

TECHNICKÁ UNIVERZITA V KOŠICIACH
Fakulta materiálov, metalurgie a recyklácie

**Numerické simulácie procesov prúdenia ocele v zariadení
plynulého odlievania ocele**

2025 Košice

Peter Demeter, Branislav Bul'ko, Róbert Dzurňák

Obsah

Zoznam obrázkov	4
Zoznam tabuliek	9
Zoznam symbolov a skratiek	10
Zoznam veličín a jednotiek	11
Úvod	13
1. Stručný popis častí ZPO	14
1.1. Zariadenie plynulého odlievania	14
2. Matematické modelovanie procesov prúdenia ocele v ZPO	20
2.1. Aplikácia nástrojov numerických simulácií na fyzikálny vodný model medzipanvy U. S. Steel Košice – prípadová štúdia č. 1 Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.	33
2.1.1. Zadanie okrajových podmienok pre samotný výpočet.	36
2.1.2. Post-processing (analytická fáza)	37
2.1.3. Čiastkový záver k aplikácii nástrojov numerických simulácií na fyzikálny vodný model medzipanvy U. S. Steel Košice – prípadová štúdia č. 1	46
2.2. Návrh fyzikálneho modelu kryštalizátora – prípadová štúdia č.2	47
2.2.1. Čiastkový záver pre prípadovú štúdiu č.3	52
2.3. Matematický model medzipanvy ŽP, a.s.	54
2.3.1. Nastavenie riešiteľa Fluent	55
2.3.2. Medzipanva so štandardnou dopadovou doskou	57
2.3.3. Zvolené okrajové a počiatočné podmienky	58
2.4. Optimalizácia vnútorného dizajnu MP	59
2.4.1. Štandardná (aktuálne používaná) konfigurácia MP	59
2.4.2. Odklon otvorov o 8°	63
2.4.3. Odklon otvorov o 12°	65
2.4.4. Odklon otvorov o 16°	67
2.5. Porovnanie výsledkov matematických simulácií pre MP so štandardnými a vychýlenými otvormi v prepážke	70

2.5.1.	Porovnanie C-kriviek.....	70
2.5.2.	Porovnanie kontúr prúdenia v čase $t = 600s$	72
2.5.3.	Porovnanie detailu otvoru - prúdnice.....	73
2.5.4.	Sledovanie rýchlosti prúdenia na zvolenej úsečke.....	74
2.6.	Matematické simulácie návrhu dvojstupňovej hubice	75
2.6.1.	Výsledky simulácií prúdenia z Discovery Live pre dvojstupňovú hubicu.....	77
2.6.2.	Výsledok matematických simulácií pre dvojstupňovú hubicu	78
2.7.	Matematické simulácie sférickej dopadovej dosky aplikovanej v odlišných typoch medzipaniev	86
2.7.1.	Porovnanie konfigurácií sférickej dopadovej dosky v štvorvýtokovej medzipanve typu delta	86
2.7.2.	Porovnávanie charakteru prúdenia v jednootvorovej medzipanve obdĺžnikového tvaru pri použití sférickej a štandardnej dopadovej dosky	105
2.8.	Záver k výsledkom matematických simulácií.....	126
3.	Záver	128
	Zoznam použitej literatúry	131

Zoznam obrázkov

Obr. 1 Zariadenie plynulého odlievania bramového typu Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.	15
Obr. 2 Liaci stojan s liacou panvou Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.	16
Obr. 3 Základné časti medzipanvy Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.	16
Obr. 4 Ponorná výlevka Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.	17
Obr. 5 Kryštalizátor Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.	18
Obr. 6 Sekundárne chladenie Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov. Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.	18
Obr. 7 Ukážka miešania ocele zospodu Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.	21
Obr. 8 Teplotné polia pri novej (vpravo) a starej (vľavo) liacej panve Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.	21
Obr. 9 Dráhy inklúzií rôznych modifikátorov prúdenia (a) prepážky s otvormi, (b) s použitím tvarovej dopadovej dosky a prepážkami s otvormi, (c) bez modifikátorov prúdenia Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.	22
Obr. 10 Vektory rýchlosti a rozloženie turbulentnej kinetickej energie hladiny roztavenej ocele pri ustálenom (a) a neustálenom režime (b) liatia (doba plnenia 60 s) Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.	23
Obr. 11 Vektory prúdenia v 1-prúdovej medzipanve a vplyv hĺbky ponoru ochrannej trubice na strhávanie trosky Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.	23
Obr. 12 Vektory rýchlosti v medzipanve po čase 720 s: a) variant II, b) variant III Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.	24
Obr. 13 Ukážka porovnania numerického modelu rôznych dizajnov ponorných výleviek (a) príklad A, (b) príklad B s fyzikálnym modelom (c) Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.	24
Obr. 14 Ukážka osi prúdenia pri 2D a 3D priestore Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.	25
Obr. 15 Výpočtová oblasť: a) geometria, b) výpočtová sieť Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.	25
Obr. 16 Ukážka vystrojenia medzipanvy pre rýchlosť odlievania $0,8 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ pre konfiguráciu 1 na fyzikálnom modeli pri 10 sekunde.....	33
Obr. 17 Ukážka vystrojenia medzipanvy pre rýchlosť odlievania $0,8 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ pre konfiguráciu 2 na fyzikálnom modeli pri 10 sekunde.....	33
Obr. 18 Importovaná geometria z CAD programu do CFD programu Ansys Fluent (konfigurácia 1)	34
Obr. 19 Importovaná geometria z CAD programu do CFD programu Ansys Fluent (konfigurácia 2)	34
Obr. 20 Príklad vygenerovanej výpočtovej siete pre konfiguráciu 1.....	35
Obr. 21 Označenie vstupu a výstupu pre daný model	36
Obr. 22 Rýchlostné pole pre konfiguráciu 1 Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.	37
Obr. 23 Rýchlostné pole pre konfiguráciu 2 Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.	38
Obr. 24 Ukážka charakteru prúdenia v medzipanve pre konfiguráciu 1, pre rýchlosť odlievania $0,8 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a $1,2 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.	38

Obr. 25 Zvolená rovina medzipanvou pre konfiguráciu 1	39
Obr. 26 Vstrekovanie stopovacej látky pre konfiguráciu 1, pre sledované rýchlosti odlievania 0,8 m.min ⁻¹ (vľavo) a 1,2 m.min ⁻¹ (vpravo) Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.	39
Obr. 27 Vstrekovanie stopovacej látky pre konfiguráciu 1, pre sledované rýchlosti odlievania 0,8 m.min ⁻¹ (vľavo) a 1,2 m.min ⁻¹ (vpravo) – fyzikálny model Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.	40
Obr. 28 Vstrekovanie stopovacej látky pre konfiguráciu 2, pre sledované rýchlosti odlievania 0,8 m.min ⁻¹ (vľavo) a 1,2 m.min ⁻¹ (vpravo) Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.	40
Obr. 29 Vstrekovanie stopovacej látky pre konfiguráciu 2, pre sledované rýchlosti odlievania 0,8 m.min ⁻¹ (vľavo) a 1,2 m.min ⁻¹ (vpravo) – fyzikálny model Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.	41
Obr. 30 C-krivka pre konfiguráciu 1 pri rýchlosti odlievania 0,8 m.min ⁻¹ – numerický model Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.	42
Obr. 31 C-krivka pre konfiguráciu 1 pri rýchlosti odlievania 0,8 m.min ⁻¹ – fyzikálny model Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.	42
Obr. 32 C-krivka pre konfiguráciu 1 pri rýchlosti odlievania 1,2 m.min ⁻¹ – numerický model Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.	43
Obr. 33 C-krivka pre konfiguráciu 1 pri rýchlosti odlievania 1,2 m.min ⁻¹ – fyzikálny model Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.	43
Obr. 34 C-krivka pre konfiguráciu 2 pri rýchlosti odlievania 0,8 m.min ⁻¹ - numerický model Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.	44
Obr. 35 C-krivka pre konfiguráciu 2 pri rýchlosti odlievania 0,8 m.min ⁻¹ - fyzikálny model Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.	44
Obr. 36 C-krivka pre konfiguráciu 2 pri rýchlosti odlievania 1,2 m.min ⁻¹ - numerický model Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.	45
Obr. 37 C-krivka pre konfiguráciu 2 pri rýchlosti odlievania 1,2 m.min ⁻¹ - fyzikálny model Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.	45
Obr. 38 Priamy a zakrivený profil kryštalizátora.....	47
Obr. 39 Profil kryštalizátora na základe reálneho zariadenia.....	48
Obr. 40 Profil kryštalizátora na základe navrhovaného modelu kryštalizátora	48
Obr. 41 Geometria modelu kryštalizátora	50
Obr. 42 Ukážka vygenerovanej výpočtovej siete pre model kryštalizátora	51
Obr. 43 Ukážka sledovanej oblasti navrhovaného modelu kryštalizátora s posuvnými stenami	52
Obr. 44 Vodný model kryštalizátora.....	53
Obr. 45 3D vizualizácia modelu	54
Obr. 46 3D vizualizácia modelu – pohľad z hora	55
Obr. 47 Vstrekovanie stopovacej látky.....	55
Obr. 48 Geometria medzipanvy so štandardnou dopadovou doskou	57
Obr. 49 Štandardná konfigurácia MP	59
Obr. 50 C-krivky – štandardná konfigurácia	59

Obr. 51 Vektory prúdenia – pohľad zhora, štandardná konfigurácia.....	60
Obr. 52 Vektory prúdenia –pohľad spredu, štandardná konfigurácia	60
Obr. 53 Vektory prúdenia – pohľad zboku, štandardná konfigurácia	60
Obr. 54 Vektor prúdenia – detailný pohľad zhora, štandardná konfigurácia	61
Obr. 55 Kontúry prúdenia– pohľad zhora, štandardná konfigurácia	61
Obr. 56 Kontúry prúdenia–pohľad spredu, štandardná konfigurácia	62
Obr. 57 Kontúry prúdenia– pohľad zboku, štandardná konfigurácia.....	62
Obr. 58 C-krivky pre štandardnú konfiguráciu (fyzikálna simulácia).....	63
Obr. 59 Geometria medzipanvy so štandardnou dopadovou doskou s odklonom otvorov o 8°	63
Obr. 60 C-krivky pri 8° odklone otvorov	64
Obr. 61 Vektor prúdenia pri 8° odklone otvorov.....	64
Obr. 62 Kontúry prúdenia pri 8° odklone otvorov.....	65
Obr. 63 Geometria medzipanvy so štandardnou dopadovou doskou s odklonom otvorov o 12°	65
Obr. 64 C-krivky pri 12° odklone otvorov	66
Obr. 65 Vektor prúdenia pri 12° odklone otvorov.....	66
Obr. 66 Kontúry prúdenia pri 12° odklone otvorov.....	67
Obr. 67 Geometria medzipanvy so štandardnou dopadovou doskou s odklonom otvorov o 18°	67
Obr. 68 C-krivky pri 16° odklone otvorov	68
Obr. 69 Vektor prúdenia pri 16° odklone otvorov.....	68
Obr. 70 Kontúry prúdenia pri 16° odklone otvorov.....	69
Obr. 71 Štandardná konfigurácia – Graf.....	70
Obr. 72 Odklon otvorov 8° - Graf.....	70
Obr. 73 Odklon otvorov 12° - Graf.....	71
Obr. 74 Odklon otvorov 16°	71
Obr. 75 Štandardná konfigurácia – Kontúry.....	72
Obr. 76 Odklon otvorov 8° - Kontúry.....	72
Obr. 77 Odklon otvorov 12° - Kontúry.....	72
Obr. 78 Odklon otvorov 16° - Kontúry.....	73
Obr. 79 Štandardná konfigurácia - Vektory	73
Obr. 80 Odklon otvorov 8° - Vektory	73
Obr. 81 Odklon otvorov 12°	74
Obr. 82 Odklon otvorov 16°	74
Obr. 83 Geometria medzipanvy so štandardnou dopadovou doskou s vyznačenou úsečkou na ktorej bola sledovaná rýchlosť prúdenia	75
Obr. 84 Rýchlostný profil pozdĺž úsečky	75
Obr. 85 Návrh dvojstupňovej hubice.....	76
Obr. 86 Ostrá hrana	76
Obr. 87 Zaoblená hrana	77

Obr. 88 Ostrá hrana – Discovery LIVE.....	77
Obr. 89 Zaoblená hrana – Discovery LIVE.....	77
Obr. 90 C-krivky – štandardná konfigurácia	78
Obr. 91 C-krivka pre dvojstupňovú hubicu – ostrá hrana	78
Obr. 92 C-krivka pre dvojstupňovú hubicu – zaoblená hrana	79
Obr. 93 Vektory prúdenia – pohľad spredu, štandardná konfigurácia	79
Obr. 94 Vektory prúdenia – pohľad spredu, ostrá hrana	79
Obr. 95 Vektory prúdenia – pohľad spredu, zaoblená hrana.....	80
Obr. 96 Vektory prúdenia – pohľad zboku, štandardná konfigurácia	80
Obr. 97 Vektory prúdenia – pohľad zboku, ostrá hrana.....	80
Obr. 98 Vektory prúdenia – pohľad zboku, oblá hrana	81
Obr. 99 Vektory prúdenia – pohľad zhora, štandardná konfigurácia.....	81
Obr. 100 Vektory prúdenia – pohľad zhora, ostrá hrana	81
Obr. 101 Vektory prúdenia – ostrá hrana.....	82
Obr. 102 Kontúry prúdenia – pohľad spredu, štandardná konfigurácia	82
Obr. 103 Kontúry prúdenia – pohľad spredu, ostrá hrana	83
Obr. 104 Kontúry prúdenia – pohľad spredu, zaoblená hrana.....	83
Obr. 105 Kontúry prúdenia– pohľad zboku, štandardná konfigurácia.....	83
Obr. 106 Kontúry prúdenia– pohľad zboku, ostrá hrana	84
Obr. 107 Kontúry prúdenia– pohľad zboku, zaoblená hrana	84
Obr. 108 Kontúry prúdenia– pohľad zhora, štandardná konfigurácia	84
Obr. 109 Kontúry prúdenia – pohľad zhora, ostrá hrana	85
Obr. 110 Kontúry prúdenia – pohľad zhora, zaoblená hrana.....	85
Obr. 111 Geometria medzipanvy použitej pri CFD simuláciách	87
Obr. 112 Geometria používanej štandardnej dopadovej dosky použitej pri simuláciách.....	87
Obr. 113 Sféricá dopadová doska v4 rovnaká výška bočných stien 45mm	88
Obr. 114 Sféricé dopadové dosky: naľavo sklon K4 , napravo V4 (rovné boky, výška 40mm)	88
Obr. 115 Sféricé dopadové dosky: naľavo Sféric V4 (rovné boky 42,5mm), napravo Spheric v4 (rovné boky 45mm)	88
Obr. 116 Sféricá dopadová doska v4 + bočné výrezy do tvaru U	89
Obr. 117 Konfigurácia zostavy medzipanvy s štandardným typom dopadovej dosky	89
Obr. 118 Konfigurácia zostavy medzipanvy s dopadovou doskou Sféricá dopadová doska K4	89
Obr. 119 Konfigurácia SP-K4_v2 (vyvýšenie SP-K4 o 150 mm).....	90
Obr. 120 Konfigurácia SP-K4_v3 (zaoblenie bočných stien na bokoch vyvýšenej doske)	90
Obr. 121 Konfigurácia SP_v4 (Spheric s vyššími bočnými hranami – 40mm od spodku sphericu)	90
Obr. 122 Konfigurácia SP_v4-425 (Spheric s vyššími bočnými hranami – 42,5mm od spodku sphericu).....	90
Obr. 123 Konfigurácia SP_v4-425 (Spheric s vyššími bočnými hranami – 45mm od spodku sphericu).....	91
Obr. 124 Konfigurácia SP-K4_v2 (vyvýšenie SP-K4 o 150 mm + otočný SP-K4 o 180°)	91

Obr. 125 Konfigurácia SP_v4 (Spheric s vyššími bočnými hranami – 40mm od spodku sphericu + na bočných hranách vytvorené zrezanie v priemere 3800 mm).....	91
Obr. 126 Výpočtová sieť medzipánvy pre realizované simulácie	92
Obr. 127 Iedované body na výstupoch z medzipánvy (zobrazenie otvorov z ľava Series 1 - CS1, Series 2 – CS2, Series 3 – CS3, Series 4 – CS4).....	93
Obr. 128 Sledované roviny (rovina 1 cez výtokové otvory - zelená farba, rovina 2 kolmo v strede na rovinu cez výtokové otvory – čierna farba, rovina 3 v oblasti troskovej čiary – červená farba),	94
Obr. 129 Sledovaná rovina 4 viedla cez stred vtokového otvoru.....	94
Obr. 130 Distribúcia stopovacej látky v 20 sekunde (rovina 2)	95
Obr. 131 Distribúcia stopovacej látky v 20 sekunde (rovina 4)	95
Obr. 132 Smer prietoku tekutiny v medzipánve na rovine 2.....	96
Obr. 133 Vektor prúdenia pre sledované konfigurácie M, SP-K4 na rovine 4.....	98
Obr. 134 C – krivka pre konfiguráciu M	98
Obr. 135 C – krivka pre konfiguráciu SP-K4	99
Obr. 136 C – krivka pre konfiguráciu SP-K4-v2	99
Obr. 137 C – krivka pre konfiguráciu SP-K4-v3	100
Obr. 138 – C krivka pre konfiguráciu SP-v4	100
Obr. 139 C – krivka pre konfiguráciu SP-v4_425	101
Obr. 140 C – krivka pre konfiguráciu SP-v4_45	101
Obr. 141 C – krivka pre konfiguráciu SP_K4_otočené	102
Obr. 142 C – krivka pre konfiguráciu sp_v4_vyrez	102

Zoznam tabuliek

Tab. 1 Konštanty modelu Realizable K- ϵ	29
Tab. 2 Konštanty modelu SST K- ω	30
Tab. 3 Kvalitatívne hodnoty pre kritérium skosenia	35
Tab. 4 Kvalitatívne hodnoty pre kritérium ortogonálnej kvality	35
Tab. 5 Hodnoty retenčných časov z numerickej simulácie Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.	46
Tab. 6 Hodnoty retenčných časov z fyzikálneho modelovania	46
Tab. 7 Výber sledovaných konfigurácií pre prípadovú štúdiu č.3	49
Tab. 8 Zhrnutie výsledkov matematických simulácií	85
Tab. 9 Hodnoty okrajových a počiatočných podmienok pre CFD simulácie	93
Tab. 10 porovnanie retenčných časov	102

Zoznam symbolov a skratiek

ZPO – zariadenie pre plynulé odlievanie ocele

IF – intersticial free (ocel' bez interstícií)

DN- dynamo ocel'

LSP- Laboratórium simulácie procesov prúdenia

CFD- Computational Fluid Dynamics

MP – medzipanva

OT – ochranná trubica

DD – dopadová doska

LP – liaca panva

SimConT – fyzikálny model medzipanvy ŽP, a.s. v mierke 1:2

SiMet – laboratórium numerickej simulácie metalurgických procesov

Zoznam veličín a jednotiek

M_l -dĺžková mierka

M_t -časová mierka

M_w - mierka rýchlostí

n – počet prúdov [-]

v – rýchlosť liatia [$m \cdot s^{-1}$]

a, b – rozmery kryštalizátora [m]

ρ – merná hmotnosť ocele [$kg \cdot m^{-3}$]

g – gravitačné zrýchlenie [$m \cdot s^{-2}$]

η – dynamická viskozita tekutiny [Pa.s]

u - kinematická viskozita tekutiny [$m^2 \cdot s^{-1}$]

ρ_L – merná hmotnosť kvapaliny [$kg \cdot m^{-3}$]

ρ_G – merná hmotnosť plynu (bubliny) [$kg \cdot m^{-3}$]

σ – medzifázové povrchové napätie [$N \cdot m^{-1}$]

Re- Reynoldsovo číslo [-]

Fr – Froudovo číslo [-]

Bo- Bondovo číslo [-]

Eo - Eötvösovo číslo [-]

Go - Goucherovo číslo [-]

De - Deryaginovo číslo [-]

Gr – Grashofovo číslo [-]

PV – zátkový objem (plug volume) [%]

t_{delay} – nameraný minimálny retenčný čas [s]

t_r – teoretický retenčný čas medziapanvy [s]

DZ – podiel mŕtvych zón [%]

C_{2tr} – koncentrácia stopovacej látky po čase $2t_r$ [kg/m^3]

m_{KCl} – vstupný objem KCl [kg]

V_{kp} – objem medzipanvy [m^3]

T – Teplota [K]

L -charakteristická délka [m]

β - koeficient tepelnej rozťažnosti [K^{-1}]

U - charakteristická rýchlosť prúdenia kvapaliny [$m.s^{-1}$]

τ – šmykové napätie [Pa]

τ_{ij} – tenzor Reynoldsových napätí

τ_t – turbulentné napätie [Pa]

η_t – turbulentná viskozita [$Pa.s^{-1}$]

δ_{ij} - Kroneckerovo delta [-]

k - turbulentná kinetická energia [$m^2.s^{-2}$]

ν_t - turbulentná kinematická viskozita [$Pa.s^{-1}$]

Ω_{ij} – tenzor vírivosti [s^{-1}]

F – vnútorná objemová sila [$N.m^{-3}$]

Úvod

Aj keď bola koncepcia zariadenia pre plynulé odlievanie ocele navrhnutá už v roku 1858 Henrym Bessemerom, k jej širšiemu zavedeniu do hutníckej praxe došlo až v druhej polovici 20. storočia. Odvtedy sa plynulé odlievanie stalo kľúčovou technológiou výroby ocele a v súčasnosti sa týmto spôsobom odlieva viac než 90 % celosvetovo vyrábanej ocele. Vývoj v oblasti zariadení, technológií a riadenia procesu prispel k zvyšovaniu efektivity, produktivity a kvality výroby, pričom významnú úlohu zohráva aj znižovanie environmentálnych dopadov a spotreby vstupných surovín. Jedným z najdôležitejších článkov procesu plynulého odlievania ocele je medzipanva. Okrem základnej funkcie akumulácie a rozdeľovania tekutej ocele medzi jednotlivé odlievacie prúdy plní aj dôležitú úlohu pri teplotnej a chemickej homogenizácii, flotácii nekovových inklúzií a zabezpečovaní stabilného a rovnomerného toku do kryštalizátora. Charakter prúdenia v medzipanve má preto priamy vplyv na kvalitu finálneho produktu, výskyt defektov, účinnosť sekundárnej metalurgie a opotrebenie výmurovky. Štúdium prúdenia v medzipanve je však v priemyselných podmienkach výrazne obmedzené kvôli neprístupnosti meraných oblastí, extrémnym teplotám a obmedzeným možnostiam inštalácie senzorov. Z tohto dôvodu sa v posledných rokoch čoraz častejšie uplatňuje modelovanie procesov, ktoré umožňuje analyzovať prúdenie vnútri medzipanvy bez nutnosti zásahu do prevádzky. Najmä matematické (numerické) modelovanie založené na metódach výpočtovej mechaniky tekutín (CFD – Computational Fluid Dynamics) sa stalo neoddeliteľnou súčasťou návrhu a optimalizácie medzipaniev a ich vnútorného vystrojenia. Matematické simulácie umožňujú podrobne sledovať rozloženie rýchlostného poľa, turbulentných veličín, retenčných časov a oblastí so stagnujúcim tokom. V porovnaní s fyzikálnym modelovaním, ktoré slúži najmä na overenie kvalitatívnych javov, poskytujú numerické simulácie širšie spektrum kvantitatívnych údajov a umožňujú testovanie variantných riešení ešte pred ich zavedením do praxe. V rámci výskumných úloh boli analyzované rôzne konfigurácie vystrojenia medzipanvy a skúmaný ich vplyv na dynamiku prúdenia, distribúciu ocele a vývoj retenčných časov. Osobitná pozornosť bola venovaná hodnoteniu účinnosti rôznych typov dopadových dosiek, ich geometrických modifikácií a vzájomnej interakcie s ochranou trubicou a výtokovými otvormi. Získané výsledky naznačujú, že vhodne zvolená geometria dopadovej dosky môže významne prispieť k zníženiu turbulentných zón, rovnomernejšiemu rozloženiu toku a predĺženiu retenčných časov, čo sa následne prejavuje na kvalite odlievanej ocele aj životnosti výmurovky. Na základe týchto poznatkov bol navrhnutý nový tvar dopadovej dosky, ktorý umožňuje optimalizované riadenie prúdenia bez potreby dodatočných modifikátorov. Tento návrh je zároveň predmetom priemyselnej ochrany a predstavuje potenciálny príspevok k zefektívneniu a udržateľnosti výroby ocele.

1. Stručný popis častí ZPO

Popis výroby ocele sa bude týkať takzvanej prvovýroby. To zahŕňa výrobu ocele od natavenia a pretavenia vsádzky v zariadení na to určenom až po hotový kontiodliatok (brama, sochor, blok). Prvovýrobu môžeme rozdeliť do troch častí. Prvá časť zahŕňa primárne zariadenia na natavenie a pretavenie vsádzky. Druhá časť sa zaoberá úpravou surovej ocele na finálne požiadavky podľa vyrábanej akosti ocele. Tretia časť zahŕňa odliatie takto pripravenej ocele na finálny kontiodliatok.

Proces výroby ocele sa realizuje hlavne v dvoch zariadeniach a to v kyslíkovom konvertore a v elektrickej oblúkovej peci.

Na svete sa vyrobilo za rok 2018 približne 1 815 726 tisíc ton surovej ocele, z toho 70,7 % v kyslíkových konvertoch a 28,9 % v elektrických peciach. V Európe to je 167 644 tisíc ton z toho 58,5 % v kyslíkových konvertoch a 41,5 % v elektrických peciach. V dnešnej dobe zatiaľ prevláda výroba v kyslíkových konvertoch, ktorej základnou vsádzkovou surovinou je tekuté surové železo a kovový odpad **Error! Reference source not found.** Na výrobu ocele v elektrických oblúkových peciach sa ako vsádzka používa kovový odpad z rôznych oblastí výroby a spracovania kovového odpadu.

Ďalšou časťou prvovýroby je spracovanie vyrobenej surovej ocele v spomínaných zariadeniach. Tento proces zahŕňa hlavne dezoxidáciu ocele, legovanie, tepelnú a chemickú homogenizáciu, odplynenie, oduhličenie, rafináciu ocele atď., hlavne podľa vyrábanej akosti ocele. Zjednodušene povedané, príprava ocele na odlievanie. Tento proces je veľmi dôležitý, pretože v tejto časti je možné zabezpečiť požadované vlastnosti vyrábanej ocele, čo sa týka chemického zloženia, čistoty a rôznych vlastností.

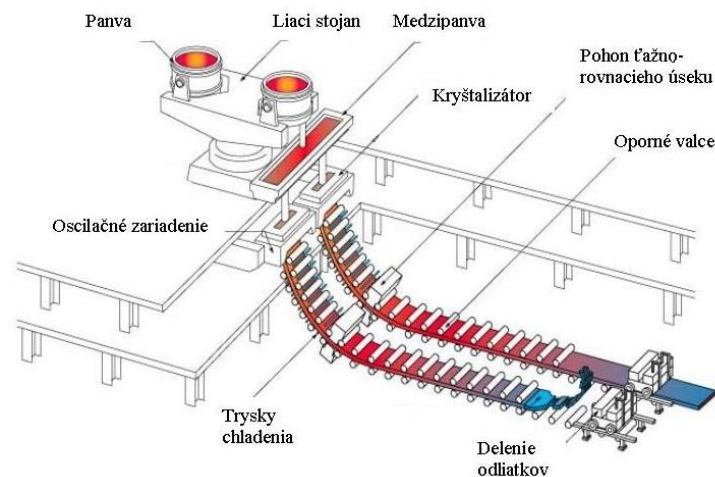
Poslednou časťou prvovýroby je odlievanie ocele. Odlievanie ocele sa môže realizovať dvoma základnými spôsobmi. Prevládajúcim spôsobom, až 97 %, je plynulé odlievanie ocele **Error! Reference source not found.**, ktoré umožňuje odlievať nepretržite a s vysokou kvalitou samotného kontiodliatku **Error! Reference source not found.** Druhým spôsobom je odlievanie do kokíl (takzvané klasické odlievanie), produktom je ingot. Odlievanie do kokíl sa využíva hlavne pri špeciálnej výrobe, malovýrobe a pri výrobe produktov veľkých rozmerov, ktoré nie je možné odlievať na zariadení plynulého odlievania.

1.1. Zariadenie plynulého odlievania

Na zariadení plynulého odlievania (ZPO) (Obr. 1) je možné odlievať tri druhy odliatkov, a to bramu, sochor a blok. ZPO obsahuje tieto základné časti:

- liaca panva,

- liaci stojan,
- ochranná trubica,
- medzipanva,
- ponorná výlevka,
- kryštalizátor,
- sekundárne a terciárne chladenia,
- páliaci stroj,
- značkovací stroj.



Obr. 1 Zariadenie plynulého odlievania bramového typu **Error! Reference source not found.**

Liaci panva

Do liacej panvy sa odpichne tekutá surová oceľ, ktorá bola vyrobená v kyslíkovom konvertore alebo v elektrickej oblúčovej peci. Následne sa presunie na zariadenie mimopecného zariadenia, kde sa oceľ podrobí rôznym úpravám podľa potreby. Nakoniec upravená oceľ sa presunie nad ZPO a uloží sa do liaceho stojana. Liaca panva má posúvačový uzáver, ktorým je možné regulovať prietok ocele.

Otočný liaci stojan

Otočný liaci stojan (Obr. 2) slúži na výmenu prázdnej a plnej liacej panvy tak, aby bolo zabezpečené plynulé odlievanie ocele. Ďalšou úlohou je zdvíhanie a spúšťanie liacej panvy nad medzipanvu.



Obr. 2 Liaci stojan s liacou panvou **Error! Reference source not found.**

Ochranná trubica

Ochranná trubica slúži na ochranu prúdu tekutej ocele pred reoxidáciou medzi liacou panvou a medzipanvou. Musí byť schopná zabezpečiť tesnenie výtokového uzla.

Medzipanva

Medzipanva (Obr. 3) patrí medzi najdôležitejšie zariadenia ZPO. Medzi základné úlohy patrí:

- regulácia hmotnostného toku ocele,
- znižuje ferostatický tlak,
- zrovnomerňuje rýchlosť,
- minimalizuje rozstrek,
- zrovnomerňuje teplotu,
- rovnomerne rozdeľuje kov,
- slúži ako zásobáreň kovu.



Obr. 3 Základné časti medzipanvy **Error! Reference source not found.**

Medzipanva je posledným uzlom v celom procese ZPO, kde je možné upraviť chemické zloženie odlievanej ocele. Pri nesprávnom fungovaní medzipanvy sa výrazne znehodnotí odlievaná oceľ, v najlepšom prípade je na oceliarni možné ju preklasifikovať. V dnešnej dobe medzipanva neslúži len ako zásobáreň kovu, ale sa stáva aj dôležitým nástrojom medzipanvovej metalurgie. Medzi hlavné úlohy medzipanvovej metalurgie patrí možnosť dezoxidácie, tepelnej a chemickej homogenizácie, mikrolegovania a rafinácie ocele. Na to, aby medzipanva vedela zabezpečiť všetky tieto úlohy, je potrebné vedieť, ako sa oceľ v nej správa a prúdi. Medzi základné nástroje, ktorými sa to realizuje sú dopadové dosky, prepážky s otvormi, hrádzky, štartovacie trubice, rôzne usmerňovače prúdenia atď.

Ponorná výlevka

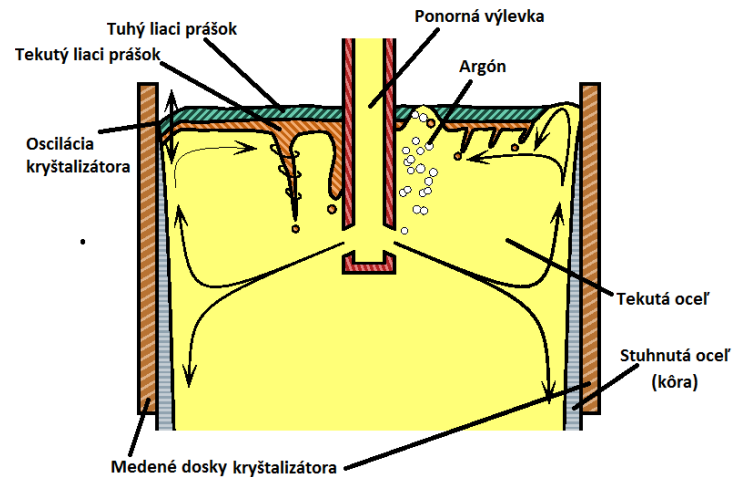
Ponorná výlevka (SEN) slúži na ochranu ocele pred reoxidáciou medzi medzipanvou a kryštalizátorom. Ďalej usmerňuje prúdenie, zabraňuje rozstreku kovu, strhávaniu liaceho prášku a nekovových vtrúsenín a zabezpečuje tok kovu do kryštalizátora.



Obr. 4 Ponorná výlevka **Error! Reference source not found.**

Kryštalizátor

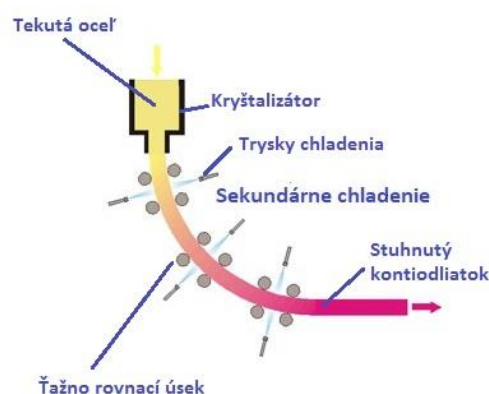
Kryštalizátor (Obr. 5) slúži na primárne chladenie tekutej odlievanej ocele, tvorbu únosnej liacej kôry a dáva finálny tvar kontodliatku. Základným materiálom je meď. Súčasťou kryštalizátora sú liace prášky, ktoré ovplyvňujú povrchovú kvalitu a čistotu odlievanej ocele. Liaci prášok je suchý, tepelne izolujúci jemnozrnný materiál, ktorý pozostáva z troskotvorných oxidov a tavidiel.



Obr. 5 Kryštalizátor **Error! Reference source not found.**

Ďalším dôležitým faktorom na hodnotenie prúdenia v kryštalizátore je samotný typ kryštalizátora, ktorý sa delí podľa konštrukcie na blokový, rúrový, doskový, z pohľadu prierezu na štvorcový, obdĺžnikový, mnohouholníkový, kruhový, profilový, podľa ťahaného predliatku na sochorový, blokový, bramový fixný alebo nastaviteľný atď. Toto sú dôležité informácie, ktoré ovplyvňujú samotné zariadenia, výrobu a modelovanie, ktoré treba brať do úvahy pri riešení týchto procesov.

Ďalej nasleduje sústava ťažných a rovnacích valcov, ktorých úlohou je ťahanie a rovanie kontiodliatku. Na začiatku tohto úseku dochádza k sekundárnemu chladeniu (Obr. 6) pomocou vodovzdušných trysiek a terciárnemu chladeniu na vzduchu. Po stuhnutí kontiodliatku po celom priereze nasleduje delenie na požadovanú dĺžku a značkovanie kontiodliatku. **Error! Reference source not found.**



Obr. 6 Sekundárne chladenie **Error! Reference source not found.****Error! Reference source not found.**

2. Matematické modelovanie procesov prúdenia ocele v ZPO

Častým problémom pri simulácií prúdenia ocele v metalurgických procesoch je nastavenie počiatočných podmienok, ako napr. optimalizácia charakteru prúdenia v medzipanve, kryštalizátore, alebo podmienky odlievania. Porozumenie týchto mechanizmov vyžaduje znalosť z oblasti technológie výroby ocele, termodynamických pochodov a samotnej kinetiky procesu.

Overenie metalurgických procesov v prevádzkových podmienkach, ako napríklad charakter prúdenia ocele vo výrobných agregátoch, patrí k najnáročnejším metódam skúmania. Veľmi často je skúšanie navrhovaných zmien v priamo v praxi, bez predchádzajúceho overenia, náročné. Vďaka masívnemu rozvoju počítačovej techniky a softvérovej dostupnosti simulačných programov je možné využiť na riešenie niektorých metalurgických problémov numerické simulácie (pri riešení matematického modelu sú využívané numerické metódy – metóda konečných diferencií, metóda konečných objemov a metóda konečných prvkov).

V súčasnej dobe sa v priemyselnej oblasti využíva v čoraz väčšej miere matematické modelovanie procesov s využitím komerčných CFD softvérov. Cieľom matematického modelovania je čo najpresnejšie zachytiť správanie reálneho procesu pomocou funkčných vzťahov a matematických operácií. Matematické modelovanie pomocou CFD modelu poskytuje platformu pre numerickú analýzu rôznych technologických procesov, ktoré zahŕňajú zložité fenomény hybnosti a prenosu tepla. V rámci analyzovania výsledkov podporuje a dopĺňa výsledky praktických experimentov, ako aj teoretickú analýzu. CFD modelovanie je v súčasnosti populárny nástroj na analýzu procesu plynulého odlievania ocele, pretože umožňuje monitorovať prietok, turbulenciu, chemickú kinetiku, turbulentné chemické interakcie, výmenu tepla, vplyv a tvorbu inklúzií súčasne. V súčasnosti najpoužívanejšie softvéry na riešenie CFD simulácií sú Fluent, CFX, FLOW-3D, PHOENICS, FIDAP, COMSOL etc.

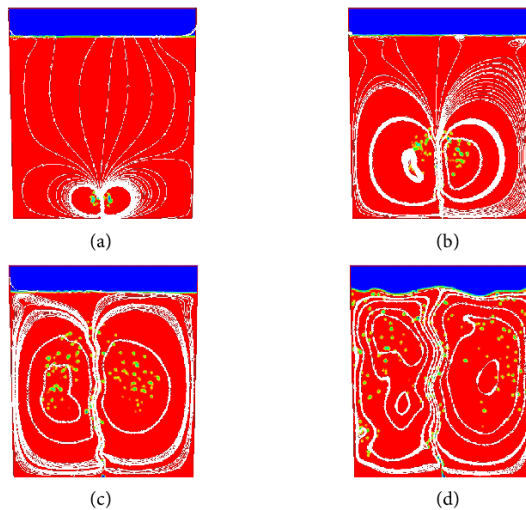
Efektívnou a veľmi progresívnou alternatívou numerických simulácií je využitie špeciálnych a univerzálnych programov, ktoré obsahujú matematické modely a algoritmy a ich riešenia pre rôzne procesy z prenosu hmoty, hybnosti a energie. Dôležitou požiadavkou pri využívaní metód CFD je verifikácia dosiahnutých výsledkov v skutočných prevádzkových podmienkach. [28][29][30]

Pomocou CFD programu je možnosť lepšie pochopiť proces, predikovať, ako sa bude systém správať, odstrániť neželané javy a uskutočniť návrh a optimalizáciu technológií.

Produktivita, kvalita a konkurencieschopnosť v metalurgii závisí na výskume, vývoji a implementácii nových metód z oblasti technológie plynulého odlievania ocele. Preto je kladený veľký dôraz na špičkovú efektivitu tohto procesu.

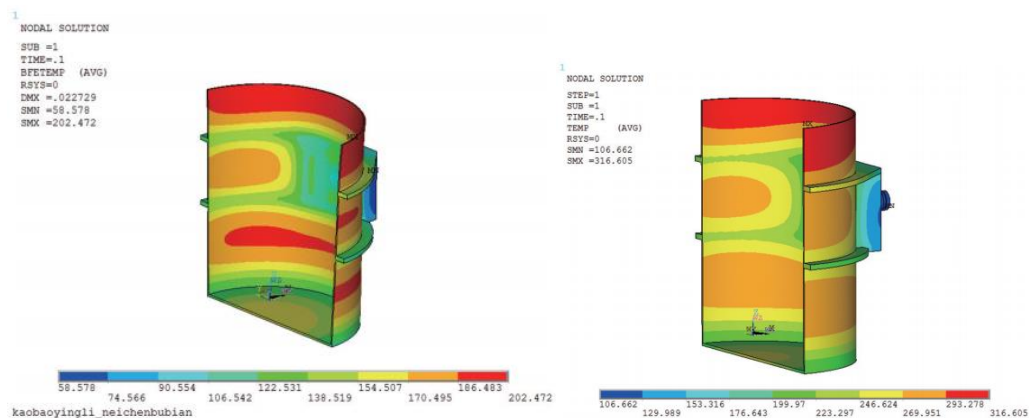
Zariadenie pre plynulé odlievanie ocele je zložené z viacerých uzlov a tu je prehľad možností využitia numerických simulácií v jednotlivých uzloch na príkladoch realizovaných štúdií:

- 1) liacej panvy,
 - a) sledovanie charakteru prúdenia ocele pri použití horného a spodného premiešavania (**Obr. 7**), **Error! Reference source not found.**



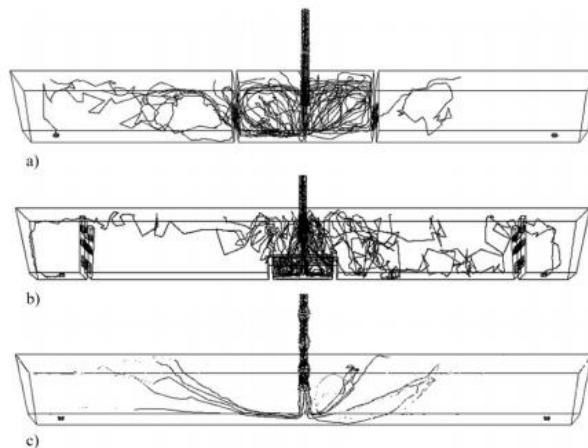
Obr. 7 Ukážka miešania ocele zospodu **Error! Reference source not found.**

- b) tvorba červeného oka v liacej panve, **Error! Reference source not found.**
 - c) vyprázdňovanie liacej panvy a vplyv na charakter prúdenia a teplotné zmeny (**Obr. 8**), **Error! Reference source not found.**



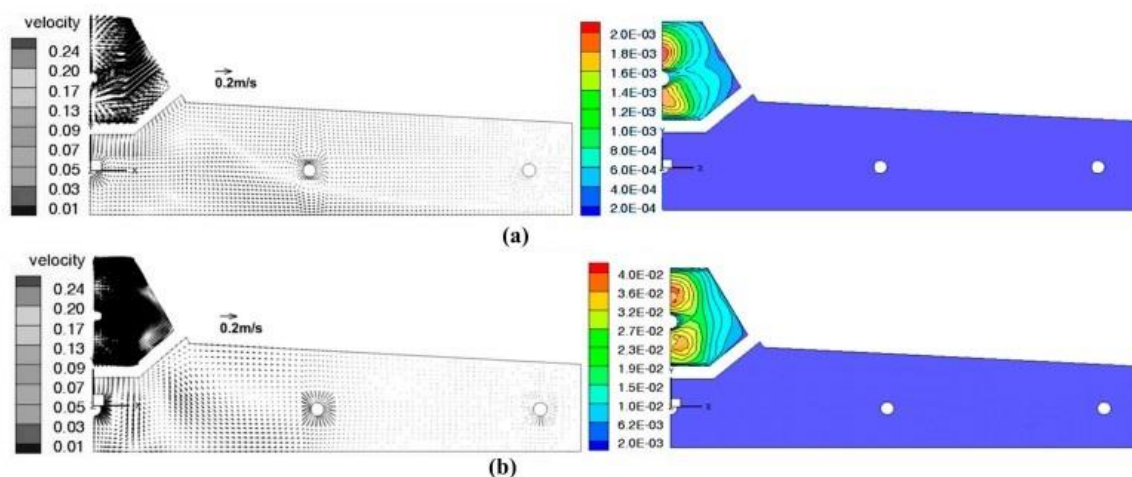
Obr. 8 Teplotné polia pri novej (vpravo) a starej (vľavo) liacej panve **Error! Reference source not found.**

- d) tepelné zaťaženie výmurovky vplyvom nového typu liacej panvy. **Error! Reference source not found.**
- 2) ochrannej trubice:
- a) numerické modelovanie novo navrhovaných ochranných trubíc a ich vplyv na charakter prúdenia a odstránenie inklúzií v medzipanve s rôznymi modifikátormi **Obr. 9, Error! Reference source not found.**



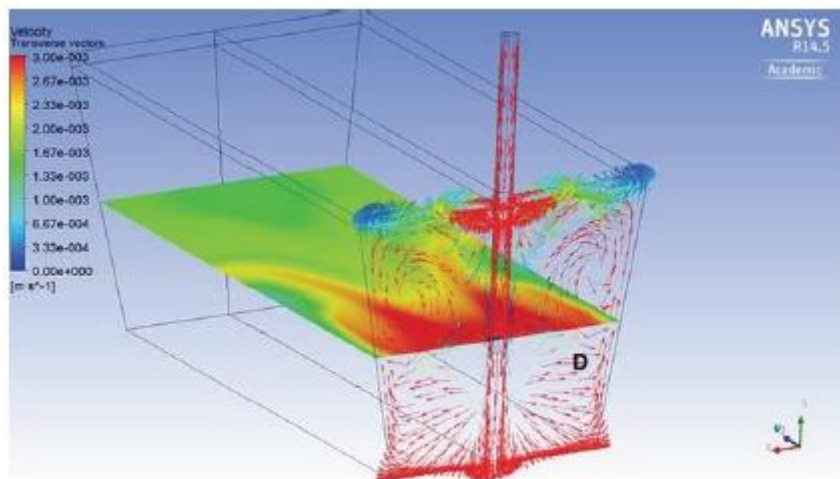
Obr. 9 Dráhy inklúzií rôznych modifikátorov prúdenia (a) prepážky s otvormi, (b) s použitím tvarovej dopadovej dosky a prepážkami s otvormi, (c) bez modifikátorov prúdenia **Error! Reference source not found.**

- 3) medzipanvy:
- a) vplyv intermixu a charakter prúdenia pre rôzne tvary medzipanvy, **Error! Reference source not found.**
- b) viacfázové prúdenie v 5-otvorovej medzipanve pri výmene liacej panvy (**Obr. 10**), **Error! Reference source not found.**



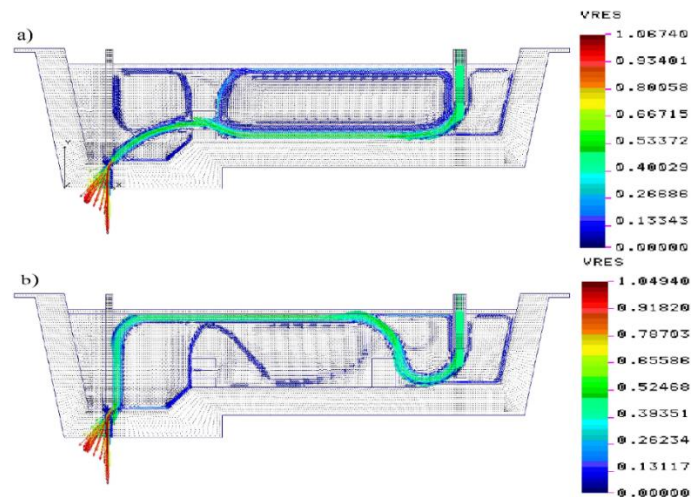
Obr. 10 Vektory rýchlosti a rozloženie turbulentnej kinetickej energie hladiny roztavenej ocele pri ustálenom (a) a neustálenom režime (b) liatia (doba plnenia 60 s) **Error! Reference source not found.**

- c) vplyv hĺbky ponorenia ochrannej trubice do tekutej ocele pri 1-otvorovej medzipanve, **Error! Reference source not found.**
- d) strhávanie medzipanvovej trosky v procese výroby ocele (**Obr. 11**), **Error! Reference source not found.**



Obr. 11 Vektory prúdenia v 1-prúdovej medzipanve a vplyv hĺbky ponoru ochrannej trubice na strhávanie trosky **Error! Reference source not found.**

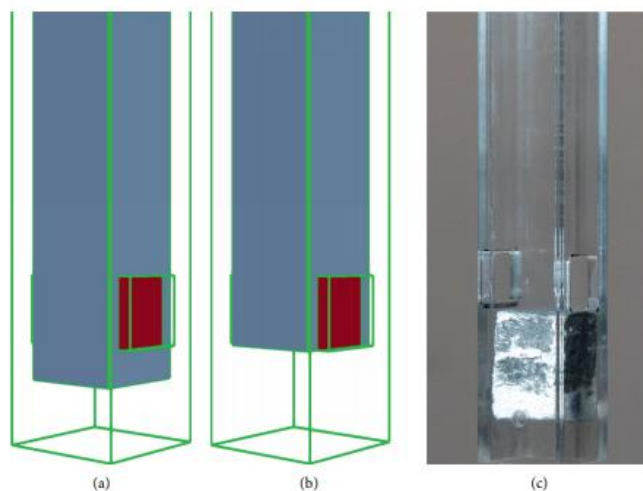
- e) modelovanie prúdenia a teplotných javov v medzipanve pri plynulom odlievaní ocele (**Obr. 12**), **Error! Reference source not found.**



Obr. 12 Vektory rýchlosti v medzipanve po čase 720 s: a) variant II, b) variant III **Error! Reference source not found.**

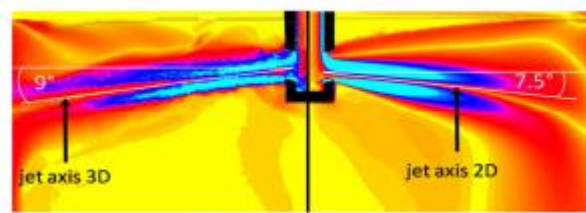
4) ponornej výlevky, kryštalizátora a kontiodliatku:

a) analýza prúdenia vo vnútri ponornej výlevky (**Obr. 13**), **Error! Reference source not found.**



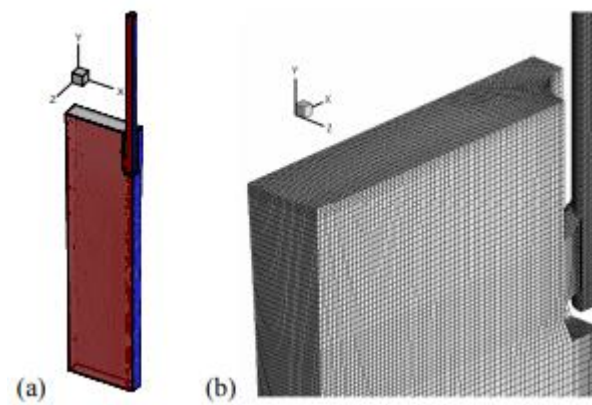
Obr. 13 Ukážka porovnania numerického modelu rôznych dizajnov ponorných výleviek (a) príklad A, (b) príklad B s fyzikálnym modelom (c) **Error! Reference source not found.**

b) aplikácia numerických simulácií na mazanie, kmitanie kryštalizátora, tuhnutie a tvorba defektov pri odlievaní ocele (**Obr. 14**), **Error! Reference source not found.**



Obr. 14 Ukážka osi prúdenia pri 2D a 3D priestore **Error! Reference source not found.**

- c) štúdium prúdenia ocele a správanie sa trosky v kryštalizátore v procese plynulého odlievania, **Error! Reference source not found.**
- d) simulácie prechodového prúdenia v kryštalizátore počas odlievania ocele (**Obr. 15**), **Error! Reference source not found.**



Obr. 15 Výpočtová oblasť: a) geometria, b) výpočtová sieť **Error! Reference source not found.**

- e) numerický model elektromagnetického miešania ocele v kryštalizátore na ZPO. **Error! Reference source not found.**

Na to aby sme vedeli pochopiť a popísať deje, ktoré prebiehajú pri prúdení ocele na jednotlivých uzloch ZPO je potrebné poznať základné vlastnosti tekutín, ktoré popisuje vedný odbor mechanika tekutín. Numerické simulácie mnohých javov je úzko spojené so simulovaním určitého pohybu matematickými prostriedkami. Pohyb tekutín súvisí s riešením rôznych problémov, daných fyzikálnym modelom:

- laminárne a turbulentné prúdenie,
- stlačiteľné a nestlačiteľné prúdenie,
- stacionárne, nestacionárne a prechodové prúdenie,
- prenos tepla, prirodzená a zmiešaná konvekcia, radiácia

- viacfázové prúdenie, prúdenie voľnou hladinou, prúdenie pevných častíc,
- horenie, chemické reakcie,
- prúdenie poréznym prostredím, atď.[42]

Medzi tekutiny patria kvapaliny a plyny. Spoločná vlastnosť sa nazýva tekutosť. Tekutosť je definovaná ako neschopnosť stáleho tvaru v dôsledku možného vzájomného pohybu častíc. Tekutiny spĺňajú Newtonov zákon viskozity, ktorý je definovaný ako vnútorné trenie tekutiny, ktoré je priamo úmerné rýchlosti toku. Medzi takéto tekutiny patrí aj voda. [43][44]112[45]

Riešenie matematických modelov v rámci CFD modelovania je rozložené do troch fáz. V prvej fáze je potrebné analyzovať riešený fyzikálny proces (dej) a určiť vhodné matematické riešenie pre daný proces. Matematické riešenie je vyjadrením procesu v určení fyzikálnych premenných veličín pomocou parciálnych diferenciálnych rovníc a definovaní okrajových podmienok. V druhej fáze je potrebné vytvoriť virtuálny 3D model zariadenia a rozložiť ho do matematickej siete v rámci ktorej prebiehajú výpočty parciálnych diferenciálnych rovníc. V tretej fáze prebieha výpočet na základe zvolených numerických technik.

V tejto kapitole je opísaný zjednodušený spôsob pre modelovanie vodného modelu medzipanvy. Matematický model je založený na výsledkoch získaných z experimentálnych meraní na fyzikálnom modeli v laboratórií LSPP (kapitola 4.2).

Proces plynulého odlievania v medzipanve je charakterizovaný hlavne prúdením tekutiny v uzavretom prostredí. Prúdenie tekutiny vieme popísať ako prenos častíc, ktorá je definovaná smerom a rýchlosťou tekutiny. Charakter prúdenia je vo veľkej miere ovplyvnený turbulentiou. Turbulencia vzniká pri obtekaní stien medzipanvy a v miestach kde sa vytvoria náhle rozdiely rýchlosti tekutiny. Toky ocele v medzipanve v reálnych podmienkach prebiehajú v trojrozmernom poly a s ohľadom na rýchlosti a povahu toku môžeme prúdenie charakterizovať ako turbulentné a nestacionárne. Charakteristické miesta pri ktorých je v rámci medzipanvy potrebné uvažovať s turbulentiou je hlavne v oblasti vstupného prúdu do medzipanvy a v oblasti dopadovej dosky. Turbulentné prúdenie sa skladá z nepravidelných vírov rôznej veľkosti. Hlavné turbulentné víry, ktoré sú nositeľom kinetickej energie sa časom rozkladajú na menšie víry. Menšie víry ďalej rozkladajú svoju energiu na teplo. Turbulentné víry tak vieme charakterizovať dĺžkovou mierkou l (m) a rýchlostným mierkou u (m/s). Pri matematickom riešení prúdenia tak hlavnú úlohu zohráva správne navrhnutý model turbulencie.

Analýza skúsenosti riešiteľských tímov, ktoré sa venovali tvorbe matematických modelov prúdenia ocele v medzipanve je pomerne široká. Medzi najčastejšie využívané modely popisu turbulencie

patria RANS (Reynolds Averaged Navier–Stokes), DNS (Direct Numerical Simulation). resp. LES (Large eddy simulation). Všetky tieto modely definujú turbulentný tok tekutín na základe zákona zachovania hmotnosti (rovnica kontinuity), zákona zachovania hybnosti pomocou Navier-Stokesovej rovnice a zákonom zachovania energie. Rozdiely sú v spôsobe výpočtu a nárokoch na hardvérové vybavenie. Najpoužívanejším modelom riešenia turbulentného toku je model RANS. Model RANS modeluje turbulentné víry na základe časovo spriemerovaných hodnôt Reynoldsa. Korelácie fluktuácie rýchlosti sú riešené pomocou turbulentného modelu. Súčasťou komerčne dostupných CFD softvérov sú viaceré RANS modely, ktoré zjednodušujú výpočet na základe transportných rovníc. Prehľad literatúry o matematickom modelovaní v medzipanvách odhaľuje, že väčšina výskumníkov tímov využila na popis turbulencie RANS k-ε model.

Modely k-ε predstavujú dvojrovnícové modely turbulencie. Umožňujú stanovenie dĺžkového aj časového merítka riešením dvoch samostatných transportných rovníc. Reynoldsove napätie sa modeluje pomocou turbulentnej viskozity μ_t podľa Boussinesquevej hypotézy.

Táto hypotéza je základom mnohých turbulentných modelov, ako napríklad nularovnicové (Zero equation), jednorovnicové (Spalart-Allmaras, Eddy viscosity transport model) a dvojrovnícové (k-epsilon, RNG k-epsilon, k-omega, BLS k-omega, Shear stress transport) modely. Nularovnicové modely riešia turbulentnú viskozitu na základe jednej algebrickej rovnice, jednorovnicové modely riešia turbulentnú viskozitu na základe jednej diferenciálnej rovnice a dvojrovnícové modely dvoma diferenciálnymi rovnicami. Predpoklad hypotézy je taký, že tenzor šmykového napätia môžeme zameniť za Newtonov vzťah (31). Príklad tohto vzťahu pre zjednodušené dvojrozmerné prúdenie je vyjadrené rovnicou:

$$\tau = \eta \frac{du}{dy} \quad (31)$$

kde τ – šmykové napätie [Pa]

η – dynamická viskozita [Pa.s⁻¹]

u – rýchlosť [m.s⁻¹]

Jednou veličinou je možné nahradiť 9 turbulentných napätí, ktorá má hodnotu dynamickej viskozity. Túto veličinu nazývame turbulentná viskozita.

$$\tau_{ij} = -\overline{\rho u_i' u_j'} = \tau_t = \eta_t \frac{\partial u}{\partial y} \quad (32)$$

kde τ_{ij} – tenzor Reynoldsových napätí

τ_t – turbulentné napätie [Pa]

η_t – turbulentná viskozita [Pa.s⁻¹]

Všeobecné vyjadrenie tohto predpokladu je:

$$-\overline{\rho u_i' u_j'} = \eta_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (33)$$

Kde δ_{ij} - Kroneckerovo delta [-]

$$k = \frac{1}{2} \overline{\rho u_i' u_i'} \quad (34)$$

kde k - turbulentná kinetická energia [m².s⁻²]

Tenzor Reynoldsoveho napätia vznikol priemerovaním tenzorov viskózných napätí, kde je jednou neznámou turbulentná viskozita. Turbulentná viskozita nezávisí od prúdiacej látky, ale riadi sa režimom prúdenia. Pre laminárne prúdenie je to nula. **Error! Reference source not found.**
Error! Reference source not found.

Rovnosť tenzorov dáva možnosť spočítať molekulovú a turbulentnú viskozitu. Súčet týchto dvoch viskozít sa nazýva efektívna viskozita (35). **Error! Reference source not found.**
Error! Reference source not found.

$$\nu_{eff} = \nu + \nu_t \quad (35)$$

kde ν_t - turbulentná kinematická viskozita [Pa.s⁻¹]

V rámci dostupných komerčných softvérov sú k dispozícii viaceré modely k-ε. V rámci popisu turbulencie prúdenia v medzipanve je najpoužívanější model k-ε realizable.

Oproti štandardnému modelu k-ε má model realizable inú formuláciu výpočtu turbulentnej viskozity a modifikovanú transportnú rovnicu pre ε, ktorá je odvodená z exaktnej rovnice pre transport stredných kvadratických fluktuácií vírivosti.

Model Realizable tiež ako RNG prináša vylepšenia pre prúdenie s veľkým zakrivením prúdov, vírov a rotáciou. Nevýhodou tohto modelu je nefyzikálne turbulentná viskozita v takých prípadoch, kde výpočtový objekt sa skladá z rotačných a stacionárnych zón.

C_μ nie je pri tomto modeli konštanta, ale vypočíta sa zo vzťahu (36).

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{kU^*}{\varepsilon}} \quad (36)$$

$$\text{kde } U^* = \sqrt{S_{ij}S_{ij} + \widetilde{\Omega}_{ij}\widetilde{\Omega}_{ij}}$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \text{tenzor rýchlosti deformácie [s}^{-1}\text{]}$$

$$\widetilde{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2\varepsilon_{ijk}\omega_k$$

$$\Omega_{ij} = \overline{\Omega}_{ij} - \varepsilon_{ijk}\omega_k$$

A_0 – konštanta o hodnote 4,04

A_s – konštanta

kde $\overline{\Omega}_{ij}$ – stredná hodnota tenzoru vírivosti [s^{-1}] zobrazeného do pohybujúcej sa vzťažnej sústavy s otáčkami ω_k

Ω_{ij} – tenzor vírivosti [s^{-1}]

$\varepsilon_{ijk}\omega_k$ – nefyzikálna turbulentná viskozita

Konštanty modelu (**Tab. 1**) sú trochu odlišné od štandardného a RNG modelu.

Tab. 1 Konštanty modelu Realizable K- ε

$C_{1\varepsilon}$	C_2	σ_k	σ_ε
1,44	1,9	1,0	1,2

$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$ – konštanta modelu, turbulentné Prandtllovo číslo pre k, ε

Kinetická energia turbulencie k a rozptylom kinetickej energie ε sa získava z nasledujúcich transportných rovníc:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (37)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_{1\varepsilon} S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad (38)$$

Kde: G_k - je generácia kinetickej energie turbulencie v dôsledku gradientov rýchlosti,
 G_b - je generácia kinetickej energie turbulencie v dôsledku vztaku,
 Y_M - predstavuje príspevok od fluktuálnych dilatácií pri stlačiteľnom turbulentnom prúdení k celkovej disipácii,
 $C_{1\varepsilon}, C_2, C_3$ - konštanty modelu,
 $\sigma_k, \sigma_\varepsilon$ – konštanty modelu – turbulentné Prandtllové čísla pre k a ε (-),
 S_k, S_ε – užívateľom definované zdrojové členy.

Model k- ε poskytuje lepšie výsledky vo väčšej vzdialenosti od stien preto sa často dopĺňa o model k- ω , ktorý lepšie predikuje výsledky v blízkosti stien takýto kombinovaný RANS model je známy ako k- ω SST.

Model k- ω SST spája robustnosť a presnosť v blízkosti steny s modelom k- ε , ktorý je vhodný ďalej od stien. Tento model je výhodnejší pri viacerých druhoch prúdenia oproti Standard k- ω .

Turbulentná viskozita sa vypočíta podľa vzťahu (39):

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega} \frac{1}{\max\left[\frac{1}{\alpha^*}, \frac{SF_2}{\alpha_1 \omega}\right]} \quad (39)$$

kde S - užívateľom zadané zdrojové členy

a - inverzné efektívne Prandtlove čísla

F – vnútorná objemová sila [N.m⁻³]

Tab. 2 Konštanty modelu SST K- ω

α_{∞}^*	α_{∞}	α_0	β_{∞}^*	R_{β}	R_k	R_{ω}	ζ^*	M_{t0}	$\sigma_{k,1}$	$\sigma_{\omega,1}$	$\sigma_{k,2}$	$\sigma_{\omega,2}$	α_1	$\beta_{i,1}$	$\beta_{i,2}$
1	0,52	1/9	0,09	8	6	2,95	1,5	0,25	1,176	2,0	1,0	1,168	0,31	0,075	0,0828

Ďalším využívaným modelom pre popis turbulencie je model DNS. Tento model zahŕňa priame riešenie nestacionárnych Navier –Stokesových rovníc bez turbulentného modelu ako je to pri k- ϵ modely. To znamená že pre popísanie turbulencie musí byť numericky riešený celý rozsah priestorových a časových dĺžok turbulencie. Takýto prístup riešenia nestacionárneho deja si vyžaduje extrémne jemnú výpočtovú sieť matematického modelu a taktiež krátky časový krok. Veľkosť buniek odpovedá veľkosti najmenších vírov, ktoré sú definované Kolmogorovým rozkladom dĺžkovej a rýchlostnej mierky turbulencie. S nárastom Reynoldsového čísla charakterizujúcim prúdenie počet buniek prudko narastá. Pre vysoké nároky na hardvér a zdĺhavý výpočet sa takýto prístup modelovania využíva iba na elementárne časti riešených problémov.

Zjednodušenie priameho numerického riešenia nestacionárnych Navier –Stokesových rovníc je zahrnuté v modely LES. V prípade modelovania turbulencie sú najdôležitejšie turbulentné toky modelované rovnako ako pri modely DNS avšak menšie turbulentné toky sú opísané pomocou algebraického modelu. V tomto modely sú menšie turbulentné toky odfiltrované. Výsledkom je, že menšie turbulentné toky, ktoré nemajú výrazný vplyv na zmenu celkovej turbulencie v matematickom modely sú časovo a priestorovo spriemerované. Takéto riešenie efektívne odstraňuje informácie malého rozsahu z numerického riešenia, čím urýchľuje výpočet. Model turbulencie filtrovaných tokov je rovnako riešený podľa Boussinesquovej hypotézy ako pri modeloch RANS. Výpočet kinetickej energie je v tomto prípade daná vzťahom:

$$k_{sgs} = \frac{1}{2} (\overline{u_k^2} - \overline{u_k}^2) \quad (40)$$

Transportná rovnica je daná vzťahom:

$$\rho \frac{\partial \overline{k_{sgs}}}{\partial t} + \rho \frac{\partial \overline{u_j k_{sgs}}}{\partial x_j} = -\tau_{ij} \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_j} - C_{\epsilon} \rho \frac{k_{sgs}^{\frac{3}{2}}}{\Delta_f} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k_{sgs}}{\partial x_j} \right) \quad (41)$$

Analýza skúseností s využitím nestacionárnych modelov prúdenia v medzipanve poukazujú na fakt, že z hľadiska presnosti dosiahnutých výsledkov je najnevhodnejší model RANS. Výpočet prenosu

častíc je daný na základe transportných rovníc, čím do značnej miery zanedbávame viaceré fyzikálne vplyvy. Dosiahnuté výsledky sa však aj napriek týmto zjednodušeniam dajú pokladať za priaznivé nakoľko viacero výskumných tímov verifikovalo svoje výsledky matematických modelov v praxi. Model DNS nie je v súčasnej dobe využiteľný na riešenie komplexných nestacionárnych procesov a z ohľadom na výpočtovú techniku nie je dostupný vo väčšine komerčne dostupných softvéroch. Riešenie modelov prúdenia pomocou LES modelu poskytuje v súčasnej dobe najpresnejšie výsledky avšak paradoxne jeho využitie v praxi nie je také populárne ako pri modeloch RANS.

Ďalšou dôležitou časťou pri modelovaní medzipanvy je definovanie multifázového rozhrania. Multifázovým rozhraním rozumieme miesto kde dochádza ku styku dvoch rozličných fáz. Pri riešení modelovania reálnej medzipanvy sa multifázové rozhranie definuje pri styku ocele s troskou resp. ak je objem medzipanvy prebublávaný inertným plynom. V rámci multifázového rozhrania tak je možné sledovať napr. tvorbu sférických inklúzií alebo interakciu jednotlivých fáz medzi sebou. Riešenie transportných rovníc pri multifázovom prúdení je vyjadrením skalárnych veličín pre jednotlivú fázu a zmes.

$$\frac{\partial \alpha_1 \rho_1 \Phi_1^k}{\partial t} + \nabla (\alpha_1 \rho_1 \vec{u}_1 \Phi_1^k - \alpha_1 \Gamma_1^k \nabla \Phi_1^k) = S_1^k \quad (42)$$

where α_1, ρ_1 , and $\vec{u}_1$ are the volume fraction, physical density, and velocity of phase-I, respectively. Γ_1^k and S_1^k are the diffusion coefficient and source term, respectively, which you will need to specify. In this case, scalar Φ_1^k is associated only with one phase (phase-I) and is considered an individual field variable of phase-I.

V určitých prípadoch numerického riešenia vodného modelu medzipanvy pri ktorých uvažujeme iba s jednofázovým zložením prúdiacej tekutiny je možné multifázový model zanedbať.

Proces miešania stopovacej látky vo vodnom modeli môžeme popísať ako difúziu. Difúzia je jav kedy častice jednej látky samovoľne prenikajú medzi častice druhej látky. Látky majú tendenciu prechádzať z prostredia jej väčšou koncentráciou do prostredia s nižšou koncentráciou, čím daná látka difunduje. Prirodzenou vlastnosťou látok je, že pokiaľ sa jej častice môžu pohybovať (molekuly v nehybnom roztoku sa pohybujú na základe Brownovho pohybu) tak sa rozptyľujú do celého priestoru, ktorý môžu dosiahnuť, a postupne vo všetkých jeho častiach vyrovnajú svoju koncentráciu. Difúzny tok tekutiny (roztoku) je definovaný podľa Fickovho prvého zákona. Pri riešení nestacionárneho problému však difúzny tok je potrebné určiť na základe Fickovho druhého

zákonu. Fickov druhý zákon definuje ako difúzia spôsobí zmenu skalárnych veličín ako je hustota, koncentrácia stopovacej látky v závislosti na čase.

Výsledný vzťah pre difúziu stopovacej látky vo vodnom modeli je možné definovať na základe rovnice:

$$\rho \frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{C}}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[D_{eff} \frac{\partial \bar{C}}{\partial x_j} \right] = 0 \quad (43)$$

where $\bar{C}$ is the tracer concentration and D_{eff} is the effective kinematic diffusivity, which is defined as:

$$D_{eff} = \rho D + \frac{\mu_t}{Sc} \quad (44)$$

where D is the kinematic diffusivity and Sc is the turbulent Schmidt number.

Vo vodnom modeli existuje gradient koncentrácií stopovacej látky, ktorý je daný podmienkou 2. druhu (hmotnostnou koncentráciou KCl na vstupe). Samotná difúzia je následne definovaná rýchlosťou vstupného prúdu a geometriou medzipanvy a charakterizovaná je ako hustota koncentračného poľa v určitom mieste vodného modelu (x, y, z) a v čase t .

Súčasťou matematického modelu je definovanie difúzie značkovacej látky, ktorá sa využila na definovanie RTD kriviek. V praxi sa najčastejšie používajú krivky C a F . C – krivky umožňujú sledovať prúdenie tekutiny v medzipanve a používajú sa na optimalizáciu zariadenia z hľadiska geometrie medzipanvy alebo regulácie vstupno - výstupných prietokov. F -krivky sa využívajú na opis procesu miešania jednotlivých prúdov pri zmene chemického zloženia ocele. Matematický model pri riešení C -kriviek umožňuje riešiť sústavu ako jednofázový model, nakoľko sa jedna o prúdenie vody. Riešenie F -kriviek si vyžaduje modelovanie sústavy ako viac fázový model (vzduch-voda), čím sa model komplikuje a časovo predlžuje. Dynamické modelovanie vzniku sférických inklúzií pri miešaní vody so vzduchom si vyžaduje časový krok pri modelovaní na úrovni $\Delta t = 50$ ms. Vzhľadom na dostupnú výpočtovú techniku, modelovanie celého procesu vzniku F -kriviek nie je reálne preto sa v tejto kapitole zameriame iba na analýzu C -kriviek. Výsledky matematického modelu budú verifikované s výsledkami fyzikálneho modelu (kapitola 13.1).

Riešenie diskretizovaných algebraických rovníc CFD softvéroch prebieha iteračnou metódou. Riešenie rovníc hybnosti a kontinuity je z hľadiska výpočtu prepojené pretože všetky zložky rýchlosti sa prepočítavajú v každej z uvedených rovníc. Problematickým parametrom pri riešení je definovanie tlakového člena v rovnici hybnosti. Prepojenie vplyvu tlaku na rýchlosť prúdenia je v rámci CFD programov riešený pomocou rôznych formulácií spojenia tlak- rýchlosť. Pri riešení prúdenia v medzipanve sa často používa algoritmus SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-

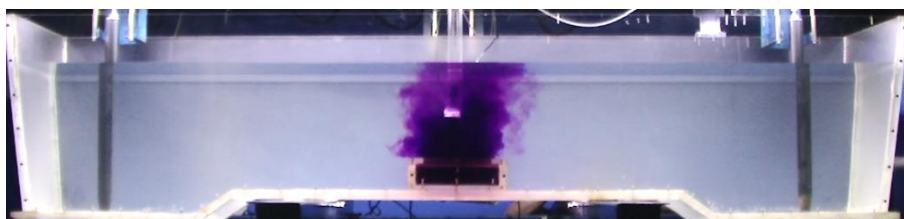
Linked Equations), ktorý rieši korekcie tlaku na základe rovnice kontinuity. Riešenie korekcie tlaku pri nestacionárnych dejov je vhodnejšie definovať na základe algoritmu PISO (Pressure Implicit with Splitting of Operators). Tento algoritmus rieši korekcie tlaku dvakrát.

2.1. Aplikácia nástrojov numerických simulácií na fyzikálny vodný model medzipanvy U. S. Steel Košice – prípadová štúdia č. 1

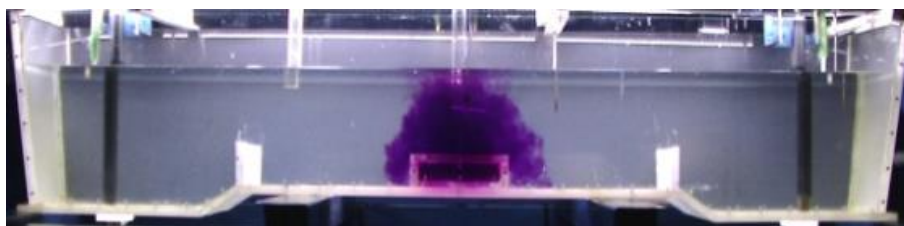
Error! Reference source not found.

Jedna z prvých štúdií, ktorá bola riešená v laboratóriu „SiMeT“, bola prípadová štúdia, v ktorej boli výstupy z fyzikálneho modelu zariadenia pre plynulé odlievanie ocele spoločnosti U. S. Steel Košice, s.r.o. (**Obr. 16**) použité na nastavenie, verifikáciu a následnú validáciu numerického modelu medzipanvy. Cieľom štúdie bolo získať podobné závislosti koncentrácie stopovacej látky od času, ako je to pri fyzikálnom modeli pomocou využitia vhodných matematických modelov.

Pre numerické simulácie boli použité dve konfigurácie medzipanvy pri prietokoch zodpovedajúcich rýchlostiam odlievania $0,8 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ (**Obr. 16**) a $1,2 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ (**Obr. 17**) na reálnom zariadení pri rozmeroch kryštalizátora $1060 \times 220 \text{ mm}$.



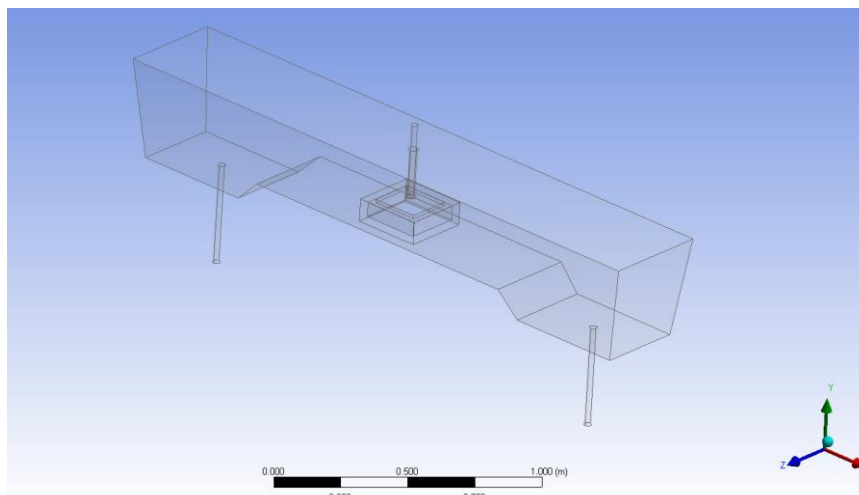
Obr. 16 Ukážka vystrojenia medzipanvy pre rýchlosť odlievania $0,8 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ pre konfiguráciu 1 na fyzikálnom modeli pri 10 sekunde



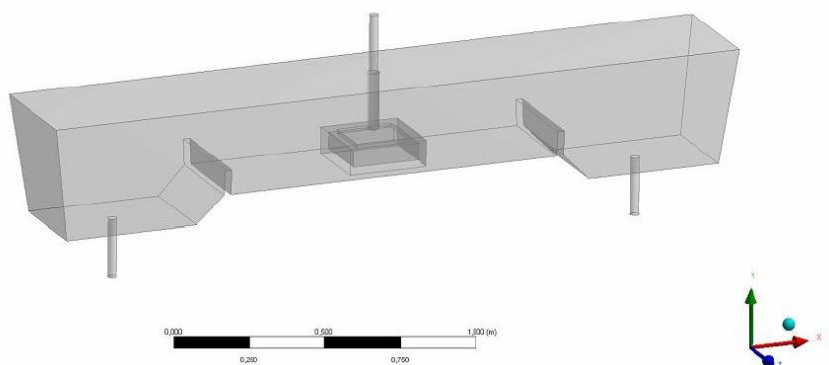
Obr. 17 Ukážka vystrojenia medzipanvy pre rýchlosť odlievania $0,8 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ pre konfiguráciu 2 na fyzikálnom modeli pri 10 sekunde

Prvá konfigurácia (konfigurácia 1) medzipanvy bola vystrojená len tvarovou dopadovou doskou (**Obr. 18**) a druhá konfigurácia (konfigurácia 2) bola vystrojená okrem tvarovej dopadovej dosky ešte aj hrádzkami (**Obr. 19**). Geometria modelov bola vytvorená pomocou CAD programu Autodesk

Inventor a následne importovaná do položky „Geometry“ v projekte vytvoreného v Workbench Ansys Fluent 17.2.



Obr. 18 Importovaná geometria z CAD programu do CFD programu Ansys Fluent (konfigurácia 1)



Obr. 19 Importovaná geometria z CAD programu do CFD programu Ansys Fluent (konfigurácia 2)

Ďalším krokom bolo vytvorenie výpočtovej siete. Kvalita výpočtovej siete ovplyvňuje kvalitu výpočtu a tiež výpočtové zaťaženie pracovnej stanice. Kvalita siete bola sledovaná podľa dvoch kritérií a to skosenia a ortogonalitu. Podľa kritéria skosenia (skewness) bola hodnota 0,23 a podľa kritéria ortogonalitu (orthogonal) to bola hodnota 0,93. Podľa obidvoch kritérií boli dosiahnuté kvalitatívne hodnoty označené ako výborné pre skosenie a veľmi dobré pre ortogonalitu (Tab. 3, Tab. 4). Výpočtová sieť bola tvorená pri obidvoch konfiguráciách v rozsahu 4 400 000 do 4 450 000 elementov (Obr. 20) a bola tvorená tetraedrickou (štvorstennnou) sieťou so zjemnením v kritických oblastiach modelu (oblasť ochrannej trubice, oblasť tvarovej dopadovej dosky, oblasť ostrých hrán hrádzok, atď.).

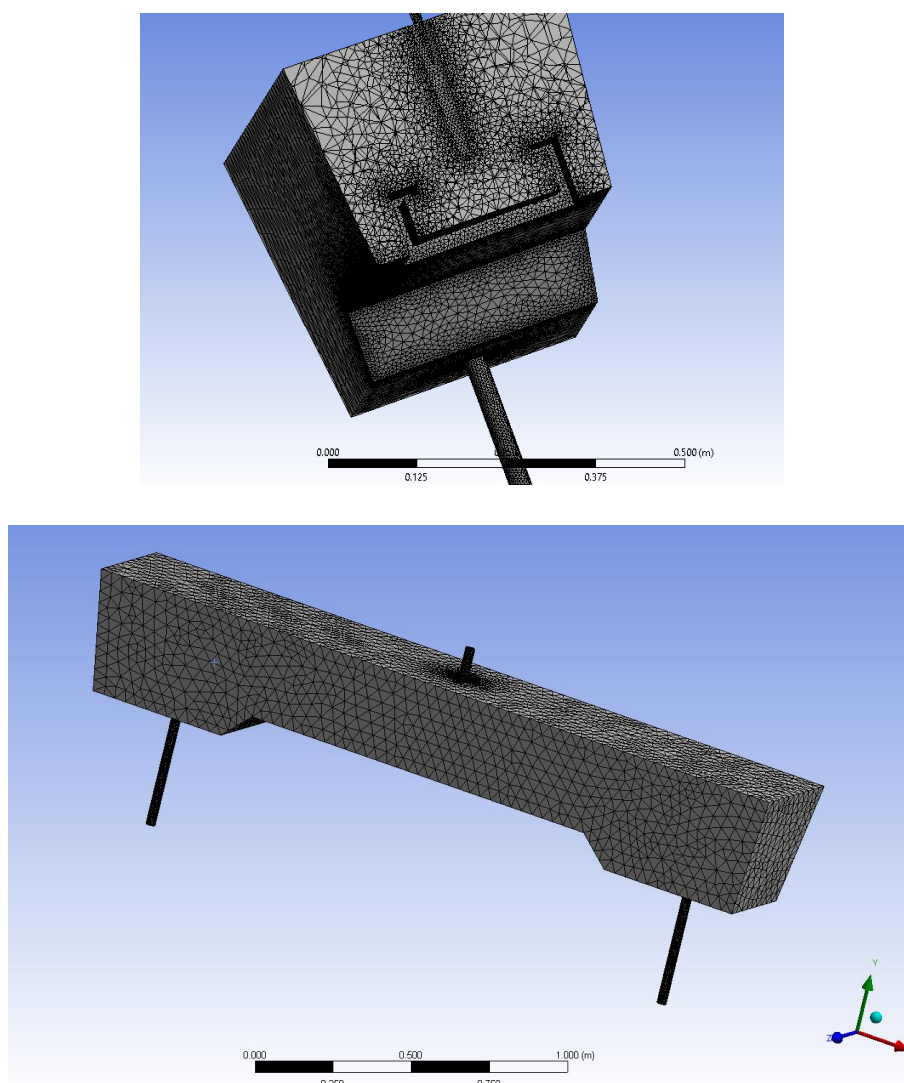
Tab. 3 Kvalitatívne hodnoty pre kritérium skosenia

Výborné	Veľmi dobré	Dobré	Akceptovateľné	Zlé	Neakceptovateľné
0 – 0,25	0,25 – 0,50	0,50 – 0,80	0,80 – 0,94	0,95 – 0,97	0,98 – 1,00

Tab. 4 Kvalitatívne hodnoty pre kritérium ortogónalnej kvality

Neakceptovateľné	Zlé	Akceptovateľné	Dobré	Veľmi dobré	Výborné
0 – 0,001	0,001 – 0,14	0,15 – 0,20	0,20 – 0,69	0,70 – 0,95	0,95 – 1,00

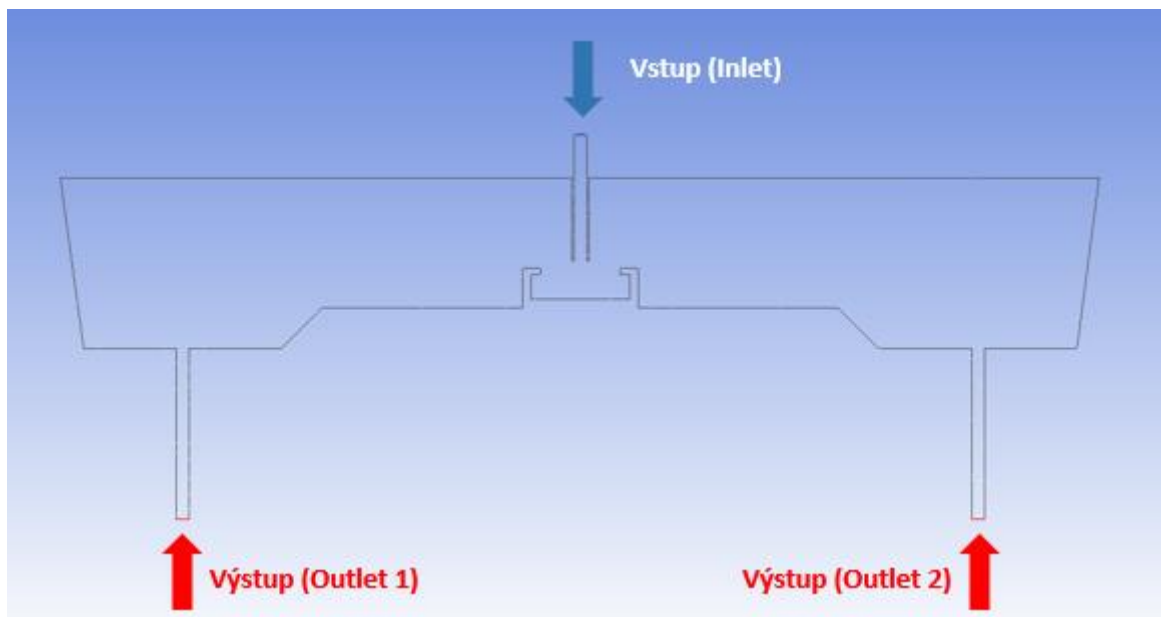
https://www.researchgate.net/publication/320786408_Performance_of_hybrid_nano-micro_reinforced_mg_metal_matrix_composites_brake_calliper_simulation_approach



Obr. 20 Príklad vygenerovanej výpočtovej siete pre konfiguráciu 1

2.1.1. Zadanie okrajových podmienok pre samotný výpočet.

Po načítaní geometrie s vygenerovanou sieťou do Fluentu bola zobrazená geometria modelu s označenými oblasťami vstupu a výstupu pretekajúceho média (**Obr. 21**). Prvým krokom bolo zadanie gravitačnej podmienky v osi y ($-9,81 \text{ m.s}^{-2}$). Následne boli zadane potrebné okrajové a počiatočné podmienky, ako napríklad vhodný turbulentný model a charakteristické vlastnosti materiálu, ktorý prúdi modelom. V danom prípade prúdiacim médiom bola voda a vlastnosti prúdiaceho média boli načítané z databázy Fluentu (hustota, viskozita, relatívna molekulová hmotnosť). V ďalšom kroku boli skúšané turbulentné modely ako k- ϵ (realizovateľný, ale aj RNG model), k- ω SST model a model transportu častíc, kvôli možnosti vstrekovania stopovacej látky. Charakteristiky jednotlivých turbulentných modelov sú definované vyššie v texte. Zadefinované podmienky pre vstup a výstup pretekajúceho média boli rýchlosť, intenzita turbulencie, hydraulický priemer a objemový podiel prúdiaceho média. Ako prídavné vstrekovacie médium za účelom analýzy prúdenia bol vytvorený nový materiál - stopovacia látka s rovnakými vlastnosťami ako voda. Na vstupe bol nastavený hmotnostný prietok v závislosti od rýchlosti odlievania a na výstupe nulový pretlak. Posledná podmienka, ktorá bola zadaná, sa týkala nulového trenia na stenách.



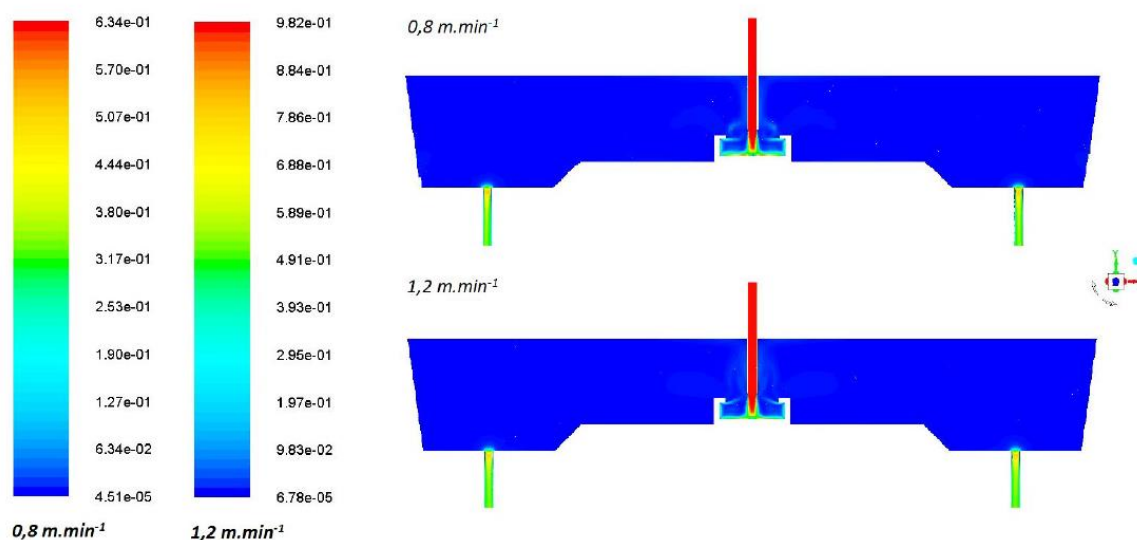
Obr. 21 Označenie vstupu a výstupu pre daný model

Výpočet prebehol na úvod v režime „*Steady state*“, kvôli ustáleniu prúdenia a následne v režime „*Transient casting*“. Režim „*Steady state*“ znamená, že pole vektora rýchlosti nezávisí od času a naopak, režim „*Transient casting*“, je závislý na čase. **Error! Reference source not found.**
Error! Reference source not found.

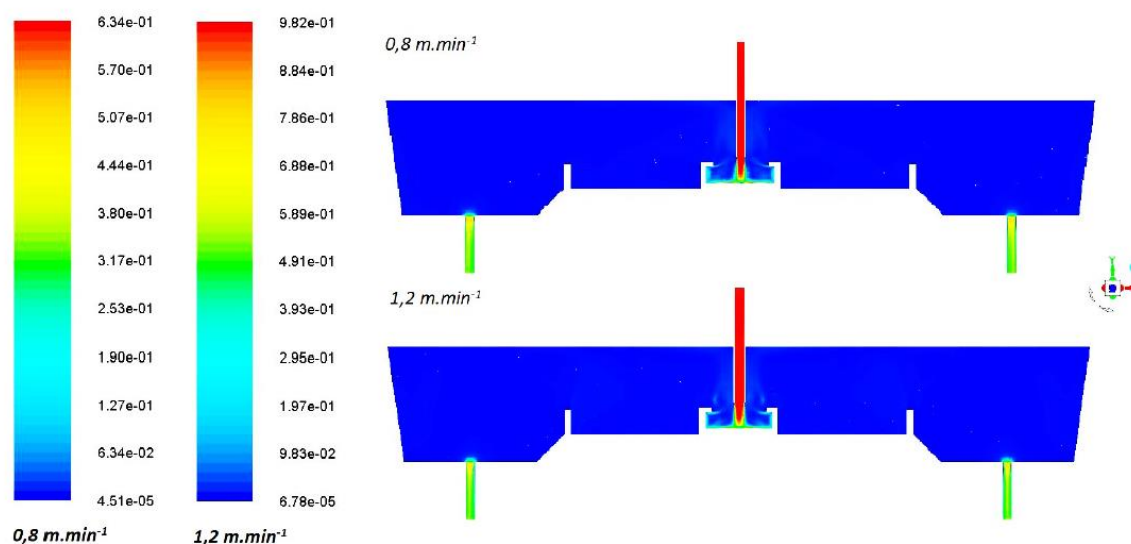
2.1.2. Post-processing (analytická fáza)

Výstupom numerickej simulácie boli grafické zobrazenia rýchlostných polí v reze medzipanvy, určovanie charakteru prúdenia na základe trajektórií v elementárnych objemoch, grafické závislosti bezrozmernej koncentrácie stopovacej látky od času potrebných pre analýzu, minimálnych a maximálnych retenčných časov a vizuálne sledovanie vstrekovania stopovacej látky, kde bolo možné sledovať jej rozptýlenie do objemu medzipanvy pri stanovených rýchlostiach prúdenia tekutiny.

Rýchlostné pole v medzipanve testovaných konfigurácií, vznikajúce pri rýchlostiach odlievania $0,8 \text{ m.min}^{-1}$ a $1,2 \text{ m.min}^{-1}$, sú zobrazené na **Obr. 22** a **Obr. 23** **Error! Reference source not found.** Pri testovaných konfiguráciách dochádzalo k zmenám rýchlosti v oblasti ochrannej trubice, tvarovej dopadovej dosky a výtokových uzloch.

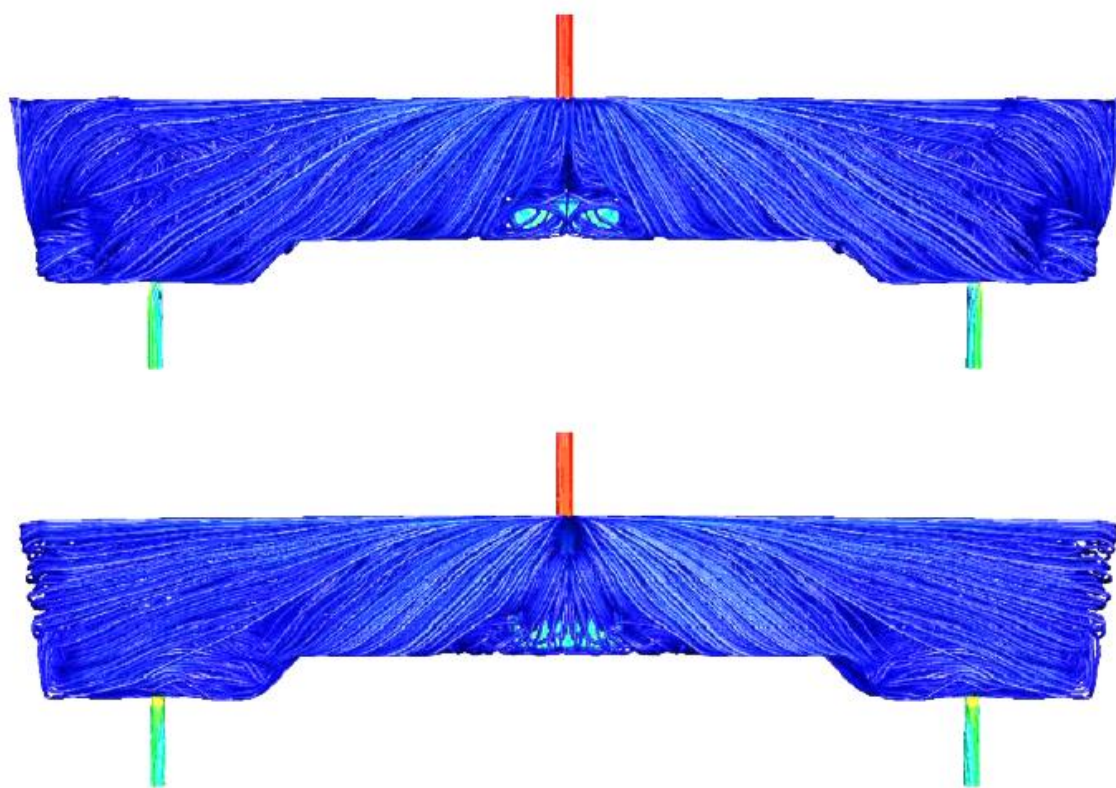


Obr. 22 Rýchlostné pole pre konfiguráciu 1 **Error! Reference source not found.**



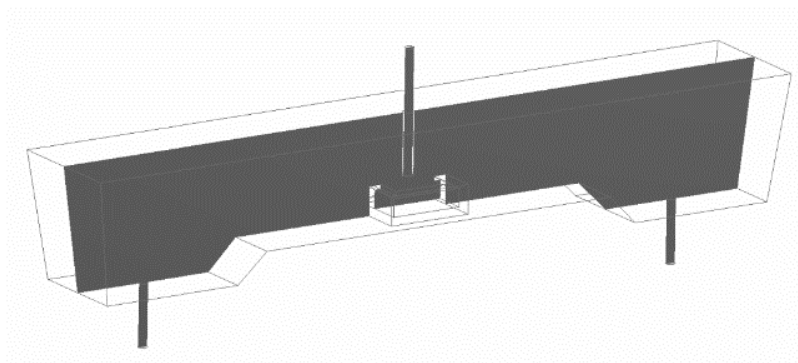
Obr. 23 Rýchlostné pole pre konfiguráciu 2 **Error! Reference source not found.**

Na **Obr. 24** na základe zafarbenia prúdnic je možné sledovať na hladine ocele charakter laminárneho prúdenia, čo je v tejto oblasti žiadané, a čo má pozitívny vplyv na odplavovanie inklúzií do trosky.

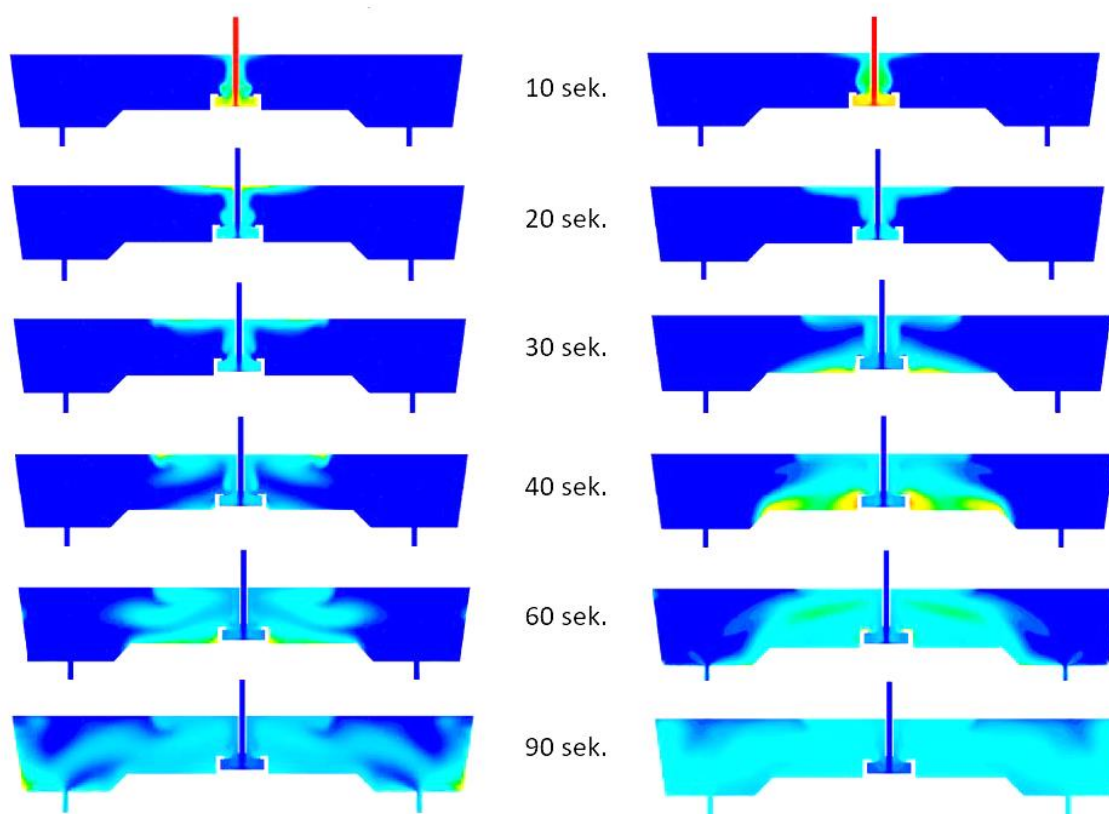


Obr. 24 Ukážka charakteru prúdenia v medzipanve pre konfiguráciu 1, pre rýchlosť odlievania 0,8 m.min⁻¹ a 1,2 m.min⁻¹ **Error! Reference source not found.**

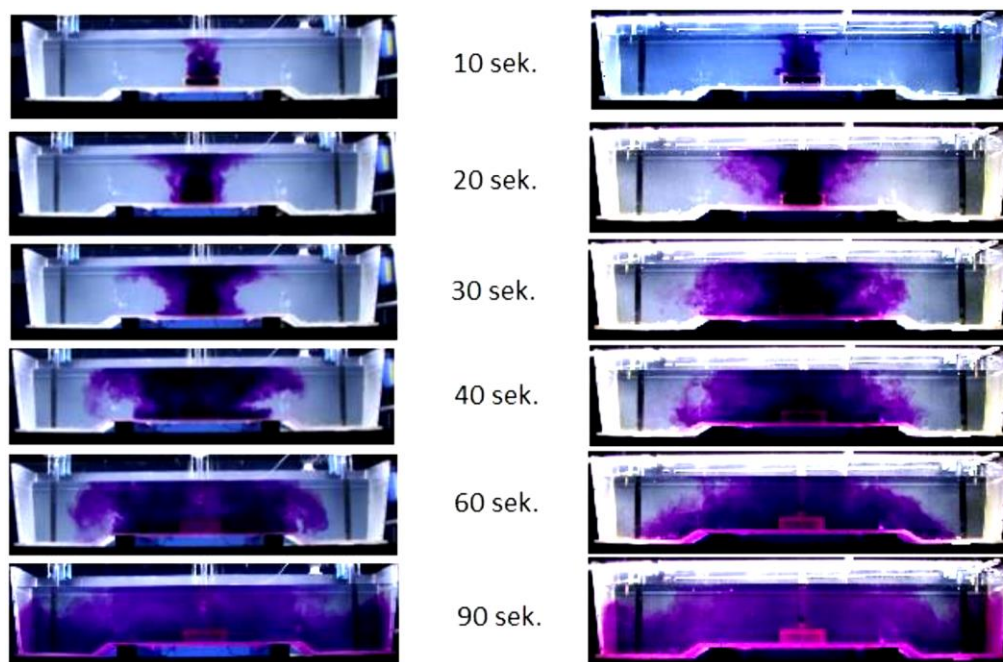
Pre zobrazenie rýchlostných polí pre vstrekovanie stopovaciej látky bola vytvorená rovina vedená stredom medzipanvy (**Obr. 25**). Počas vstrekovania stopovacej látky došlo k prerozdeleniu objemu v časových intervaloch pre konfiguráciu 1, čo je zobrazené pre numerickú simuláciu na **Obr. 26**. a pre fyzikálny model na **Obr. 26**. Pre konfiguráciu 2 pre numerickú simuláciu je prerozdelenie objemu zobrazené na **Obr. 28** a pre fyzikálny model na **Obr. 29**. **Error! Reference source not found.**



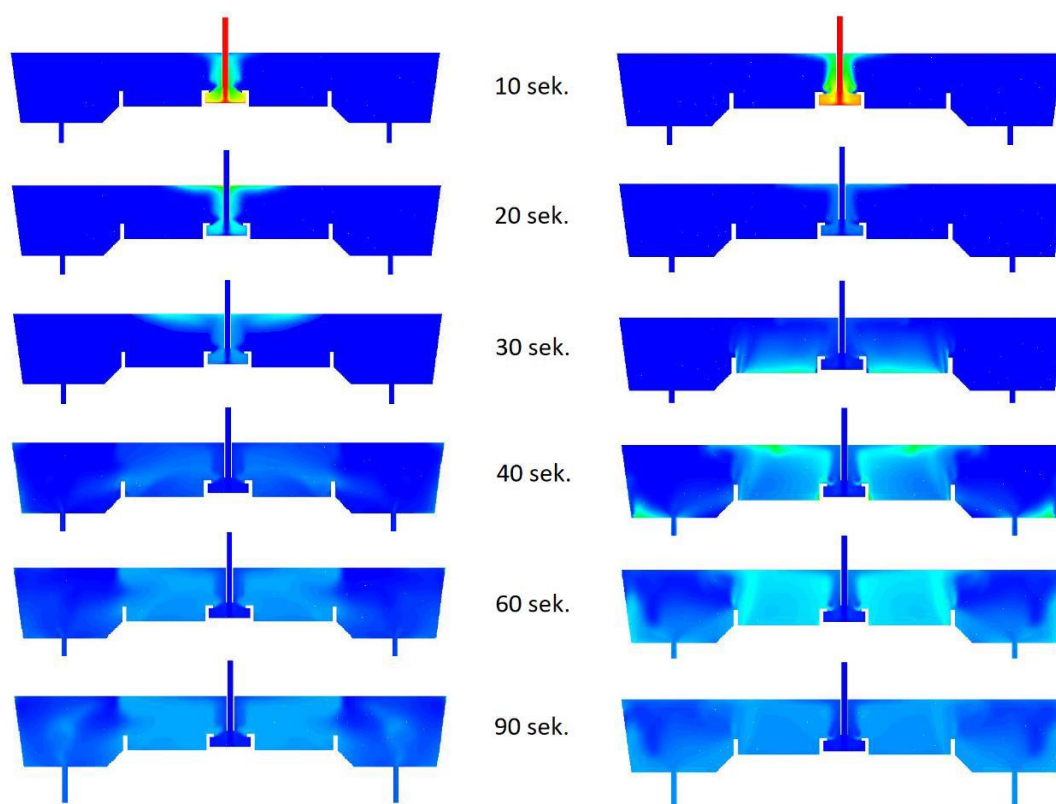
Obr. 25 Zvolená rovina medzipanvou pre konfiguráciu 1



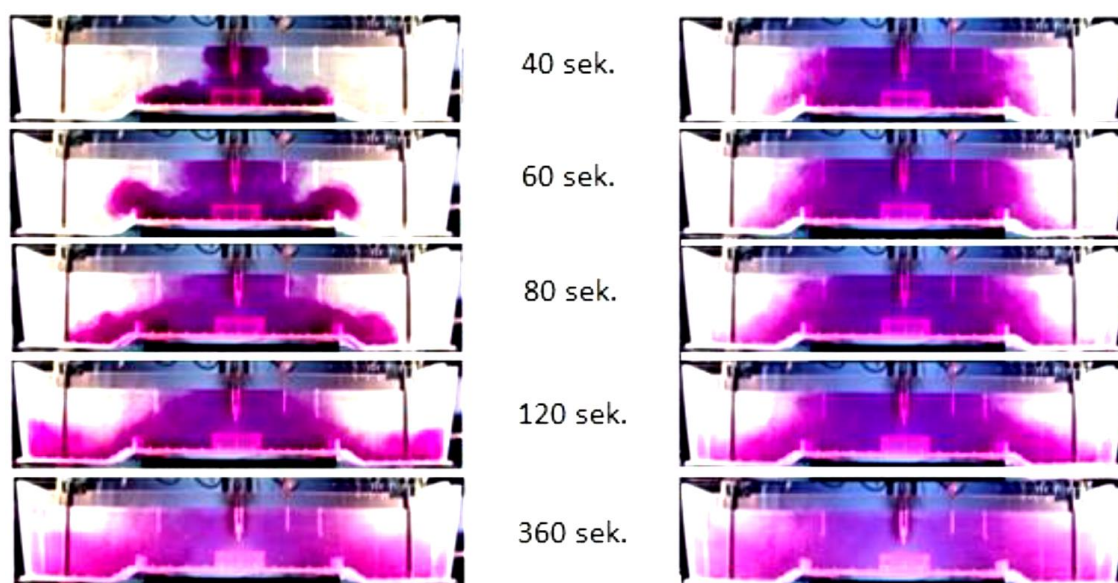
Obr. 26 Vstrekovanie stopovacej látky pre konfiguráciu 1, pre sledované rýchlosti odlievania 0,8 m.min⁻¹ (vľavo) a 1,2 m.min⁻¹ (vpravo) **Error! Reference source not found.**



Obr. 27 Vstrekovanie stopovacej látky pre konfiguráciu 1, pre sledované rýchlosti odlievania $0,8 \text{ m.min}^{-1}$ (vľavo) a $1,2 \text{ m.min}^{-1}$ (vpravo) – fyzikálny model **Error! Reference source not found.**

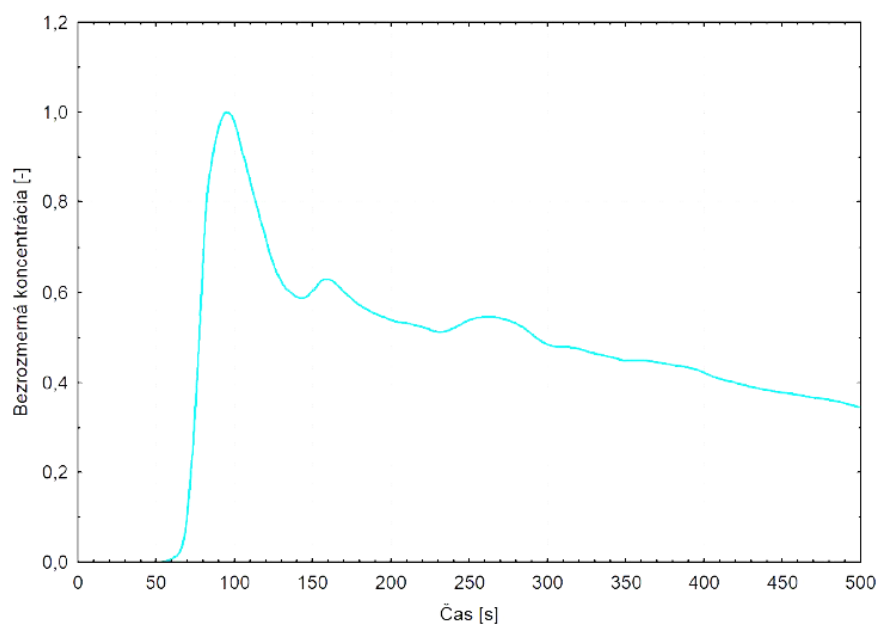


Obr. 28 Vstrekovanie stopovacej látky pre konfiguráciu 2, pre sledované rýchlosti odlievania $0,8 \text{ m.min}^{-1}$ (vľavo) a $1,2 \text{ m.min}^{-1}$ (vpravo) **Error! Reference source not found.**

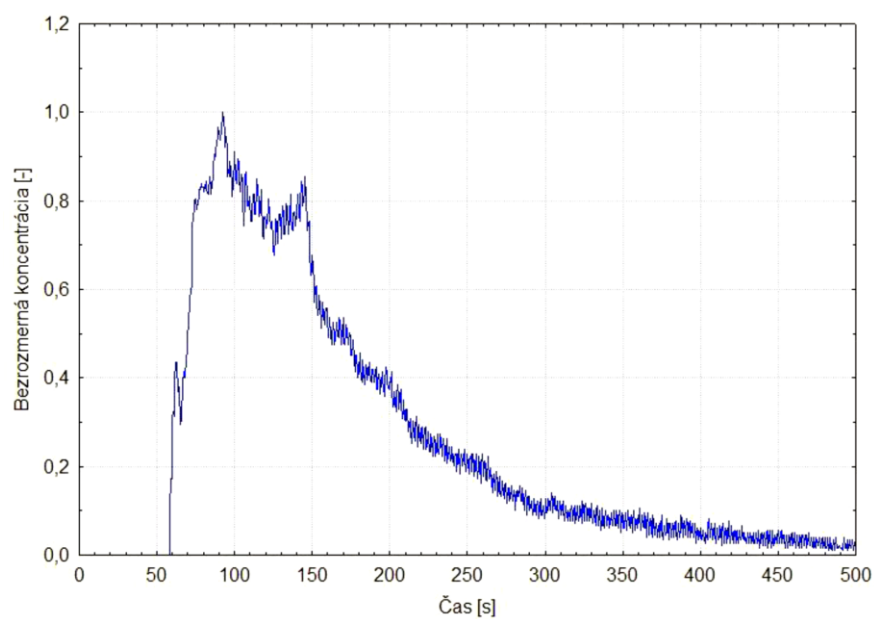


Obr. 29 Vstrekovanie stopovacej látky pre konfiguráciu 2, pre sledované rýchlosti odlievania 0,8 m.min⁻¹ (vľavo) a 1,2 m.min⁻¹ (vpravo) – fyzikálny model **Error! Reference source not found.**

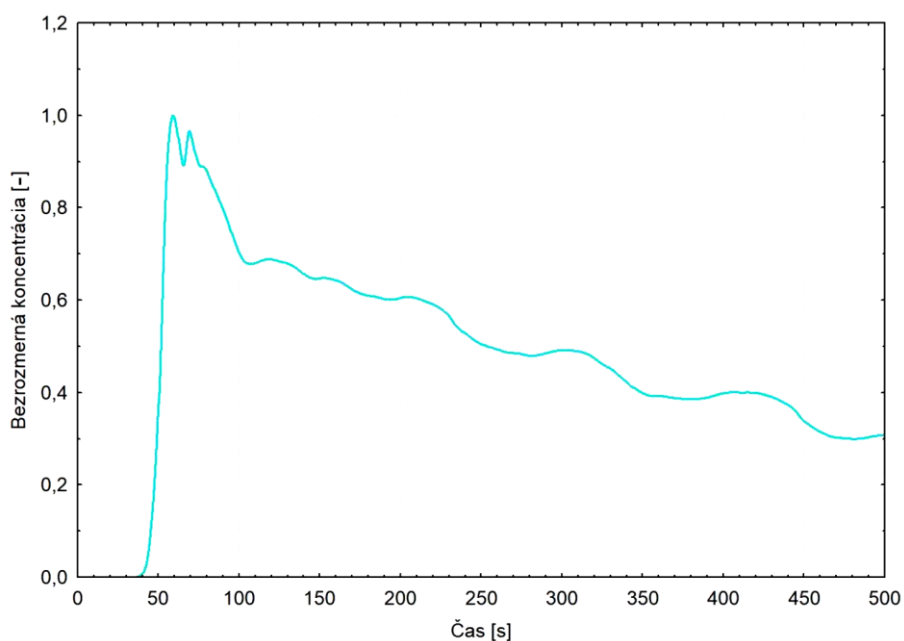
Získané hodnoty z numerickej simulácie, na základe priebehu reziduálov a dosiahnutí konvergenzie, boli upravené na bezrozmernú koncentráciu a boli vytvorené takzvané C-krivky. Bezrozmerná koncentrácia sa vypočíta ako podiel jednej hodnoty koncentrácie vodivosti a maximálnej koncentrácie zo všetkých hodnôt. Hodnoty bezrozmernej koncentrácie sa pohybujú v rozsahu 0 - 1. Po výpočte bezrozmernej koncentrácie sa vytvorila závislosť podľa potreby, napr. času alebo množstva odliatej ocele. Následne boli určené hodnoty pre minimálny a maximálny retenčný čas. Ukážka C-krivky z numerických simulácií pri analýze prúdenia pre konfiguráciu 1, pre rýchlosť odlievania 0,8 m.min⁻¹, je zobrazená na **Obr. 30** a pre fyzikálny model na **Obr. 31**. Pre konfiguráciu 1 pri rýchlosti odlievania 1,2 m.min⁻¹ pre numerickú simuláciu je zobrazená c-krivka na **Obr. 32** a pre fyzikálny model na **Obr. 33**.



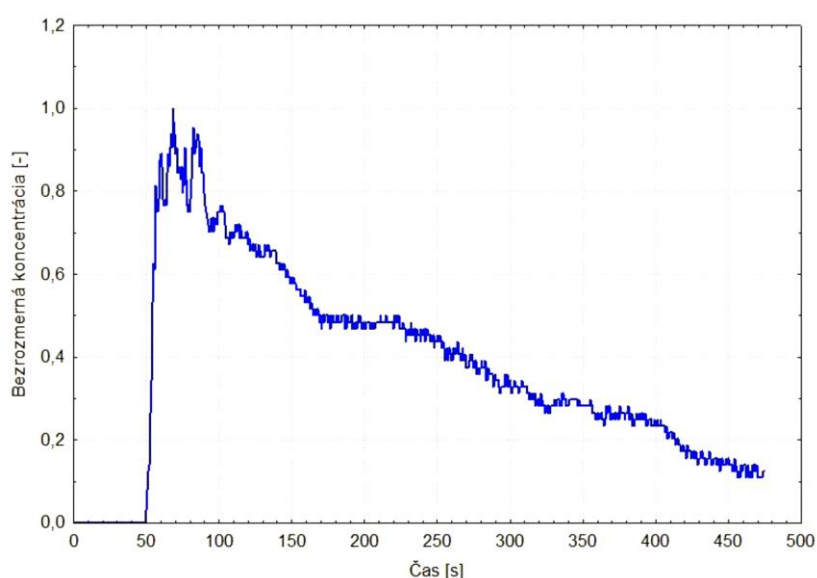
Obr. 30 C-krivka pre konfiguráciu 1 pri rýchlosti odlievania $0,8 \text{ m.min}^{-1}$ – numerický model **Error!**
Reference source not found.



Obr. 31 C-krivka pre konfiguráciu 1 pri rýchlosti odlievania $0,8 \text{ m.min}^{-1}$ – fyzikálny model **Error!**
Reference source not found.

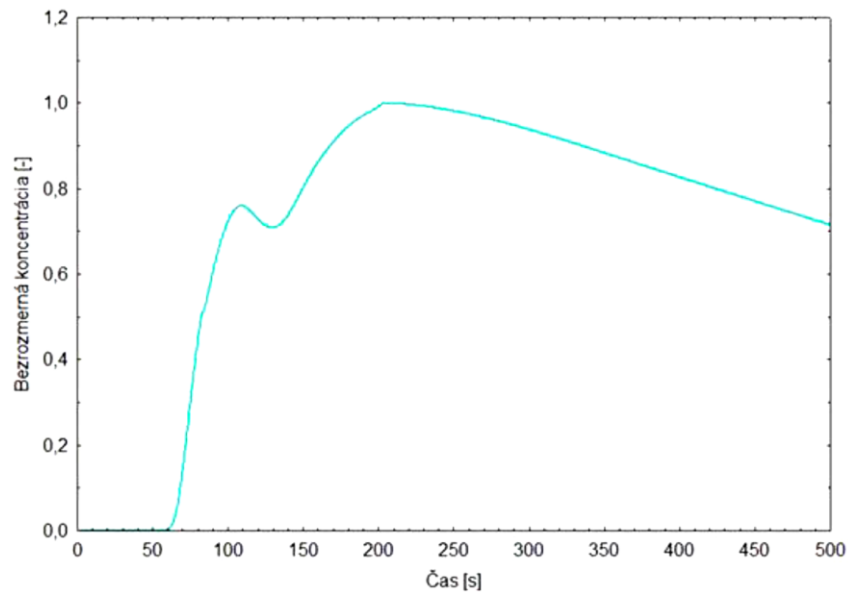


Obr. 32 C-krivka pre konfiguráciu 1 pri rýchlosti odlievania $1,2 \text{ m.min}^{-1}$ – numerický model **Error!**
Reference source not found.

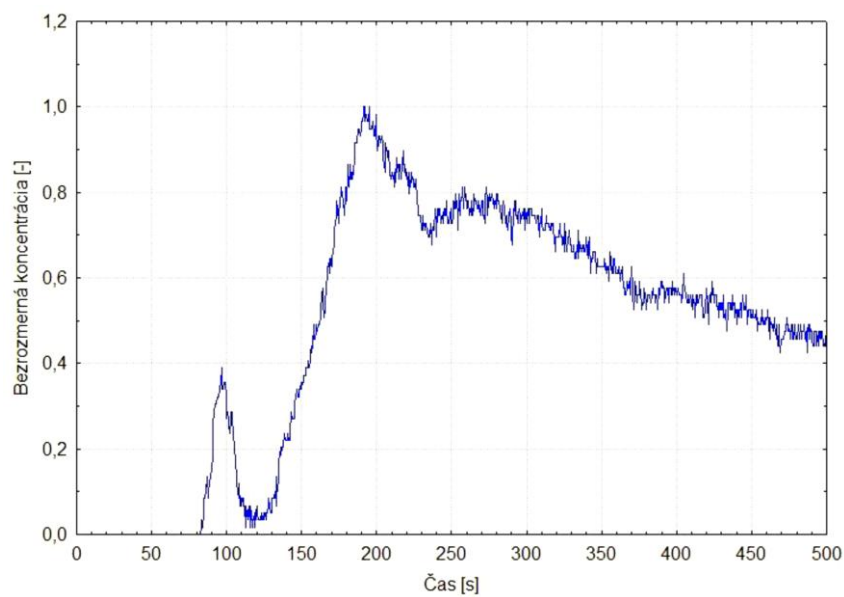


Obr. 33 C-krivka pre konfiguráciu 1 pri rýchlosti odlievania $1,2 \text{ m.min}^{-1}$ – fyzikálny model **Error!**
Reference source not found.

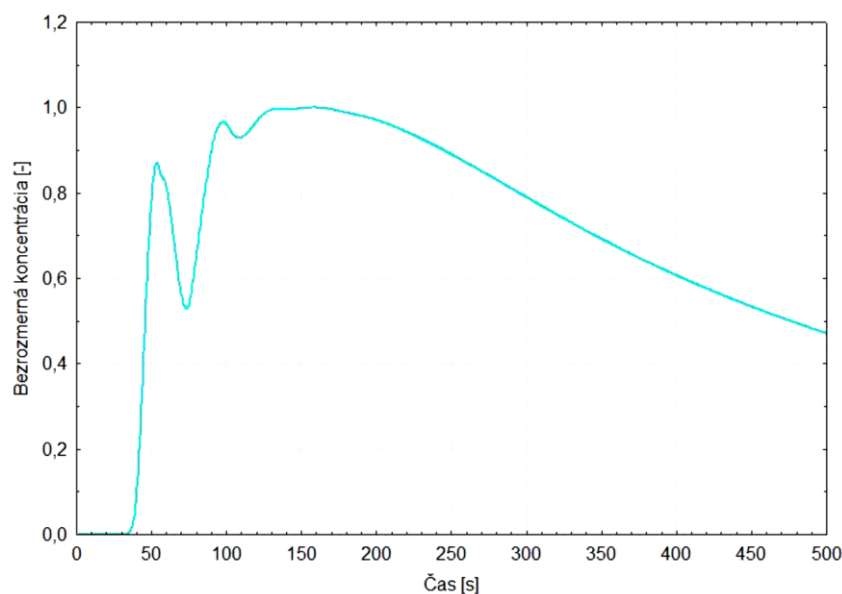
Pre konfiguráciu 2, pri rýchlosti odlievania $0,8 \text{ m.min}^{-1}$, je c-krivka zobrazená na **Obr. 34**, pre numerický model a pre fyzikálny model na **Obr. 35**. Pri rýchlosti $1,2 \text{ m.min}^{-1}$ je c-krivka pre numerickú simuláciu zobrazená na **Obr. 36** a pre fyzikálny model na **Obr. 37**. Pri uvedených matematických simuláciách bol kladený dôraz na kľúčové body C-krivky, teda minimálny a maximálny retenčný čas.



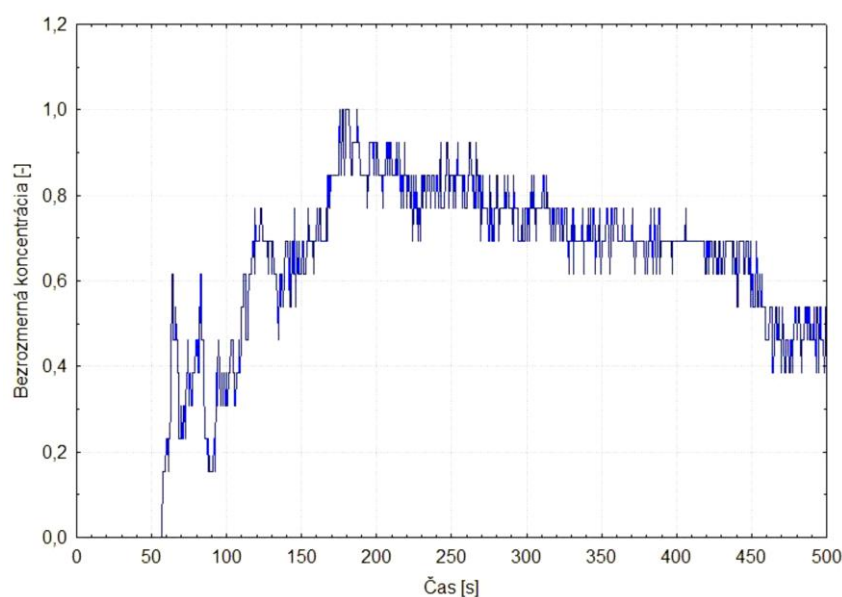
Obr. 34 C-krivka pre konfiguráciu 2 pri rýchlosti odlievania $0,8 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ - numerický model **Error!**
Reference source not found.



Obr. 35 C-krivka pre konfiguráciu 2 pri rýchlosti odlievania $0,8 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ - fyzikálny model **Error!**
Reference source not found.



Obr. 36 C-krivka pre konfiguráciu 2 pri rýchlosti odlievania $1,2 \text{ m.min}^{-1}$ - numerický model **Error!**
Reference source not found.



Obr. 37 C-krivka pre konfiguráciu 2 pri rýchlosti odlievania $1,2 \text{ m.min}^{-1}$ - fyzikálny model **Error!**
Reference source not found.

Získané hodnoty minimálneho a maximálneho retenčného času z numerických simulácií (**Tab. 5**) boli porovnané s hodnotami pre fyzikálny model (**Tab. 6**). Pri použití turbulentného modelu Realizable $k-\epsilon$ boli pri konfigurácií 1 hodnoty z numerických simulácií a fyzikálneho modelu porovnateľné. Ale pri konfigurácií 2 bolo nutné použiť turbulentný model $k-\omega$ SST, pomocou ktorého sa boli dosiahnuté bližšie hodnoty s fyzikálnym modelom oproti modelu Realizable $k-\epsilon$.

Tab. 5 Hodnoty retenčných časov z numerickej simulácie **Error!** Reference source not found.

Konfigurácia	Rýchlosť odlievania
--------------	---------------------

	0,8 m.min ⁻¹		1,2 m.min ⁻¹	
	t _{min}	t _{max}	t _{min}	t _{max}
1	58,5	96	38,5	59
2 (model Realizable k-ε)	59,5	201,5	32	159
2 (k-ω SST model)	76,3	172,82	53,8	169

Tab. 6 Hodnoty retenčných časov z fyzikálneho modelovania

Konfigurácia	Rýchlosť odlievania			
	0,8 m.min ⁻¹		1,2 m.min ⁻¹	
	t _{min}	t _{max}	t _{min}	t _{max}
1	58,5	92,5	38,5	53,5
2	79,75	171,75	57,5	175,5

Pri porovnaní minimálnych a maximálnych retenčných časov pre konfigurácie 1 a 2 so zvyšovaním rýchlosti odlievania, dochádzalo k zníženiu obidvoch retenčných časov, čo v praxi môže mať vplyv na skrátenie času pre potrebné vyplavovanie inklúzií do trosky. Pri konfigurácii 2 pri obidvoch rýchlostiach odlievania došlo k výraznému zvýšeniu maximálneho retenčného času.

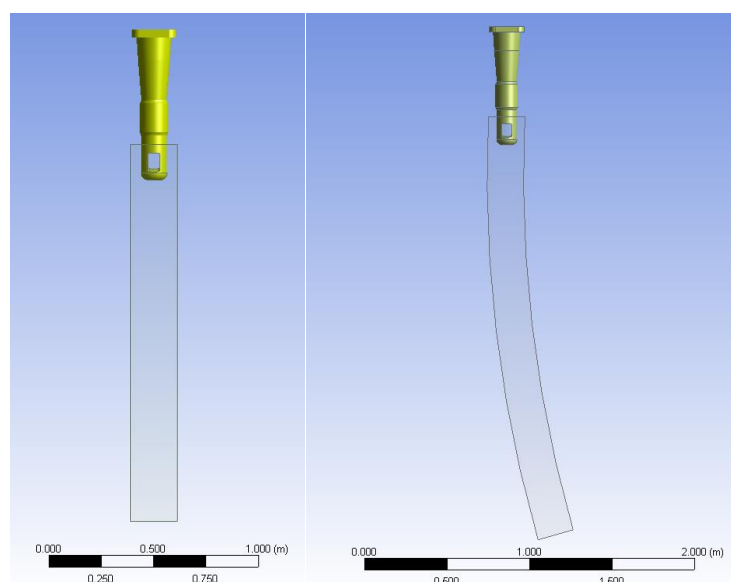
2.1.3. Čiastkový záver k aplikácii nástrojov numerických simulácií na fyzikálny vodný model medzipanvy U. S. Steel Košice – prípadová štúdia č. 1

Cieľom tejto štúdie bolo vytvorenie numerických simulácií pre fyzikálny vodný model medzipanvy U. S. Steel Košice. Geometria bola vytvorená na základe rozmerov fyzikálneho modelu. Na základe fyzikálneho modelu boli určené ešte okrajové podmienky, napríklad rýchlosti vstupu a výstupu prúdiaceho média. Po vytvorení geometrie a vygenerovaní výpočtovej siete na základe vhodných parametrov, hodnotenia kvality siete a zadání potrebných podmienok, ako materiálové charakteristiky, okrajové a počiatočné podmienky, bol realizovaný výpočet. Na základe získaných hodnôt z priebehu reziduálov a dosiahnutí konvergenzie bola vytvorená C-krivka a odčítanie minimálneho a maximálneho retenčného času pre dané konfigurácie. Pri porovnaní týchto hodnôt bol pri konfigurácii 2 zmenený turbulentný model z Realizable k-ε na k-ω SST, aby boli dosahované podobné hodnoty s výstupmi z fyzikálneho modelu. Dôvodom zmeny matematického turbulentného modelu bolo, že model k-ω SST lepšie rieši oblasť prúdenia v blízkosti stien. Pri porovnaní c-kriviek pre jednotlivé konfigurácie sa zistilo, že najvýraznejší rozdiel nastal pri rýchlostiach 0,8 m.min⁻¹. Priebeh kriviek bol podobný, ale pri fyzikálnom modelovaní c-kriviek boli zaznamenané výraznejšie vplyvy úzkych stien medzipanvy.

2.2. Návrh fyzikálneho modelu kryštalizátora – prípadová štúdia č.2

Ďalšia prípadová štúdia riešená v laboratóriu „SiMeT“ bola zameraná na návrh fyzikálneho vodného modelu zakriveného kryštalizátora s meniteľnou šírkou stien. Úlohou bolo, na základe numerických simulácií, určiť vhodnú mierku modelu a dĺžku kryštalizátora bramového typu pre vytvorenie fyzikálneho modelu na základe sledovania prúdenia v oblasti ponornej výlevky (SEN). Na základe šírky kryštalizátora boli použité dva typy ponorných výleviek s rôznym uhlom otvorov v spodnej časti výlevky (očí).

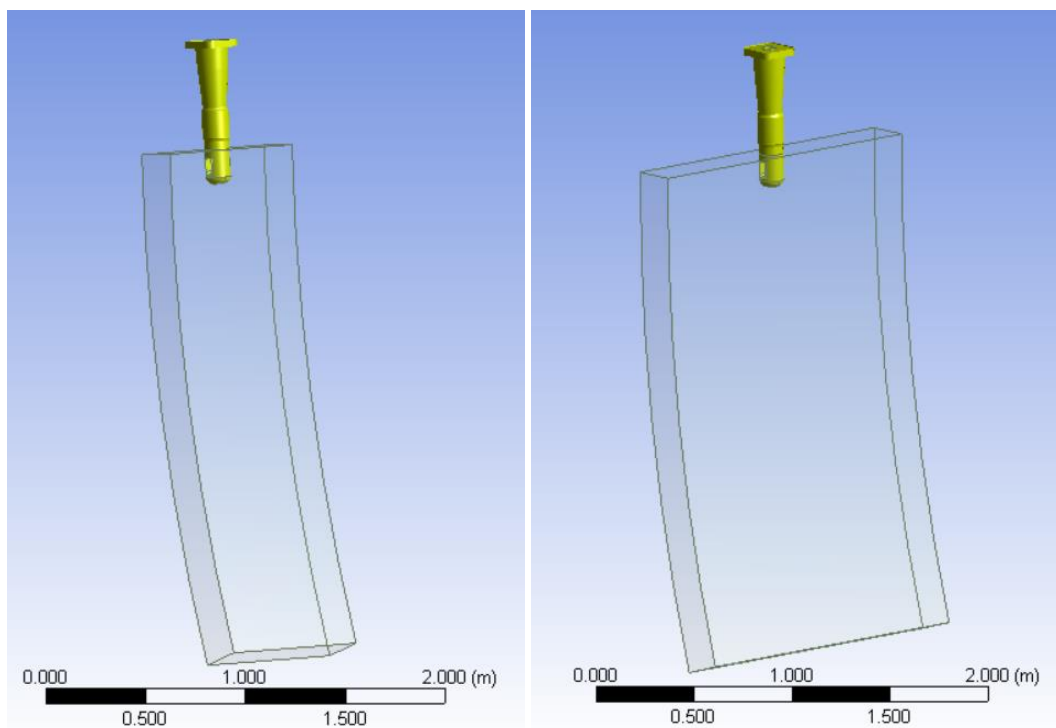
Stanovené boli dva ciele. Prvým cieľom bolo určiť, či je potrebné, aby fyzikálny model bol po výške zakrivený ako reálne zariadenie (Obr. 38). Tento cieľ bol veľmi dôležitý z pohľadu návrhu fyzikálneho modelu a výroby samotného modelu. Pri priamom kryštalizátore by samotná realizácia výroby bola omnoho jednoduchšia.



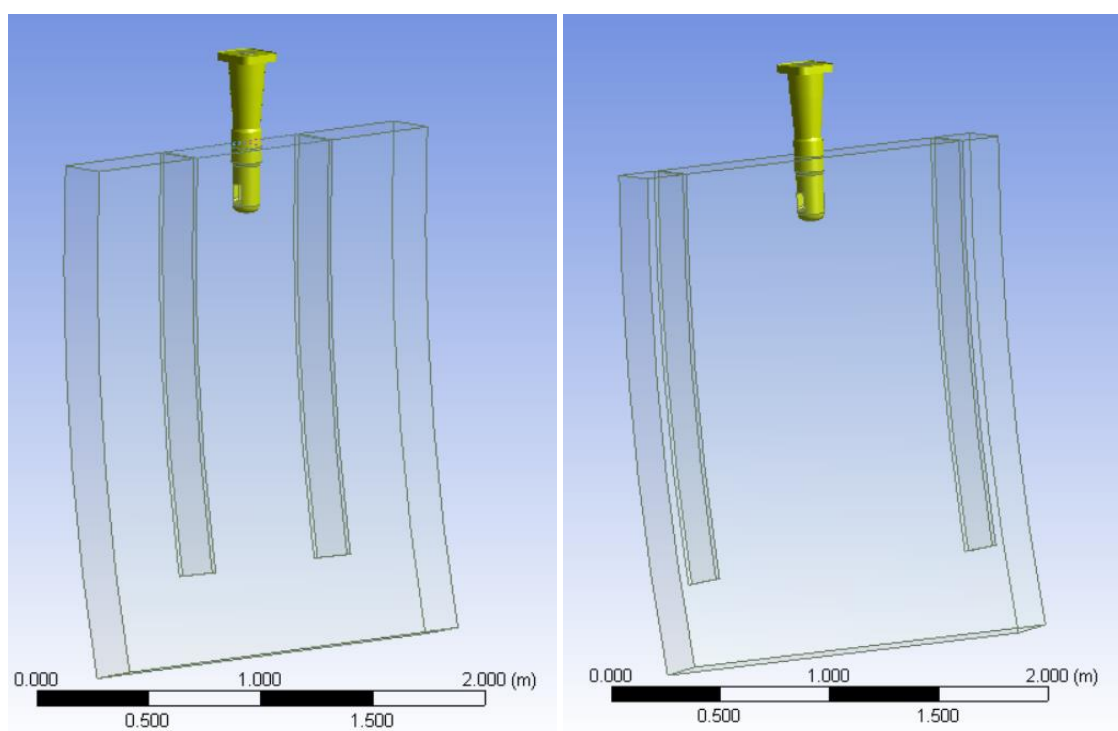
Obr. 38 Priamy a zakrivený profil kryštalizátora

Druhým cieľom bolo určiť dĺžkovú mierku samotného modelu, aby boli dodržané všetky pravidlá podobnosti modelu s reálnym zariadením.

Pre simulácie boli použité rôzne varianty kryštalizátorov od meniteľnej šírky až po zmenu pomeru šírky a dĺžky. Samozrejme, na základe zmeny šírky kryštalizátora, boli použité aj rôzne typy ponorných výleviek a rýchlosti odlievania. Boli vytvorené dva základné modely geometrie, pričom prvý bol vytvorený na základe reálneho kryštalizátora (**Obr. 39**) a druhý bol už návrh fyzikálneho modelu (**Obr. 40**) tak, aby bolo možné meniť šírku kryštalizátora.



Obr. 39 Profil kryštalizátora na základe reálneho zariadenia



Obr. 40 Profil kryštalizátora na základe navrhovaného modelu kryštalizátora

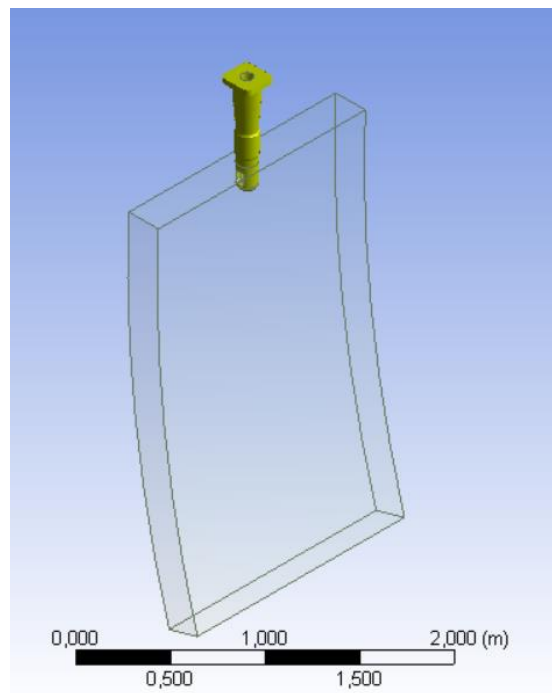
V nasledujúcej **Tab. 7** sú popísané jednotlivé parametre kryštalizátora a ponorných výleviek pre výber sledovaných konfigurácií.

Tab. 7 Výber sledovaných konfigurácií pre prípadovú štúdiu č.3

Konfigurácia	Kryštalizátor				Ponorná výlevka	
	Rozmer [mm]	prevedenie	Pomer (š/d)	Prietokové množstvo [kg/s]	15° oči	25° oči
1	A	priamy	1:1	7,9	x	
2	A	priamy	1:2	7,9	x	
3	A	priamy	1:3	7,9	x	
7	A	zakrivený	1:1	5,2	x	
8	A	zakrivený	1:2	5,2	x	
9	A	zakrivený	1:3	5,2	x	
4	B	priamy	1:1	7,9		x
5	B	priamy	1:2	7,9		x
6	B	priamy	1:3	7,9		x
10	B	zakrivený	1:1	5,2		x
11	B	zakrivený	1:2	5,2		x
12	B	zakrivený	1:3	5,2		x

A - najväčšia možná šírka kryštalizátora, B - najmenšia možná šírka kryštalizátora

Pre vytvorenie geometrií sledovaných konfigurácií (**Obr. 41**) bol použitý modul tvorby geometrie „Design Modeler“ v programe ANSYS FLUENT.

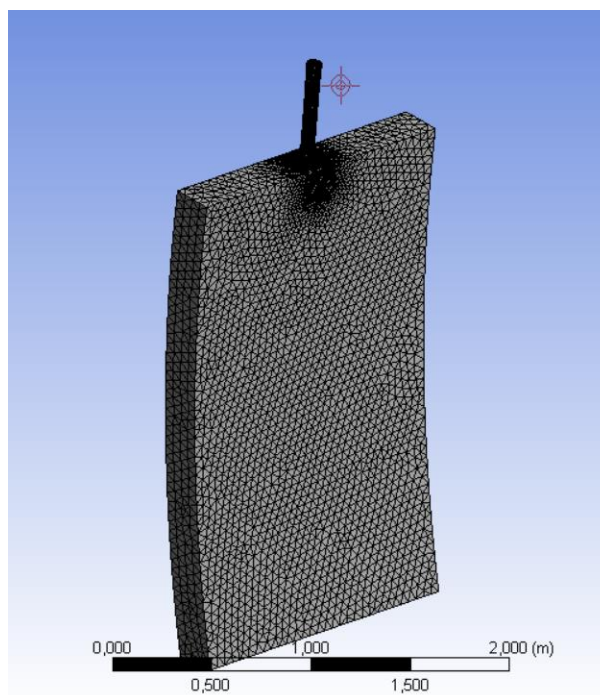


Obr. 41 Geometria modelu kryštalizátora

Výpočtová sieť bola vygenerovaná tak, aby spĺňala podmienku kvality ortogonalita a kvalitu skosenia buniek **Obr. 42**. Prvotná sieť bola vygenerovaná automaticky. Aby sa dosiahla požadovaná kvalita pri tvorbe výpočtovej siete, boli upravené ešte ďalšie parametre a to:

- Initial Size Seed – Full Assembly,
- Relevance Center – Fine,
- Growth Rate - 1,15,
- Smoothing – High.

Po týchto úpravách boli dosiahnuté kvalitatívne hodnoty pre ortogonalitu a skosenia na výbornej úrovni.



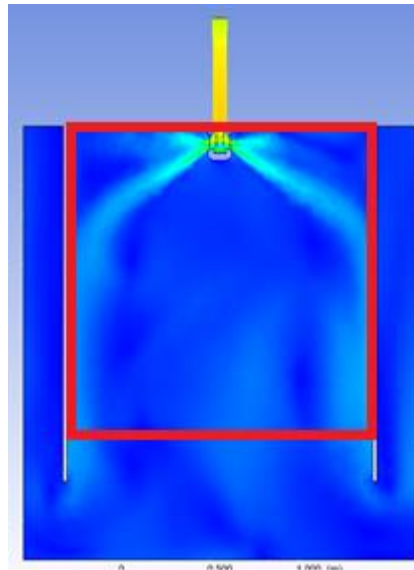
Obr. 42 Ukážka vygenerovanej výpočtovej siete pre model kryštalizátora

Pre samotný výpočet vo Fluente boli nastavené tieto parametre:

- výpočet prúdenia – stacionárny,
- pôsobenie gravitácie v osi $y = -9,81 \text{ m.s}^{-2}$,
- turbulentný model Realizable $k-\epsilon$, Standard Wall Fn,
- pretekajúca tekutina – voda,
- okrajové podmienky – velocity inlet, outlet,
- metóda riešenia - Simple, Inizializace – from all zones,
- počet iterácií – 2000,
- samotný výpočet.

Okrajové podmienky pre vstup tekutiny boli zadané ako hmotnostný prietok prepočítaný na základe rozmerov rôznych skúmaných konfigurácií.

Po dosiahnutí konvergenie výpočtu bolo uskutočnené hodnotenie výsledkov charakteru prúdenia pomocou vektorov, prúdnic a kontúr rýchlosti prúdenia v oblasti ponornej výlevky so zameraním sa na hladinu a bočné steny (**Obr. 43**). Pozorovaný bol charakter prúdenia z očí ponornej výlevky, jeho rozdzojenie na dva hlavné prúdy. Prvý ovplyvňuje hladinu v kryštalizátore, aby nedošlo k odkrytiu hladiny vplyvom zvýšenej rýchlosti prúdenia a druhý prúd smerujúci šikmo dole k bočným stenám ovplyvňuje tvorbu stuhnutej kôry.



Obr. 43 Ukážka sledovanej oblasti navrhovaného modelu kryštalizátora s posuvnými stenami

Na základe vyššie uvedeného postupu riešenia numerických simulácií pre rôzne konfigurácie a zmeny pretekajúceho množstva tekutiny, boli vytvorené vizualizácie charakteru prúdenia pomocou rýchlostných polí, vektorov a prúdnic pri rovnakom časovom intervale. Ukážky niektorých sledovaných konfigurácií zobrazujú nasledujúce tabuľky. **Error! Reference source not found.** (viď **Error! Reference source not found.**) zobrazuje charakter prúdenia podľa navrhovaného tvaru kryštalizátora pri maximálnej šírke (A) ale rôznych pomeroch šírky a dĺžky s priamym bočným profilom. **Error! Reference source not found.** (viď **Error! Reference source not found.**) znázorňuje charakter prúdenia podľa navrhovaného tvaru kryštalizátora pri minimálnej šírke (B), tiež rôznych pomeroch šírky a dĺžky, ale so zakriveným bočným profilom. **Error! Reference source not found.** (viď **Error! Reference source not found.**) zobrazuje charakter prúdenia podľa navrhovaného tvaru kryštalizátora pri minimálnej šírke (B), ale rôznych pomeroch šírky a dĺžky s priamym bočným profilom **Error! Reference source not found.** (viď **Error! Reference source not found.**) znázorňuje charakter prúdenia podľa navrhovaného tvaru kryštalizátora pri minimálnej šírke (B), ale rôznych pomeroch šírky a dĺžky so zakriveným bočným profilom.

2.2.1. Čiastkový záver pre prípadovú štúdiu č.3

Na základe uskutočnenia numerických simulácií na mnohých konfiguráciách, ktoré sú popísané vyššie bolo vyhodnotené, že pre výrobu fyzikálneho vodného modelu kryštalizátora s meniteľnou šírkou na Ústave metalurgie bude vyhovovať pomer šírky ku dĺžke 1:1 so zakriveným profilom kryštalizátora. Charakter prúdenia na sledovaných konfiguráciách jednoznačne potvrdil, že nie je

potrebné meniť dĺžku kryštalizátora oproti reálnemu zariadeniu. Zmeny charakteru prúdenia v sledovanej oblasti závislé od dĺžky neboli výrazné ani pri minimálnej a maximálnej šírke kryštalizátora. Výhodou takejto mierky bude to, že bude možné skúšať reálne ponorné výlevky, čo výrazne urýchli proces realizácie experimentov na tomto vodnom modeli. Pri porovnaní charakteru prúdenia pre priamy a zakrivený profil kryštalizátora sa ukázalo, že tento faktor je dôležitý a má výrazný vplyv na prúdenie. Po zhodnotení numerických simulácií bola vytvorená projektová dokumentácia a na základe tohto bol skonštruovaný model. V súčasnosti je tento vodný model kryštalizátora v mierke 1:1 s meniteľnou šírkou (**Obr. 44**) vybudovaný a čaká na prvé testovacie experimenty. Hlavným cieľom vybudovania fyzikálneho modelu je sledovanie charakteru prúdenia na hladinu, a tiež v oblasti stien za použitia rôznych typov ponorných výleviek, a tiež zmeny hĺbky ponoru.



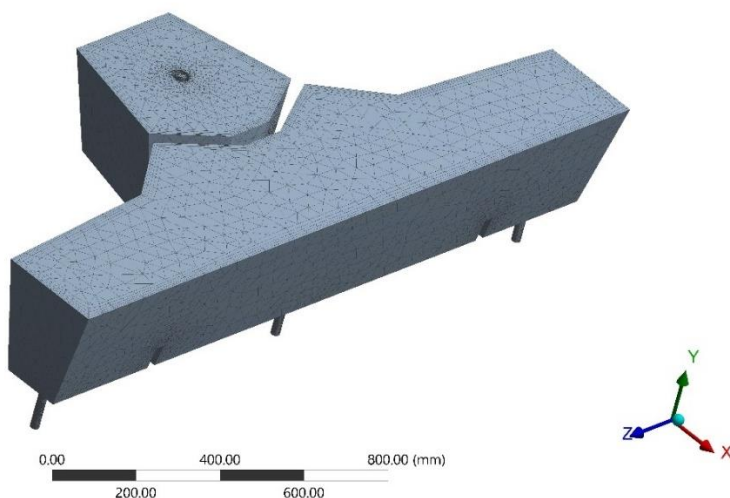
Obr. 44 Vodný model kryštalizátora

2.3. Matematický model medzipanvy ŽP, a.s.

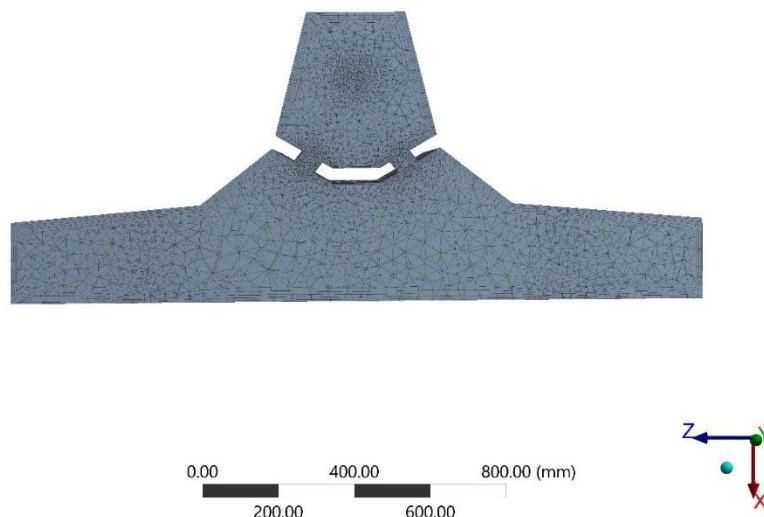
Matematickým modelom navrhnutom v programe ANSYS fluent R17.2 boli analyzované 2 prípadové štúdie fyzikálneho vodného modelu medzipanvy ŽP, a.s. v mierke 1:2. Geometria

medzipanvy bola modelovaná v programe SpaceClaim. Následne bol model medzipanvy diskretizovaný na výpočtovú sieť v programe Ansys meshing. V prvotnej fáze boli vytvorené viaceré štruktúry výpočtovej siete pre posudenie vplyvu výpočtovej siete na finálne výsledky. Výpočtové siete boli analyzované kontrolou kvality a na základe algoritmu SKEWNESS a ORTHOGONAL, ktoré definujú kvalitu siete podľa Tab. 1 a Tab. 2. Kvalita buniek vypovedá o miere tvarovej deformácie buniek v porovnaní s jej ideálnou podobou. Kvalitná sieť je taká, ktorá sa skladá z na seba nadväzujúcich geometricky pravidelných približne rovnako veľkých a pravidelne po celej výpočtovej oblasti rozložených elementov (buniek). Čím je deformácia tvaru bunky výraznejšia, tým menej kvalitná je potom sieť. Kvalita siete má vplyv na dĺžku výpočtu a kvalitu výsledku.

Na základe záverečnej správy z roku 2019 (Experimenty v spoločnom laboratóriu SimConT „Fyzikálny model medzipanvy ŽP, a.s.“ za rok 2019, Zmluva o dielo č. P-102-0014/19), sa použila výpočtová sieť s tetrahedrálным jadrom a prizmatickou medznou vrstvou. Pri tomto type výpočtovej siete sa dosahovala najlepšia kontrolovaná kvalita na základe algoritmu SKEWNESS a ORTHOGONAL. Základné parametre výpočtových sietí pre jednotlivé konfigurácie sú nižšie pri konkrétnej skúšanej konfigurácii.



Obr. 45 3D vizualizácia modelu



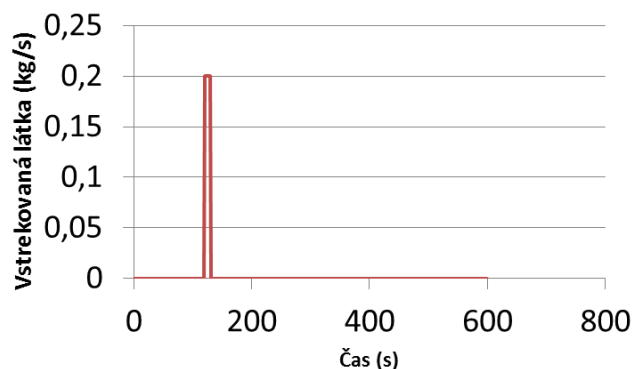
Obr. 46 3D vizualizácia modelu – pohľad z hora

2.3.1. Nastavenie riešiteľa Fluent

Matematický model medzipanvy bol modelovaný ako nestacionárny proces, pre možnosť analýzy C-kriviek. Nestacionárny model ukazuje stav systému v jednotlivých časových úsekoch odpovedajúcich nastavenému časovému kroku. Časový krok bol 0,1s.

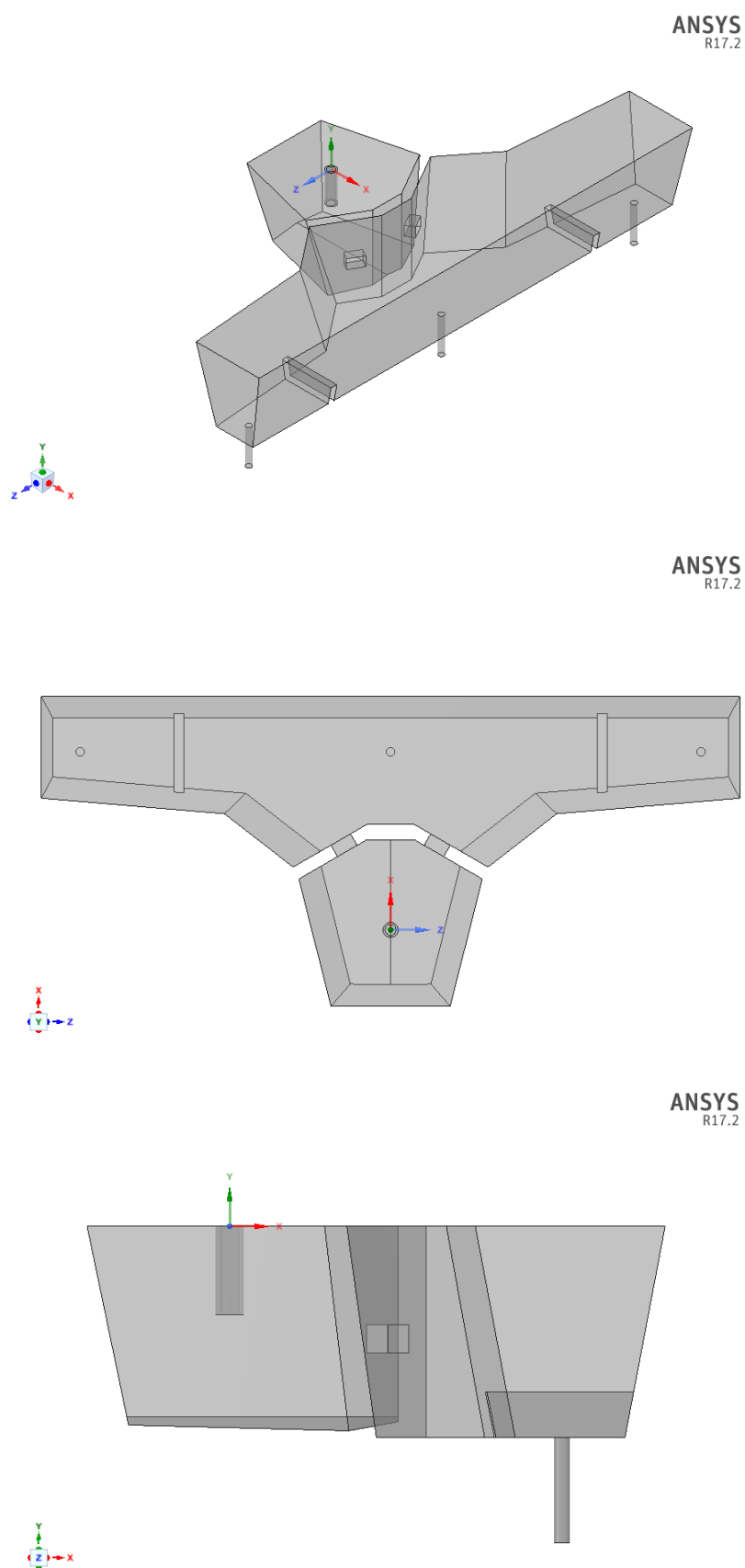
Okrajové podmienky modelu boli definované na základe analýzy fyzikálneho vodného modelu SimConT v mierke 1:2. (Okrajové podmienky sú fyzikálne veličiny definované na hraniciach výpočtovej oblasti, ktoré vyjadrujú fyzikálnu podstatu modelovaného deja).

Hlavnou hraničnou podmienkou na strane vstupu bol hmotnostný prietok vody do vodného modelu, ktorý bol nastavený ako konštanta (v čase sa hodnota nemenila). Vstrekovanie stopovacej látky do modelu bolo definované cez časovo závislú funkciu, ktorá bola zahrnutá do hmotnostného prietoku vody. Doba vstrekovania bola 6 sekúnd v množstve 150 ml. Na strane výstupu z modelu bola nastavená hraničná podmienka Outflow, ktorá prerozdeľuje hmotnostný tok na viaceré miesta nakoľko vodný model má 3 výstupy. Steny modelu boli definované hraničnou podmienkou Wall, ktorá prezentuje pevné steny výpočtovej oblasti.



Obr. 47 Vstrekovanie stopovacej látky

2.3.2. Medzipanva so štandardnou dopadovou doskou

**Obr. 48** Geometria medzipanvy so štandardnou dopadovou doskou

2.3.3. Zvolené okrajové a počiatkové podmienky

Simulácia je realizovaná pomocou Navier-Stokesových rovníc, spriemerovaných podľa Reynoldsa, v ktorých je potrebné nahradiť korelácie fluktuácií rýchlosti modelom turbulencie. Existujú rôzne RANS modely, ktoré zjednodušujú problém pridaním rôznych ďalších transportných rovníc. Modely typu $k - \varepsilon$, a ďalšie zavádzajú aj tzv. turbulentnú viskozitu cez Boussinesquovu hypotézu. Pre časovo závislé úlohy sa používajú metódy URANS (Unsteady-RANS), ktoré predpokladajú časovú mierku mnohonásobne menšiu ako je časová miera stredného prúdu. Tieto modely sú schopné zachytiť nestability, ako je uvoľňovanie vírov, ale nie sú schopné zachytiť turbulentné nestability. Výpočet riešia teda sekvenciou stacionárnych javov.

Model $k - \varepsilon$ Tento model je jeden z najznámejších a v inžinierskej praxi veľmi často používaných modelov. Jeho popularita v priemyselných aplikáciách je daná robustnosťou, ekonomickosťou výpočtu a dostatočnou presnosťou pre široký rozsah typov turbulentného prúdenia. Je to semi-empirický model. Hlavným predpokladom je, že prúdenie je plne turbulentné a efekt molekulárnej viskozity je zanedbateľný. $k - \varepsilon$ model je použiteľný len pri vysokých Reynoldsových číslach. Model je nevhodný pre nadmernú difúziu pre mnoho situácií: veľké zakrivenie prúdu, víry, rotáciu, odtrhnutie prúdu a nízke Reynoldsové čísla. Z toho dôvodu sa z modelu vyvinuli ďalšie modifikácie, ktoré využívajú jeho výhody a snažia sa minimalizovať nedostatky.

Realizable $k - \varepsilon$ model Obsahuje inú formuláciu turbulentnej viskozity a modifikovanú transportnú rovnicu pre rozptyl energie ε . Prináša lepšie výsledky pre prúdenie s veľkým zakriveným prúdom, vírmi, alebo rotáciou. Z uvedených modelov dosahuje najlepšie výsledky, preto je jeho používanie odporúčané.

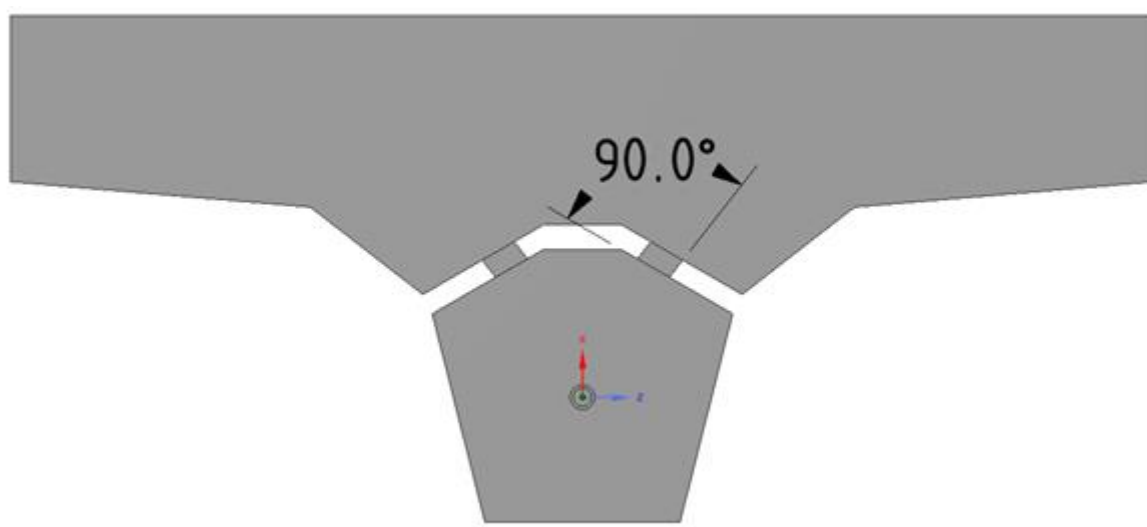
Parametre zadané v riešiteľovi:

- Nestacionárny výpočet (aby sme vedeli vykresliť C-krivku)
- Uvažujeme s pôsobením gravitácie v osi $z = -9.81 \text{ m.s}^{-2}$
- Model - Realizable $k - \varepsilon$
- Materiál – voda
- Hraničné podmienky – vstup ako Mass Flow Rate
- Metóda riešenia – jednoduchá (Simple), Inicializácia – zo všetkých zón (from all zones)
- Šmykové trenie na stenách – neuvažuje sa
- Počet iterácií – 50 s časovým krokom 600 na 1 sekundu

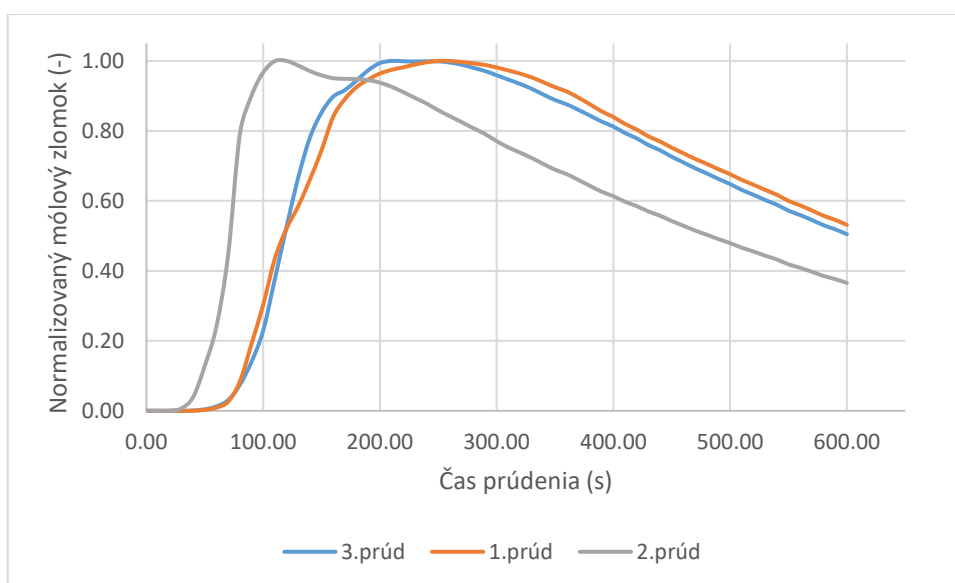
2.4. Optimalizácia vnútorného dizajnu MP

Optimalizáciu vnútorného dizajnu MP s cieľom minimalizovať rozdiely retenčných časov medzi 2. (stredným), 1. a 3. (krajnými) lejacími prúdmi súčasne s rešpektovaním požiadavky na elimináciu nadmerného opotrebenia pracovnej výmurovky MP v oblasti troskovej čiary spôsobeného dynamickým prúdením ocele vo vtokovej časti bol zmenený uhol otvorov z hubice. Všetky uvedené simulácie sú porovnávané so štandardnou (aktuálne používanou) konfiguráciou medzipanvy – ďalej len štandardná konfigurácia.

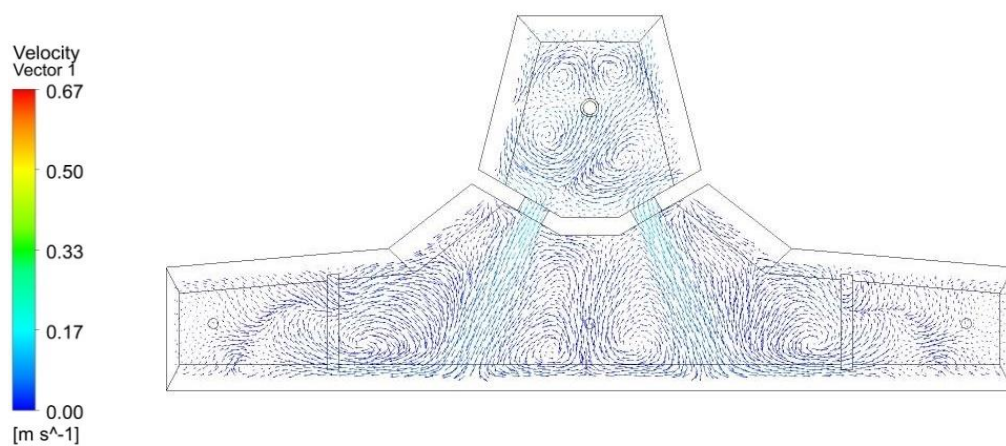
2.4.1. Štandardná (aktuálne používaná) konfigurácia MP



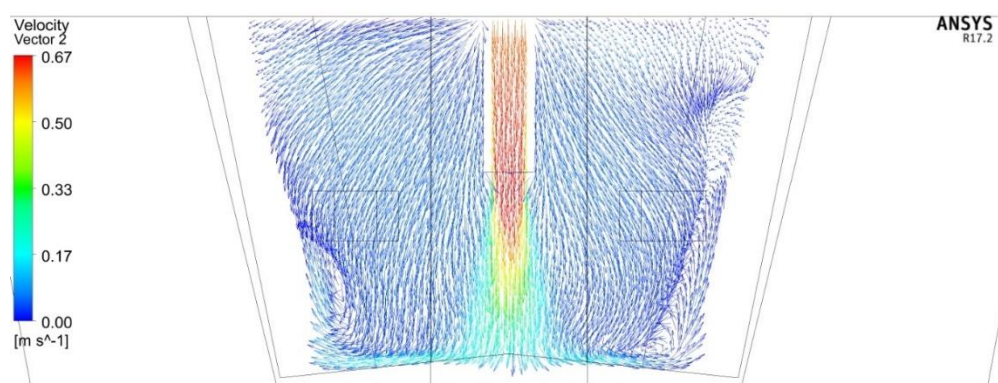
Obr. 49 Štandardná konfigurácia MP



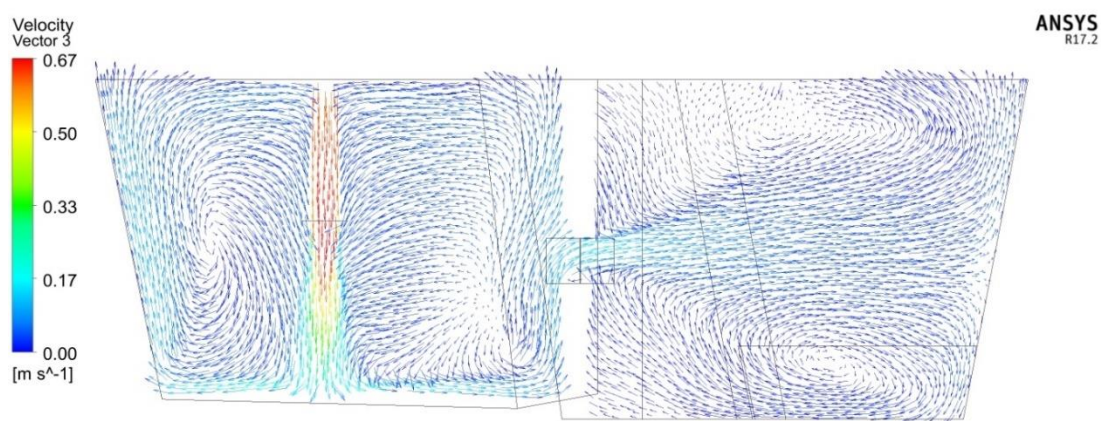
Obr. 50 C-krivky – štandardná konfigurácia



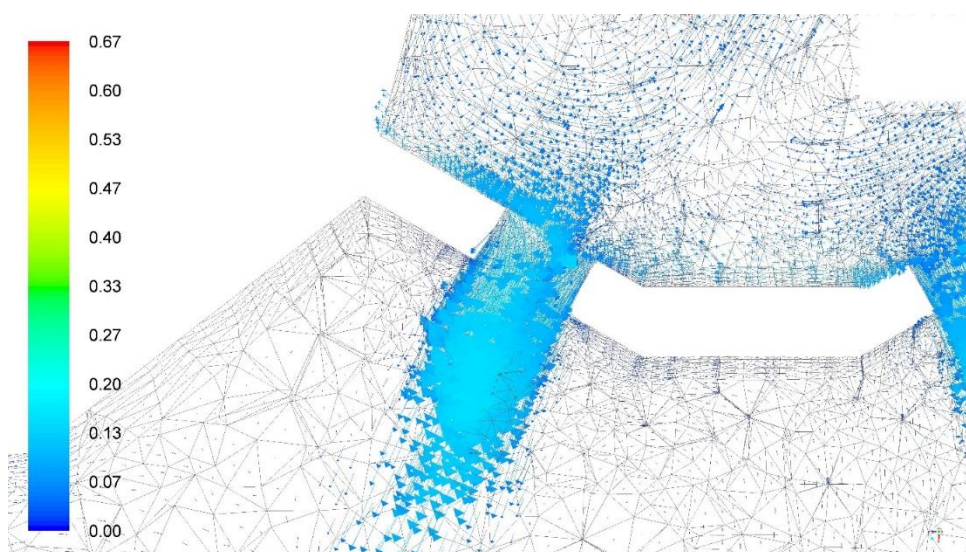
Obr. 51 Vektory prúdenia – pohľad zhora, štandardná konfigurácia



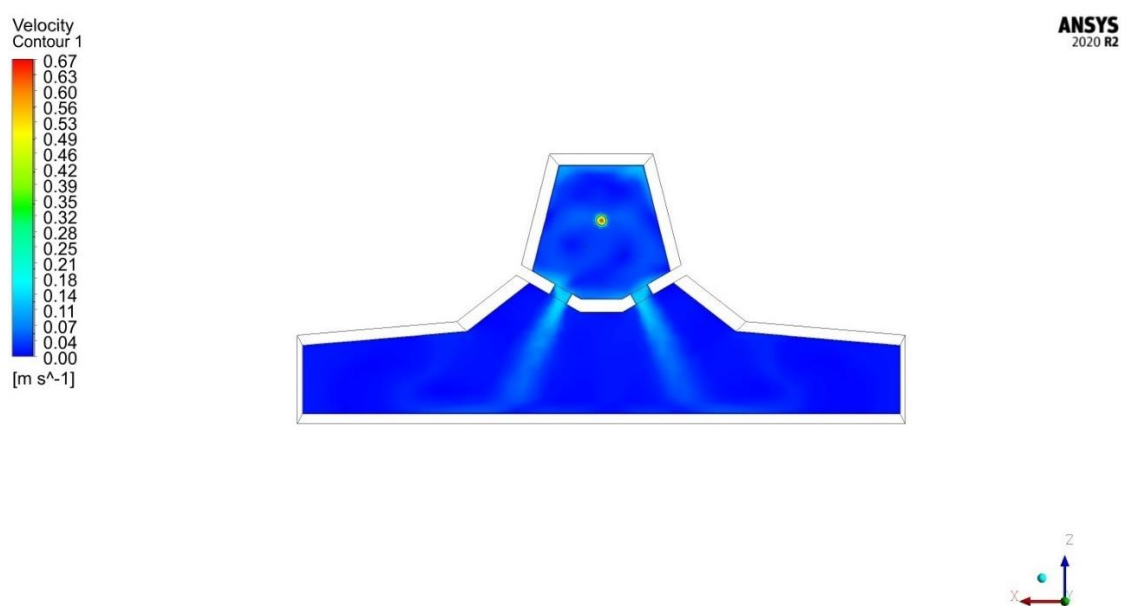
Obr. 52 Vektory prúdenia – pohľad spredu, štandardná konfigurácia



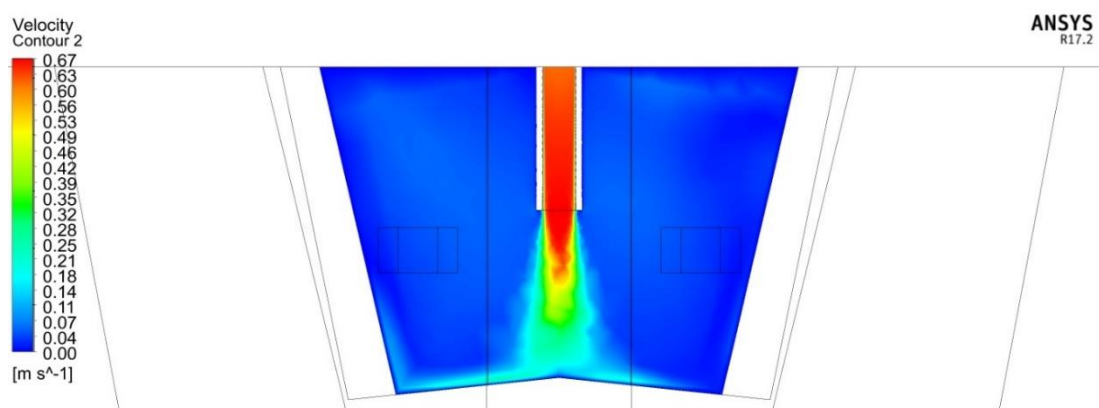
Obr. 53 Vektory prúdenia – pohľad z boku, štandardná konfigurácia



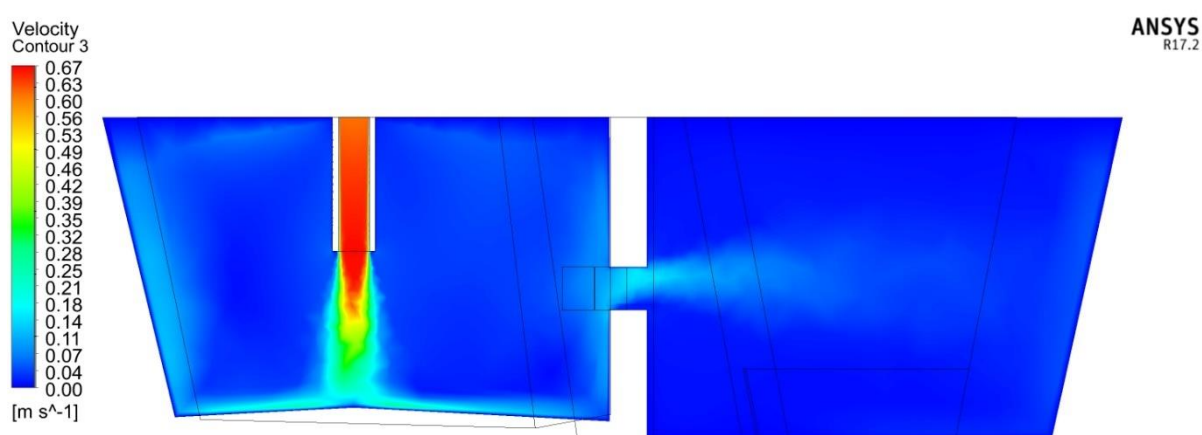
Obr. 54 Vektor prúdenia – detailný pohľad zhora, štandardná konfigurácia



Obr. 55 Kontúry prúdenia– pohľad zhora, štandardná konfigurácia

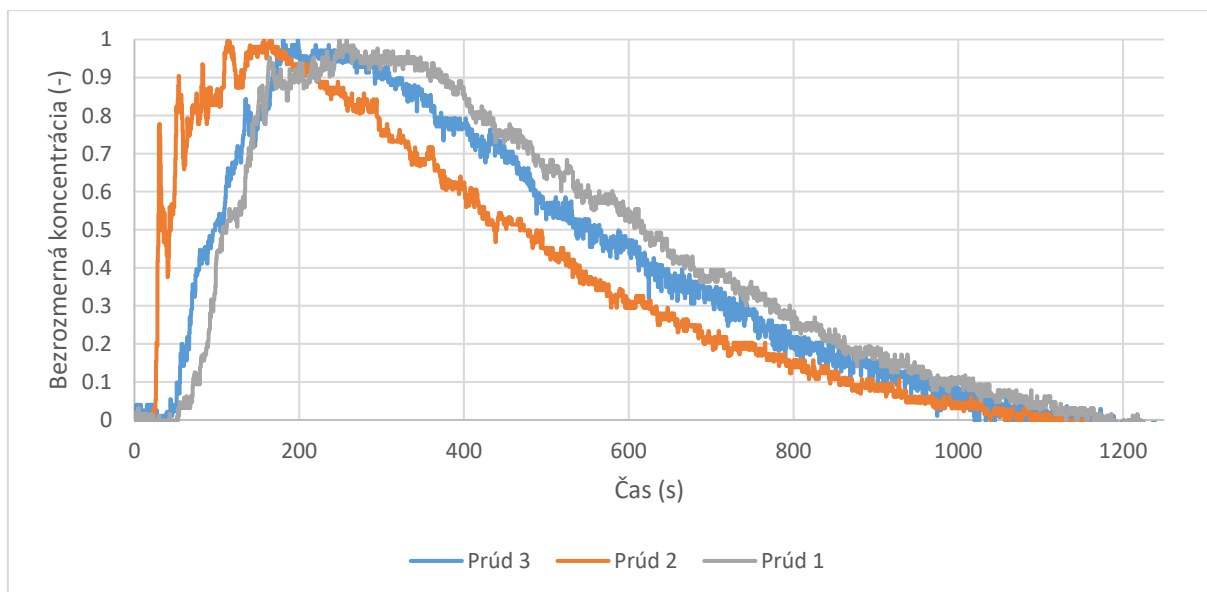


Obr. 56 Kontúry prúdenia–pohľad spredu, štandardná konfigurácia



Obr. 57 Kontúry prúdenia– pohľad zboku, štandardná konfigurácia

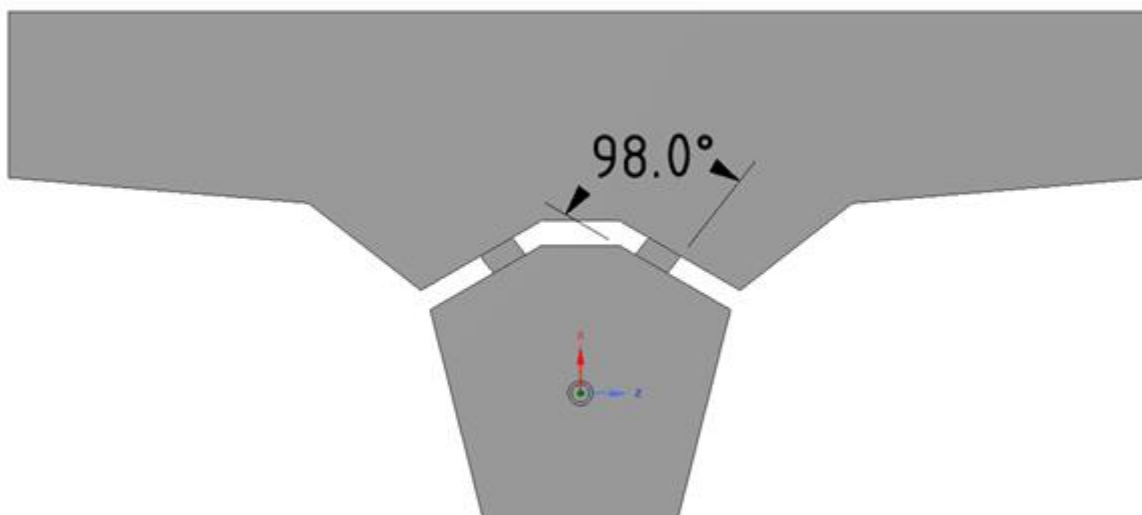
Z distribúcie retenčných časov medzi jednotlivé lejacie prúdy (**Obr. 58**) vyplýva, že najkratší čas má prostredný prúd, teda prúd č.2. Tento výsledok bol potvrdený aj fyzikálnymi simuláciami vo výskumnej správe „Fyzikálny model medzipanvy ŽP, a.s.“ za rok 2019, Obr.15.



Obr. 58 C-krivky pre štandardnú konfiguráciu (fyzikálna simulácia)

So zámerom predĺžiť retenčný čas prúdu č.2, bolo urobených niekoľko simulácií s rôznym odklonom výtokových otvorov v prepážke a to v uhloch 8° , 12° a 16° od ich pôvodnej kolmej osi.

2.4.2. Odklon otvorov o 8°



Obr. 59 Geometria medzipanvy so štandardnou dopadovou doskou s odklonom otvorov o 8°

2.4.2.1. Základné parametre výpočtovej siete:

Počet uzlov: 116685

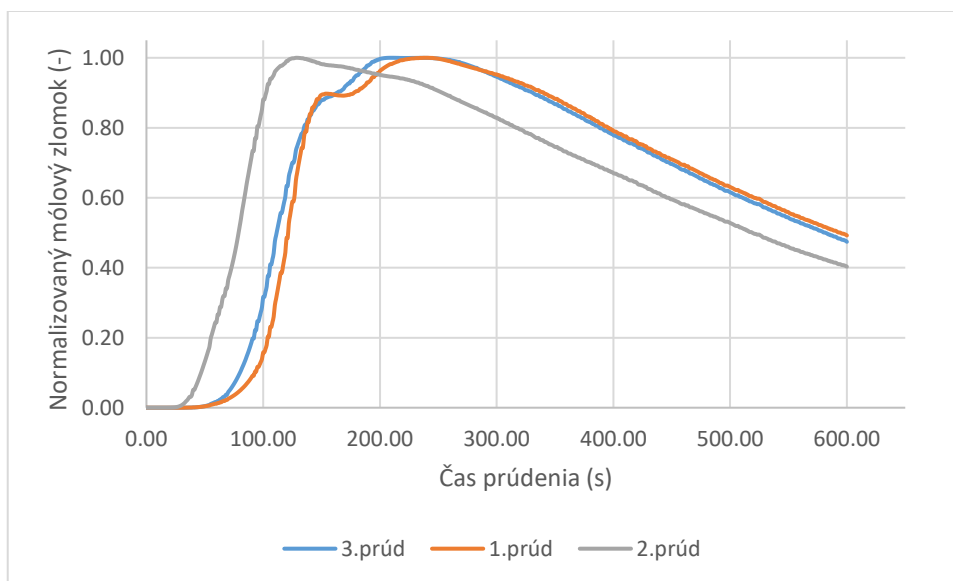
Počet elementov: 370417

Kvalita skewness (skosenie):

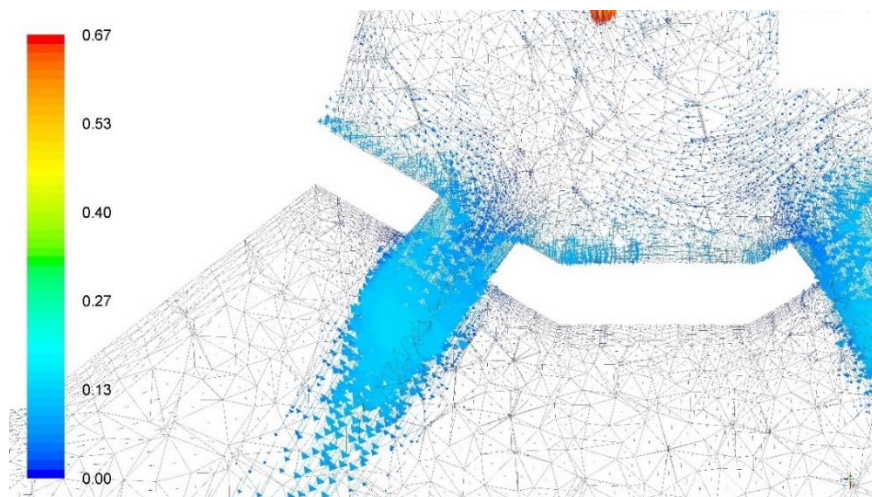
- Max: 0,8553
- Min: 0,018

Kontrola kvality orthogonal (ortogonálna kvalita):

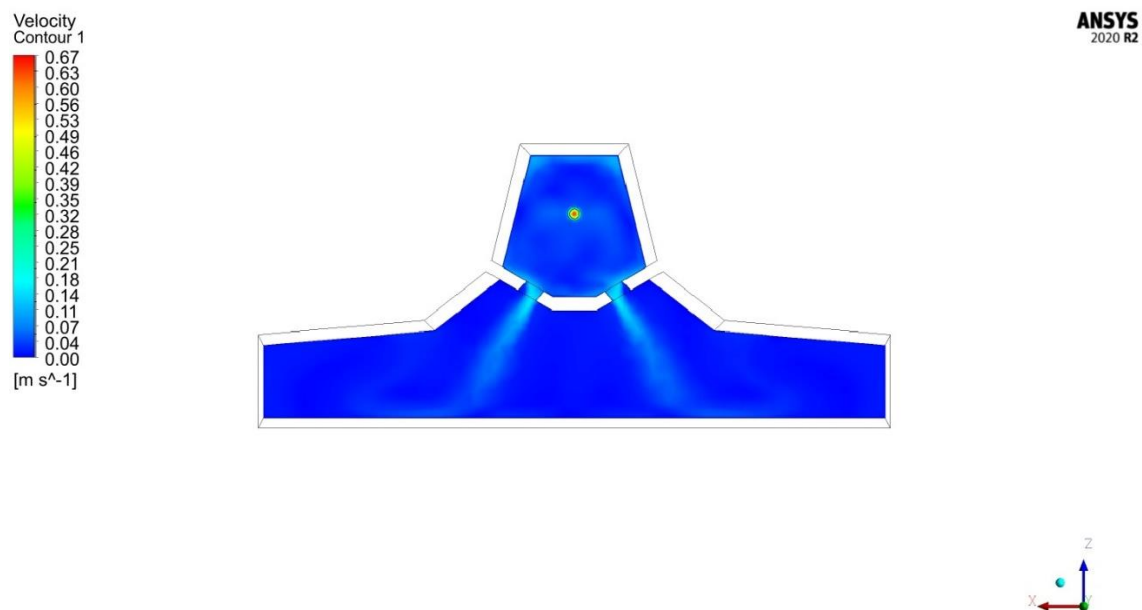
- Max: 0,99
- Min: 0,25



Obr. 60 C-krivky pri 8° odklone otvorov

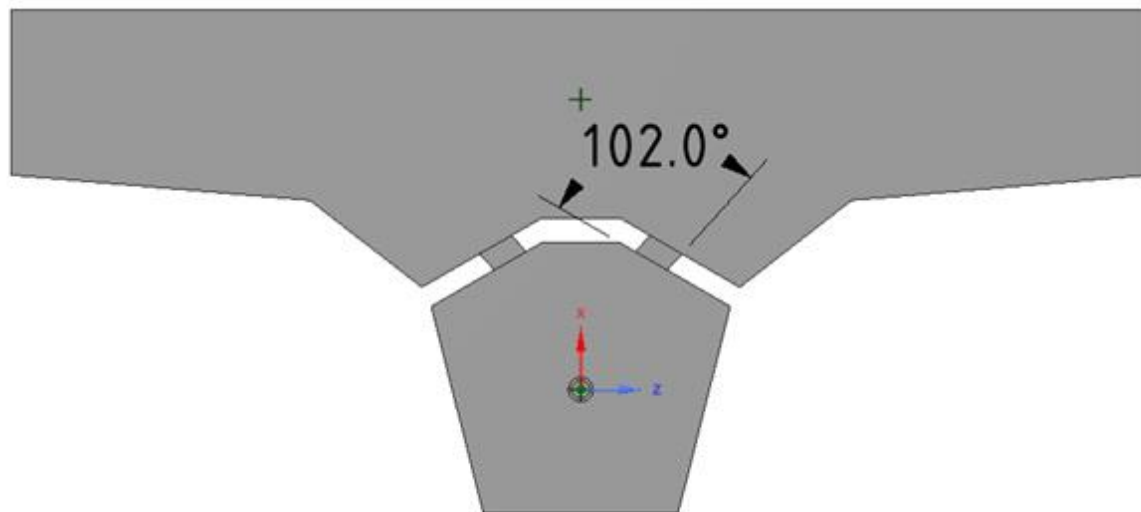


Obr. 61 Vektor prúdenia pri 8° odklone otvorov



Obr. 62 Kontúry prúdenia pri 8° odklone otvorov

2.4.3. Odklon otvorov o 12°



Obr. 63 Geometria medzipanvy so štandardnou dopadovou doskou s odklonom otvorov o 12°

2.4.3.1. Základné parametre výpočtovej siete:

Počet uzlov: 116978

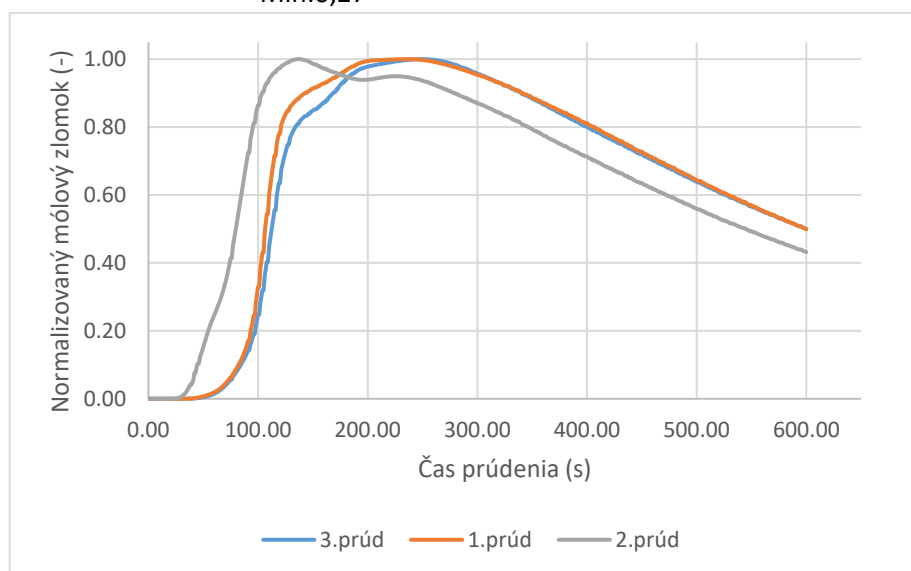
Počet elementov: 371686

Kvalita skewness:

- Max: 0,88
- Min: 0,018

Kontrola kvality orthogonal:

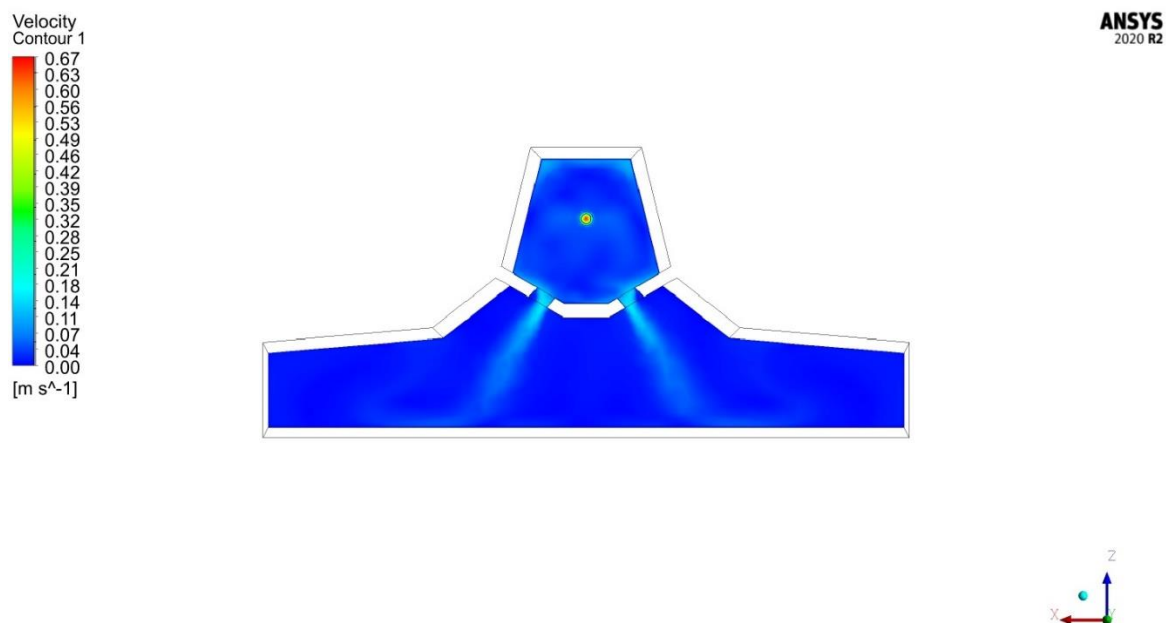
- Max:0,99
- Min:0,27



Obr. 64 C-krivky pri 12° odklone otvorov

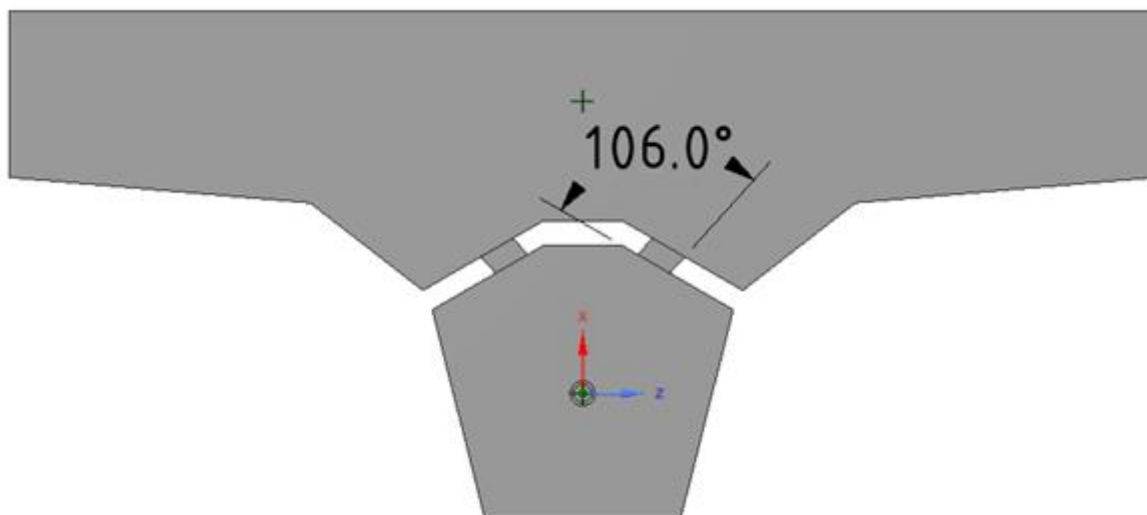


Obr. 65 Vektor prúdenia pri 12° odklone otvorov



Obr. 66 Kontúry prúdenia pri 12° odklone otvorov

2.4.4. Odklon otvorov o 16°



Obr. 67 Geometria medzipanvy so štandardnou dopadovou doskou s odklonom otvorov o 18°

2.4.4.1. Základné parametre výpočtovej siete:

Počet uzlov: 116573

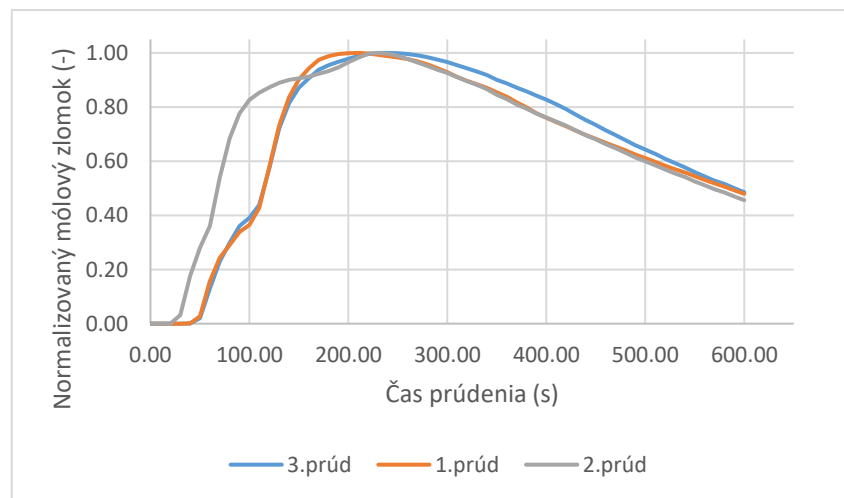
Počet elementov: 369892

Kvalita skewness:

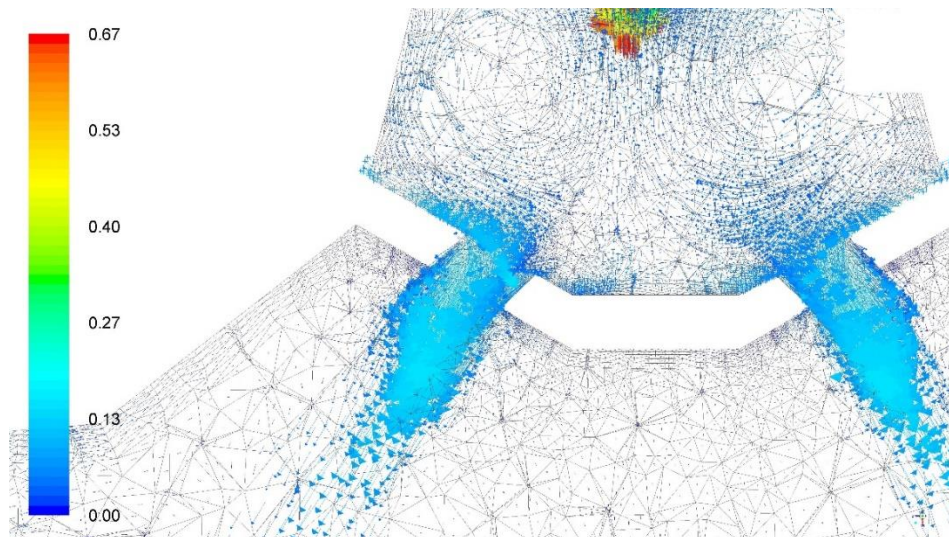
- Max: 0,88
- Min: 0,009

Kontrola kvality orthogonal:

- Max: 0,99
- Min: 0,22



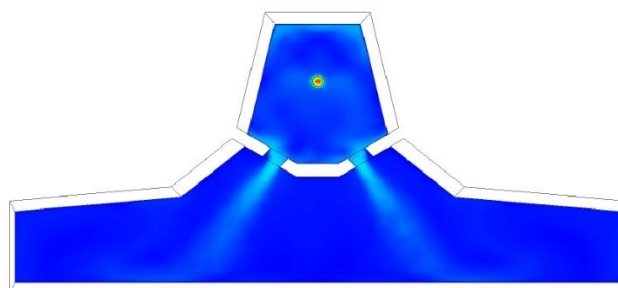
Obr. 68 C-krivky pri 16° odklone otvorov



Obr. 69 Vektor prúdenia pri 16° odklone otvorov

Velocity
Contour 1
0.67
0.63
0.60
0.56
0.53
0.49
0.46
0.42
0.39
0.35
0.32
0.28
0.25
0.21
0.18
0.14
0.11
0.07
0.04
0.00
[m s⁻¹]

ANSYS
2020 R2

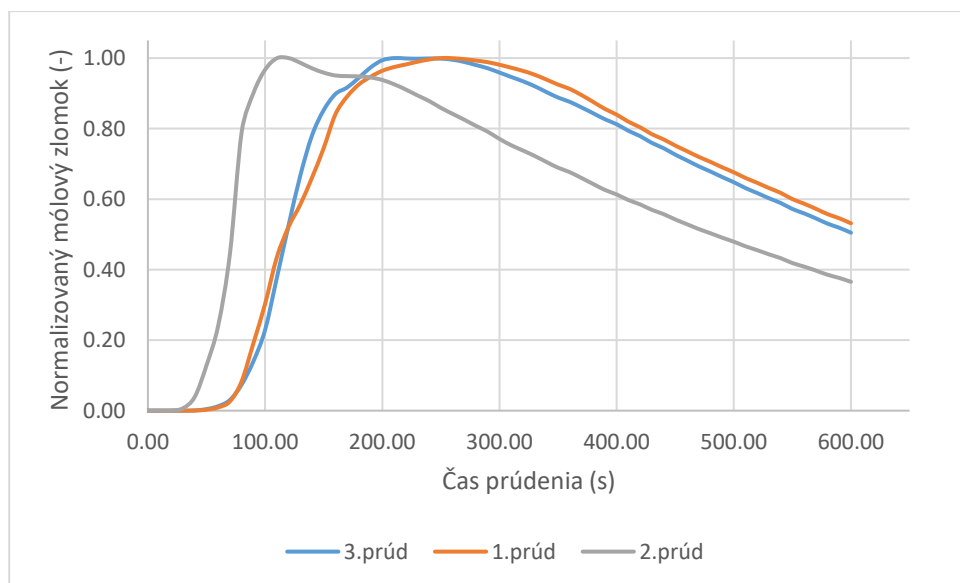


Obr. 70 Kontúry prúdenia pri 16° odklone otvorov

2.5. Porovnanie výsledkov matematických simulácií pre MP so štandardnými a vychýlenými otvormi v prepážke

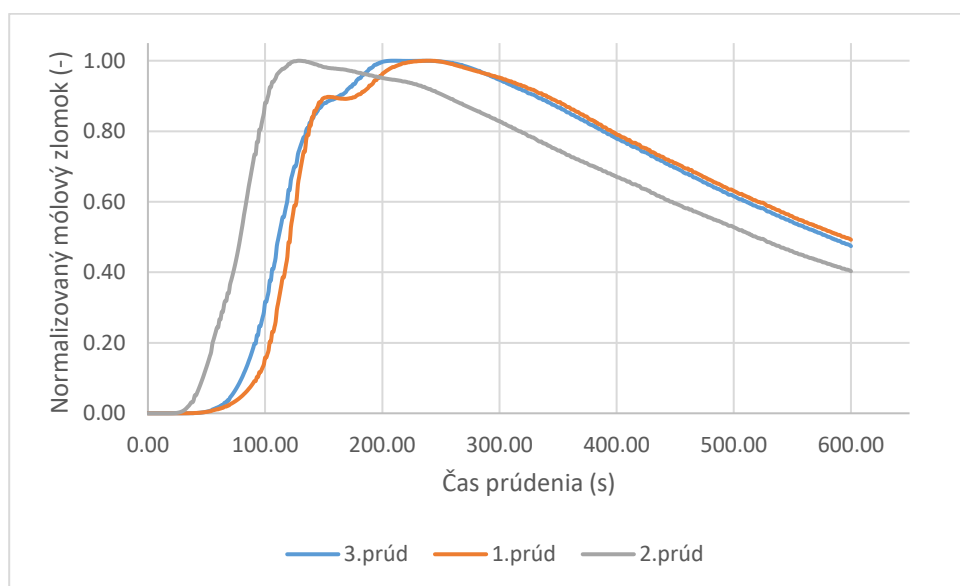
2.5.1. Porovnanie C-kriviek

Štandardná konfigurácia



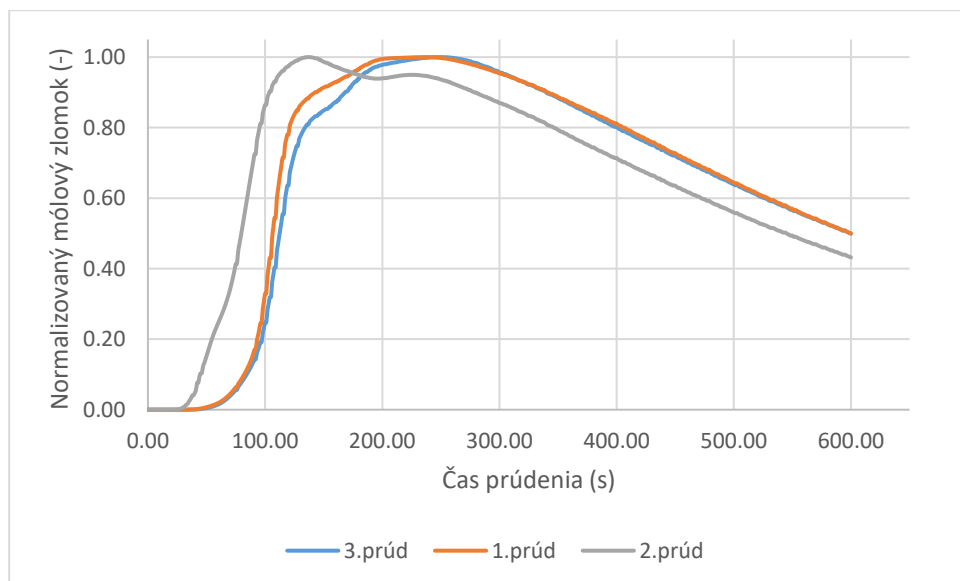
Obr. 71 Štandardná konfigurácia – Graf

Odklon otvorov 8°



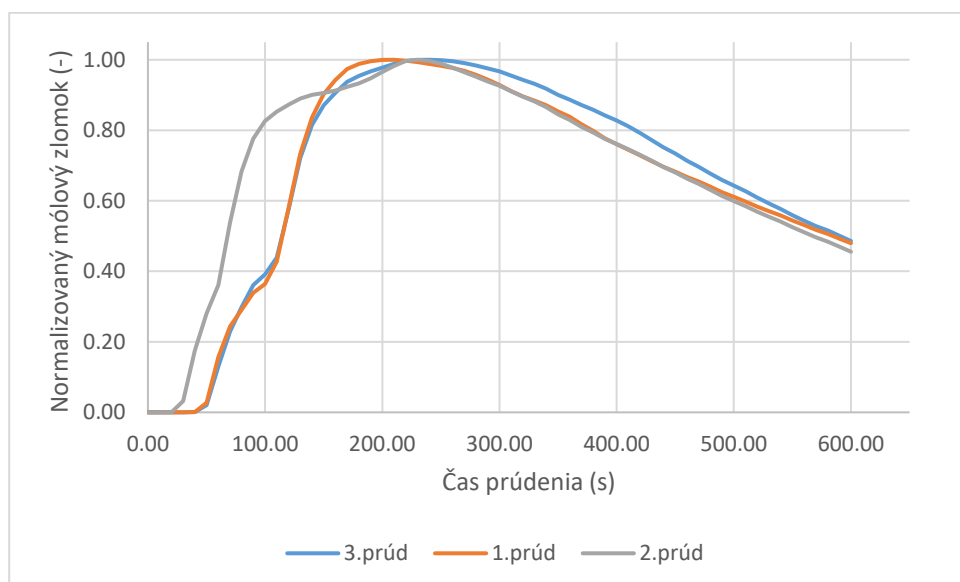
Obr. 72 Odklon otvorov 8° - Graf

Odklon
otvorov 12°



Obr. 73 Odklon otvorov 12° - Graf

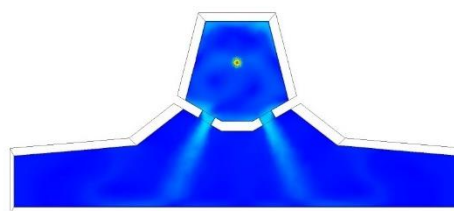
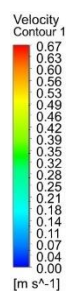
Odklon
otvorov 16°



Obr. 74 Odklon otvorov 16°

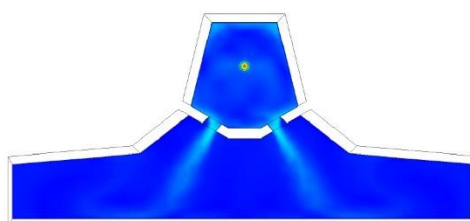
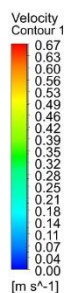
2.5.2. Porovnanie kontúr prúdenia v čase $t = 600s$

Štandardná
konfigurácia



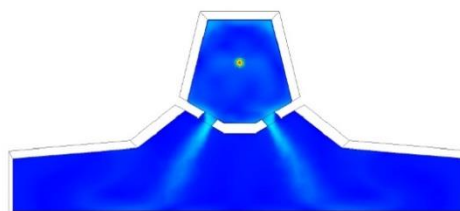
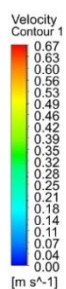
Obr. 75 Štandardná konfigurácia – Kontúry

Odklon otvorov 8°

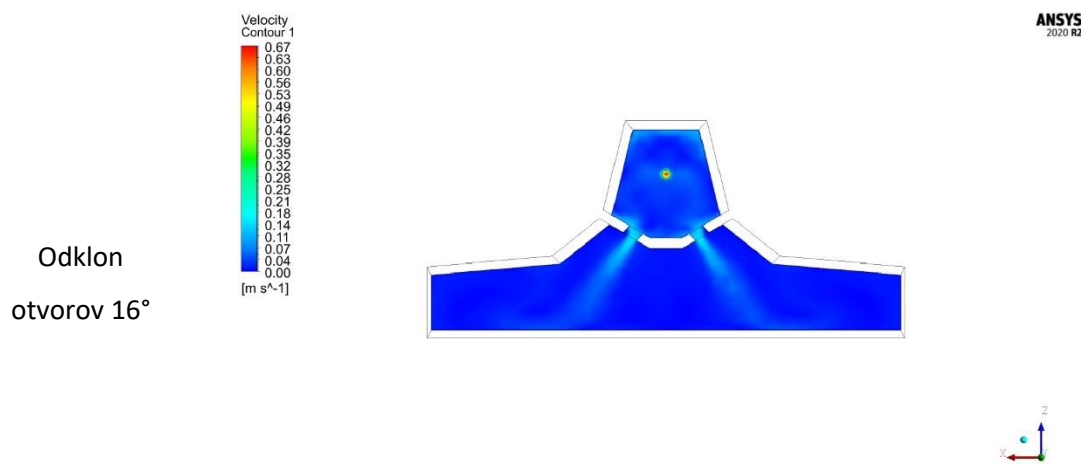


Obr. 76 Odklon otvorov 8° - Kontúry

Odklon otvorov
12°

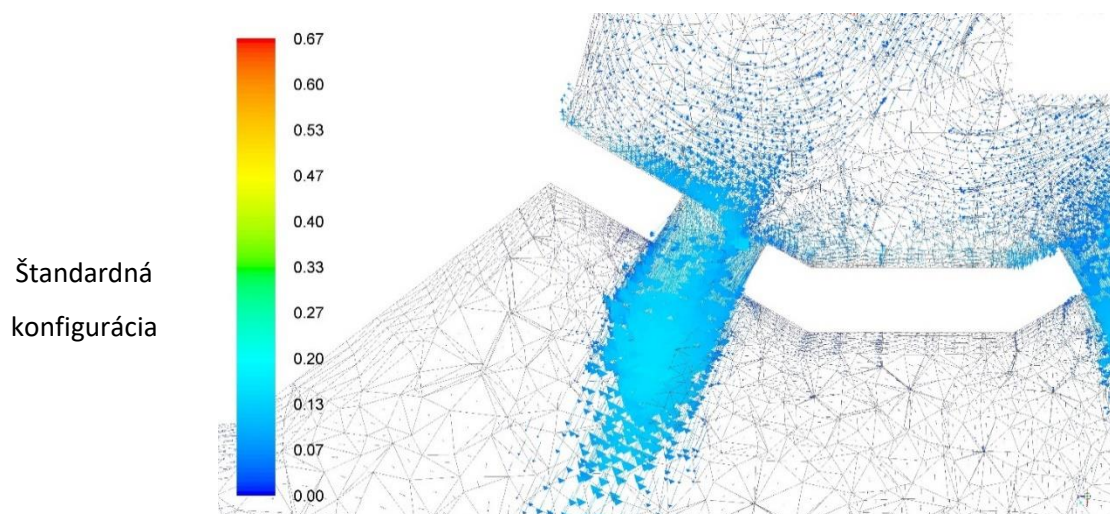


Obr. 77 Odklon otvorov 12° - Kontúry

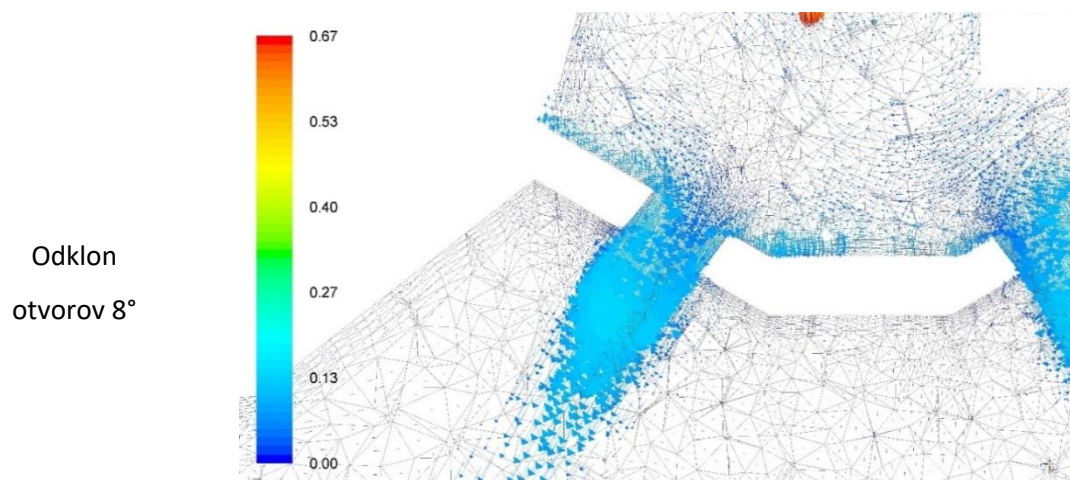


Obr. 78 Odklon otvorov 16° - Kontúry

2.5.3. Porovnanie detailu otvoru - prúdnice



Obr. 79 Štandardná konfigurácia - Vektory



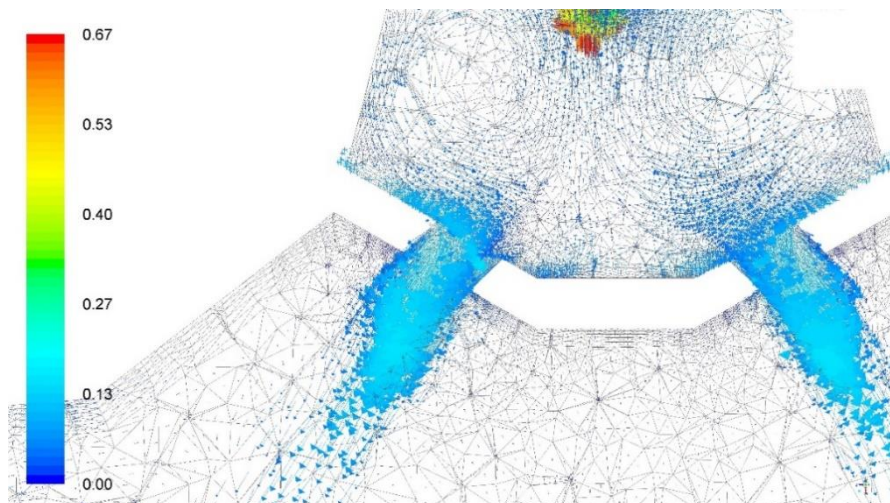
Obr. 80 Odklon otvorov 8° - Vektory

Odklon
otvorov 12°



Obr. 81 Odklon otvorov 12°

Odklon
otvorov 16°

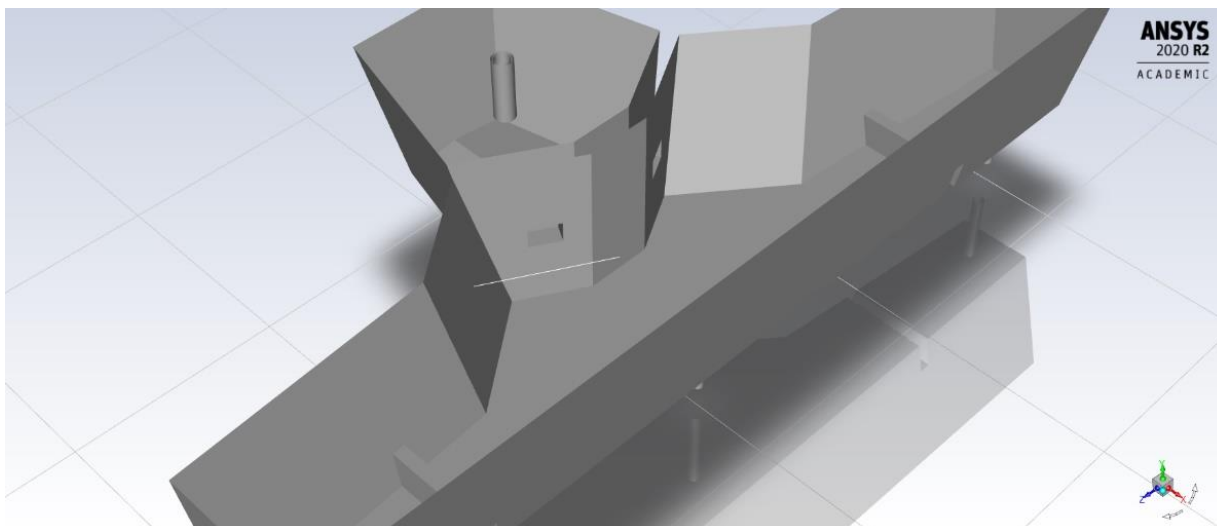


Obr. 82 Odklon otvorov 16°

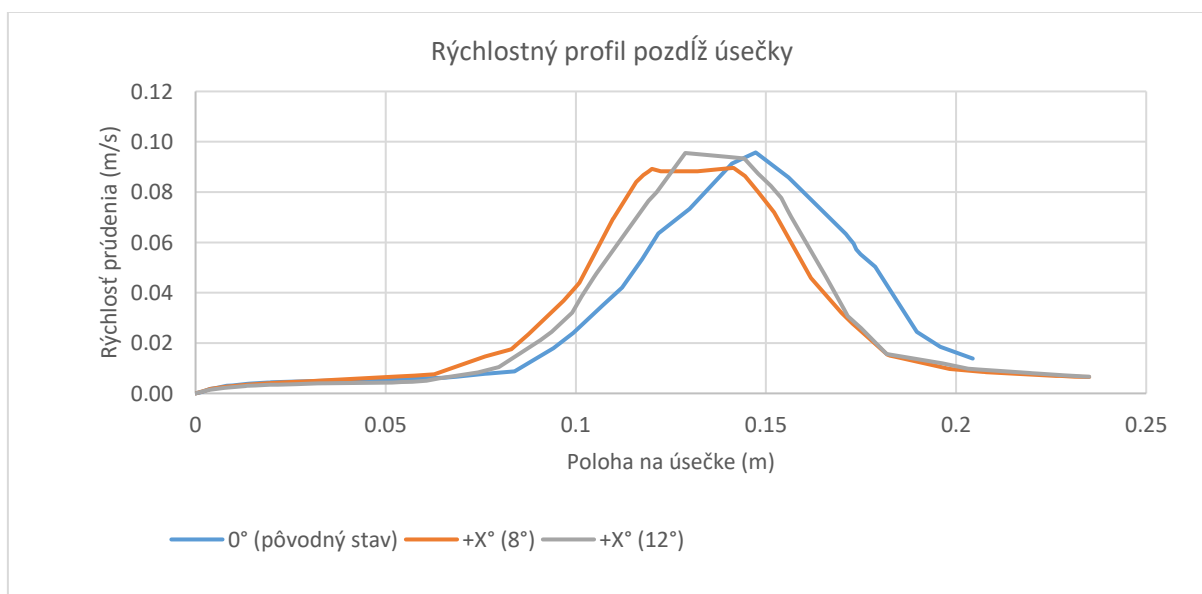
Z pohľadu retenčných časov na jednotlivých lejacích prúdoch sa javí ako najvhodnejší variant vychýlenia otvorov o 8° smerom od prúdu č.2. Pri väčších uhloch vychýlenia už dochádzalo k deformácii priebehu C-kriviek u stredného prúdu, čo nie je žiadúce.

2.5.4. Sledovanie rýchlosti prúdenia na zvolenej úsečke

Sledovanie rýchlosti prúdenia na zvolenej úsečke bolo realizované z dôvodu zistenia zmeny rýchlostného profilu od bočnej steny do priestoru medzipanvy. Začiatok úsečky bol od steny medzipanvy a vo výške osi otvoru v prepážke.



Obr. 83 Geometria medzipanvy so štandardnou dopadovou doskou s vyznačenou úsečkou na ktorej bola sledovaná rýchlosť prúdenia

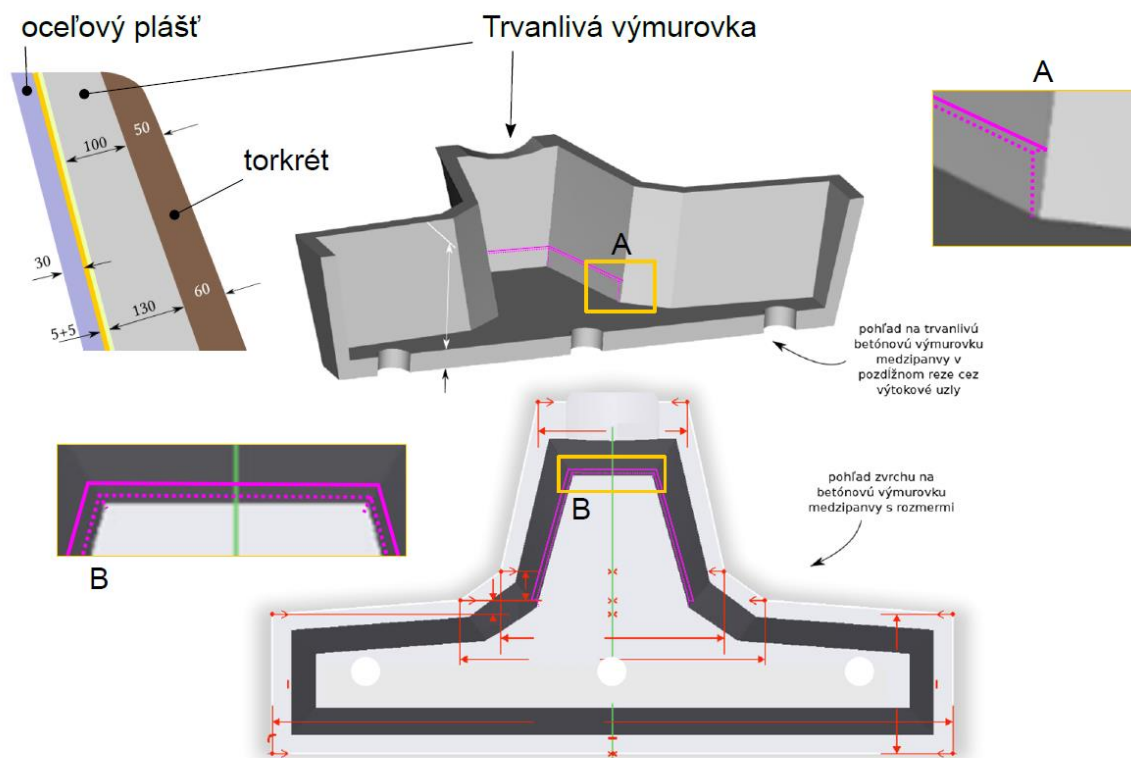


Obr. 84 Rýchlostný profil pozdĺž úsečky

Bolo zistené, že rýchlostný profil pri vychýlení otvorov o 8° má plochý priebeh, bez výrazného maxima.

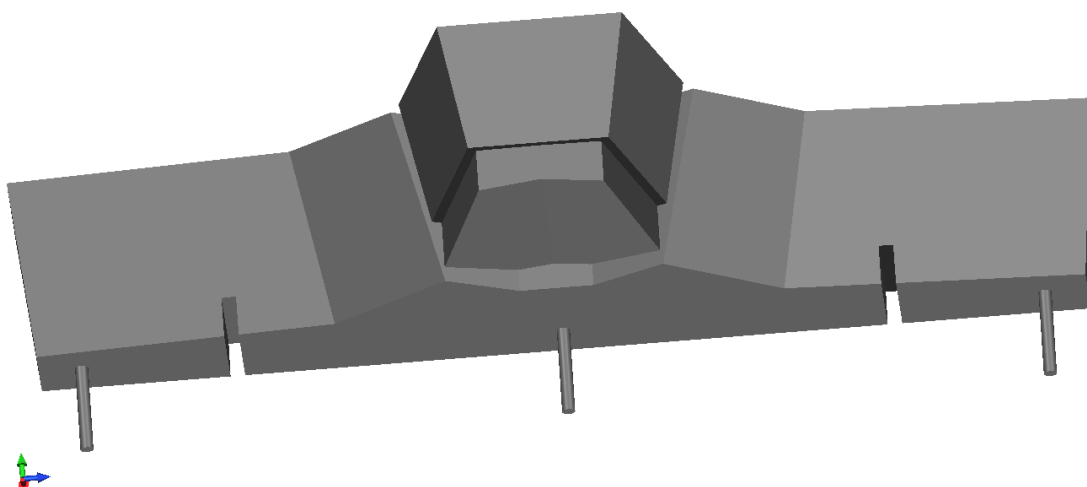
2.6. Matematické simulácie návrhu dvojstupňovej hubice

Na základe návrhu (**Obr. 85**) zo ŽP VVC (Ing. Karol Ondrejko, PhD., Vedúci oddelenia modelovania a simulácií procesov) bol vytvorený model dvojstupňovej hubice. Predpokladá sa, že tento tvar hubice by mohol prispieť k vhodnejšiemu prúdeniu ocele na medzifázovom rozhraní oceľ – troska a tým prispieť ku zníženiu erózie pracovnej výmurovky v oblasti troskovej čiary. Výška stupienka (rímky) od dna MP je 83mm, vzdialenosť hrany od steny je 19mm a v prípade zaoblenej hrany je rádius R7 (uvedené platí pre model MP v mierke 1:2).

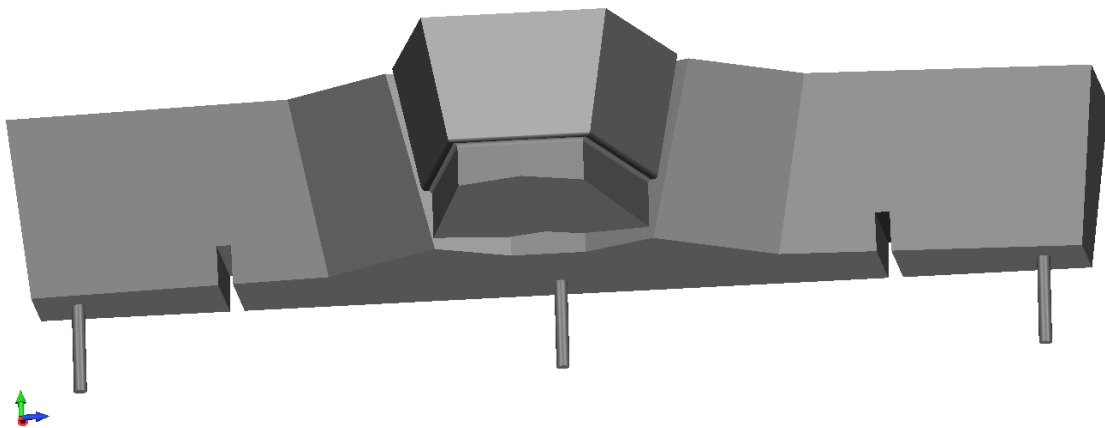


Obr. 85 Návrh dvojstupňovej hubice

Úprava hubice bola realizovaná podľa návrhu ale dvoch prevedeniach. Dodaný prvý stupeň buď mal ostrú, alebo zaoblenú hranu. Prvotne boli urobené simulácie pomocou Discovery Live, kde bolo zistené rozdielne prúdenie. Na základe tohto výsledku sa realizovali numerické simulácie tak ako v prípade predchádzajúcich konfigurácií.



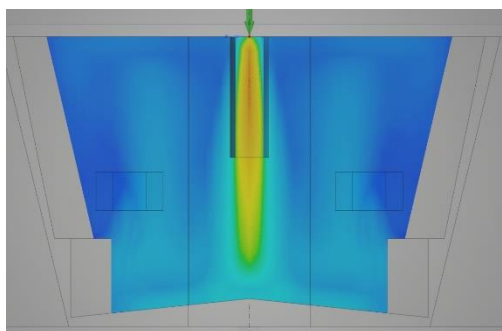
Obr. 86 Ostrá hrana



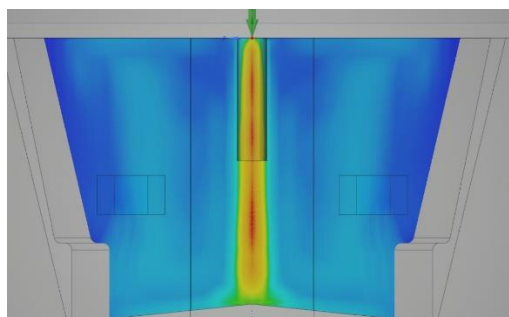
Obr. 87 Zaoblená hrana

2.6.1. Výsledky simulácií prúdenia z Discovery Live pre dvojstupňovú hubicu

Prvé simulácie pre prúdenie pre navrhovanú hubicu boli urobené v programe Discovery Live.



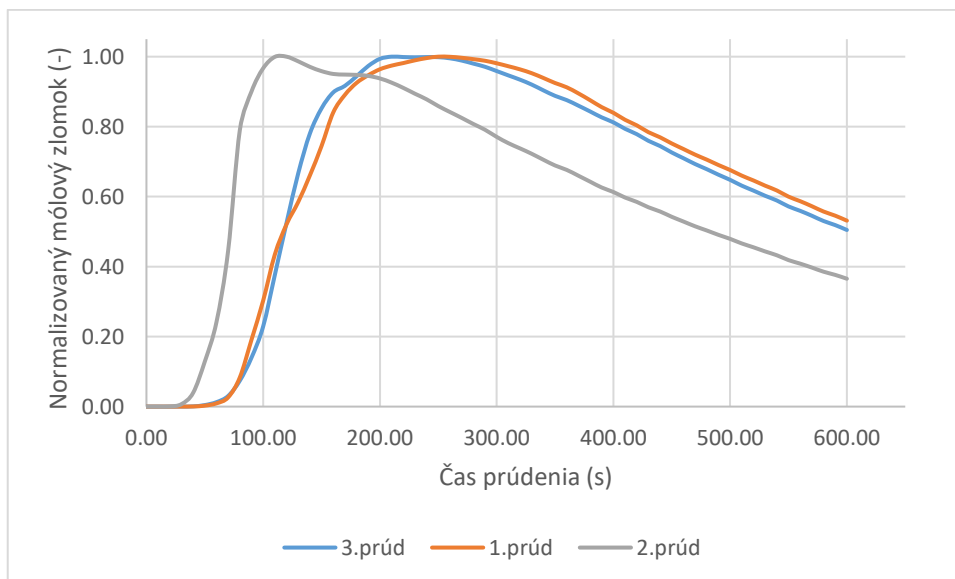
Obr. 88 Ostrá hrana – Discovery LIVE



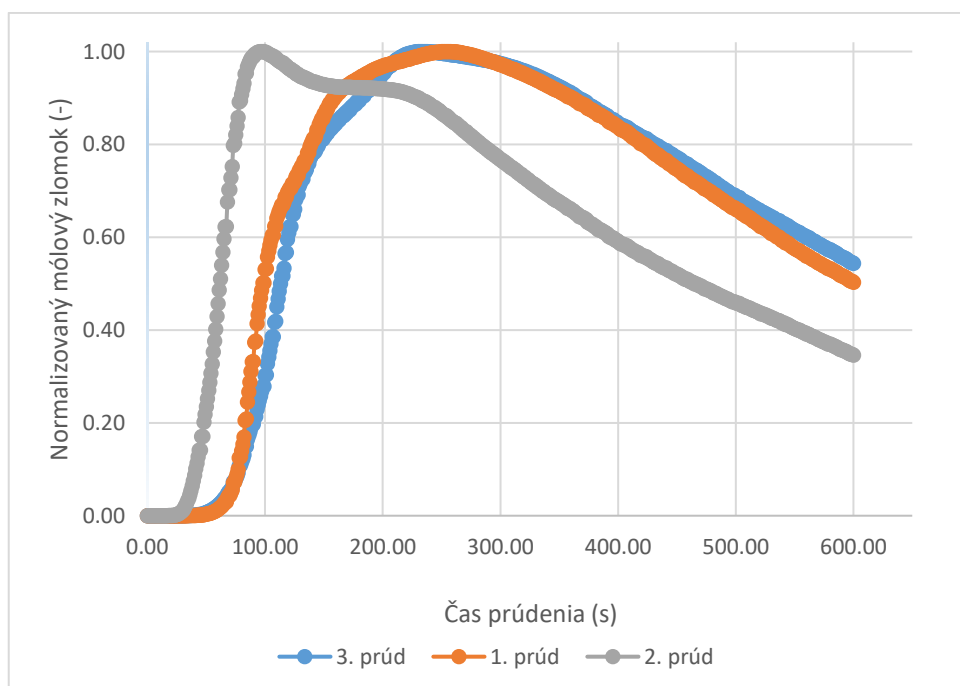
Obr. 89 Zaoblená hrana – Discovery LIVE

2.6.2. Výsledok matematických simulácií pre dvojstupňovú hubicu

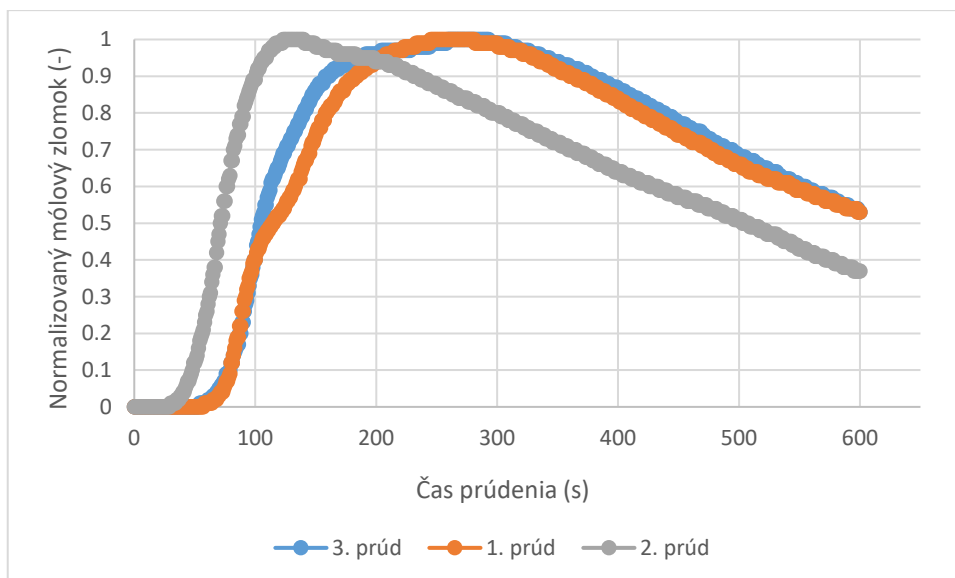
Nižšie uvedené výsledky simulácií boli urobené v programe Ansys Fluent.



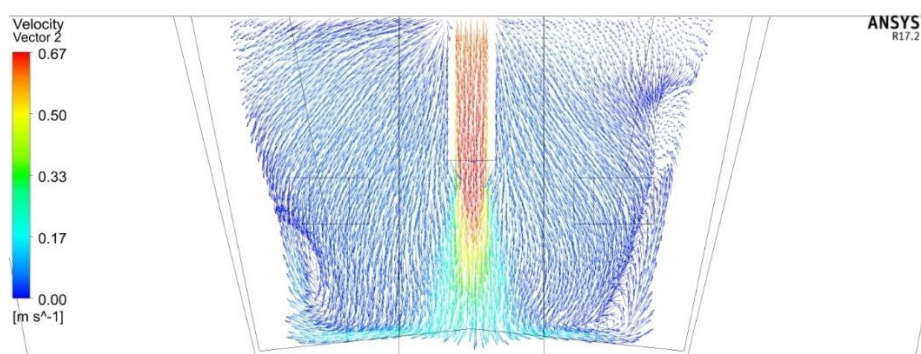
Obr. 90 C-krivky – štandardná konfigurácia



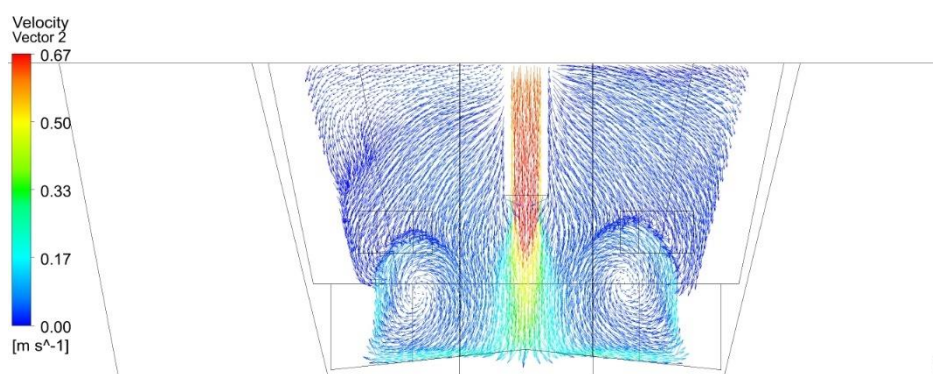
Obr. 91 C-krivka pre dvojstupňovú hubicu – ostrá hrana



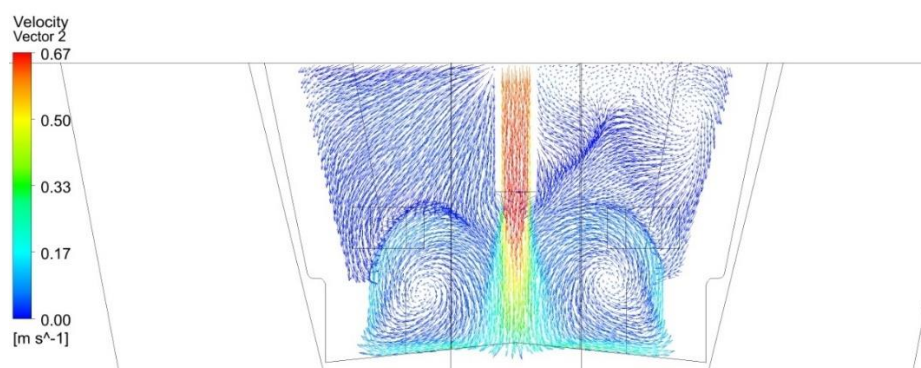
Obr. 92 C-krivka pre dvojstupňovú hubicu – zaoblená hrana



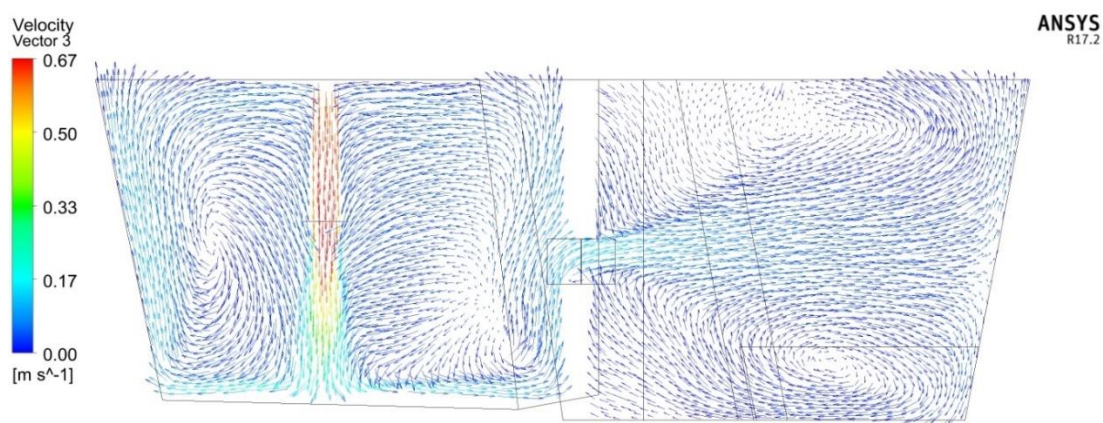
Obr. 93 Vektory prúdenia –pohľad spredu, štandardná konfigurácia



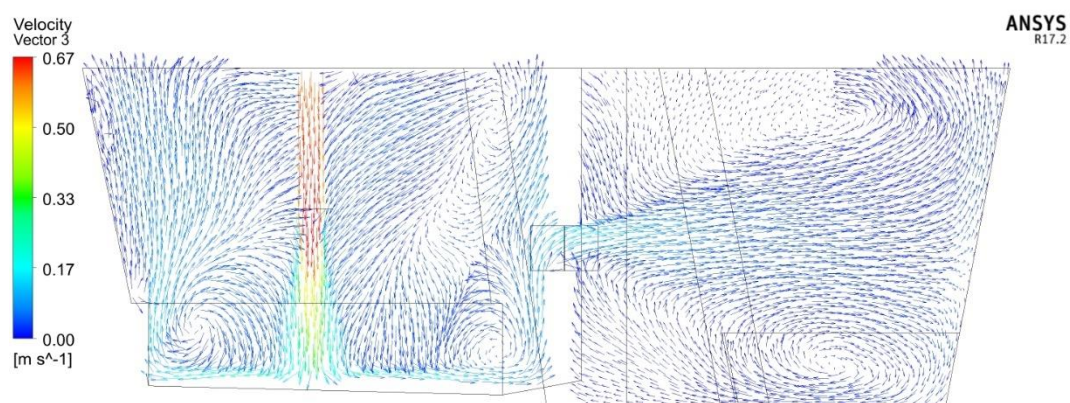
Obr. 94 Vektory prúdenia –pohľad spredu, ostrá hrana



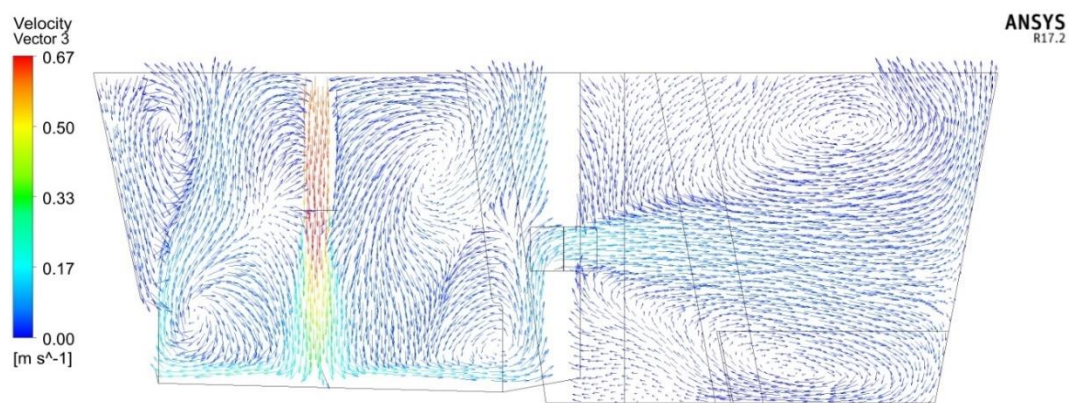
Obr. 95 Vektory prúdenia – pohľad spredu, zaoblená hrana



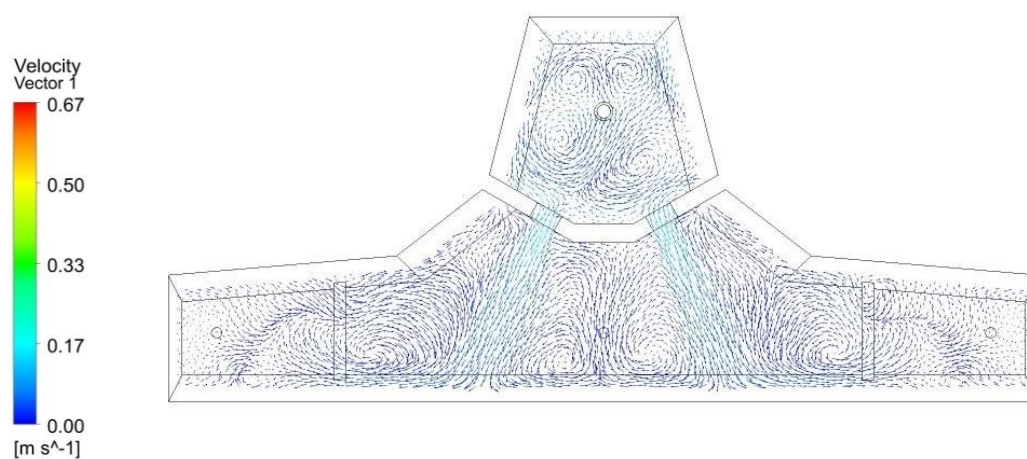
Obr. 96 Vektory prúdenia – pohľad zboku, štandardná konfigurácia



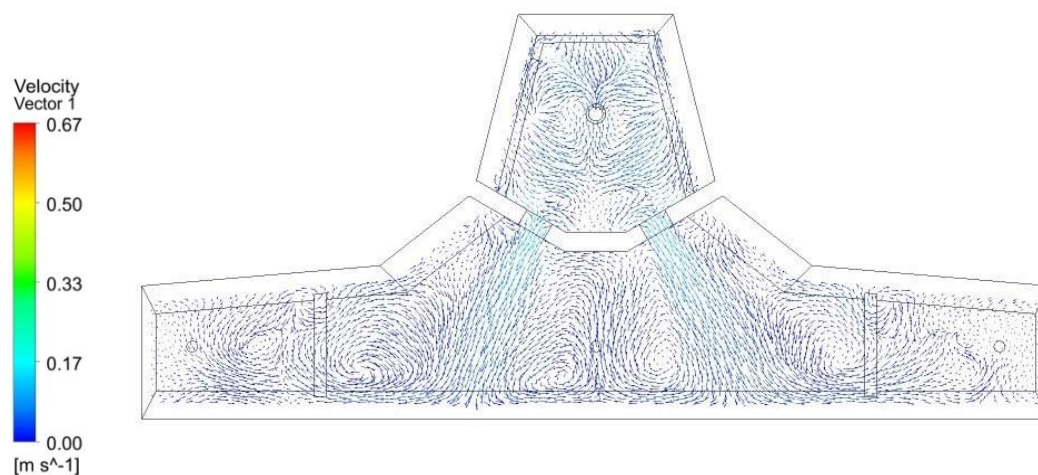
Obr. 97 Vektory prúdenia – pohľad zboku, ostrá hrana



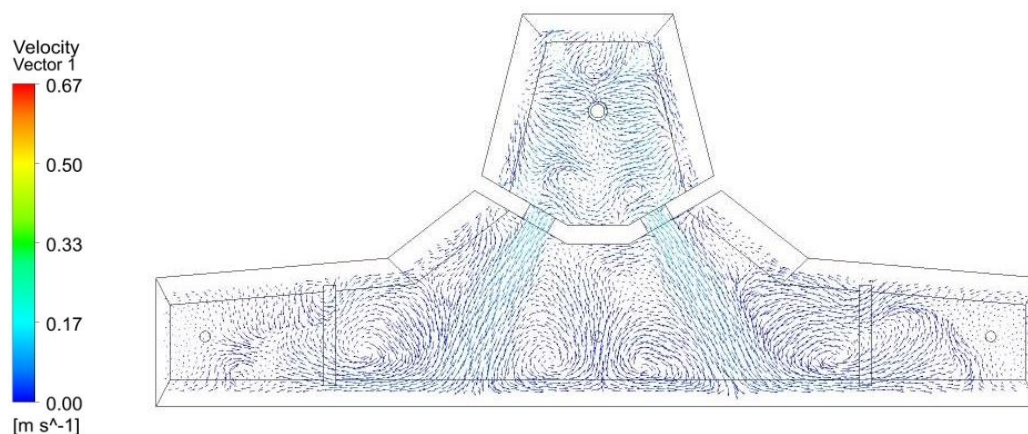
Obr. 98 Vektory prúdenia – pohľad zboku, oblá hrana



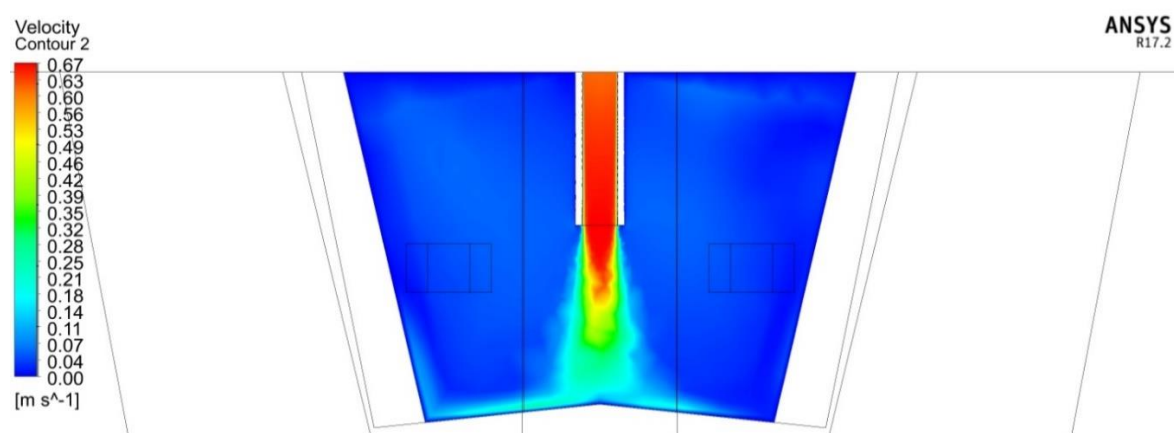
Obr. 99 Vektory prúdenia – pohľad zhora, štandardná konfigurácia



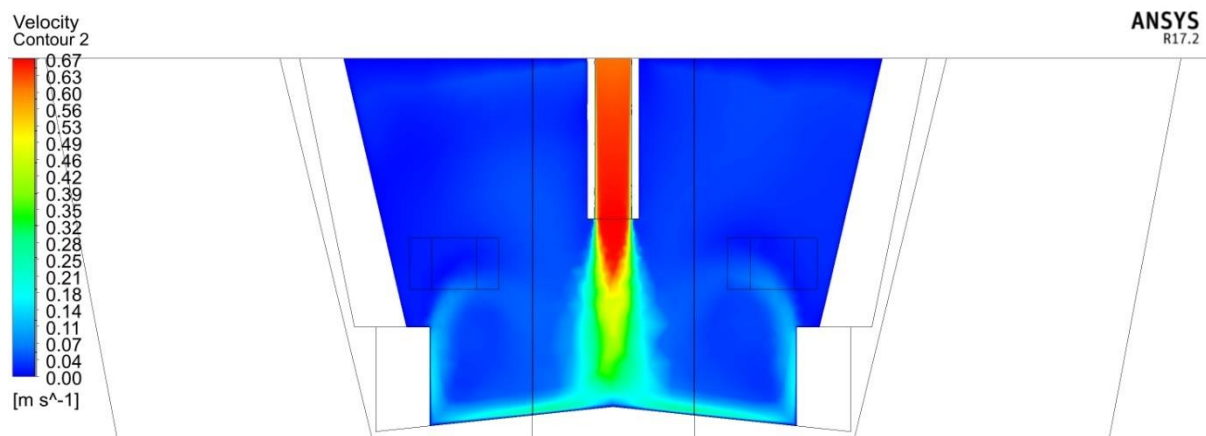
Obr. 100 Vektory prúdenia – pohľad zhora, ostrá hrana



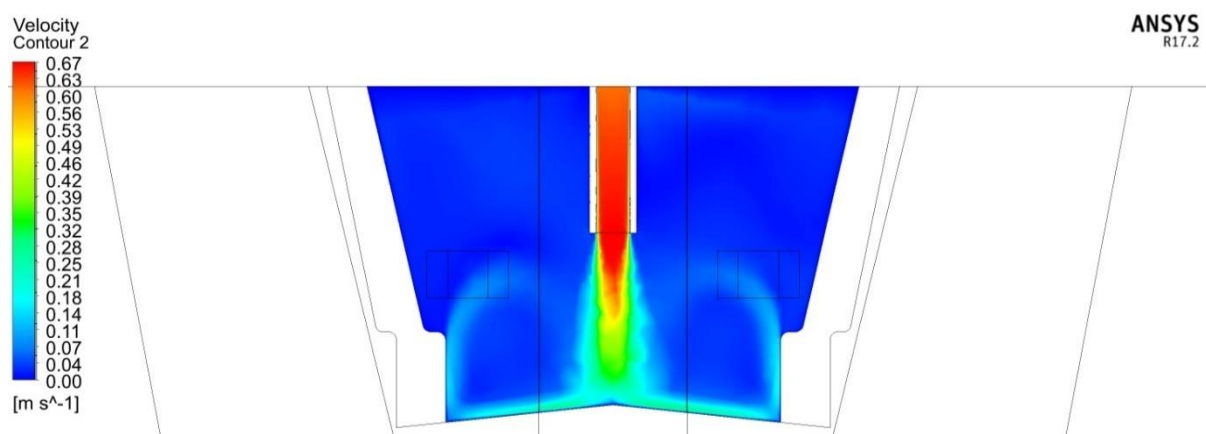
Obr. 101 Vektory prúdenia – ostrá hrana



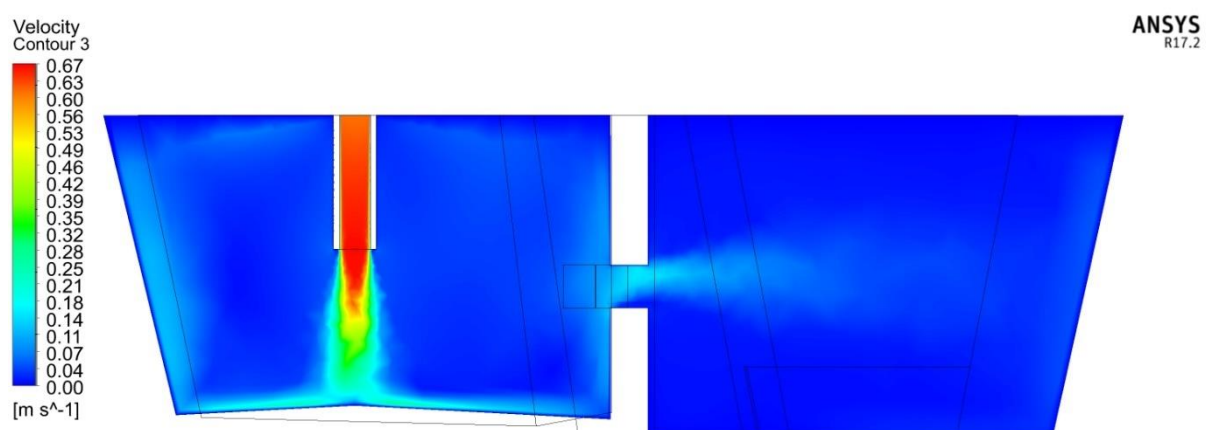
Obr. 102 Kontúry prúdenia – pohľad spredu, štandardná konfigurácia



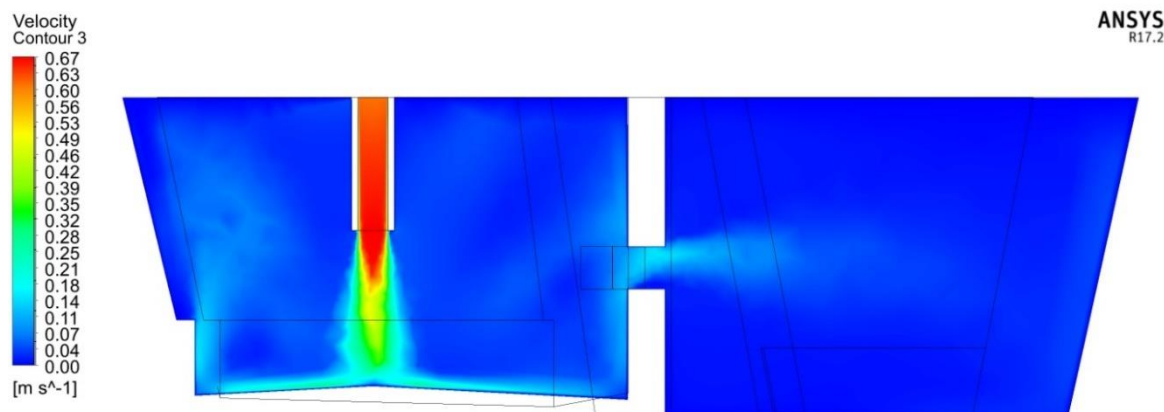
Obr. 103 Kontúry prúdenia – pohľad spredu, ostrá hrana



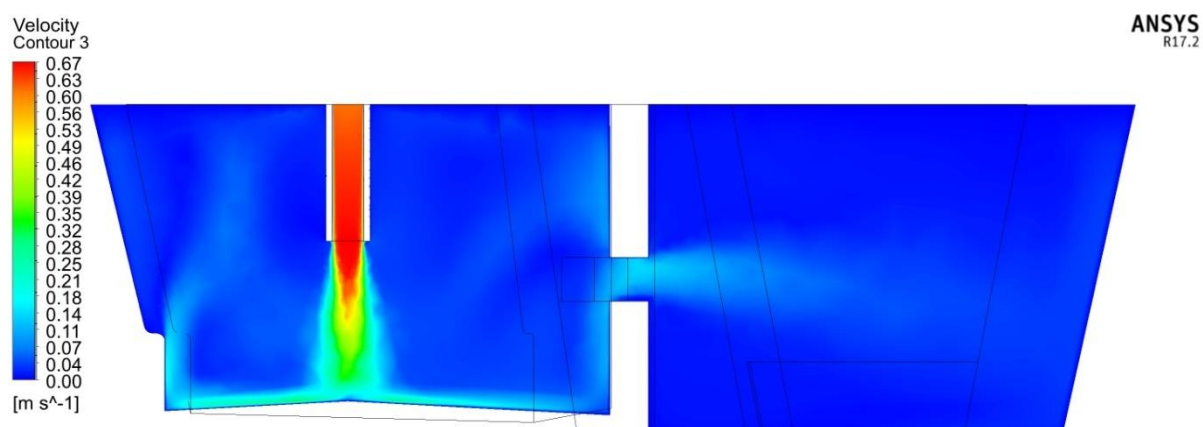
Obr. 104 Kontúry prúdenia – pohľad spredu, zaoblená hrana



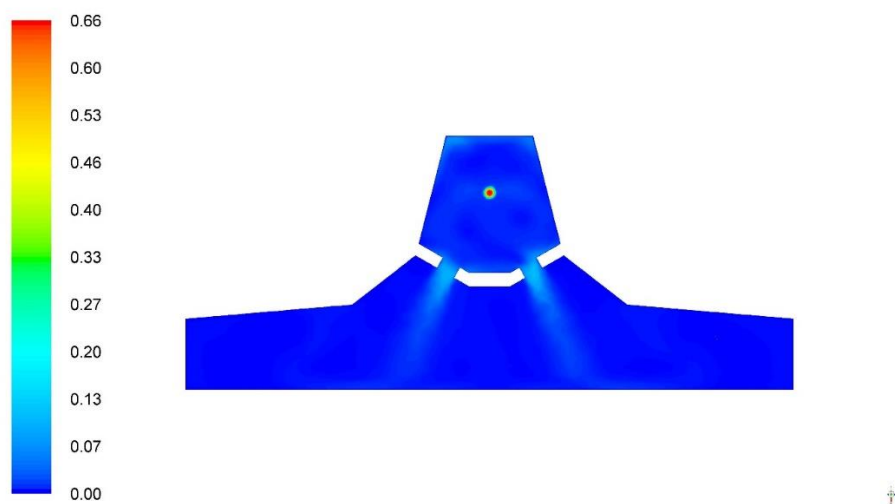
Obr. 105 Kontúry prúdenia – pohľad z boku, štandardná konfigurácia



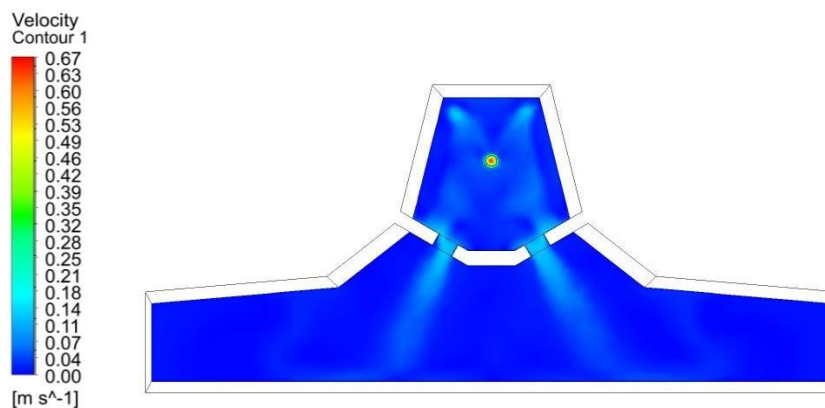
Obr. 106 Kontúry prúdenia– pohľad zboku, ostrá hrana



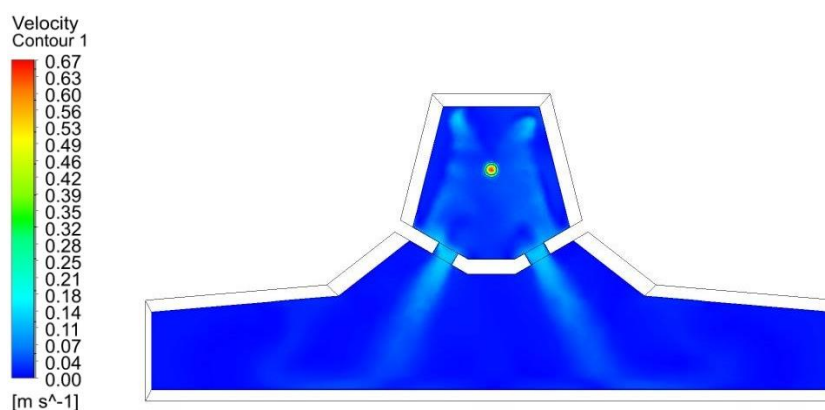
Obr. 107 Kontúry prúdenia– pohľad zboku, zaoblená hrana



Obr. 108 Kontúry prúdenia– pohľad zhora, štandardná konfigurácia



Obr. 109 Kontúry prúdenia – pohľad zhora, ostrá hrana



Obr. 110 Kontúry prúdenia – pohľad zhora, zaoblená hrana

Tab. 8 Zhrnutie výsledkov matematických simulácií

	Hrany rímasy	
Výstup simulácie	Ostré	Oblé
Retenčný čas prúd č.2	Kratší - zhoršenie	Porovnateľný
Retenčný čas prúdy č.1 a č.3	Porovnateľné	Porovnateľné
Vektory rýchlosti prúdenia v hubici	Tvorba vírov v oblasti rímasy	
		Pri pohľade zboku nižšie rýchlosti prúdenia v oblasti troskovej čiary
Kontúry rýchlostí prúdenia		Bočný rez, viditeľné odklonenie toku ocele s vyššou rýchlosťou od zadnej steny MP

Na základe uvedených výsledkov simulácií je možné predpokladať, že tzv. dvojstupňová hubica by mohla mať pozitívny vplyv na zníženie erózie pracovnej výmurovky MP v oblasti troskovej čiary. Predtým, než bude táto alternatíva simulovaná na vodnom modeli, bude potrebné urobiť ešte ďalšie matematické simulácie zamerané na optimalizáciu tvaru a rozmerov rímsy.

2.7. Matematické simulácie sférickej dopadovej dosky aplikovanej v odlišných typoch medzipaniev

Sférická dopadová doska (SP) predstavuje konštrukčný prvok určený na optimalizáciu prúdenia tekutej ocele v medzipanve. Jej primárnou funkciou je tlmenie dopadovej energie prúdu pritekajúcej ocele z ochrannej trubice, čím sa znižuje riziko poškodenia výmurovky, najmä v oblasti dna a troskovej čiary. Zároveň usmerňuje smer toku a znižuje rozstreky, čím prispieva k stabilizácii hladiny a minimalizácii turbulentných efektov v okolí vstupu. Charakteristickým znakom sférickej dopadovej dosky je zakrivená aktívna plocha, ktorá umožňuje rovnomerné rozdelenie toku v priestore medzipanvy a prispieva k zníženiu lokálnych extrémov v rýchlostnom poli.

Vhodne navrhnutý tvar takejto dosky zabezpečuje rovnomernejší tok medzi výtokovými otvormi, predlžuje retenčný čas a obmedzuje tvorbu stagnujúcich oblastí, ktoré sú z pohľadu metalurgie nežiadúce. V porovnaní s tradičnými riešeniami s viacerými modifikátormi (napr. hrádzky, prepážky) ponúka sférická doska jednoduchšiu výrobu, nižšiu spotrebu žiaruvzdorného materiálu a priaznivejší dopad na udržateľnosť prevádzky. Uplatňuje sa najmä tam, kde je potrebné zvýšiť účinnosť flotácie vtrúsenín, homogenizáciu teplotného a chemického poľa a zabezpečiť stabilný prietok do kryštalizátorov.

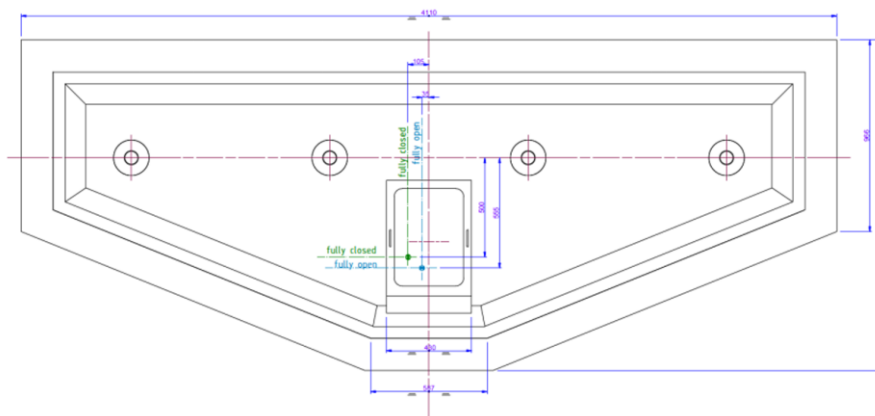
Navrhnutá geometria sférickej dopadovej dosky vychádza z jednoduchého sférického segmentu doplneného o výškovo diferencované čelné a bočné steny. Tieto prvky sú navrhnuté tak, aby vytvárali riadené rozloženie tokov smerom k jednotlivým výtokovým otvorom, bez potreby ďalších dodatočných modifikátorov. Riešenie je univerzálne aplikovateľné na rôzne typy medzipaniev a umožňuje stabilizovať prúdenie v širokom rozsahu odlievacích podmienok.

2.7.1. Porovnanie konfigurácií sférickej dopadovej dosky v štvorvýtokovej medzipanve typu delta

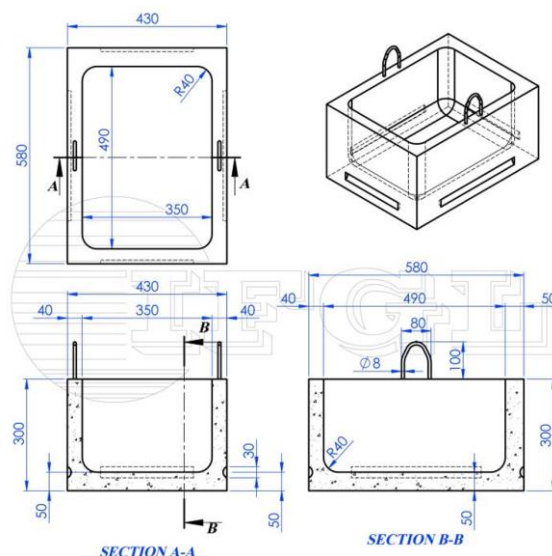
Cieľom simulácií bolo vyhodnotiť vplyv rôznych konfigurácií sférickej dopadovej dosky na charakter prúdenia v štvorvýtokovej medzipanve typu delta. Model medzipanvy mal vtok v zúženom čele a výtoky rozmiestnené vejárovito pozdĺž zadnej steny.

Sférické dopadové dosky Obr. 113 – 116, boli porovnávané so štandardnou tvarovou dopadovou doskou (M) Obr. 112, je štandardná dopadová doska bežne používaná v praxi. Hodnotené boli varianty s rôznou výškou bočných stien, tvarom prechodov (ostré vs. zaoblené), výrezmi a vertikálnym umiestnením dosky. Simulácie prebiehali v Ansys Fluent s použitím realizovateľného $k-\epsilon$ modelu v nestacionárnom režime. Na výpočet retenčných časov bola použitá stopovacia látka.

Výsledky ukázali, že sférická dopadová doska zlepšuje rozloženie toku, znižuje turbulenciu v oblasti vstupu a predlžuje retenčný čas, najmä pri konfiguráciách so zaoblenými hranami a vyššími bočnými stenami. Niektoré varianty preukázali rovnomernejší tok medzi výtokmi v porovnaní so štandardnou doskou. Z porovnania C-kriviek a retenčných časov vyplýva, že vhodne navrhnutá sférická doska môže zlepšiť hydraulické parametre prúdenia bez potreby dodatočných modifikátorov.

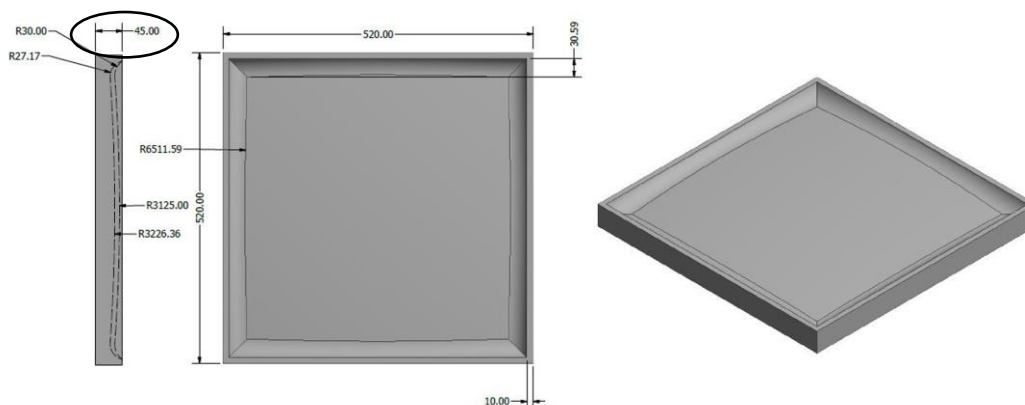


Obr. 111 Geometria medzipanvy použitej pri CFD simuláciách

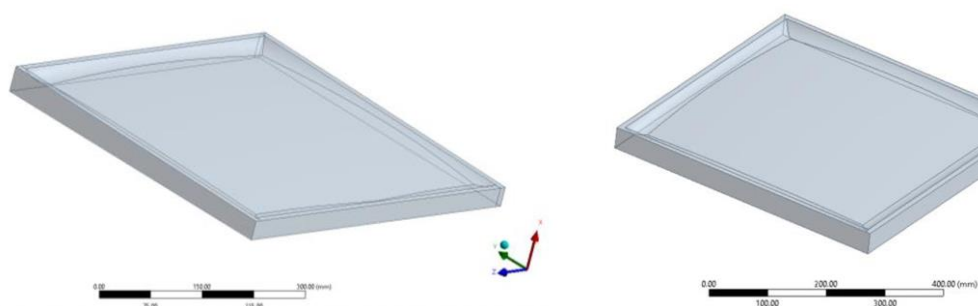


Obr. 112 Geometria používanej štandardnej dopadovej dosky použitej pri simuláciách

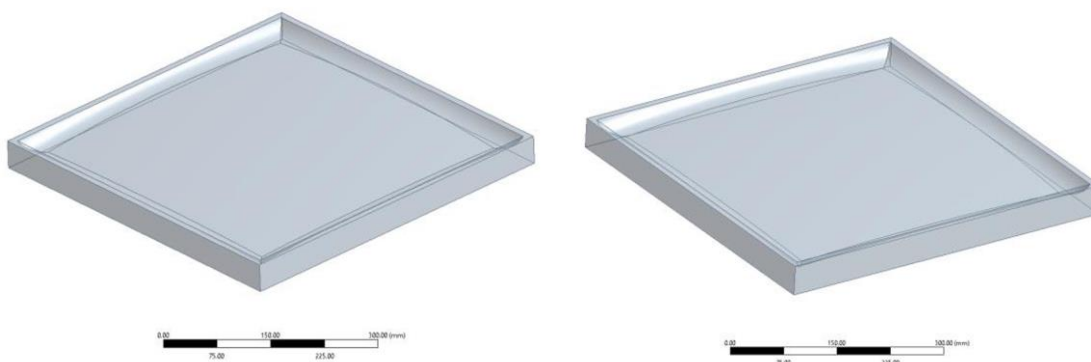
Na Obr. 112 je znázornená geometria spolu s rozmermi sférickej dopadovej dosky v4. Rozmer výšky stien sa bude jednotlivo meniť pri rozdielnych konfiguráciach. Menený rozmer výšky steny je zvýraznený na Obr. 112.



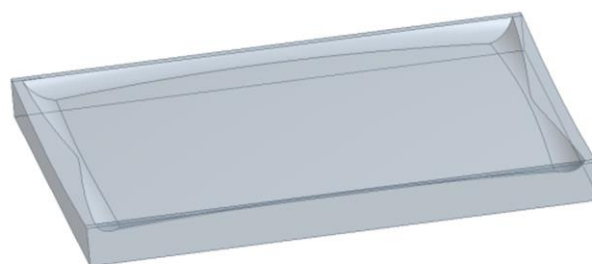
Obr. 113 Sférická dopadová doska v4 rovnaká výška bočných stien 45mm



Obr. 114 Sférické dopadové dosky: naľavo sklon K4 , napravo V4 (rovné boky, výška 40mm)

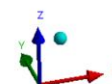
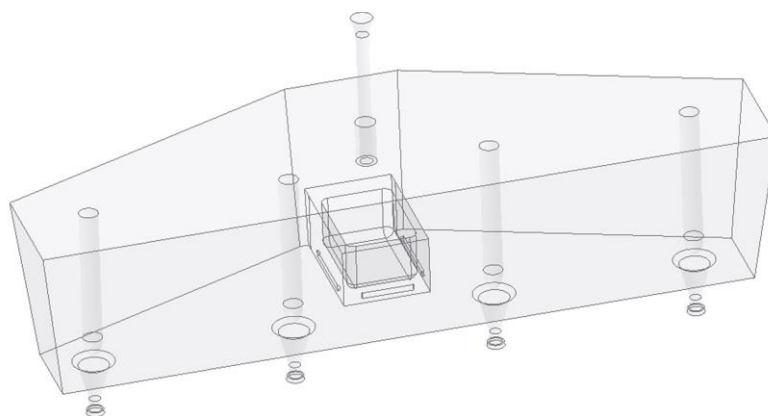


Obr. 115 Sférické dopadové dosky: naľavo Sféric V4 (rovné boky 42,5mm), napravo Spheric v4 (rovné boky 45mm)

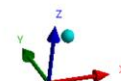
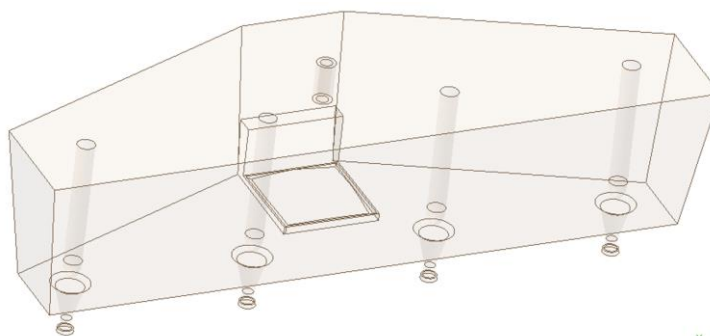


Obr. 116 Sférická dopadová doska v4 + bočné výřezy do tvaru U

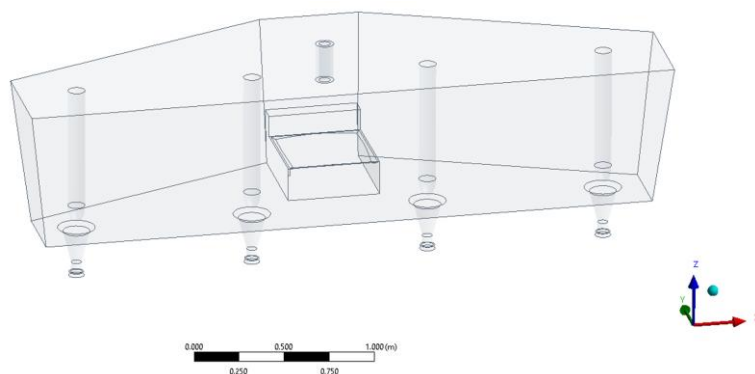
2.7.1.1. Realizované konfigurácie pri simuláciách



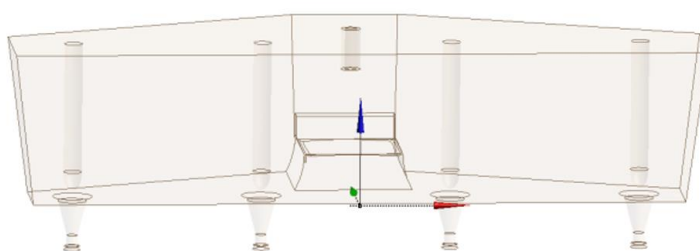
Obr. 117 Konfigurácia zostavy medzipanvy s štandardným typom dopadovej dosky



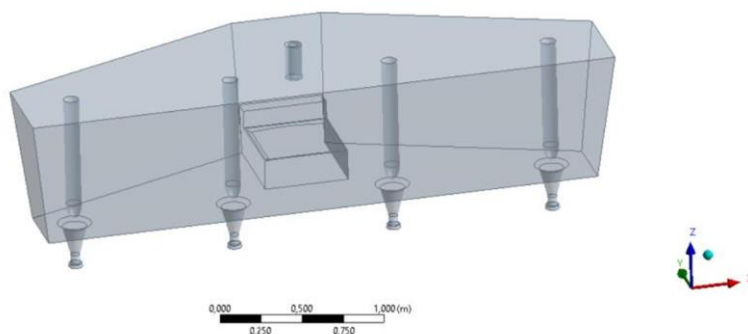
Obr. 118 Konfigurácia zostavy medzipanvy s dopadovou doskou Sférická dopadová doska K4



Obr. 119 Konfigurácia SP-K4_v2 (vyvýšenie SP-K4 o 150 mm)



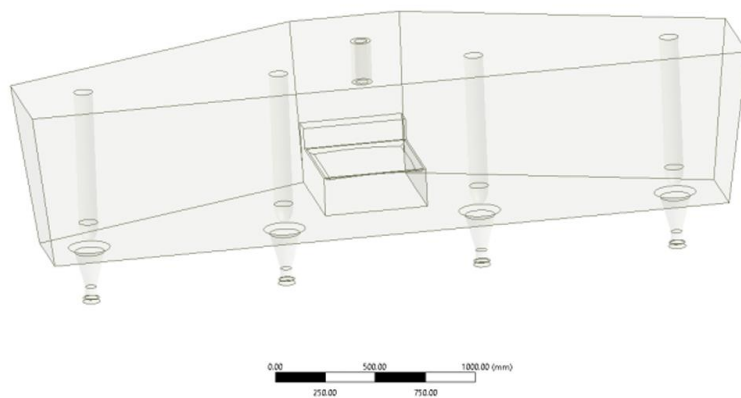
Obr. 120 Konfigurácia SP-K4_v3 (zaoblenie bočných stien na bokoch vyvýšenej doske)



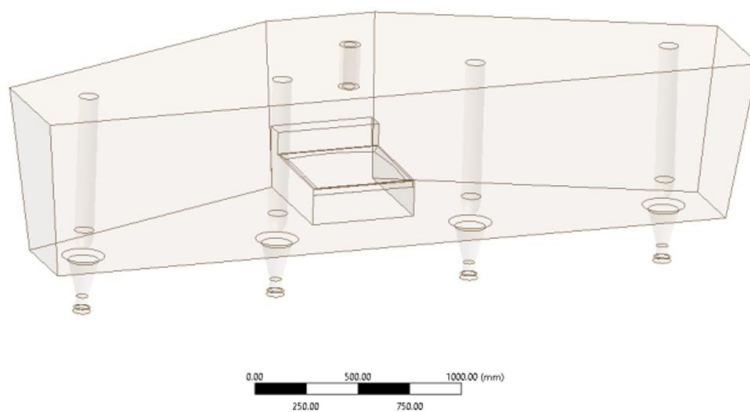
Obr. 121 Konfigurácia SP_v4 (Spheric s vyššími bočnými hranami – 40mm od spodku sphericu)



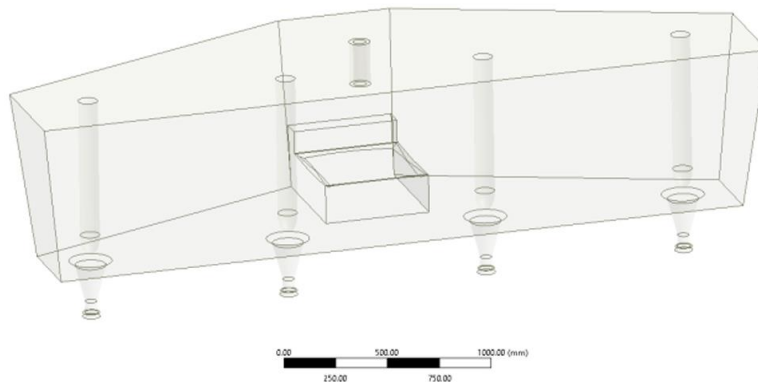
Obr. 122 Konfigurácia SP_v4-425 (Spheric s vyššími bočnými hranami – 42,5mm od spodku sphericu)



Obr. 123 Konfigurácia SP_v4-425 (Spheric s vyššími bočnými hranami – 45mm od spodku sphericu)



Obr. 124 Konfigurácia SP-K4_v2 (vyvýšenie SP-K4 o 150 mm + otočný SP-K4 o 180°)



Obr. 125 Konfigurácia SP_v4 (Spheric s vyššími bočnými hranami – 40mm od spodku sphericu + na bočných hranách vytvorené zrezanie v priemere 3800 mm)

2.7.1.2. Počiatočné a okrajové podmienky pre CFD simulácie

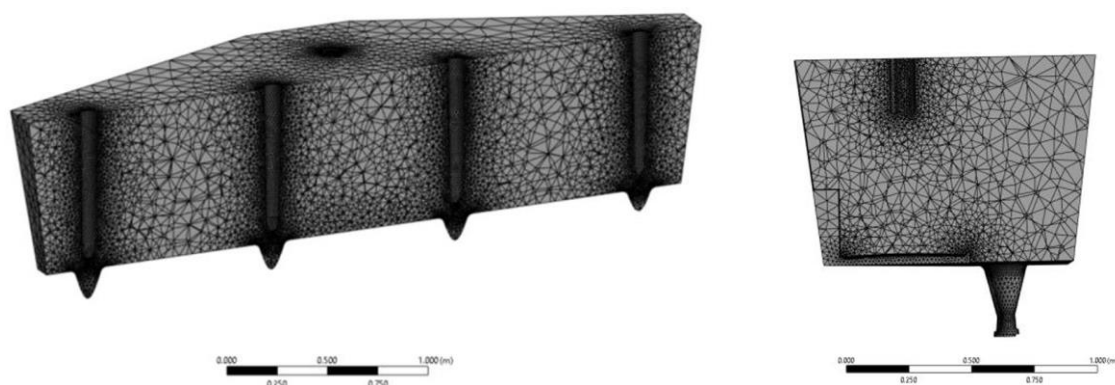
Na reálnom zariadení sa odlieva 65 ton ocele za 40 minút. Po prepočte kritérií podobnosti a vlastností ocele pre simulácie bolo vypočítané objemové množstvo pretečenej ocele 27,083 kg/s, čo činí 0.873 m.s⁻¹ na základe hustoty ocele 7020 kg/m³. Objem medzipanvy je 2,376 m³. Na základe Reynolsovho čísla pre kruhový prierez vstupu do medzipanvy bola vypočítaná intenzita turbulencie podľa vzťahu (1)

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

Hodnota činila 3,49 % čo odpovedá hodnote Reynolsovho čísla $Re = 195\,213$

Pre výskum bol použitý CFD program Ansys Fluent, the software produced by ANSYS, Canonsburg, PA, USA. Výpočet sa realizoval na 3D modely. 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. 126. Počet elementov pre výpočtovú sieť bol 429344. Sieť bola hodnotená na základe kvalitatívneho spektra pre kritérium Skewness a orthogonality. Dosiahnuté hodnoty boli pre kritérium skewness average 0.23004 a pre ortogonalitu max. 0,99316. Dôležitým krokom je aj špecifikácia oblasti vstupu, výstupu a stien modelu medzipanvy, kvôli možnosti následného zadávania počiatočných a okrajových podmienok.



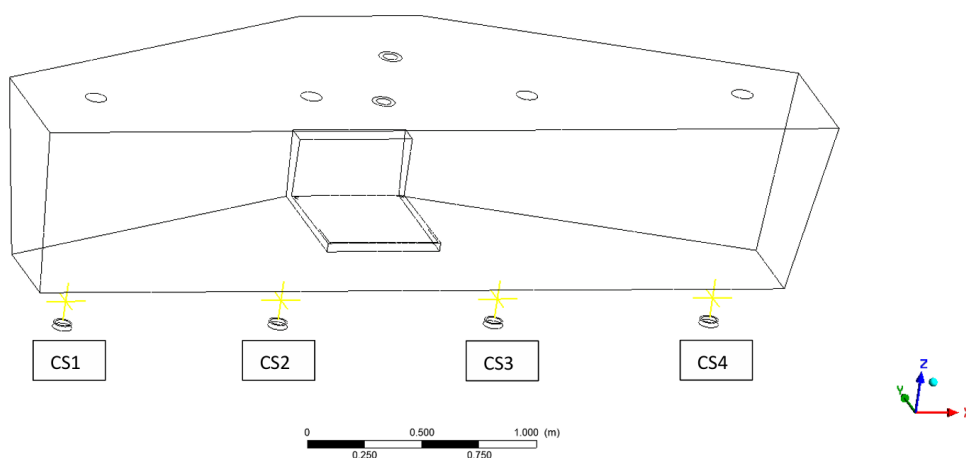
Obr. 126 Výpočtová sieť medzipánvy pre realizované simulácie

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. V nasledujúcej tabuľke sú uvedené hodnoty okrajových a počiatočných podmienok pre CFD simulácie.

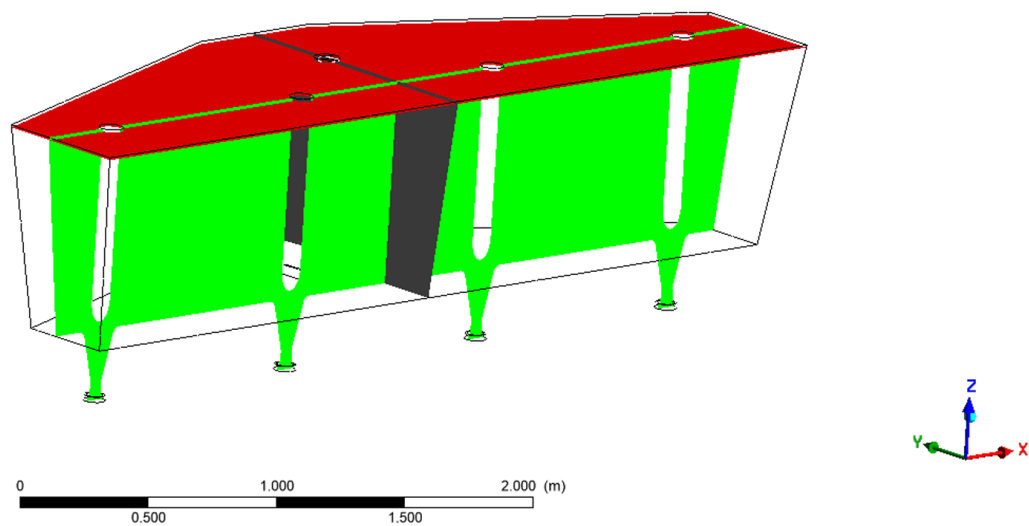
Tab. 9 Hodnoty okrajových a počiatočných podmienok pre CFD simulácie

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

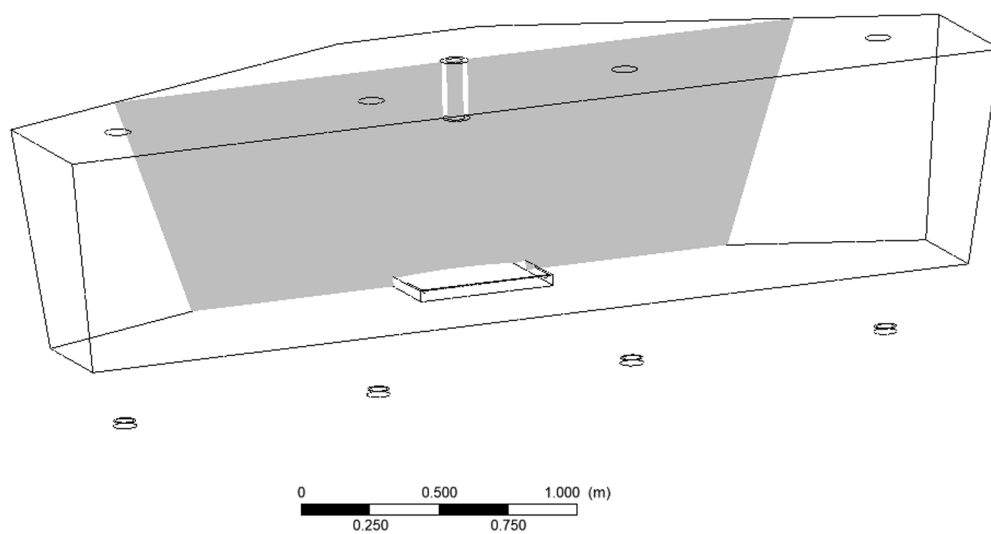
Sledované body a roviny



Obr. 127 sledované body na výstupoch z medzipanvy (zobrazenie otvorov z ľava Series 1 - CS1, Series 2 – CS2, Series 3 – CS3, Series 4 – CS4)

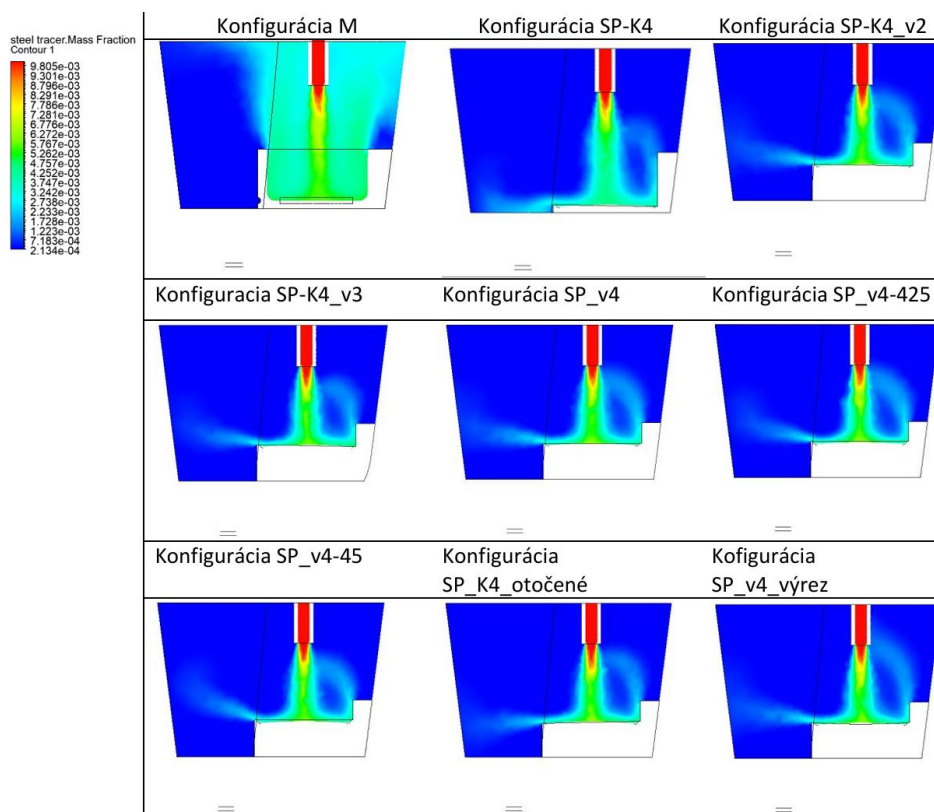


Obr. 128 Sledované roviny (rovina 1 cez výtokové otvory - zelená farba, rovina 2 kolmo v strede na rovinu cez výtokové otvory – čierna farba, rovina 3 v oblasti troskovej čiary – červená farba),

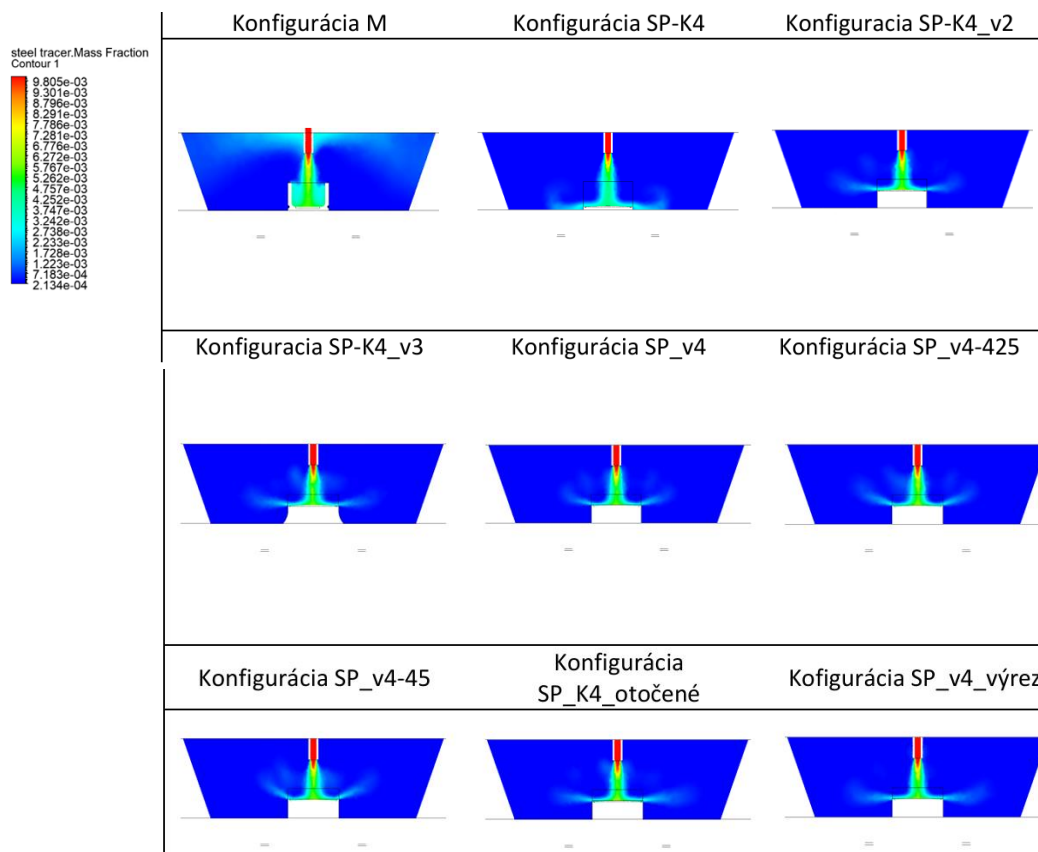


Obr. 129 Sledovaná rovina 4 viedla cez stred vtokového otvoru.

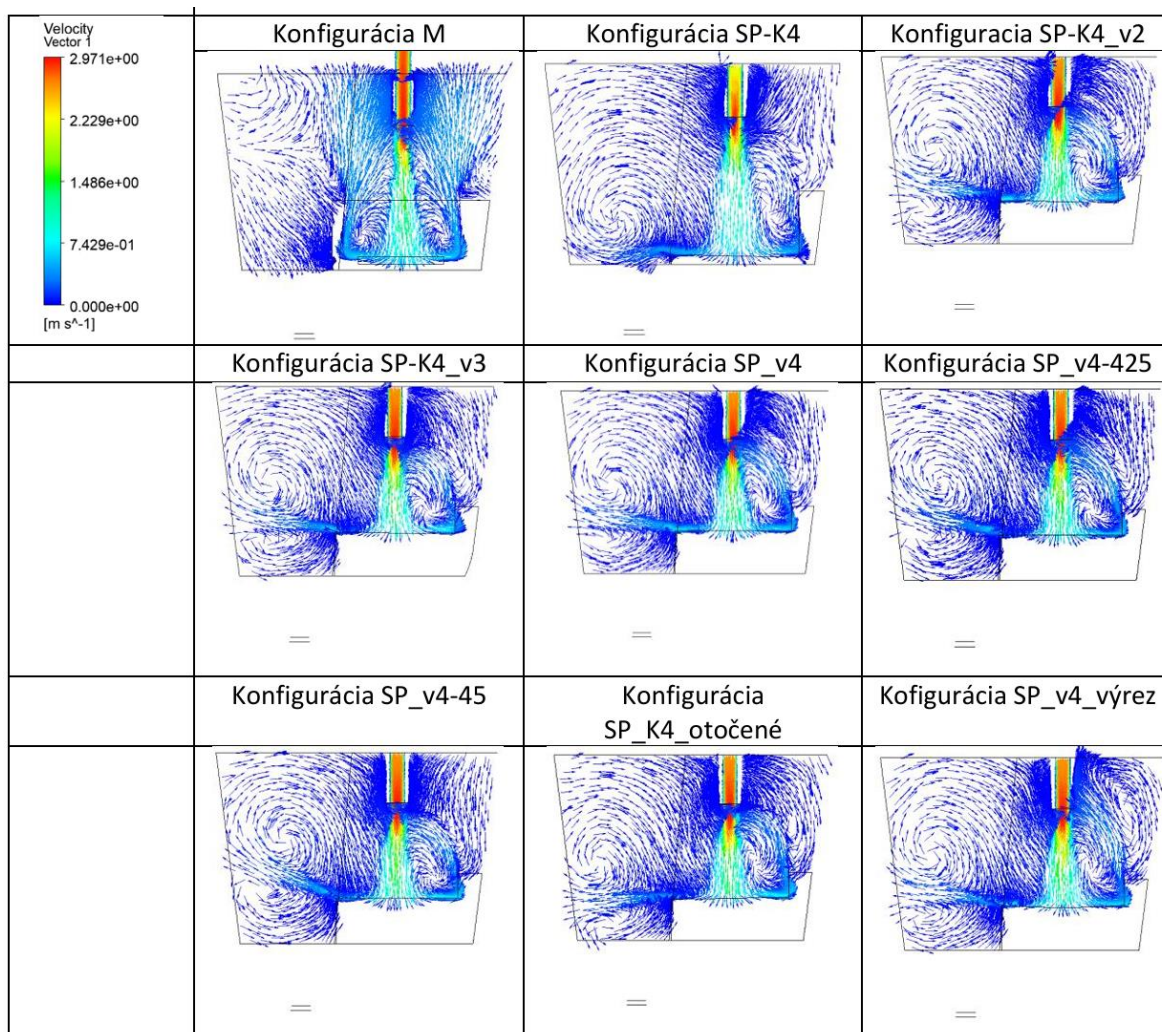
2.7.1.3. Výsledky CFD simulací



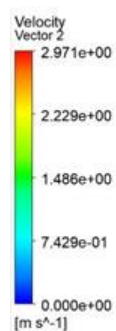
Obr. 130 Distribúcia stopovacej látky v 20 sekunde (rovina 2)



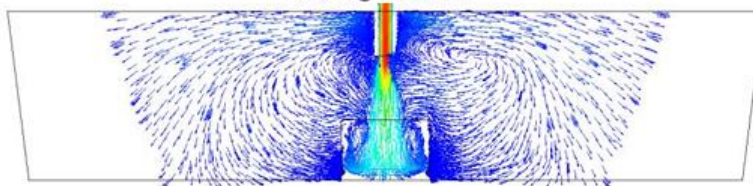
Obr. 131 Distribúcia stopovacej látky v 20 sekunde (rovina 4)



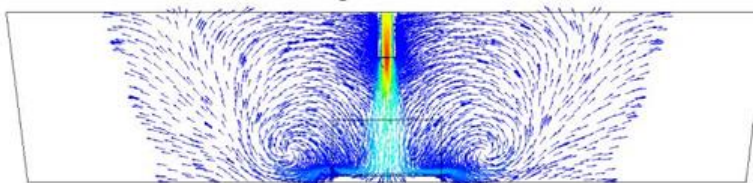
Obr. 132 Smer prietoku tekutiny v medzipanve na rovine 2



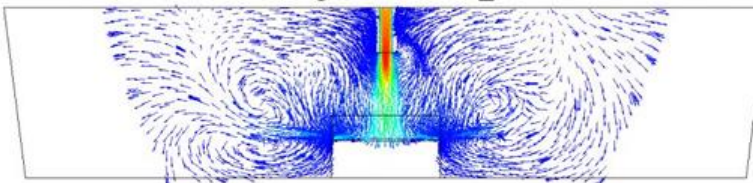
Konfigurácia M



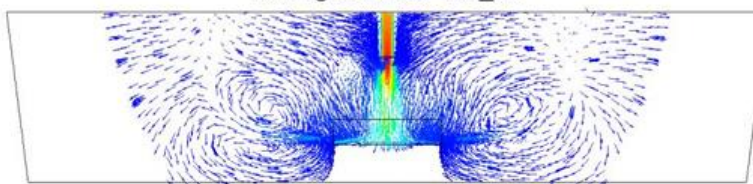
Konfigurácia SP-K4



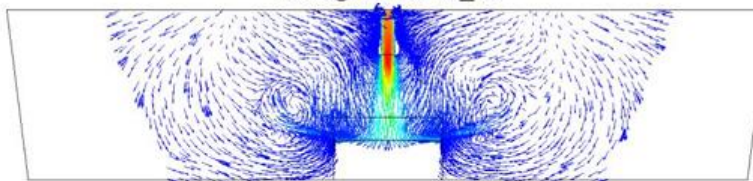
Konfigurácia SP-K4_v2



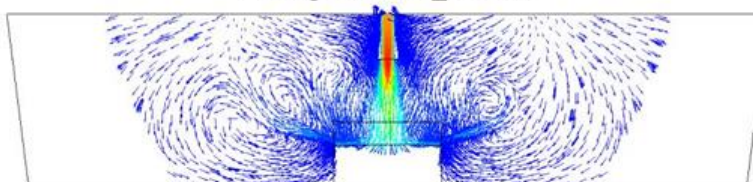
Konfigurácia SP-K4_v3



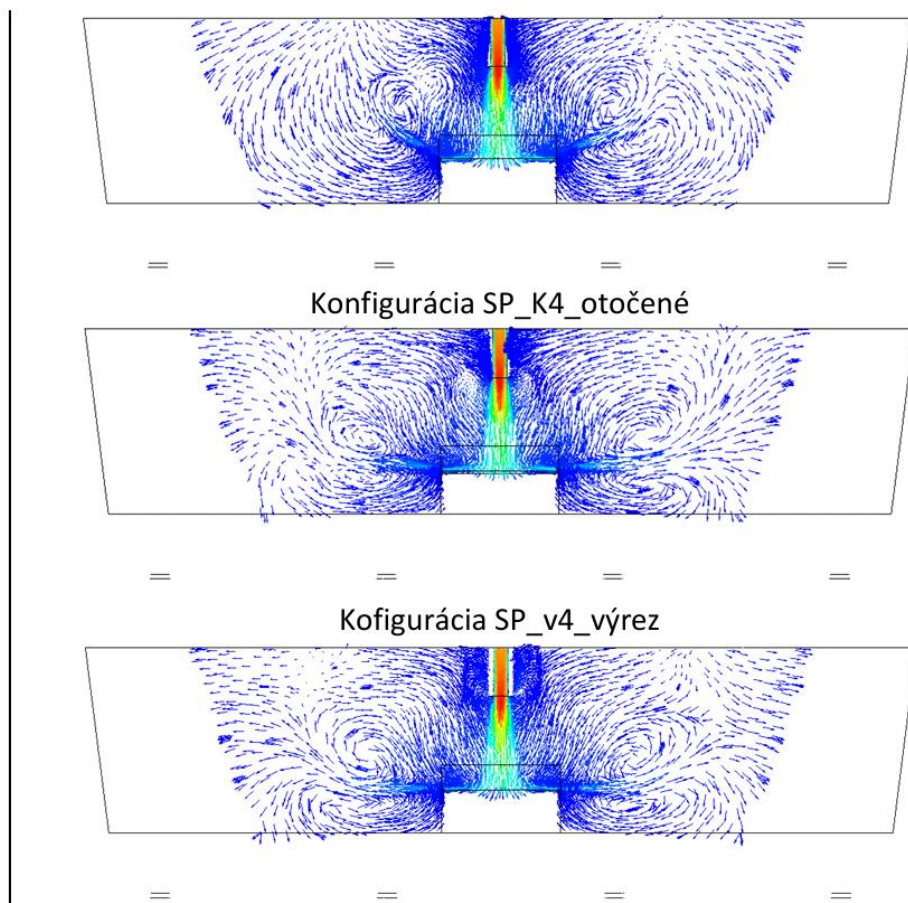
Konfigurácia SP_v4



Konfigurácia SP_v4-425



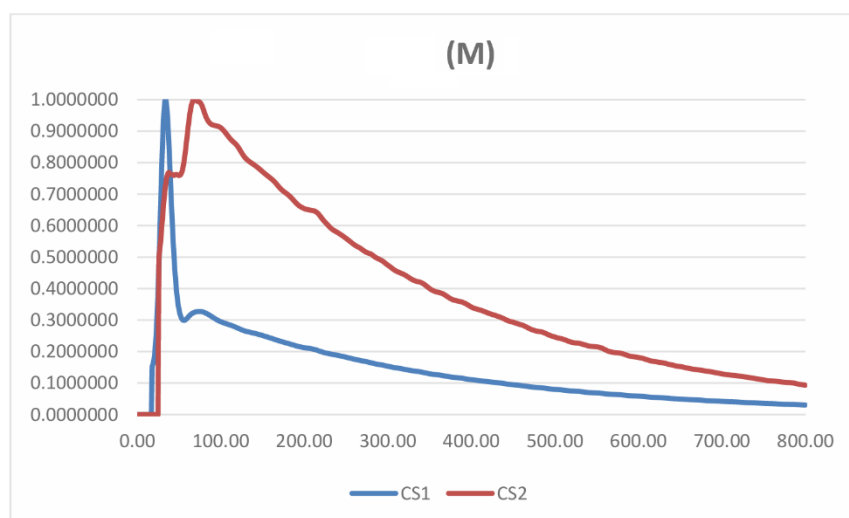
Konfigurácia SP_v4-45



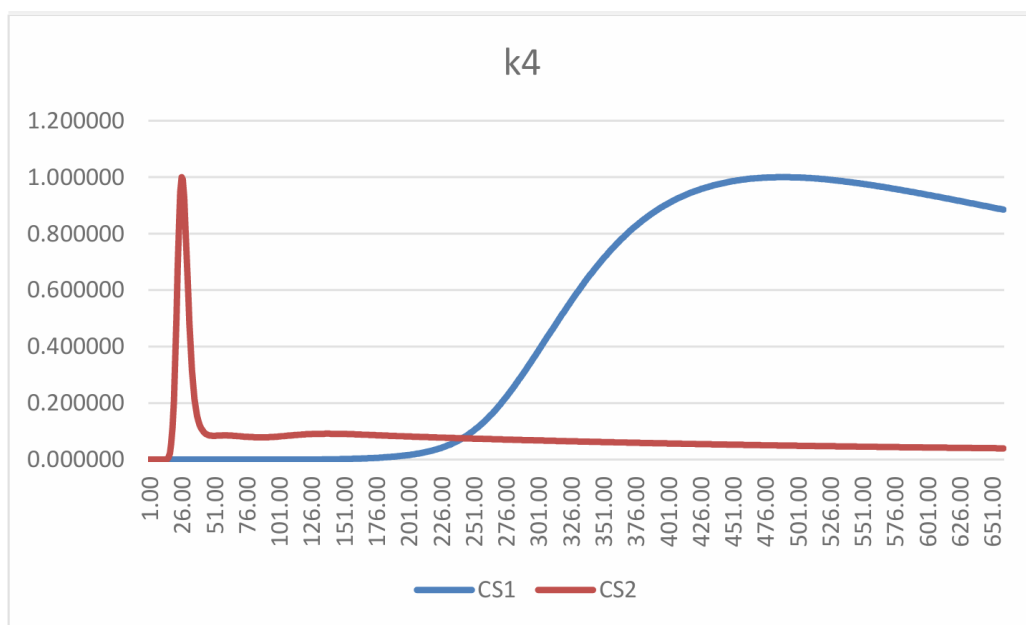
Obr. 133 Vektor prúdenia pre sledované konfigurácie M, SP-K4 na rovine 4

2.7.1.4. Vyhodnotené výsledky formou C-kriviek

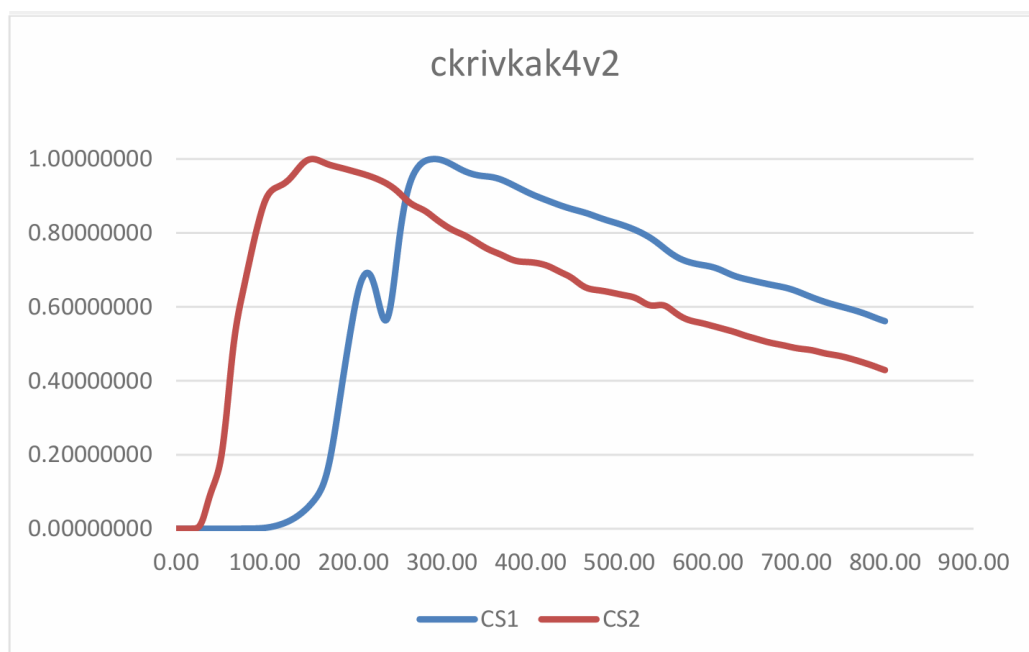
V nasledujúcich grafoch boli vyhodnotené C-krivky na základe matematických simulácií. Boli vyhodnocované len 2 prúdy, kvoli symetricite medzipanvy oboch strán.



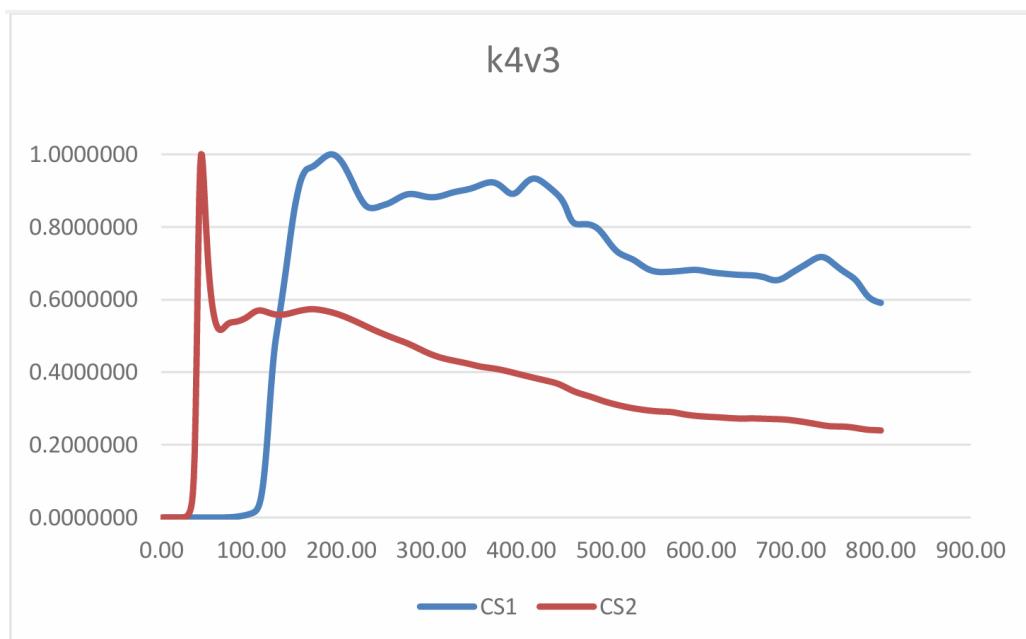
Obr. 134 C – krivka pre konfiguráciu M



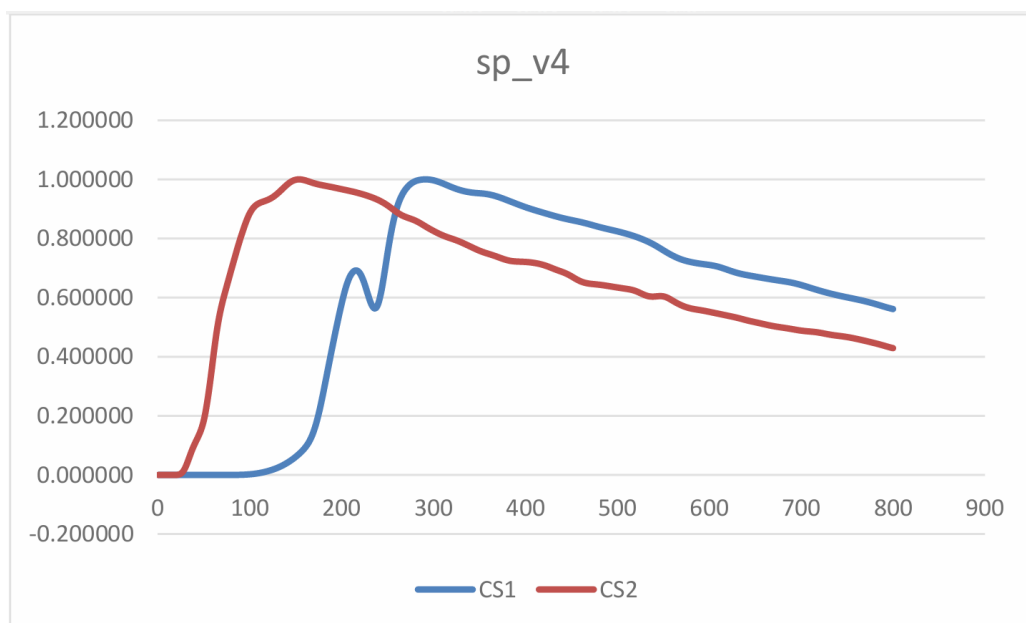
Obr. 135 C – krivka pre konfiguráciu SP-K4



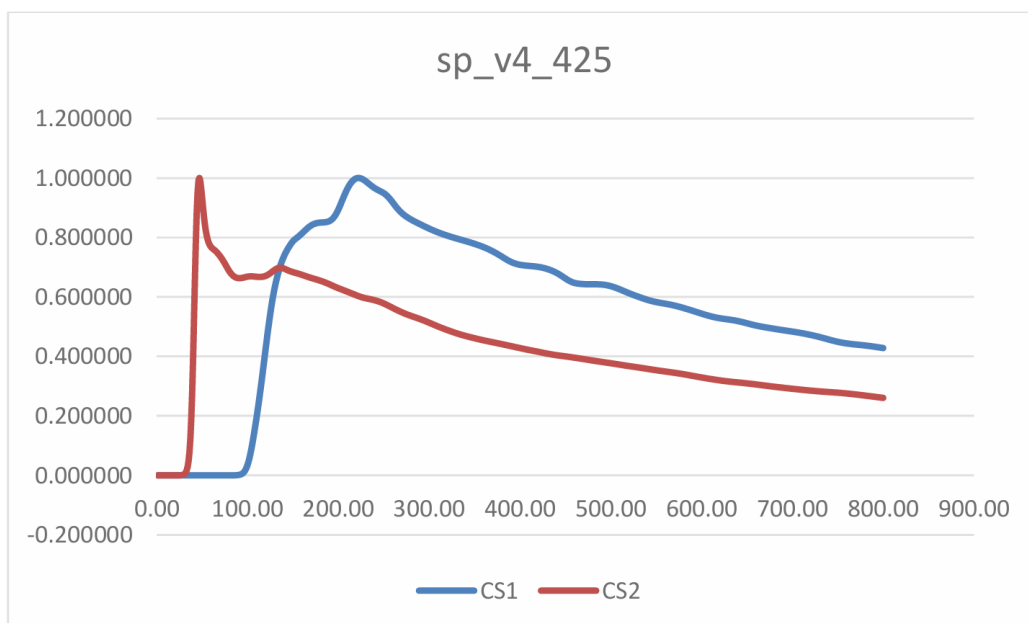
Obr. 136 C – krivka pre konfiguráciu SP-K4-v2



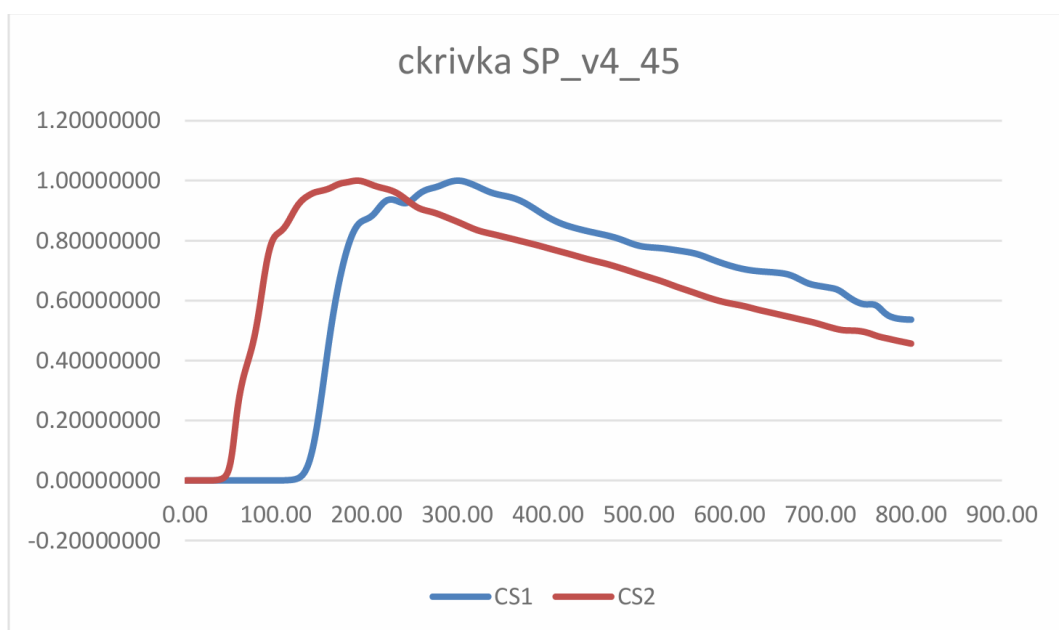
Obr. 137 C – krivka pre konfiguráciu SP-K4-v3



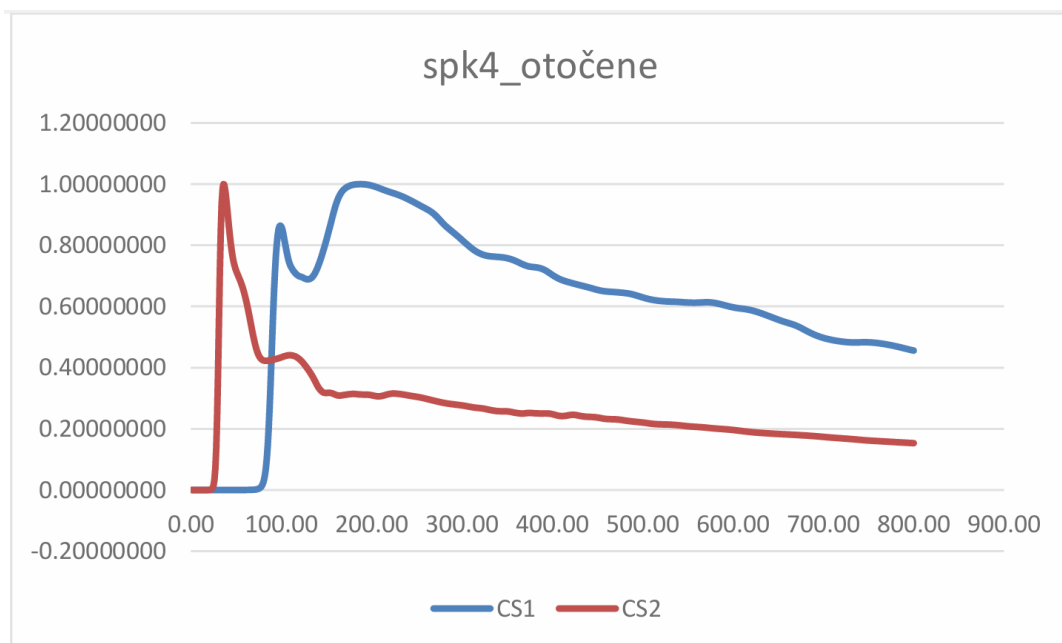
Obr. 138 – C krivka pre konfiguráciu SP-v4



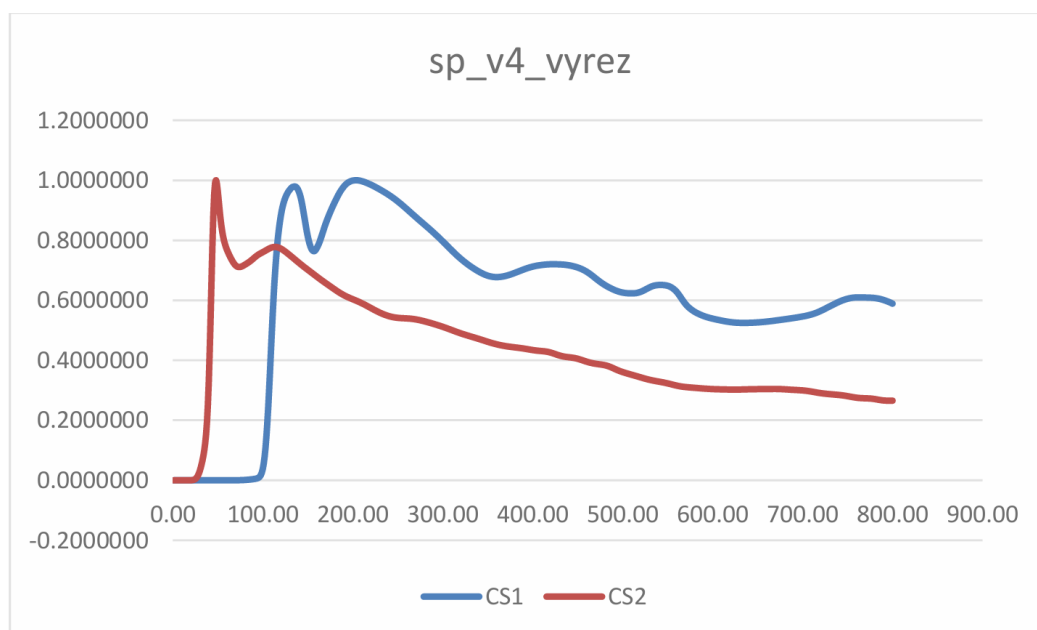
Obr. 139 C – krivka pre konfiguráciu SP-v4_425



Obr. 140 C – krivka pre konfiguráciu SP-v4_45



Obr. 141 C – krivka pre konfiguráciu SP_K4_otočené



Obr. 142 C – krivka pre konfiguráciu sp_v4_vyrez

Porovnanie retenčných časov

V rámci simulácií boli vyhodnotené retenčné časy v medzipanve vybavenej rôznymi konfiguráciami sférickej dopadovej dosky. Vzhľadom na symetrické usporiadanie geometrie boli retenčné časy analyzované na dvoch výtokových prúdoch. Pre každý variant bol určený minimálny a maximálny

retenčný čas, ktoré poskytujú informáciu o rozsahu zotrvania tekutej ocele v priestore panvy. Prehľad výsledkov je uvedený v nasledujúcej tabuľke.

Tab. 10 Porovnanie retenčných časov

	Výsledky min. a max. retenčných časov						$\frac{V_d}{V}$	$\frac{V_p}{V}$	$\frac{V_m}{V}$
	Tmin [s]			Tmax [s]			[%]		
	CS1	CS2	0,5 po max CS1	CS1	CS2	0,5 po max CS2			
Konfigurácia M	18	25	44	34	68	283			
Konfigurácia SP-K4	97	9		489	26	485			
Konfiguráciu SP-K4-v2	52	13	920	292	154	676			
Konfiguráciu SP-K4-v3	45	15	900	189	44	252			
Konfiguráciu SP-v4	57	15	850	292	154	675			
Konfiguráciu SP-v4_425	69	18	666	222	47	310			
Konfiguráciu SP-v4_45	65	15	870	301	190	734			
Konfiguráciu SP-v4 výrez	47	13	890	204	48	310			
Konfigurácia sp_k4_otočené	39	13	697	188	36	69			

2.7.1.5. Záver kapitoly

Po vyhodnotení referenčnej konfigurácii (RK) bol stanovený nový cieľ na zrovnomenie retenčných časov medzi jednotlivými výtakovými prúdmi.

Konfigurácia SP-K4 – Pri tejto konfigurácii dochádza k skratovému prúdeniu. Na základe toho dochádza k zníženiu min. retenčného času (Rt_{min}) na CS2 (prúd bližšie k dopadovej doske) oproti RK. Taktiež došlo aj k výraznému predĺženiu Rt_{min} na CS1 .

Konfiguráciu SP-K4-v2 – Táto konfiguráciu využíva tú istú dopadovú dosku SP-K4 s rozdielom priblíženie cez podstavec k vtokovej trubice o 150 mm. Rt_{min} na CS2 sa priblížilo ako je to pri RK a na výtakovom otvore CS1 došlo k zníženiu oproti predchádzajúcej konfigurácie SP-K4.

Konfiguráciu SP-K4-v3 – Pri tejto konfigurácii bolo skúšané zrýchlenie prúdenia na bočných stranách podstavca pomocou vytvorenia oblúku aby bolo dosiahnuté predĺženie Rt_{min} na CS2. V konečnom výsledku došlo k čiastočnému zvýšeniu Rt_{min} na CS2 a tiež k zníženiu na CS1.

Konfiguráciu SP-v4 – Ďalšia konfigurácia využila Sféricú dopadovú dosku s rovnakými vyvýšenými stenami na všetkých stranách. Výsledok neukázal výrazné rozdiely na Rt_{min} oproti Konfigurácii SP-K4-v3. Hlavným rozdielom pri týchto dvoch konfiguráciách bolo pri sledovaní prúdnic. Dochádzalo k rovnomernejšiemu prúdeniu v celej medzipanvy a hustejšiemu prúdeniu v prednej časti od dopadovej dosky.

Pri týchto sledovaných konfiguráciách na CS2 nebolo dosiahnuté výrazné zvýšenie Rt_{min} ale opačne na CS1 bolo dosiahnuté.

Ďalším krokom bude ešte vyskúšanie dvoch nových úprav Sphericu. Prvá zmena sa bude týkať úpravy na vyvýšených stenách a to vykrojením steny do tvaru V, aby sme docielili zvýšenie rýchlosti a tým dochádzalo k zvýšeniu rýchlosti s cieľom zvýšenie Rt_{min} na CS2. Druhá zmena sa bude týkať vytvorením drážky od stredu Spheriku na boky.

Porovnaním rôznych konfigurácií dopadových dosiek v medzipanve typu delta bolo cieľom dosiahnuť rovnomernejšie rozloženie retenčných časov medzi výtokovými otvormi (CS1 a CS2). Výsledky ukázali významné rozdiely v charaktere prúdenia pri jednotlivých variantách:

1. Konfigurácia SP-K4:

- Dochádza k skratovému prúdeniu – prúd bližšie k dopadovej doske (CS2) má kratší retenčný čas (Rt_{min}) v porovnaní s referenčnou konfiguráciou (RK).
- Naopak, na výtokovom otvore CS1 došlo k výraznému predĺženiu Rt_{min} .

2. Konfigurácia SP-K4-v2:

- Priblíženie dopadovej dosky SP-K4 o 150 mm k vtokovej trubici znížilo Rt_{min} na CS1.
- Na CS2 sa retenčný čas priblížil hodnotám z RK.

3. Konfigurácia SP-K4-v3:

- Zaoblenie bočných stien na podstavci malo za cieľ zrýchliť prúdenie na bokoch.
- Výsledkom bolo čiastočné zvýšenie Rt_{min} na CS2 a zníženie na CS1.

4. Konfigurácia SP-v4:

- Táto konfigurácia využila rovnakú výšku stien po obvode dopadovej dosky.

- Nezaznamenali sa výrazné rozdiely v Rt_{min} oproti SP-K4-v3, ale prúdenie bolo rovnomernejšie a hustejšie v prednej časti od dopadovej dosky.

Kľúčové zistenia:

- Ani jedna z testovaných konfigurácií nedosiahla výrazné zvýšenie Rt_{min} na CS2, ale na CS1 sa podarilo dosiahnuť predĺženie retenčného času.
- Rovnomernejšie prúdenie bolo pozorované pri konfiguráciách s modifikovanými stenami dopadovej dosky.

Ďalšie kroky v optimalizácii:

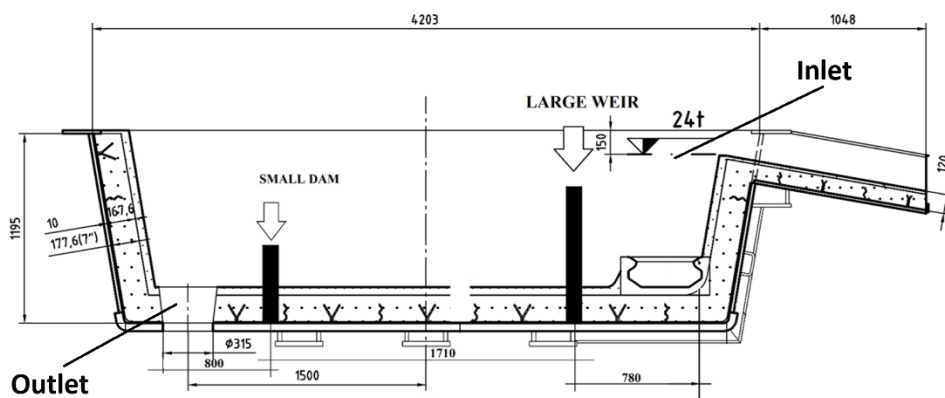
- Úprava stien do tvaru V – cieľom je zvýšiť rýchlosť a predĺžiť Rt_{min} na CS2.
- Vytvorenie drážky od stredu Spheriku k bokom na zlepšenie prúdenia.

2.7.2. Porovnávanie charakteru prúdenia v jednootvorovej medzipanve obdĺžnikového tvaru pri použití sférickej a štandardnej dopadovej dosky spolu s vystrojením medzipanvy

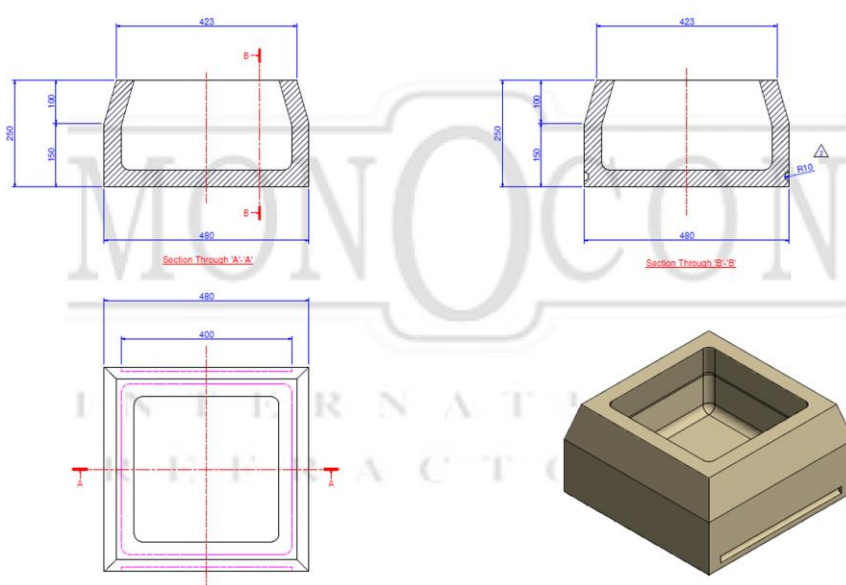
Cieľom simulácií bolo porovnať charakter prúdenia tekutej ocele v medzipanve pri rôznych konfiguráciách vnútorného vystrojenia. Ako východisková konfigurácia bola uvažovaná aktuálne používaná zostava s komplexnejšou tvarovou dopadovou plochou a doplnkovými usmerňovacími prvkami. Porovnanie bolo realizované s variantom obsahujúcim zjednodušenú tvarovú dopadovú plochu bez ďalších modifikátorov.

Hodnotenie bolo vykonané na základe C-kriviek získaných zo simulácií s použitím stopovacej látky, pričom z nich boli určené retenčné časy pre jednotlivé prípady. Charakter prúdenia bol analyzovaný pomocou vektorových polí, kontúr rýchlostí a prúdnic. Zvlášť bola sledovaná distribúcia rýchlostí na stene nachádzajúcej sa za dopadovou plochou.

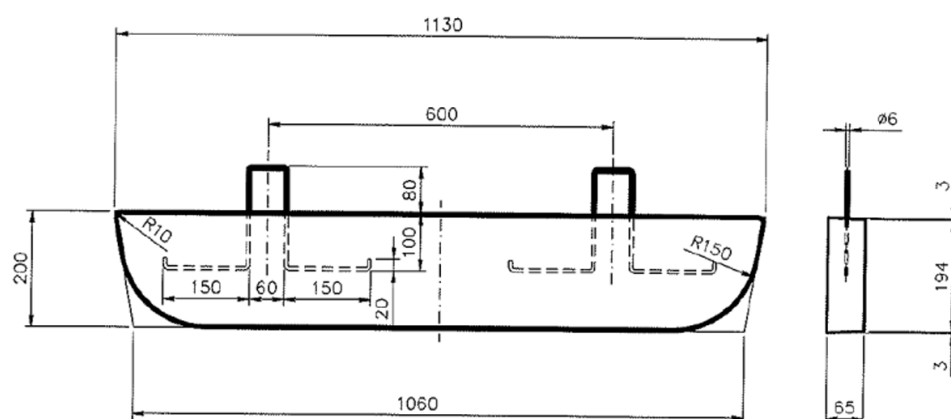
Na nasledujúcich Obrázkoch, **Obr. 143 - 146** sú znázornené reálne rozmery, medzipánvy a jej vystrojenia, z ktorých boli neskôr vytvorené geometrie pre matematické simulácie v programe Ansys Flluent.



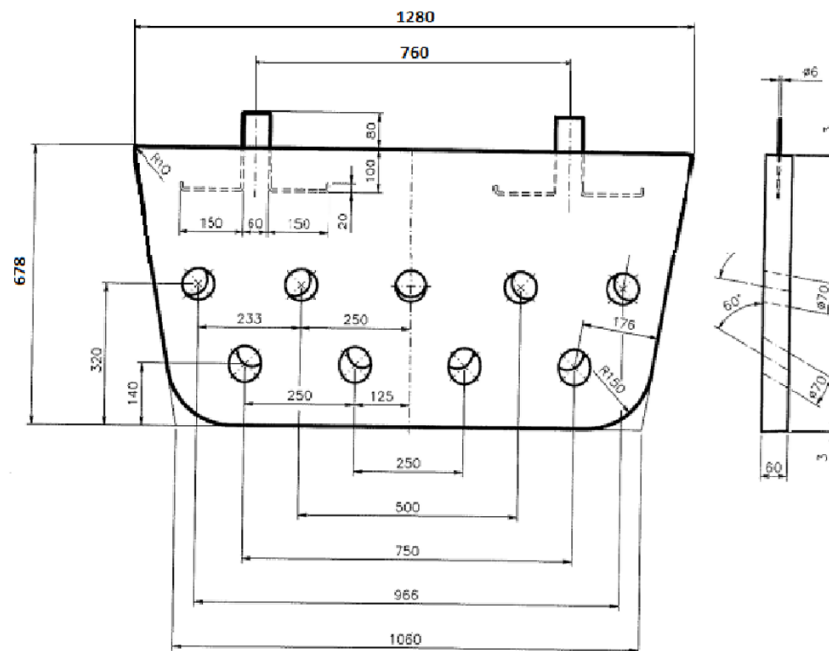
Obr. 143 Jednootvorová medzipánva Obd. Tvaru



Obr. 144 Používaná štandardna dopadová doska



Obr. 145 Malá hrádzka



Obr. 146 Veľká priehradka s otvormi



Obr. 147 Uloženie vystrojenia (hrádzok) v medzipanve v prevádzke

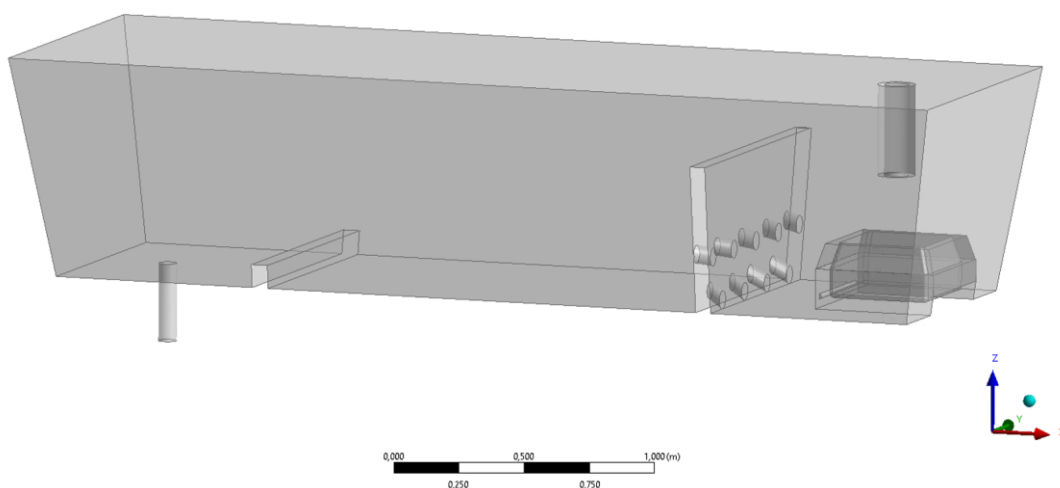
Rozmery pre tvorbu 3D geometrie

hrúbka pracovnej výmurovky: 70-80 mm predpis ale namerali sme od 9-15cm ale aj 4 cm

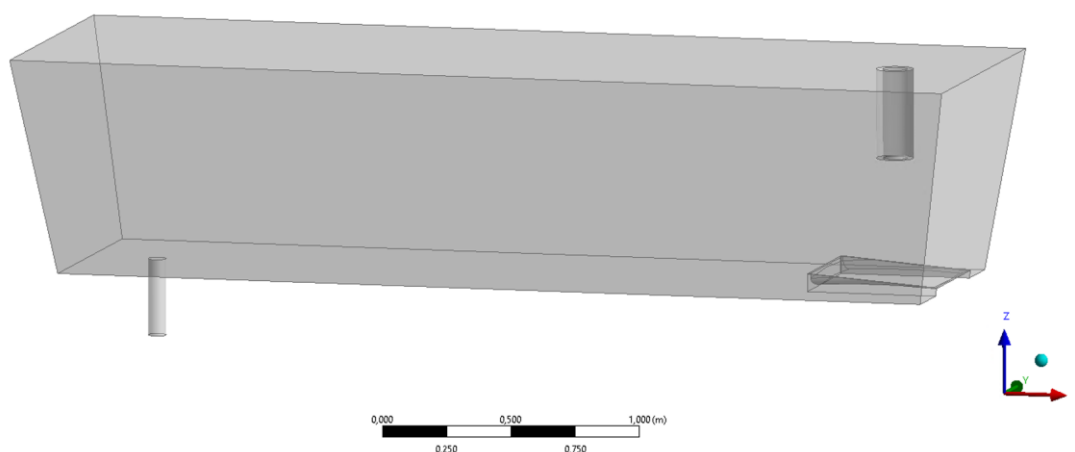
- vnútorná šírka (pracovná) MP v hornej časti 129 cm

- veľká prepážka od steny hore 88,5, dole 79,5
- výška veľkej prepážky od dna (prac. vým.) 58cm
- vzdialenosť medzi VP a MP 170cm
- výška malej prepážky od dna pracovnej výmurovky 9 cm
- vzdialenosť malej prepážky od steny 79,5 cm
- turbostop končí na 49 cm od steny
- turbostop vzdialenosť od bočnej steny 28,5cm
- vzdialenosť MP výlevky (os) od steny 24cm
- priemer MP výlevky 70mm
- priemer panvovej výlevky je 55mm
- hrúbka pracovnej výmurovky medzipánve je 100mm
- výška dopadu od spodného konca ochrannej trubice po dopad v turbostope je cca 500mm
- výška hladiny ocele (aj s troskou) je 89cm
- rýchlosť liatia: min 0,4m/min - max 1,2m/min, štandardne 0,9-1,1m/min
- Váha tavby cca 103ton, max. 105ton
- doba liatia 45-60min

Geometria medzipanvy použitej pri CFD simuláciách:



Obr. 148 Standardná konfigurácia – 1

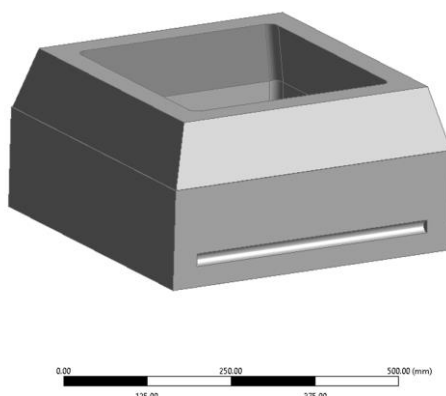


Obr. 149 Testovaná konfigurácia – 2

Tab. 11 Prehľad porovnávaných konfigurácií vnútorného vystrojenia medzipanvy použitých pri simuláciách

Konfigurácia	Popis
1	Štandardné vystrojenie medzipanvy – malá hrádzka, veľká prepážka s otvormi, Štandardný typ dopadovej dosky – typu ST
2	Vystrojenie medzipanvy len s tvarovou dopadovou doskou K4-70

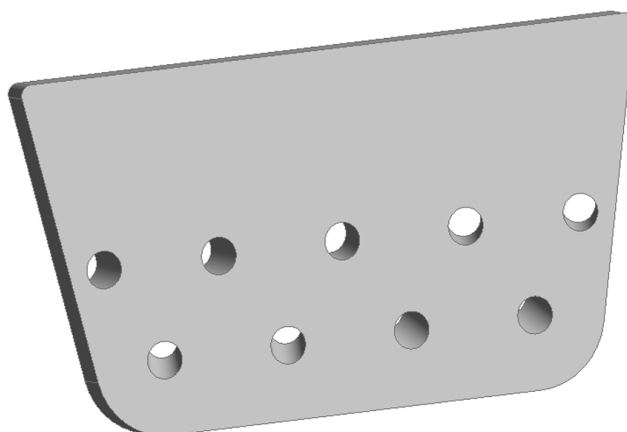
Použité vystrojenie mdzipanvy v matematických simuláciach



Obr. 150 Štandardna dopadová doska typu-ST



Obr. 151 Malá hrázka



Obr. 152 Velká prepážka s otvory



Obr. 153 Dopadová doska Spheric K4-70

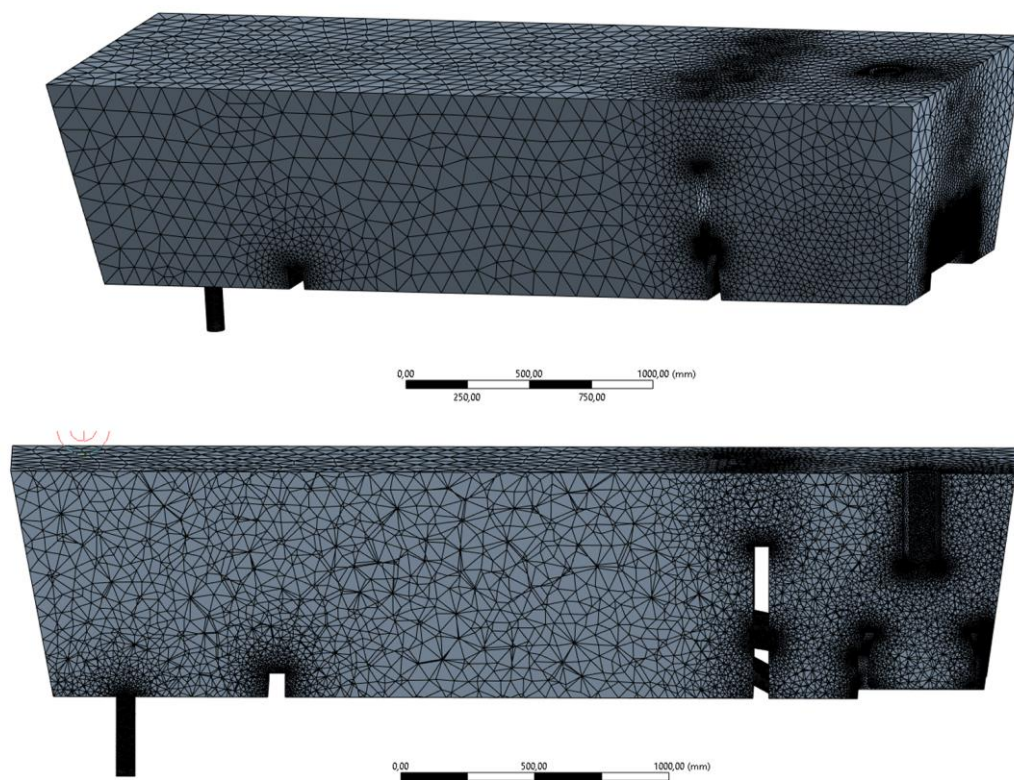
2.7.2.1. Počiatočné a okrajové podmienky pre CFD simulácie

Výpočet bol realizovaný pri odlievaní 103 t za 45 minút. Po prepočte kritérií podobnosti a vlastností ocele pre simulácie bolo vypočítané objemové množstvo pretečenej ocele 38.15 kg/s, čo činí 0.767 m.s-1 na základe hustoty ocele 7020 kg/m³. Objem medzipanvy je 3.4594 m³. Na základe Reynolsovho čísla pre kruhový prierez vstupu do medzipanvy bola vypočítaná intenzita turbulencie, analogicky ako pri predchádzajúcich realizovaných simuláciach podľa vzťahu (1). Hodnota činila 2,98 % čo odpovedá hodnote Reynolsovho čísla $Re = 810\,985$.

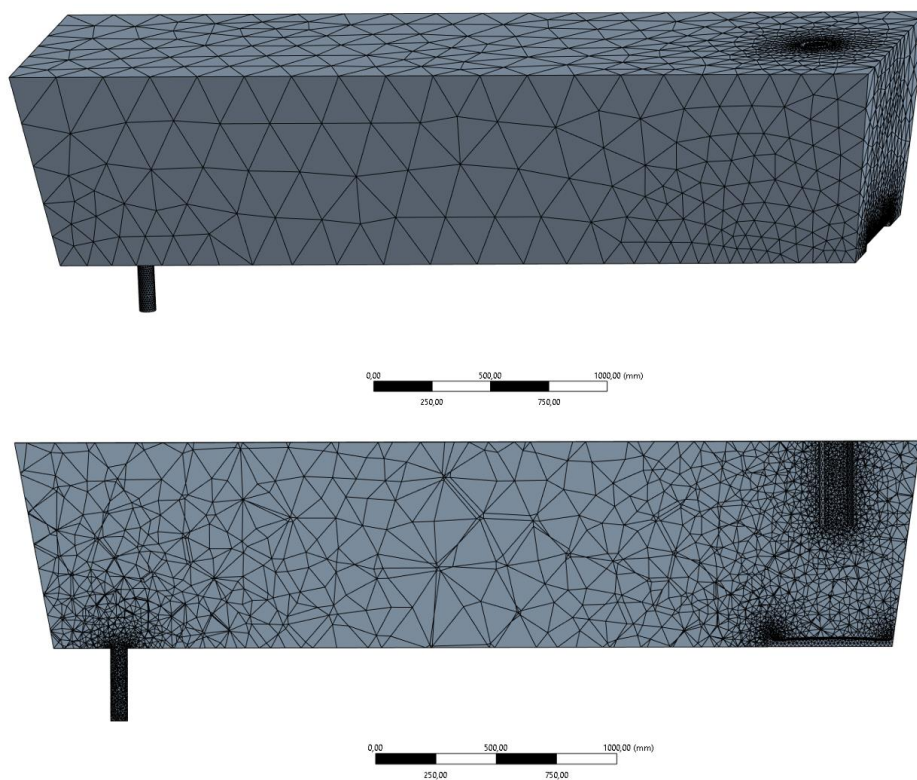
Pre výskum bol použitý CFD program Ansys Fluent, the software produced by ANSYS, Canonsburg, PA, USA. Výpočet sa realizoval na 3D modely. Väčšina riešených problémov v praxi má turbulentné prúdenie, preto je potrebný turbulentný model. Pre výpočet bol použitý Model k-epsilon realizable. Pre zhodnotenie 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 prúdacie 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. 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 0.2773 a pre ortogonalitu max. 0,99492. Dôležitým krokom je aj špecifikácia oblasti vstupu, výstupu a stien modelu medzipanvy, kvôli možnosti následného zadávania počiatočných a okrajových podmienok.

Posledné uvedené matematické simulácie sú pre dvojstupňovú hubicu na základe návrhu ŽP VVC. Výstupy z týchto simulácií sú zaujímavé najmä z pohľadu prúdenia v oblasti troskovej čiary a preto v nich odporúčame pokračovať v roku 2021.



Obr. 154 Výpočtová sieť konfigurácie č.1



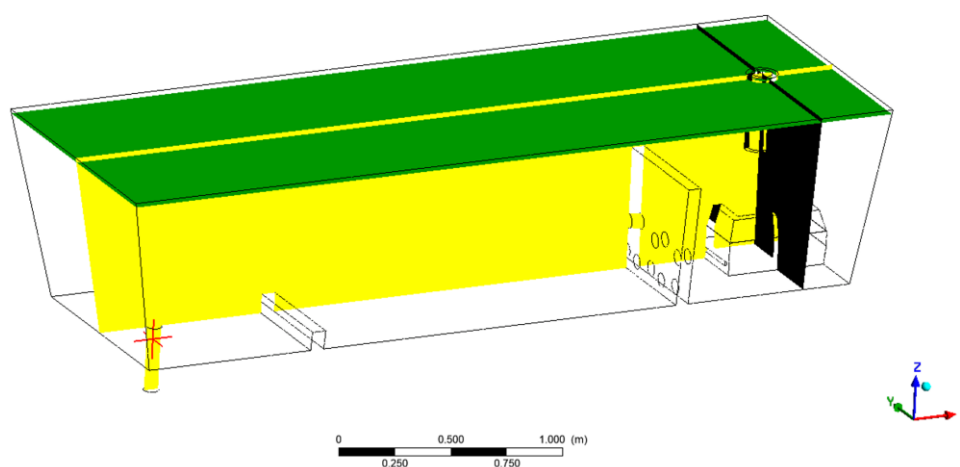
Obr. 155 Výpočtová sieť konfigurácie č. 2

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.

Tab. 12 Hodnoty okrajových a počiatočných podmienok pre CFD simulácie

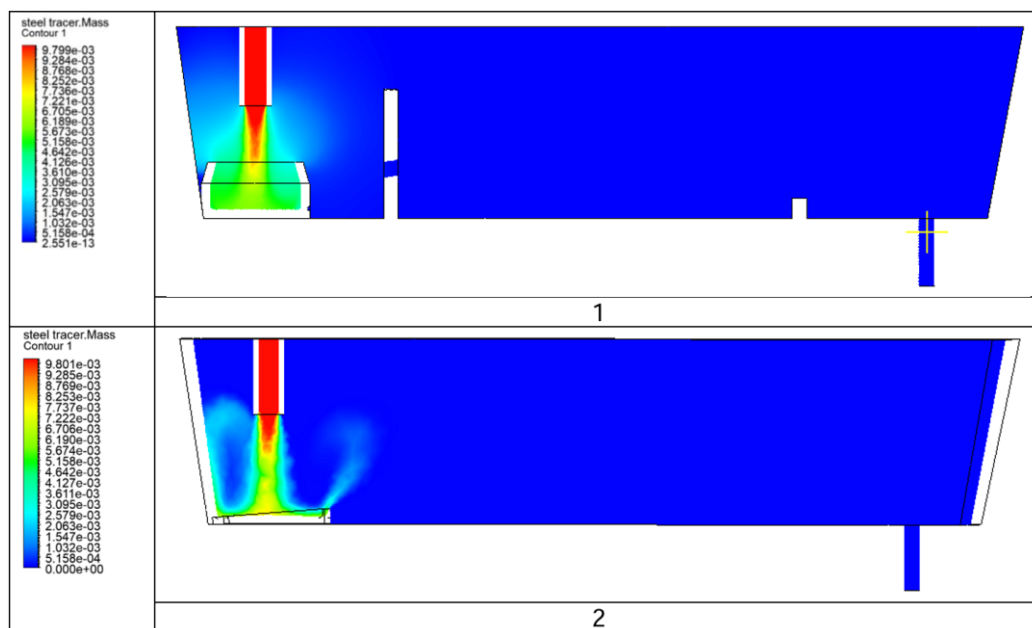
Parameter	Value
Model	
Diameter of ladle shroud [mm]	95
Depth of molten steel [mm]	860
Material	
Inlet temperature [K]	1823
Density of molten steel [kg.m-3]	7020
Viscosity of molten steel [kg.m-1.s-1]	0.0067
Specific heat [J.kg-1.K-1]	750
Thermal conductivity [w.m-1.K-1]	41
Heat flux [kw.m-2]	15
Inlet	
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

V rámci simulácií boli v geometrickom modeli medzipanvy definované vybrané sledované roviny a výpočtové body, ktoré slúžili na podrobnú analýzu dynamiky prúdenia. Umiestnenie týchto rovín a bodov bolo navrhnuté tak, aby pokrývali kľúčové oblasti medzipanvy – najmä priestor za dopadovou plochou, centrálnu časť a oblasť v blízkosti výtokového otvoru. Tieto roviny a body boli následne použité na vizualizáciu vektorových polí, kontúr rýchlostí a vývoja koncentrácie stopovacej látky.

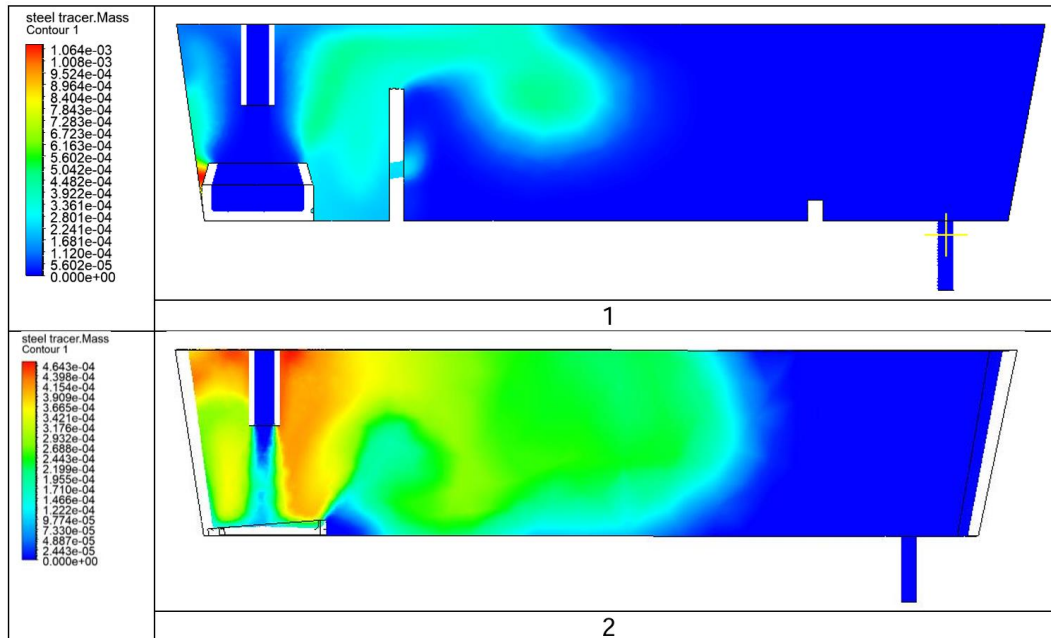


Obr. 156 Sledované body a roviny: Sledovaný bod (červený krížik), Rovina 1 – žltá farba, Rovina 2 – čierna farba, Rovina 3 – zelená farba

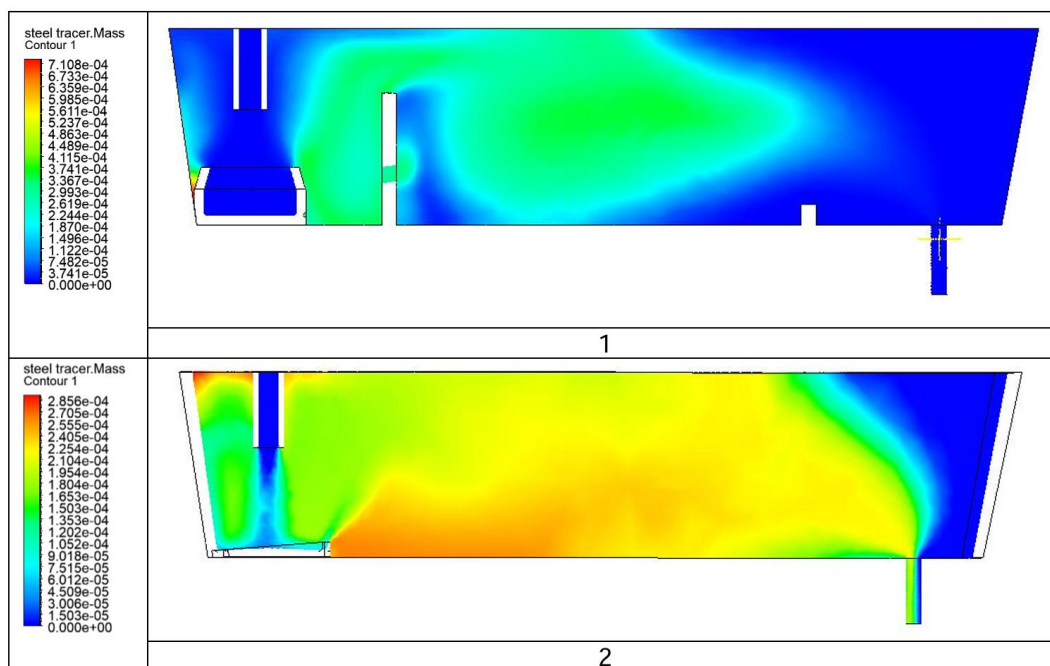
2.7.2.2. Výsledky matematických simulácií CFD



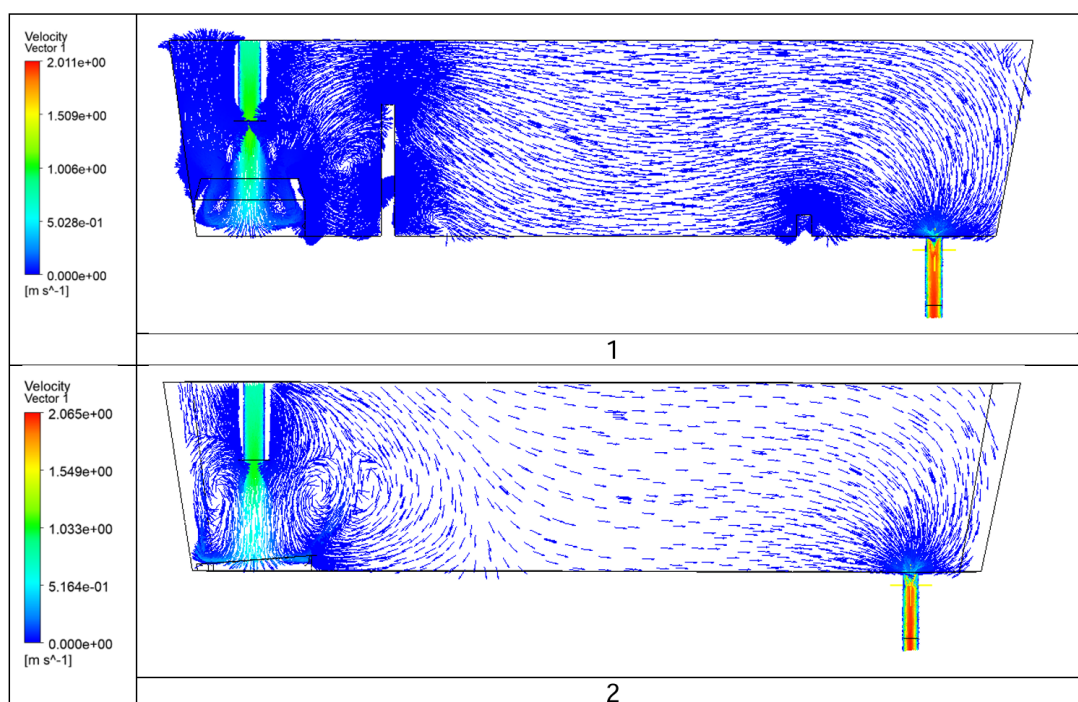
Obr. 157 Distribúcia stopovacej látky v 20 sekunde (Rovina 1)



Obr. 158 Distribúcia stopovacej látky v 120 sekunde (Rovina 1)

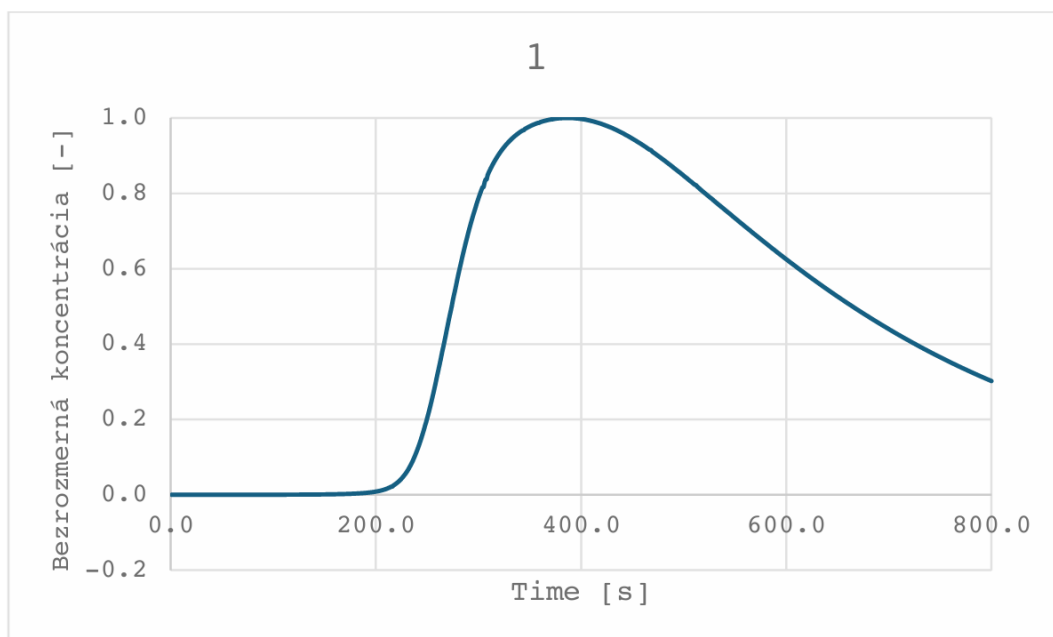


Obr. 159 Distribúcia stopovacej látky v 220 sekunde (Rovina 1)

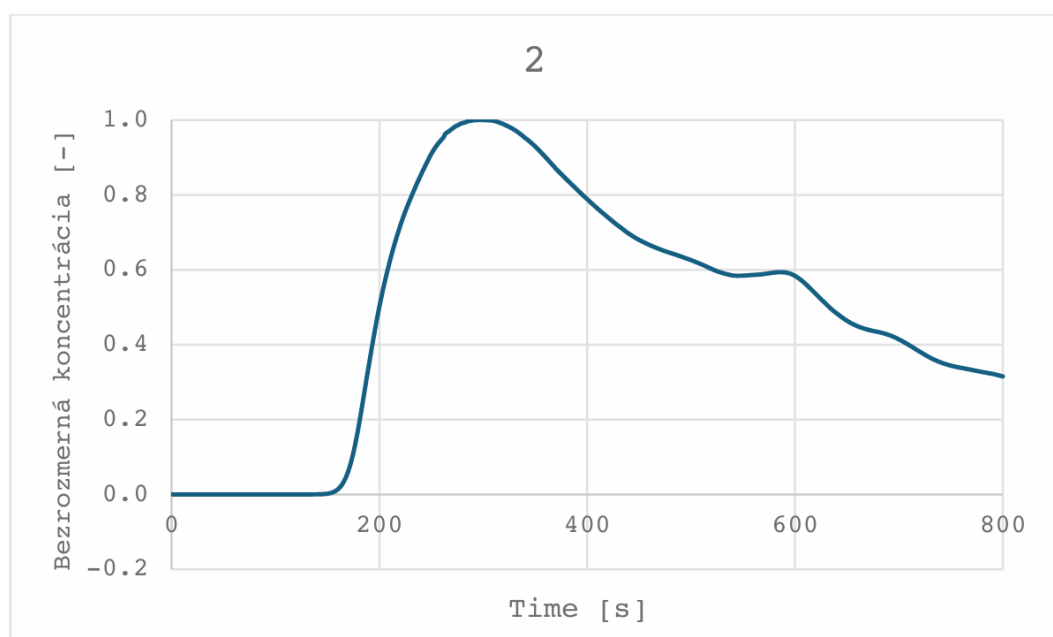


Obr. 160 Smer prietoku tekutiny v medzipanve na (Rovina 1) – vektory

2.7.2.3. Vyhodnotenie výsledkov na základe C-kriviek



Obr. 161 C – krivka pre konfiguráciu 1



Obr. 162 C – krivka pre konfiguráciu 2

Tab. 13 Výsledky retenčných časov

Konfigurácia	Výsledky min. a max. retenčných časov	
	T min. [s]	T max. [s]
1	186	388
2	143	297

2.7.2.4. Záver kapitoly

Z pozorování sledování kontúr vyplývá, že při použití tvarové dopadové desky „K4“ (konfigurácia 2) sa dosahuje rovnomernejšiemu rozptýleniu ocele v celom objeme smerom k výtokovému otvoru. Pri pozorovaní v oblasti troskovej čiary pri konfigurácii 1 je vidieť zvýšenú rýchlosť v okolí ochrannej trubice a v oblasti nad veľkou prepážkou. Pri konfigurácii 2 zvýšená rýchlosť prúdenia je pozorovaná rovnomerne od ochrannej trubice ku krajom v oblasti pritekajúcej ocele.

Pri sledovaní vektor môžeme pozorovať menšie turbulentné prúdenie v oblasti ochrannej trubice, čo môže mať pozitívny vplyv na opotrebenie výmurovky v tejto oblasti. Vyhodnotenie na základe RDT c-kriviek a retenčného času:

- pri konfigurácii 1 sa dosiahol prvý zaznamenaný impulz v 14 sekunde na liacom prúde, čo ale nepotvrdzuje vizuálny priebeh C-krivky.
- pri konfigurácii 2 sa dosiahol prvý impulz v 97 sekunde.
- samotný priebeh kriviek bol podobný s rozdielom v rozsahu 540- 600 sekundách, kde sa asi prejavil vplyv úzkych stien

Cieľom štúdie bolo porovnať charakter prúdenia v medzipanve Smederevo pri použití dvoch odlišných konfigurácií:

- 1) Referenčná konfigurácia (1) – obsahuje tvarovú dopadovú dosku (Type ST monobox), veľkú priehradku s otvormi a malú hrádzku.
- 2) Testovaná konfigurácia (2) – obsahuje len tvarovú dopadovú dosku Spheric K4-70 bez ďalšieho vystrojenia.

Hlavné zistenia:

1) Charakter prúdenia:

Konfigurácia 1:

- Pozorované je zvýšené prúdenie v okolí ochrannej trubice a nad veľkou prepážkou.
- Prúdenie je menej rovnomerné, s výraznými turbulentiami v oblasti vstupu. O

Konfigurácia 2:

- Dosahuje sa rovnomernejší rozptyl ocele od ochrannej trubice smerom k výtokovým otvorom.

- Znížené turbulentné prúdenie v oblasti ochrannej trubice môže znížiť opotrebenie výmurovky.

2) Rýchlosť prúdenia:

Konfigurácia 1:

- Vyššia rýchlosť v okolí ochrannej trubice a nad veľkou prepážkou.

Konfigurácia 2:

- Rovnomerná distribúcia rýchlosti od ochrannej trubice ku krajom medzipanvy.

3) Retenčné časy (RTD krivky):

Konfigurácia 1:

- Prvý impulz bol zaznamenaný v 14. sekunde, avšak priebeh krivky nebol konzistentný.
- $T_{min} = 186 \text{ s}$, $T_{max} = 388 \text{ s}$.

Konfigurácia 2:

- Prvý impulz bol zaznamenaný v 97. sekunde, čo naznačuje lepšie rozloženie prúdenia.
- $T_{min} = 143 \text{ s}$, $T_{max} = 297 \text{ s}$ – kratšie retenčné časy oproti konfigurácii 1.
- Konfigurácia 2 (Spheric K4-70) poskytuje rovnomernejšie prúdenie a menšie turbulencie v oblasti ochrannej trubice, čo môže viesť k nižšiemu opotrebeniu výmurovky.
- Konfigurácia 1 má dlhšie retenčné časy, ale vykazuje menej stabilné prúdenie a väčšiu dynamiku v oblasti ochrannej trubice.
- Odporúča sa zvážiť optimalizáciu výšky a umiestnenia hrádzok pri použití dopadovej dosky Spheric K4-70, aby sa dosiahla lepšia rovnomernosť prúdenia a znížila sa erózia výmurovky.

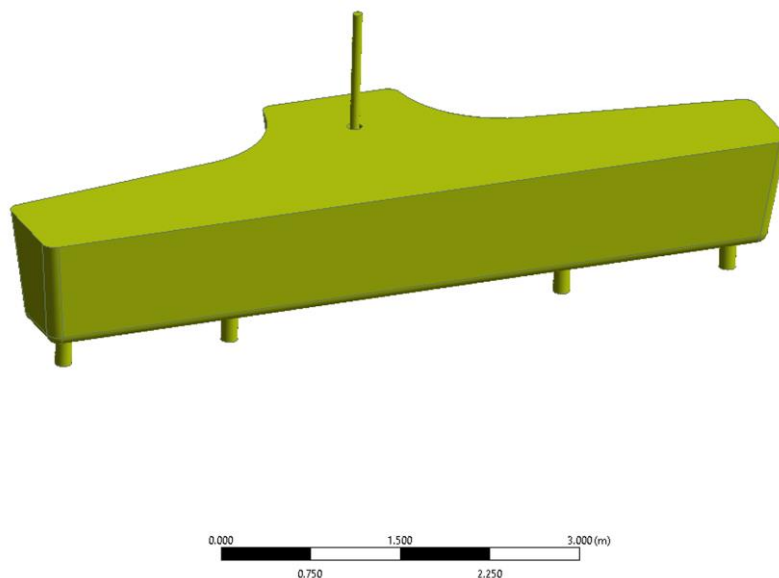
2.7.3. Matematické simulácie prúdenia ocele v štvorprúdovej medzipanve: vplyv geometrie sférickej dopadovej plosky a vychýlenia vtokovej trubice

Cieľom simulácií bolo analyzovať vplyv rôznych geometrických konfigurácií dopadovej dosky a vychýlenia ochrannej trubice na charakter prúdenia ocele v štvorvýtokovej medzipanve. Prúdenie v medzipanve je známe svojou citlivosťou na asymetrické prevádzkové podmienky, ako sú nesúosé napojenie ochrannej trubice alebo teplotná nehomogenita, ktoré môžu viesť k nestabilným prúdeným vzorcom a zníženej účinnosti riadenia procesu. Z tohto dôvodu boli realizované numerické simulácie zohľadňujúce ideálne aj neideálne vstupné podmienky.

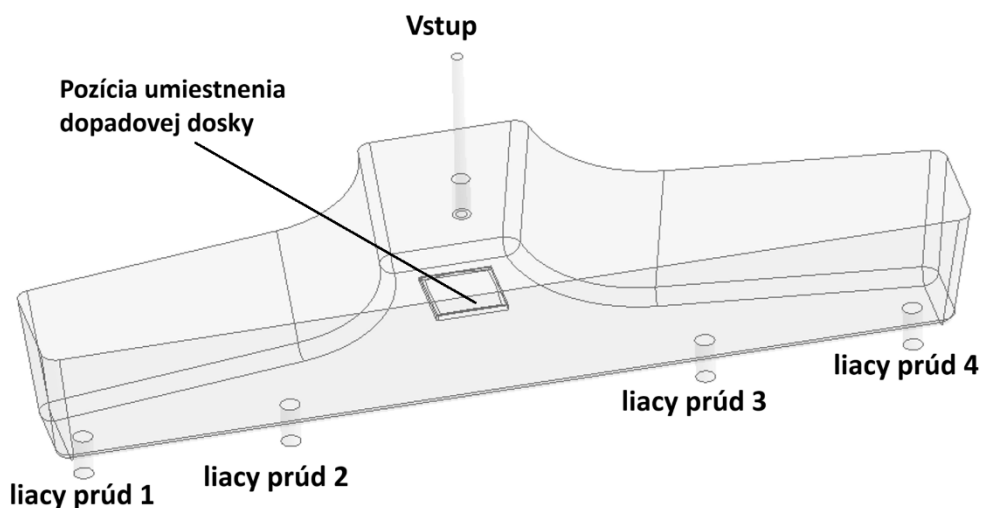
Porovnávané boli dve konfigurácie dopadovej dosky – štandardná rovinná geometria a trojrozmerná tvarová dopadová doska sférického typu. V oboch prípadoch bol simulovaný vplyv rôznych úrovní vychýlenia ochrannej trubice. Výpočty boli vykonané s použitím realizovateľného k - ε modelu turbulencie a metódy sledovania častíc na analýzu retenčných charakteristík pomocou C-kriviek. Získané výsledky poskytujú poznatky o tom, ako jednotlivé konštrukčné riešenia ovplyvňujú stabilitu a rovnomernosť prúdenia aj pri prevádzkových odchýlkach, a môžu prispieť k zlepšeniu návrhu medzipaniev z hľadiska robustnosti voči asymetrii vstupu.

2.7.3.1. Konfigurácie simulácie a geometria štvorvýtokovej medzipanvy

Analyzovaná medzipanva **Obr.163** predstavuje priemyselnú štvorvýtokovú konfiguráciu s pracovným objemom $7,794 \text{ m}^3$, ktorá sa štandardne využíva pri sekvenciách plynulého odlievania približne 65 ton tekutej ocele počas 35 minút. Na základe kritérií podobnosti a fyzikálnych vlastností ocele bol pre simulácie stanovený objemový prietok $30,92 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$, čo zodpovedá priemernej rýchlosti prúdenia $0,878 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ pri hustote ocele $7020 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.



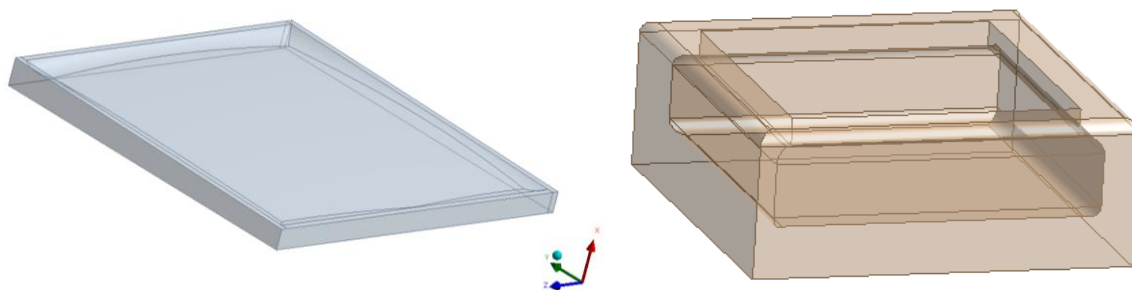
Obr. 163 Geometrické znázornenie vnútorného objemu medzipanvy



Obr. 164 Vonkajší objem medzipanvy so znázornením základného umiestnenia analyzovaných dopadových dosiek.

Na posúdenie vplyvu na charakter prúdenia boli analyzované dve konfigurácie dopadovej dosky **Obr.165**. Prvá konfigurácia využívala štandardnú dopadovú dosku navrhnutú tak, aby usmerňovala prúd pritekajúcej tekutej ocele priamo smerom nadol. Druhá konfigurácia obsahovala sférickú dopadovú dosku typu K4 s trojrozmernou geometriou určenou na účinnejšie rozptýlenie energie prúdu a rovnomernejšie rozdelenie toku v celom objeme medzipanvy.

Okrem rozdielov v geometrii dopadových dosiek bol analyzovaný aj vplyv vychýlenia ochrannej trubice. Simulované boli viaceré odchýlky polohy vrátane bočného posunu o 200 mm doľava od pozdĺžnej osi medzipanvy a naklonenia ochrannej trubice vzad o $4,7^\circ$. Testované boli aj kombinácie polohových a uhlových vychýlení s cieľom reprezentovať realistické prevádzkové podmienky.



Obr. 165 Geometrické modely hodnotených dopadových dosiek: sférická dopadová doska typu K4 (vľavo) a štandardná dopadová doska (vpravo).

Numerické simulácie boli realizované v softvéri Ansys Fluent (ANSYS, Canonsburg, PA, USA) s využitím realizovateľného modelu turbulencie k- ϵ na zachytenie turbulentných vlastností prúdenia. Výpočtová doména bola rozdelená pomocou polyédrovej siete s celkovým počtom 204 100 prvkov. Kvalita siete bola hodnotená na základe kritérií šikmosti a ortogonalita, pričom bola dosiahnutá priemerná hodnota šikmosti 0,2318 a maximálna ortogonalita 0,99237, čo potvrdilo vhodnosť siete pre presnú numerickú analýzu.

Reynoldsovo číslo, vypočítané podľa rovnice (1) pre kruhový prierez vstupu ochrannej trubice, dosiahlo hodnotu $Re = 682\,935$, čo potvrdzuje plne turbulentný režim prúdenia. Na základe toho bol ako vhodný zvolený realizovateľný model k- ϵ , schopný zachytiť zložité turbulentné štruktúry typické pre priemyselné podmienky v medzipanve. Intenzita turbulencie na vstupe bola stanovená ako 2,98 % (odvodená z Reynoldsovho čísla), zatiaľ čo výstup bol modelovaný ako tlaková hranica s intenzitou turbulencie 5 %.

Na vyhodnotenie rozloženia retenčných časov bola do toku po dobu 10 sekúnd vstrekovávaná stopovacia látka, pričom sa uplatnila metóda sledovania častíc. Realizované boli stacionárne aj nestacionárne výpočty. Nestacionárna analýza zahŕňala 8 000 časových krokov s veľkosťou kroku 0,1 s (maximum 20 iterácií na krok), čo umožnilo detailné sledovanie transportu častíc a vývoja prúdenia v čase.

Kritériá hodnotenia

Hydrodynamické správanie jednotlivých konfigurácií bolo hodnotené na základe analýzy vektorových polí rýchlosti, ktoré poskytli informácie o smere toku, jeho stabilite a tvorbe recirkulačných oblastí. Na identifikáciu stagnujúcich zón s nízkou prietokovou aktivitou, ktoré sú nežiadúce z hľadiska miešania a teplotnej homogenizácie, boli použité koncentrácie stopovacích častíc vo forme kontúr. Retenčné časy boli vypočítané na základe údajov zo sledovania častíc a vyjadrené vo forme C-kriviek pre každý výtokový prúd. Tieto krivky umožnili stanovenie minimálnych a maximálnych retenčných časov, čím sa získal kvantitatívny základ pre porovnanie účinnosti prúdenia medzi jednotlivými konfiguráciami.

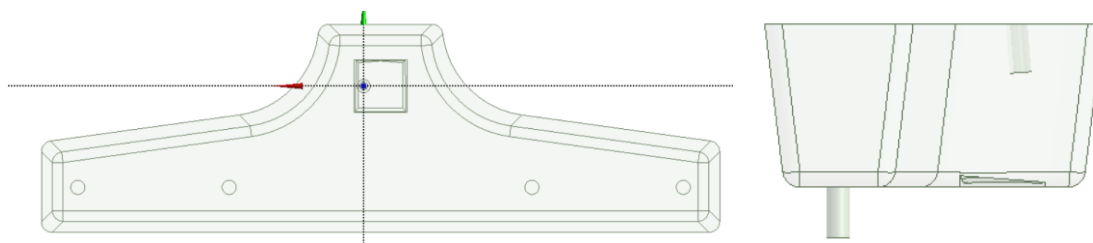
Doplňujúce kvalitatívne hodnotenie bolo zamerané na identifikáciu charakteristických prúdených vzorcov, ktoré poukazovali na piestový charakter toku, spojený s rizikom skratového prúdenia a obmedzenou účinnosťou miešania. Pozornosť bola venovaná aj výskytu tzv. „red eye“ javov, ktoré sú typicky spojené s vysokými rýchlosťami v okolí ochrannej trubice a zvýšeným opotrebením žiaruvzdorného materiálu. Tieto pozorovania boli kľúčové pre posúdenie praktickej výkonnosti

jednotlivých geometrií dopadových dosiek a ich schopnosti zabezpečiť stabilné prúdenie aj pri vychýlení ochrannej trubice.

2.7.3.2. Výsledky matematických simulácií

Vplyv geometrie dopadovej dosky a vychýlenia ochrannej trubice na charakter prúdenia v medzipanve bol hodnotený na základe šiestich vybraných konfigurácií. Dve z nich predstavovali referenčné prípady – so štandardnou a sférickou dopadovou doskou typu K4 pri ideálnom zarovnaní ochrannej trubice. Zvyšné štyri konfigurácie boli zamerané na účinky vychýlenia ochrannej trubice, konkrétne pri bočnom posune o 200 mm doľava a pri náklone vzad o 4,7°.

Obe tieto odchýlky, znázornené na **Obr. 166**, boli aplikované na obe typy dopadových dosiek, aby sa vyhodnotila ich citlivosť na neideálne prevádzkové zarovnanie vstupu. Prehľad všetkých analyzovaných konfigurácií je uvedený v **Tab. 14**.

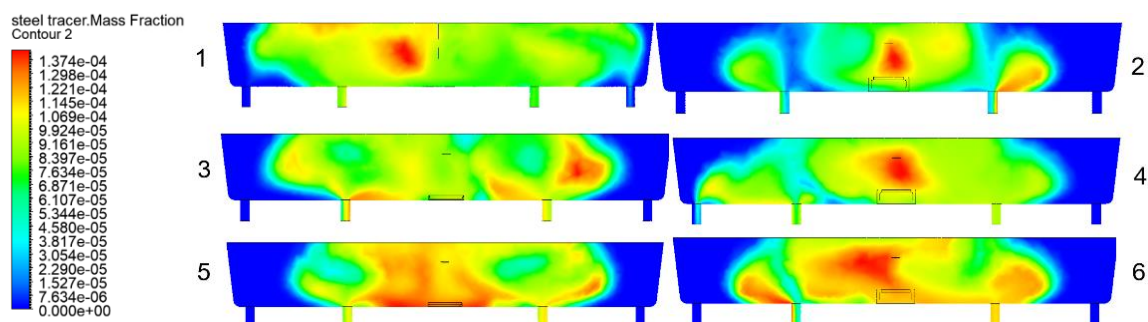


Obr. 166 Vizualizácia vychýlenia ochrannej trubice: bočný posun o 200 mm doľava (vľavo) a náklon vzad o 4,7° (vpravo) v modeli medzipanvy.

Tab. 14 Prehľad analyzovaných konfigurácií medzipanvy s rôznymi typmi dopadových dosiek a polohami ochrannej trubice.

Configuration ID	Impact pad type	Ladle shroud position
1	Spherical K4	Centered
2	Standard	Centered
3	Spherical K4	Displaced by 200 mm (left)
4	Standard	Displaced by 200 mm (left)
5	Spherical K4	Tilted by 4.7° (backward)
6	Standard	Tilted by 4.7° (backward)

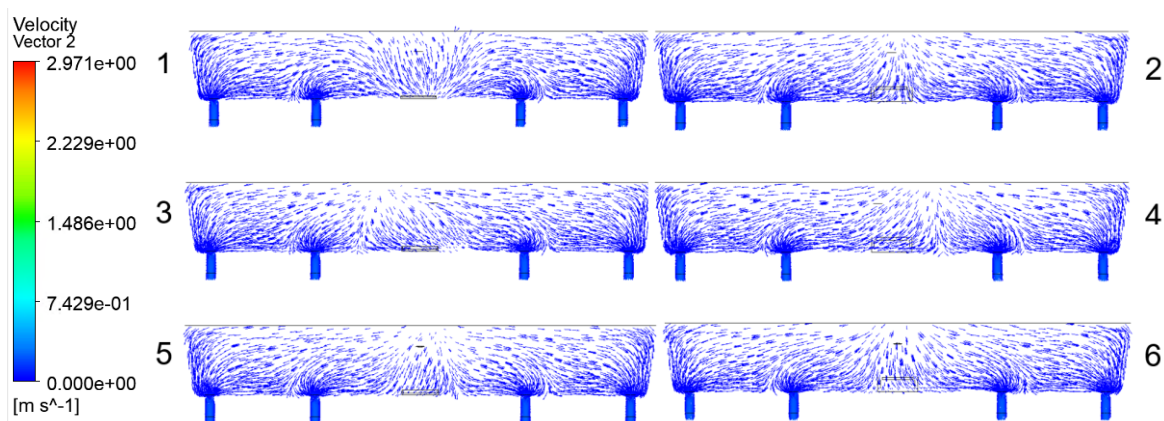
Prvým hodnotiacim kritériom charakteru prúdenia v medzipanve bolo rozloženie stopovacej látky po 400 sekundách, ktoré poskytuje informáciu o prítomnosti mŕtvych zón a celkovej účinnosti miešania. Na **Obr. 167** je uvedené porovnanie koncentrácie stopovacej látky pre všetky analyzované konfigurácie.



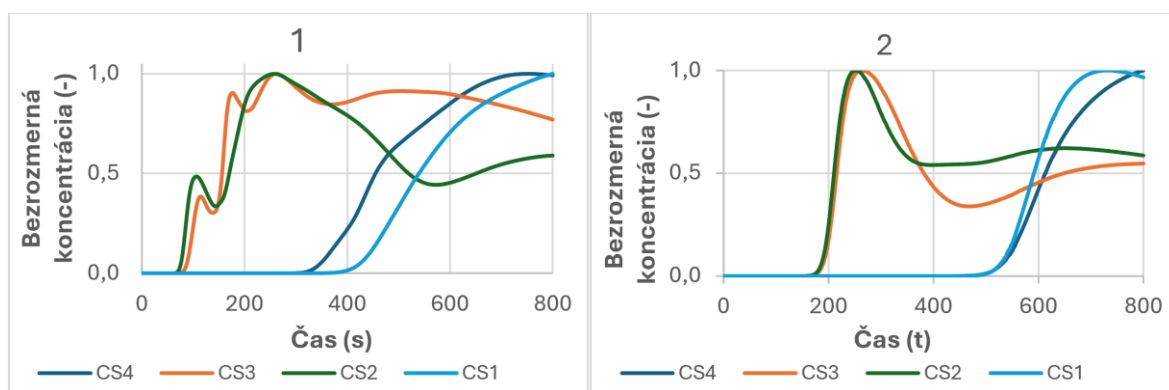
Obr. 167 Rozloženie koncentrácie stopovacej látky po 400 sekundách pre všetky analyzované konfigurácie.

Porovnanie rozloženia stopovacej látky po 400 sekundách **Obr. 167** ukazuje, že konfigurácia so sférickou dopadovou doskou (1) vykazuje najpriaznivejší charakter prúdenia, s výraznejšou disperziou v hornej časti medzipanvy, čo podporuje rafinačné reakcie na rozhraní troska–kov. Táto konfigurácia zároveň dosahuje najnižší objem mŕtvych zón. Pri vychýlení ochrannnej trubice o 200 mm doľava vykazuje konfigurácia so sférickou doskou (3) rovnomernejšie rozloženie toku v porovnaní so štandardnou doskou (4), pri ktorej sa pozorovali výraznejšie mŕtve zóny v oblasti výtokov. V prípade náklonu trubice o $4,7^\circ$ vykazujú obidve konfigurácie (5 a 6) porovnateľné prúdenie, bez výraznej prevahy jednej z geometrií.

Druhým hodnotiacim kritériom bol smer a charakter prúdenia tekutej ocele, ktorý ovplyvňuje intenzitu piestového toku a riziko vzniku javov typu „red eye“. Obrázok 5 zobrazuje porovnanie vektorových polí rýchlosti pre všetky analyzované konfigurácie.



Obr. 168 Vizualizácia vektorových polí rýchlosti znázorňujúca smer a intenzitu prúdenia v medzipanve pre všetky analyzované konfigurácie.



Obr. 169 Porovnanie C-kriviek pre konfigurácie 1 (sférická dopadová doska typu K4) a 2 (štandardná dopadová doska).

Na základe celkového porovnania všetkých hodnotených konfigurácií dosahuje štandardná dopadová doska dlhšie retenčné časy vo všetkých výtokových prúdoch v porovnaní so sférickou dopadovou doskou typu K4. Pri konfigurácii so sférickou doskou sú na C-krivkách jasne viditeľné oscilácie, ktoré poukazujú na zložitejšie a menej stabilné rozloženie toku v priestore medzipanvy. Toto správanie je výsledkom kombinácie geometrie medzipanvy a špecifického tvaru dopadovej dosky.

Vplyv vychýlenia ochrannnej trubice sa prejavil vo všetkých analyzovaných prípadoch, pričom ovplyvnil rovnomernosť toku aj rozdelenie retenčných časov. Kvantitatívne výsledky pre všetky konfigurácie sú uvedené v **Tab. 15**, ktorá obsahuje minimálne a maximálne retenčné časy pre všetky štyri výtokové prúdy.

Tab. 15

Výsledky min. a max. retenčných časov								
	Tmin (s)				Tmax (s)			
	CS1	CS2	CS3	CS4	CS1	CS2	CS3	CS4
1	262	49	56	249	800	258	262	752
2	374	120	126	359	731	252	262	800
3	301	91	87	296	781	276	316	725
4	332	93	111	320	800	292	224	472
5	339	98	88	347	752	239	343	800
6	362	94	124	373	800	306	283	627

Ako už bolo uvedené, výsledky uvedené v **Tab. 15** ukazujú, že štandardná dopadová doska dosahuje vyššie retenčné časy, avšak s väčšími rozdielmi medzi jednotlivými výtokovými prúdmi. Naopak, sférická dopadová doska typu K4 zabezpečuje rovnomernejšie rozdelenie retenčných časov medzi výtokmi, aj napriek tomu, že C-krivky vykazujú výraznejšie oscilácie, čo naznačuje lokálne zložitejšie prúdenie. Štandardná dopadová doska síce vykazuje hladší priebeh C-kriviek, avšak s menej rovnomerným rozdelením toku medzi jednotlivými vetvami.

2.7.3.3. Záver kapitoly

Realizovaná štúdia potvrdila, že geometria dopadovej dosky a poloha ochrannej trubice majú zásadný vplyv na charakter prúdenia v medzipanve. Výsledky ukázali, že štandardná dopadová doska vedie k dlhším retenčným časom a podporuje lepšiu homogenizáciu, najmä pri ideálnych vstupných podmienkach. Zároveň však vykazuje výraznejší piestový tok a zvýšené riziko výskytu javu „red eye“ pri vychýlení ochrannej trubice, čo môže negatívne ovplyvniť stabilitu toku a rovnomernosť metalurgického účinku medzi jednotlivými výtokmi.

Naopak, sférická dopadová doska typu K4 zabezpečila rovnomernejšie rozdelenie toku v priestore medzipanvy, nižšiu intenzitu piestového prúdenia a menšiu citlivosť na asymetrické prevádzkové podmienky. Aj keď jej retenčné časy boli v priemere kratšie, prúdenie bolo stabilnejšie a rovnomernejšie rozložené naprieč všetkými výtokovými vetvami, čo je výhodné najmä z hľadiska prevádzkovej spoľahlivosti a kontroly kvality.

Na základe porovnania možno sférickú dopadovú dosku odporučiť v prípadoch, kde je prioritou stabilné riadenie toku, nižšia turbulentná záťaž a robustnosť voči prevádzkovým odchýlkam. Štandardná dopadová doska je vhodnejšia tam, kde je cieľom maximalizácia retenčného času a predĺženie kontaktu medzi kovovou a troskovou fázou pre zvýšenie rafinačného účinku.

2.8. Záver k výsledkom matematických simulácií

V rámci riešenia problematiky optimalizácie prúdenia tekutej ocele v medzipanve boli realizované rozsiahle matematické simulácie pomocou softvérového nástroja Ansys Fluent. Výpočtové modelovanie sa uskutočňovalo v niekoľkých etapách, ktoré zohľadňovali postupný vývoj návrhov vnútorného vystrojenia medzipanvy, overovanie výsledkov fyzikálnym modelom a rozšírenie štúdie o špecifické aspekty, ako je geometria dopadovej dosky a vychýlenie ochrannej trubice.

V počiatočnej fáze, nadväzujúcej na simulácie z roku 2019, boli implementované skúsenosti týkajúce sa tvorby výpočtovej siete a nastavenia vhodných okrajových a počiatočných podmienok (viď kapitola 1.3). Výpočtová doména bola definovaná tak, aby pokrývala celý objem medzipanvy s dostatočnou presnosťou na rozlíšenie prúdových štruktúr. Použitá polyédrová sieť spĺňala kritériá kvality so zohľadnením šikmosti a ortogonalita, čo umožnilo zabezpečiť stabilitu a presnosť simulácií.

Prvé výpočtové série sa zameriavali na úpravu geometrie výtokových otvorov v prepážke. Simulované boli tri odklony od pôvodného stavu – 8°, 12° a 16°. Na základe hodnotenia C-kriviek, retenčných časov, vektorových polí a kontúr koncentrácie bola ako optimálna vyhodnotená konfigurácia s odklonom 8°, ktorá bola následne validovaná fyzikálnym modelom a slúžila ako referenčný základ pre ďalšie návrhy.

V nadväznosti na túto časť bola pozornosť presunutá na hodnotenie účinkov dopadových dosiek s rôznou geometriou, pričom sa porovnávala štandardná (rovinná) dopadová doska a novo navrhnutý typ sférickej dopadovej dosky. Výpočty boli realizované pre rôzne typy medzipaniev, vrátane geometrií so symetrickým aj asymetrickým usporiadaním výtokov. Analyzované boli varianty s rozdielnou výškou bočných stien, zaoblením prechodových častí a úpravou zakrivenia aktívnej plochy dopadovej dosky.

Simulácie potvrdili, že tvar dopadovej dosky má zásadný vplyv na charakter prúdenia, najmä v oblasti pod ochrannou trubicou a v smere k výtokovým otvorom. Sférická dopadová doska znižovala intenzitu piestového prúdenia, zmierňovala turbulentné extrémny a podporovala rovnomernejšie rozdelenie toku v celom objeme medzipanvy. Napriek mierne kratším retenčným časom v porovnaní so štandardnou doskou poskytovala stabilnejší tok a vyššiu prevádzkovú robustnosť.

Ďalšia séria výpočtov bola zameraná na hodnotenie vplyvu vychýlenia ochrannej trubice, ktoré v praxi môže vzniknúť v dôsledku montážnych alebo prevádzkových odchýlok. Simulované boli dva typy vychýlení – bočný posun o 200 mm a náklon o 4,7° – a ich kombinácie. Tieto odchýlky boli aplikované na obe typy dopadových dosiek. Výsledky ukázali, že štandardná dopadová doska je na

vychýlenie citlivejšia, čo sa prejavilo výraznými asymetriami toku a zvýšeným rizikom tvorby mŕtvych zón. Naopak, sférická dopadová doska si udržiavala stabilný charakter prúdenia aj pri neideálnom zarovnaní vstupu.

Vyhodnotenie simulácií bolo realizované viacerými metódami: analýzou vektorových polí, kontúr koncentrácie stopovacej látky, vizualizáciou recirkulačných oblastí a výpočtom C-kriviek pre každý výtokový prúd. Získané retenčné časy umožnili kvantitatívne porovnať jednotlivé konfigurácie a identifikovať varianty s najvyššou účinnosťou z hľadiska metalurgických požiadaviek – teda s predĺženou dobou zotrvania, rovnomerným rozdelením toku a minimalizáciou skratových ciest.

Výsledky numerických simulácií poskytli ucelený pohľad na správanie sa rôznych návrhov dopadových dosiek a vnútorného vystrojenia medzipanvy. Potvrdilo sa, že vhodne zvolená geometria dopadovej dosky má kľúčový význam pre optimalizáciu hydraulických podmienok, zvýšenie účinnosti sekundárnej metalurgie a zabezpečenie požadovanej kvality odlievanej ocele. Tieto zistenia tvoria dôležitý základ pre ďalší vývoj riešení zameraných na riadenie toku a podporu rafinačných procesov v oblasti medzipaniev.

3. Záver

Predložená monografia sa zamerala na podrobnú analýzu prúdenia tekutej ocele v medzipanve počas procesu plynulého odlievania, s dôrazom na optimalizáciu vnútornej geometrie a vystrojenia pomocou dopadových dosiek rôzneho typu. Osobitná pozornosť bola venovaná vývoju, testovaniu a porovnaniu sférickej dopadovej dosky, ktorej vývoj predstavuje nosnú časť projektu riešeného v rámci národného výskumného programu. Problematika bola riešená prostredníctvom kombinácie fyzikálneho modelovania a numerických simulácií s cieľom detailne pochopiť vplyv geometrických parametrov na tokové javy, retenčné charakteristiky a metalurgickú účinnosť medzipanvy.

Súhrn použitých prístupov a výpočtových podmienok

V prvej časti výskumu boli realizované výpočtové simulácie pomocou softvéru Ansys Fluent, pričom výpočtová doména bola navrhnutá tak, aby pokrývala reálny objem medzipanvy s dostatočným rozlíšením prúdových štruktúr. Boli aplikované vhodné okrajové a počiatočné podmienky v súlade s predchádzajúcimi experimentálnymi skúsenosťami (2019), pričom výpočty prebiehali v nestacionárnom režime s použitím realizovateľného k- ϵ modelu turbulencie. Overenie výpočtovej siete bolo vykonané na základe hodnôt šikmosti a ortogonalít, čo potvrdilo numerickú stabilitu riešení.

Na analýzu zotrvania tekutej ocele v medzipanve bola použitá stopovacia látka a metóda sledovania častíc, pomocou ktorej sa generovali C-krivky pre jednotlivé výtoky. Táto metóda umožnila kvantitatívne hodnotenie retenčných časov, identifikáciu skratových prúdov, mŕtvych zón, a odhad efektivity miešania a homogenizácie.

Výsledky zmeny geometrie priehradky a optimalizácia prúdenia

Prvotné simulácie boli zamerané na zmenu smerovania prúdenia prostredníctvom úpravy uhlov otvorov v priehradke. Testované boli konfigurácie s odklonom 8°, 12° a 16° od pôvodnej osi, pričom bola vybraná optimálna verzia s 8° sklonom na základe vývoja C-kriviek a vizualizácie toku. Táto konfigurácia bola odporúčaná aj na fyzikálne overenie a poskytla základ pre ďalšiu fázu optimalizácie.

Porovnanie štandardnej a sférickej dopadovej dosky

Najrozsiahlejšia časť práce bola venovaná porovnaniu štandardnej rovnej dopadovej dosky s novovyvinutou sféricou dopadovou doskou typu K4. Tieto konfigurácie boli testované v rôznych geometrických usporiadaniach medzipaniev, vrátane dvojvýtokových, štvorvýtokových a

symetrických typov. Hodnotené boli: rozloženie rýchlostných polí, intenzita recirkulácie, výskyt piestového toku, rozdelenie retenčných časov a citlivosť na prevádzkové odchýlky.

Štandardná dopadová doska dosahovala v priemere vyššie retenčné časy, čo je výhodné z hľadiska rafinácie a predĺženia kontaktu kovovej fázy s troskou. Na druhej strane, simulácie potvrdili vyššiu mieru piestového toku, čo vedie k vzniku skratových ciest a zníženej účinnosti homogenizácie. Navyše, pri neideálnych podmienkach vstupu (vychýlenie ochrannej trubice) bola štandardná doska výrazne náchylná na vznik asymetrického toku a „red eye“ efektu, čo v praxi môže spôsobovať nadmerné opotrebenie žiaruvzdornej výmurovky.

Sférická dopadová doska vykazovala výrazne rovnomernejšie rozloženie prúdenia, lepšiu stabilitu hladiny a menšiu turbulentnú záťaž v oblasti vstupu. Aj napriek tomu, že priemerné retenčné časy boli mierne kratšie, C-krivky vykazovali vyššiu symetriu a konzistentnosť medzi výtokmi, čo je výhodné z hľadiska rovnomerného metalurgického účinku. V konfiguráciách s vychýlením ochrannej trubice si sférická dopadová doska zachovala priaznivý tokový režim a vykazovala nižšiu citlivosť na asymetriu vstupu, čo potvrdzuje jej robustnosť voči reálnym výrobným podmienkam.

Hodnotenie výtokových charakteristík a zhrnutie retenčných časov

Pre každú z analyzovaných konfigurácií boli spracované retenčné charakteristiky vo forme C-kriviek, z ktorých boli odvodené minimálne a maximálne retenčné časy (T_{min} a T_{max}). Tieto hodnoty umožnili kvantitatívne porovnanie medzi konfiguráciami. Štandardná dopadová doska poskytla síce dlhší T_{max} , avšak s väčšími rozdielmi medzi výtokmi. Naopak, sférická dopadová doska priniesla rovnomernejšie rozloženie, čo znižuje riziko lokálnych odchýlok v kvalite ocele pri viacerých súčasne odlievaných prúdoch.

Význam pre prax a odporúčania

Na základe vykonaných simulácií možno konštatovať, že tvar dopadovej dosky patrí medzi kľúčové nástroje riadenia toku v medzipanve. Jeho správna voľba môže výrazne prispieť k zvýšeniu kvality odlievanej ocele bez nutnosti zavádzania ďalších pasívnych alebo aktívnych regulačných prvkov, ako sú prepážky, hrádzky alebo indukčné miešanie.

Sférická dopadová doska typu K4 sa ukázala ako vhodná voľba najmä pre aplikácie, kde je prioritou:

- stabilita toku,
- rovnomernosť medzi výtokmi,
- nízka citlivosť na vychýlenie vstupu,

- a dlhodobá spoľahlivosť pri odlievaní vysokokvalitných ocelí.

Naopak, štandardná dopadová doska môže byť vhodnejšia v aplikáciách, kde je požiadavka na maximálny retenčný čas a kde sú zaručené ideálne prevádzkové podmienky bez významných geometrických odchýlok.

Perspektíva ďalšieho výskumu

Výsledky prezentované v monografii poskytujú solídny základ pre ďalšie smerovanie výskumu v oblasti optimalizácie dopadových prvkov v medzipanve. Do budúcnosti sa ako perspektívne javia najmä:

- návrh hybridných dopadových prvkov kombinujúcich výhody oboch typov geometrií,
- vývoj adaptívnych vystrojení reagujúcich na meniace sa podmienky počas odlievania,
- rozšírenie výpočtových modelov o teplotné a chemické aspekty toku,
- ako aj experimentálne overenie vybraných konfigurácií priamo v prevádzkových podmienkach.

Zoznam použitej literatúry

- [1]. THOMAS, B.G.: 'Continuous Casting', The Encyclopedia of Materials: Science and Technology, K.H. J. Buschow, R. Cahn, M. Flemings, B. Ilshner, E. J. Kramer, S. Mahajan.(D. Apelian, subject ed.) Elsevier Science Ltd., Oxford, United Kingdom, Vol. 2, pp. 1595-1599, 2001.
- [2]. Steel Statistical Yearbook 2009, World Steel Association, [online], [cit. 2014-10-5]. Dostupné na internete:
<<http://www.worldsteel.org/pictures/publicationfiles/Steel%20Statistical%20Yearbook%202009.pdf>>.
- [3]. KOVÁČ, P. et al.: Steel Cleanliness Improvement through Tundish Configuration Optimizing, Metalurgija, 2003, No.4, p. 249 - 255
- [4]. KIJAC, J., KOVÁČ, P., STERANKA, E. MASEK, V., MAREK, P.: The current status of Tundish covering slags in slab caster plant, Metallurgija, Vol.43, 2004, , No.1, p.59-62
- [5]. DREZET, J., M., RAPPAZ, M.: Outils numériques appliqués aux procédés de coulée continue, STI Ecole de Mécanique des Matériaux Mécamat, Aussois 2008
- [6]. GOLDSCHMIT, M., B., FERRO, S., P., PRÍNCIPE, R., J., HEIBERTO COPPOLA OWEN, A.: Numerical Modelling of Liquid Steel Flow in Continuous Casting Processes, [online], [cit.2014-21-09], Dostupné na internete:
<<http://www.exa.unicen.edu.ar/fluidos/dfyp/Fluidos2001/Datos/Contenido/Lectures/Goldschmit.PDF>>.
- [7]. Michalek, K.: Využití fyzikálního a numerického modelování pro optimalizaci metalurgických procesů, Vysoká škola báňská - technická univerzita Ostrava, 2001, ISBN 80-7078-861-5
- [8]. LI, B., TSUKIHASHI, F.: Vortexing Flow Patterns in a Water Model of Slab Continuous casting Mold, ISIJ International, Vol. 45, 2005, No. 1, pp. 30-36
- [9]. BUĽKO, B.: Vplyv krycích a rafinačních prášků na životnost výmurovky medzipanvy, Diplomová práce, 2006, Košice
- [10]. BUĽKO, B., DEMETER, P., MOLNÁR, M.: Optimalizácia postupov výroby a odlievania vybraných akostí ocelí pre zlepšenie ich čistoty - fyzikálne modelovanie vybraných konfigurácií medzipanvy pre odlievanie IF a DN akostí ocelí, súčasť výsk. projektu V352, 2012
- [11]. MAZUMDAR, D., YAMANOGLU, G., SHANKARNARAYANAN, R., GUTHRIE, RIL.: Similarity Considerations in the Physical Modelling of Steel Making Tundish Systems, Steel Research, Vol. 66, No. 1, 14-19, 1995.

- [12]. SAHAI Y, AHUJA R.: Fluid Flow and Mixing of Melt in Steelmaking Tundishes, Ironmaking & Steelmaking, Vol. 13, No. 5, pp. 241-247, 1986.
- [13]. LÓPEZ-RAMÍREZ, S., DE J. BARRETO, J., PALAFOX-RAMOS, J., MORALES, RD., ZACHARIAS, D.: Modeling Study of the Influence of Turbulence Inhibitors on the Molten Steel Flow, Tracer Dispersion, and Inclusion Trajectories in Tundishes, Metallurgical and Materials Transactions B, Vol. 32B, pp. 615-627, 2001.
- [14]. KORIA, SC., SINGH, S.: Physical modelling of the effects of the flow modifier on the dynamics of molten steel flowing in a tundish, ISIJ International 34 (10), 1994, 784-793
- [15]. SHENG, DY., JONSSON, L.: Investigation of Transient Fluid-Flow and Heat-Transfer in a Continuous-Casting Tundish by Numerical-Analysis Verified with Nonisothermal Water Model Experiments, Metallurgical and Materials Transactions B, Vol. 30B, No. 5, pp. 979-985, 1999.
- [16]. SINHA, AK., VASSILICOS, A.: Physical Modelling of Thermal Effects on Steel Flow and Mixing in Tundish, Ironmaking & Steelmaking, Vol. 25, No. 5, pp. 387- 393, 1998.
- [17]. JOO, S., HAN, JW., GUTHRIE, RIL.: Inclusion Behavior and Heat-Transfer Phenomena in Steelmaking Tundish Operations', Metallurgical and Materials Transactions B, Vol. 24B, pp. 767-777, 1993.
- [18]. [online], [cit. 2014-9-5]. Dostupné na internete: <<http://www.agcarbon.com/images/content/tundish3.jpg>>.
- [19]. [online], [cit. 2014-10-5]. Dostupné na internete: <http://calderys-indoporlen.com/en/application_and_industries_porlen.php?sidsnews=144&s=steel>.
- [20]. LI, B., TSUKIHASHI, F.: Vortexing Flow Patterns in a Water Model of Slab Continuous casting Mold, ISIJ International, Vol. 45, 2005, No. 1, pp. 30-36
- [21]. DE KOCK, D. J.: Optimal Tundish design methodology in a continuous casting process, Doctoral Thesis, University of Pretoria, Electronic theses and dissertations, 2002, [online], [cit. 2013-5-5]. Dostupné na internete: <<http://upetd.up.ac.za/thesis/available/etd-10072005-095941/unrestricted/01thesis.pdf>>.
- [22]. THOMAS, B.G.: Continuous Casting: Complex Models, The Encyclopedia of Materials: Science and Technology, K.H. J. Buschow, R. Cahn, M. Flemings, B. Ilchner, E. J. Kramer, S. Mahajan, eds., (J. Dantzig, subject ed.) Elsevier Science Ltd., Oxford, UK, Vol. 2, 2001, pp. 1599-1609, [online], [cit. 2013-5-5]. Dostupné na internete: <http://ccc.illinois.edu/PDF%20Files/Publications/01_Dantz_Ch_final.pdf>.
- [23]. THOMAS, B.G.: Continuous Casting: Modelling, The Encyclopedia of Advanced Materials, (J. Dantzig, A. Greenwell, J. Michalczyk, eds.) Pergamon Elsevier Science Ltd., Oxford, UK, Vol. 2, 2001, p. 8, Revision 3, Oct. 12, 1999

- [24]. MIRANDA, R., BARRON, M., BARRETO, A. J., HOYOS L., GONZALES, J.: Experimental and Numerical analysis of the Free Surface in a Water Model of a Slab Continuous Casting Mold, *ISIJ International*, Vol. 45, 2005, No. 11, p. 1626 - 1635
- [25]. YAMAURA, H. et al.: Development of Technology for blowing Fine Bubbles into Tundish through Porous Plug Using Molten Steel Flow, *ISSTech 2003 Conference Proceedings*
- [26]. HONS, J.: Diagnostika metalurgických parametrů zařízení pro plynulé odlévání oceli pomocí jaderných metod. *Hutnické listy*, 1998, č. 1, s. 9-11.
- [27]. ŘEZNÍČEK, R.: Vizualizace proudění. *Academia Praha*, 1972, s. 202
- [28]. [online], [cit. 2014-3-5]. Dostupné na internetu: <<http://www.pivtec.com/>>.
- [29]. THOMAS, B., G., YUAN, Q., SIVARAMAKRISHNAN, S., VANK, S.,P.: Transient Fluid Flow in a Continuous Steel-Slab Casting Mold, [online], [cit. 2014-4-6]. Dostupné na internetu: <<http://www.tms.org/pubs/journals/JOM/0201/Thomas/Thomas-0201.html>>.
- [30]. [online], [cit. 2014-5-6]. Dostupné na internetu: <<http://www.dantecdynamics.com/flow-in-metallurgical-reactors>>.
- [31]. CLARK, M., WAGNER, T., TROUSSET, A.: Modelling for Tundish Applications, In: *Refractories Engineer*, January 2003
- [32]. SAHAI, Y., EMI, T.: Melt Flow Characterization in Continuous Casting Tundishes, *ISIJ International*, Vol.36, 1996, No.6
- [33]. SAHAI, Y., EMI, T.: Criteria for Water Modelling of Melt flow and Inclusion Removal in Continuous Casting tundishes, *ISIJ International*, Vol.36, 1996, No.9
- [34]. YAMAURA, H. et al.: Development of Technology for blowing Fine Bubbles into Tundish through Porous Plug Using Molten Steel Flow, *ISSTech 2003 Conference Proceedings*
- [35]. FALKUS, J., LAMUT, J.: Model Testing of the Bath Flow Through the Tundish of the Continuous Casting Machine, In: *Archives Of Metallurgy and Materials*, 2005, Issue 3
- [36]. IGUCHI, M., TAKAHASHI, K., ILEGBUSHI, O., J., SANO, M., KIUCHI, H.: Effects of the Physical properties of Top Oil Layer on Bubble and Liquid Flow Characteristics in a bottom Blown Water Bath, *ISIJ International*, Vol.38, 1988, No. 9
- [37]. AGUILAR – CORONA, A., MORALES, R., D., DÍAZ – CRUZ, M., PALAFOX – RAMOS, J., GARCÍA DEMEDICES, L.: Thermal stratification of steel flow in tundishes with off-centred ladle shrouds using different flow control designs, *Canadian metallurgical Quartely*, Vol 42, No. 4
- [38]. VÄYRYNEN, P., J., VAPALAHTI, S., K. , LOUHENKILPI, S. J.: On Validation of Mathematical Fluid Flow Models for Simulation of Tundish Water Models and Industrial Examples, [online], [cit. 2010-19-5]. Dostupné na internetu: <http://www.flow3d.com/pdfs/tp/cast_tp/FloSci-Bib03-08.pdf>.

- [39]. BUĽKO, B., KIJAC, J.: Optimization of Tundish equipment, *Acta Metallurgica Slovaca*, Vol. 16, 2010, No. 2, p. 76-83, [online], [cit. 2014-22-8]. Dostupné na internete: <http://www.ams.tuke.sk/data/ams_online/2010/number2/mag01/mag01.pdf>.
- [40]. MICHALEK, K. a kol.: Zlepšování provozních parametrů sochorového ZPO úpravami vnitřního uspořádání mezipánve, *Hutnícké listy*, č.7 - 8 (1999), str. 45 – 50
- [41]. MICHALEK, K. a kol.: Optimalizace proudění lázně v mezipánvi zařízení pro plynulé lití sochorů v Třineckých železárnách, a.s., *Hutnícké listy*, č.1 (1998), str. 3 – 8
- [42]. DEMETER, P., BUĽKO, B., BARICOVÁ, D.: Možnosti úpravy prúdenia ocele v symetrickej medzipanve, *Teorie a praxe výroby a zpracování oceli 2011 Rožnov pod Radhoštěm*
- [43]. CHAKRABORTY, S., SAHAI, Y.: Effect of holding time and surface cover in ladles on liquid steel flow in continuous casting tundishes, *Metall. Trans. B*, 23B (1992), No.2, April 1992, 153-167, ISSN 1073-5615
- [44]. DAMLE, CH. , SAHAI, Y.: A criterion for Water Modeling of Non-isothermal Melt Flows in Continuous Casting Tundishes, *ISIJ Inetrnational*, Vol.36 (1996), No.6, S.681-689
- [45]. [online], [cit. 2014-22-8]. Dostupné na internete: <<http://www.vesuvius.com/en/end-markets/iron-steel/casting/continuous-casting/tundish-furniture/impact-pads/>>.
- [46]. GUTHRIE, R.I.L., ISAC, M., CHATTOPADHYAY, K.: A Review of some Applications of CFD Modelling to Enhance Liquid Steel Quality in Ladles and Tundishes, *METEC, STEELSIM*, 2011, June 27- July 1, Dusseldorf, Germany
- [47]. ZHANG, L., THOMAS, B., G.: State of the Art in Evaluation and Control of Steel Cleanliness, *ISIJ International*, Vol. 43 (2003), No. 3, pp. 271–291
- [48]. HASHIO, M., TOKUDA, N., KAWASAKI, M., WATANABE, T.: Continuous Casting of Steel, *Secondary Process Technology Conf.*, Vol. 2, ISS, Warrendale, PA, (1981), 65.
- [49]. [online], [cit. 2014-22-8]. Dostupné na internete: <<http://www.vesuvius.com/en/end-markets/iron-steel/casting/continuous-casting/tundish-furniture/diffusers/>>.
- [50]. WOLF, M.M.: Advances in clean steel technology, *Continuous casting vol. 7*, 1995, ISS Warrendale USA, str. 81 – 83
- [51]. MIHALIČ, V.: *Oceliárstvo II*, Alfa Bratislava, 1982
- [52]. MOLNÁR, M.: Proposal of Tundish Configuration for Steel Continuous Casting Introductory Study of Research Project No.V299, *USSE Research*, April (2008).
- [53]. BUĽKO, B., KIJAC, J., DEMETER, P.: Influence variation of steel impact point in Tundish, *Acta Metallurgica Slovaca Conference*, Vol.1, 2010, No.4, p.140-142
- [54]. BUĽKO, B., MOLNÁR, M., DEMETER, P.: Physical modelling of various Tundish configurations for casting of qualitatively demanding steel grades, *Metallurg*, No.11, 2013, s.36-39

- [55]. [-] Buľko, B., Molnár, M., Demeter, P.: Physical modeling of different configurations of a tundish for casting grades of steel that must satisfy stringent requirements on quality, *Metallurgist*, Vol. 57, Nos. 11–12, March, 2014 (Russian Original Nos. 11–12, November–December, 2013)
- [56]. VÄYRYNEN, P., WANG, S., LOUHENKILPI, S., HOLAPPA, L.: Modeling and Removal of Inclusions in Continuous Casting, *Materials Science and Technology (MS&T)* 2009 October 25-29, 2009, Pittsburgh, Pennsylvania
- [57]. BUĽKO, B., KIJAC, J., DEMETER, P., BARICOVÁ, D.: Vplyv vychýlenia tieniacej trubice na asymetriu prúdenia ocele v medzipánve, *Ocelári : Teorie a praxe výroby a zpracování oceli : sborník 27. konference : Rožnov pod Radhoštěm : 6. - 7.4.2011. - Ostrava : Tanger, spol. s.r.o., 2011 P. 1-7. - ISBN 978-80-87-294-21-5*
- [58]. BUĽKO, B. [et al.]: Influence of misalignment ladle shroud on tundish residence time / - 2011. In: *Acta Metallurgica Slovaca*. Roč. 17, č. 1 (2011), s. 51-57. - ISSN 1338-1156 [online], [cit. 2014-22-8]. Dostupné na internete: http://www.ams.tuke.sk/data/ams_online/2011/number1/mag08/mag08.pdf.
- [59]. AGUILAR-CORONA, A., MORALES, R.D., DÍAZ-CRUZ, M., PALAFOX-RAMOS, J., DEMEDICES, L. GARCÍA: Thermal stratification of steel flow in tundishes with off-centred ladle shrouds using different flow control designs, *Canadian Metallurgical Quarterly*, Volume 42, Number 4, 2003, pp. 455-464(10)
- [60]. [online], [cit. 2014-22-8]. Dostupné na internete: www.kar.elf.stuba.sk/predmety/iss/doc/RegresnaAnalyza.doc.
- [61]. BUĽKO, B., KIJAC, J., DEMETER, P.: Influence variation of steel impact point in Tundish, *Acta Metallurgica Slovaca Conference*, Vol.1, 2010, No.4, p.140-142
- [62]. GRYC, K., MICHALEK, K., STŘASÁK, P.: Optimalizace vnitřní konfigurace mezipánve pro dosažení teplotní homogenity plynule odlévané oceli, *Metal* 2007, 22.-24.5.2007, Hradec nad Moravicí
- [63]. PIEPRZYCA, J., MERDER, T., LIPINSKI, J., LASKAWIEC, D.: Physical model of CCM for research in isothermal and non-isothermal conditions, *Hutnik-Wiadomości hutnicze*, 2010, Nr 10, s. 567-571, ISSN 1230-3534
- [64]. BAO-KUAN, W..F., FENG-MAN, S., L.: Large eddy simulation for flow field in centrifugal tundish, *Journal of Northeastern University*, 2007, Vol. 28, Issue (8): 1143-1146
- [65]. SAHAI, Y., TOSHIHIKO, E.: Tundish Technology For Clean Steel Production, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, [online], [cit. 2012-15-8]. Dostupné na internete: [ftp://ftp.kardemir.com/Yeni%20Klas%F6r/Tundish%20Technology%20For%20Clean%20Steel%20Production.pdf](http://ftp.kardemir.com/Yeni%20Klas%F6r/Tundish%20Technology%20For%20Clean%20Steel%20Production.pdf).

- [66]. MIKI, Y., SHIBATA, H., BESSHO, N., KISHIMOTO, Y., SORIMACHI, K., HIROTA, A.: Tetsu-to-Hagane, 2000, 86, 239-246.
- [67]. BAJER, R.: Modelovanie nepretržitého odlievania ocele, Diplomová práca, Technická univerzita, Hutnícka fakulta, Košice, 2012
- [68]. ~~BULKO, B., KIJAC, J., DEMETER, P.: Influence Variation of Steel Impact Point in Tundish, Acta Metallurgica Slovaca Conference, Vol.1, 2010, No.4, p.140-142~~
- [69]. Bigoš, P., Faltinová, E.: Acta Mechanica Slovaca, Vol. 17, 2013, No.1, p. 18-22
- [70]. CUPEK, J., BOCEK, J., MILATA, R., CIBULKA, J., LASOTA, M.: Optimization of blooms 525 mm and length at the bloom caster in Trinecké železářny, a. s., In.: Iron And Steelmaking, 2011, Horní Bečva, Česká Republika, p.172-176
- [71]. MOLNÁR, M.: Proposal of Tundish Configuration for Steel Continuous Casting, Introductory Study of Research Project No.V299, USSE Research, 2008
- [72]. ~~BULKO, B., KIJAC, J., DEMETER, P.: Influence variation of steel impact point in tundish, Acta Metallurgica Slovaca Conference, Vol. 1, 2010, No. 4, p. 140-142~~
- [73]. DORADO, T., COEDO, A.G., FERNÁNDEZ, B.J.: Materials Science Forum, Vol. 383, 2001, p. 131-142, DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.383.131
- [74]. [online], [cit. 2013-23-7]. Dostupné na internete:
<<http://www.fhvp.unipo.sk/cvt/statistika/stbasic3.htm>>.
- [75]. [online], [cit. 2014-5-8]. Dostupné na internete:
<<http://rimarcik.com/navigator/metody.html>>.
- [76]. MSA 0113-98 Metodické smernice na akreditáciu. Skúšky spôsobilosti. Bratislava 1998, s. 32-34.
- [77]. PALEŇČÁR, R. et al.: Štatistické metódy v metrologických a skúšobných laboratóriách, Bratislava 2001. ISBN 80-968449-3-8, s. 217.
- [78]. DE KOCK, D.J.: Optimal tundish design methodology in a continuous casting process, University of Pretoria, 2005
- [79]. VÁLEK, L.: Verification of Physical Modelling Possibility at Tundish of ArcelorMittal Ostrava a.s. Continuous Casting Machine, Iron and Steelmaking, Szczyrk, 7-9.10.2009
- [80]. MORÁVKA, J., MICHALEK, K.: Netypický aproximační model proudění oceli v mezipánvi, Conference Technical Computing Prague 2005
- [81]. HUDZIECZEK, Z., MICHALEK, K., KLUS, P., GRYC, K., TKADLEČKOVÁ, M.: Physical modeling of transfer process between metal and slag in bottom block or submerged lance blowing, Acta Metallurgica Slovaca – Conference, 2010, ISSN 1338-1660

- [82]. PIEPRZYCA, J. , KUDLIŃSKI, Z., MICHAŁEK, K., GRYC, K., TKADLEČKOVÁ, M.: Modelling steel's homogenization during argon purging, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, Vol.55, Issue 2, 2012
- [83]. CWUDZIŃSKI A.: Numerical and physical prediction of hydrodynamic conditions in one strand slab Tundish, Metall. Res. Technol. 111, 45–55 (2014), EDP Sciences, 2014,DOI: 10.1051/metal/2014012