

BMEGEÁTMG19

Lézeroptikai mérési módszerek az áramlástechnikában

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

Áramlástan Tanszék

Gépészmérnök MSc / Áramlástechnika szakirány hallgatóinak: BMEGEÁTMG19
Mechatronikai mérnök BSc / Gépészeti modellezés szakirány hallgatóinak: BMEGEÁTAM03

TARTALOM

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

Megjegyzés: a lézer Doppler sebességmérés (LDV) ismereteket Dr. Paál György: Az áramlástechnika válogatott fejezetei (BMEGEVGMG01) c. tárgy keretében adja elő. Az MG19 tárgy hallgatóinak ebből a témából nincs ZH kérdés

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/BMEGEATMG19/2010-2011-II/>

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) Mire, mely mennyiségek mérésére alkalmas 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 um 0.001 um 0.01 um 0.1 um 1 um 10 um 100 um 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		←	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	
		←	Zinc Oxide Fume	→	Insecticide Dusts		Pollens	
		←	Combustion Nuclei	→	Spray Dried Milk		Plant Spores	
		←	Atmospheric dusts	→				
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:

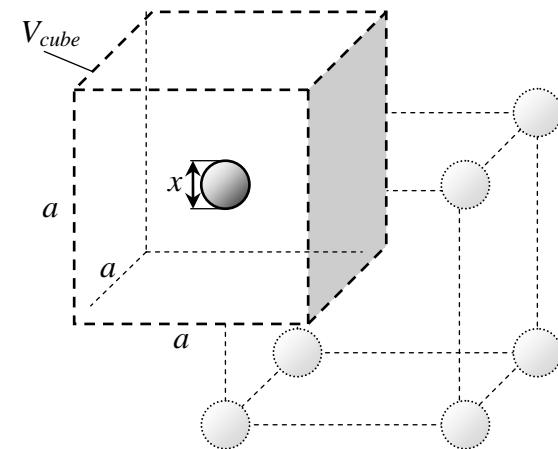
$$c = \frac{\sum m_p}{V_{g+p}} \cong \frac{\sum m_p}{V_{g+p}} = \frac{\sum V_p \cdot \rho_p}{V_{g+p}} = \frac{n \cdot \frac{x^3 \cdot \pi}{6} \cdot \rho_p}{n \cdot a^3} = \frac{x^3 \cdot \pi}{6} \cdot \rho_p$$

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.

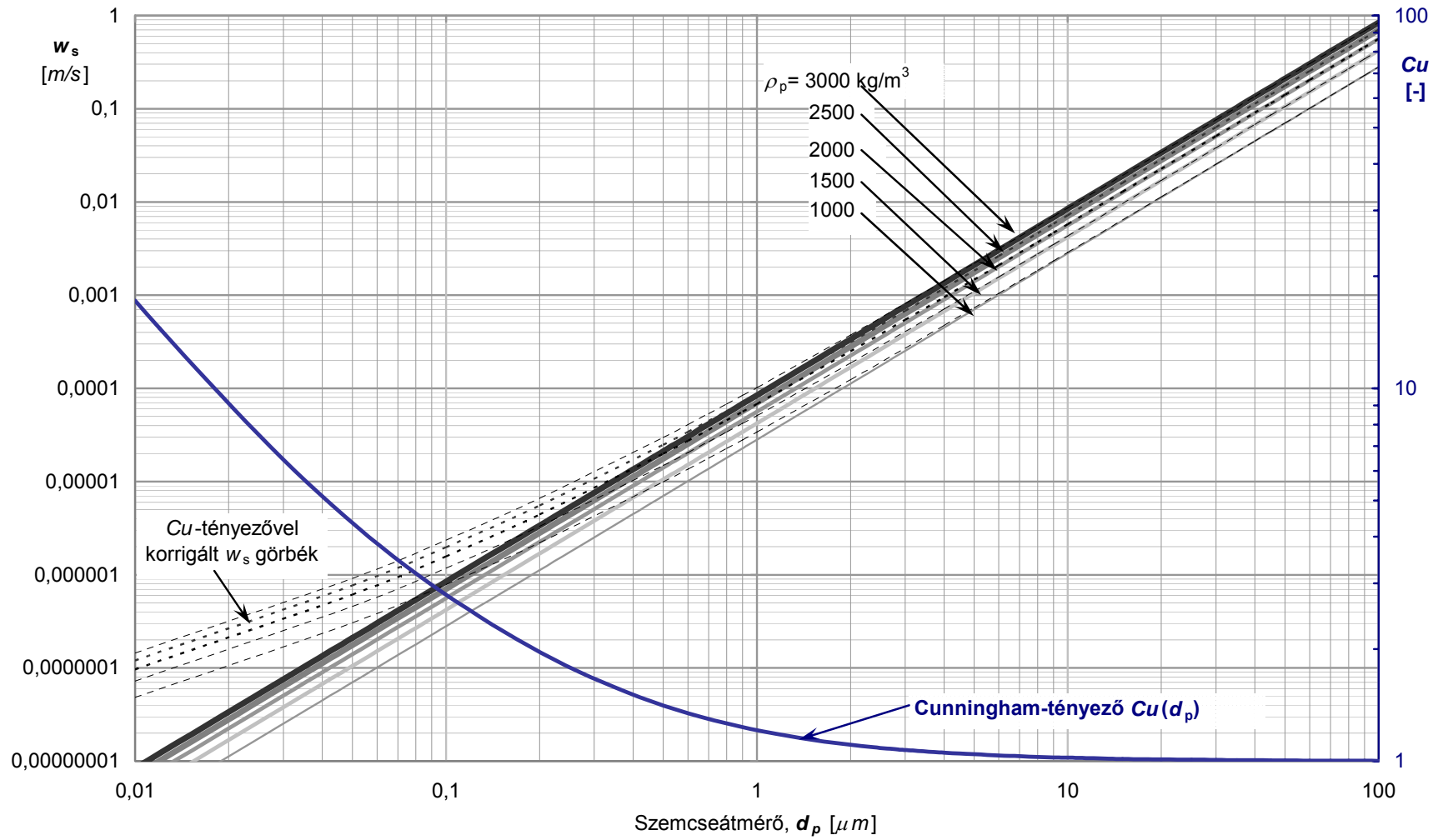
Material	d_p (μm)	Laser	Pulse energy, pulse time	Light sheet		Reference
				w (mm)	t (mm)	
TiO ₂ ($m = 2.6$, $\rho = 3500 \text{ kg m}^{-3}$)	<1	Nd:YAG	10 mJ, 20 ns	15	0.3	Reuss <i>et al</i> (1989)
TiO ₂ , ZrO ₂	0.7–1	Nd:YAG	110 mJ, 12 ns			Paone <i>et al</i> (1996)
Al ₂ O ₃ ($m = 1.76$, $\rho = 3970 \text{ kg m}^{-3}$)	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

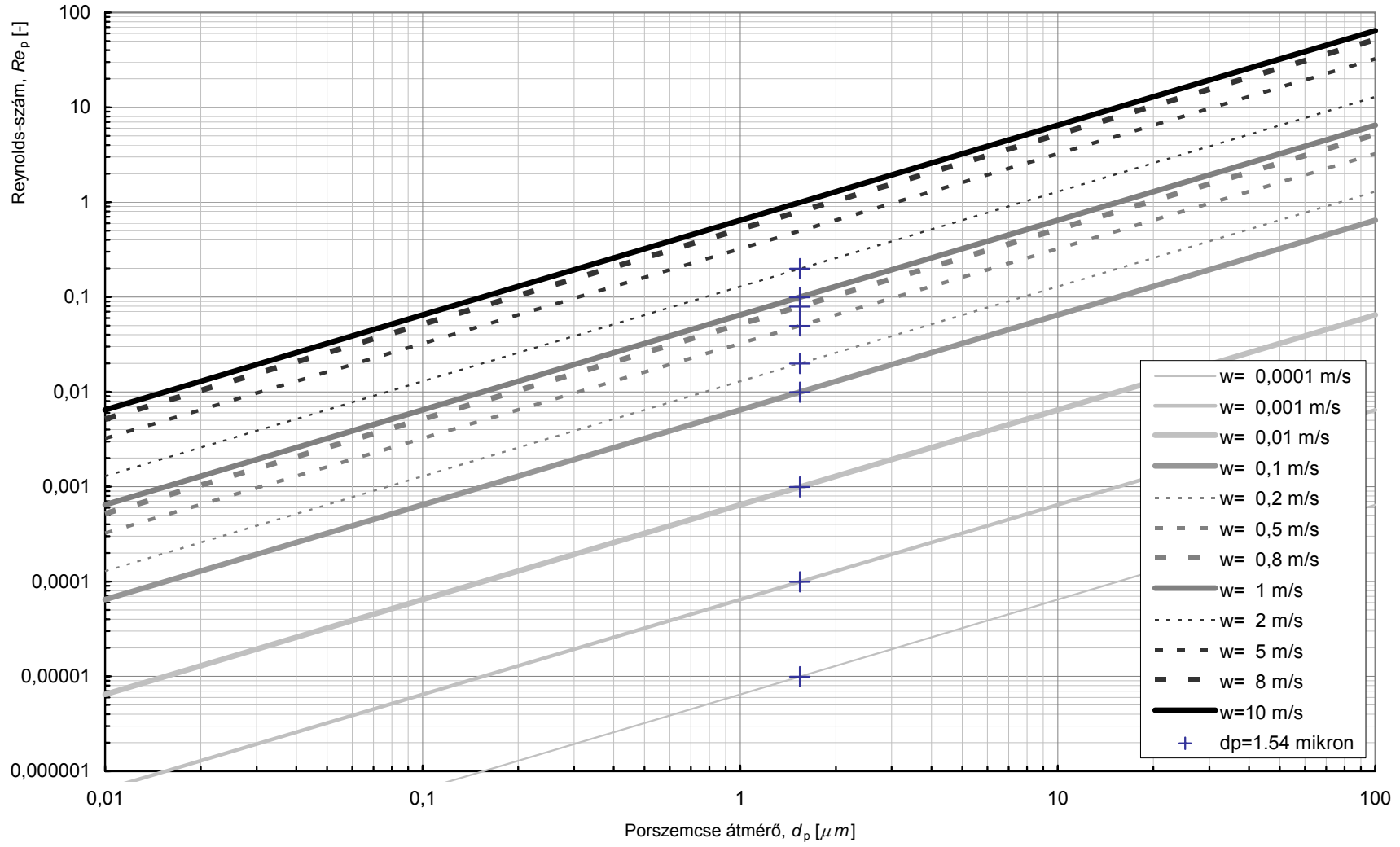
Table 4. Seeding particles in liquid flows.

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)

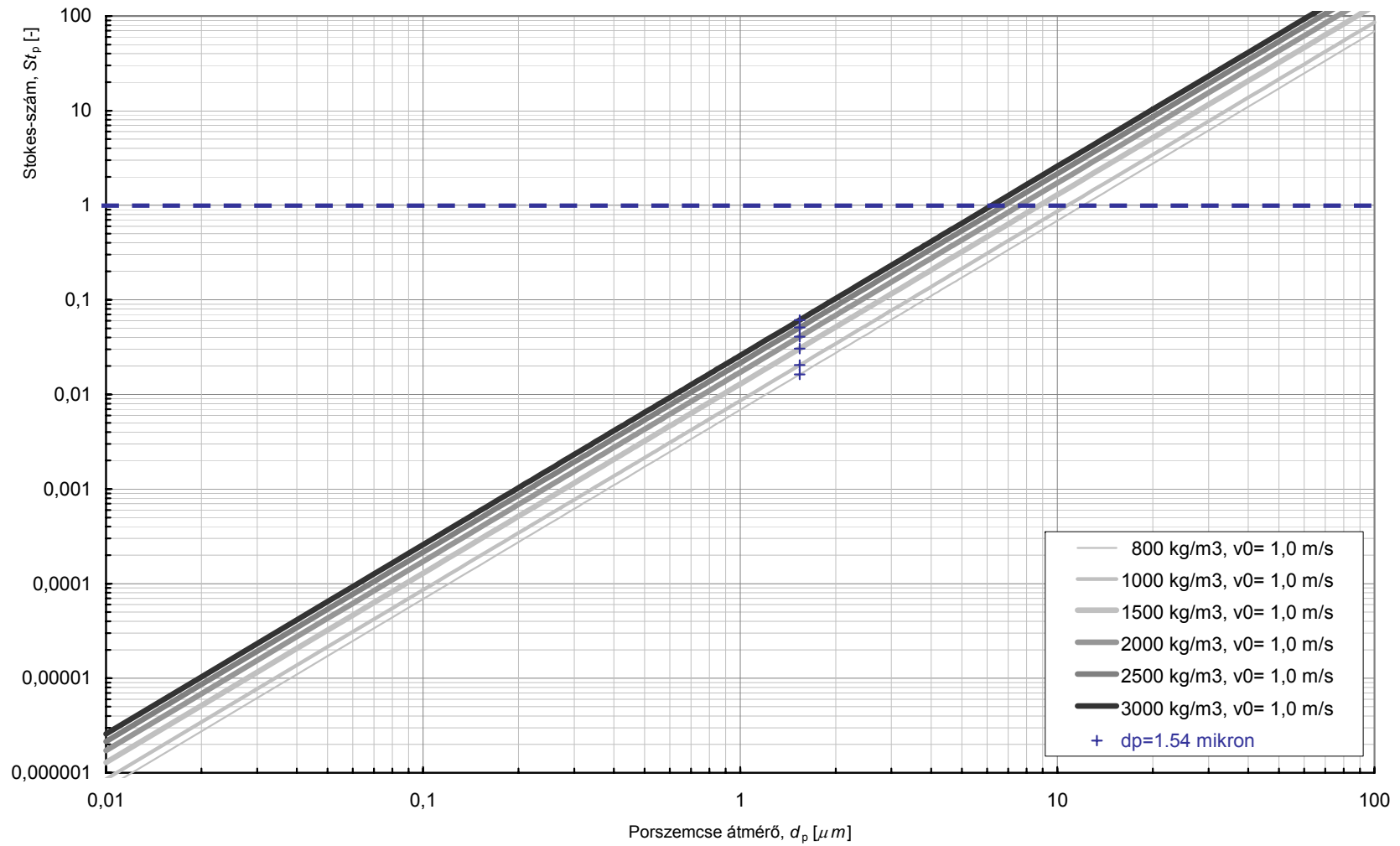
Süllyedési sebesség



Reynolds-szám



Tehetlenségi paraméter avagy a részecske Stokes-szám



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

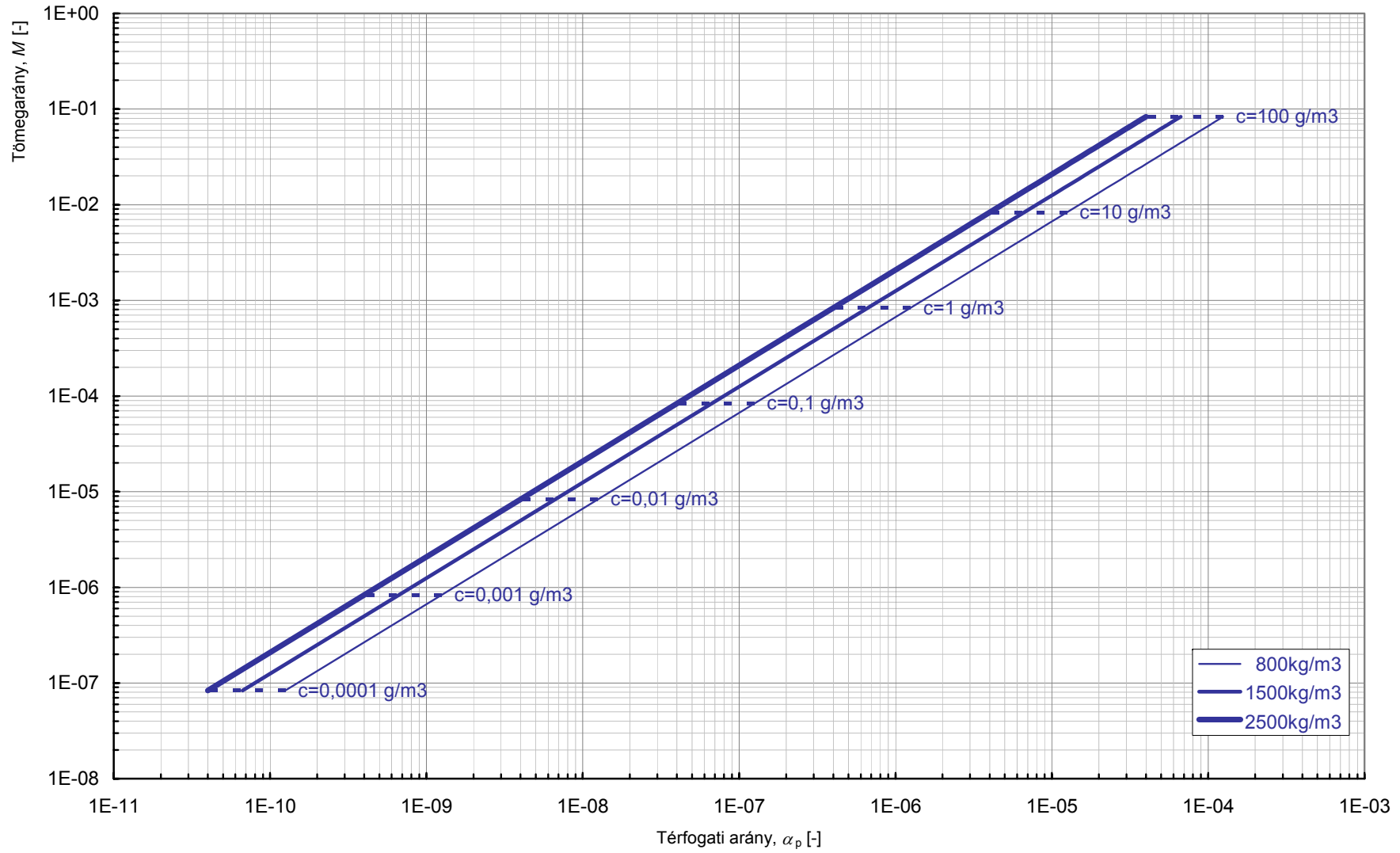
ρ_g : density of gas (carrier phase)

ρ_p : density of particle (material)

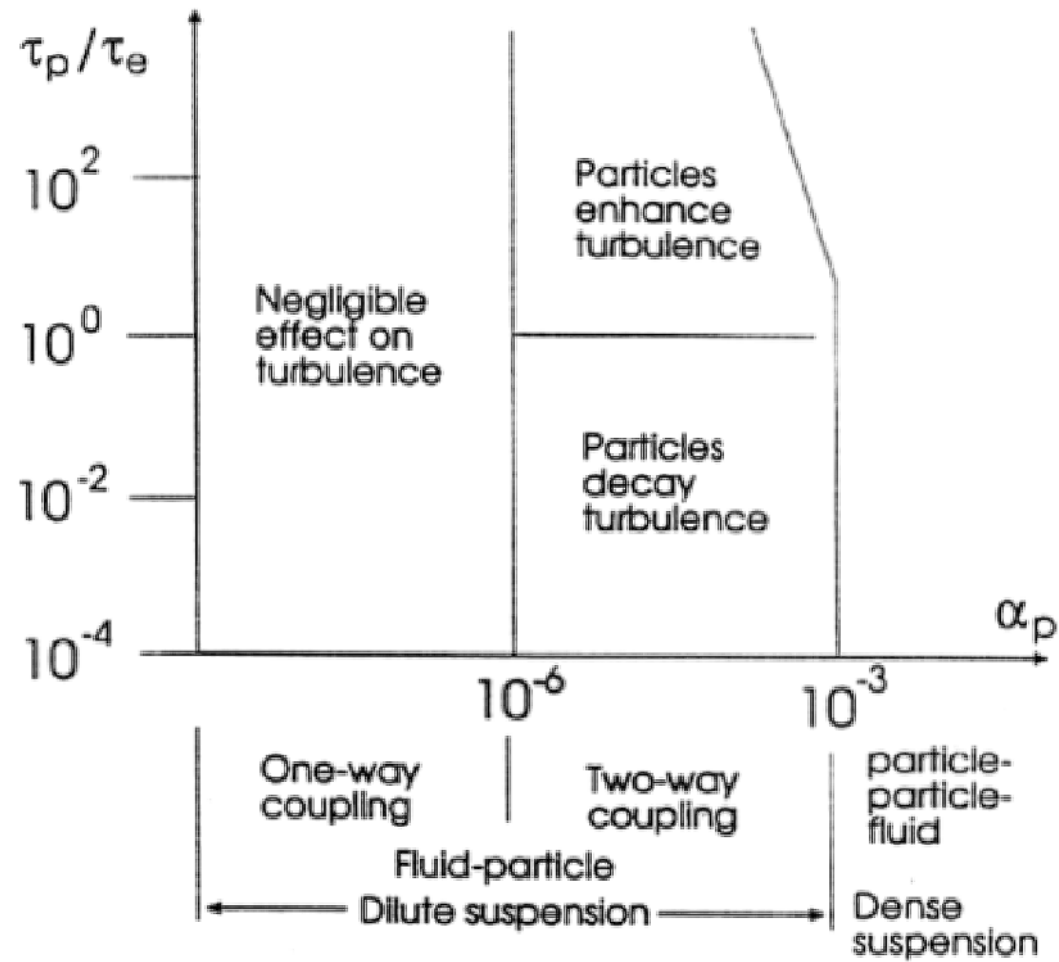
α_p		ρ_p [kg/m ³]		
		800	1500	2500
c_p [g/m ³]	0,0001	$1,3 \cdot 10^{-10}$	$6,7 \cdot 10^{-11}$	$4,0 \cdot 10^{-11}$
	0,001	$1,3 \cdot 10^{-9}$	$6,7 \cdot 10^{-10}$	$4,0 \cdot 10^{-10}$
	0,01	$1,3 \cdot 10^{-8}$	$6,7 \cdot 10^{-9}$	$4,0 \cdot 10^{-9}$
	0,1	$1,3 \cdot 10^{-7}$	$6,7 \cdot 10^{-8}$	$4,0 \cdot 10^{-8}$
	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	$1,3 \cdot 10^{-1}$	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$8,3 \cdot 10^{-2}$

Térfogat- ill. tömegarány



Térfogatarány



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

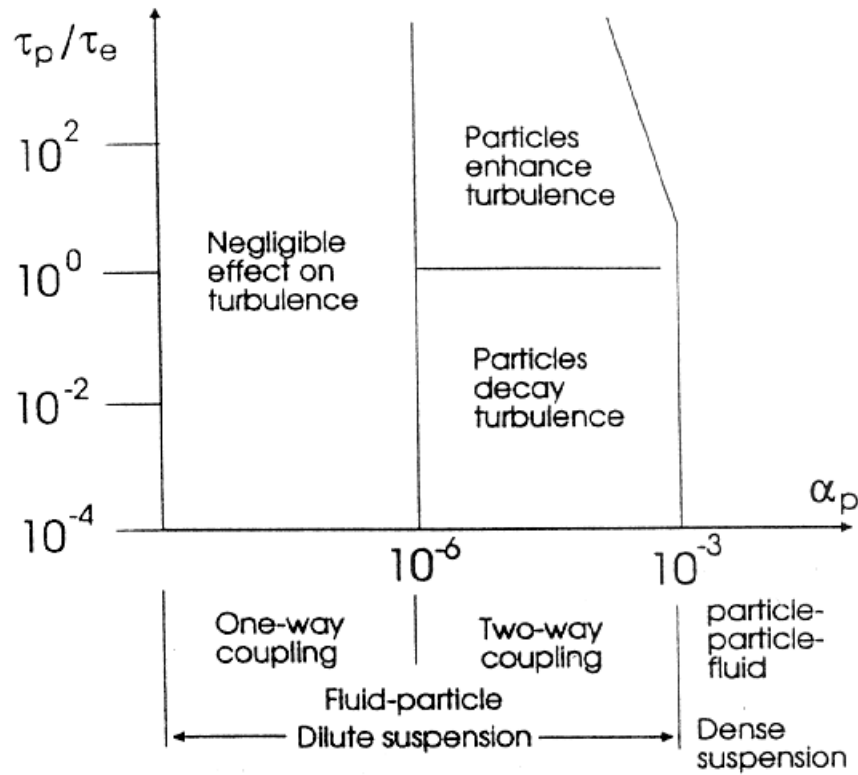
τ_p : characteristic (response) time of the particle

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]

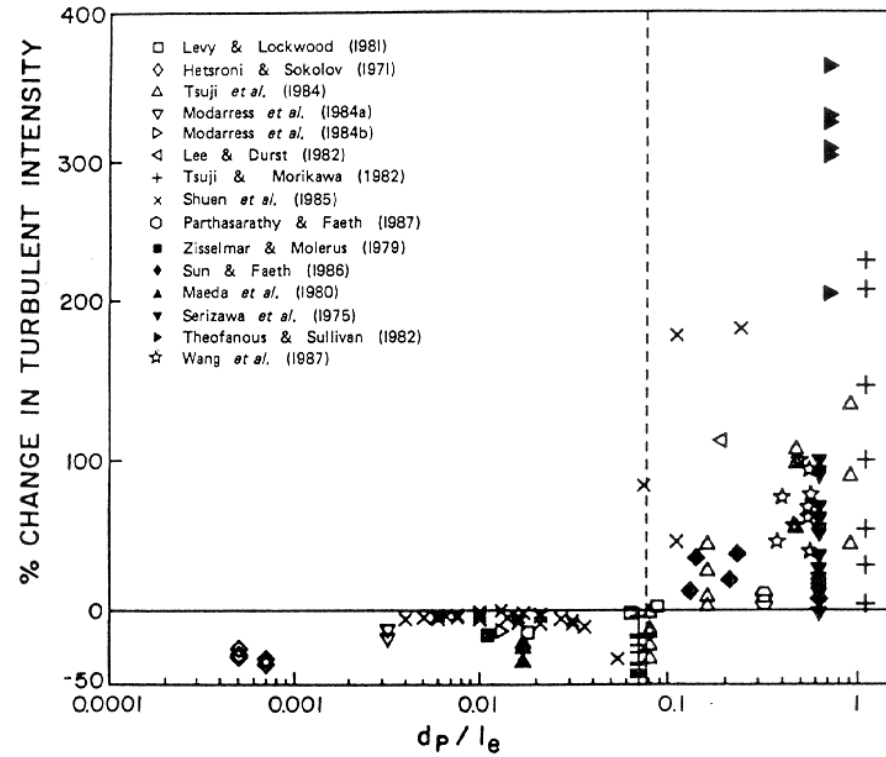
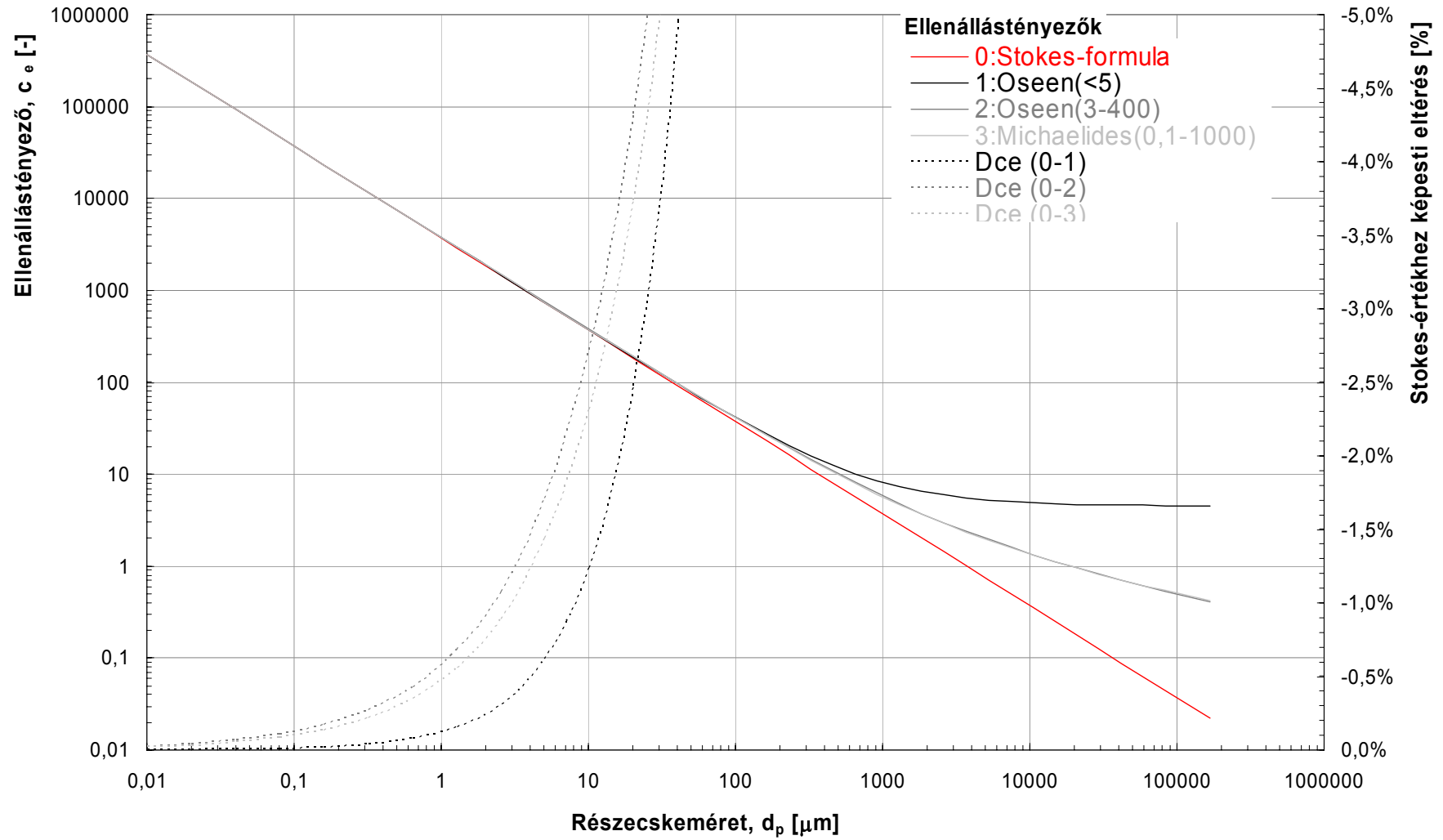


Figure 2. Change in turbulent intensity as function of length scale ratio.

[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)

