértékelés)
- p) Mit kell tudni digitális képalkotásról? (képfeldolgozás, kamera/objektív)

**Áramlásba juttatott részecskék
típusok / méretek
A szállító közegben való viselkedés
„seeding / tracer” problémakör**

POR - Dust:

size range: $d \geq 0,2$ [μm]

description: solid particles, produced by breaking or attrition, abrasion, wearing of solid substances, perceptible to the eye, the diameter is larger than the wave length of light.

FÜST - Smoke (fume):

size range: $d \leq 1$ [μm]

description: solid or liquid particles or droplets, originated from condensation or chemical reaction, in most cases chain-like structures. Produced at combustion, chemical processes etc.

KÖD - Mist (fog):

size range: $0,1 \leq d \leq 200$ [μm]

description: liquid droplets originated from steam condensation or by atomization, spraying. The mist droplets and the saturated steam of that liquid are in equilibrium state.

0.0001 μm 0.001 μm 0.01 μm 0.1 μm 1 μm 10 μm 100 μm 1 mm 10 mm

Solid		←	Smoke	→	←	Dust	→									
Liquid		←	Mist	→	←	Spray	→									
Soil		←	Clay	→	←	Silt	→	←	Fine Sand	→	←	Coarse Sand	→	←	Gravel	→
Athmospheric		←	Smog	→	←	Clouds, Smog	→	←	Mist, drizzle	→	←	Rain	→			
Typical particles and gas dispersoids	<p>Gas molecules</p>	←	Rosin smoke	→	←	Tekstile Dusts	→	←	Fertilizer, Limestone	→						
		←	Oil Smokes	→	←	Tobacco	→	←	Coal Dust	→						
		←	Metallurgical dusts and fumes	→	←	Amm.cl.fumes	→	←	Cement Dust	→						
		←	Carbon Black	→	←	Recovery boiler dust	→	←	Milled Flour	→	←	Beach Sand	→			
		←	Paint Pigments	→	←	Pulverized Coal	→	←	Pollens	→						
		←	Zinc Oxide Fume	→	←	Insecticide Dusts	→	←	Plant Spores	→						
		←	Combustion Nuclei	→	←	Spray Dried Milk	→	←	Hydraulic Nozzle Drops	→						
		←	Atmospheric dusts	→	←	Sea Salt Nuclei	→	←	Pneumatic Nozzle Drops	→						
		←	Viruses	→	←	Plastic cutting	→	←	Torula - yeast dust	→						
		←	Fly Ash	→	←	Bacteria	→	←	Human hair	→						
Behaviour in human body	←	Exhaleables	→	←	Air Cells	→	←	Upper Respiratory Passages	→	←	Nose and throat	→				
Charging mechanism		←	Diffusion Charging	→	←	Both Charg. Mech.	→	←	Field Charging	→						
Principles for particle size analysis		←	Impact	→	←	Permeability	→	←	Visible to eye	→						
		←	Electrical mobility	→	←	Settling time	→	←	Scattering	→						
		←	Diffusion	→												

a/x : átlagos relatív távolság

Let's calculate the c [kg/m³] mass concentration of n particles evenly distributed in a particle-gas mixture having a volume of V_{g+p} . Let's assume that each particle is sitting in the center of a cube. (see Figure below).

The concentration can be calculated:

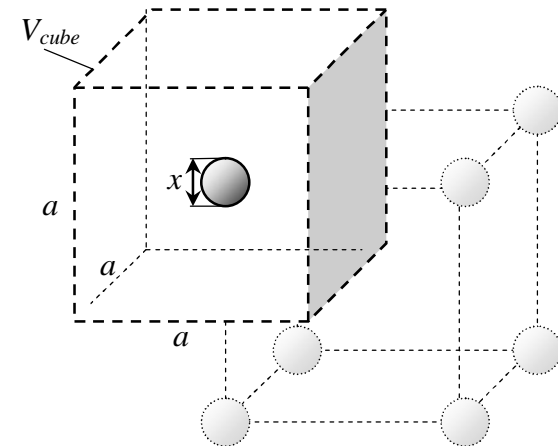
$$c = \frac{\sum m_p}{V_{g+p}} \cong \frac{\sum m_p}{V_{g+p}} = \frac{\sum V_p \cdot \rho_p}{V_{g+p}} = \frac{n \cdot \frac{x^3 \cdot \pi}{6} \cdot \rho_p}{n \cdot a^3} = \frac{x^3 \cdot \pi}{6} \cdot \rho_p$$

where c [kg/m³] mass concentration, a [m] average distance between particles, ρ_p [kg/m³] density of particles, n is number of particles.

For the average relative distance (a/x) between neighboring particles in gas we get:

$$\frac{a}{x} = \sqrt[3]{\frac{\rho_p \cdot \pi}{6 \cdot c}}$$

c [g/m ³]	$\frac{a}{x}$	N [db/cm ³]
10	47	350.000
1	101	35.000
0.1	218	3.500



Conclusion:

- in case of usual particle concentration values the particle-laden flows are very dilute mixtures. (the distance between neighboring particles is very large).
- particles are present with very high number even in particle-gas mixtures having very low concentration.

PARTICLES

Table 2. Particle response in turbulent flow ($\eta = 0.99$).

Particle	ρ_p (kg m ⁻³)	Gas (10 ⁵ Pa)	Density ratio s	Viscosity ν (m ² s ⁻¹)	f_c (kHz)	Sk_c	d_p (μ m)
TiO ₂	3500	Air (300 K)	2950	1.50×10^{-5}	1	0.0295	1.44
					10		0.45
Al ₂ O ₃	3970	Flame (1800 K)	20250	3.00×10^{-4}	1	0.0113	2.46
					10		0.78
Glass	2600	Air (300 K)	2190	1.50×10^{-5}	1	0.0342	1.67
					10		0.53
Olive oil	970	Air (220 K)	617	1.45×10^{-5}	1	0.0645	3.09
					10		0.98
Microballoon	100	Air (300 K)	84.5	1.50×10^{-5}	1	0.1742	8.50
					10		2.69

the Stokes number Sk , a characteristic non-dimensional frequency of the particle response. Sk is defined here as

$$Sk = \left(\frac{\omega}{\nu}\right)^{1/2} d_p \quad (6)$$

PARTICLES

Table 3. Seeding particles in gas flows.

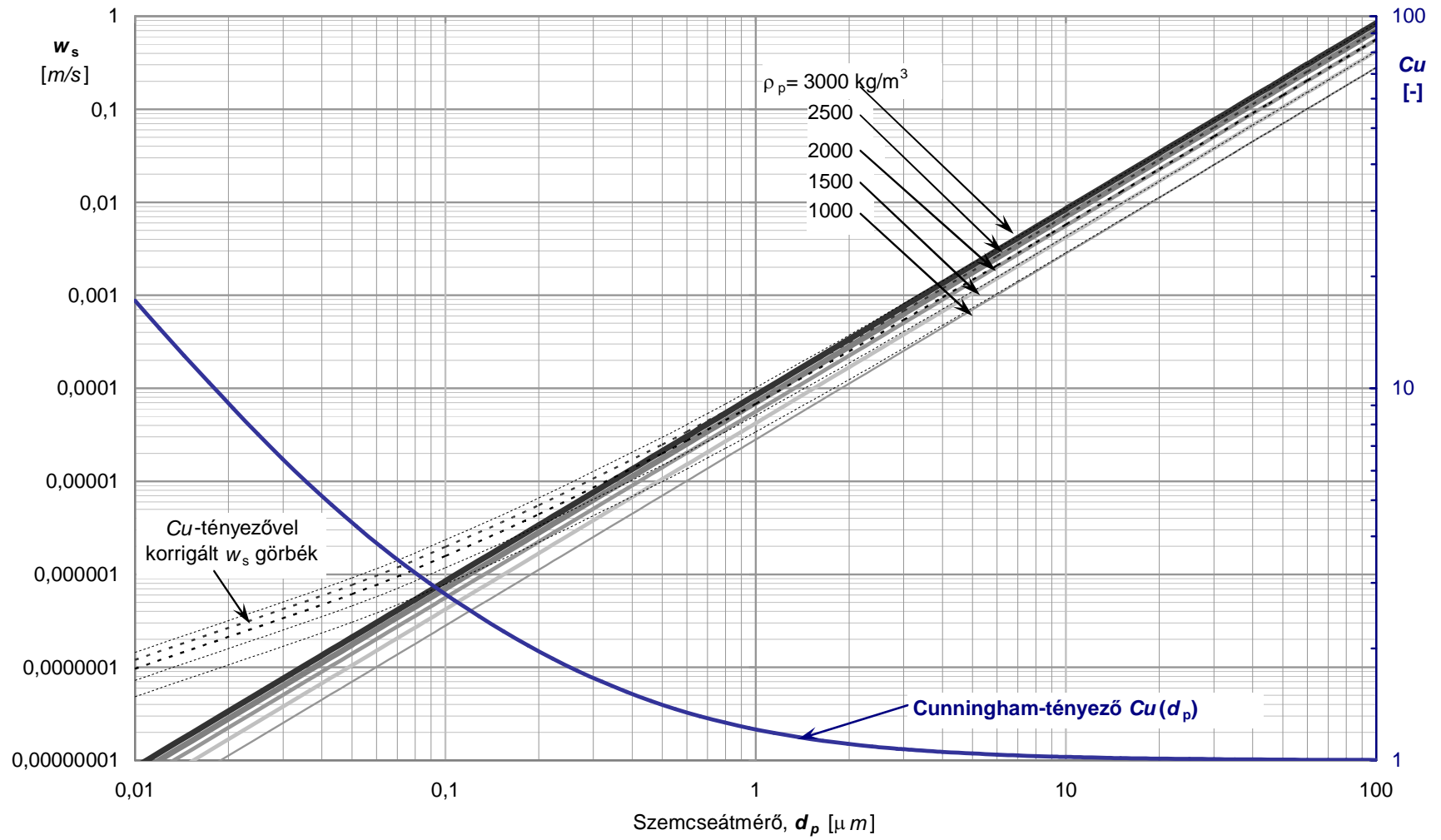
Material	d_p (μm)	Laser	Pulse energy, pulse time	Light sheet		Reference
				w (mm)	t (mm)	
TiO ₂ ($m = 2.6$, $\rho = 3500 \text{ kg m}^{-3}$)	<1	Nd:YAG	10 mJ, 20 ns	15	0.3	Reuss <i>et al</i> (1989)
TiO ₂ , ZrO ₂	0.7–1	Nd:YAG	110 mJ, 12 ns			Paone <i>et al</i> (1996)
Al ₂ O ₃ ($m = 1.76$, $\rho = 3970 \text{ kg m}^{-3}$)	0.3	Nd:YAG	400 mJ		0.2	Muniz <i>et al</i> (1996)
	3	Nd:YAG	9 mJ, 6 ns			Anderson <i>et al</i> (1996)
	0.8	Ruby	20 ns	150	$\simeq 1$	Krothapalli <i>et al</i> (1996)
Polycrystalline	30	Nd:YAG	135 mJ, 6 ns			Grant <i>et al</i> (1994)
Glass	30	Ruby	30 mJ, 30 ns			Schmidt and Löffler (1993)
Oil smoke	1	Ruby	5 J			Stewart <i>et al</i> (1996)
Corn oil	1–2	Nd:YAG	100 mJ			Jakobsen <i>et al</i> (1994)
Oil	1–2	Nd:YAG	120 mJ		0.4	Westerweel <i>et al</i> (1993)
Olive oil ($m = 1.47$, $\rho = 970 \text{ kg m}^{-3}$)	1.06	Nd:YAG	70 mJ, 16 ns	200	0.5	Höcker and Kompenhans (1991)
						Fischer (1994)
						Raffel <i>et al</i> (1996)

PARTICLES

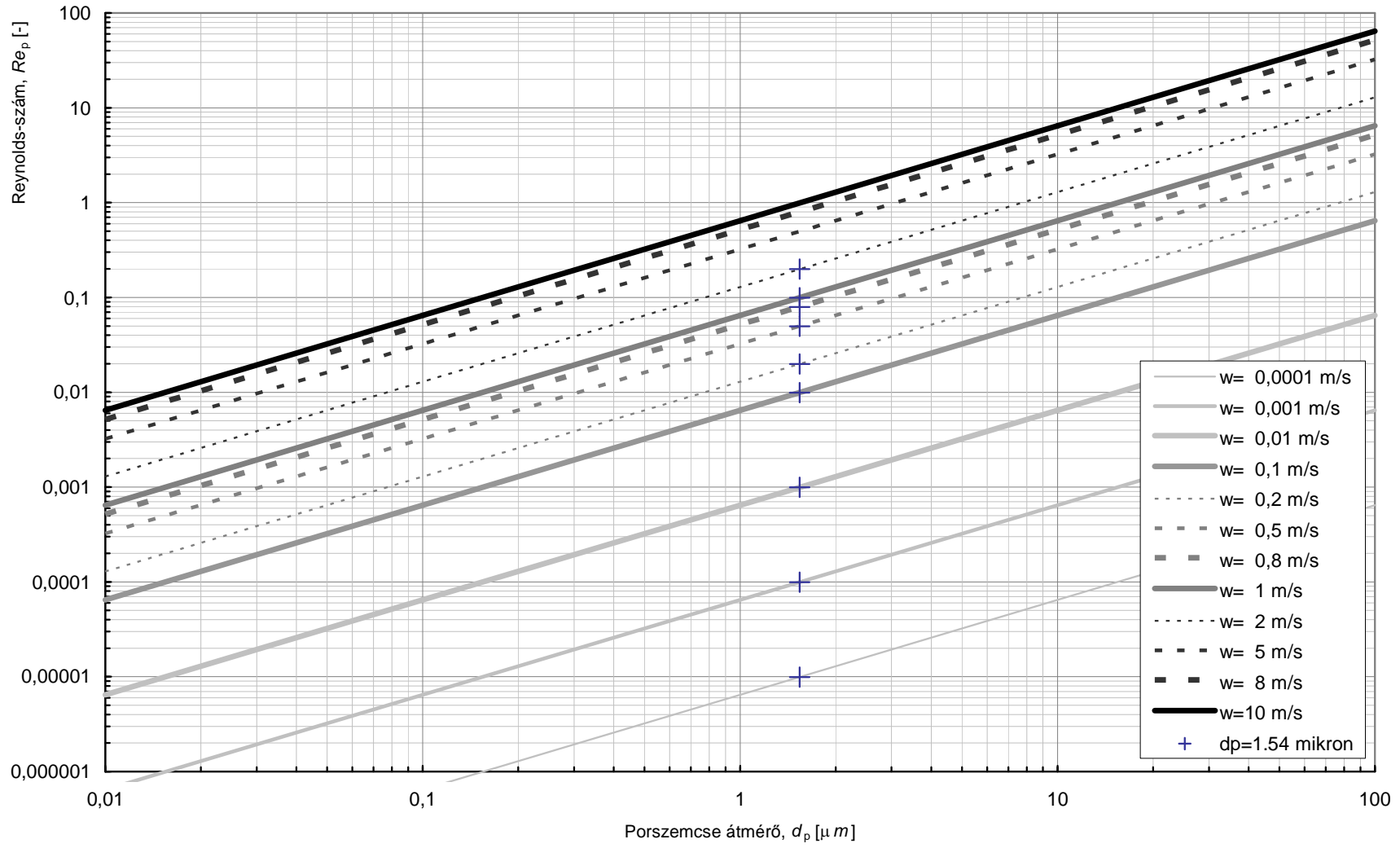
Table 4. Seeding particles in liquid flows.

Material	d_p (μm)	Laser	CW power or energy, time	Light sheet		Reference
				w (mm)	t (mm)	
TiO ₂	3	Nd:YAG				Longmire and Alahyari (1994)
Al ₂ O ₃	9.5	Ruby	2 J, 30 ns	100	0.8	Liu <i>et al</i> (1991)
Conifer pollen ($\rho = 1000 \text{ kg m}^{-3}$)	50–60	Ar ion	1–2 W			Westergaard <i>et al</i> (1993) McCluskey <i>et al</i> (1995) Gallagher and McEwan (1996)
Polymer ($\rho = 1030 \text{ kg m}^{-3}$)	30	Ar ion	0.5–5 W		0.5	Draad and Westerweel (1996) McCluskey <i>et al</i> (1996)
Phosphorescent polymer	80	Ar ion	5 W		1	Willert and Gharib (1991)
Fluorescent	50	Nd:YAG				Hart (1996)
	20	Cu vapour	45 W		1	Roth <i>et al</i> (1995)
Polystyrene ($\rho = 1050 \text{ kg m}^{-3}$)	500					Khoo <i>et al</i> (1992)
	15	Ruby	25 mJ, 20 ns			Zhang <i>et al</i> (1996)
Thermoplastic ($\rho = 1020 \text{ kg m}^{-3}$)	6	Nd:YAG		50	2	Hassan <i>et al</i> (1994)
Reflective ($\rho = 1010 \text{ kg m}^{-3}$)	60	Ar ion	18 W			Grant <i>et al</i> (1992)
	30	Ar ion	12–18 W	200		Grant and Wang (1994)
Metallic coated	4	Ar ion	2 W		2	Magness <i>et al</i> (1993)
	14	Ar ion			1	Johari <i>et al</i> (1996)
Microspheres ($\rho = 700 \text{ kg m}^{-3}$)	<30	Ar ion				Graham and Soria (1994)
H ₂ bubbles		Ar ion	1 W		0.3	Dieter <i>et al</i> (1994)

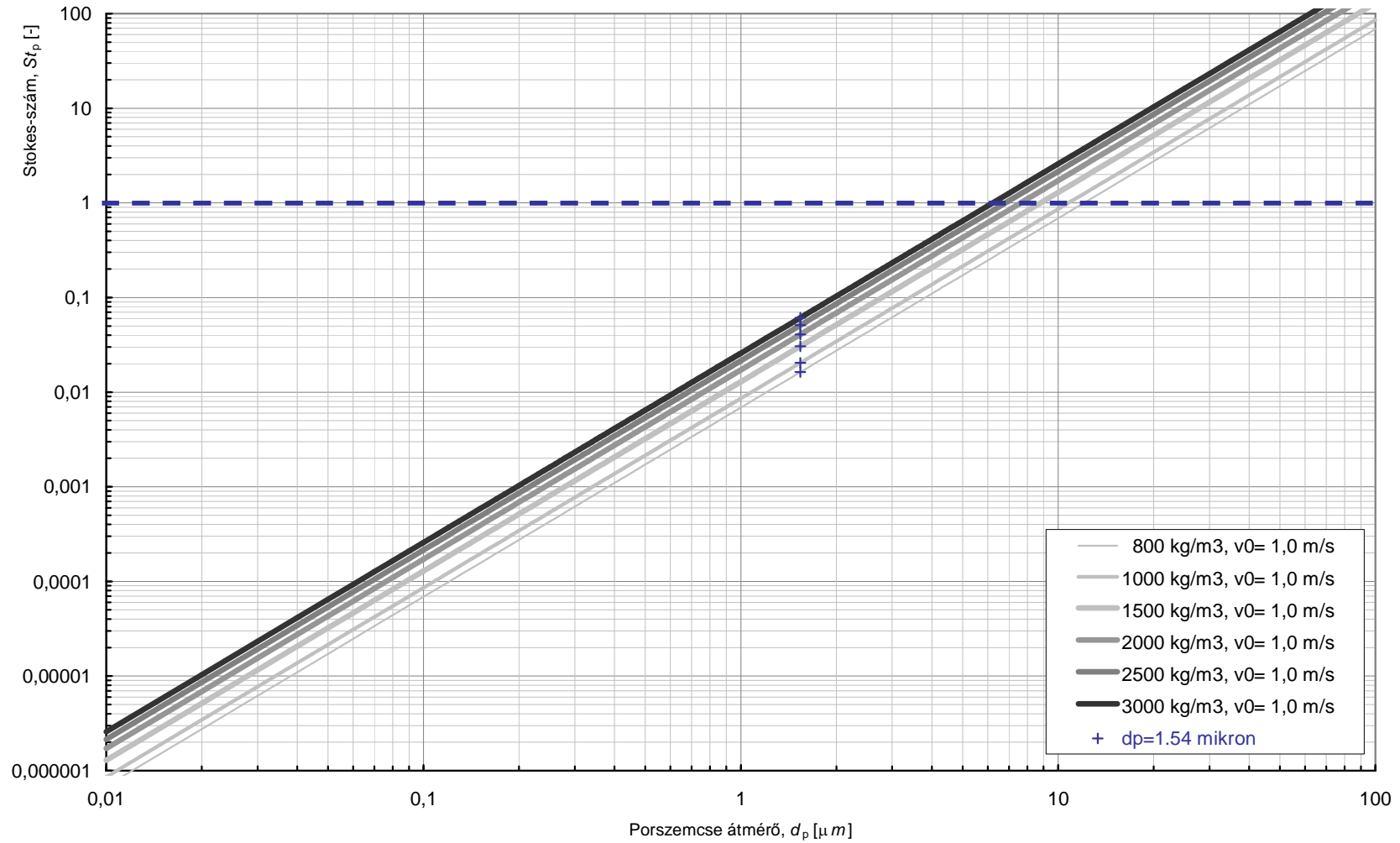
Süllyedési sebesség



Reynolds-szám



Tehetlenségi paraméter (Ψ_p) avagy a részecske Stokes-szám (St_p)



Térfogat- ill. tömegarány

Characteristic parameters of the primary & secondary phase:

- carrier fluid (primary phase)
- seeding /tracer particles (secondary phase)

Volume ratio:

$$\alpha_p = \frac{V_p}{V_g} = \frac{\frac{d_p^3 \pi}{6}}{a^3} = \frac{c_p}{\rho_p}$$

Mass loading ratio:

$$M = \frac{c_p}{\rho_g} = \alpha_p \frac{\rho_p}{\rho_g}$$

$$\frac{M}{\alpha_p} = \frac{\rho_p}{\rho_g}, \text{ or } \frac{\alpha_p}{M} = \frac{\rho_g}{\rho_p}$$

where:

c_p : particle mass concentration

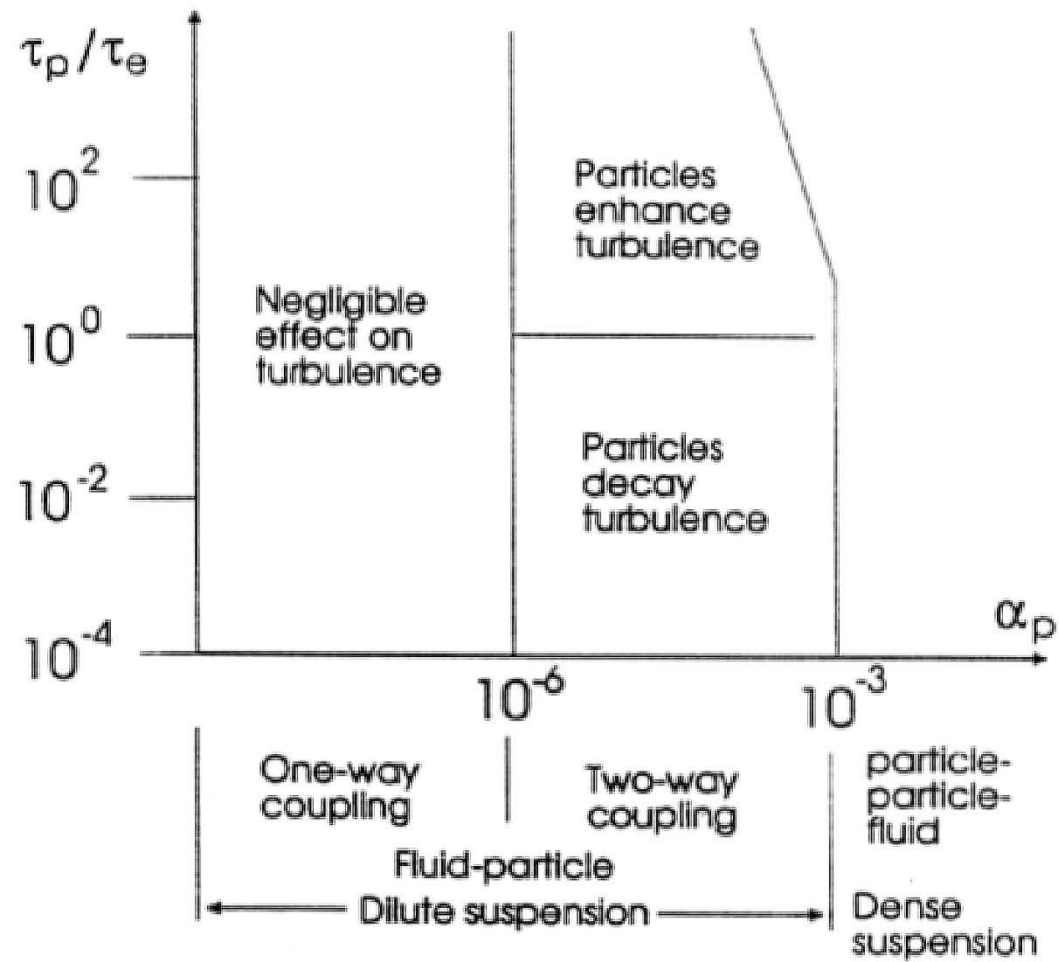
ρ_g : density of gas (carrier phase)

ρ_p : density of particle (material)

α_p		ρ_p [kg/m ³]		
		800	1500	2500
c_p [g/m ³]	0,0001	$1,3 \cdot 10^{-10}$	$6,7 \cdot 10^{-11}$	$4,0 \cdot 10^{-11}$
	0,001	$1,3 \cdot 10^{-9}$	$6,7 \cdot 10^{-10}$	$4,0 \cdot 10^{-10}$
	0,01	$1,3 \cdot 10^{-8}$	$6,7 \cdot 10^{-9}$	$4,0 \cdot 10^{-9}$
	0,1	$1,3 \cdot 10^{-7}$	$6,7 \cdot 10^{-8}$	$4,0 \cdot 10^{-8}$
	1	$1,3 \cdot 10^{-6}$	$6,7 \cdot 10^{-7}$	$4,0 \cdot 10^{-7}$
	10	$1,3 \cdot 10^{-5}$	$6,7 \cdot 10^{-6}$	$4,0 \cdot 10^{-6}$
	100	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$6,7 \cdot 10^{-5}$	$4,0 \cdot 10^{-5}$

M		ρ_g [kg/m ³]		
		0,8	1,0	1,2
c_p [g/m ³]	0,0001	$1,3 \cdot 10^{-7}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$8,3 \cdot 10^{-8}$
	0,001	$1,3 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$8,3 \cdot 10^{-7}$
	0,01	$1,3 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$8,3 \cdot 10^{-6}$
	0,1	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$8,3 \cdot 10^{-5}$
	1	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$8,3 \cdot 10^{-4}$
	10	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$8,3 \cdot 10^{-3}$
	100	$1,3 \cdot 10^{-1}$	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$8,3 \cdot 10^{-2}$

Térfogatarány



ELGHOBASHI (1994): „Turbulence modulation map”: particle STOKES-number ($St_p = \tau_p/\tau_e$) in function of the α_p

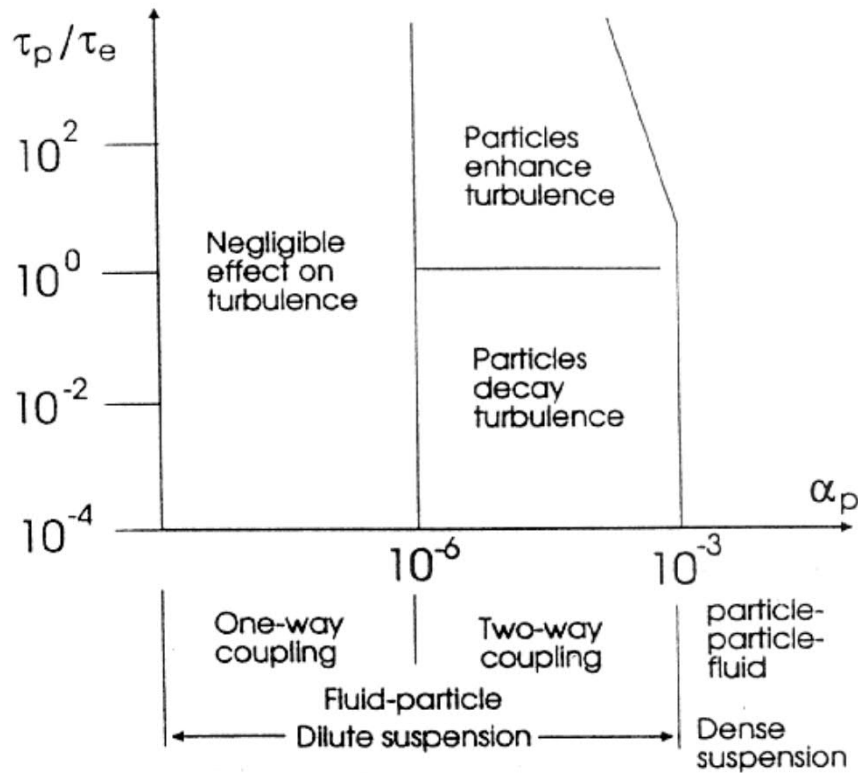
τ_p : characteristic (response) time of the particle

τ_e : characteristic time of the carrier fluid

dilute mixtures: $\alpha_p < 10^{-3}$

dense mixtures: $\alpha_p > 10^{-3}$

A részecskék hatása a szállító közeg turbulenciájára



[ELGHOBASHI, 1994]

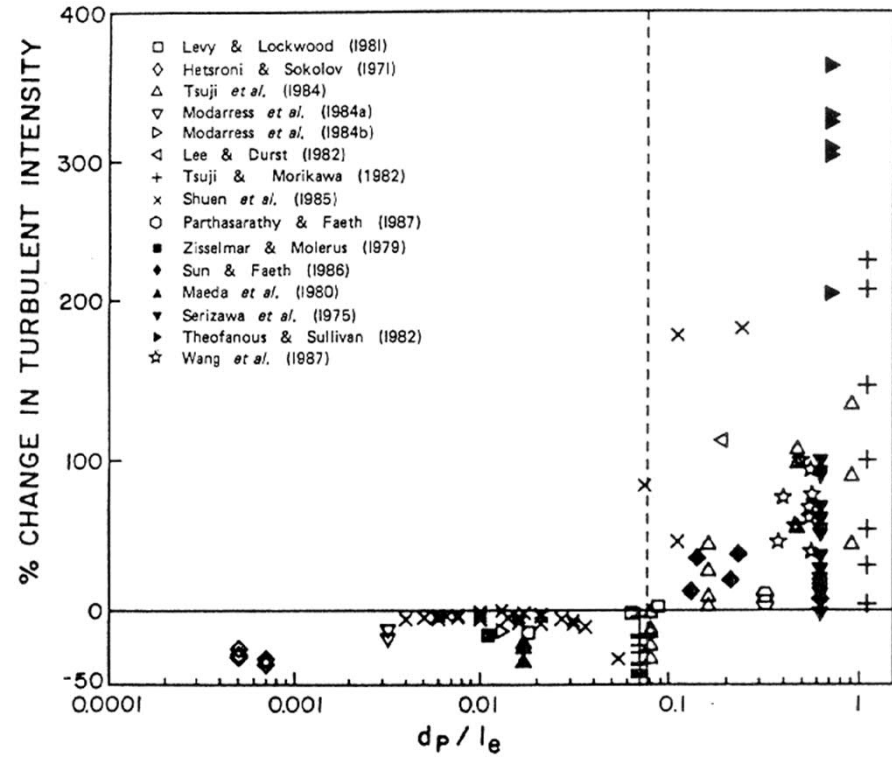
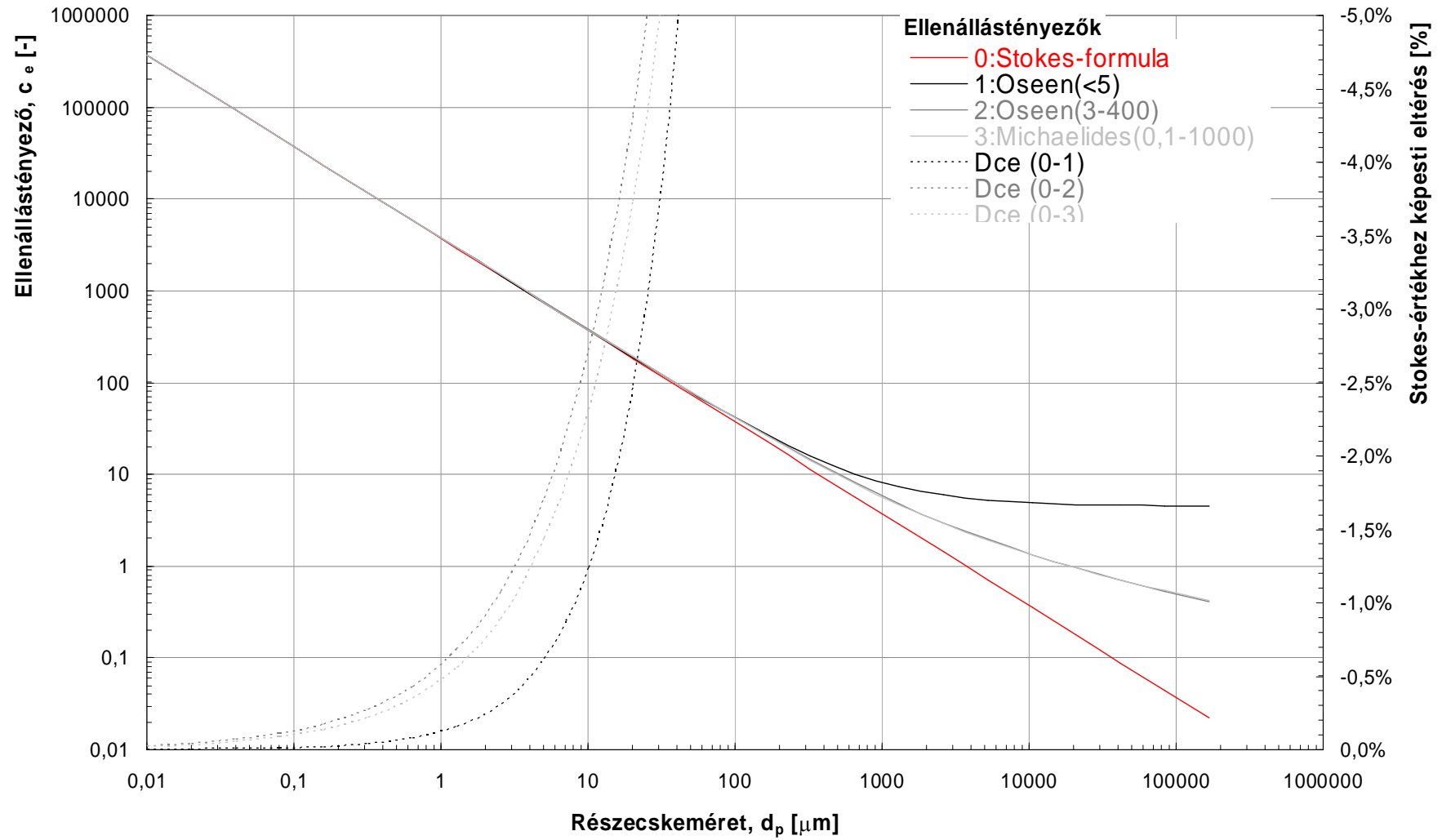


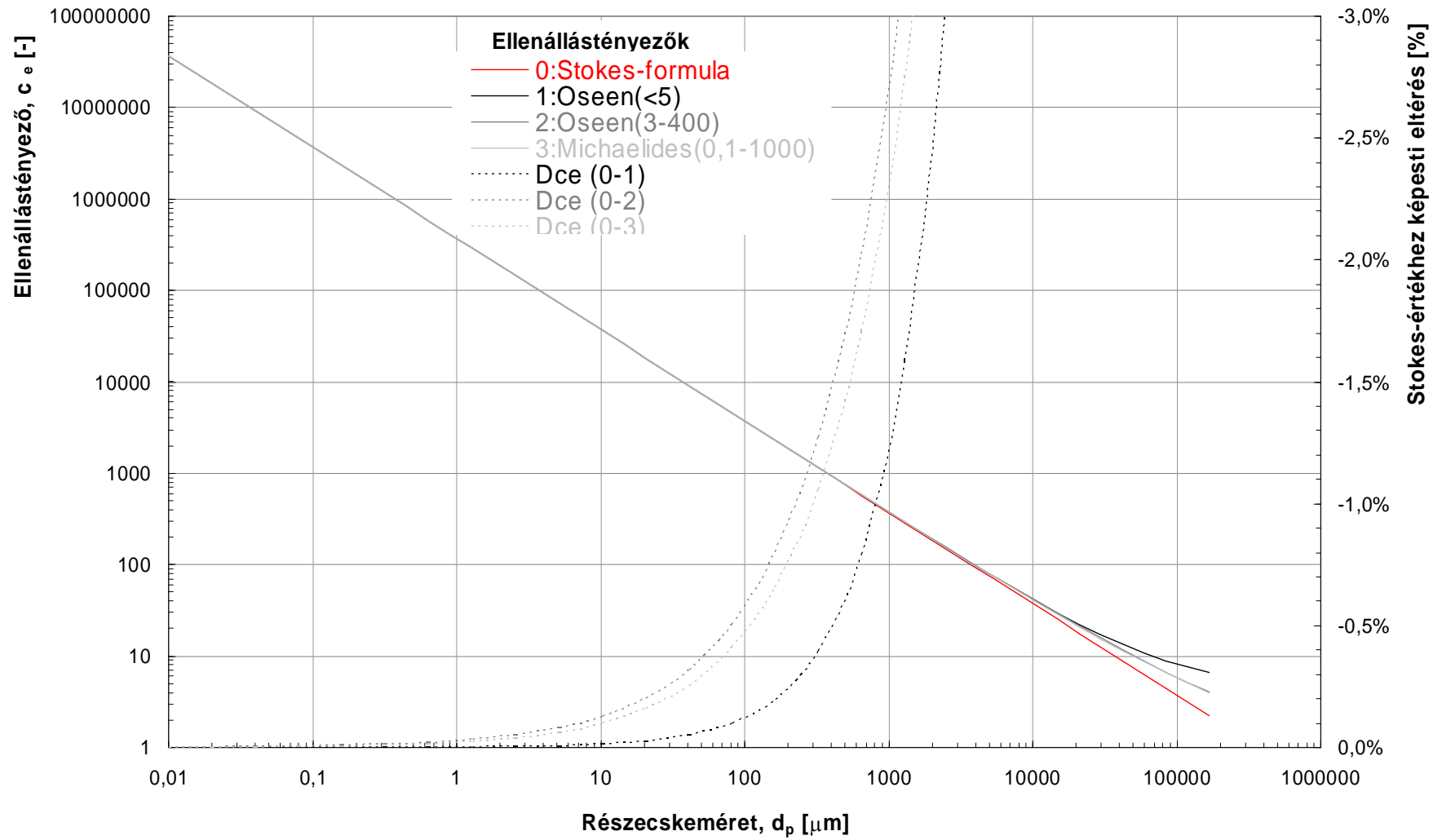
Figure 2. Change in turbulent intensity as function of length scale ratio.

[GORE and CROWE, 1989]

Ellenállástényező képletek közötti eltérés ($w=0,1\text{ m/s}$, olajkód levegőben)



Ellenállástényező képletek közötti eltérés ($w=0,001\text{ m/s}$, olajkód levegőben)



ÖNÁLLÓ FELADAT=2. ZH (30 pont)

Digitális kép(pár)rögzítés segítségével végezzen optikai áramlási sebességmérést!

Cél:

Egy folyadék, tárgy stb., akármilyen adott térbeli pontjának a mozgási sebességét kell meghatározni. + Hibaszámítással.

A $\underline{v}(\underline{r}, t)$ sebességvektor adott (minél rövidebb) $\Delta t = t_2 - t_1$ időintervallumra vonatkozó „pillanatnyi” sebességének (valójában ez a Δt alatti átlagsebesség) legalább két komponensének (v_x, v_y) digitális képfeldolgozás alapján történő meghatározása.

FONTOS:

Hibaszámítás = az adott térbeli ponthoz és Δt időintervallumhoz sebességkomponensek mennyire pontosak (időben?, térben?)