



# Turbulence a přístupy jejího řešení v CFD

# Obsah přednášky

- Turbulence – co to je? Proč je důležité ji řešit?
- Přístupy řešení turbulence v CFD
- Potřeba použití turbulentních modelů
- Nejčastěji používané modely turbulence
- Řešení turbulentního proudu v blízkosti stěny

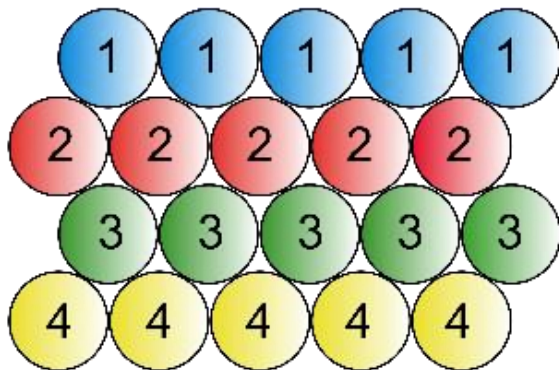
# Turbulence – co to je? Proč je důležité ji řešit?

# Úvod do turbulence

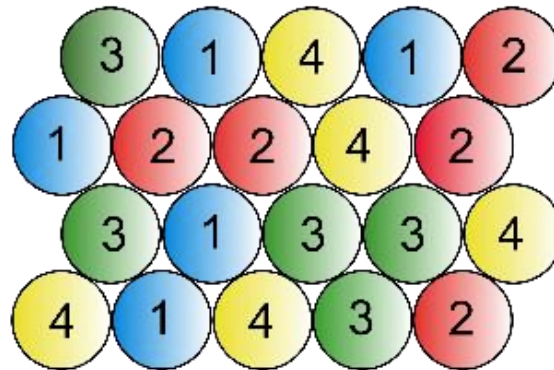
- Proudění může být laminární, turbulentní, nebo přechodové.
- **Většina případů** v průmyslové praxi **je** však **turbulentní**.
- Řešení laminárního proudu je téměř exaktní (hustota sítě, okrajové podmínky).
- Pro zachycení turbulentních struktur pomocí výpočetní sítě bychom potřebovali velký počet konečných objemů.
- Řešení turbulentního proudu je tak velkou výzvou a často způsobuje výpočtářům problémy.
- Turbulence je vždy **nestacionární a 3D** (ve všech dimenzích).

## Úvod do turbulence (2)

PŘED

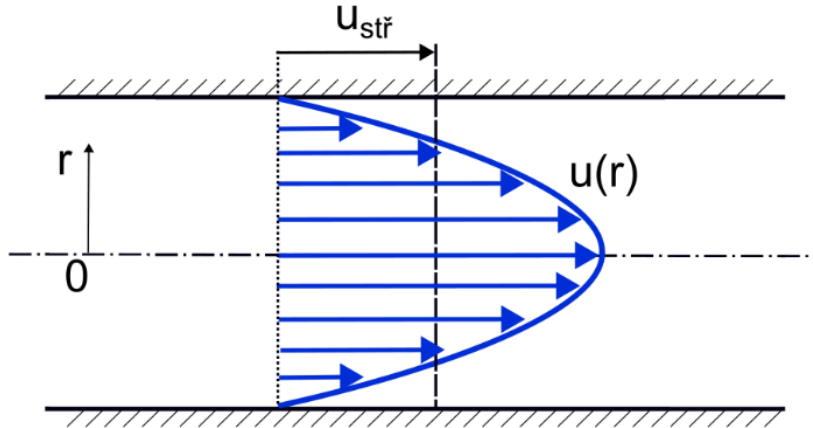


PO

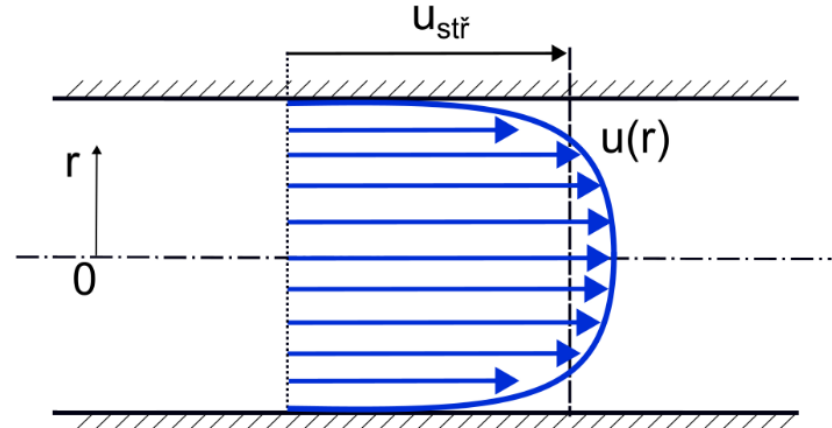


# Úvod do turbulence (3)

## Laminární profil

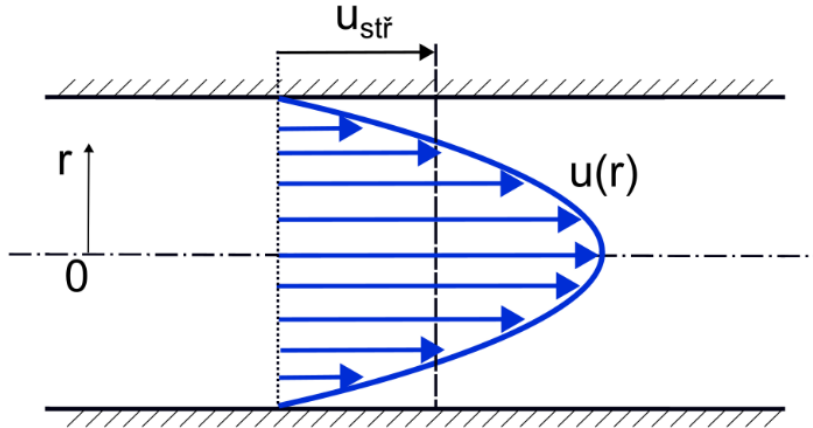


## Turbulentní profil

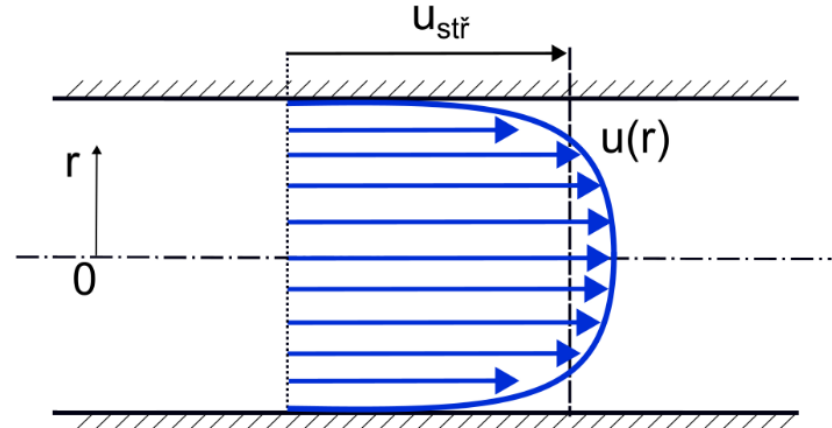


# Úvod do turbulence (3)

## Laminární profil



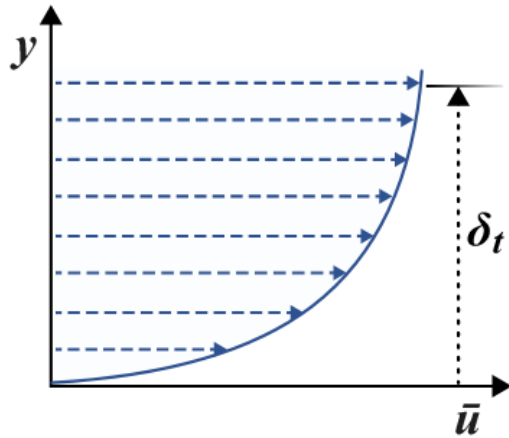
## Turbulentní profil



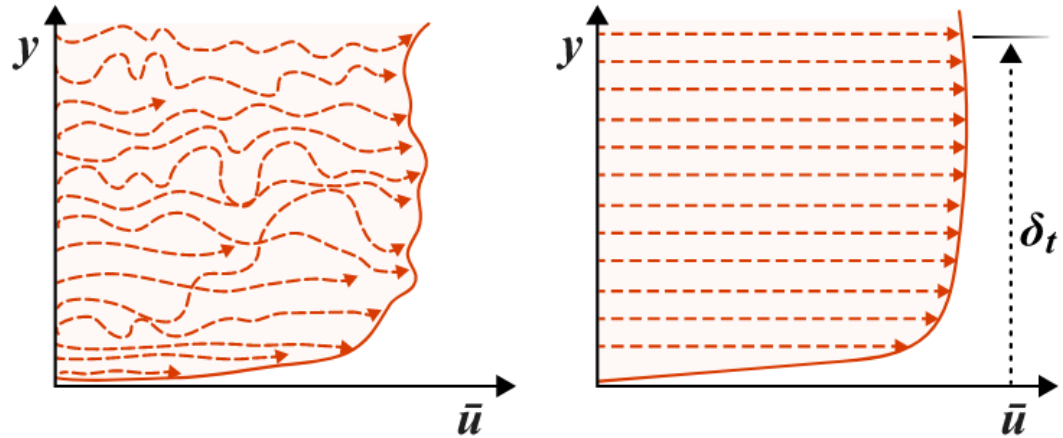
**POZOR! Jedná se o časově  
středované průběhy!**

## Úvod do turbulence (4)

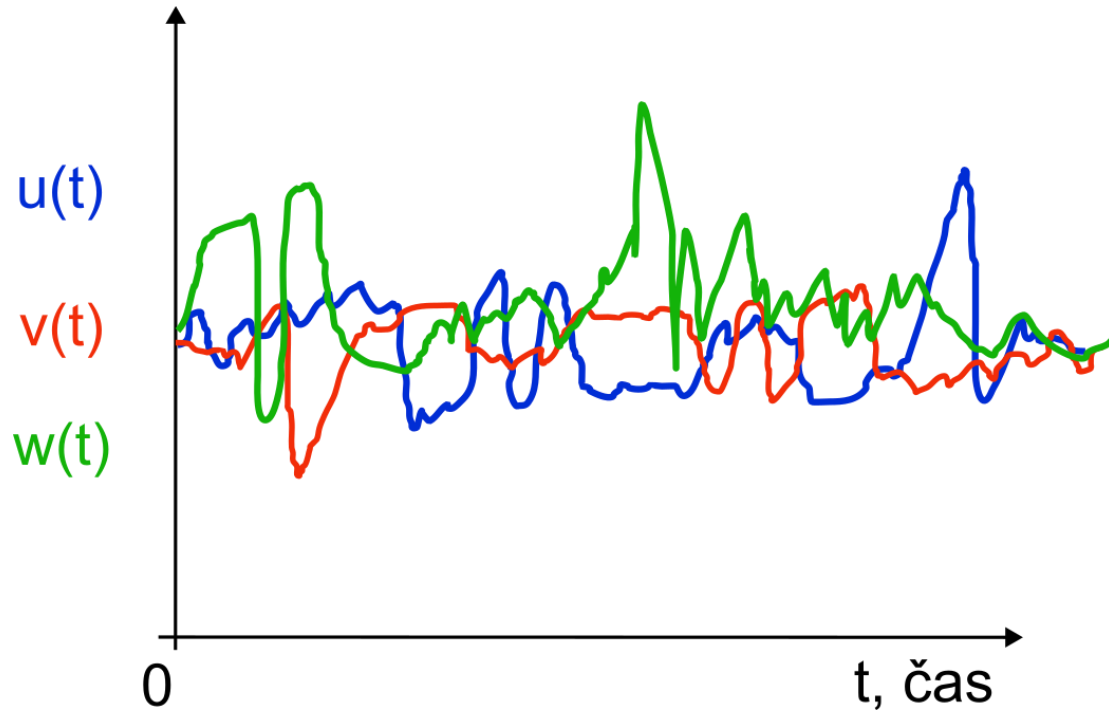
Laminární profil



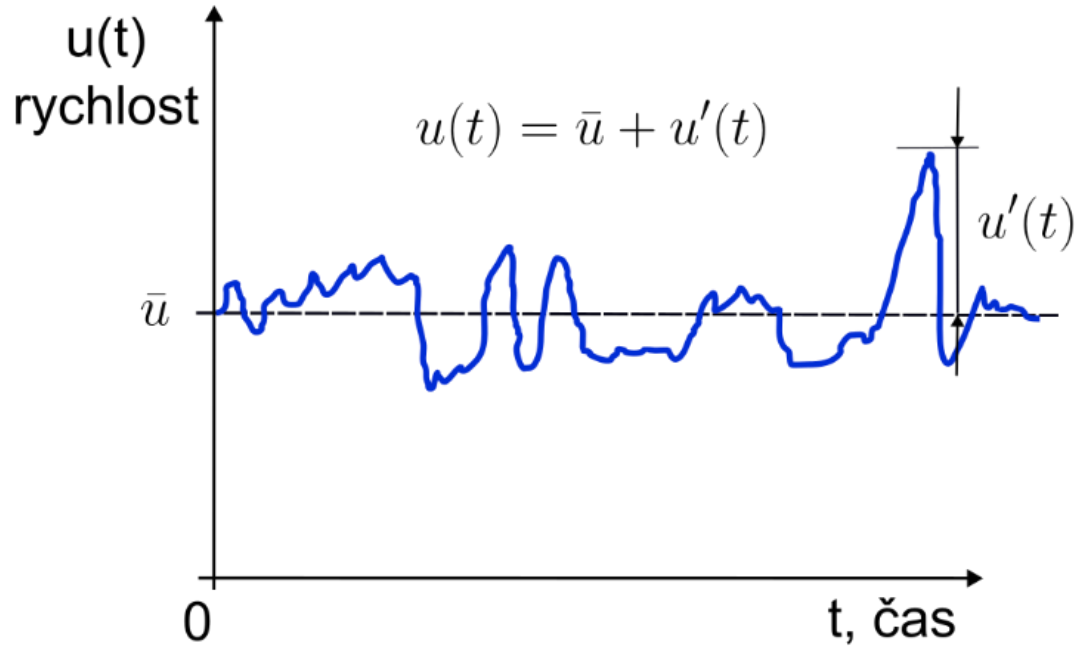
Turbulentní profil



# Úvod do turbulence – rychlost v bodě



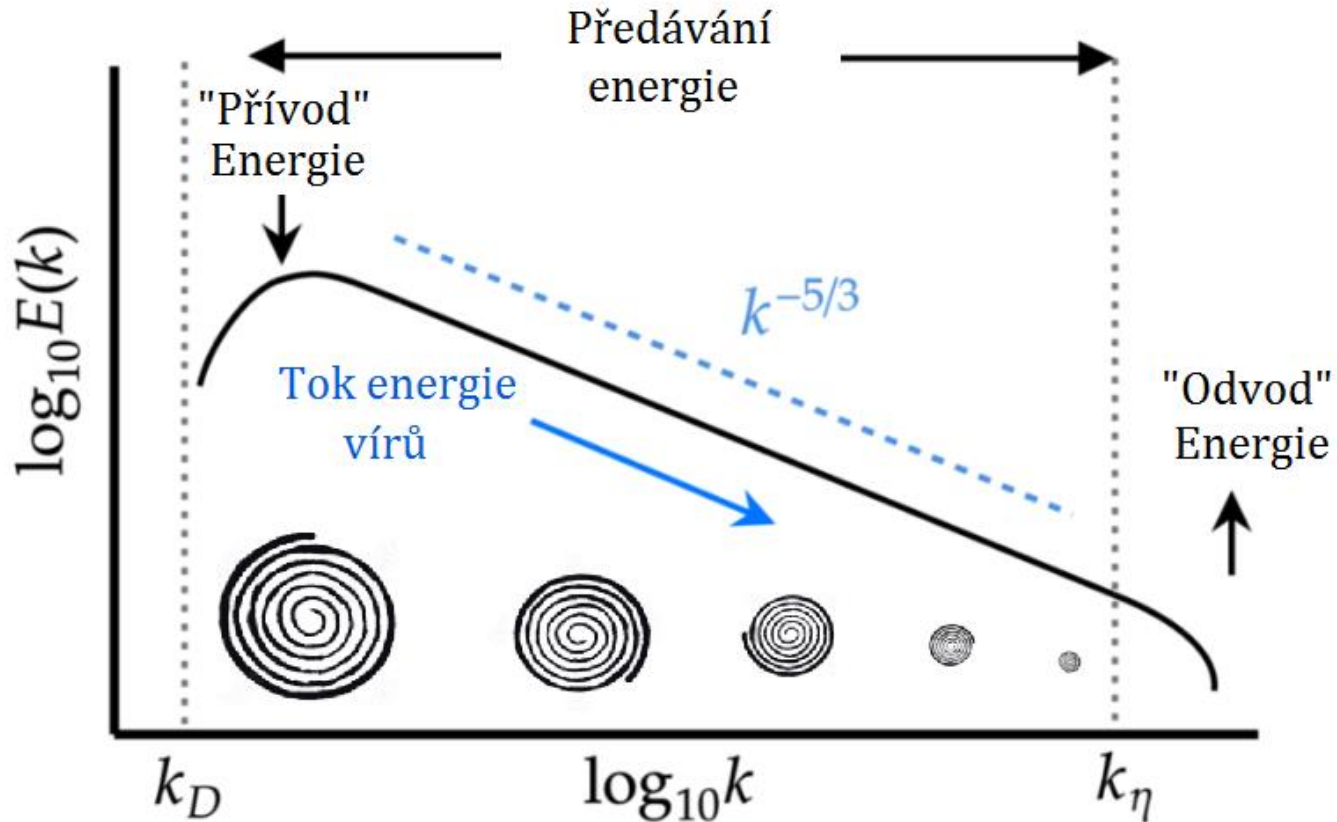
# Úvod do turbulence – rychlost v bodě (2)



# Turbulence – základní myšlenka

- **Turbulentní proudy jsou charakteristické náhodnými a náhlými změnami (fluktuace) veličin**, většinou v oblastech zavíření proudu.
- **Metoda přímé numerické simulace** (Direct Numerical Simulation - DNS) je zatím **pro běžné inženýrské aplikace nepoužitelná**.
- Její použití by vyžadovalo použití velkého počtu elementů (zachycení turbulentních struktur všech délkových a časových měřítek).
- Proto se ještě stále **musíme** ve většině případů **spoléhat na experimenty a empirické korelace** (vzorce).

## Turbulentní energetická kaskáda - Kolmogorov

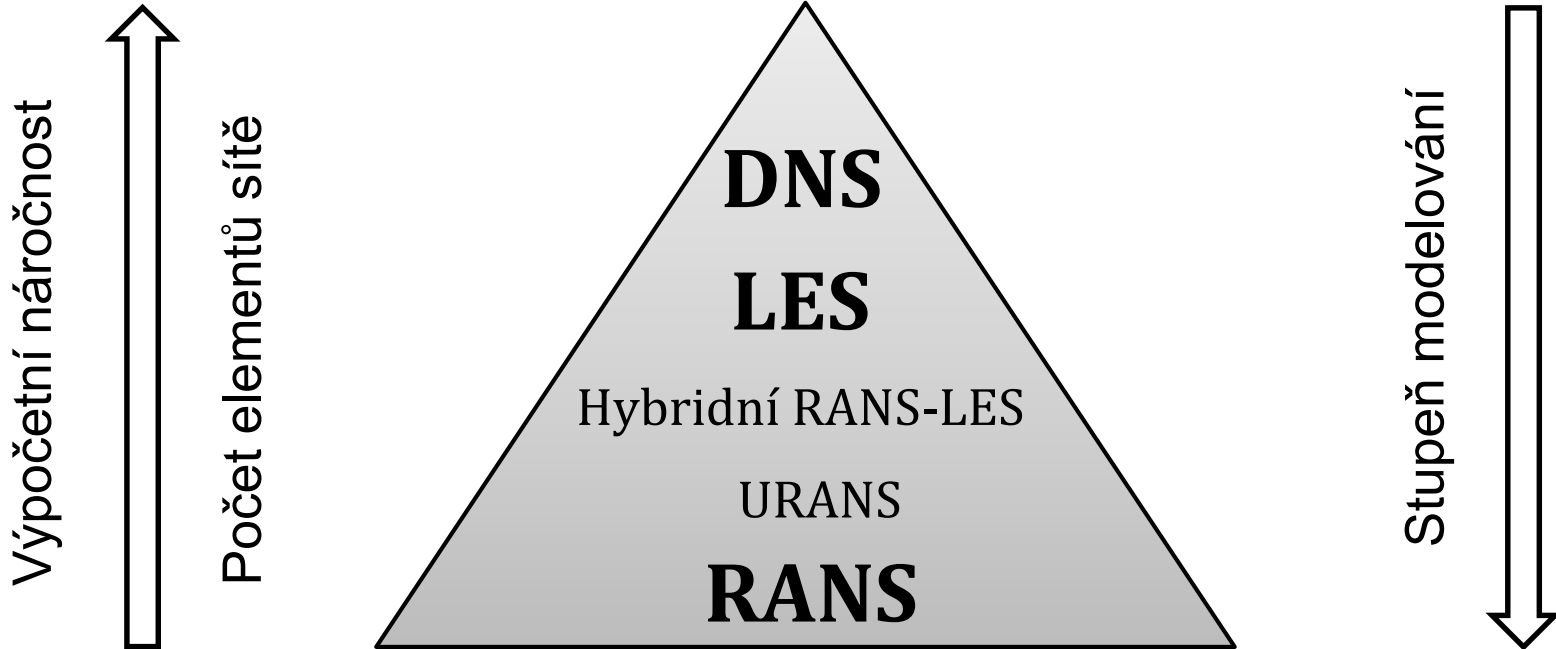


# Přístupy řešení turbulence v CFD

# Přístupy řešení turbulence v CFD

- Obecně se v současnosti využívají **3 základní přístupy řešení**.
- Jejich využití záleží na daném případě a dostupném výpočetním výkonu.
- Teoreticky lze turbulenci **zcela počítat pomocí výpočetní sítě (DNS metoda)**.
- Prakticky je tato metoda stále zatím nepoužitelná.
- Na druhém konci spektra je přístup využívající **zcela modelování turbulentních struktur (RANS metoda)**.
- Poslední přístup (**LES metoda**) je zjednodušeně **kompromis mezi těmito dvěma**.

## Přístupy řešení turbulence v CFD (2)



\*Direct Numerical Simulation

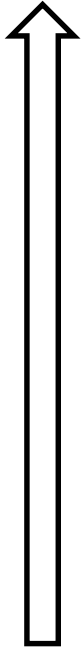
\*Large Eddy Simulation

\*Reynolds-Averaged Navier-Stokes

\*Unsteady RANS (pro nestacionární úlohy)

# Přístupy řešení turbulence v CFD (3)

Výpočetní náročnost

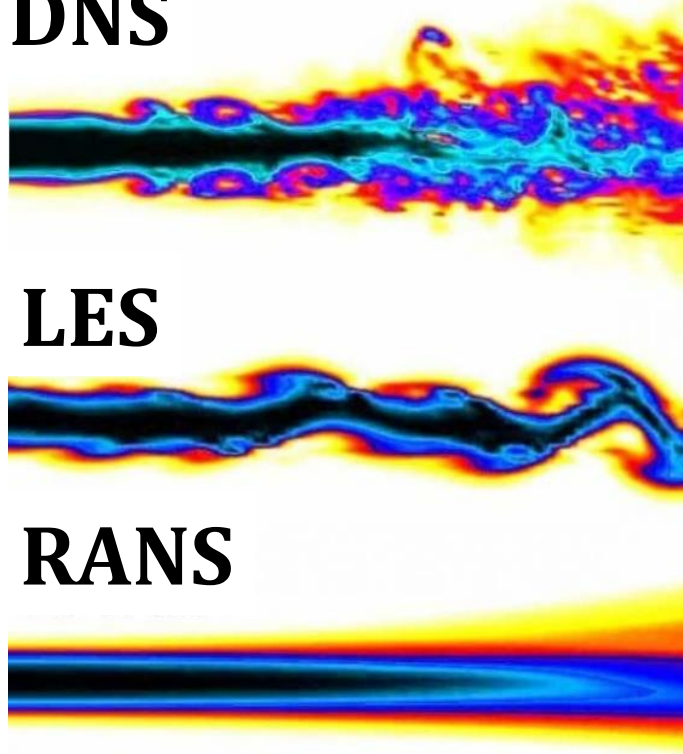


Počet elementů sítě

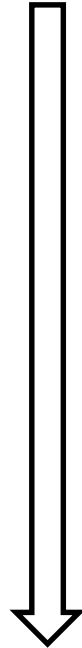
**DNS**

**LES**

**RANS**



Stupeň modelování



## Přímé řešení turbulence (DNS)

- **Nevyužívá žádný model turbulence**, přímo řešíme turbulentní struktury pomocí dostatečně husté výpočetní sítě.
- **Kompletní řešení 3D nestacionárních N-S rovnic, rovnice kontinuity (a en. rovnice).**
- **Vysoké požadavky na hustotu a kvalitu výpočetní sítě.**
- Snaha o zachycení vírů všech délkových a časových měřítek.

## Přímé řešení turbulence (DNS) (2)

- V praxi v současné době **použitelné pouze pro jednoduché případy proudění** a nízká Reynoldsova čísla.
- Použití **zejména pro základní výzkum** pro hlubší pochopení jevu turbulence.
- Umožňuje zkoumání jevů, které jsou obtížně měřitelné, nebo v některých případech neměřitelné vůbec.

# Řešení turbulence pomocí modelů

- Turbulentní struktury potřebujeme nějak zachytit/popsat pomocí jednodušších principů bez nutnosti použití velmi husté sítě.
- Jednou z možností je se inspirovat molekulárním pohybem (Boussinesq).
- V laminárním proudu je molekulární viskozita příčinou smykového (tečného) napětí.
- V turbulentním proudu je toto smykové napětí také, avšak vyskytuje se zde navíc ještě **přídavné (turbulentní) smykové napětí, které je důsledkem turbulentních fluktuací.**

$$\tau_{\text{celk}} = \tau_{\text{lam}} + \tau_{\text{tur}} \quad (1)$$

## Řešení turbulence pomocí modelů (3)

- Modely využívající Boussinesqovy hypotézy jsou tzv. EVM modely a tvoří podskupinu RANS modelů.
- **EVM = Eddy Viscosity Model**, tzv. model přídavné vírové viskozity (napětí).
- Tato tzv. **TURBULENTNÍ VISKOZITA NENÍ MATERIÁLOVOU VLASTNOSTÍ, ale vlastností proudění!**
- Modely se snaží o co nejvhodnější vyjádření turbulentní (vírové) viskozity, a tím o co nejvěrnější zachycení turbulentních struktur.

$$\mu_t = f(\text{parametry turbulence})$$

(2)

# Boussinesqova hypotéza

- Průměrování/středování N-S rovnic způsobí, že se v rovnicích objeví **dodatečné členy**, tzv. **Reynoldsova napětí**.

$$\frac{\partial(\rho\bar{\mathbf{U}})}{\partial t} + \nabla \cdot \{\rho\bar{\mathbf{U}}\bar{\mathbf{U}}\} = -\nabla p + \nabla \cdot \{\mu[\nabla\bar{\mathbf{U}} + (\nabla\bar{\mathbf{U}})^T]\} - \nabla \left( \frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot \bar{\mathbf{U}}) \right) - \nabla \cdot \underbrace{\{\rho\bar{\mathbf{U}}'\bar{\mathbf{U}}'\}} + \rho\mathbf{g} \quad (3)$$

## Reynoldsova napětí

- Abychom uzavřeli systém řešených rovnic, je nutné Reynoldsova napětí nějakým způsobem vyjádřit (modelovat).
- Nejčastěji se využívá tzv. **Boussinesqovy hypotézy**.

$$-\rho\bar{\mathbf{U}}'\bar{\mathbf{U}}' = \underbrace{\mu_t\{\nabla\bar{\mathbf{U}} + (\nabla\bar{\mathbf{U}})^T\}} - \frac{2}{3}\rho k\mathbf{I} - \frac{2}{3}\mu_t(\nabla \cdot \bar{\mathbf{U}})\mathbf{I} \quad (4)$$

## Gradienty střední rychlosti

## Řešení turbulence pomocí modelů (2)

- Pro nestlačitelné proudění se často používá následující tvar.

$$\tau_{\text{tur}} = \tau_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j} = 2\mu_t S_{ij} - \frac{2}{3}\rho k \delta_{ij} \quad (5)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (6)$$

- Dále je potřeba určit turbulentní viskozitu  $\mu_t$ , např.  $\mu_t = f(k, \varepsilon)$ .

# Potřeba použití turbulentních modelů

# Potřeba použití turbulentních modelů

- Modely **se snaží o co nejpřesnější zachycení fyzikálních jevů**, které jsou způsobeny přítomností turbulentních struktur.
- **Ideální turbulentní model** by měl zároveň být **co nejjednodušší**, s komplexitou klesá opodstatněnost jeho použití.
- Popisující matematické vztahy by tedy neměly být příliš složité (i když uvidíte dále :)).
- **Neexistuje univerzální model turbulence!**
- **Výsledky CFD simulací jsou vždy závislé na použitém modelu turbulence.**

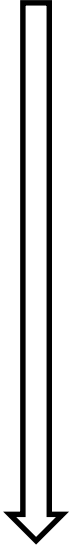
## Potřeba použití turbulentních modelů (2)

- První a nejjednodušší modely turbulence byly tzv. algebraické.
- Sofistikovanější modely využívají jednu či více transportních rovnic (PDR).
- Z tohoto důvodu vznikly také jejich názvy, např. jednorovnicové, dvourovnicové apod.

# Nejčastěji používané modely turbulence

# Modely turbulence skupiny RANS

Výpočetní náročnost



1-rovnicové modely: např. Spalart-Allmaras model

2-rovnicové modely: modely typu  $k-\epsilon$  (Standard, RNG, Realizable\*)  
modely typu  $k-\omega$  (Standard, BSL, SST\*)

Více-rovnicové modely: Reynolds Stress (Reynoldsova napětí) modely (RSM)

Modely pro popis přechodového proudění: např.  $k-k_l-\omega$  model, Transition SST model, ...

DES }  
LES } **Nepatří mezi**  
DNS } **modely skupiny**  
**RANS**

# Oblasti použití modelů skupiny RANS

Model	Chování a oblast použití
<b>Spalart-Allmaras</b>	Ekonomický model pro velké sítě. Dobrý pro lehce složitější případy (kvazi-2D) vnějšího i vnitřního proudění a proudění v mezních vrstvách pod tlakovým gradientem (např. profily, křídla, trupy letadel, raket, trupy lodí). Neuspokojivé výsledky pro 3D proudění, volné smykové vrstvy, proudění se silným odtržením.
<b>Standard k-<math>\epsilon</math></b>	Robustní model. Velmi často používaný navzdory jeho nedostatkům. Neuspokojivé výsledky pro komplexní proudění s nepříznivým tlakovým gradientem, odtržením, nebo silným zakřivením. Vhodný jako startovní model pro inicializaci, počáteční studium alternativních tvarů a parametrické studie.
<b>Realizable k-<math>\epsilon</math></b>	Vhodný pro složitější proudění zahrnující velká tečná napětí nebo často se měnící napětí, schopný modelovat mírné zavíjení, lokálně přechodové proudění (např. odtržení mezní vrstvy, odtrhávání proudu a tvorba úplavu za obtékanými tělesy, odtržení v difuzoru, ventilace místnosti).
<b>RNG k-<math>\epsilon</math></b>	Vlastnosti podobné modelu k- $\epsilon$ Realizable, občas problémy s konvergencí úlohy.
<b>Standard k-<math>\omega</math></b>	Výborný pro stěnami ohraničené proudění s mezní vrstvou, volné smykové oblasti, proudění s nízkým Reynoldsovým číslem v porovnání s modely typu k- $\epsilon$ . Vhodný pro složitější případy proudění s mezní vrstvou pod nepříznivým tlakovým gradientem a pro modelování odtržení (vnější aerodynamika a průtočné části energetických strojů). V některých případech odtržení nadhodnocuje a predikuje jej příliš brzy. Výsledky výrazně závislé na vstupních okrajových podmínkách turbulence.
<b>BSL k-<math>\omega</math></b>	Podobný jako model k- $\omega$ SST. Dobrý pro složitější případy proudění, kde model SST nadhodnocuje odtržení proudu.
<b>SST k-<math>\omega</math></b>	Podobné výhody jako model k- $\omega$ standard. Není citlivý na nastavení vstupních okrajových podmínek turbulence jako model k- $\omega$ standard. Většinou predikuje odtržení proudu lépe než ostatní modely ze skupiny RANS.
<b>RSM</b>	Popisuje fyziku turbulence nejlépe ze všech modelů skupiny RANS. Nepředpokládá izotropickou turbulenci. Vyšší nároky na výkon a paměť PC. Horší konvergence úlohy z důvodu provázanosti Reynoldsových napětí (coupling). Vhodný pro komplexní 3D proudění se silným zakřivením proudu, silné zavíjení nebo rotace (např. zakřivené potrubí, rotační kanály, vířivé spalovací komory, cyklonové odlučovače, ...).

# Oblasti použití modelů skupiny RANS

Model	Chování a oblast použití
<b>Spalart-Allmaras</b>	Ekonomický model pro velké sítě. Dobrý pro lehce složitější případy (kvazi-2D) vnějšího i vnitřního proudění a proudění v mezních vrstvách pod tlakovým gradientem (např. profily, křídla, trupy letadel, raket, trupy lodí). Neuspokojivé výsledky pro 3D proudění, volné smykové vrstvy, proudění se silným odtržením.
<b>Standard k-<math>\epsilon</math></b>	Robustní model. Velmi často používaný navzdory jeho nedostatkům. Neuspokojivé výsledky pro komplexní proudění s nepříznivým tlakovým gradientem, odtržením, nebo silným zakřivením. Vhodný jako startovní model pro inicializaci, počáteční studium alternativních tvarů a parametrické studie.
<b>Realizable k-<math>\epsilon^*</math></b>	Vhodný pro složitější proudění zahrnující velká tečná napětí nebo často se měnící napětí, schopný modelovat mírné zavíjení, lokálně přechodové proudění (např. odtržení mezní vrstvy, odtrhávání proudu a tvorba úplavu za obtékanými tělesy, odtržení v difuzoru, ventilace místnosti).
<b>RNG k-<math>\epsilon</math></b>	Vlastnosti podobné modelu k- $\epsilon$ Realizable, občas problémy s konvergencí úlohy.
<b>Standard k-<math>\omega</math></b>	Výborný pro stěnami ohraničené proudění s mezní vrstvou, volné smykové oblasti, proudění s nízkým Reynoldsovým číslem v porovnání s modely typu k- $\epsilon$ . Vhodný pro složitější případy proudění s mezní vrstvou pod nepříznivým tlakovým gradientem a pro modelování odtržení (vnější aerodynamika a průtočné části energetických strojů). V některých případech odtržení nadhodnocuje a predikuje jej příliš brzy. Výsledky výrazně závislé na vstupních okrajových podmínkách turbulence.
<b>BSL k-<math>\omega</math></b>	Podobný jako model k- $\omega$ SST. Dobrý pro složitější případy proudění, kde model SST nadhodnocuje odtržení proudu.
<b>SST k-<math>\omega^*</math></b>	Podobné výhody jako model k- $\omega$ standard. Není citlivý na nastavení vstupních okrajových podmínek turbulence jako model k- $\omega$ standard. Většinou predikuje odtržení proudu lépe než ostatní modely ze skupiny RANS.
<b>RSM</b>	Popisuje fyziku turbulence nejlépe ze všech modelů skupiny RANS. Nepředpokládá izotropickou turbulenci. Vyšší nároky na výkon a paměť PC. Horší konvergence úlohy z důvodu provázanosti Reynoldsových napětí (coupling). Vhodný pro komplexní 3D proudění se silným zakřivením proudu, silné zavíjení nebo rotace (např. zakřivené potrubí, rotační kanály, vířivé spalovací komory, cyklonové odlučovače, ...).

# Turbulentní model k-ε

- **Standardní verze modelu k-ε** je popsána následujícími rovnicemi :

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} k) = \nabla \cdot \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + P_k + P_b - \rho \epsilon + S_k \quad (7)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \epsilon) = \nabla \cdot \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (P_k + C_{3\epsilon} P_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (8)$$

- Kde  $\mu_t$  je turbulentní dynamická viskozita definována vztahem:

$$\mu_t = C_\mu \frac{\rho k^2}{\epsilon} \quad (9)$$

- $P_k$  a  $P_b$  jsou produkční členy způsobené tečným napětím střední rychlosti a vztlakem.
- $S_k$  a  $S_\epsilon$  jsou uživatelsky definované zdroje turbulentní kinetické energie ( $k$ ) a disipace ( $\epsilon$ ).

# Turbulentní model k-ε

- Standardní verze modelu k-ε je popsána následujícími rovnicemi :

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} k) = \nabla \cdot \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + \underbrace{P_k + P_b - \rho \epsilon + S_k}_{\text{Zdrojové členy (produkce a destrukce)}} \quad (7)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \epsilon) = \nabla \cdot \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right) + \underbrace{C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (P_k + C_{3\epsilon} P_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon}_{\text{Zdrojové členy (produkce a destrukce)}} \quad (8)$$

- Kde  $\mu_t$  je turbulentní dynamická viskozita definována vztahem:

$$\mu_t = C_\mu \frac{\rho k^2}{\epsilon} \quad (9)$$

- $P_k$  a  $P_b$  jsou produkční členy způsobené tečným napětím střední rychlosti a vztlakem.
- $S_k$  a  $S_\epsilon$  jsou uživatelsky definované zdroje turbulentní kinetické energie ( $k$ ) a disipace ( $\epsilon$ ).

## Turbulentní model k- $\epsilon$ (2)

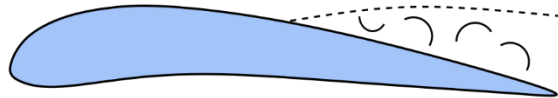
- Hodnoty koeficientů  $C_\mu$ ,  $C_{1\epsilon}$ ,  $C_{2\epsilon}$  a  $C_{3\epsilon}$  se mezi jednotlivými varianty modelu (**Standard, RNG, Realizable**) mohou mírně lišit.
- Koeficienty modelu k- $\epsilon$  standard se vyvíjely v čase.

Model	$\sigma_k$	$\sigma_\epsilon$	$C_{1\epsilon}$	$C_{2\epsilon}$	$C_\mu$
Jones & Launder (1972)	1.0	1.3	<b>1.55</b>	<b>2.0</b>	0.09
Launder & Spalding (1974)	1.0	1.3	<b>1.44</b>	<b>1.92</b>	0.09
Launder & Sharma (1974)	1.0	1.3	<b>1.44</b>	<b>1.92</b>	0.09

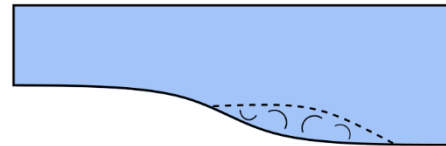
- Koeficienty od Launder & Sharma (1974) jsou nejaktuálnější a jsou používané v aktuálních verzích programů Ansys Fluent/CFX, Star CCM+ a OpenFOAM.

## Turbulentní model k- $\epsilon$ (3)

- Model k- $\epsilon$  standard **není přesný pro predikci proudění v mezní vrstvě s nepříznivým tlakovým gradientem.**
- V nadzvukovém proudu za přítomnosti rázových vln je jeho přesnost ještě slabší.
- Pro popis proudění ve vnější aerodynamice a průtočných částech energetických strojů je potřeba lepší model.
- Existuje celá řada modelů pro lepší popis proudění s nepříznivým tlakovým gradientem, např. Spalart - Allmaras, k -  $\omega$  Standard, k -  $\omega$  SST, ...



Održení na profilu



Održení v difuzoru

## Turbulentní model k- $\omega$

- **Standardní verze modelu k- $\omega$**  model je popsána následujícími rovnicemi:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} k) = \nabla \cdot \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + \underbrace{P_k + P_b - \rho \epsilon + S_k}_{\text{Zdrojové členy (produkce a destrukce)}} \quad (10)$$

Zdrojové členy (produkce a destrukce)

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \omega) = \nabla \cdot \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \nabla \omega \right) + \underbrace{\alpha \frac{\omega}{k} \rho P_k - \beta \rho \omega^2 + S_\omega}_{\text{Zdrojové členy (produkce a destrukce)}} \quad (11)$$

Zdrojové členy (produkce a destrukce)

- Obě veličiny  $\omega$  a  $\epsilon$  popisují disipaci turbulentní kinetické energie ( $k$ ).
- Model k- $\omega$  má odlišné hodnoty empirických koeficientů ( $\alpha = 5/9$ ,  $\beta = 0.075$ ,  $\beta^* = C_\mu$ ,  $\sigma_k = 2$ ,  $\sigma_\omega = 2$ ).

## Turbulentní model k- $\omega$ (2)

- Můžeme poměrně snadno získat  $\epsilon$  pomocí k a  $\omega$  dle následujícího vztahu

$$\epsilon = C_{\mu} \omega k = \beta^* \omega k \quad (12)$$

- Turbulentní viskozita je počítána ze vztahu:

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega} = C_{\mu} \frac{\rho k^2}{\epsilon} \quad (13)$$

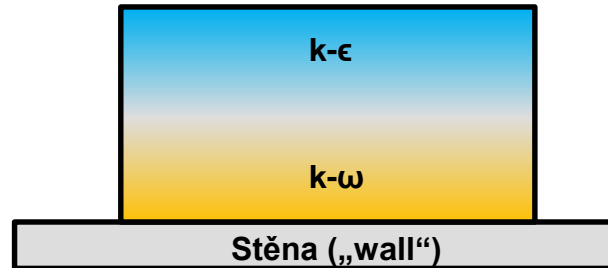
- Model k- $\omega$  je zpravidla přesnější než model k- $\epsilon$  v případech nepříznivého tlakového gradientu nebo mírného odtržení proudu.

## Turbulentní model $k-\omega$ (3)

- Nicméně i **malé změny v okrajové podmínce turbulence volného proudu mají významný dopad na výsledky.**
- Toto lze obejít použitím jednoho z tzv. hybridních modelů, jenž kombinuje model  $k-\omega$  s modelem  $k-\epsilon$ .
- Výsledkem je pak model  $k-\omega$  SST nebo  $k-\omega$  BSL model.

## Turbulentní model $k-\omega$ (3)

- Nicméně i malé změny v okrajové podmínce turbulence volného proudu mají významný dopad na výsledky.
- Toto lze obejít použitím jednoho z tzv. hybridních modelů, jenž kombinuje model  $k-\omega$  s modelem  $k-\epsilon$ .
- Výsledkem je pak model  $k-\omega$  SST nebo  $k-\omega$  BSL model.

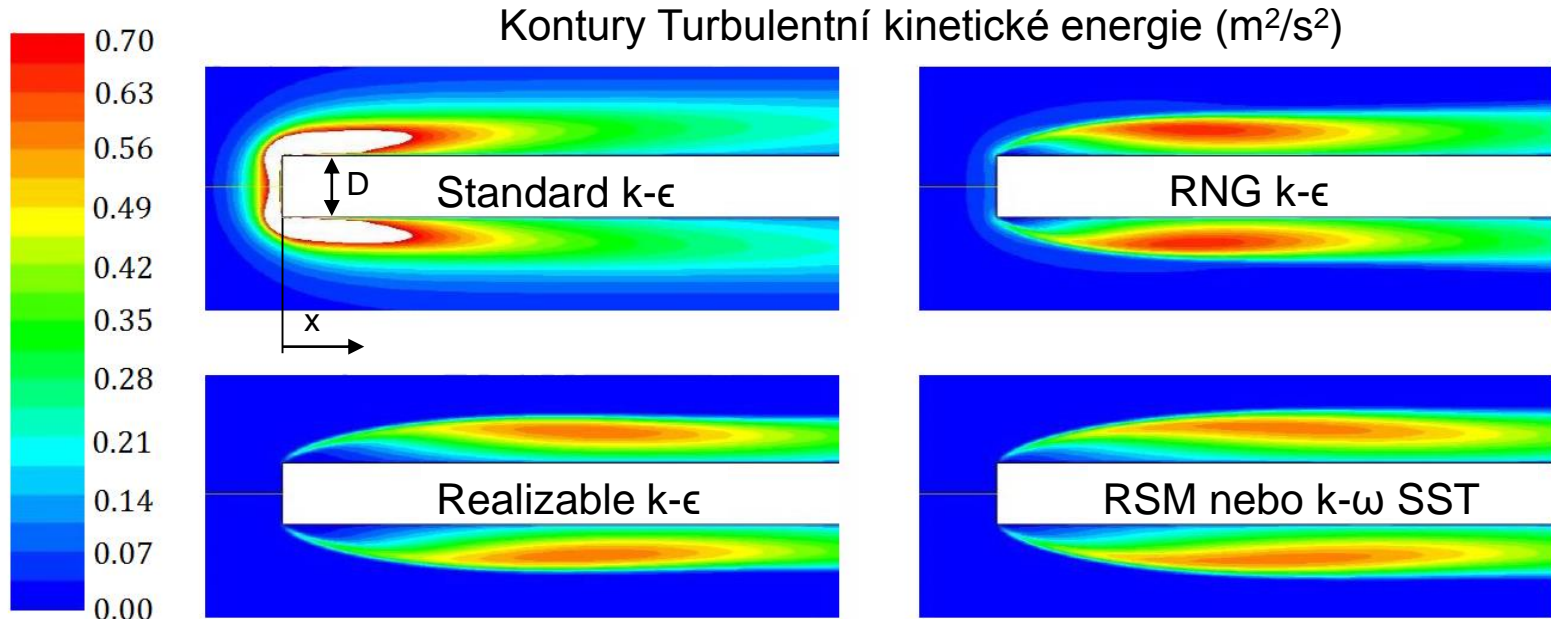


## Turbulentní model k- $\omega$ SST

- **Model k- $\omega$  SST** (Shear Stress Transport) je tzv. **hybridním 2-rovnicovým modelem**, který **kombinuje přednosti standardních verzí modelů typu k- $\epsilon$  a k- $\omega$** .
- Model k- $\omega$  Standard popisuje daleko lépe proudění v mezní vrstvě v porovnání s modely typu k- $\epsilon$ .
- Původní model k- $\omega$  Standard (Wilcox) je příliš citlivý na nastavenou hodnotu veličiny  $\omega$  (OP) ve volném proudu, zatímco tento nedostatek model k- $\epsilon$  nemá.
- Modely typu k- $\epsilon$  a k- $\omega$  jsou zkombinovány tak, že model k- $\omega$  SST se chová jako model typu k- $\omega$  u pevné stěny a jako model typu k- $\epsilon$  ve volném proudu.

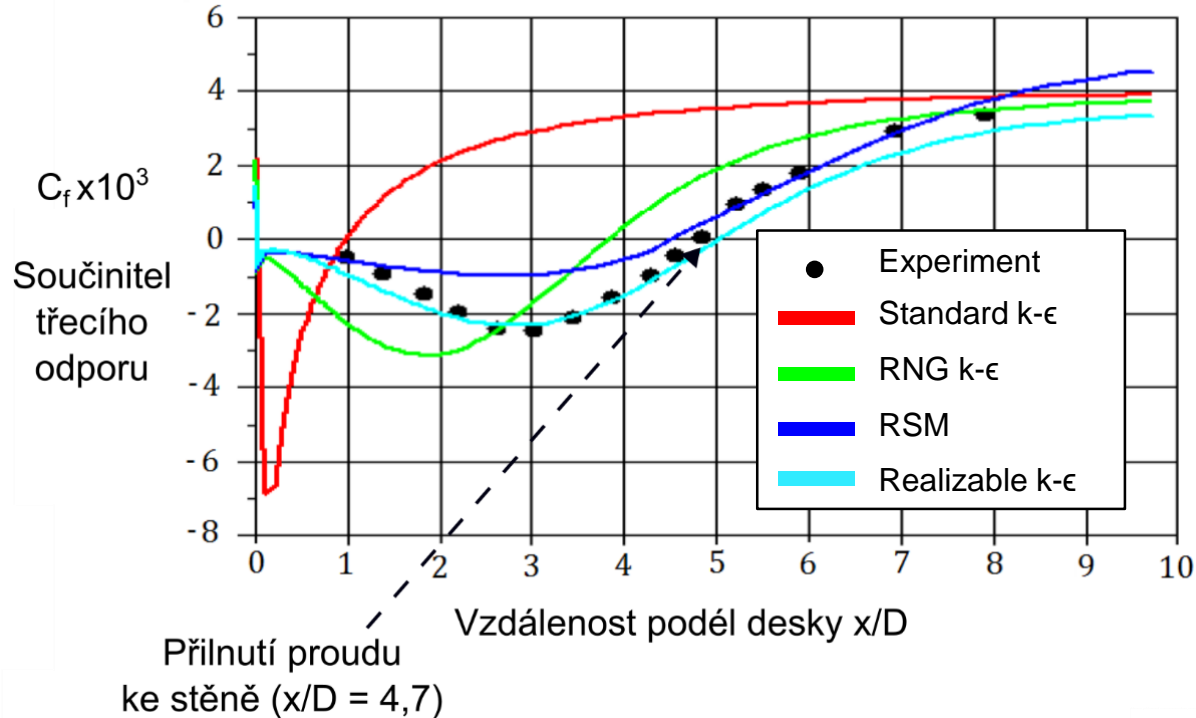
# Příklad: Turbulentní proudění okolo desky

- Například model  $k-\epsilon$  Standard výrazně nadhodnocuje produkci turbulence v místě stagnace proudu.



## Příklad: Turbulentní proudění okolo desky (2)

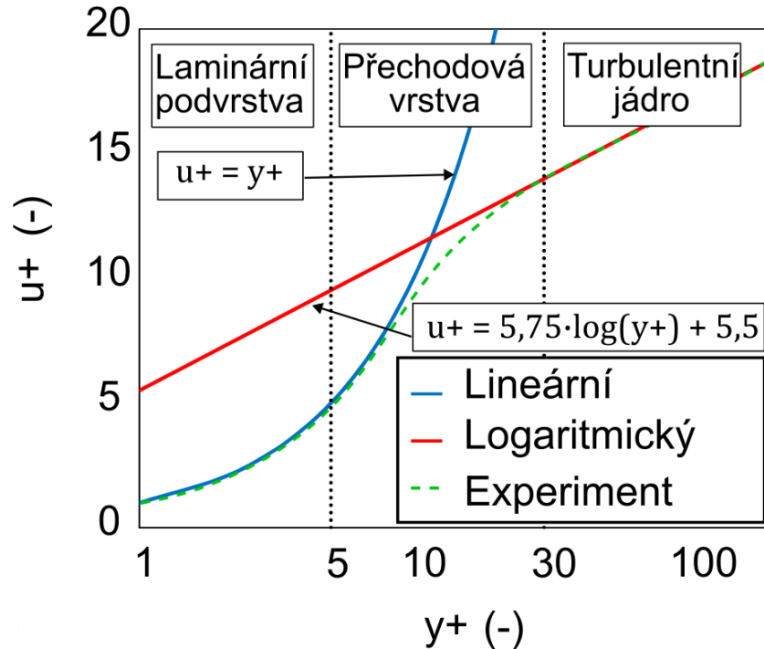
- Naproti tomu model  $k-\epsilon$  Standard značně podhodnocuje velikost separační bubliny, zatímco model  $k-\epsilon$  Realizable zachycuje tuto velikost relativně přesně.



# Řešení turbulentního proudu v blízkosti stěny

# Univerzální zákon stěny

- V blízkosti stěny platí tzv. **Univerzální zákon stěny v turbulentním proudu.**



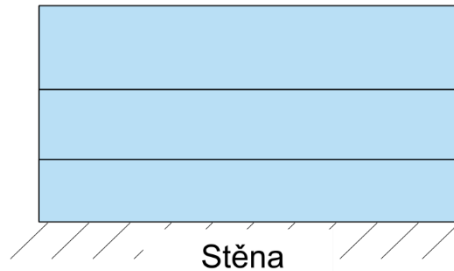
$$u^+ = \frac{u}{u_\tau} \quad (14)$$

$$y^+ = \frac{\rho u_\tau y}{\mu} \quad (15)$$

$$u_\tau = \sqrt{\frac{|\tau_w|}{\rho}} \quad (16)$$

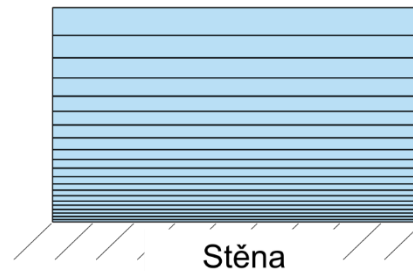
# Způsoby řešení v mezní vrstvě

- Rozlišujeme **2 základní způsoby řešení** turbulentního proudění v blízkosti stěny:
  1. Pomocí tzv. **stěnových funkcí**
  2. Pomocí **zahuštění sítě** (přímé řešení mezní vrstvy)



1) **Využití stěnových funkcí**

$$30 < y^+ < 200$$



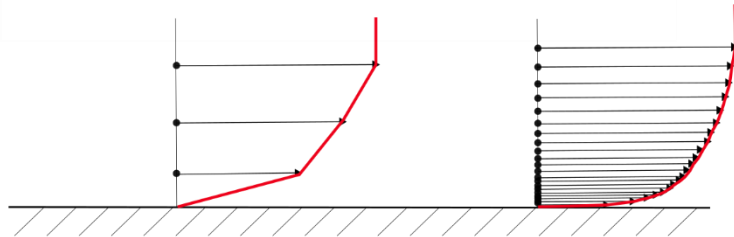
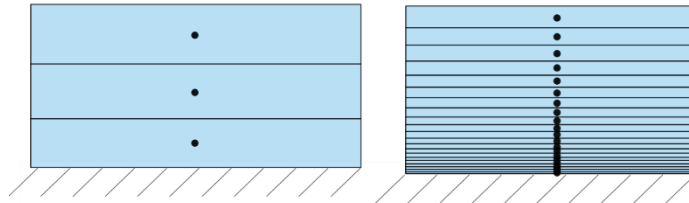
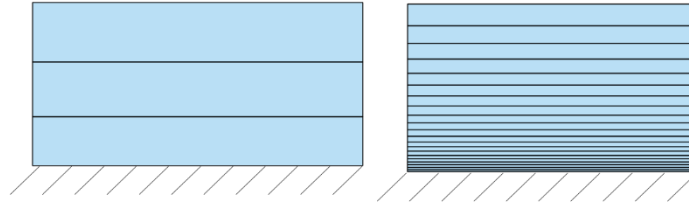
2) **Přímé řešení profilu v mezní vrstvě**

$$y^+ \leq 5 \\ (y^+ \approx 1)$$

# Způsoby řešení v mezní vrstvě (2)

Stěnové  
funkce

Zahuštění  
sítě



# Shrnutí přednášky

- **Turbulence** jako jeden z fyzikálních jevů
- **Přístupy řešení** turbulence (**DNS, LES, RANS**)
- Potřeba modelování turbulentního proudění (RANS)
- Běžně používané modely RANS (2-rovnicové modely:  $k-\epsilon$  a  $k-\omega$ )
- **Řešení** turbulentního proudu **v blízkosti stěny**



# Děkuji za pozornost