

## Turbulencia

Balogh  
Miklós

Bevezető

Lamináris

Turbulens

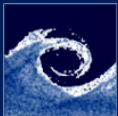
Hatások

Határréteg

# Lamináris és turbulens áramlások, határrétegek

Balogh Miklós  
Áramlástan Tanszék

2016. november 10.



# Örvénylő áramlások

## Turbulencia

Balogh  
Miklós

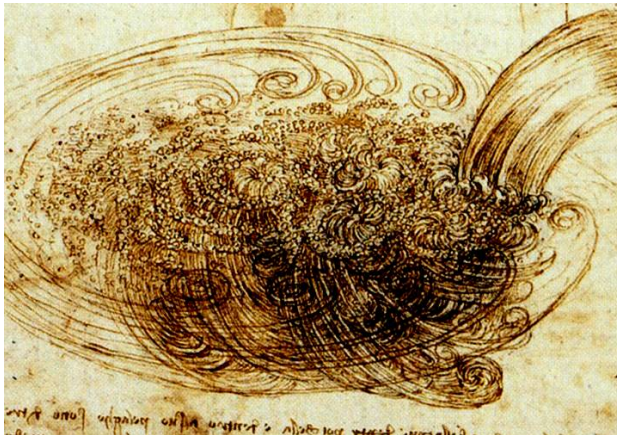
Bevezető

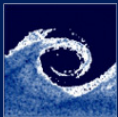
Lamináris

Turbulens

Hatások

Határréteg





# Örvénylő áramlások

## Turbulencia

Balogh  
Miklós

### Bevezető

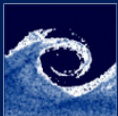
Lamináris

Turbulens

Hatások

Határréteg





# Reynolds kísérlet (1883)

Turbulencia

Balogh  
Miklós

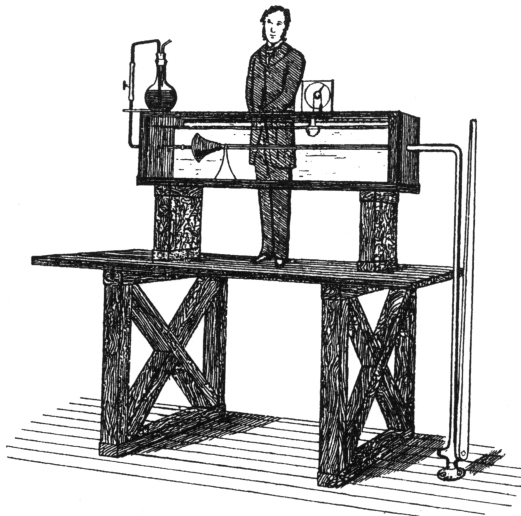
Bevezető

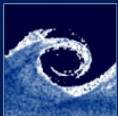
Lamináris

Turbulens

Hatások

Határréteg





# Az áramlások jellemzésére - Reynolds szám

## Turbulencia

Balogh  
Miklós

## Bevezető

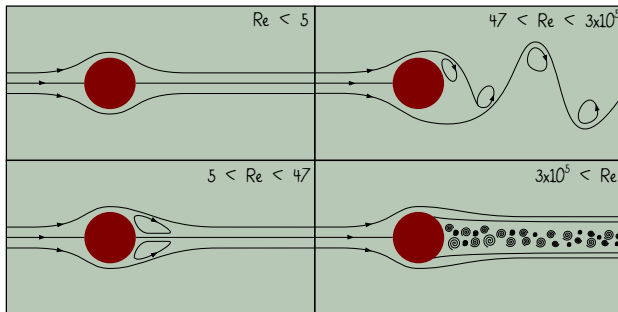
Lamináris

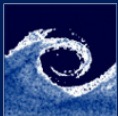
Turbulens

Hatások

Határréteg

- Reynolds szám:  $Re = \frac{vL}{\nu}$
- Lamináris réteges áramlások ( $Re < 2300$ )
- Turbulens áramlások (tranzien,  $Re > 2300$ )





# Lamináris és turbulens áramlás

## Turbulencia

Balogh  
Miklós

### Bevezető

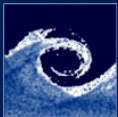
Lamináris

Turbulens

Hatások

Határréteg

- Lamináris (réteges): Szabályosan változó áramlástani jellemzők (nyomás, sebesség), amely réteges szerkezetet mutat. Ha időben és térben változást mutat, az jól jellemezhető.
- Turbulens (örvénylő): Kaotikusan, sztochasztikusan változó áramlástani jellemzők, szerkezetének leírása meglehetősen bonyolult:
  - Tranziens, térben és időben igen változékony
  - 3D (akkor is, ha a főáramlás 2D)
  - Örvényes, nagy a Reynolds szám
  - Disszipatív (viszkózus feszültségek: mozgási energiából hő)
  - Erősen diffúzív (gyors keveredés)



# Lamináris áramlás

## Turbulencia

Balogh  
Miklós

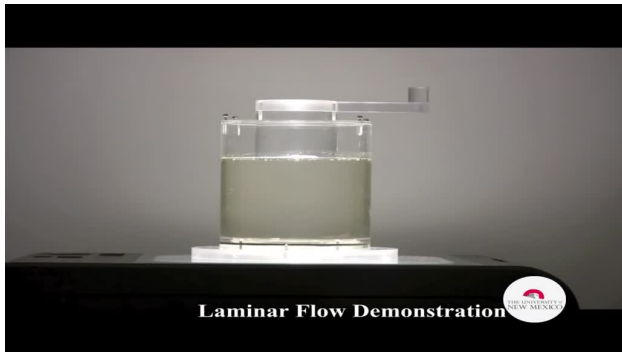
## Bevezető

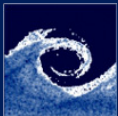
Lamináris

Turbulens

Hatások

Határréteg





# Turbulens vagy lamináris?

## Turbulencia

Balogh  
Miklós

## Bevezető

Lamináris

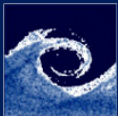
Turbulens

Hatások

Határréteg







# Lamináris áramlás csőben

Turbulencia

Balogh  
Miklós

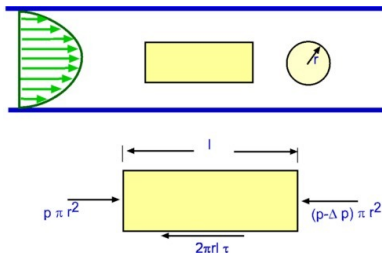
Bevezető

Lamináris

Turbulens

Hatások

Határréteg

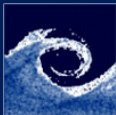


- A kontroll térfogatra felírt egyensúly:

$$p\pi r^2 - \left( p - \frac{dp}{dx} dx \right) \pi r^2 = \tau 2\pi r dx$$

- Rendezve és alkalmazva Newton viszkozitási törvényét:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = 2\tau = 2\mu \frac{dv}{dr} \rightarrow \frac{dv}{dr} = \frac{r}{2\mu} \frac{dp}{dx}$$



# Lamináris áramlás csőben

## Turbulencia

Balogh  
Miklós

Bevezető

Lamináris

Turbulens

Hatások

Határérték

- Integrálva az egyenletet (szétválasztható):

$$\int 1 dv = \frac{1}{2\mu} \frac{dp}{dx} \int r dr \rightarrow v(r) = \frac{1}{4\mu} \frac{dp}{dx} r^2 + K$$

- Alkalmazzuk a tapadás törvényét, mint peremfeltételt:

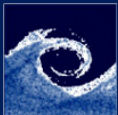
$$v(R) = 0 \rightarrow K = -\frac{1}{4\mu} \frac{dp}{dx} R^2$$

- Vegyük figyelembe, hogy a nyomásgradiens kiszámolható a cső hosszából és a nyomáskülönbségből:

$$\frac{dp}{dx} = \frac{\Delta p}{L}$$

- A sebesség a sugár függvényében ebből:

$$v(r) = \frac{1}{4\mu} \frac{dp}{dx} (r^2 - R^2) = \frac{1}{4\mu} \frac{\Delta p}{L} (R^2 - r^2)$$



# Lamináris áramlás csőben

## Turbulencia

Balogh  
Miklós

Bevezető

Lamináris

Turbulens

Hatások

Határréteg

- Kiemelve  $R^2$ -et:

$$v(r) = \frac{R^2}{4\mu} \frac{\Delta p}{L} \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right]$$

- A maximális sebesség ( $r = 0$  esetén):

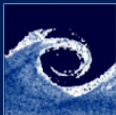
$$v_{max} = v(0) = \frac{R^2}{4\mu} \frac{\Delta p}{L}$$

- A sebességprofil:

$$v(r) = v_{max} \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right]$$

- Integrálva a sebességprofil megmutatható:

$$\bar{v} = \frac{v_{max}}{2}$$



# Lamináris áramlás csőben

## Turbulencia

Balogh  
Miklós

Bevezető

Lamináris

Turbulens

Hatások

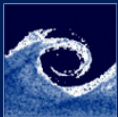
Határréteg

- A térfogatáram:

$$\begin{aligned}q_v &= \bar{v}A = \int_A v(r) dA = v_{max} \int_A \left[1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2\right] dA = \\&= v_{max} \int_0^R \left[1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2\right] 2\pi r dr = 2\pi v_{max} \int_0^R \left[r - \frac{r^3}{R^2}\right] dr \\&= 2\pi v_{max} \left[\frac{r^2}{2} - \frac{r^4}{4R^2}\right]_0^R = v_{max} R^2 \pi \left[1 - \frac{R^2}{2R^2}\right] = \frac{A}{2} v_{max}\end{aligned}$$

- A cső keresztmetszetével osztva:

$$\frac{q_v}{A} = \bar{v} = \frac{v_{max}}{2}$$



# Turbulens áramlások

## Turbulencia

Balogh  
Miklós

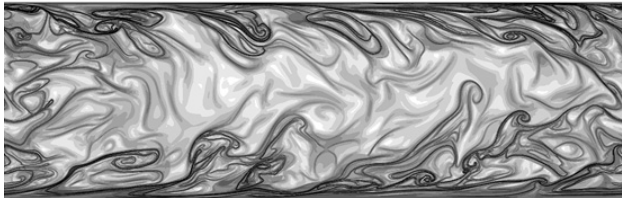
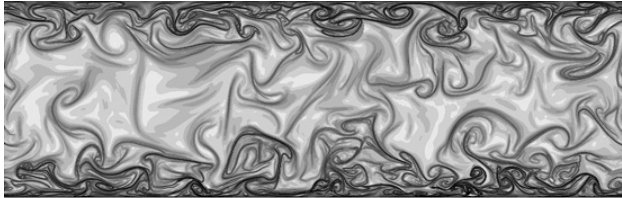
Bevezető

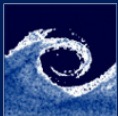
Lamináris

**Turbulens**

Hatások

Határréteg





# Turbulens kaszkád

Turbulencia

Balogh  
Miklós

Bevezető

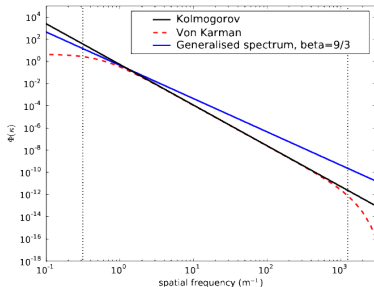
Lamináris

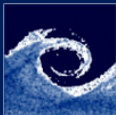
Turbulens

Hatások

Határréteg

„Big whorls have little whorls  
That feed on their velocity,  
And little whorls have lesser whorls  
And so on to viscosity.,,  
Lewis Fry Richardson





# A hidro-termodinamikai egyenletrendszer (HTDE)

## Turbulencia

Balogh  
Miklós

Bevezető

Lamináris

Turbulens

Hatások

Határréteg

## Megmaradási tételek leírása

- Mozgásmennyiségre – Navier-Stokes egyenlet

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = \mathbf{g} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \left[ \nabla^2 \mathbf{v} - \frac{2}{3} \nabla (\nabla \cdot \mathbf{v}) \right]$$

- Tömegre – folytonossági egyenlet

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0$$

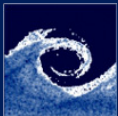
- Energiára – energiaegyenlet

$$\frac{\partial (\rho c_p T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho c_p T \mathbf{u}) = \nabla \cdot (k_T \nabla T) + H$$

## Az anyagi rendszer állapotának leírása

- Állapotegyenlet

$$p = \rho R T$$



# Reynolds átlagolt Navier–Stokes egyenletek (RANS)

## Turbulencia

Balogh  
Miklós

Bevezető

Lamináris

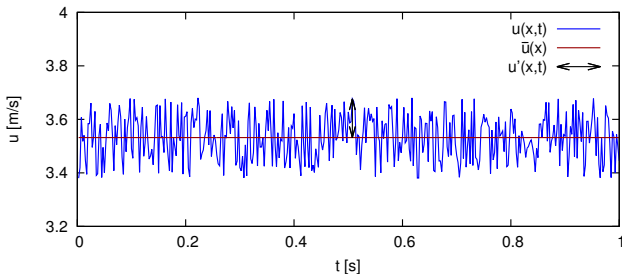
Turbulens

Hatások

Határréteg

A teljes N–S egyenletrendszer numerikusan nehezen kezelhető

- Felbontjuk a változókat, pl.  $\mathbf{u}(\mathbf{x}, t) = \overline{\mathbf{u}}(\mathbf{x}) + \mathbf{u}'(\mathbf{x}, t)$
- Visszahelyettesítés után időben átlagoljuk az egyenleteket
- Az átlagolt egyenletek nem zártak:  $-\overline{u'_i u'_j}$  látszólagos feszültségeket modellezzük (turbulencia modellekkel)





Boussinesq hipotézis:  $\nu_t$  örvényviszkozitással

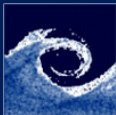
- $-\overline{u'_i u'_j} = \nu_t \left( \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial \bar{v}_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij},$
- ahol  $k = -\overline{u'_i u'_i}$  a turbulens kinetikus energia.

Prandtl keveredési úthossz ( $l_m$ ) modell

- $\nu_t = l_m^2 \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right|$

Smagorinsky modell szub-grid skálájú örvényviszkozitásra

- $\nu_t = (C_s \Delta)^2 |\bar{S}|,$
- where  $\bar{S} = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$ , and  $S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right)$



# Turbulencia modellezése

## Turbulencia

Balogh  
Miklós

Bevezető

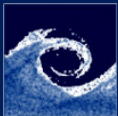
Lamináris

Turbulens

Hatások

Határréteg

- Algebrai modellek: lokális sebesség + hosszlépték
- Reynolds átlagolt modellek (URANS, RANS):
  - Spalart–Allmaras: 1 egyenlet (szárnyak)
  - $k - \epsilon$  modell: 2 egyenlet (izotróp turbulencia)
  - $k - \omega$  modell: 2 egyenlet (viszkózus alapréteg, tranzíció)
  - RSM modell: 7 egyenlet (anizotrop turbulencia, szekunder áramlás)
- Turbulens struktúrák felbontására épülő modellek:
  - DNS: Felbontott turbulencia (Kolmogorov  $\mu$ -skála)
  - LES: Nagy örvények felbontása + subgrid modell
  - DES: Fal közelében URANS + távol-térben LES (SAS)



# Turbulencia modellezése

## Turbulencia

Balogh  
Miklós

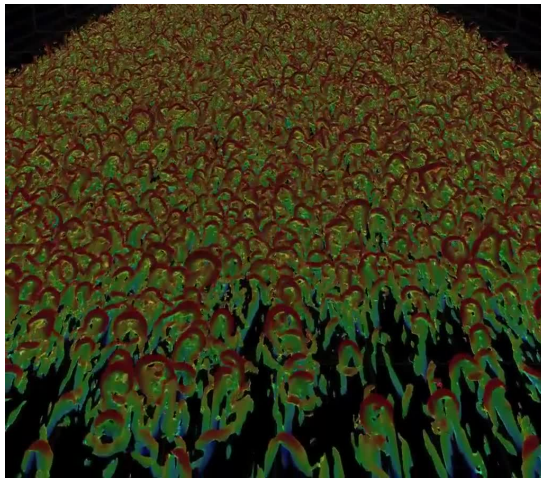
Bevezető

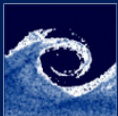
Lamináris

**Turbulens**

Hatások

Határréteg





# Turbulencia hatása a transzportfolyamatokra

## Turbulencia

Balogh  
Miklós

Bevezető

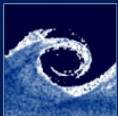
Lamináris

Turbulens

Hatások

Határréteg

- Lamináris áramlások
  - Örvénymentesek
  - Molekuláris diffúzió és az advekció dominál
  - A keveredés lassú
  - Advekció dominál
  - Példa: oldódás nyugvó folyadékban
- Turbulens áramlások
  - Örvénytételek: örvények szállítják a tulajdonságokat
  - Örvényes áramlás (turbulens kaszkád)
  - Turbulens diffúzió dominál
  - Intenzív keveredés
  - Példa: oldódás kavargó folyadékban



## Turbulencia

Balogh  
Miklós

Bevezető

Lamináris

Turbulens

Hatások

**Határréteg**

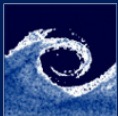
Entry #: V84181

## Spatially developing turbulent boundary layer on a flat plate

J.H. Lee, Y.S. Kwon, N. Hutchins and J.P. Monty

Department of Mechanical Engineering  
The University of Melbourne





# Határréteg

Turbulencia

Balogh  
Miklós

Bevezető

Lamináris

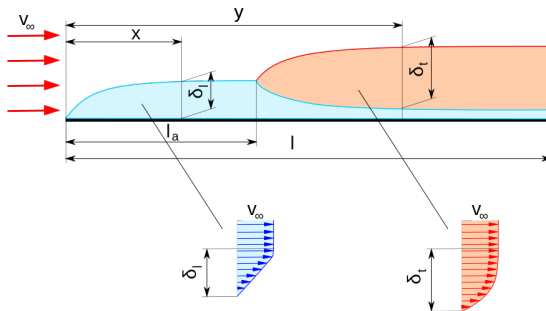
Turbulens

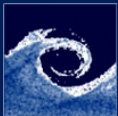
Hatások

Határréteg

Áramlásba helyezett test szilárd felületén kialakuló réteg

- Belső súrlódás (viszkózitás) dominál
- Torlópontban és a felületen a sebesség zérus
- A felülettől távolodva a sebesség növekszik
- Az ideálistól eltérő réteg a határréteg





# Transzport a határrétegben

## Turbulencia

Balogh  
Miklós

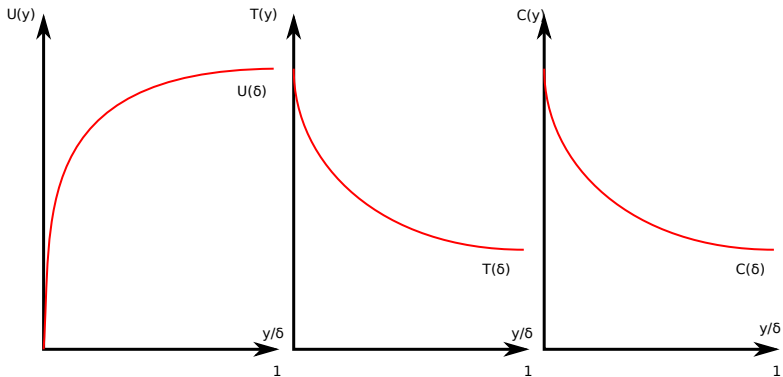
Bevezető

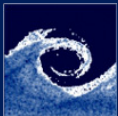
Lamináris

Turbulens

Hatások

Határréteg





# Ellenállás - Reynolds szám

## Turbulencia

Balogh  
Miklós

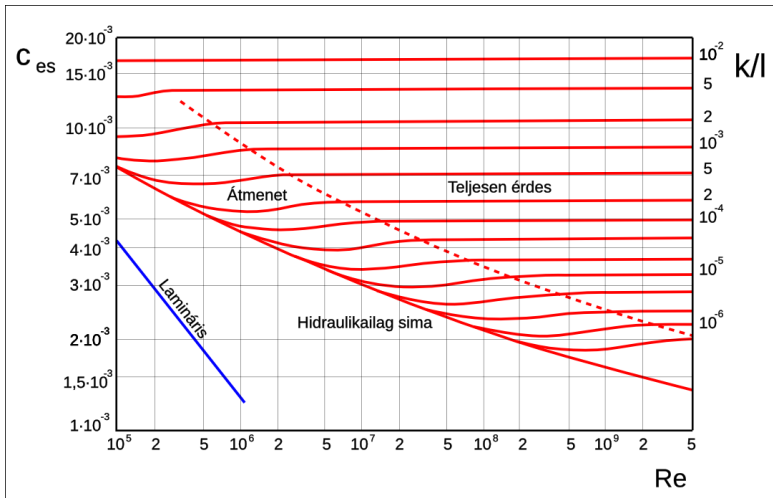
Bevezető

Lamináris

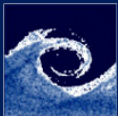
Turbulens

Hatások

Határérték







# Határréteg leválás

## Turbulencia

Balogh  
Miklós

Bevezető

Lamináris

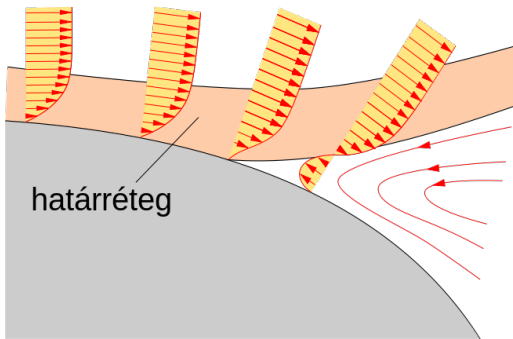
Turbulens

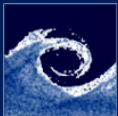
Hatások

Határréteg

Leválás: visszaáramlás (örvények) a felület mentén

- Hirtelen lassuló áramlás (pl. íveltség miatt)
- Növekvő nyomás irányában áramló közeg





# Határréteg leválás megakadályozása

## Turbulencia

Balogh  
Miklós

Bevezető

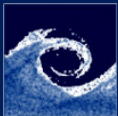
Lamináris

Turbulens

Hatások

Határréteg

- Csúsztatófeszültség csökkentése
- Nyomás-változás csökkentése (íveltség csökkentése)
- Telt sebességmegoszlás létrehozása
  - határréteg elszívás
  - határréteg gyorsítás
  - határréteg frissítés
  - aktív áramlás-szabályozás
- A határréteg leválás káros, megszüntetése növeli berendezéseink hatásfokát, csökkenti a veszteségeket!



# Határréteg leválás – példák

## Turbulencia

Balogh  
Miklós

Bevezető

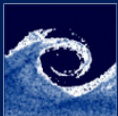
Lamináris

Turbulens

Hatások

Határréteg





# Határréteg leválás – példák

## Turbulencia

Balogh  
Miklós

Bevezető

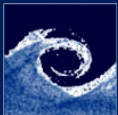
Lamináris

Turbulens

Hatások

**Határréteg**





## Turbulencia

Balogh  
Miklós

Bevezető

Lamináris

Turbulens

Hatások

Határréteg

Köszönöm a figyelmet!