

POROVNÁVANIE CHARAKTERU PRÚDENIA V 2-PRÚDOVEJ MEDZIPANVE

Authors:

Doc. Ing. Peter DEMETER, PhD.

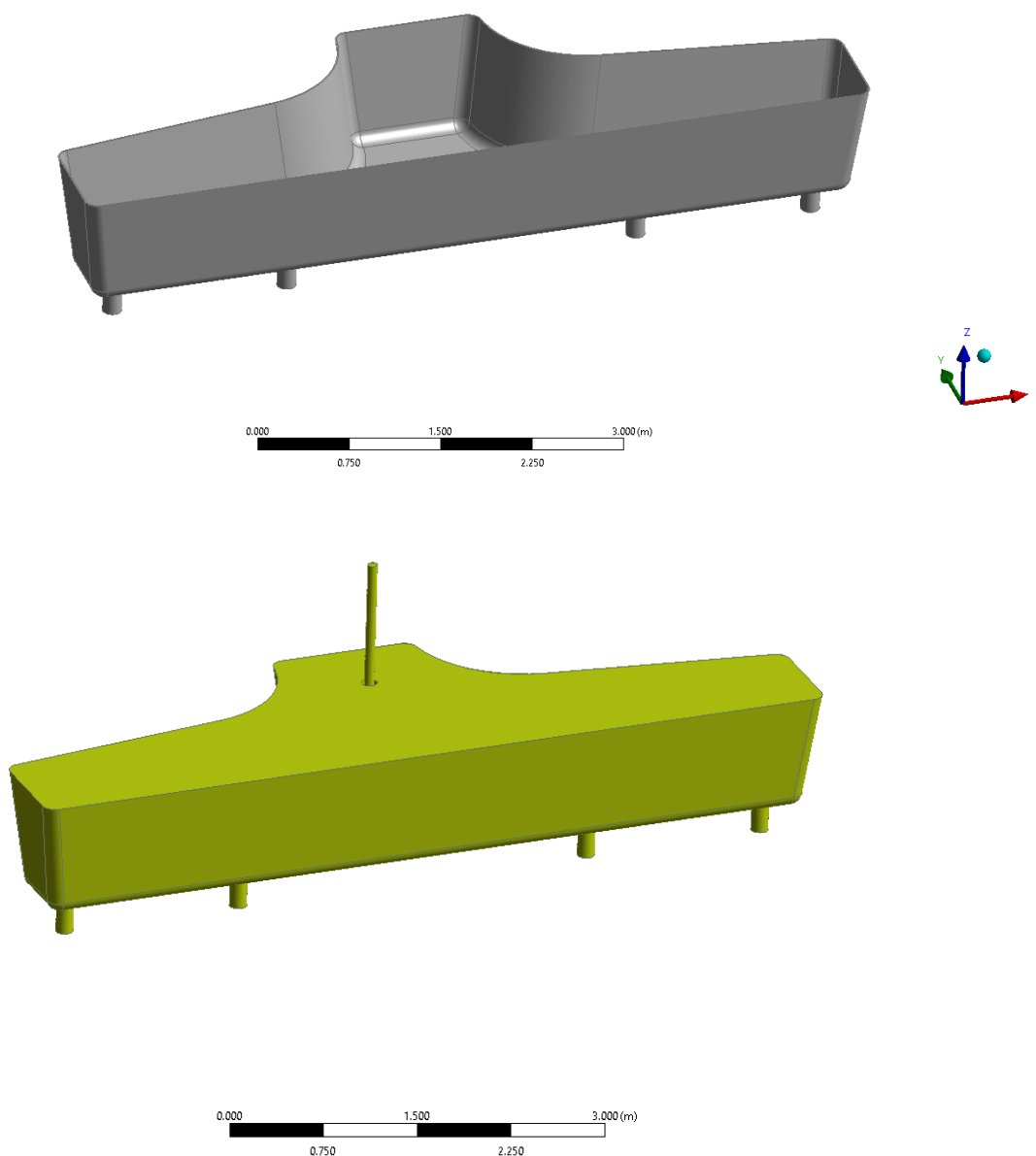
Doc. Ing. Branislav BUĽKO, PhD.

Cieľ

Porovnanie charakteru prúdenia v 2-prúdovej medzipanve pri zmene tvarovej dopadovej dosky a vychýlení ochrannej trubice. Porovnávala sa medzipanva bez vnútorného vstrojenia s tvarovou dopadovou doskou Spheric „K4“. Hodnotenie bolo realizované na základe RTD-kriviek a následne sa stanovili retenčné časy. Charakter prúdenia bol zobrazený na základe vektorov, kontúr a prúdnic.

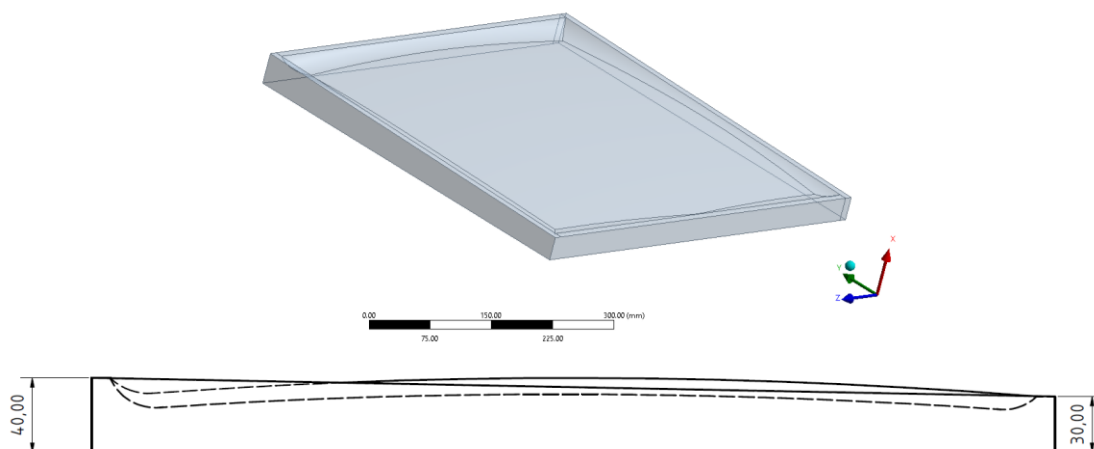
Tvar medzipanvy

Geometria medzipanvy použitej pri CFD simuláciách:

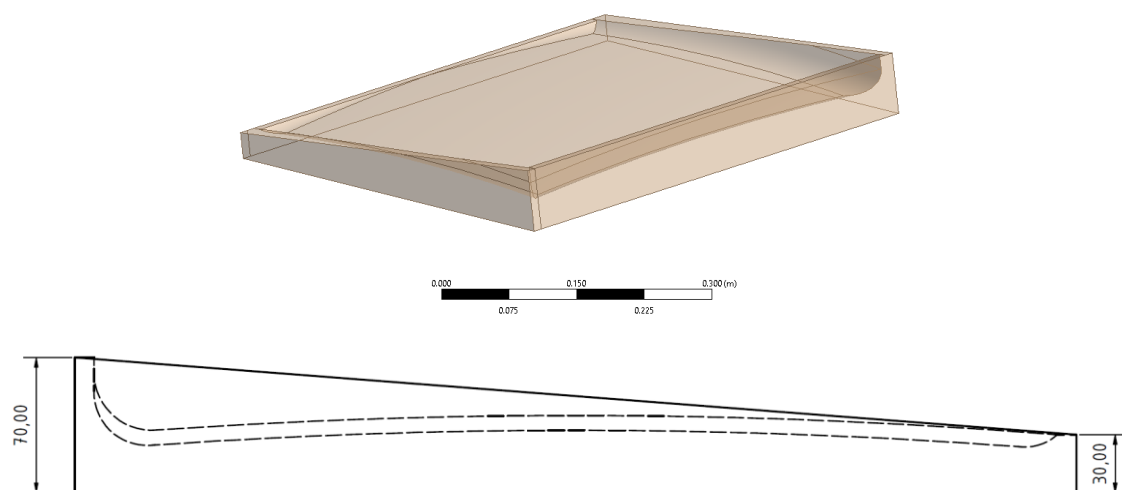


Vnútorný objem medzipanvy

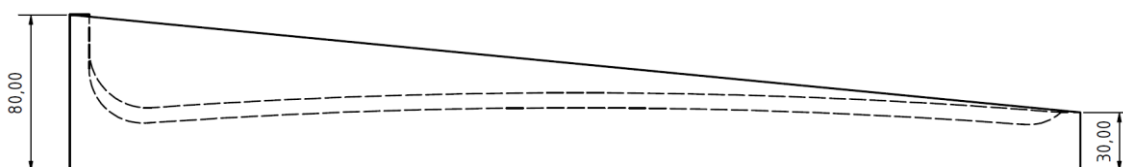
Použité dopadové dosky



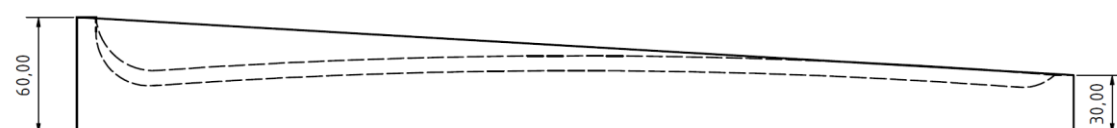
Spheric k4



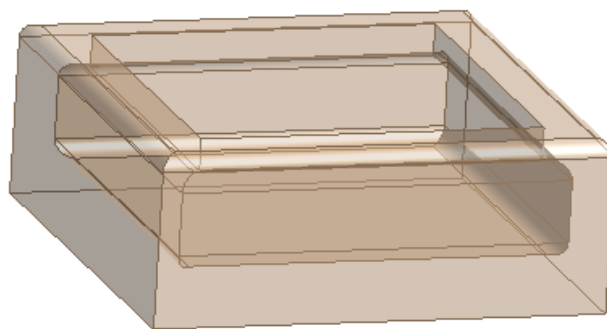
Spheric K4 -70



Spheric K4 -80



Spheric K4 -60

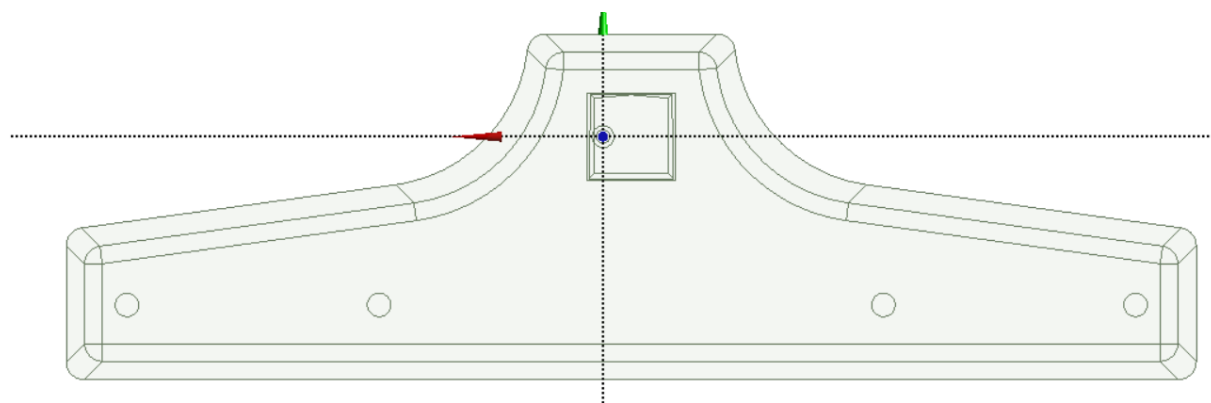
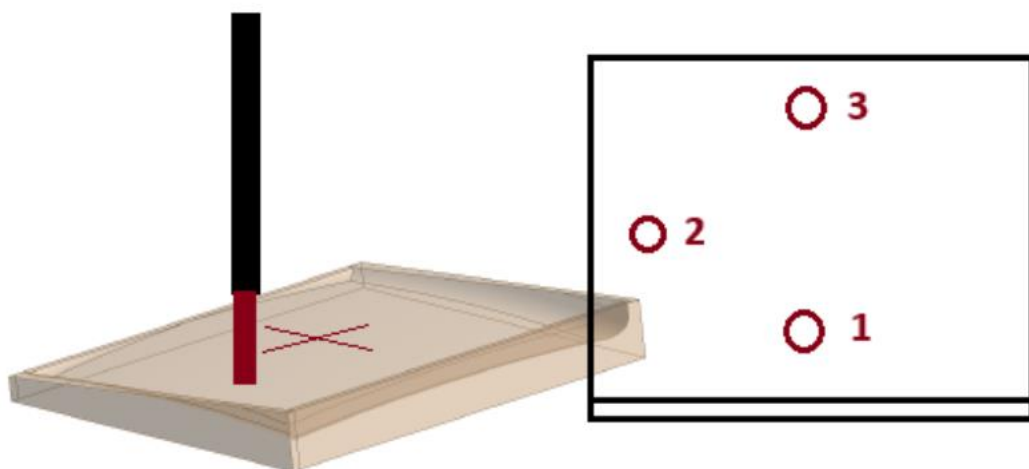


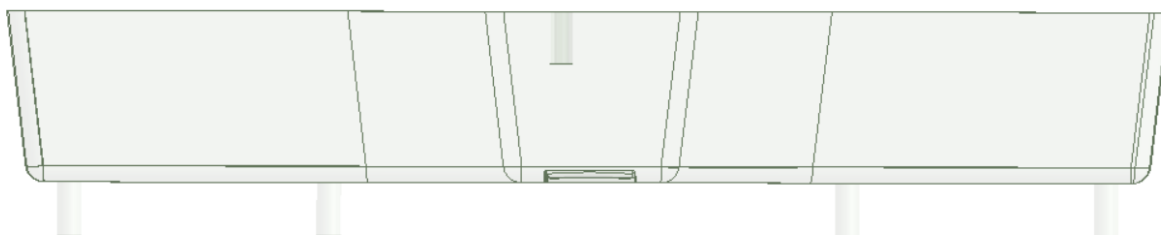
Turbostop

Nákresy vychýlenia

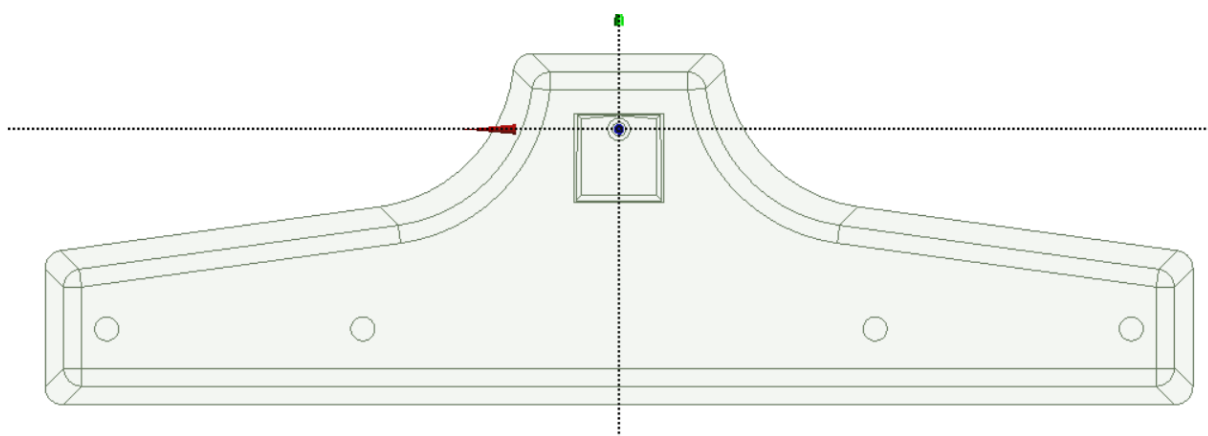
Vonkajší priemer trubice 65 mm. Požadované posunutie o 200 mm od stredu dopadovej dosky. Pri posunutí od osi ladle shroud to vychádza veľmi na kraj dopadovej dosky. Preto sme upravili posunutie o polovicu priemeru ladle shroud na 167.5 mm.

Posunutie o 200 mm pri 90°.

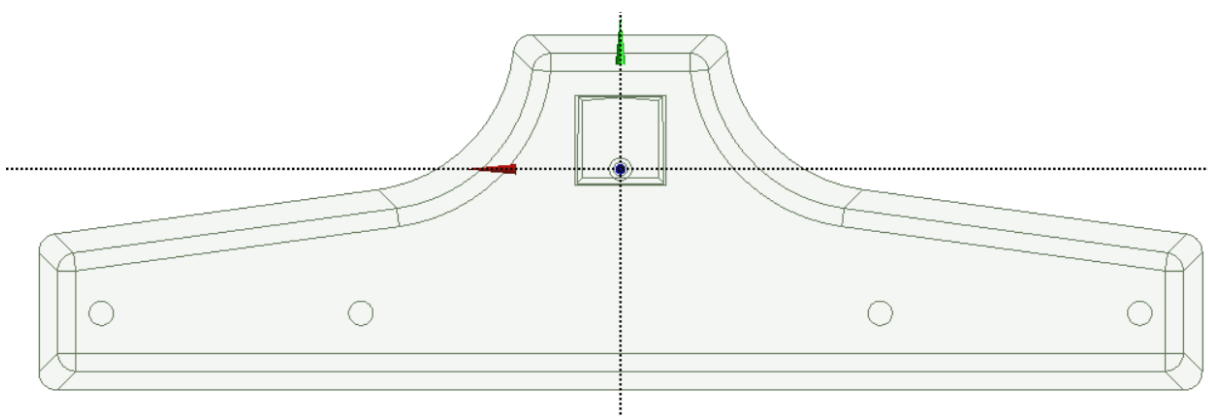




Posunutie o 200 mm doľava

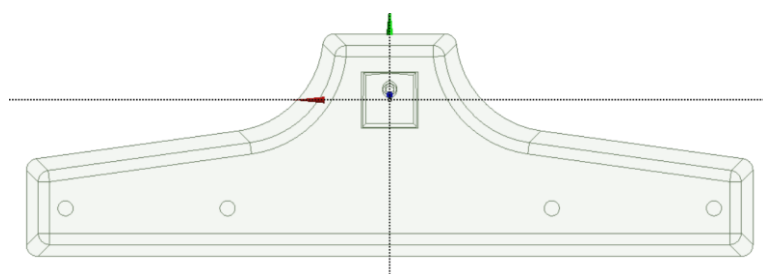
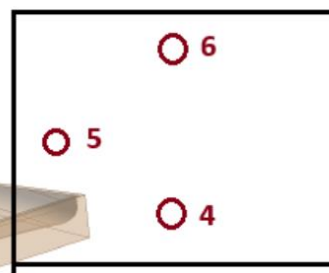
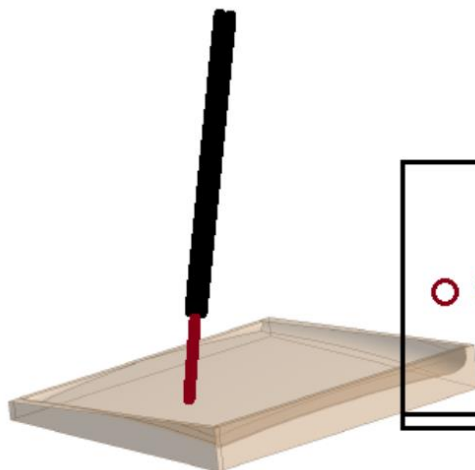


Posunutie dozadu

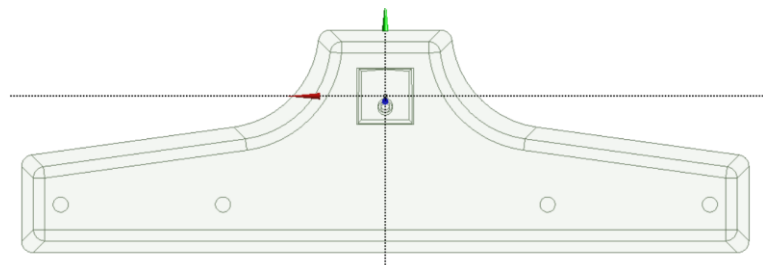


Posunutie dopredu

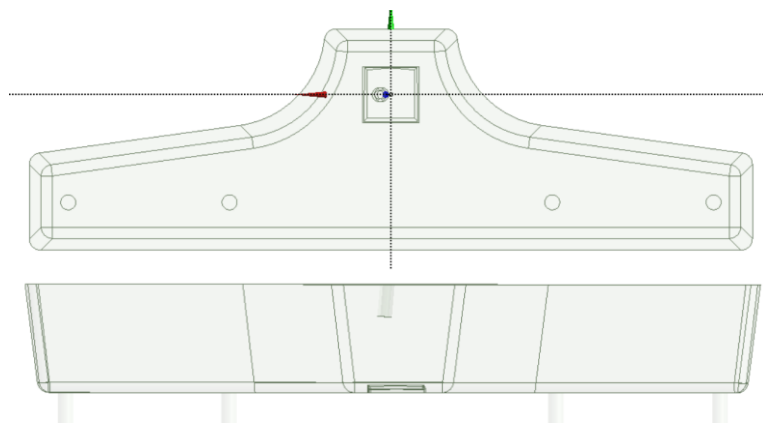
Na základe dĺžky ladle shroud a vzdialenosti od dna medzipanvy bol uhol 4.7° . Dĺžka ladle shroud 1340 mm a 700 mm od dna medzipanve.



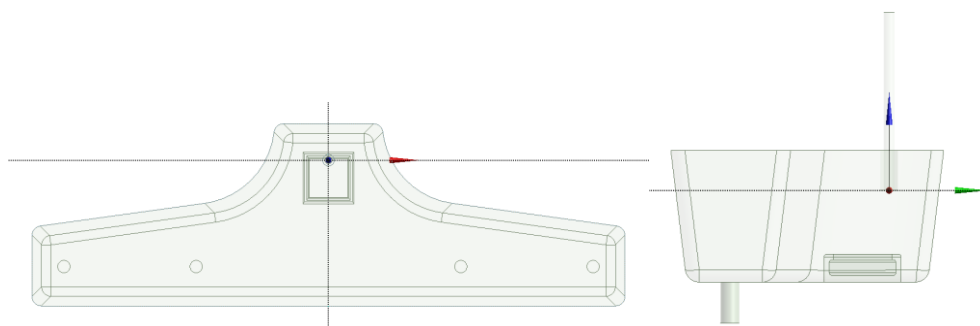
Vychýlenie dozadu o $4,7^\circ$



Vychýlenie dopredu o $4,7^\circ$



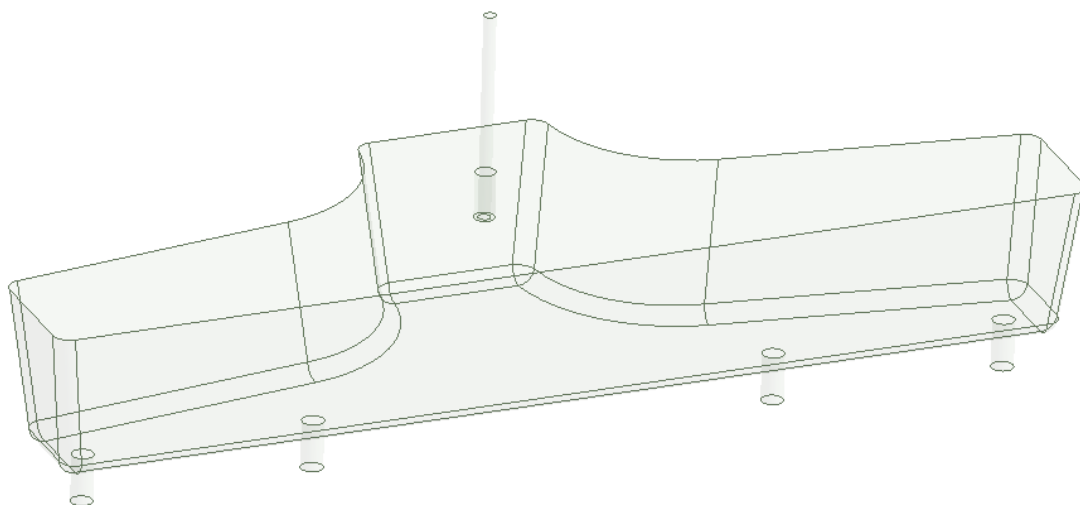
Vychýlenie doľava o $4,7^\circ$



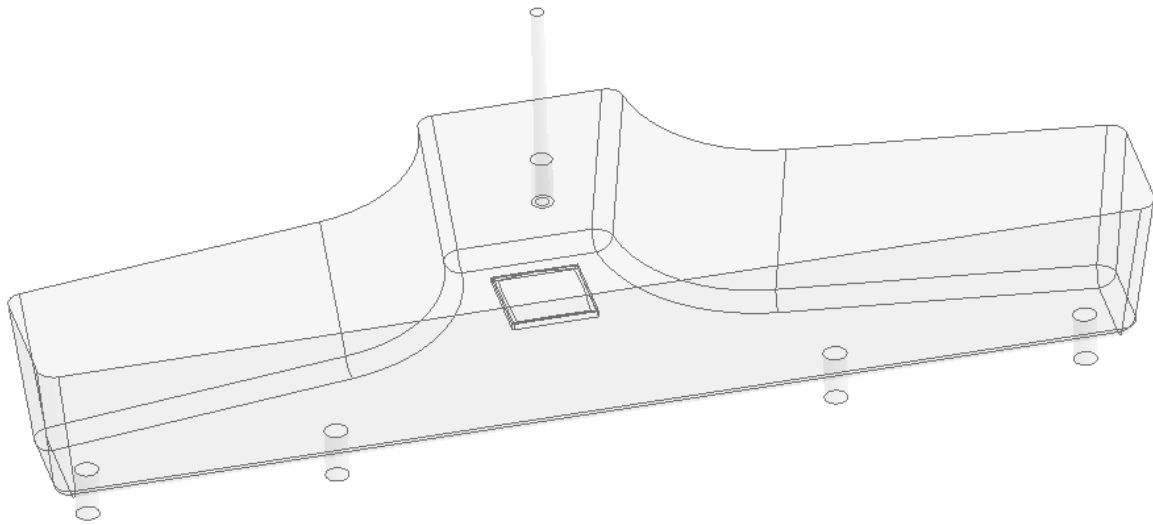
Konfigurácia	Popis
1	Medzipanva bez vystrojenia
2	Medzipanva s dopadovou doskou Spheric K4
3	Medzipanva s dopadovou doskou Spheric K4 - vyvýšená predná strana na 70 mm
4	Medzipanva s dopadovou doskou Spheric K4 - vyvýšená predná strana na 80 mm
5	Medzipanva s dopadovou doskou Spheric K4 - vyvýšená predná strana na 60 mm
6	Medzipanva s dopadovou doskou Spheric K4 s hrádzkami po stenu medzipanvy
7	Medzipanva s dopadovou doskou Turbostop
8	Medzipanva s dopadovou doskou Turbostop - Trubica posunutá o 200 mm dozadu
9	Medzipanva s dopadovou doskou Turbostop - Trubica posunutá o 200 mm dopredu
10	Medzipanva s dopadovou doskou Turbostop - Trubica posunutá o 200 mm doľava
11	Medzipanva s dopadovou doskou Turbostop - Trubica naklonená o 4,7° dozadu
12	Medzipanva s dopadovou doskou Turbostop - Trubica naklonená o 4,7° dopredu
13	Medzipanva s dopadovou doskou Turbostop - Trubica naklonená o 4,7° doľava
14	Medzipanva s dopadovou doskou Spheric K4 - Trubica posunutá o 200 mm dozadu
15	Medzipanva s dopadovou doskou Spheric K4 - Trubica posunutá o 200 mm dopredu
16	Medzipanva s dopadovou doskou Spheric K4 - Trubica posunutá o 200 mm doľava

17	Medzipanva s dopadovou doskou Spheric K4 - Trubica naklonená o 4,7° dozadu
18	Medzipanva s dopadovou doskou Spheric K4 - Trubica naklonená o 4,7° dopredu
19	Medzipanva s dopadovou doskou Spheric K4 - Trubica naklonená o 4,7° doľava

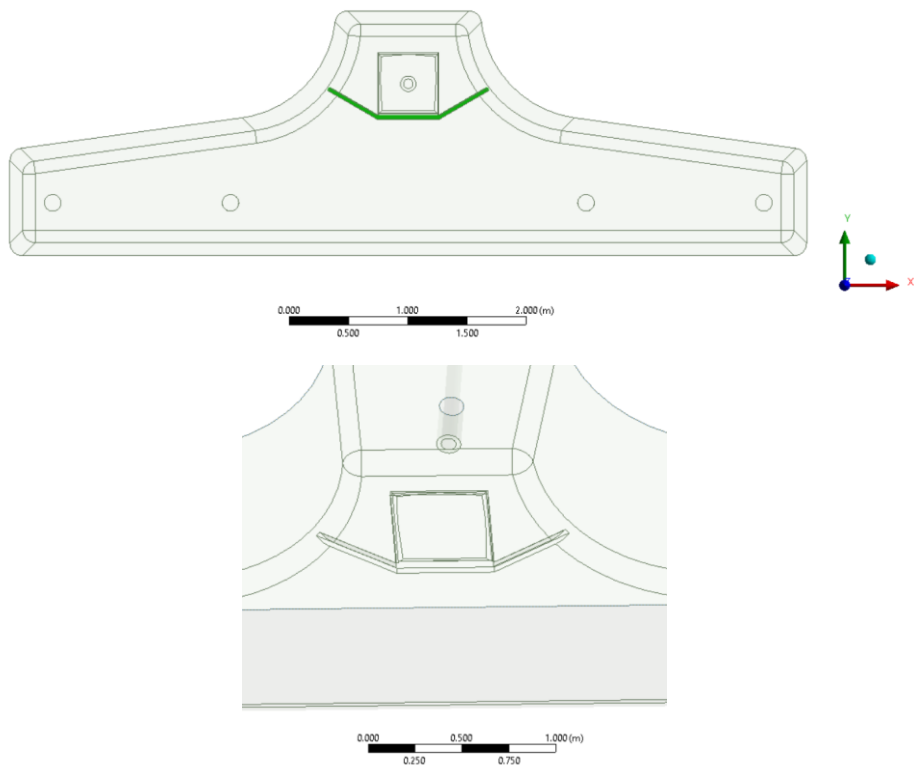
Skúšané zostavy pri simuláciách



Konfigurácia bez dopadovej dosky



Základné umiestnenie všetkých testovaných dopadových dosiek



Vystrojenia medziapanvy s dopadovou doskou Spheric K4 s hrádzkami

Počiatkové a okrajové podmienky pre CFD simulácie

Na reálnom zariadení sa odlieva 65 ton ocele za 35 minút. Po prepočte kritérií podobnosti a vlastností ocele pre simulácie bolo vypočítané objemové množstvo pretečenej ocele 30,92 kg/s, čo činí 0.878 m³¹ na základe hustoty ocele 7020 kg/m³. Objem medziapanvy je 7,794 m³.

Na základe Reynolsovho čísla pre kruhový prierez vstupu do medzipanvy bola vypočítaná intenzita turbulencie podľa vzťahu (1)

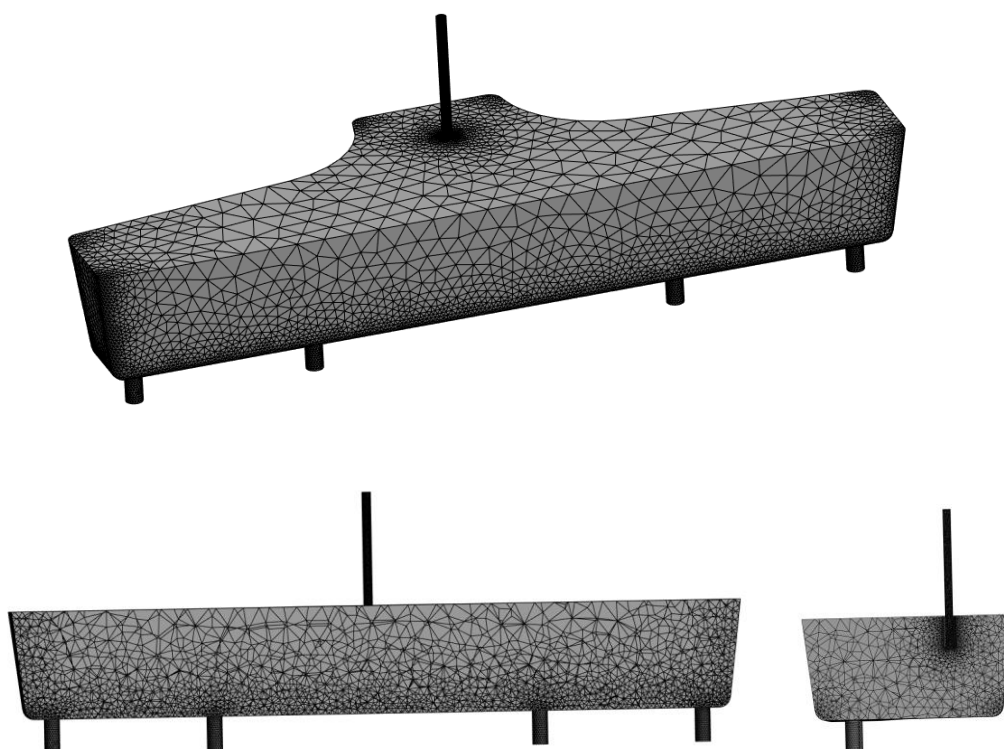
$$I = 0,16 \cdot Re^{\left(\frac{-1}{8}\right)} \cdot 100 \quad (1)$$

Hodnota činila 2,98 % čo odpovedá hodnote Reynolsovho čísla $Re = 682\,935$

Pre výskum bol použitý CFD program Ansys Fluent, the software produced by ANSYS, Canonsburg, PA, USA. Výpočet sa realizoval na 3D modeli. Väčšina riešených problémov v praxi má turbulentné prúdenie, preto je potrebný turbulentný model. Pre výpočet bol použitý **Model k-epsilon realizable**.

Pre zhodnotenie a určenie času a doby, ktorú tekutina v medzipanve strávi, je kľúčovou veličinou retenčný čas. Aby bolo možné tento čas určiť, bol použitý model transportu častíc. Princíp spočíva v injektáži stopovacej látky s totožnými fyzikálnymi vlastnosťami ako má hlavné prúdiace médium. Po 10 sekundách stopovacia látka prestane do medzipanvy prúdiť. Na výstupoch tak dokážeme sledovať jej koncentráciu počas celej doby prúdenia.

Výpočtová sieť bola tvorená polyedrami (Obr. 7). Počet elementov pre výpočtovú sieť bol 204100. Sieť bola hodnotená na základe kvalitatívneho spektra pre kritérium Skewness a orthogonality. Dosiahnuté hodnoty boli pre kritérium skewness average 0.2318 a pre ortogonalitu max. 0,99237. Dôležitým krokom je aj špecifikácia oblasti vstupu, výstupu a stien modelu medzipanvy, kvôli možnosti následného zadávania počiatočných a okrajových podmienok.

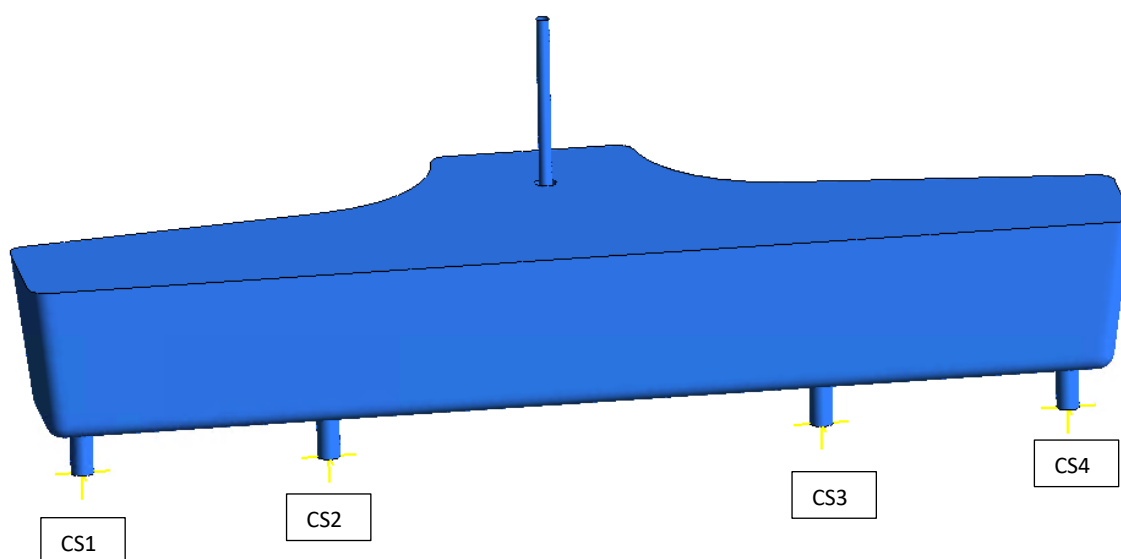


Riešenie bolo realizované v stacionárnom režime (steady) a nestacionárnom (transient - Number of Time Steps: 8000, Time step 0,1s max. Iterations 20). Do výpočtu bol zahrnutý aj vplyv gravitácie.

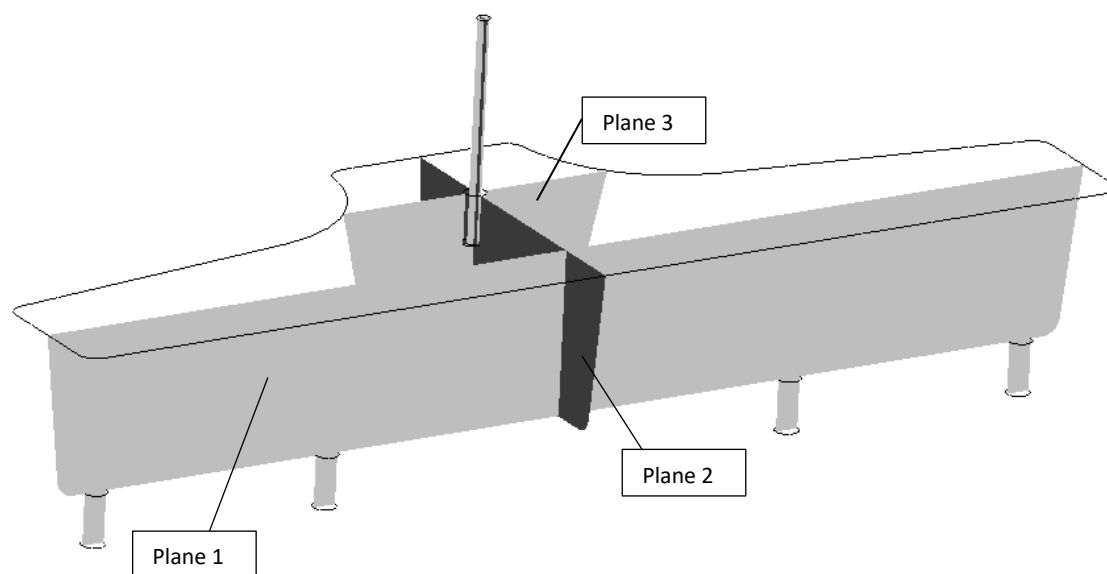
Hodnoty okrajových a počiatočných podmienok pre CFD simulácie sú uvedené v Tabuľke.

Parameter	Value
Model	
Diameter of ladle shroud [mm]	75
Depth of molten steel [mm]	825
Material	
Inlet temperature [K]	1823
Density of molten steel [kg.m ⁻³]	7020
Viscosity of molten steel [kg.m ⁻¹ .s ⁻¹]	0.0067
Specific heat[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	750
Thermal conductivity [w.m ⁻¹ .K ⁻¹]	41
Heat flux [kw.m ⁻²]	15
Inlet	
Mass flow Rate [kg.s ⁻¹]	27.083
Turbulent Intensity [%]	3.49
Hydraulic Diameter [m]	0.075
Outlet	
Pressure outlet	0
Turbulent Intensity [%]	5
Hydraulic Diameter [m]	0.055
Walls	
Walls (flow)	No slip
Thermal Conditions [K]	1777
Wall (heat loss) [kW.m ⁻²]	2.5
Surface (heat loss) [kW.m ⁻²]	15
Tracer	
Injection time (s)	10

Sledované body a roviny



Sledované body na výstupoch z medzipanvy (zobrazenie otvorov z ľava Series 1 - CS1, Series 2 – CS2, Series 3 – CS3, Series 4 – CS4)

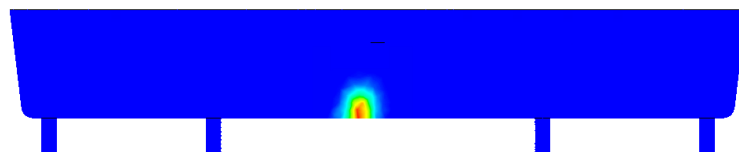
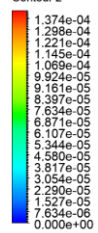


Sledované roviny

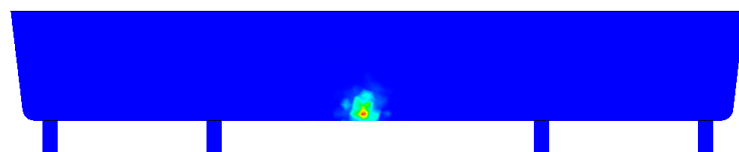
Výsledky CFD simulácií

Distribúcia stopovacej látky v 20 sekunde (Plane 1)

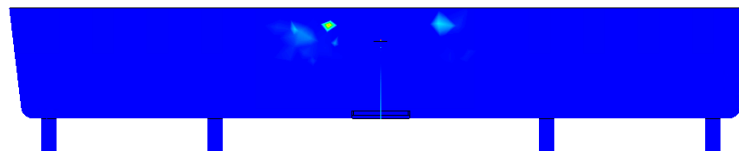
steel tracer.Mass Fraction
Contour 2



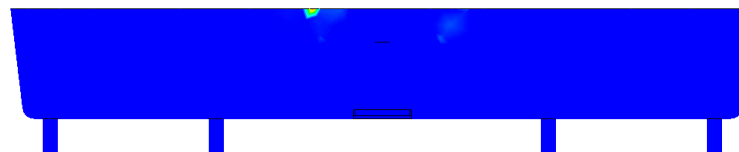
1



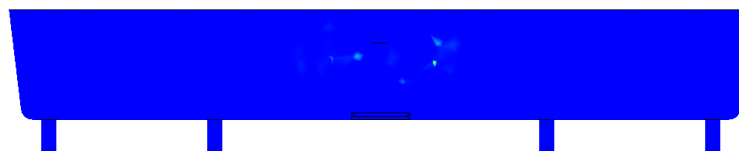
2



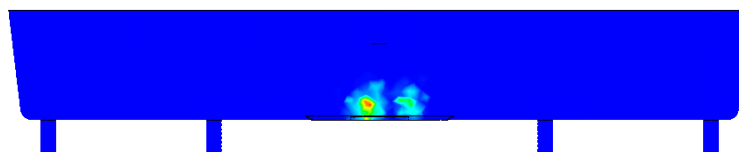
3



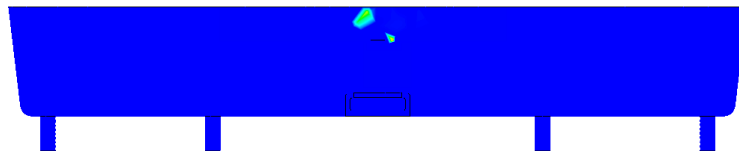
4



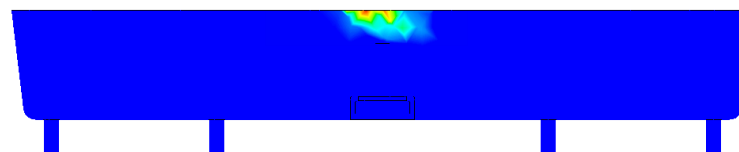
5



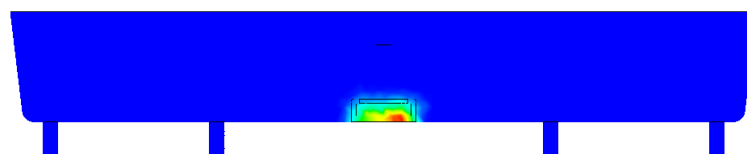
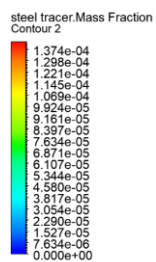
6



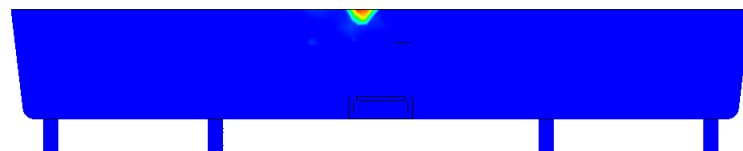
7



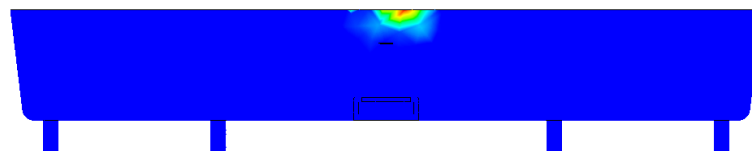
8



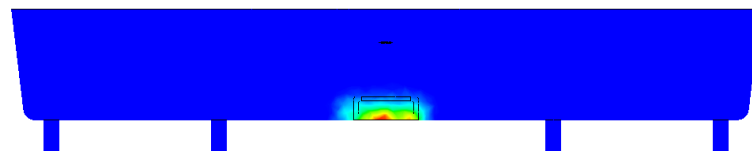
9



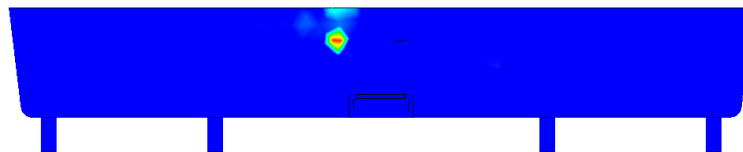
10



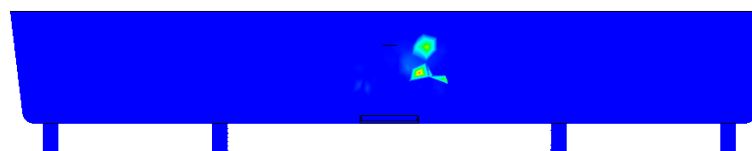
11



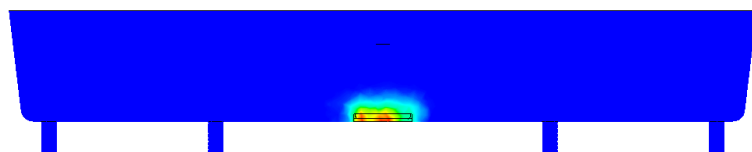
12



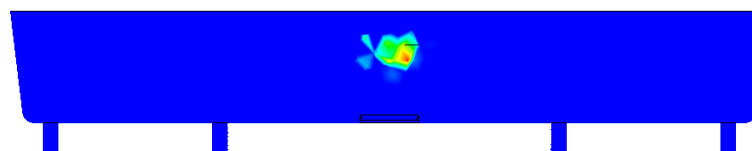
13



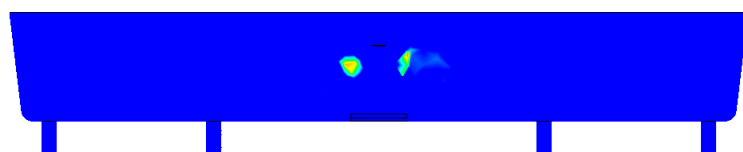
14



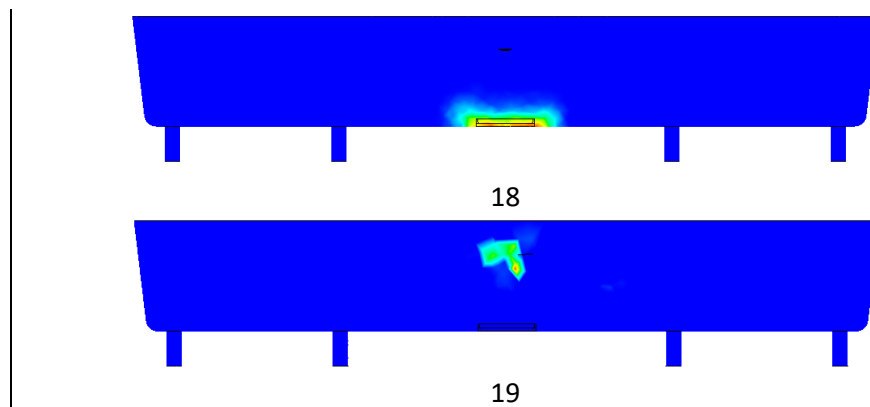
15



16



17

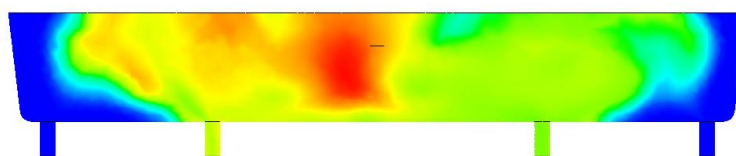


Pri konfiguráciách 8, 10, 11 a 13 vysoká koncentrácia stopovacej látky v okolí ochrannej trubice hovorí o výraznom piestovom prúdení. Riziko tvorby červeného oka (Red Eye Phenomena). Podľa sledovaného parametra koncentračných polí stopovacej látky sú sférické dosky výrazne menej citlivé na vychýlenie ochrannej trubice.

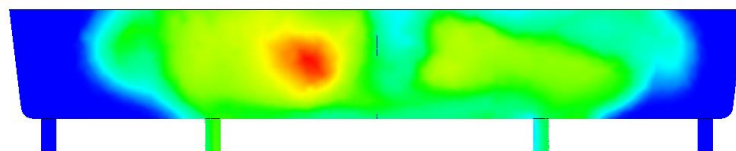
Distribúcia stopovacej látky v 300 sekunde (Plane 1)

steel tracer.Mass Fraction
Contour 2

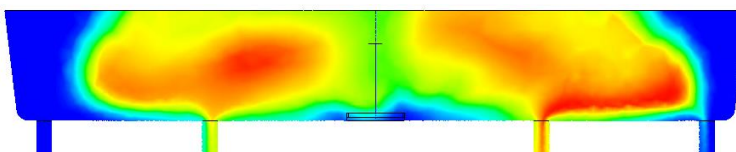
1.374e-04
1.298e-04
1.221e-04
1.145e-04
1.069e-04
9.924e-05
9.161e-05
8.397e-05
7.634e-05
6.871e-05
6.107e-05
5.344e-05
4.580e-05
3.817e-05
3.054e-05
2.290e-05
1.527e-05
7.634e-06
0.000e+00



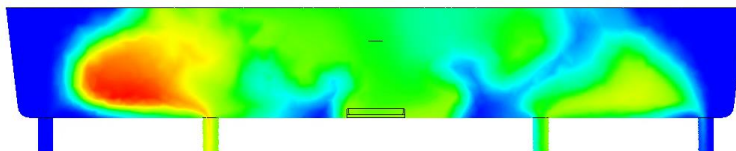
1



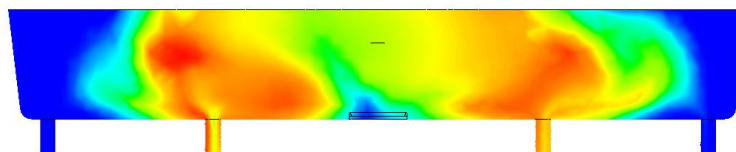
2



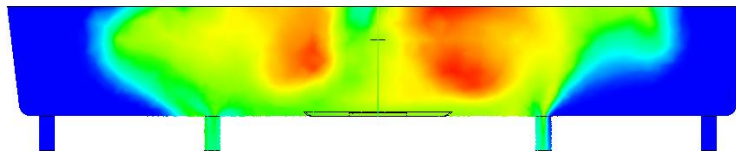
3



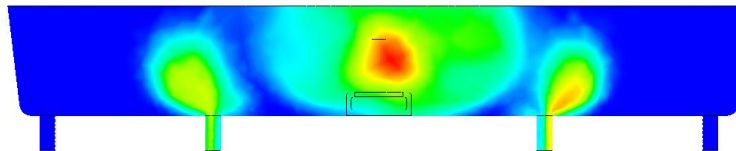
4



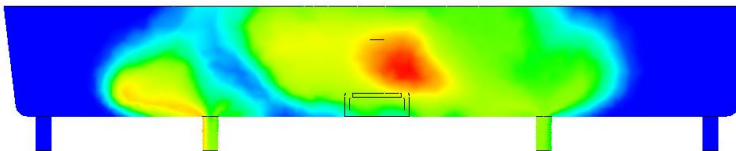
5



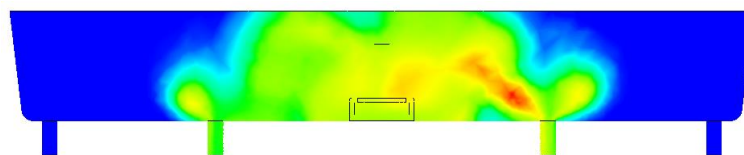
6



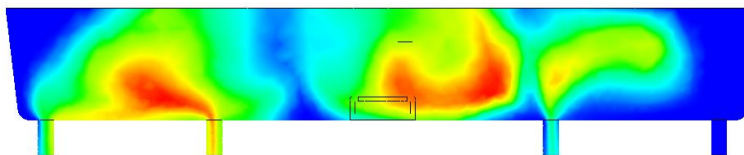
7



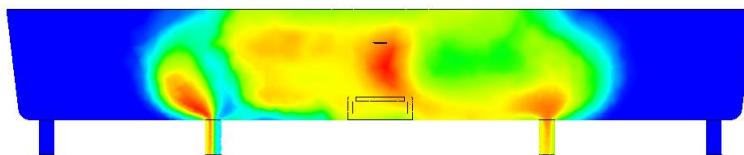
8



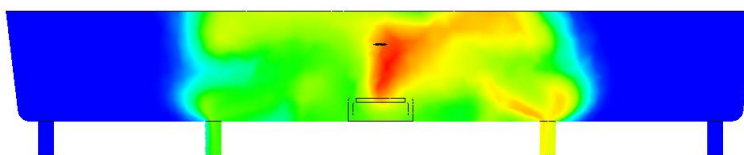
9



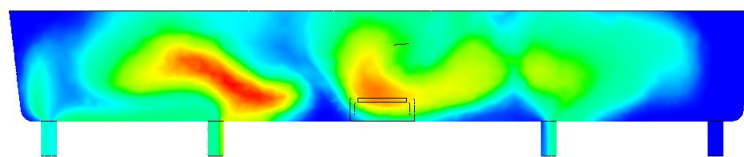
10



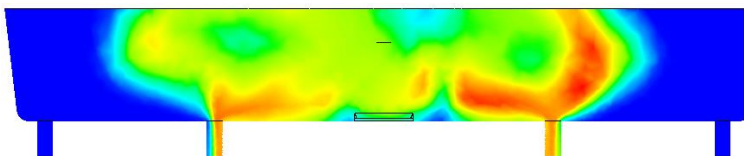
11



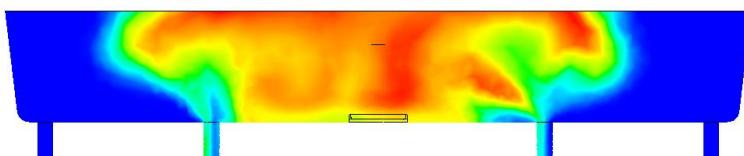
12



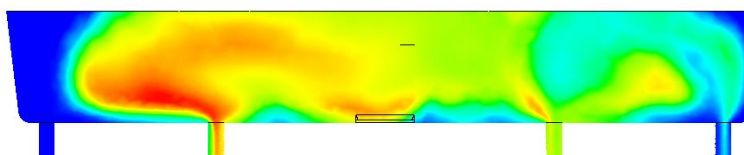
13



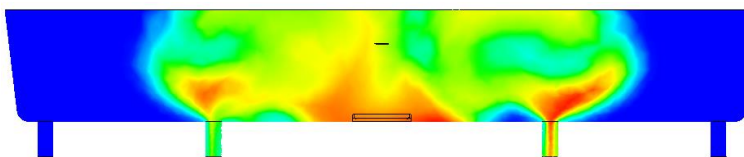
14



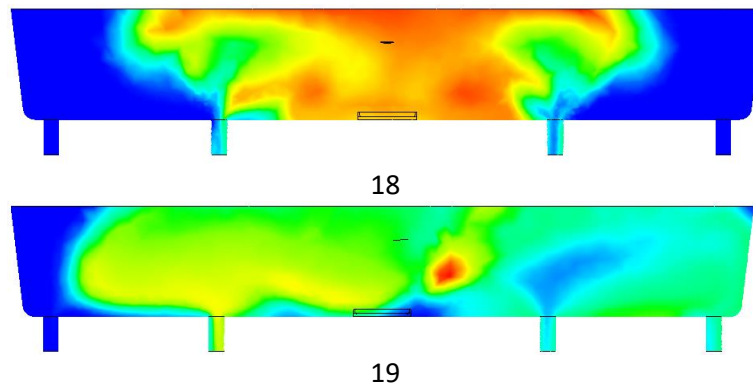
15



16



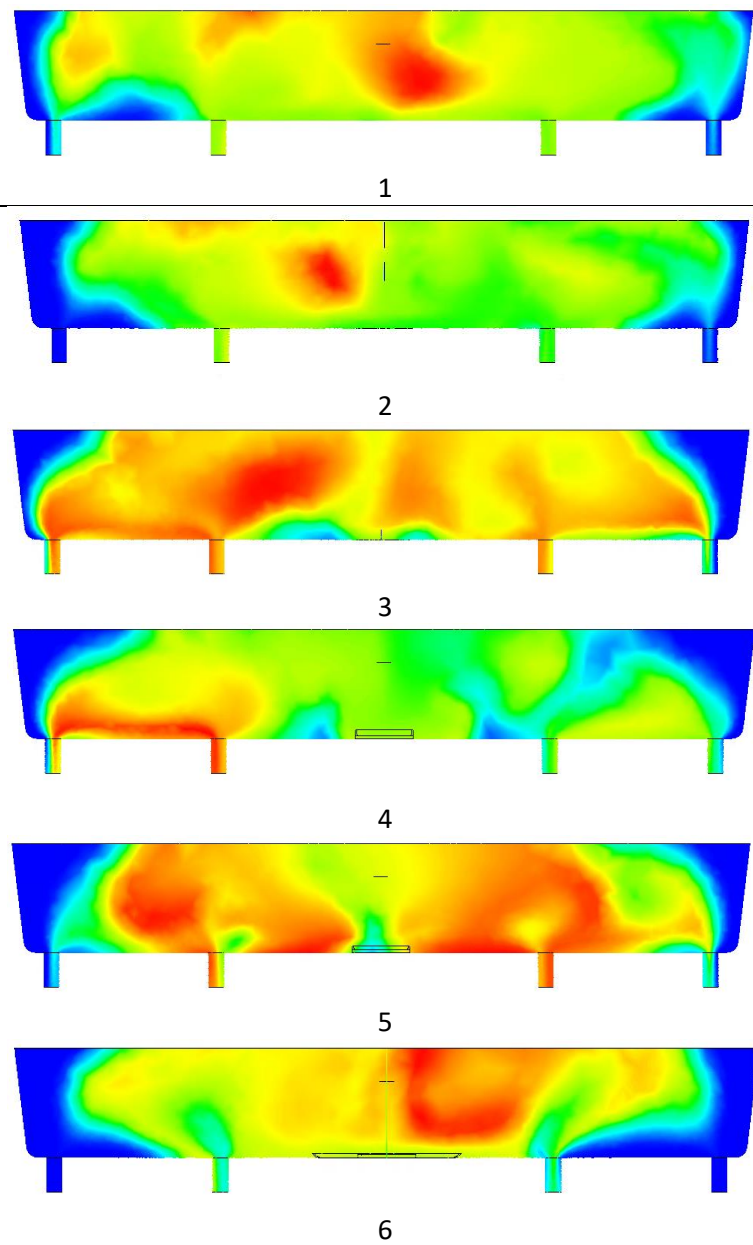
17

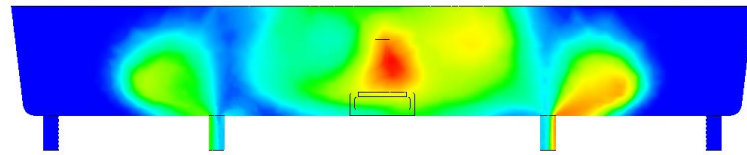


Distribúcia stopovacej látky v 400 sekunde (Plane 1)

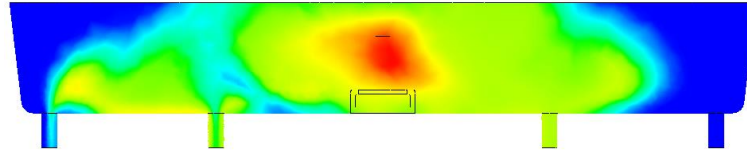
steel tracer.Mass Fraction
Contour 2

1.374e-04
1.298e-04
1.221e-04
1.145e-04
1.069e-04
9.924e-05
9.161e-05
8.397e-05
7.634e-05
6.871e-05
6.107e-05
5.344e-05
4.580e-05
3.817e-05
3.054e-05
2.290e-05
1.527e-05
7.634e-06
0.000e+00

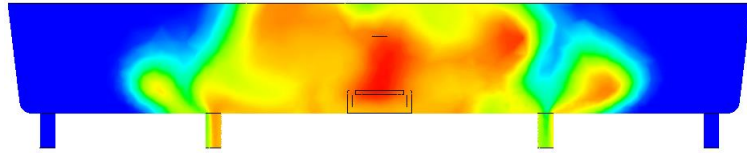




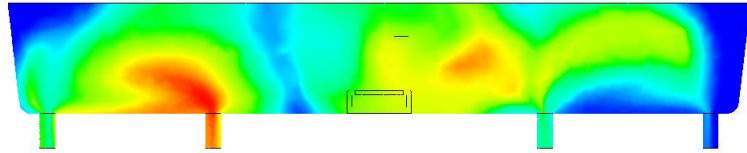
7



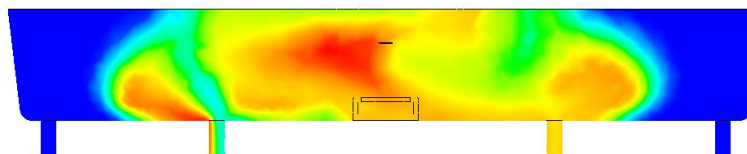
8



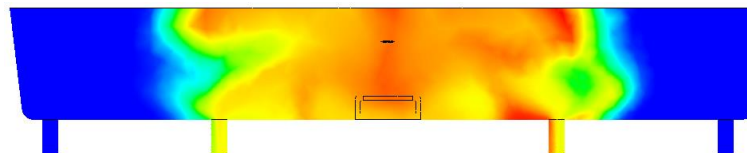
9



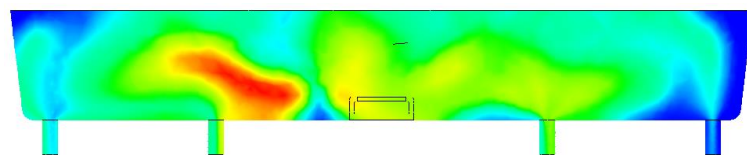
10



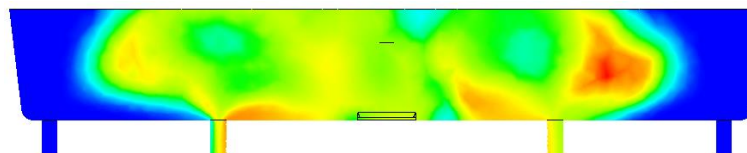
11



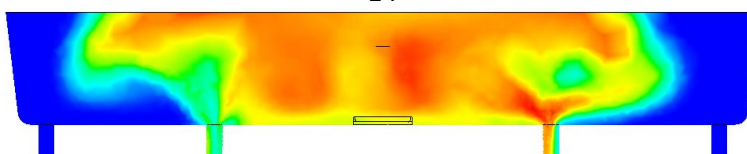
12



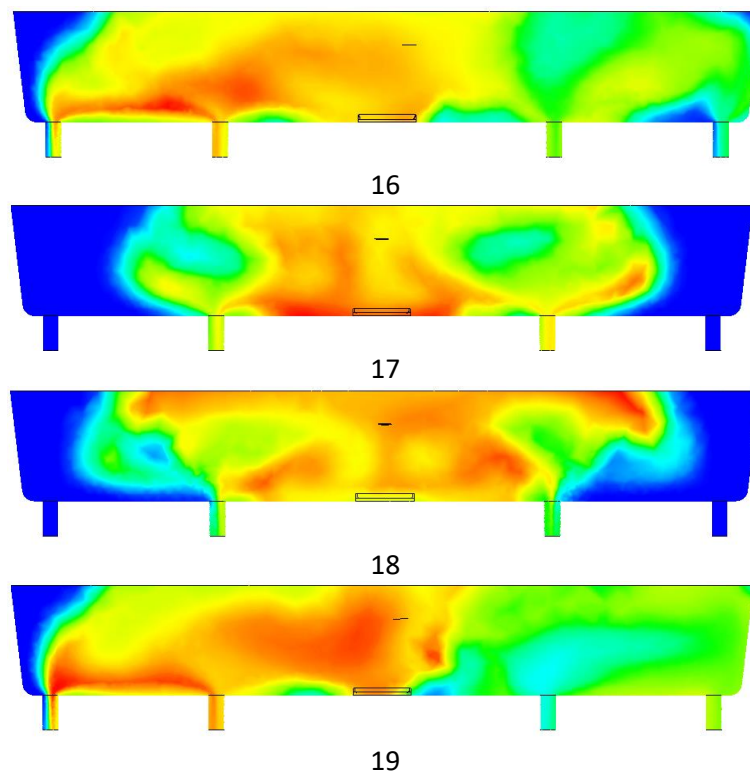
13



14



15



Z pohľadu dynamiky prúdenia v hornej časti medzipanvy (zvýšený rozptyl stopovacej látky v objeme predpokladá intenzívnejšie rafinačné reakcie na medzifázovom rozhraní kov-troska) sa javí najvhodnejšia alternatíva 6. To isté platí aj pohľadu objemov mŕtvych zón (dead zone areas).

Ak porovnáme vplyv vychýlenia trubice pre rôzne dopadové dosky (8-14, 9-15, 10-16, 11-17, 12-18, 13-19), môžeme konštatovať že:

8-14 vplyv vychýlenia je menší pri použití dosky Spheric K4

9-15 pri vychýlenej trubici smerom dopredu vytvára dopadová doska Spheric K4 vhodnejšie prúdenie v oblasti medzifázového rozhrania kov-troska.

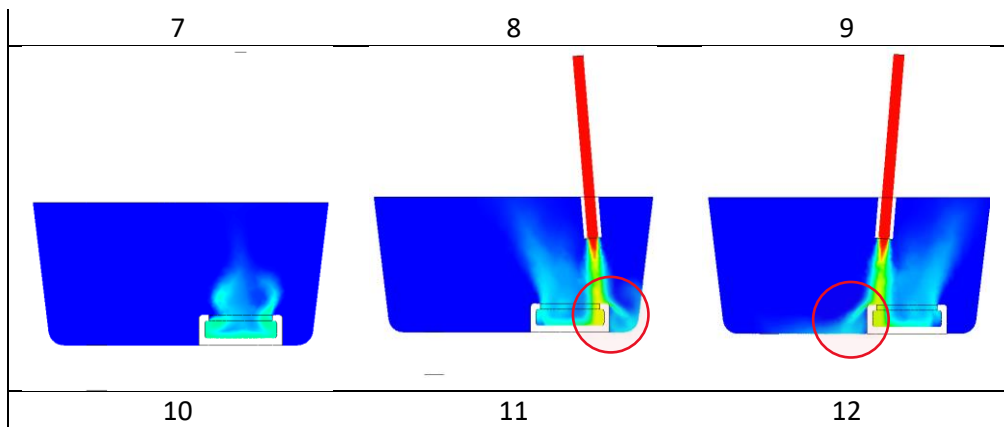
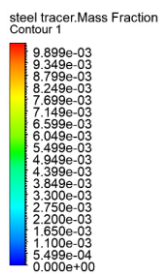
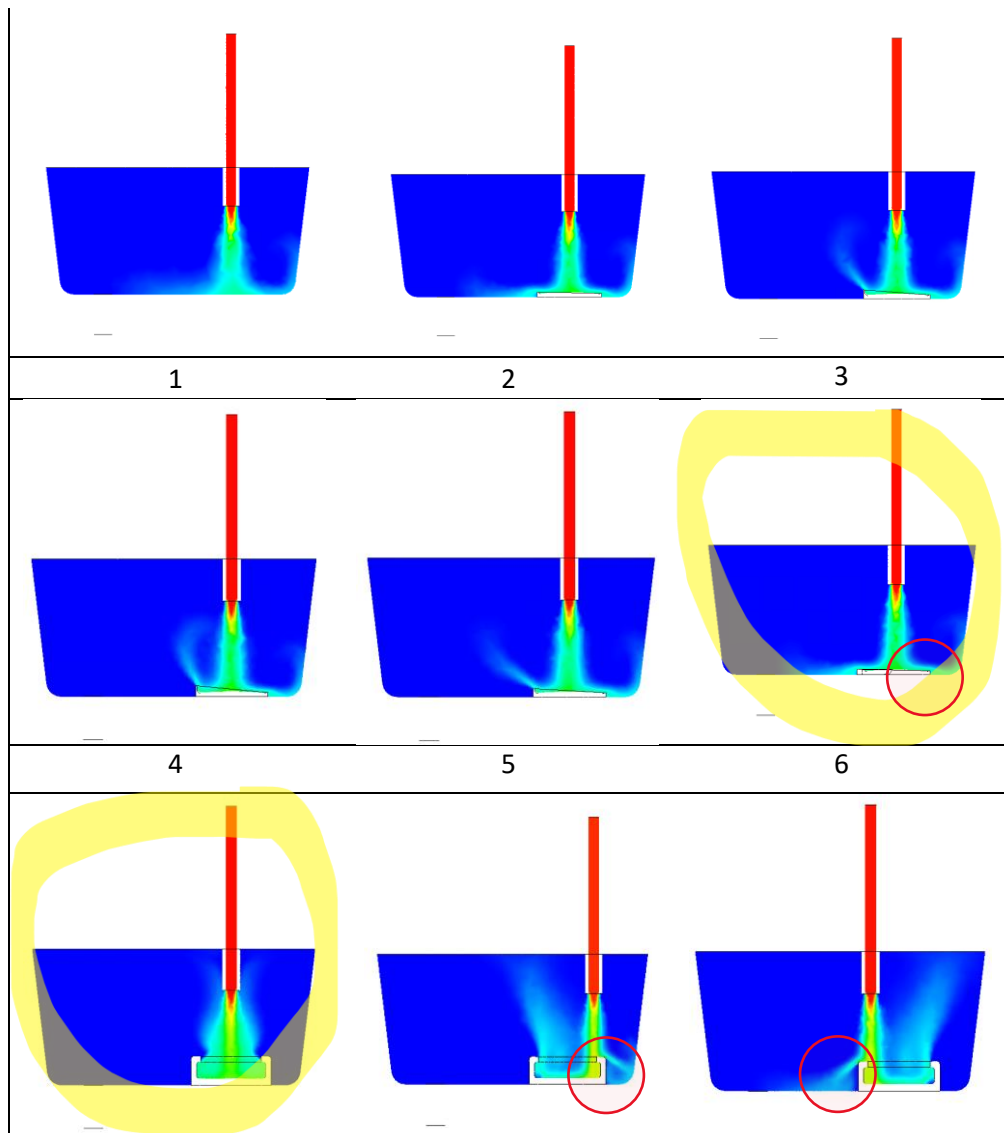
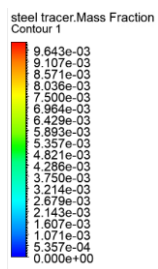
10-16 menší objem mŕtvych zón pri použití Spheric K4

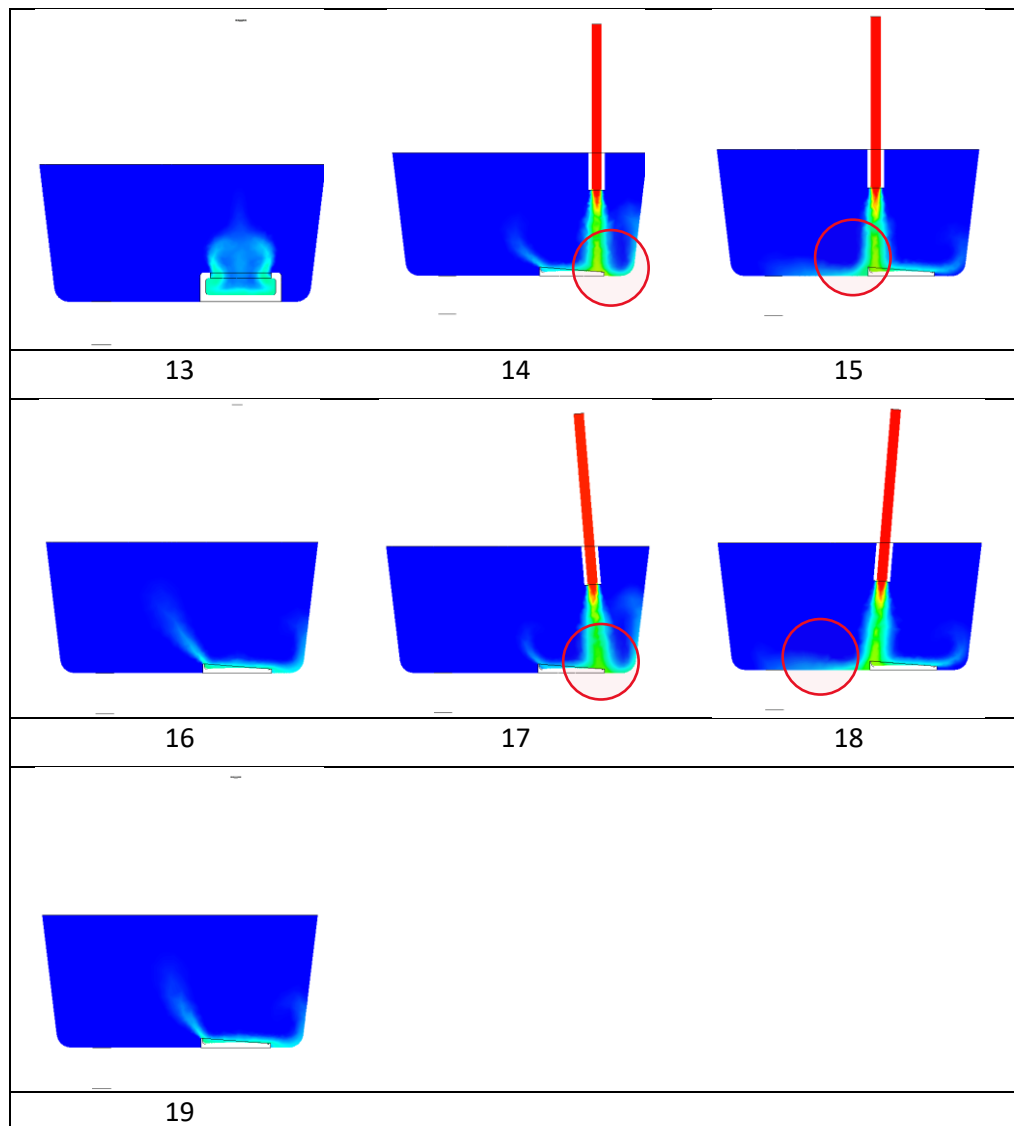
11-17 pri vychýlenej trubici dozadu sa správajú obidve testované dopadové dosky veľmi podobne

12-18 pri naklonenej trubici smerom dopredu vytvára dopadová doska Spheric K4 vhodnejšie prúdenie v oblasti medzifázového rozhrania kov-troska.

13-19 pri naklonenej trubici doľava je homogénnejšie koncentračné pole v prípade použitia Turbostopu

Distribúcia stopovacej látky v 20 sekunde (Plane 2)



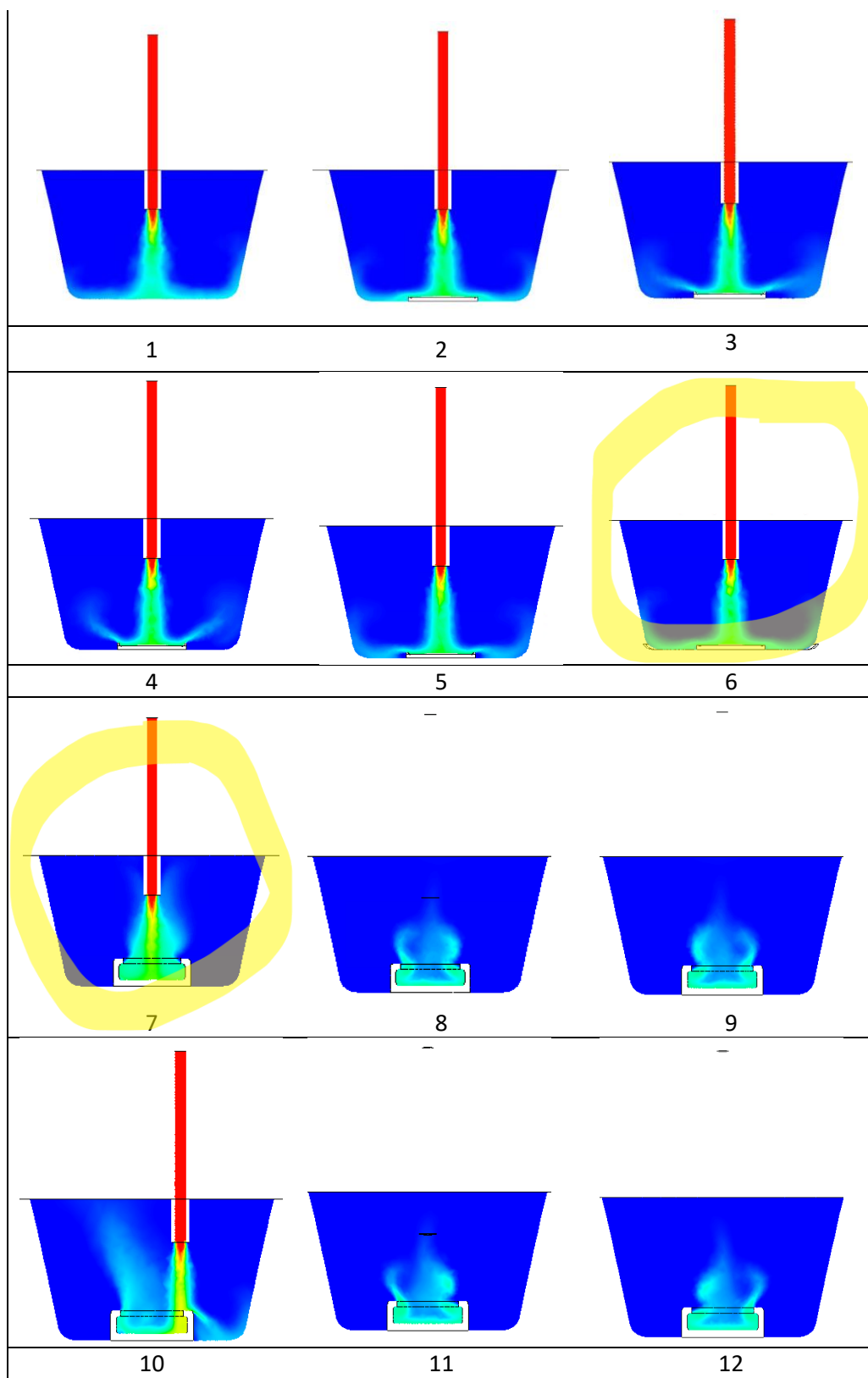
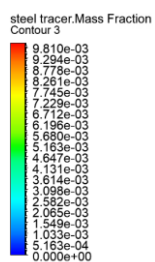


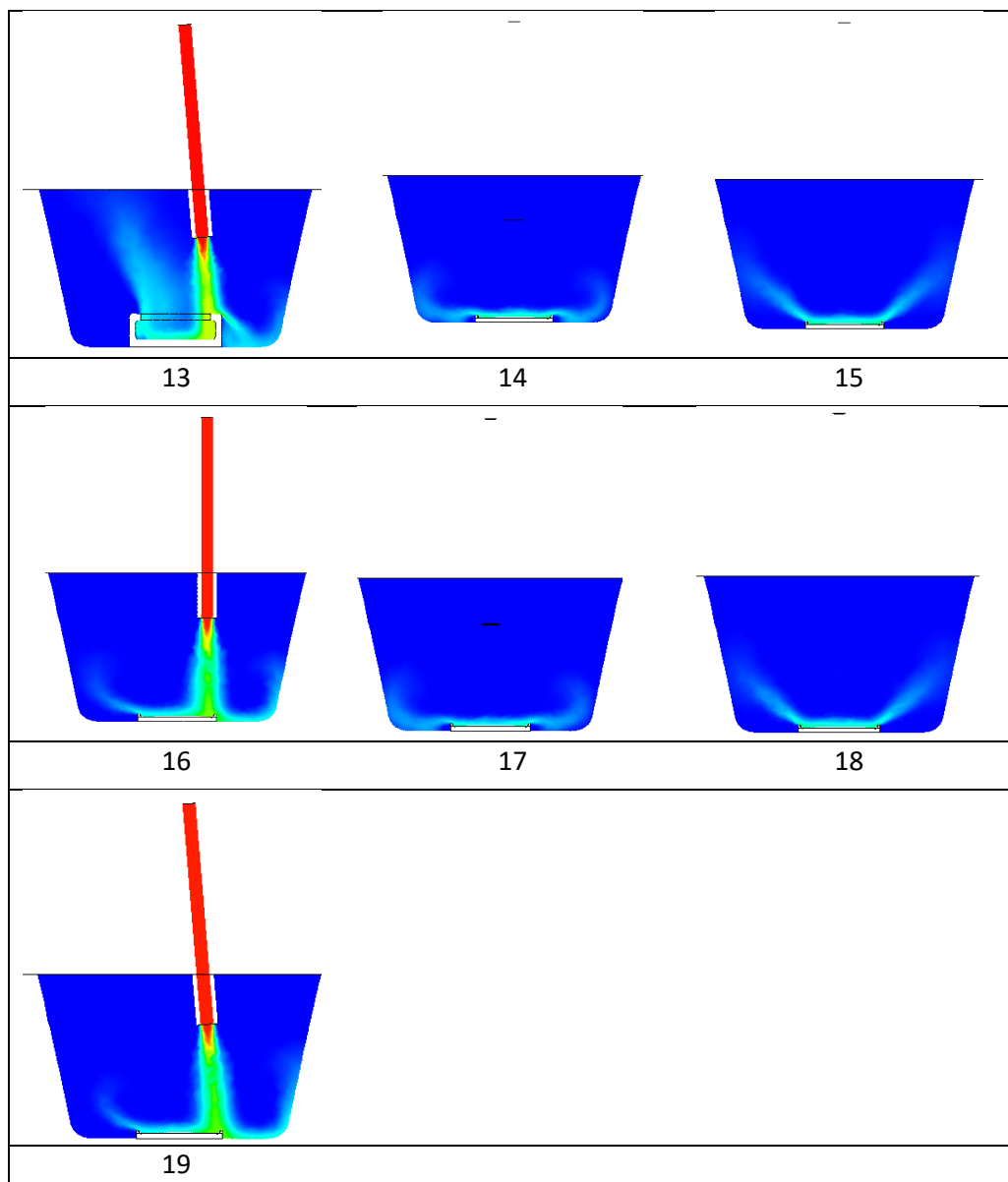
Turbostop pri správne osadenej ochrannej trubici vytvára štandardné piestové prúdenie. Sférická dopadová doska využíva na pohltenie kinetickej energie dopadajúceho prúdu ocele hybnosť okolitej ocele v objeme medzipanvy.

Pri konfigurácii 6 (Spheric K4) môže dochádzať ku zvýšenému opotrebeniu pracovnej výmurovky v červeno vyznačenej oblasti za dopadovou doskou.

V prípadoch vychýlenej alebo vyosenej ochrannej trubice hrozí riziko zvýšeného opotrebenia pracovnej výmurovky v oblasti dopadovej dosky (platí pre Spheric aj pre Turbostop) – oblasť znázornená červenou čiarou. Na základe empirických skúseností zo veľmi podobných simulácií na vlastných fyzikálnych modeloch je možné v prípade Turbostopu predikovať výrazne šikmé piestové prúdenie, ktoré bude spôsobovať tvorbu červeného oka.

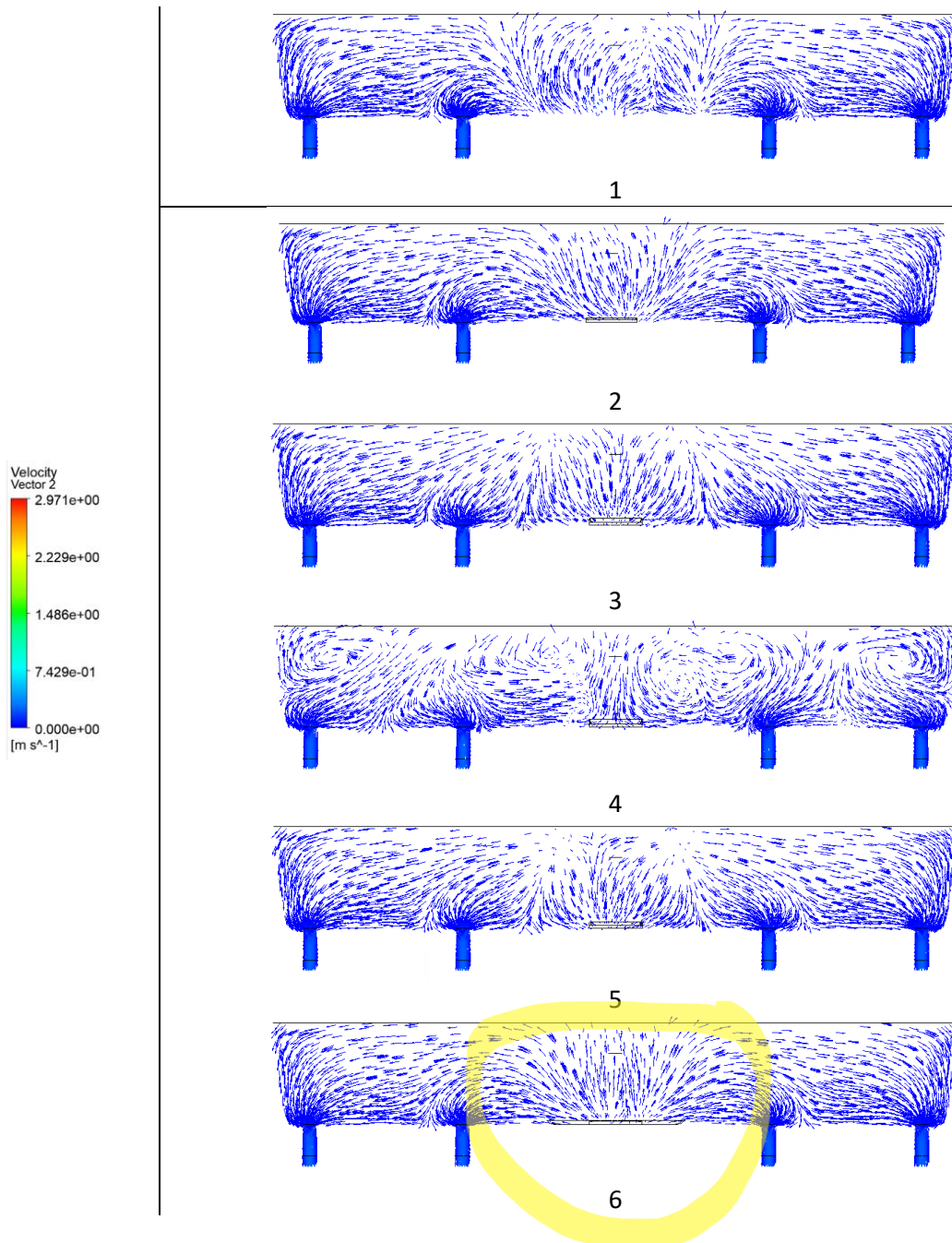
Distribúcia stopovacej látky v 20 sekunde (Plane 3)

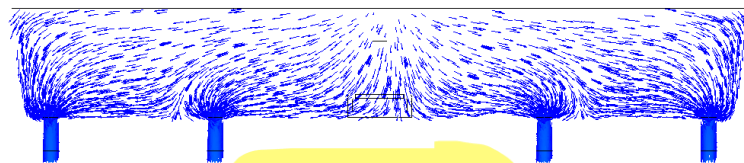




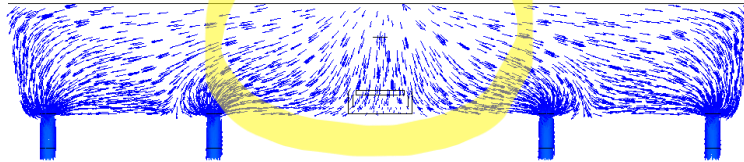
Smer prietoku tekutiny v medzipanve na Plane 1

Vektory: pri použití Turbostopu (7) je vidieť výrazné piestové prúdenie. Vektory smerujú v okolí ochrannej trubice, zvýšené riziko tvorby červeného oka. Pri použití Spheric K4 (6) je prúdenie nad dopadovou doskou viac smerované do objemu taveniny. V oboch prípadoch je vidieť vhodné prúdenie tesne pod hladinou trosky, z čoho je možné predpokladať efektívny priebeh rafinačných reakcií na medzifázovom rozhraní kov-troska. Pri posunutí trubice o 200mm doľava dochádza pri Turboostope (10) ku intenzifikácii rýchlostného poľa vpravo – žltó zvýraznená oblasť. V prípade dosky Spheric K4 (16), dochádza ku intenzifikácii rýchlostného poľa vľavo – žltó zvýraznená oblasť.

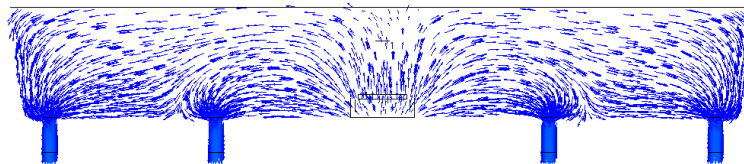




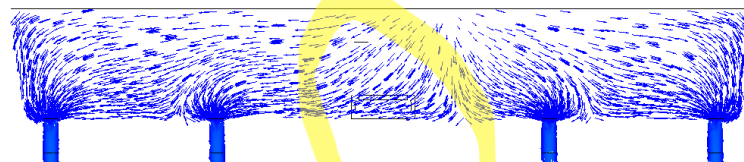
7



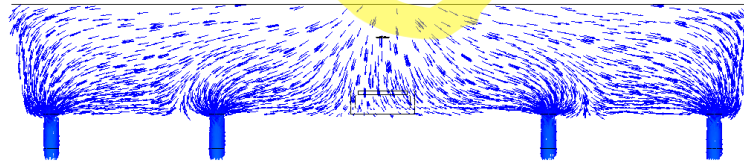
8



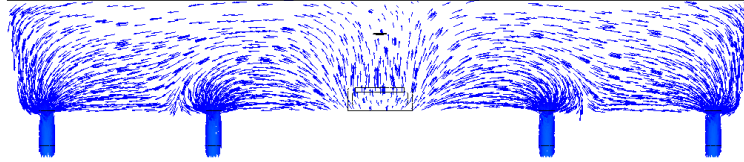
9



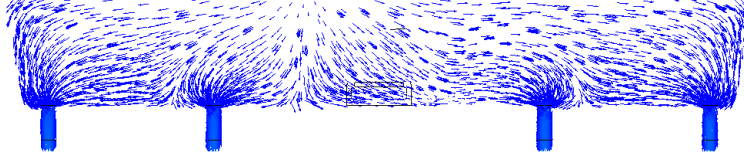
10



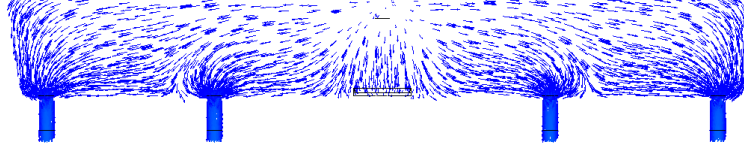
11



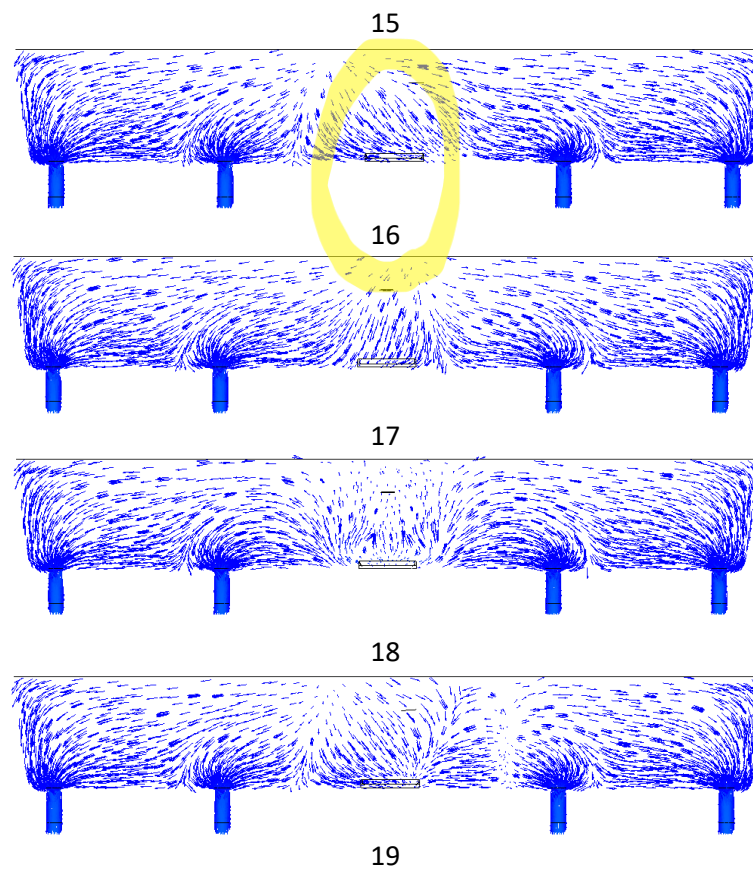
12



13

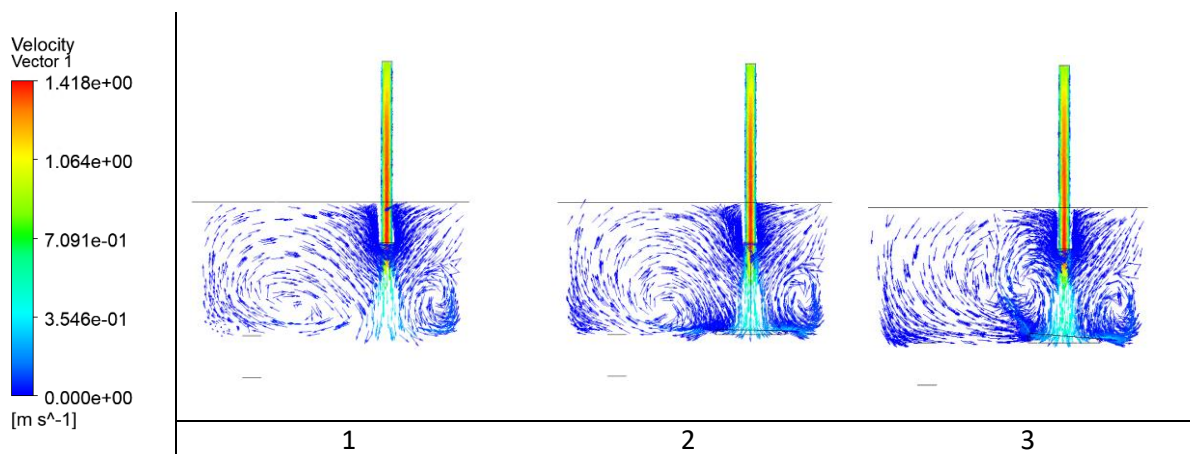


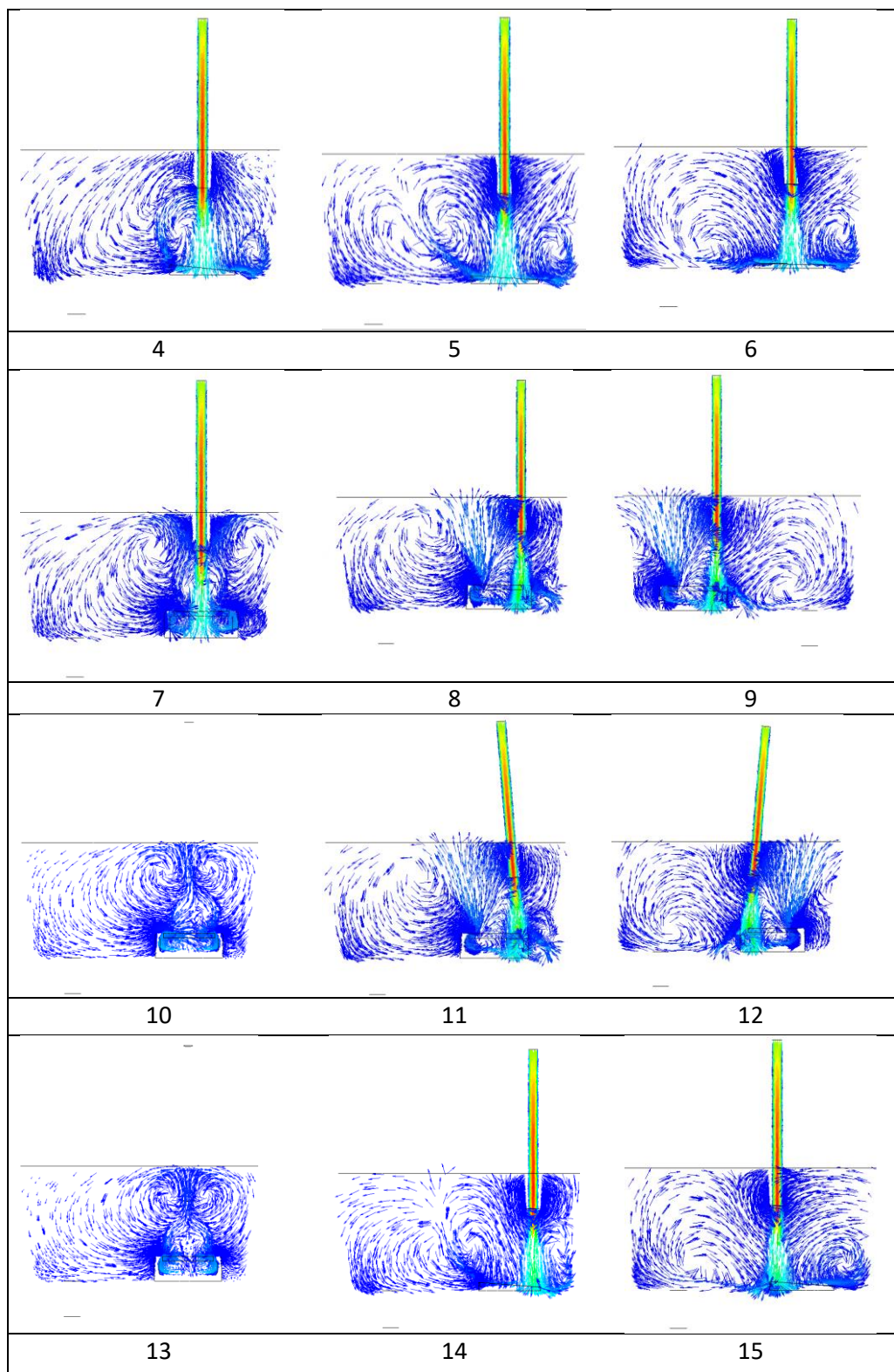
14

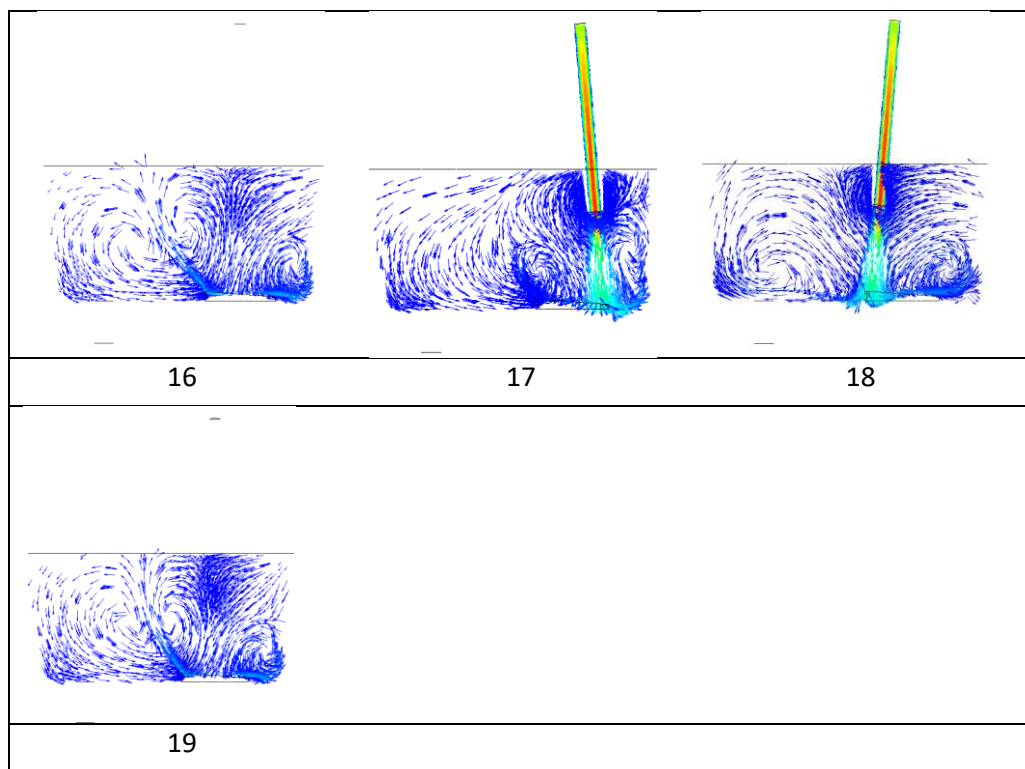


Pri použití Turbostupu (7) je piestové prúdenie natoľko intenzívne, že je veľký predpoklad vzniku červeného oka.

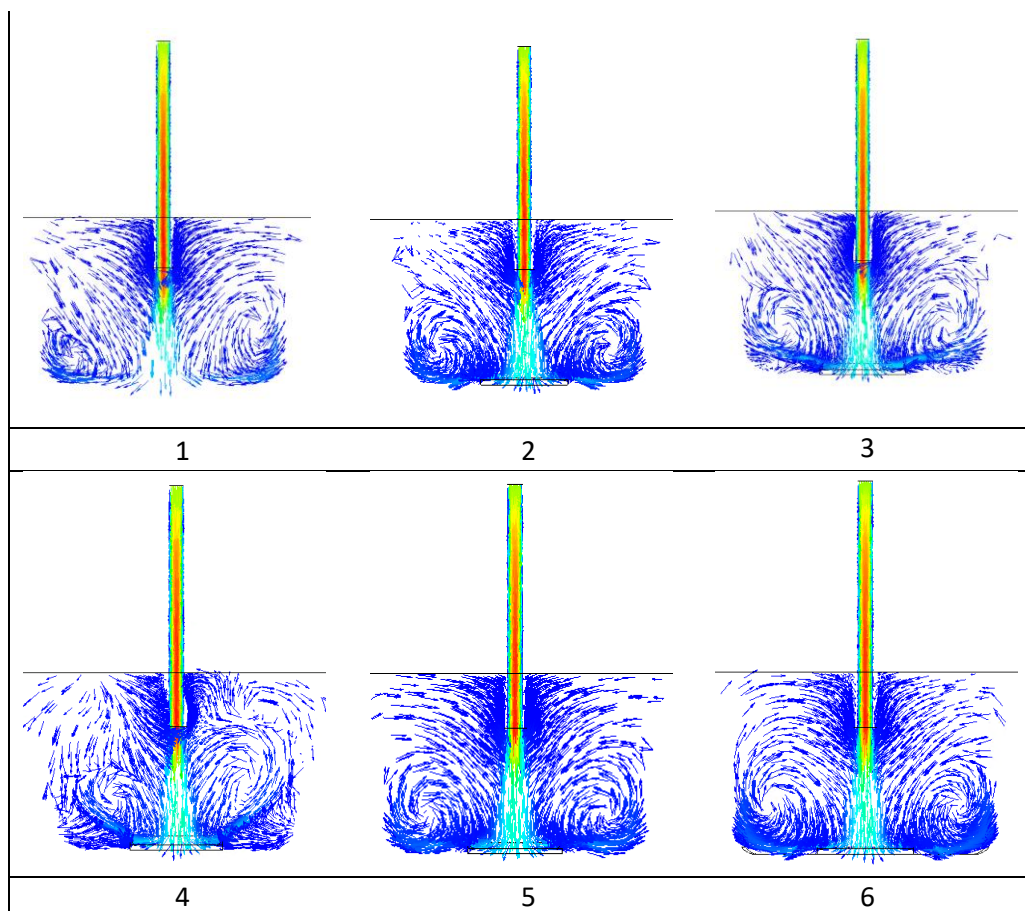
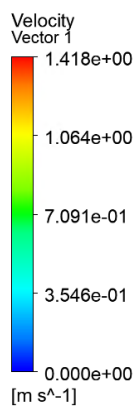
Smer prietoku tekutiny v medzipanve na Plane 2

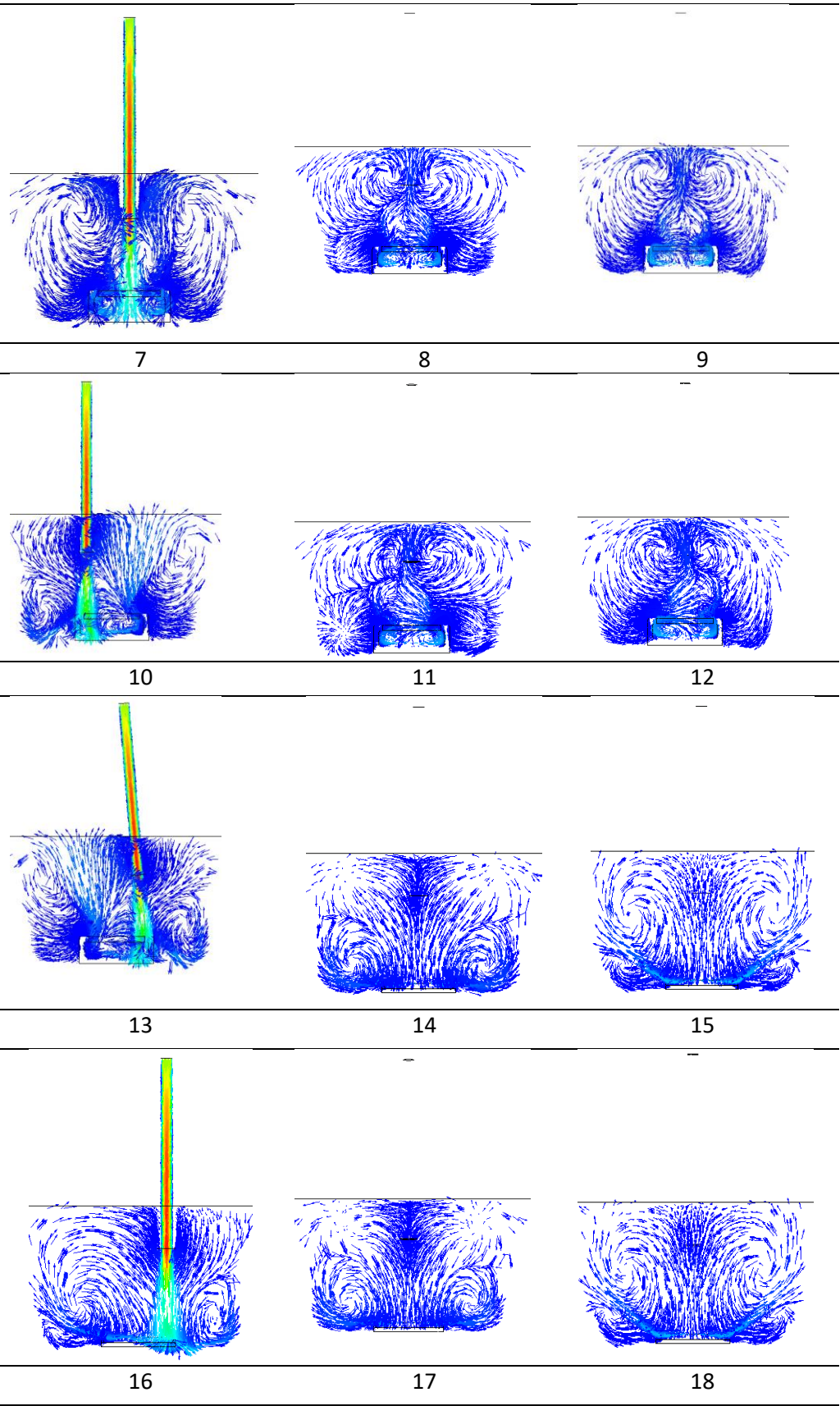


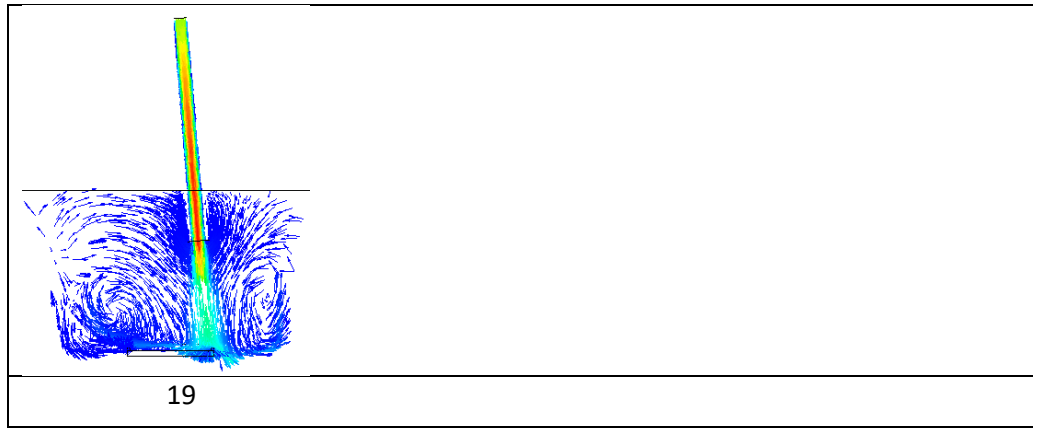




Smer prietoku tekutiny v medzipanve na Plane 3

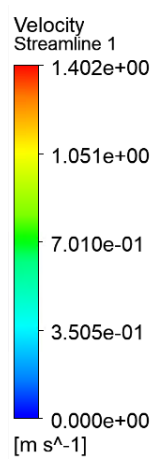




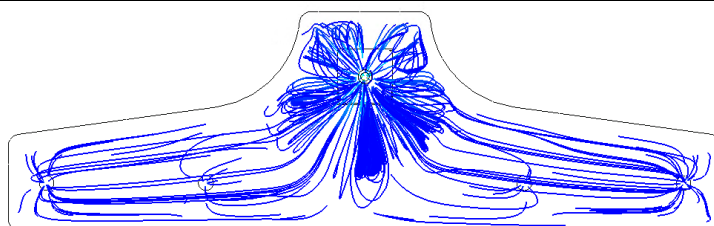


Prúdnice – Streamline

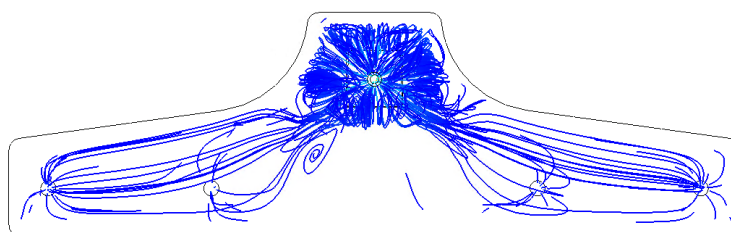
Prúdnice zhora



1



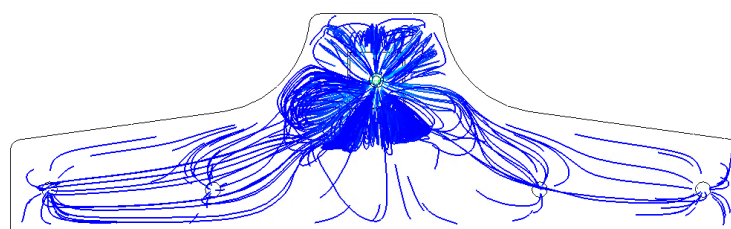
2



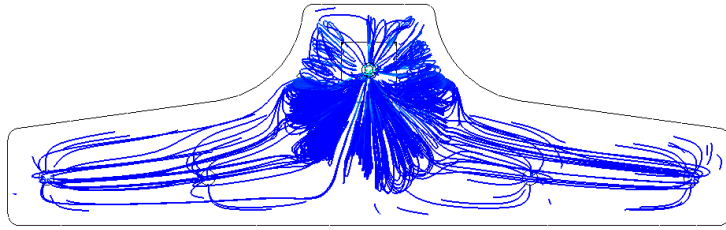
3



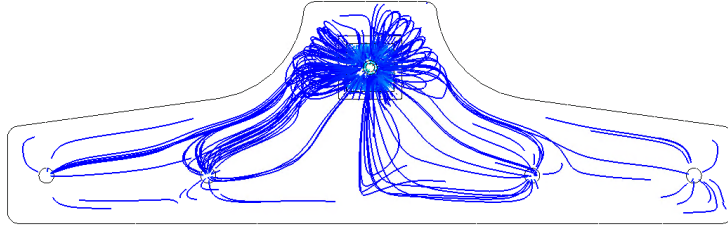
4



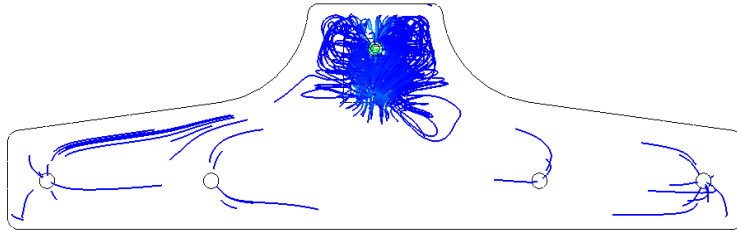
5



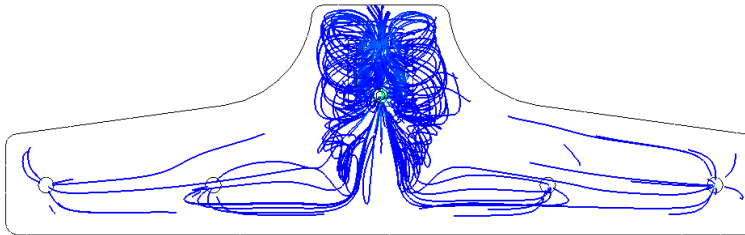
6



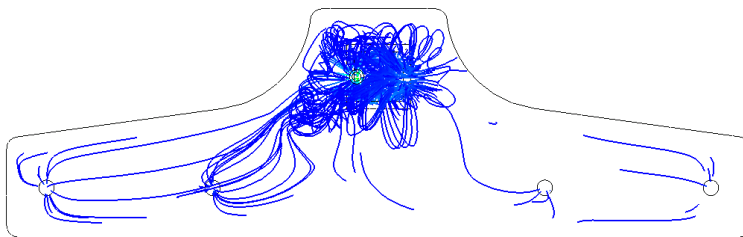
7



8



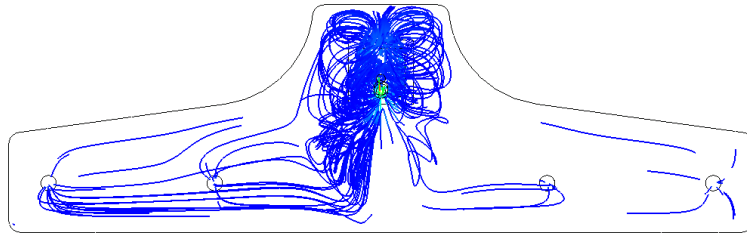
9



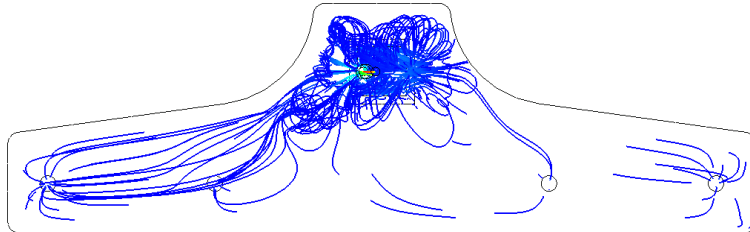
10



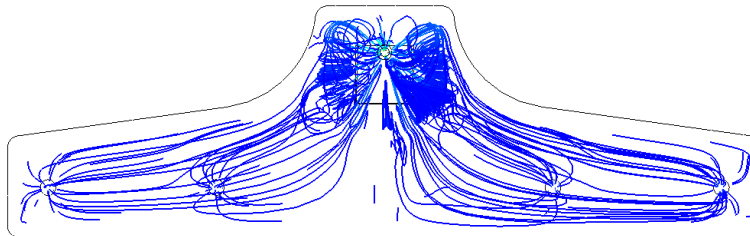
11



12



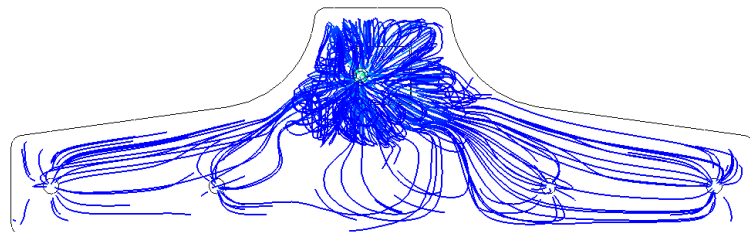
13



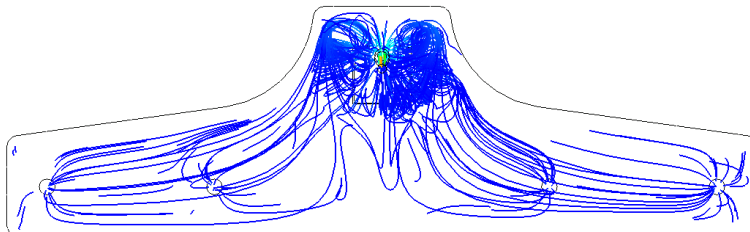
14



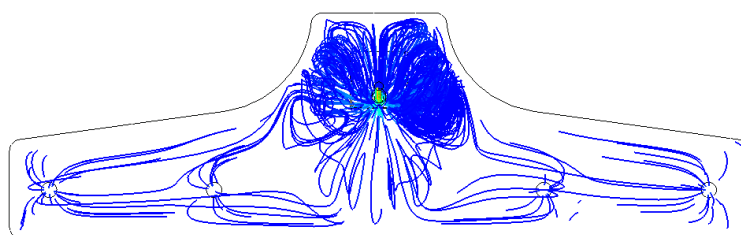
15



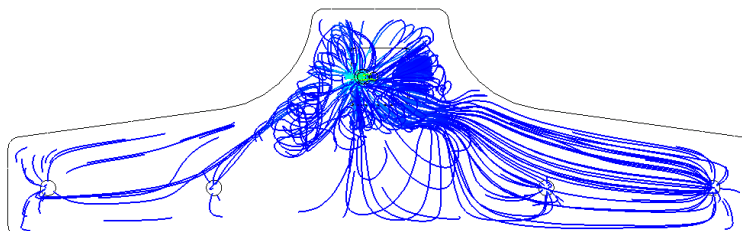
16



17



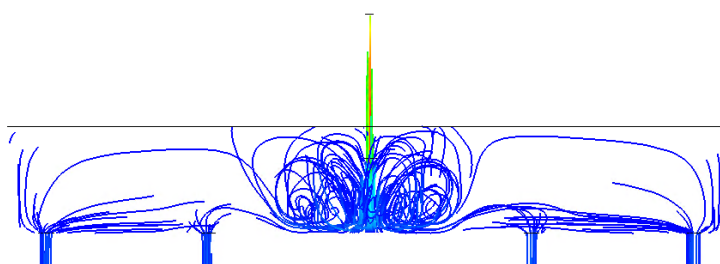
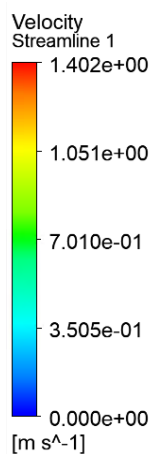
18



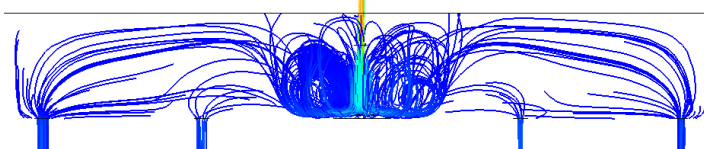
19

Pri použití Turbostupu (7) smerujú prúdnice nadol, priamo do výtokových uzlov – žltó vyznačená oblasť.
 Pri použití dopadovej dosky Spheric K4 využívajú prúdnice celý objem medzipanvy a obtekajú aj medzifázové rozhranie kov-troska – žltó vyznačená oblasť.

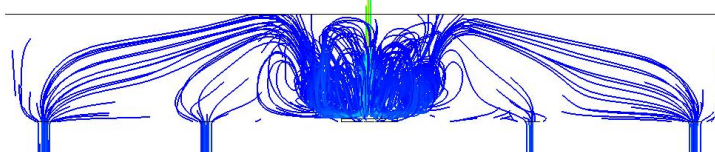
Prúdnice spredu



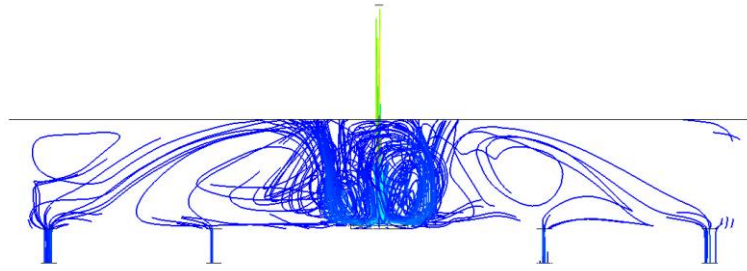
1



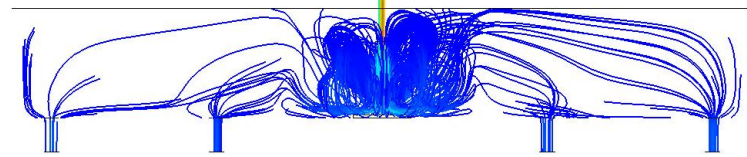
2



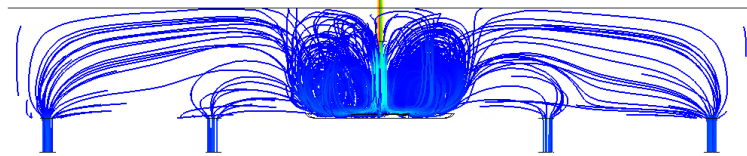
3



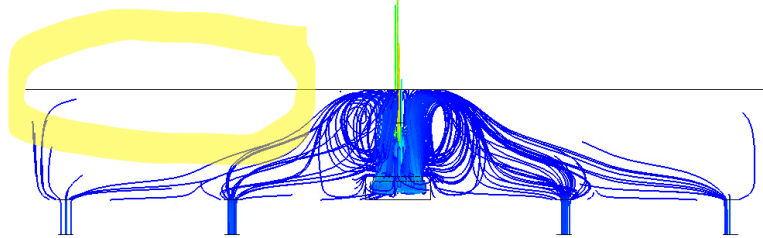
4



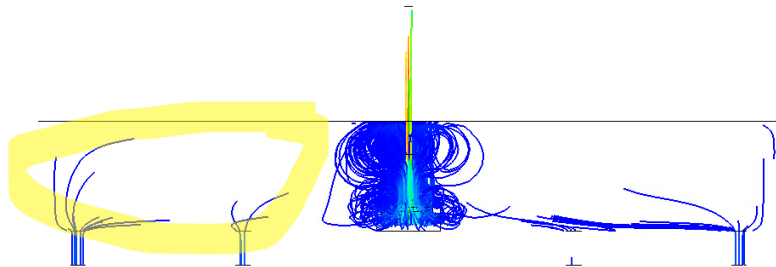
5



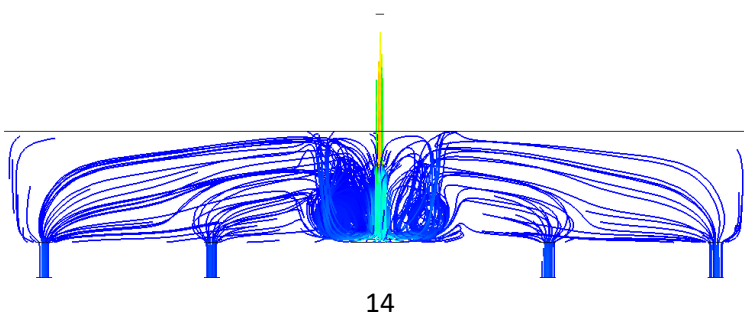
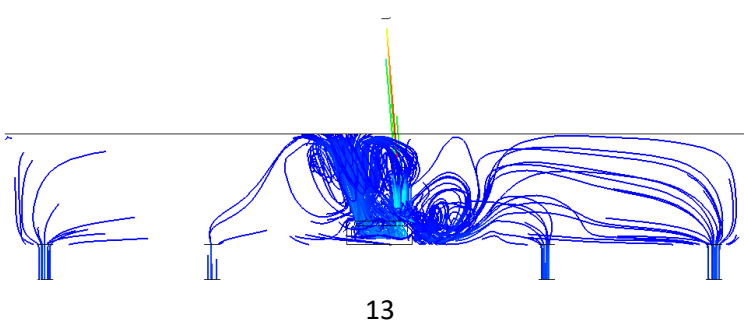
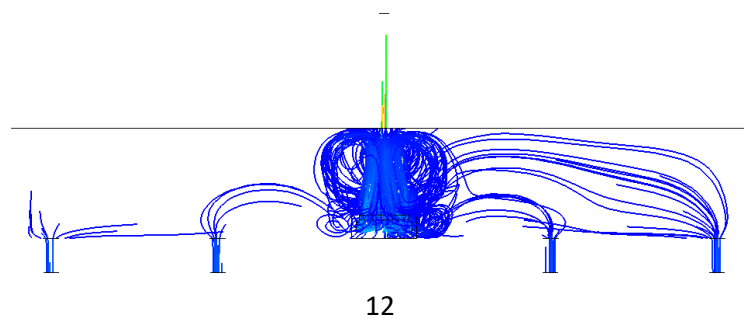
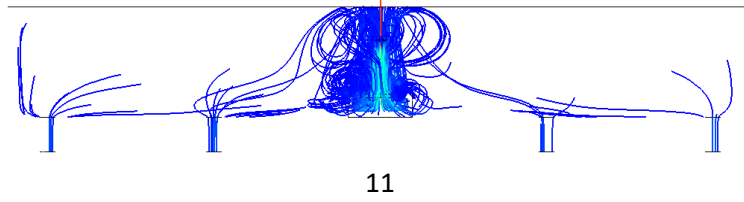
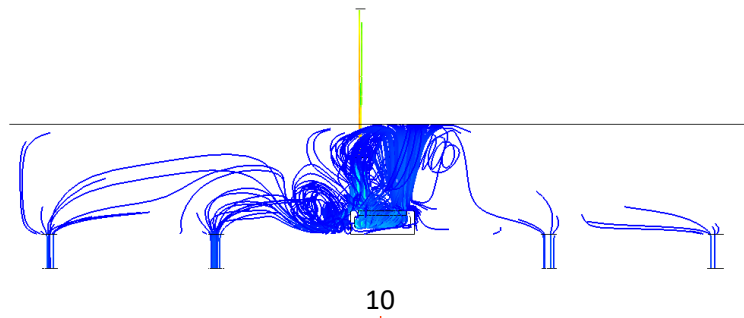
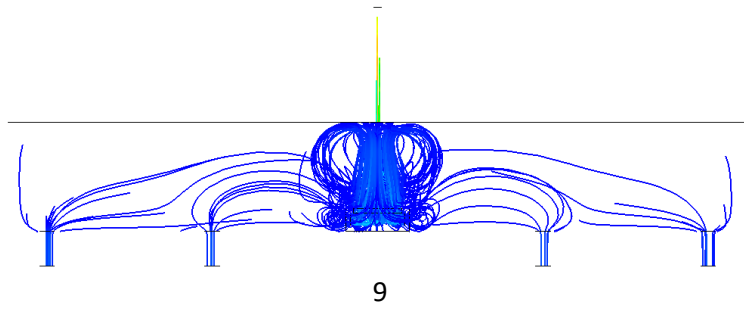
6

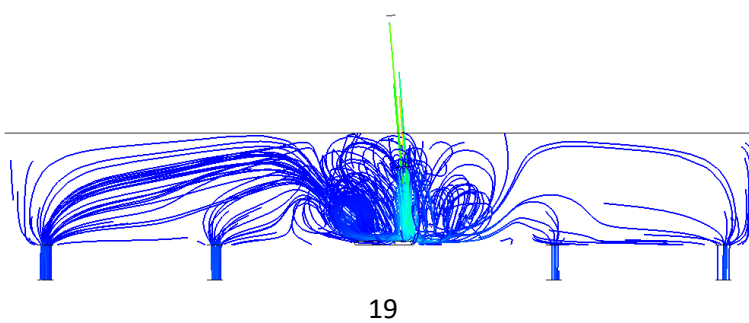
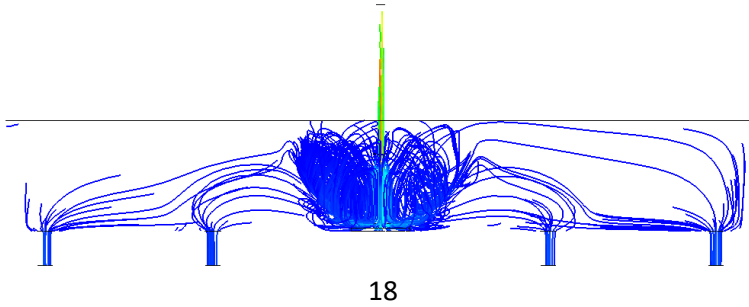
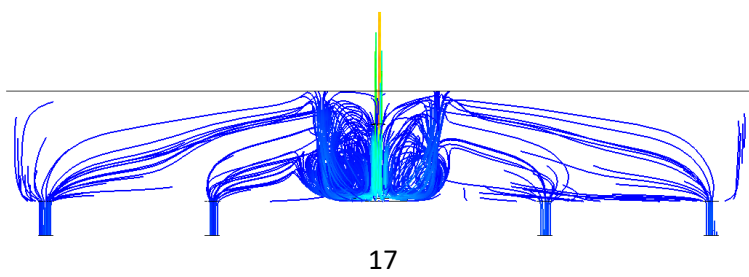
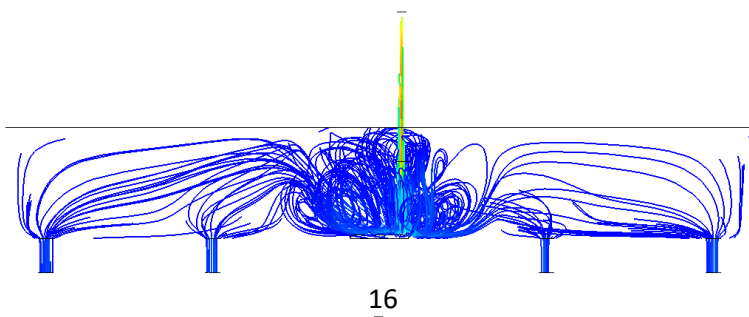
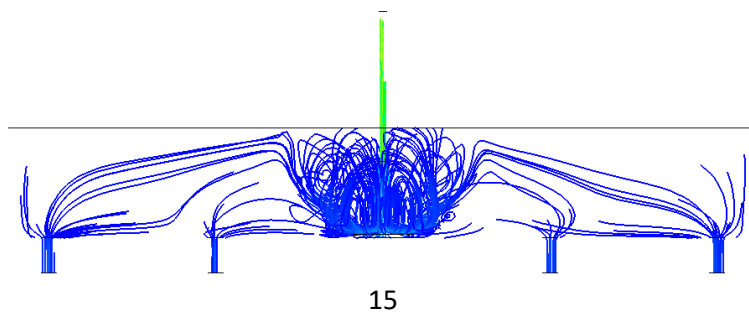


7



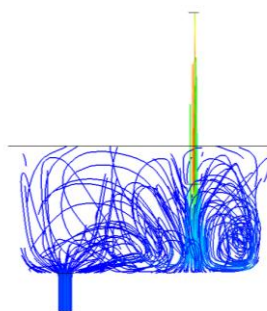
8



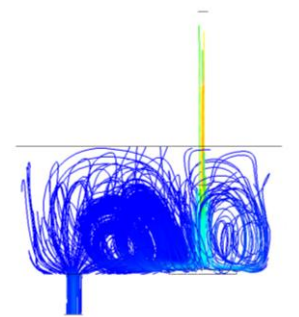


Prúdnice z boku

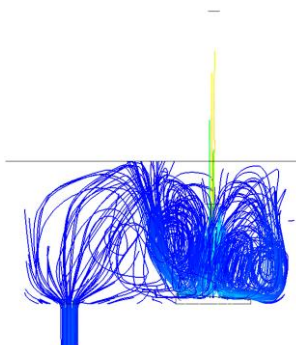
Velocity
Streamline 1
1.402e+00
1.051e+00
7.010e-01
3.505e-01
0.000e+00
[m s⁻¹]



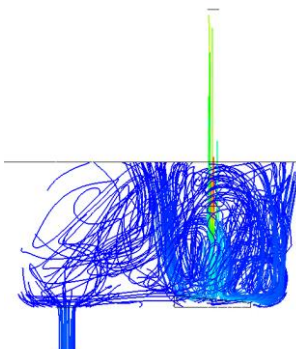
1



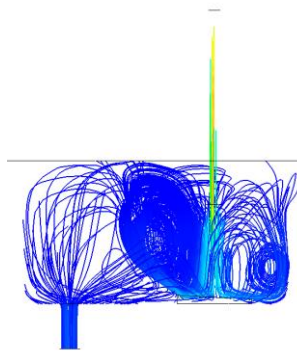
2



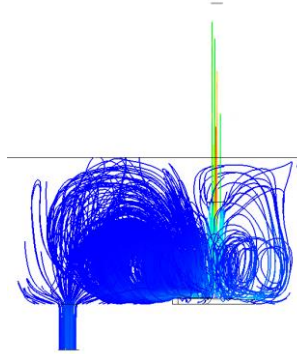
3



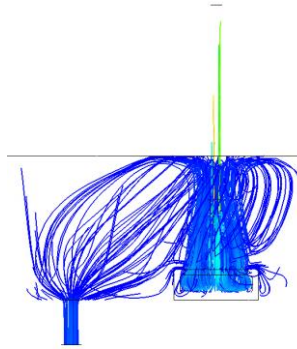
4



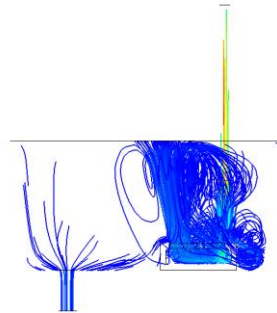
5



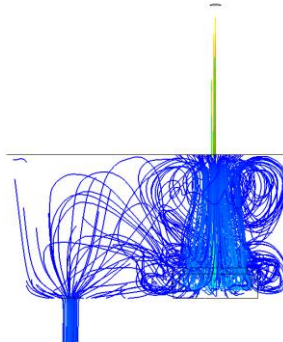
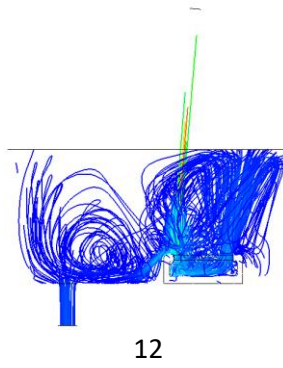
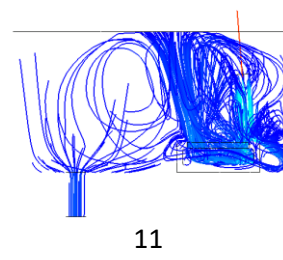
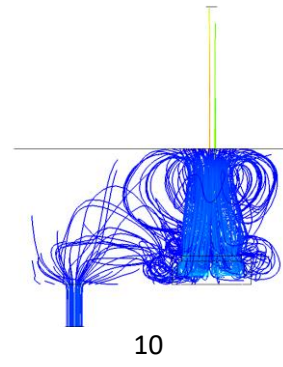
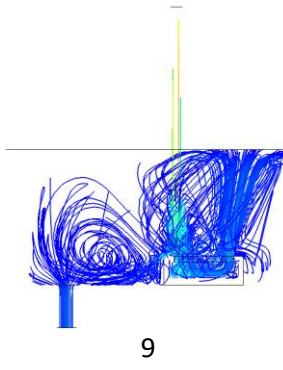
6



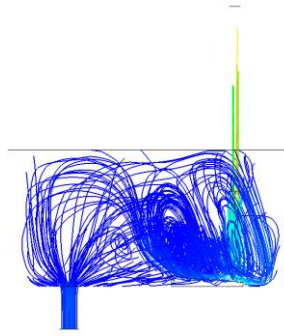
7



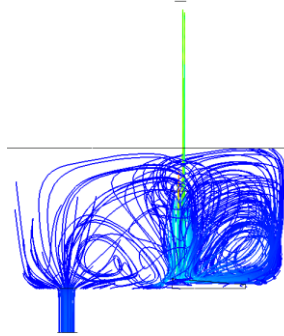
8



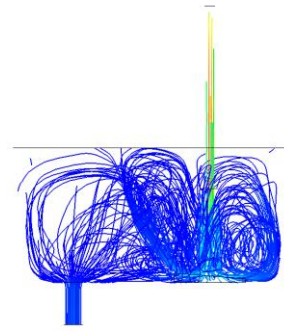
13



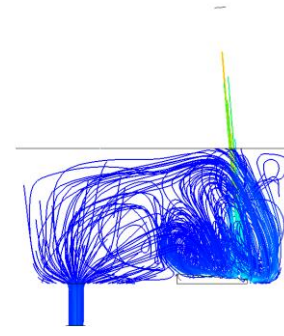
14



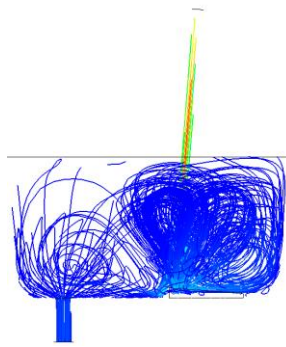
15



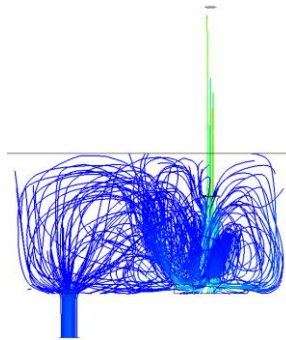
16



17



18



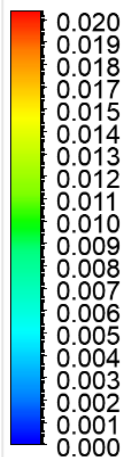
19

Porovnanie kontúr na základe rýchlosti prúdenia

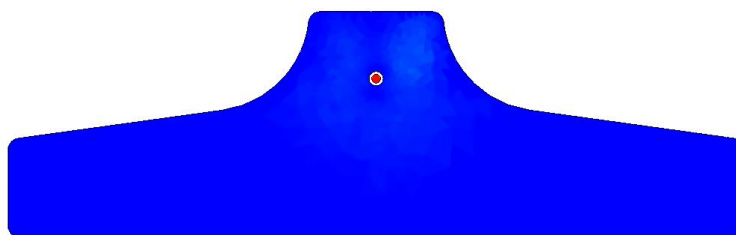
Rovina bola umiestnená 1 cm pod hladinou. Farebná škála bola nastavená v rozsahu 0.0 – 0.02 m/s. Výsledku sú zobrazované v 20 sekunde. Na základe pozorovaní je možné pozorovať zmenu rýchlostného poľa pre experimentálne konfigurácie.

Vektory: pri použití Turbostopu (7) je vidieť zvýšenú rýchlosť prúdenia taveniny na hladine v okolí ochrannej trubice - výrazné piestové prúdenie, zvýšené riziko tvorby červeného oka. Tento efekt je výrazný aj v prípade vychýlenia či vyosenia trubice vo všetkých prípadoch s Turbostopom (7-13). Pri použití Spheric K4 (6) je rýchlostné pole prúdenia taveniny na hladine rovnomernejšie.

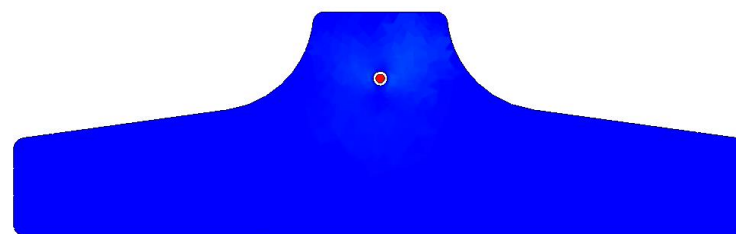
Velocity
Contour 4



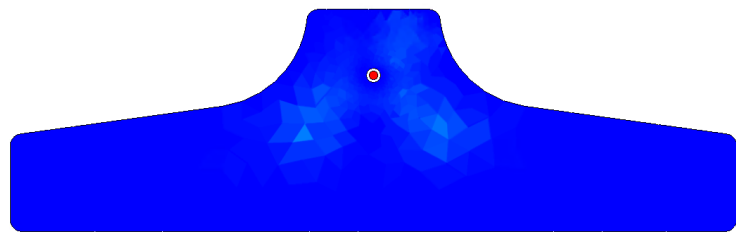
[m s⁻¹]



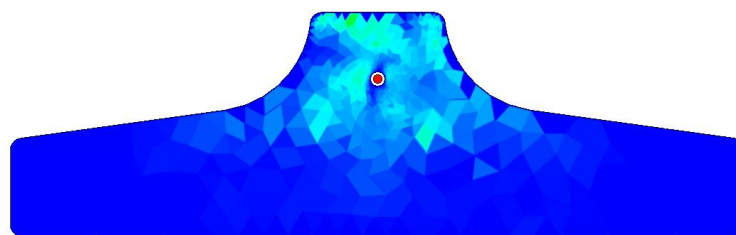
1



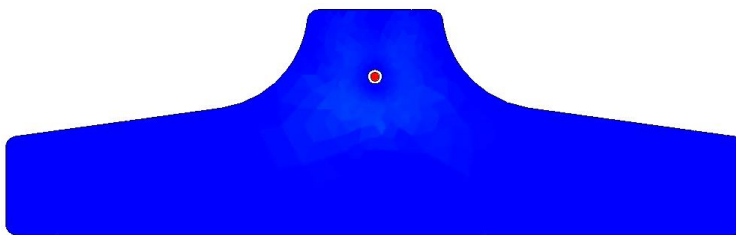
2



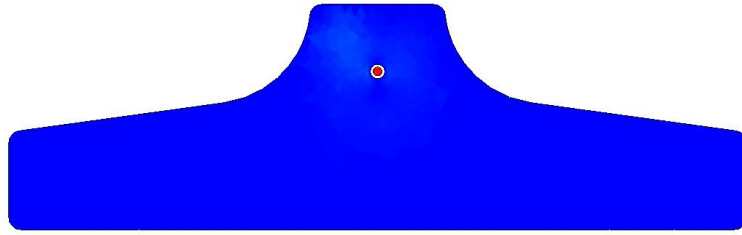
3



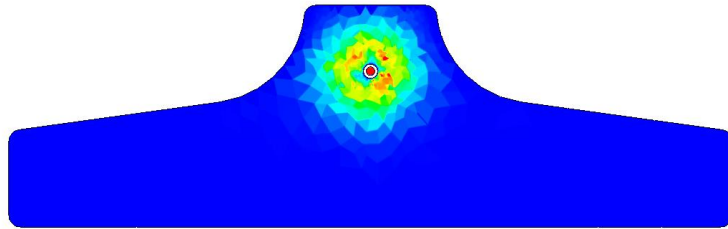
4



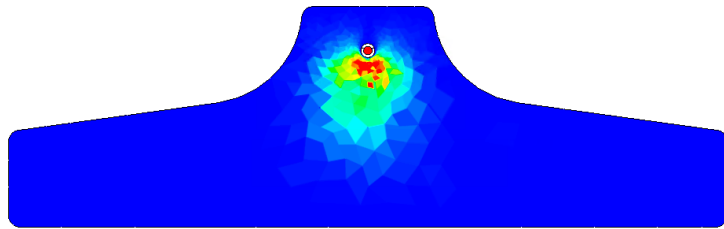
5



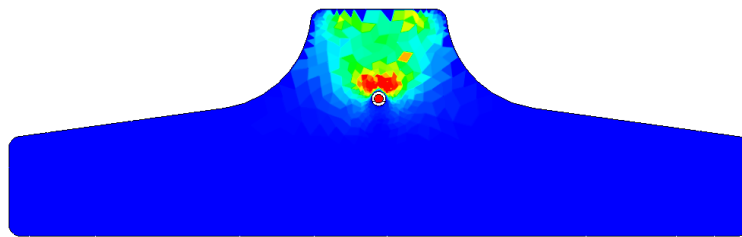
6



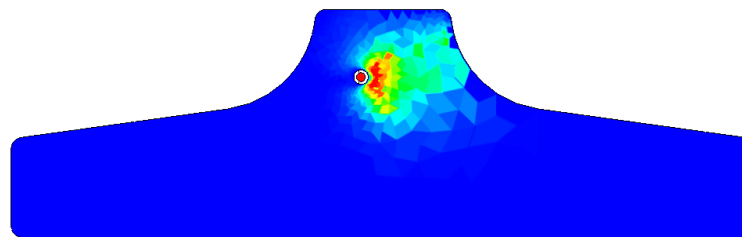
7



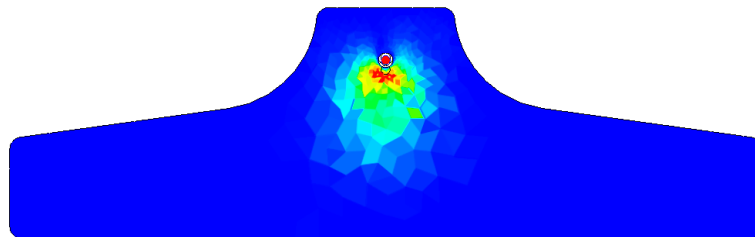
8



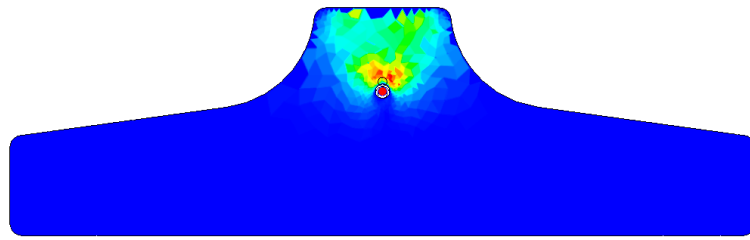
9



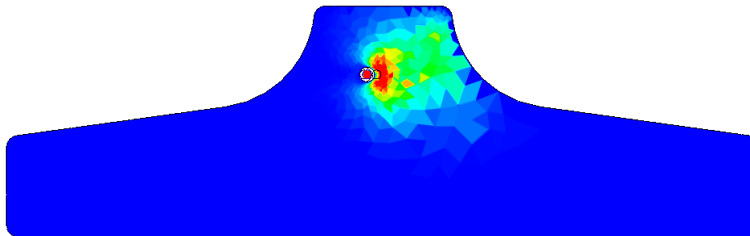
10



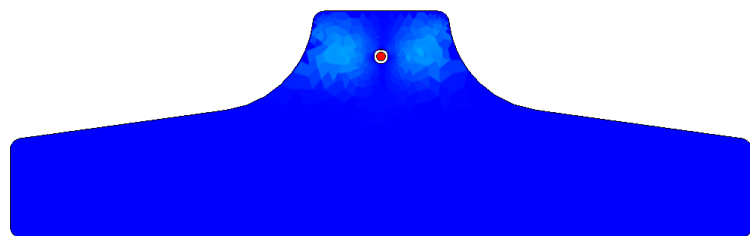
11



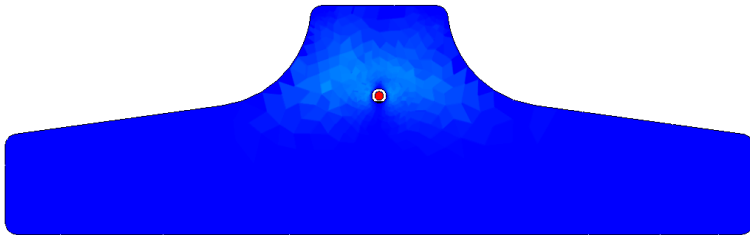
12



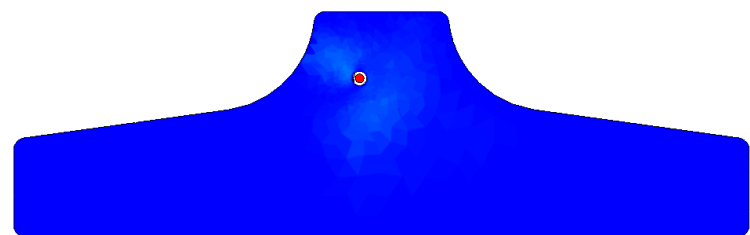
13



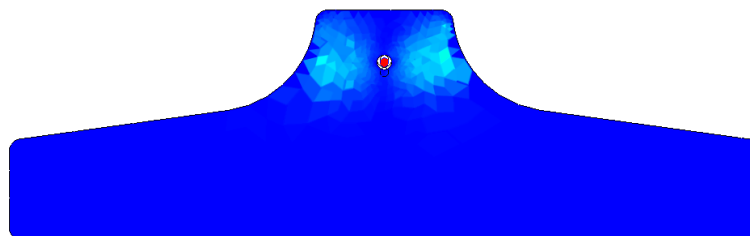
14



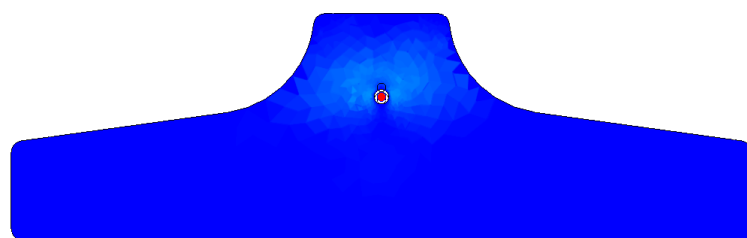
15



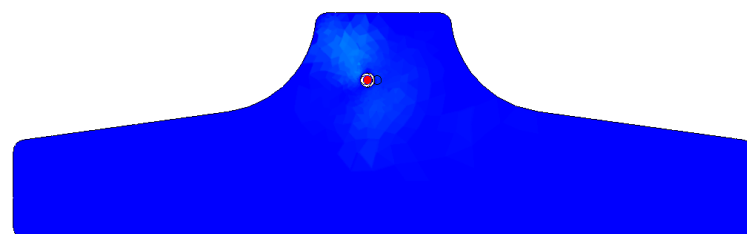
16



17



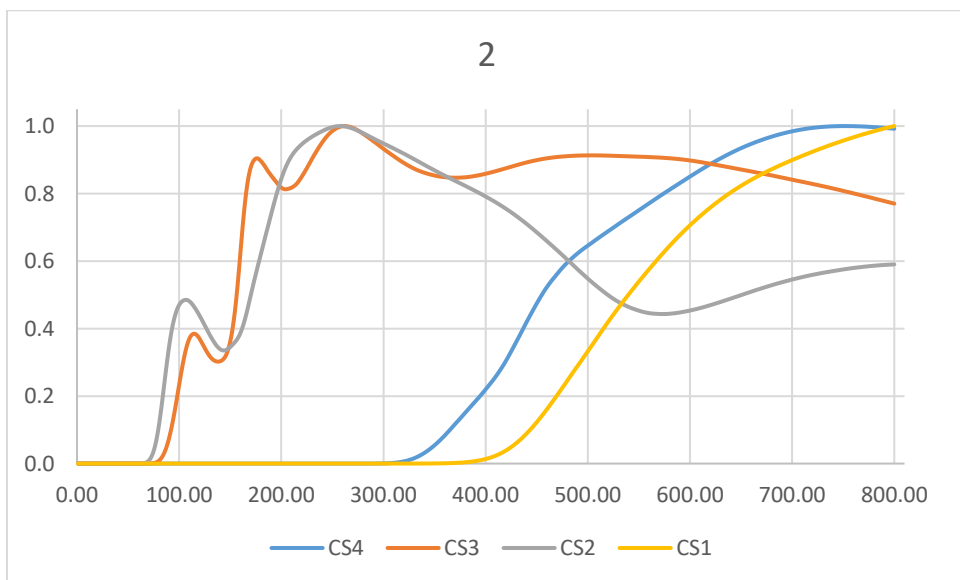
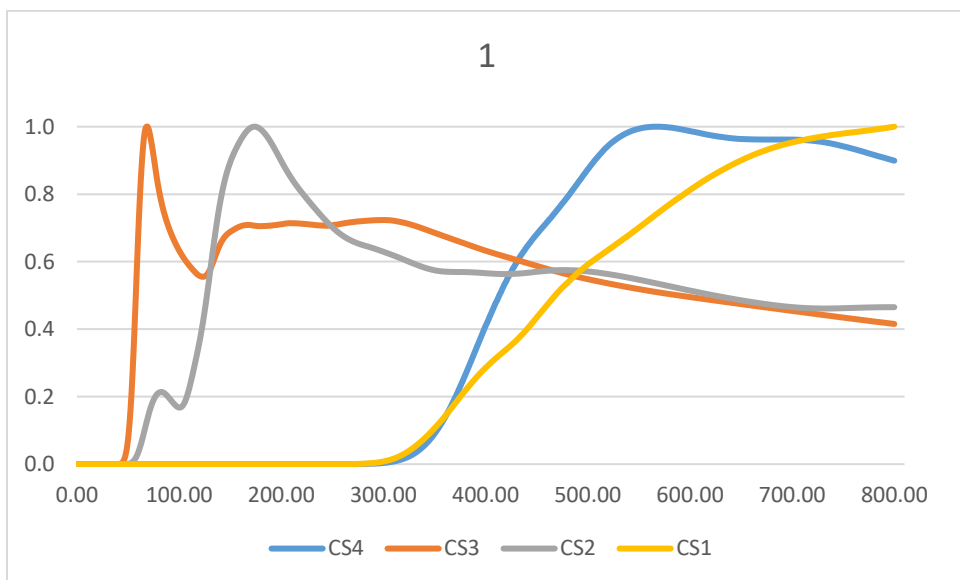
18

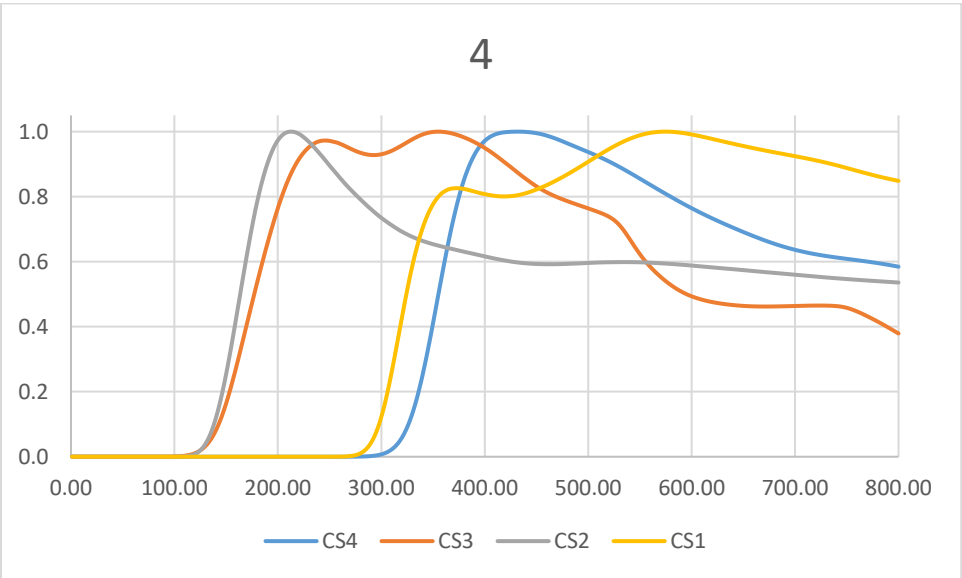
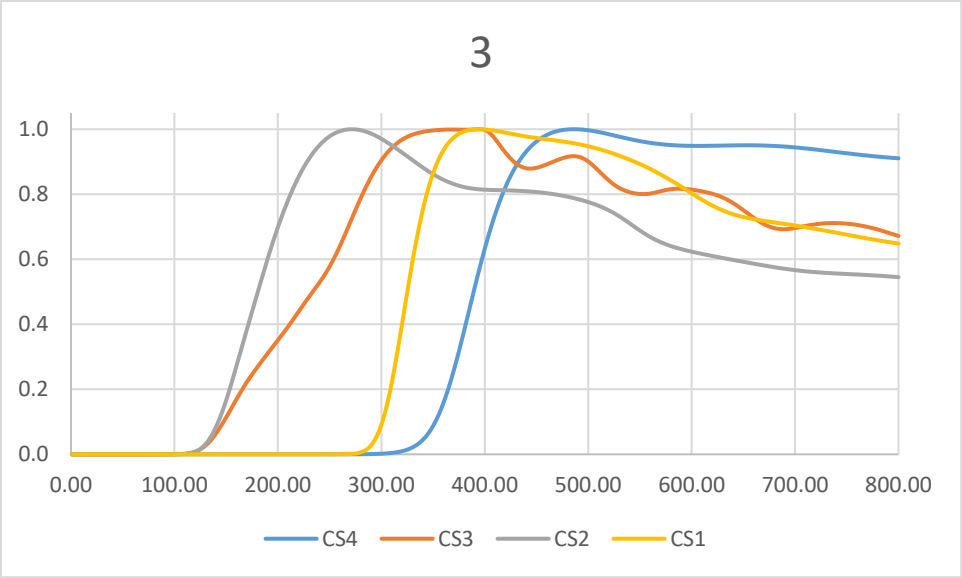


19

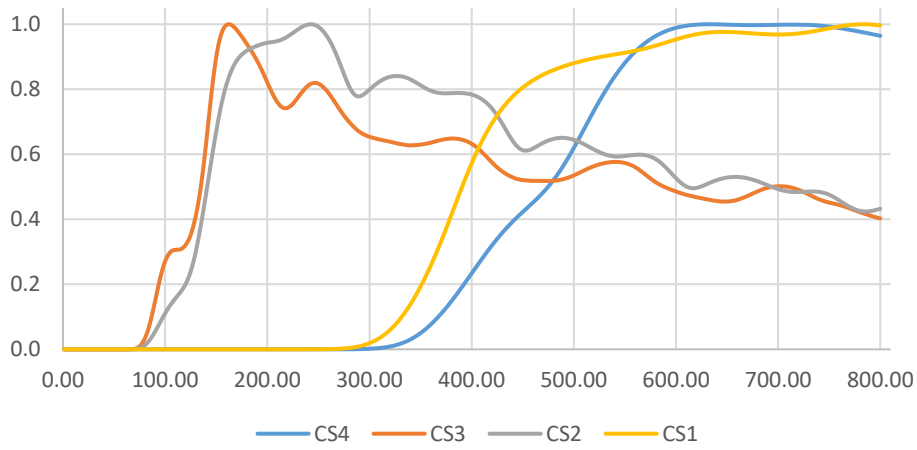
C-krivky

Pri použití Turbostopu (6) sa dosahujú dlhšie retenčné časy na všetkých liacich prúdoch – strands. Pri porovnaní s doskou Spheric K4 však dochádza ku výraznému zvlneniu koncentračného priebehu, čo je dané kombináciou tvaru medzipanvy a dopadovej dosky. Vplyv vychýlenia trubice je výrazný pre všetky kombinácie dopadových dosiek a vyosenia trubice. Na predložených grafoch je na osi x čas v sekundách a osi y bezrozmerná koncentrácia.

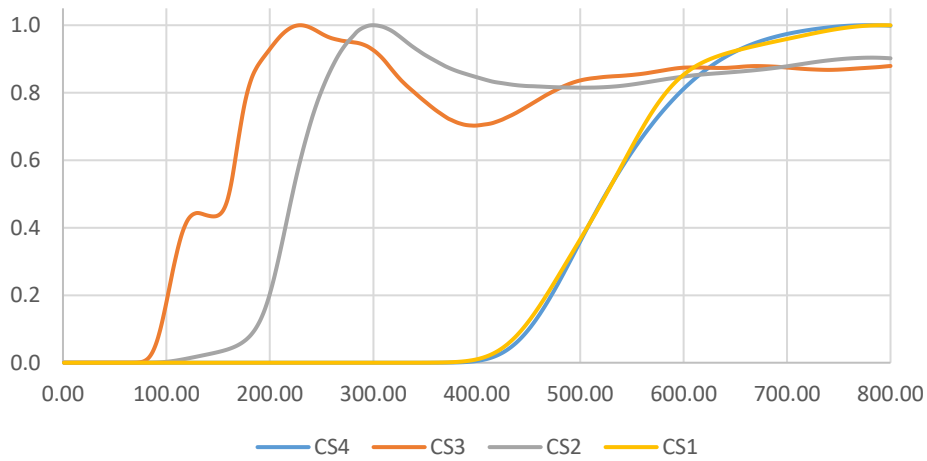




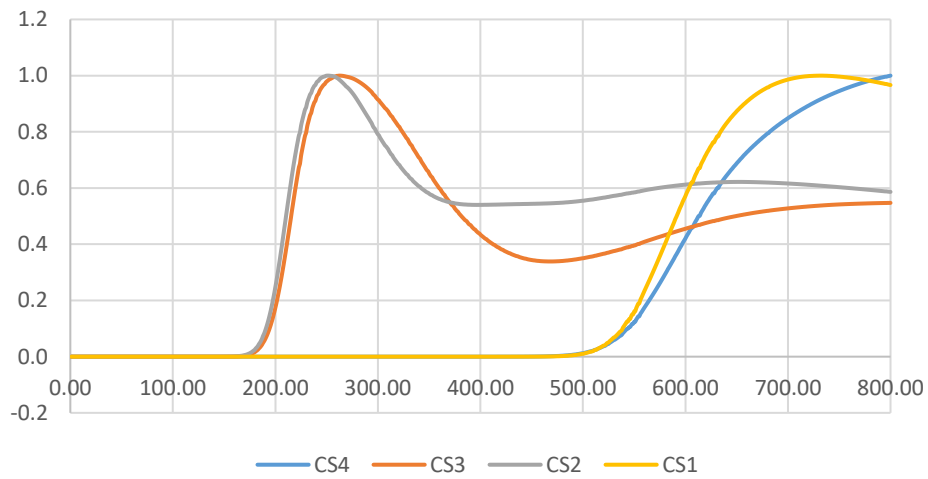
5



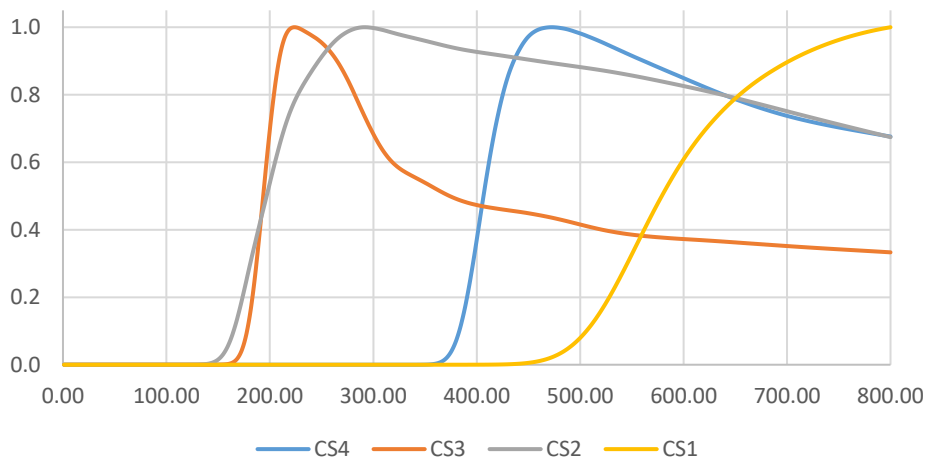
6



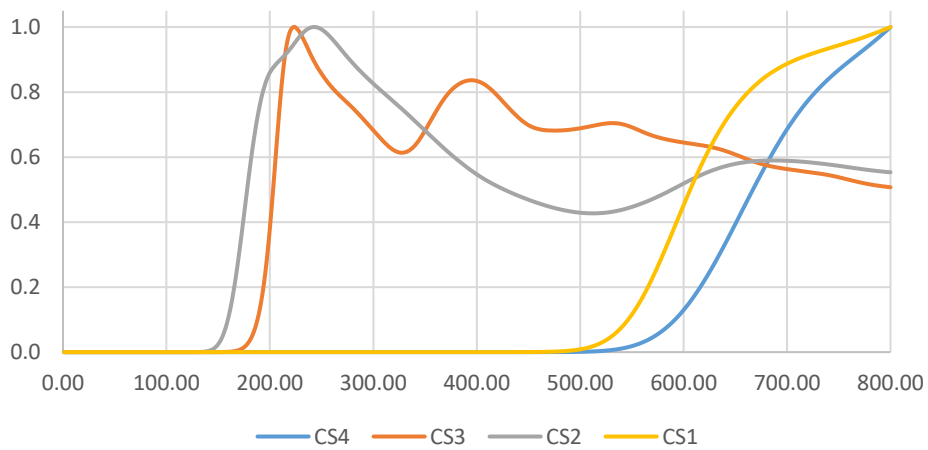
7

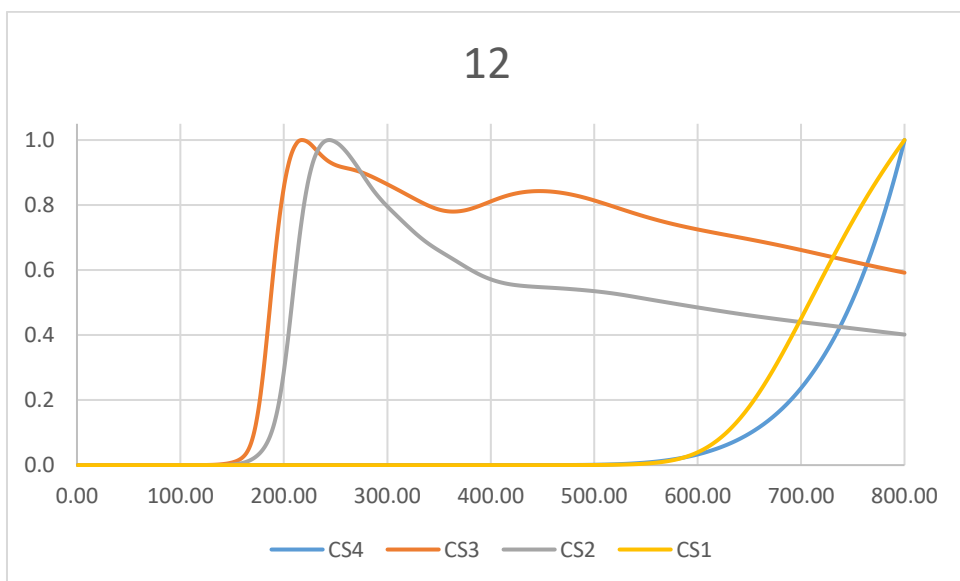
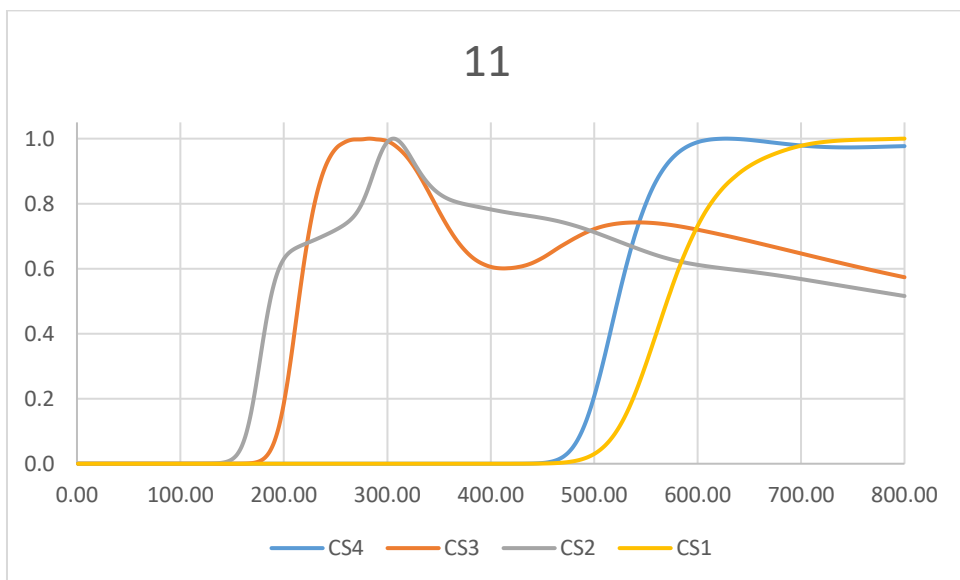
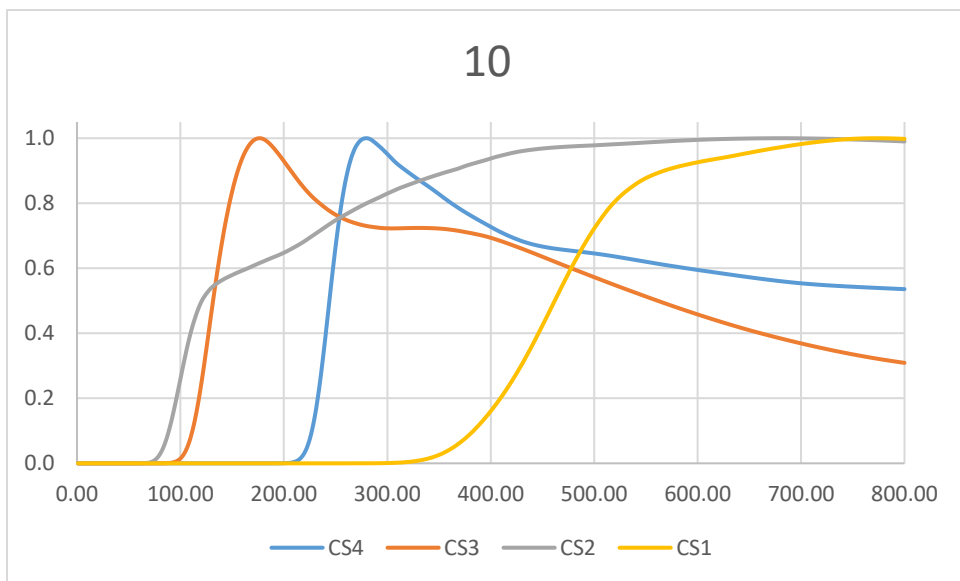


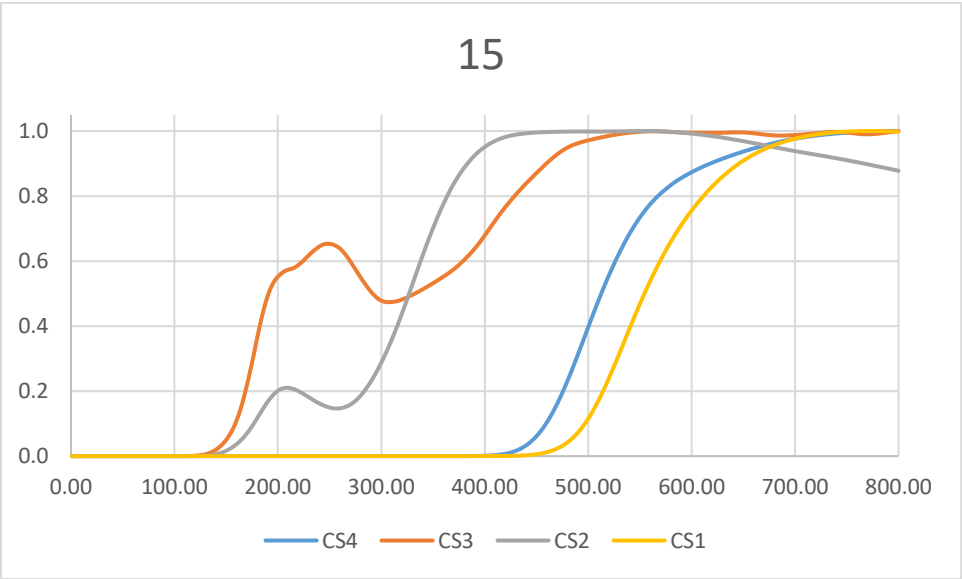
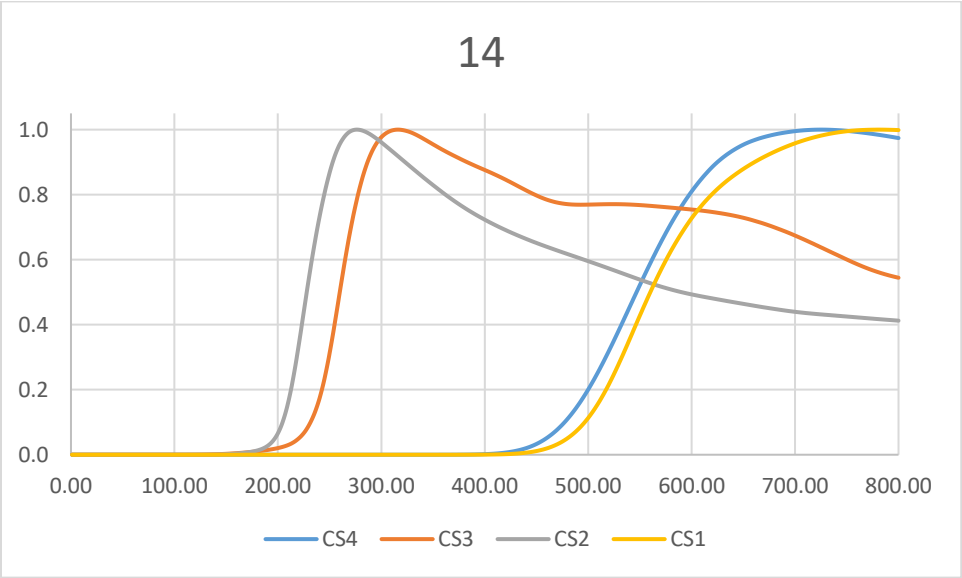
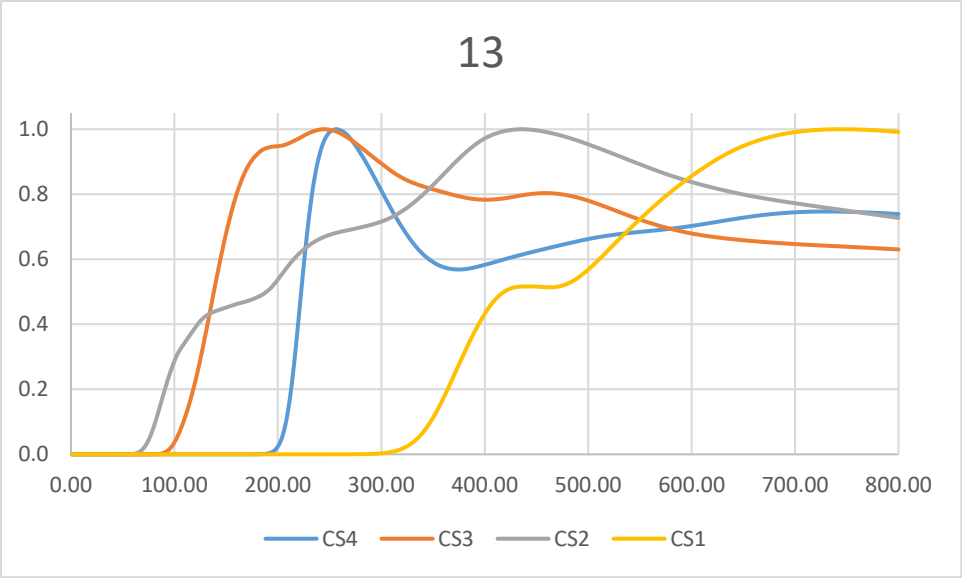
8

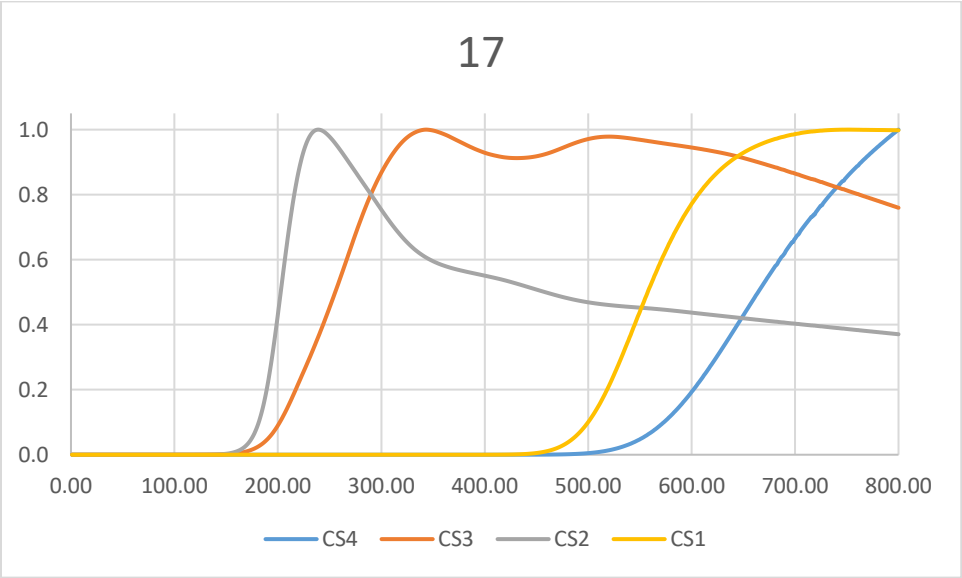
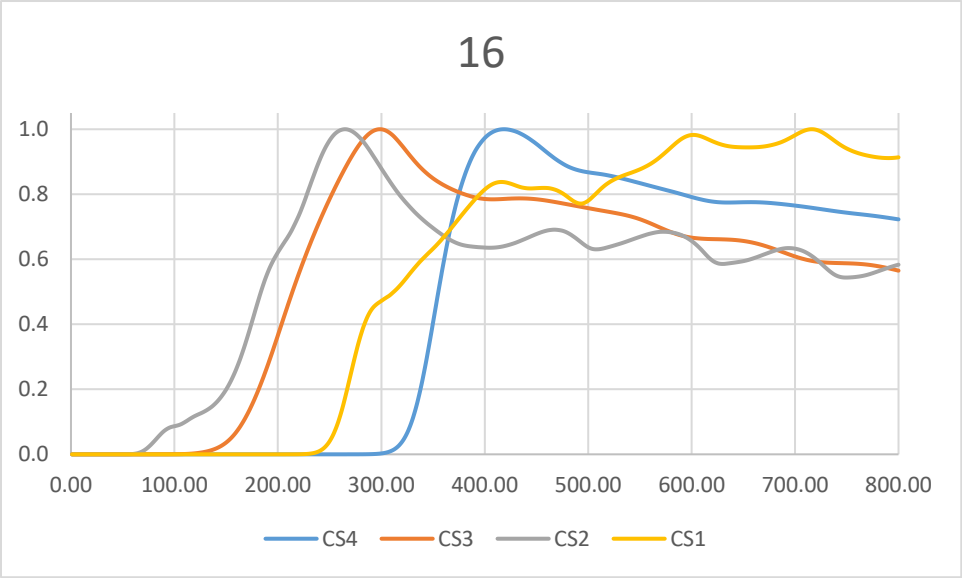


9

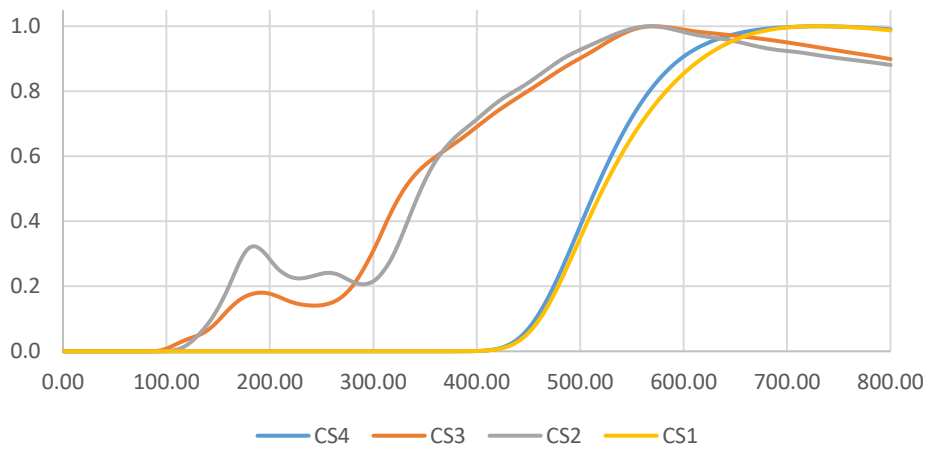




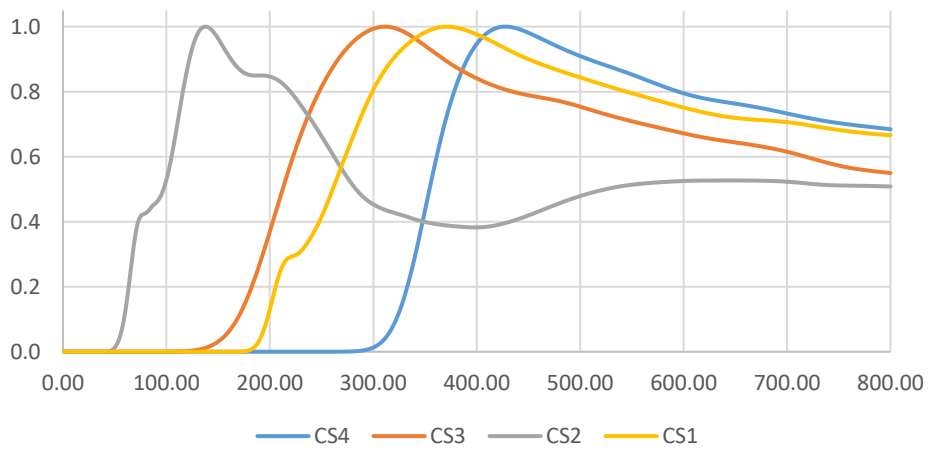




18



19



Resulting min. and max. residence times								
	Tmin [s]				Tmax [s]			
	CS1	CS2	CS3	CS4	CS1	CS2	CS3	CS4
1	209	35	31	187	800	174	69	568
2	262	49	56	249	800	258	262	752
3	222	76	71	221	394	271	395	486
4	213	67	63	212	575	213	355	432
5	190	53	53	208	783	243	162	632
6	274	62	56	312	793	299	230	779
7	374	120	126	359	731	252	262	800
8	332	93	111	320	800	292	224	472
9	357	96	115	389	800	243	223	800
10	226	48	68	174	772	683	176	280
11	362	94	124	373	800	306	283	627
12	382	92	84	368	800	244	217	800
13	207	42	64	153	742	436	245	256
14	301	91	87	296	781	276	316	725
15	330	92	72	306	773	553	800	800
16	183	41	65	233	716	265	299	419
17	339	98	88	347	752	239	343	800
18	316	74	65	314	731	568	571	731
19	146	31	72	226	371	138	311	428

Záver

Na základe štúdie boli analyzované rôzne konfigurácie medzipanvy pri použití odlišných dopadových dosiek a vychýlenia ochrannej trubice. Závbery možno zhrnúť takto:

1. Prúdenie a retenčné časy:

- Dopadová doska **Turbostop** dosahuje dlhšie retenčné časy, čo naznačuje lepšiu homogenizáciu a rafináciu tekutého kovu.
- **Spheric K4** doska má homogénnejšie rýchlostné pole na povrchu, čo môže zlepšiť rafinačné procesy na rozhraní kov-troska.

2. Vplyv vychýlenia ochrannej trubice:

- Konfigurácie s Turbostopom vykazujú intenzívne piestové prúdenie, čo môže zvýšiť riziko tvorby „červeného oka“.
- Spheric K4 je menej citlivá na vychýlenie trubice, pričom prúdenie zostáva konzistentnejšie a menej náchylné na vznik mŕtvych zón.

3. Zistené riziká:

- Pri oboch typoch dopadových dosiek dochádza pri nesprávnom nastavení trubice k zvýšenému opotrebeniu pracovnej výmurovky.
- U Turbostopu sa očakáva tvorba výraznejších šikmých prúdov, ktoré spôsobujú nerovnomerné opotrebenie.

4. Odporúčania:

- Použitie **Spheric K4** je vhodné pri požiadavkách na rovnomerné prúdenie a zníženie rizika intenzívneho piestového prúdenia.
- Dopadová doska **Turbostop** je vhodná pre aplikácie vyžadujúce dlhšie retenčné časy, avšak s dôrazom na presné nastavenie trubice.

Štúdia zdôrazňuje význam správneho výberu a konfigurácie dopadových dosiek v závislosti od požiadaviek na dynamiku prúdenia a rafináciu v medzipanve.