

# Počítačová simulace turbulentního proudění

Jiří Hrubeš, Zuzana Procházková,  
Ondřej Bouček, Jakub Sláma

# CDF – Computational Fluid Dynamics (Výpočetní dynamika tekutin )

- Zabývá se počítačovým simulováním proudění tekutin.
- Hlavním cílem je vypočítat vektorové pole rychlosti:
  1. Stacionární (ustálené)
  2. Mění se v čase
- Mohou nás zajímat i ostatní veličiny.

# Rovnice pro výpočet

## Navierovy-Stokesovy rovnice

- Rovnice jsou odvozeny ze zákonu zachování: hybnosti a hmoty

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + v * \nabla v \right) = -\nabla p + \nabla * T + f$$

$$\left( \frac{\partial \rho}{\partial t} + v * \nabla \rho \right) = -\rho \nabla * v$$

- $v$  – rychlost,  $\rho$  – hustota,  $p$  – tlak,  $T$  – tenzor napetí,  $f$  – objemová síla

# Nestlačitelné proudění

- Je-li  $\rho(x) = \rho_0$ , jde o nestlačitelné proudění:

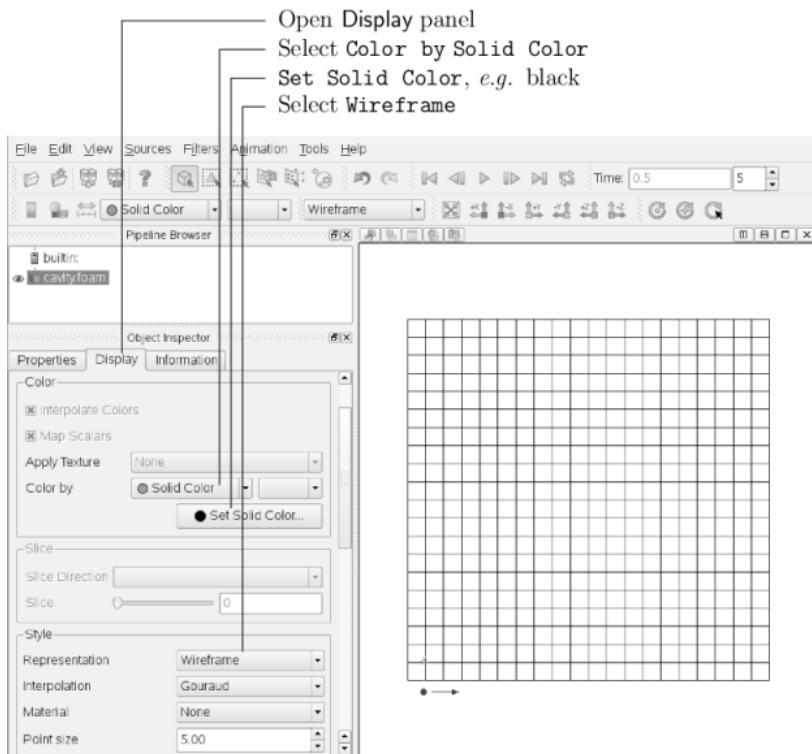
$$\rho_0 \left( \frac{\partial v}{\partial t} + v * \nabla v \right) = -\nabla p + \mu \Delta v + f$$
$$\nabla * v = 0$$

# Reynoldsovo číslo

- Je to bezrozměrná veličina, která dává do souvislosti setrvačné síly a viskozitu.
- Reynoldsovo číslo definujeme jako  **$Re = LV/\nu$**
- V intervalu  **$2320 < Re < 4000$**  je tzv. přechodná oblast mezi laminárním a turbulentním prouděním.

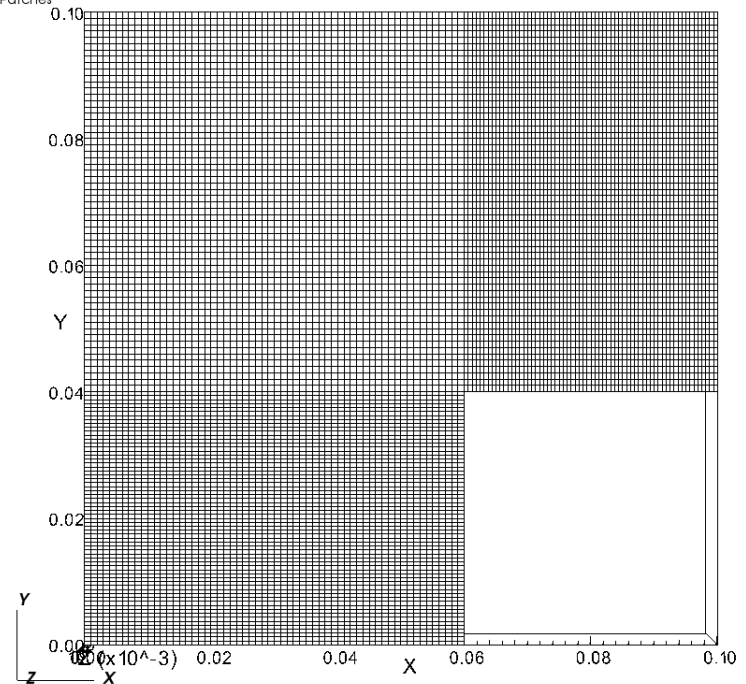
# Numerická mřížka

- Slouží k vykreslení proudění.
- Mřížka se v našem případě skládá z obdélníků, které udávají rozlišení obrazu.



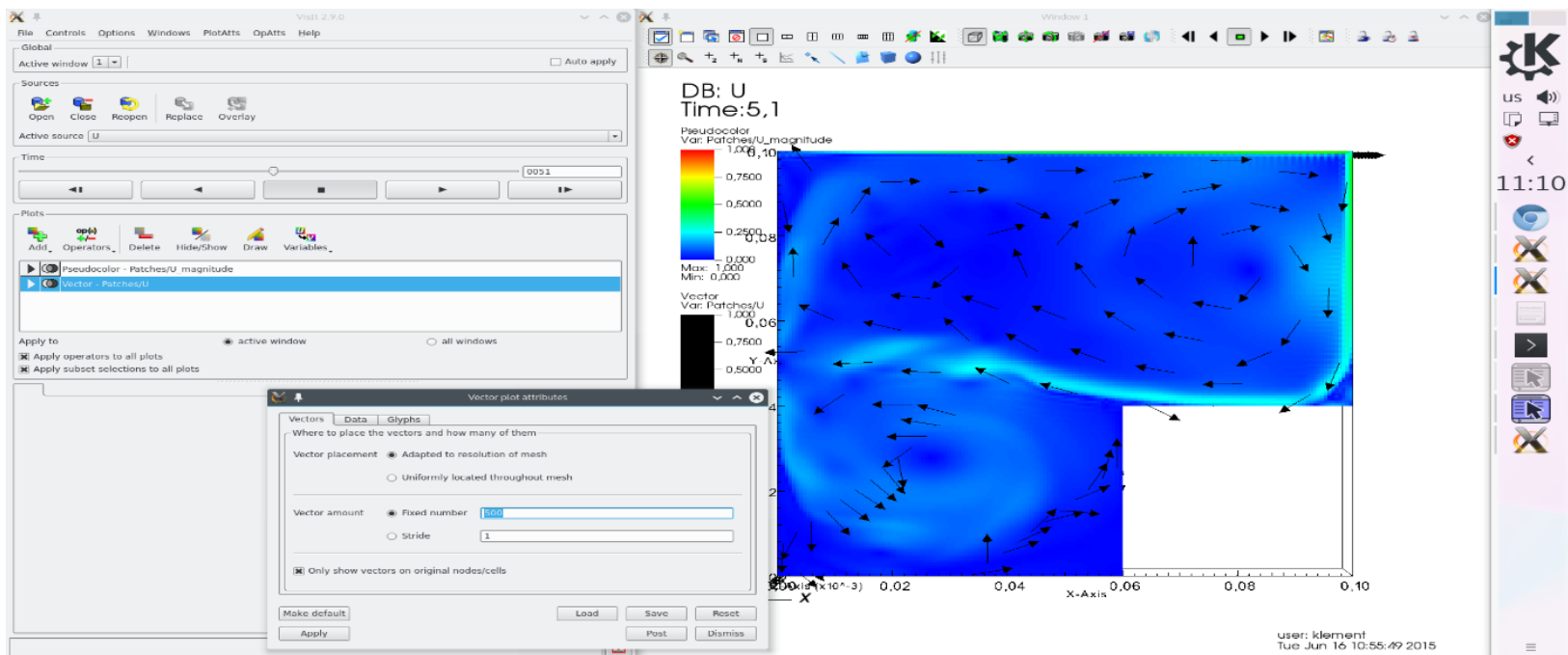
DB: p  
Time:5.3

Mesh  
Var: Patches



# Experimenty

- Experimenty jsme prováděli pomocí numerického balíku OpenFoam pro simulaci proudění.



# OpenFoam

- Veřejně přístupný program na vytváření simulací.

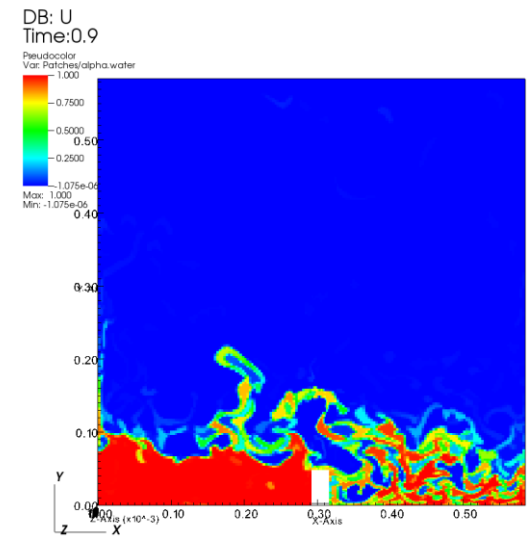
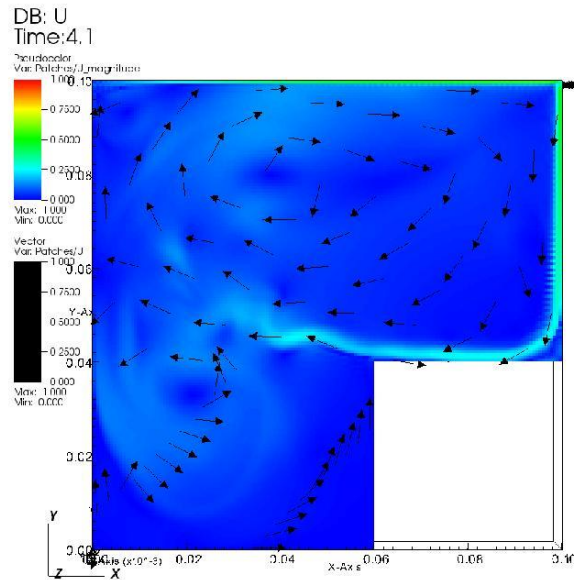
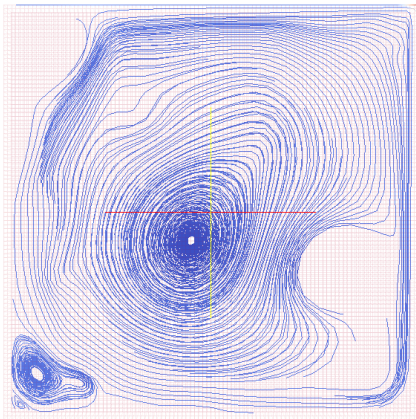
The screenshot shows the OpenFOAM website homepage. At the top, the logo 'OpenFOAM' is displayed with a blue triangle above the 'O', followed by the tagline 'The open source CFD toolbox' and the 'esi' logo. A navigation bar includes links for Home, Support, Training, News, and OpenFOAM Foundation. Below the navigation bar, there are several sections: 'About us', 'Contact', 'Jobs', and 'Legal'. A prominent blue button says 'Get OpenFOAM'. Below this, there are links for 'OpenFOAM v2.4.0 Released' and 'Download OpenFOAM'. A 'Our Services' section lists 'OpenFOAM Training', 'Software Support', and 'Development Support'. A 'Further Help' section includes 'Official Documentation' and 'Report a Bug'. The main content area features a red banner for 'OpenFOAM Team is Recruiting, Apply Now'. Below this is the 'About OpenFOAM' section, which describes the software as a free, open source CFD package developed by OpenCFD Ltd at ESI Group. To the right, there is a 'Main News' section with three news items: 'OpenFOAM Foundation releases OpenFOAM 2.4.0' (May 22nd 2015), 'OpenFOAM Foundation releases OpenFOAM 2.3.1' (Dec 10th 2014), and 'OpenFOAM Foundation releases OpenFOAM 2.3.0' (Feb 17th 2014). At the bottom, there is a 'CALL FOR PAPERS' banner for the 'OpenFOAM conference' in Stuttgart, Germany, from October 19-21, 2015, with an abstract deadline of July 10, 2015. A 'Tweets' section shows a tweet from @openfoam dated 26 May, announcing training seats for #OpenFOAM #Training 2015 in Toronto and Frankfurt.

OpenFOAM  
*The Open Source CFD Toolbox*



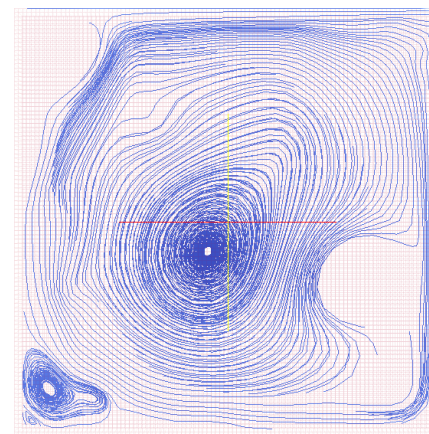
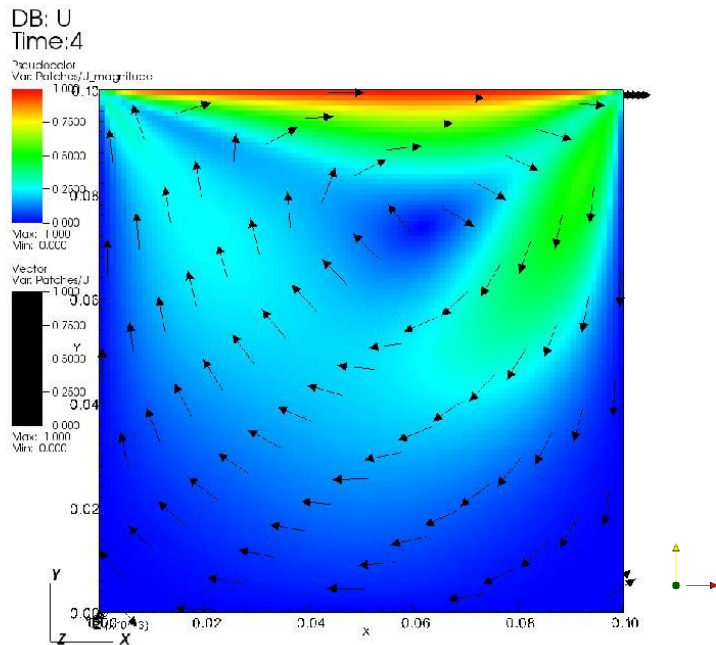
# Typy úloh

1. Cavity
2. Cavityclipped
3. Dambreak

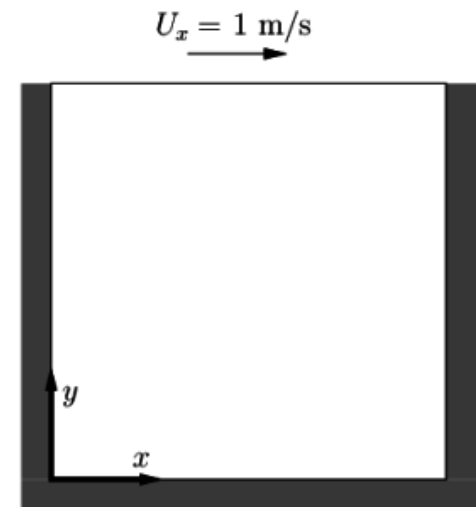


# Cavity

- Proudění vzniká posouváním vrchní strany uzavřeného čtverce.
- Při simulaci jsme měnili viskozitu kapaliny.

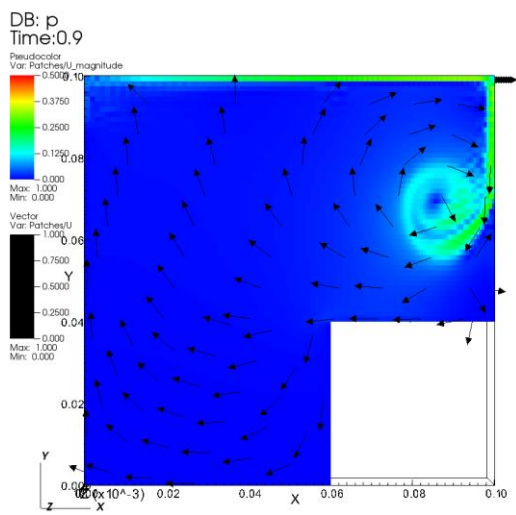


$d = 0.1 \text{ m}$

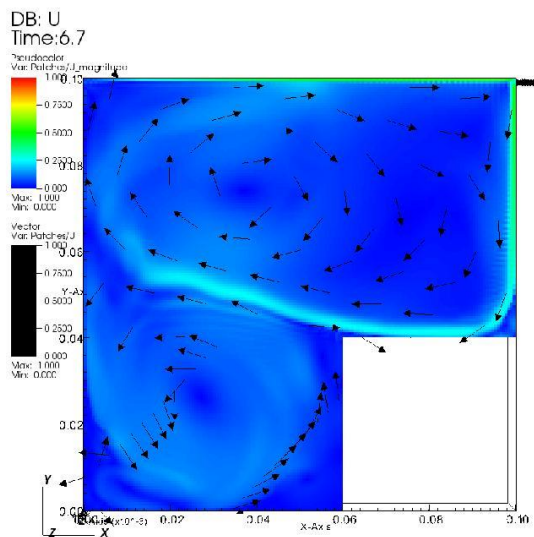


# Cavityclipped

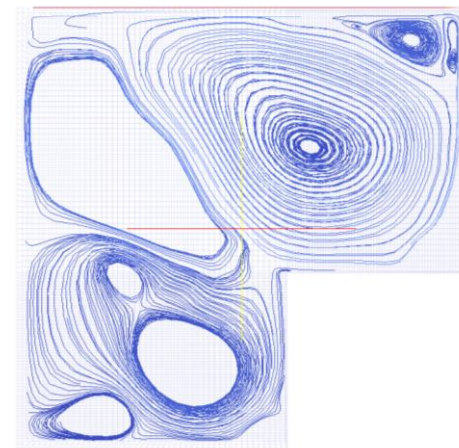
- Při této simulaci jsme používali stejný princip jako u předchozí simulace.
- Rozdíl je v tom, že jednu část čtverce jsme odebrali.



user: openfont  
Tue Jun 16 10:01:29 2015

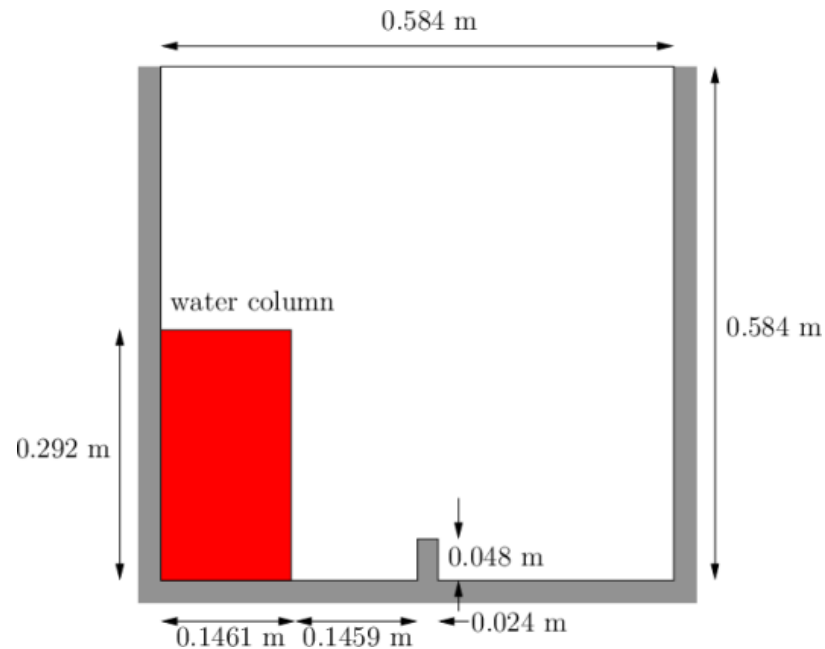


user: klement  
Tue Jun 16 12:11:13 2015



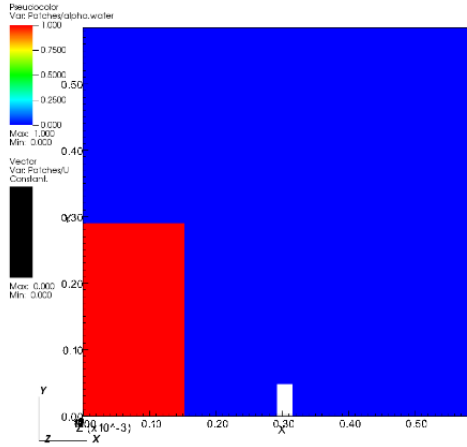
# Dambreak

- Zde jsme simulovali protržení hráze a následný náraz do překážky.
- Z důvodu mísení dvou látek se přidávají další rovnice.



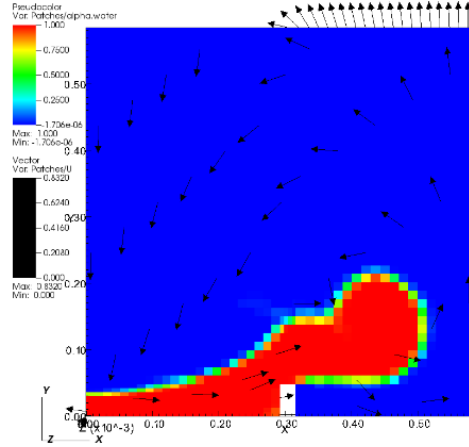
# Dambreak

DB: U  
Cycle: 0 Time:0



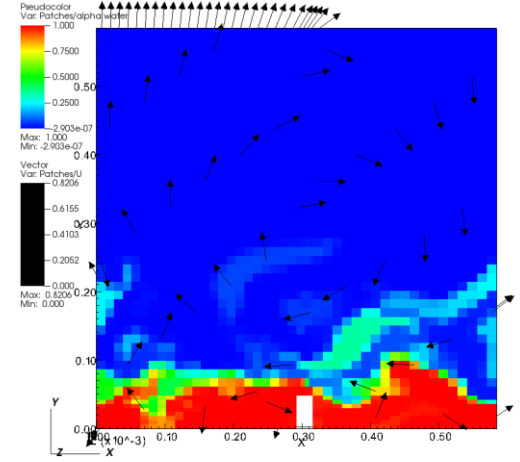
user: openfoam  
Tue Jun 16 10:32:12 2015

DB: U  
Time:0.8



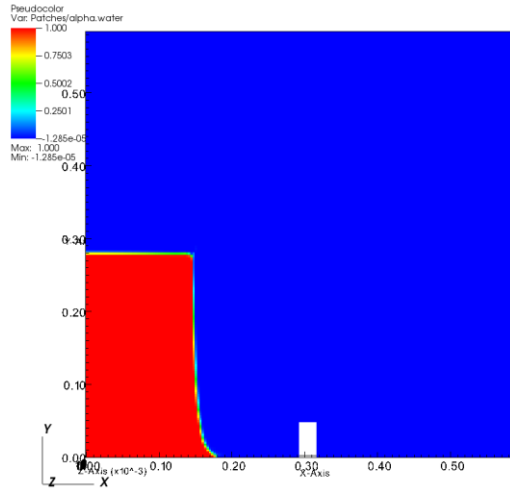
user: openfoam  
Tue Jun 16 10:32:45 2015

DB: U  
Time:3.2



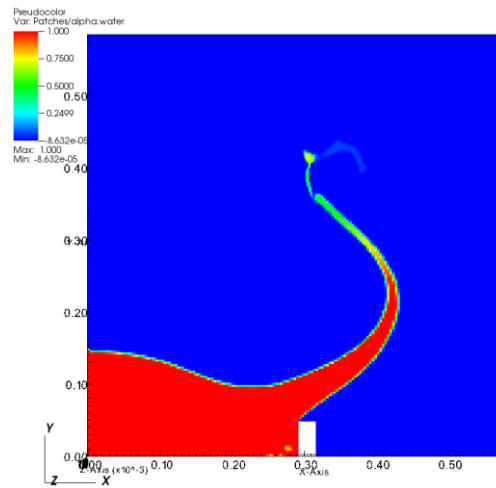
user: openfoam  
Tue Jun 16 10:24:13 2015

DB: U  
Time:0.05



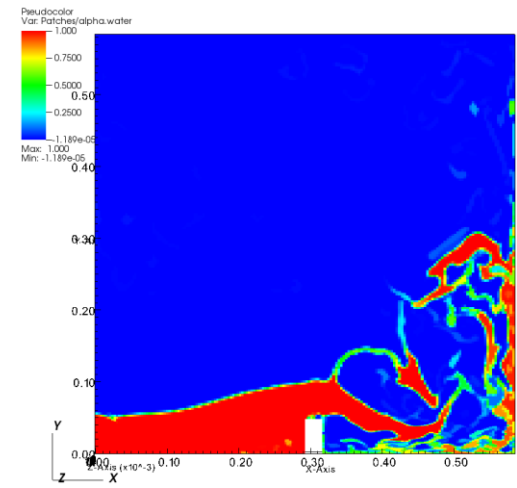
user: klement  
Tue Jun 16 12:22:08 2015

DB: U  
Time:0.25



user: klement  
Tue Jun 16 12:22:49 2015

DB: U  
Time:0.6



user: klement  
Tue Jun 16 12:23:16 2015

# Závěr

Ze simulací jsme zjistili, že při proudění záleží hlavně na Reynoldsovu číslu, viskozitě a hustotě kapaliny.

Při špatném zvolení mřížky vznikají nepředvídatelné chyby.

V závislosti na zvolených hodnotách trvá i celý výpočet na PC.

# Poděkování

Ondřej Pártl

Tomáš Oberhuber

Vladimír Klement

Vojtěch Svoboda a celé FJFI ČVUT

# Zdroje

[1] [openfoam.org](http://openfoam.org)

[2] [cs.wikipedia.org/wiki/Reynoldsovo\\_číslo](http://cs.wikipedia.org/wiki/Reynoldsovo_číslo)

[3] Prezentace Výpočetní dynamika tekutin – Tomáš Oberhuber

[4] [cfd.direct/openfoam/user-guide/tutorials](http://cfd.direct/openfoam/user-guide/tutorials)