

# CFD – aerodinamika

PREGLED

# Kaj je izziv?

- ▶ Ugotoviti, kako aero naprava vpliva na zrak, ki obteka telo
- ▶ Ugotoviti kakšne so sile "Downforce"-a in zračnega upora
- ▶ Ovrednotiti vpliv oblike telesa na ti dve sili



# Ključne lastnosti toka okoli teles

## ► Laminaren/**Turbulenten**

- Pri nizkih Re laminaren
- Pri visokih Re turbulenten
- Ocena:

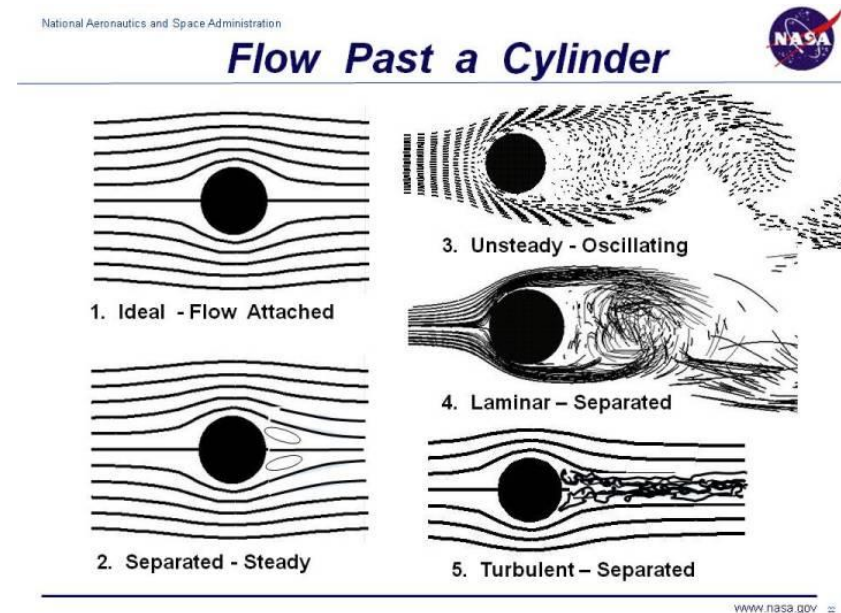
dolžina pri kateri tok ob plošči rata turbulenten/dolžina monokoka

$$turb = 5 \cdot 10^5 \cdot \frac{\nu}{U D_{monococ}} \begin{cases} 0 \dots \text{turbulentno} \\ > 1 \dots \text{laminarno} \end{cases}$$

premer hoopa ki povzroči turbulentni tok/premer hoopa

$$turb = 2300 \cdot \frac{\nu}{U D_{hoop}} \begin{cases} 0 \dots \text{turbulentno} \\ > 1 \dots \text{laminarno} \end{cases}$$

$$Re = \frac{U \cdot D}{\nu}; \quad U \dots \text{hitrosti}, D \dots \text{karakteristična dimenzija}, \\ \nu \dots \text{kinematična viskoznost}$$



$$Re_1 < Re_2 < Re_3 < Re_4 < Re_5$$

# Ključne lastnosti toka okoli teles

## ► Laminaren/**Turbulenten**

- Pri nizkih Re laminaren
- Pri visokih Re turbulenten

## ► **Ustaljen** / Neustaljen

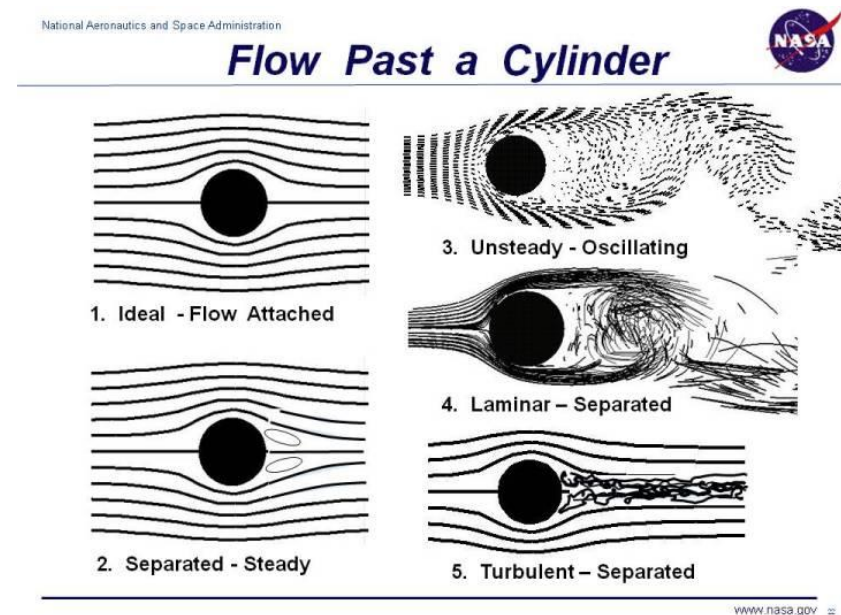
- Pri majhnih Re  $\ll 2300$  in zelo visokih Re  $\gg 2300$  ustaljen
- Pri prehodnih Re  $\sim 2300$  neustaljen!

Karakteristična premer formule cca 1 m  $\rightarrow$  Re =  $1 \cdot 10^6$   $\rightarrow$  ustaljen  
Karakteristični premer hooša cca 3 cm  $\rightarrow$  Re = 30 000  $\rightarrow$  ustaljen

## ► Stisljiv/**Nestisljiv**

- Nestisljiv za pline za hitrosti Ma  $< 0.3$   
Formula potuje pri 15 m/s, za zrak pri 0°C nestisljiv do 100 m/s

$$Re = \frac{U \cdot D}{\nu}; \quad U \dots \text{hitrosti}, D \dots \text{karakteristična dimenzija}, \\ \nu \dots \text{kinematična viskoznost}$$



$$Re_1 < Re_2 < Re_3 < Re_4 < Re_5$$

# Fizikalni opis problema (nestisljiv tok)

Continuity  $\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0$  ← Kar gre noter, to gre ven

X-momentum

$$\rho \left( \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left( \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right)$$

Y-momentum

$$\rho \left( \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + W \frac{\partial V}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left( \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \right)$$

Z-momentum

$$\rho \left( \frac{\partial W}{\partial t} + U \frac{\partial W}{\partial x} + V \frac{\partial W}{\partial y} + W \frac{\partial W}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left( \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} \right)$$

→  
Sprememba hitrosti v opazovani točki  
(če je tok ustaljen, odvod po času = 0)

↑  
Sila tlaka

↑  
Sila teže

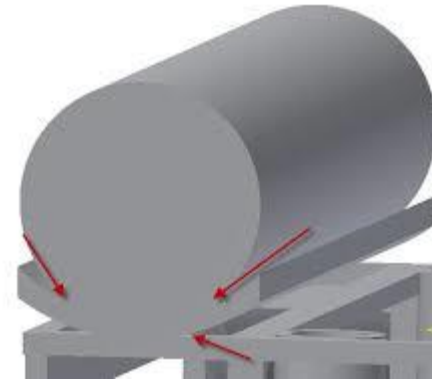
↑  
Viskozna sila  
(če je tok turbulenten se viskoznost  
navidezno poveča)

# Postopek reševanja

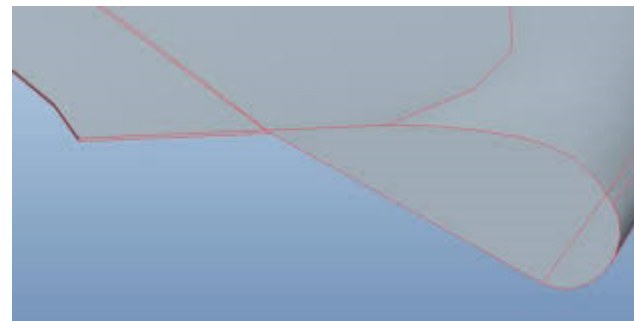


# Preprocessing - geometrija

- ▶ Geometrija:
  - ▶ Brez nepotrebnih detajlov
  - ▶ Brez čudnih geometrij
    - ▶ Tanka telesa
    - ▶ Konice, ostri robovi
    - ▶ Tanke reže
- ▶ Za geometrijo bomo uporabili NX



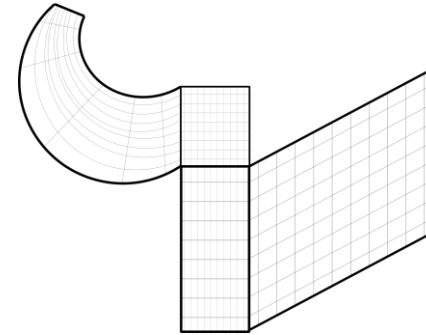
<https://forums.autodesk.com/t5/cfd-forum/can-t-import-inventor-part-to-cfd/td-p/5405125>



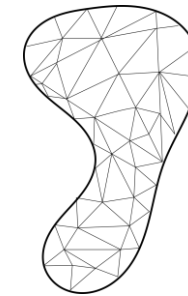
<https://www.cfd-online.com/Forums/cfx/80831-problematic-geometry.html>

# Preprocessing - Mreženje

- ▶ Strukturirano – enostavne geometrije, lepši rezultati
- ▶ Nestrukturirano – kompleksne geometrije, slabši rezultati
- ▶ Če je tok **turbulenten** (uporabljamo turbulentni model), strog predpis za **velikost prve celice ob steni!**
- ▶ Več kot je celic, bolj natančna je rešitev
  - ▶ Uporabimo toliko celic, kot je le možno
- ▶ Celice naj bodo čim bolj podobne kockam
- ▶ Če uporabimo na različnih področjih različno velike celice, naj bodo prehodi med temi področji postopni



Strukturirana



Nestrukturirana



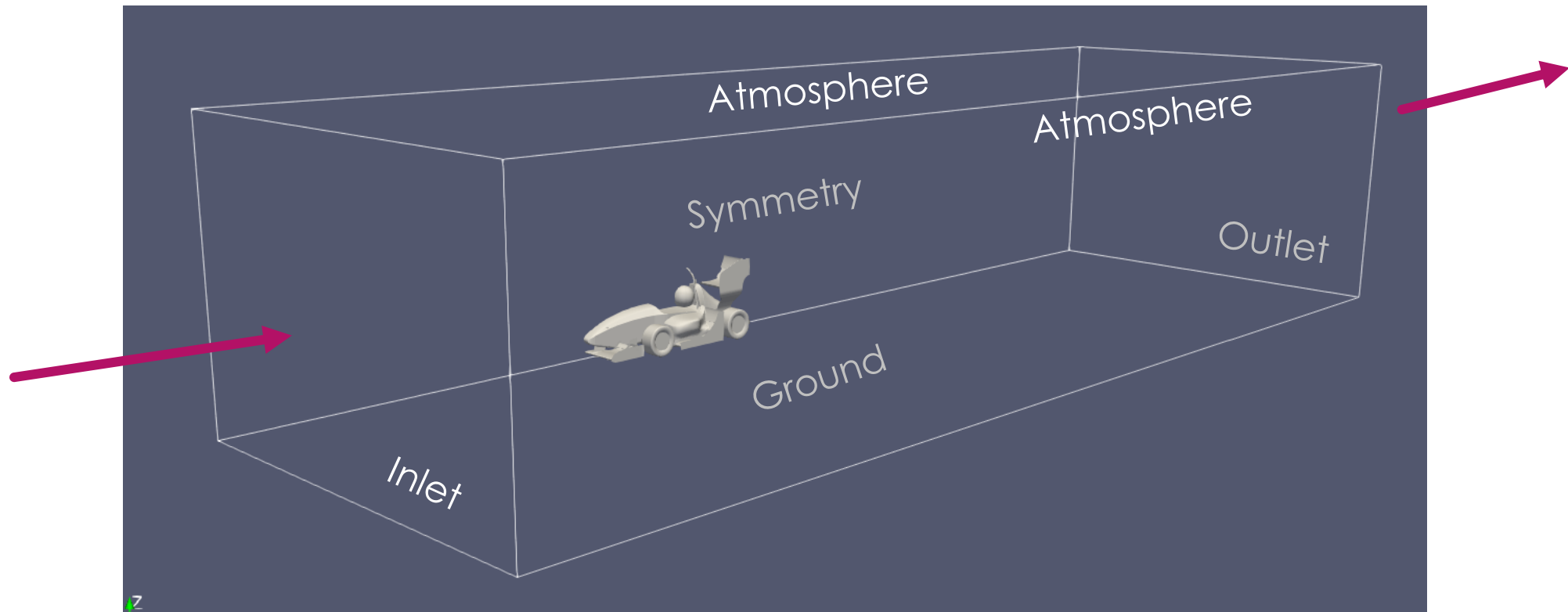
# Preprocessing - Materialni parametri

- ▶ Za nestisljiv turbulentni tok potrebujemo dva:
  - ▶ Gostota (density)
  - ▶ Kinematična viskoznost (kinematic viscosity)
- ▶ Ker ne računamo temperature toka okoli telesa, izberemo prametere pri pričakovani povprečni temperature in tlaku

# Preprocessing – Robni pogoji

- ▶ Robne pogoje moramo definirati za vsa polja, ki nastopajo v izračunu:
  - ▶ Tlačno
  - ▶ Hitrostno
  - ▶ Turbulenčna energija  $k$
  - ▶ Disipacije turbulentne energije epsilon/omega
- ▶ Če izvajamo termično analizo tudi za temperaturo  $T$

# Preprocessing – Robni pogoji – vožnja naravnost



# Preprocessing – Robni pogoji – vožnja naravnost

- ▶ Inlet: predpišemo velikost in smer hitrosti, in ničelni gradient tlaka. Vrednost turbulentne intenzitete je v vetrovniku nizka, reda močno pod 0.05% -> izračun vrednosti  $k$ . Izračun vrednosti  $\omega$  oz.  $\epsilon$  lahko izvedemo ob predpostavki, da je razmerje turbulentne in dinamične viskoznosti reda velikosti 1-10. (<http://jullio.pe.kr/fluent6.1/help/html/ug/node178.htm>)
- ▶ Atmosphere: enako kot inlet (v tem primeru računamo aerodinamiko, kot da bi bil avtomobil v tunelu), bolj pravilno bi bilo predpisati tlak in za hitrost izbrati `pressureInletOutlet` ... lahko tudi enako kot simetrijska ravnina (v tem primeru predpostavimo, da se spremenljivke preko mej ne spreminjajo več)
- ▶ Ground: gibajoči se zid ("movingWall"), s hitrostjo enako hitrosti na inletu, ničelnim gradientom za tlak in stenskimi funkcijami za  $k$  in  $\epsilon/\omega$

# Preprocessing – Robni pogoji – vožnja naravnost

- ▶ Outlet: vrednost nadtlaka = 0 Pa, ničelni gradient za hitrosti in ostala polja.
- ▶ Symmetry: simetrijska ravnina, tu predpišemo ničelni gradient za vse spremenljivke
- ▶ Površine opazovanega telesa: nepremični zidovi, hitrost = 0 m/s, za tlak predpišemo ničelni gradient. Za  $k$  in epsilon/omega uporabimo stenske funkcije.
- ▶ Pnevmatike: na mesto nepremičnega zidu uporabimo vrteči se zid ("rotatingWall") in predpišemo lokacijo osi in smer ter hitrosti vrtenja. Za  $k$  in epsilon/omega uporabimo stenske funkcije.

# Simulacija

- ▶ Nastavimo željeno število iteracij
- ▶ Nastavimo željene spremljane veličine (npr. Silo “Downforce”-a)
- ▶ Poženemo simulacijo in počakamo, da se izračun konča

# Postprocessing – izračun aerodinamičnih sil

- ▶ Aerodinamična sila:

$$\vec{F} = \int_A p \cdot \vec{n} \cdot dA$$

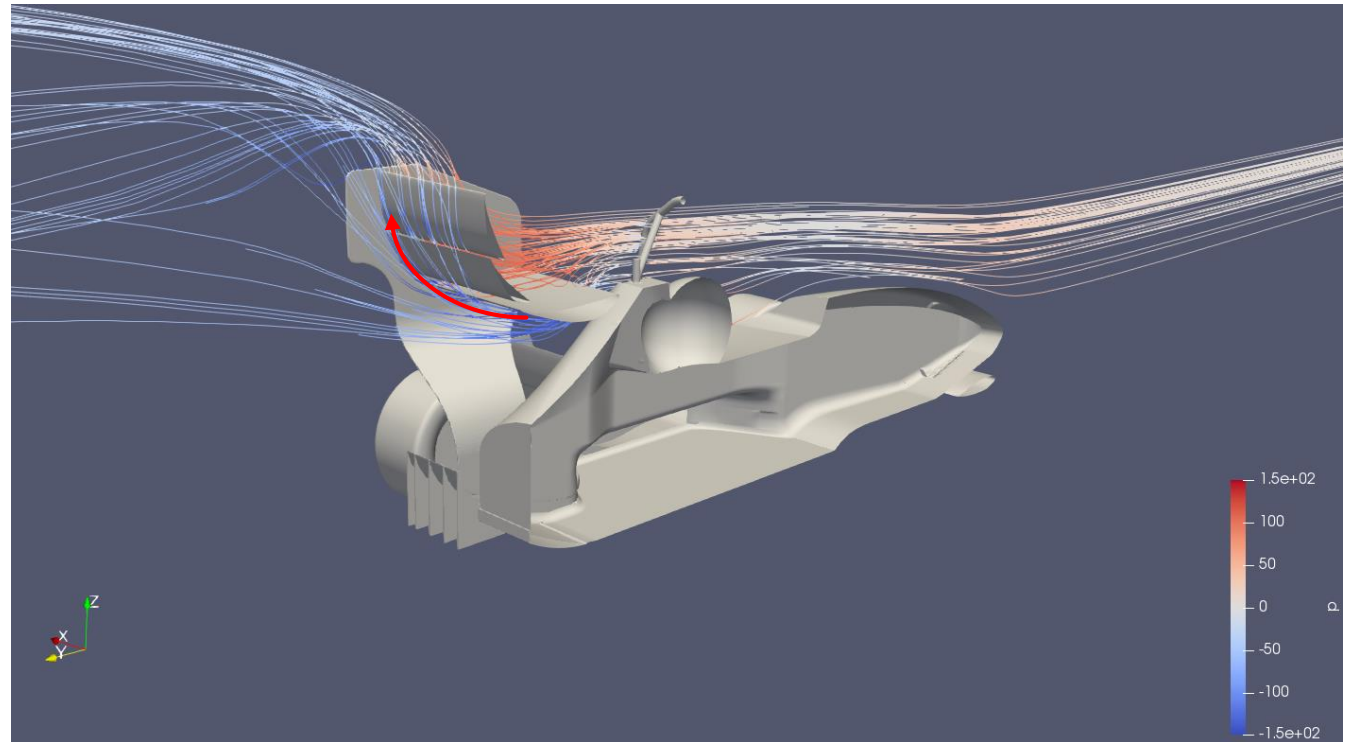
- ▶ Aerodinamični moment okoli težišča:

$$\vec{M} = \int_A (p \cdot \vec{n}) \times \vec{r} \cdot dA \quad \longrightarrow \quad \text{Stabilnost!}$$

# Postprocessing - Prikaz tokovnic

Opazujemo tok, pozorni smo na:

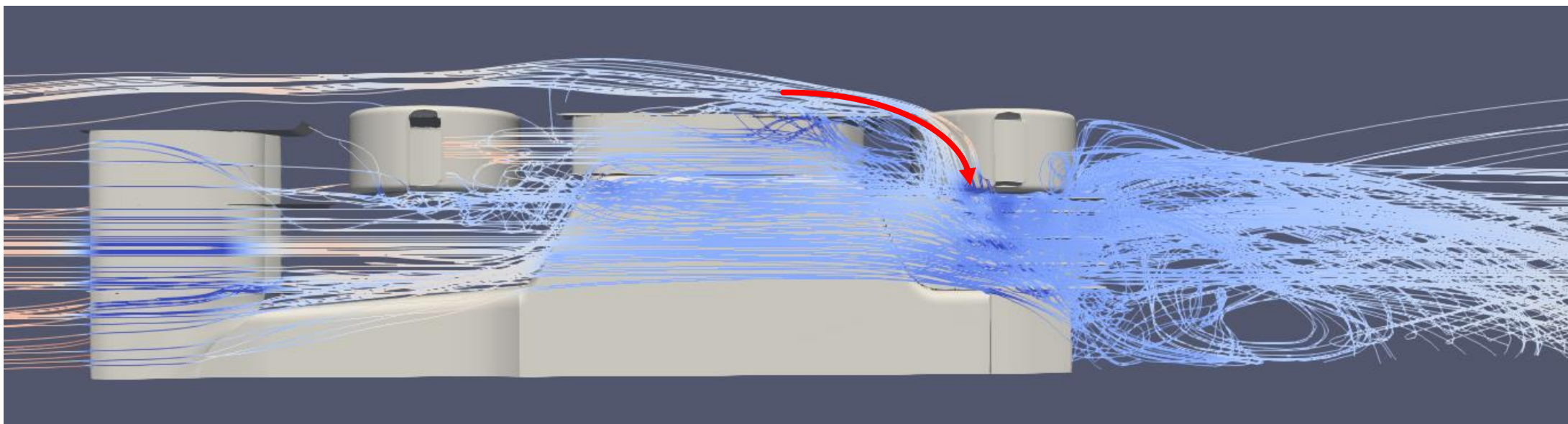
- Ali tokovnice sledijo obliki kril?  
(na sliki vidimo, da tok okoli zadnjega krila teče lepo)
- Ali tok v domeni kje zastaja?
- Od kje prihaja zrak na določeno mesto?





# Postprocessing - Prikaz tokovnic

- ▶ S pomočjo tokovnic lahko ugotovimo kje v difuzor vdirajo neželni tokovi (označeno z rdečo puščico)



# Postprocessing - Prikaz tokovnic

- ▶ Prikaz tlačnega polja:
  - ▶ Spodnje ploskve morajo imeti nizek tlak, zgornje ploskve visok!

