

Závěrečná zpráva o řešení projektu v rámci programu "COST"

ŠÍŘENÍ KOUŘE PŘI POŽÁRU V SILNIČNÍM TUNELU



Projekt číslo: OC G3.40 (2003)

Název akce "COST": **Průmyslové větrání**

Řešitel projektu: Ing. Ludvík Šajtar

Nositel: SATRA spol. s. r. o.
Sokolská 32
120 00 Praha 2
tel: 296337110, 296337163
fax: 296337101
e-mail:satra@satra.cz

Spoluřešitelé: Ing. Jiří Zápařka
Ing. Jan Pořízek

Statutární zástupce: Ing. Ludvík Šajtar

Období: **1999-2003**

ZÁKLADNÍ INFORMACE

COST je rámcový program mezinárodní spolupráce ve výzkumu a vývoji.

Projekt je součástí akce G3 „Průmyslové větrání“ programu COST (The European Co-operation in the Field of Scientific and Technical Research) s označením COST OC G3.40 – Šíření kouře při požáru v silničním tunelu. Poskytovatelem dotace je Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy České Republiky, odbor mezinárodní spolupráce ve výzkumu a vývoji.

Nositel projektu je Ing. Ludvík Šajtar, ředitel společnosti SATRA, spol. s r.o..

ÚKOL PROJEKTU

Projekt je z oblasti počítačového modelování problematiky odvětrání dopravních tunelů při požáru, s použitím Eulerova - Lagrangeova modelu výpočtové dynamiky tekutin (CFD- Computational Fluid Dynamics) s aplikací na Městský okruh v Praze.

Konkrétně na třípruhový tunel Mrázovka délky 1,2 km, který je v současné době ve výstavbě a na tunel Myslbekova – Pelc Tyrolka (třípruhový tunel délky 5,5 km), který je ve fázi projektové přípravy. Během řešení projektu započala projektová tunelu Dobrovského, který je součástí VMO Brno. Protože problematika s parametry tunelu Myslbekova-Pelc-Tyrolka, byla vyřešena v letech 2000-2002 s velkou podrobností, zaměřili jsme se v roce 2003 na ověření tunelu Dobrovského.

Celý projekt bude zakončen ověřením funkčnosti zkouškou v měřítku 1:1, v silničním tunelu Mrázovka.

Podle původního záměru mělo řešení celého projektu trvat 3 roky (1999-2001). Vzhledem k prodloužení lhůt výstavby tunelu Mrázovka, byla doba řešení projektu prodloužena na 5 let (1999-2003).

KONKRÉTNÍ CÍLE PROJEKTU

Řešení projektu 1999-2003 bylo plánováno takto:

1. Vytvořit matematický model tunelu Mrázovka metodou konečných prvků. Navrhnout model vývinu kouře při požáru a zkontrolovat jeho funkčnost.
2. Navrhnout dodatečný větrací systém pro případ požáru a zpracovat ho do již vytvořeného modelu.
3. Modelovat, při použití CDF, vznik požáru v jednotlivých částech tunelu při různých provozních stavech a vyhodnocovat účinnost větracího systému. Na základě výsledků provést dodatečné úpravy větracího systému.
4. Provést kouřové zkoušky před uvedením tunelu do provozu a na základě jejich výsledků ověřit předpoklady stanovené matematickým modelováním.
5. Na základě výsledků kouřových zkoušek v tunelu Mrázovka upravit návrh větracího systému v tunelu Myslbekova – Pelc Tyrolka.
6. Vytvořit matematický model tunelu Myslbekova – Pelc Tyrolka a modelovat, při použití CDF, vznik požáru v jednotlivých částech tunelu při různých provozních stavech . Vyhodnotit účinnost větracího systému a navrhnout jeho úpravy.

Tyto body byly postupně, v průběhu trvání projektu, řešeny. Každý rok pak byly závěry z hotových úkolů prezentovány v rámci oponentního řízení. Zprávy z oponentního řízení, jakož i záznamy o dosavadních výsledcích řešení projektu, jsou důležitým podkladem pro přidělení prostředků na další roky. Současně je, podle stavu dokončení budovaného tunelu pod Mrázovkou, upravován podrobný program řešení projektu.

II. Rekapitulace 1999-2003

Oheň byl simulován jako zdroj energie s transportem pasivního skaláru jako koncentrace kouře. Výpočtově je tento způsob oproti modelování přímého hoření méně náročný a vykazuje výsledky, které je jsou ve shodě s měřeními a nahrazuje difusní spalování.

Jako modelový případ pro návrh sacího výkonu byl uvažován požár jednoho nákladního vozidla, přičemž se počítá s vyloučením vozidel, která přepravují nebezpečný náklad. Předpokládaná uvolněná tepelná energie hořícího nákladního automobilu je brána 20 MW a vývin kouře 60 m³/s.

Výsledky byly prezentovány ve formě teplotních a koncentračních polí v příčném a podélném řezu v závislosti na čase. Teplota je udávána v °C a koncentrace je vyjádřena tzv. pasivním skalárem, který je vyjadřuje procentuální relaci vůči 100% v místě zdroje.

Plnění úkolů v roce 1999

V první fázi byl modelován třípruhový ražený úsek tunelu Mrázovka o délce 860 m, vybavený odsávacími otvory pro odvod kouře ve stropu tunelu, včetně kanálů v obezdívce tunelu, které ústí do vzduchovodu pod vozovkou.

Úkolem bylo prozkoumat vliv různých parametrů (tzn. profilu, sklonu, rychlosti proudění vzduchu, místa ohniska požáru, intenzity požáru) a na základě těchto poznatků byl navržen větrací systém, sací výkon a úsek do kterého bude odváděcí kapacita koncentrována.

Požární větrací systém byl navržen na sací výkon $150 \text{ m}^3/\text{s}$ na 400m tunelu.

Otvory ve stropě odvádějící kouř jsou každých dvacet metrů a v místě zaústění do vzduchovodu jsou svody vybaveny klapkou, což umožňuje otevření určitého úseku a tím potřebné koncentrování sacího výkonu. Snahou je aby větrání začalo odsávat na plný výkon po 1 minutě volného šíření kouře.

Při výpočtu byly použity dva modely turbulence: model k-epsilon a model LES, který počítá s interminací na rozhraní kouře a nasávané spodní vrstvy čerstvého vzduchu a simuluje časově proměnné velké víry.

Plnění úkolů v roce 2000

Byl dokončen počítačový model celého tunelu Mrázovka. Provoz vzduchotechniky byl simulován podle návrhu z předchozího roku.

Pro všechny scénáře zvolena počáteční rychlost podélného proudění v tunelovém tělese 2 m/s ve směru jízdy vozidel (od jižního k severnímu portálu), která představuje charakteristickou rychlost potřebnou k odvětrání emisí v tunelu. Ohnisko požáru bylo umístěno v rozpletu tunelu a vjezdové větve, ve dvoupruhovém úseku a v třípruhové části přecházející do stoupání. První minutu se kouř šíří v závislosti na počátečních podmínkách v tunelu. Po uplynutí této doby je předpokládáno spuštění vzduchotechniky v požárním režimu, který začne odsávat kouř z tunelového tělesa v úseku 400 m, což představuje 20 otevřených výustek kterými je odváděno $150 \text{ m}^3/\text{s}$.

Část modelu tunelu Myslbekova-Pelc –Tyrolka využita pro modelování požáru v hloubeném úseku. Odvod kouře byl řešen jedním velkokapacitním místem odvodu.

Plnění úkolů v roce 2001

V této fázi byl dokončen počítačový model hloubeného úseku tunelu Myslbekova-Pelc –Tyrolka. Byla modelována východní třípruhová část, dále vjezdová a výjezdová rampa U Vorlíků západní třípruhová část a dvoupruhová část mezi odpojením a připojením. Celý úsek tunelu je ve sklonu 4.95% ve směru jízdy. Výjezdová rampa a dvoupruhová část mezi odpojením a připojením jsou vybaveny dvojicí proudových ventilátorů.

Pro všechny scénáře zvolena počáteční rychlost podélného proudění v tunelovém tělese 2 m/s ve směru jízdy vozidel (od východního k západnímu portálu), která představuje charakteristickou rychlost potřebnou k odvětrání emisí v tunelu. Ohnisko požáru bylo umístěno v třípruhové části 350m před rozpletem výjezdové rampy. Odvod kouře byl řešen pomocí proudových ventilátorů pod klenbou tunelu v rampě a v tunelu.

Varianty:

- B0 je bez ventilátorů
- B1 po 60 s jsou spuštěny ventilátory v rampě
- B2 po 60 s jsou spuštěny ventilátory v tunelu
- B3 po 60 s jsou spuštěny ventilátory v rampě i v tunelu.

Plnění úkolů v roce 2002

V roce 2002 bylo cílem zkoumání zjistit charakter šíření kouře při požáru v raženém tří-pruhovém tunelu a navrhnout nejvhodnější způsob odvodu kouře vhodný pro tunel Myslbekova-Pelc-Tyrolka na Městském okruhu v Praze.

Tunel je dlouhý 5,5 km a je převážně celý ve sklonu. Vzhledem k délce, sklonu a podélnému systému odvětrání tunelu, se pozornost soustředila na vliv rychlosti podélného proudění na šíření kouře ve stoupání a v klesání.

Skrze 4-8 výustek v klenbě tunelu je odváděn kouř do vzduchovodu pod vozovkou, dále do strojovny a výdechem ven. Každé odvodní místo – výustka, je opatřeno klapkou, takže je umožněn odvod jen ze zasaženého úseku tunelu. Tyto výustky jsou od sebe vzdáleny 80m.

Kromě modelového požáru 20MW, byl zkoumán i požár o síle 100 MW, který odpovídá velkému hořlavým materiálem naloženému nákladnímu autu.

Modelovaný úsek byl 1000 m dlouhý s ohniskem požáru 250 m od jednoho konce a 750 m od druhého konce, ve směru jízdy. Na straně před požárem (z pohledu směru jízdy) tlakové ztráty simuluje subrutina simulující 1 km tunelu. Vzduchotechnika spouští po 60 vteřinách.

Ve variantách 1A-3B a variantě 6 je od počátku požáru podélná rychlost 2 nebo 5m/s. V okamžiku T=0 s zdroj hybnosti přestává působit.

Ve variantách 4 a 5 je počáteční rychlost 5m/s. Prvních 60s se kouř šíří přirozeně. Od T60= 60s do T120=120s simuluje lineární pokles rychlosti na 2,5 m/s práci proudových ventilátorů. Tato rychlost je pak udržována až dokonce.

Scénář je trochu nadsazen časově, ale v porovnání s variantami 1A-3B dokazují potřebu regulace podélného proudění pomocí proudových ventilátorů.

Ve variantě 5 simulující stoupání je otevřeno nejprve v T60=60s 6 vyústek a posléze v T120=120s 8 vyústek. Celkových 360 m³/s (dříve 6x60 m³/s) je nyní rozloženo rovnoměrně: 8x45 m³/s.

Ve variantě 6 je modelován požár o tepelném výdeji 100MW a počáteční rychlosti 2 m/s.

Byly použity následující scénáře událostí:

	Podélná rychlost [m/s]	Sklon [%]	Tepelný výkon [MW]	Odvod celkem [m ³ /s]	Výkon na vyústku [m ³ /s]	Počet vyústku [ks]	Délka úseku [m]
Varianta 1A	2	0	20	240	60	4	240
Varianta 1B	5	0	20	240	60	4	240
Varianta 2A	2	0	20	300	60	5	320
Varianta 2B	5	0	20	300	60	5	320
Varianta 3A	2	0	20	320	80	4	240
Varianta 3B	5	0	20	320	80	4	240
Varianta 4	5 \diamond 2,5	+3,5	20	360	60 \diamond 45	6 \diamond 8	400 \diamond 560
Varianta 5	5 \diamond 2,5	-3,5	20	360	60	6	400
Varianta 6	2	0	100	360	60	6	400

Plnění úkolů v roce 2003

Během řešení projektu započala projektová tunelu Dobrovského v Brně. Zde je požární odvod řešen systémově stejně jako tunel Myslbekova-Pelc –Tyrolka, kde je pro odvod využíváno dvou strojoven na opačných koncích požárního kanálu. Protože problematika s parametry tunelu Myslbekova-Pelc-Tyrolka, byla vyřešena s velkou podrobností v předchozím roce, zaměřili jsme se na ověření stejného principu u tunelu Dobrovského.

Tunel Dobrovského v Brně leží mezi městskou částí Žabovřesky a Královo Pole je součástí VMO Brno.

Model A

Požár ve stoupajícím tunelu-1 (ohnisko požáru cca 820 m od portálu Královo Pole)

- o bez odsávání
- o s odsáváním – otevřeny 3 vyústky, které paralelně odsávají
 - o 165 m³/s
 - o 300 m³/s

Počáteční rychlost proudění vzduchu $u_0=4,5$ m/s , která bude bržděna proudovými ventilátory na rychlost $u=0$ m/s. Tepelná energie ohniska požáru je 30 MW.

Model B

Požár v klesajícím tunelu-2 (ohnisko požáru cca 255 m od portálu Královo Pole)

- o bez odsávání
- o s odsáváním – otevřeny 3 vyústky, které paralelně odsávají
 - o 165 m³/s
 - o 300 m³/s

Počáteční rychlost proudění vzduchu $u_0=4,5 \text{ m/s}$, která bude bržděna proudovými ventilátory ubržděna na rychlost $u=1,5 \text{ m/s}$. Tepelná energie ohniska požáru je 30 MW.

III. Závěry a hodnocení celého projektu

Celý projekt byl řešen ve všech bodech podle plánu s rozšířením na tunel Dobrovského v Brně, s výjimkou bodu 4, který byl řešen pouze teoreticky.

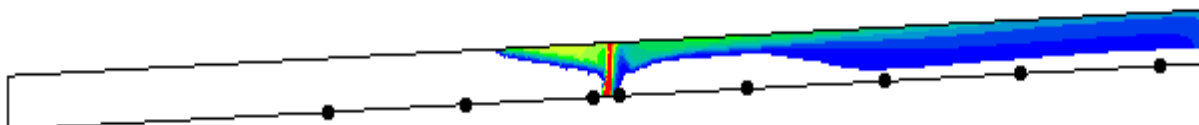
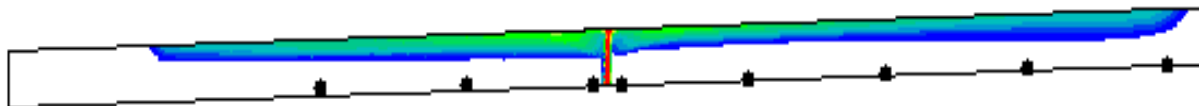
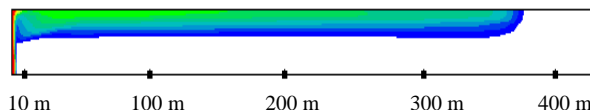
Plánované fyzikální ověření větracího systému plánované v bodu 4 nebylo možné z důvodu zpoždění dokončení stavby. Vzduchotechnické zařízení v současnosti ještě není instalováno. Požární zkouška je plánovaná před otevřením tunelu v červenci 2004.

Vliv úhlu sklonu vozovky

ČAS 140 s

- 0 %
- 0,7%
- 4,5%

(rychlost proudění vzduchu 0 m/s)

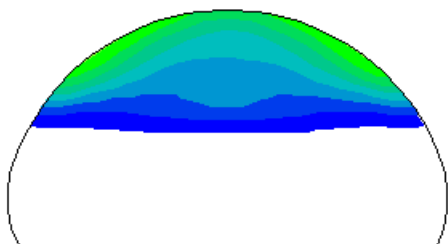


Sklon 0 %

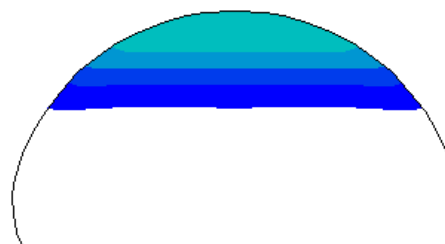
Sklon 4,5 %



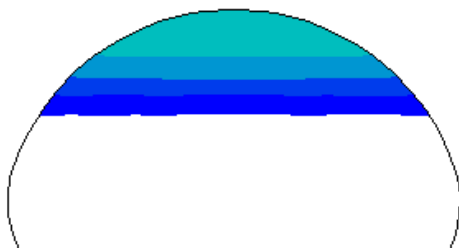
X = 0 m



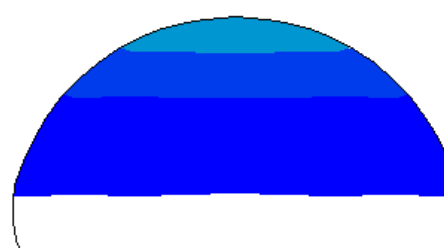
X = 10 m



X = 100 m



X = 100 m

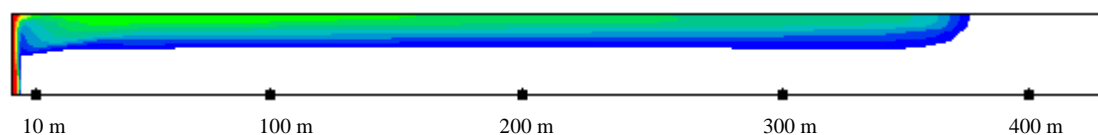
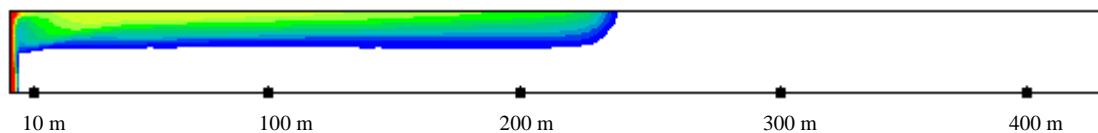


X = 200 m

Vliv intenzity požáru

- 5 MW
 - 20 MW
- (rychlost proudění vzduchu 0 m/s)

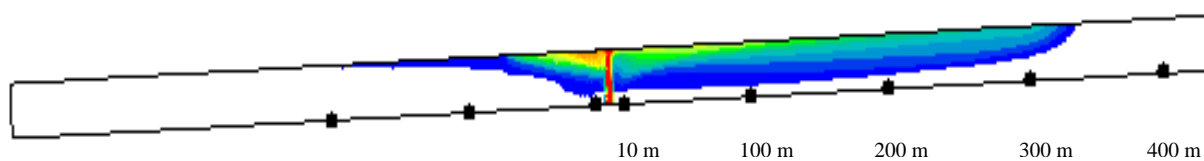
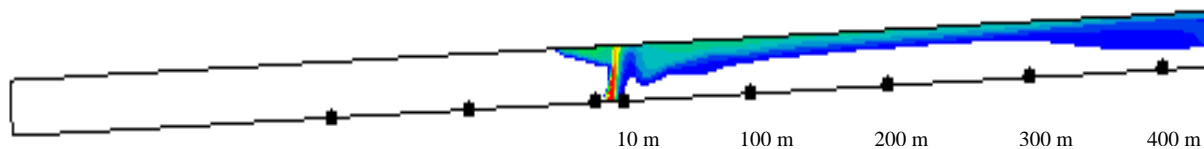
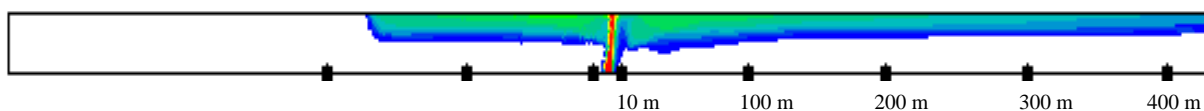
ČAS 140 s



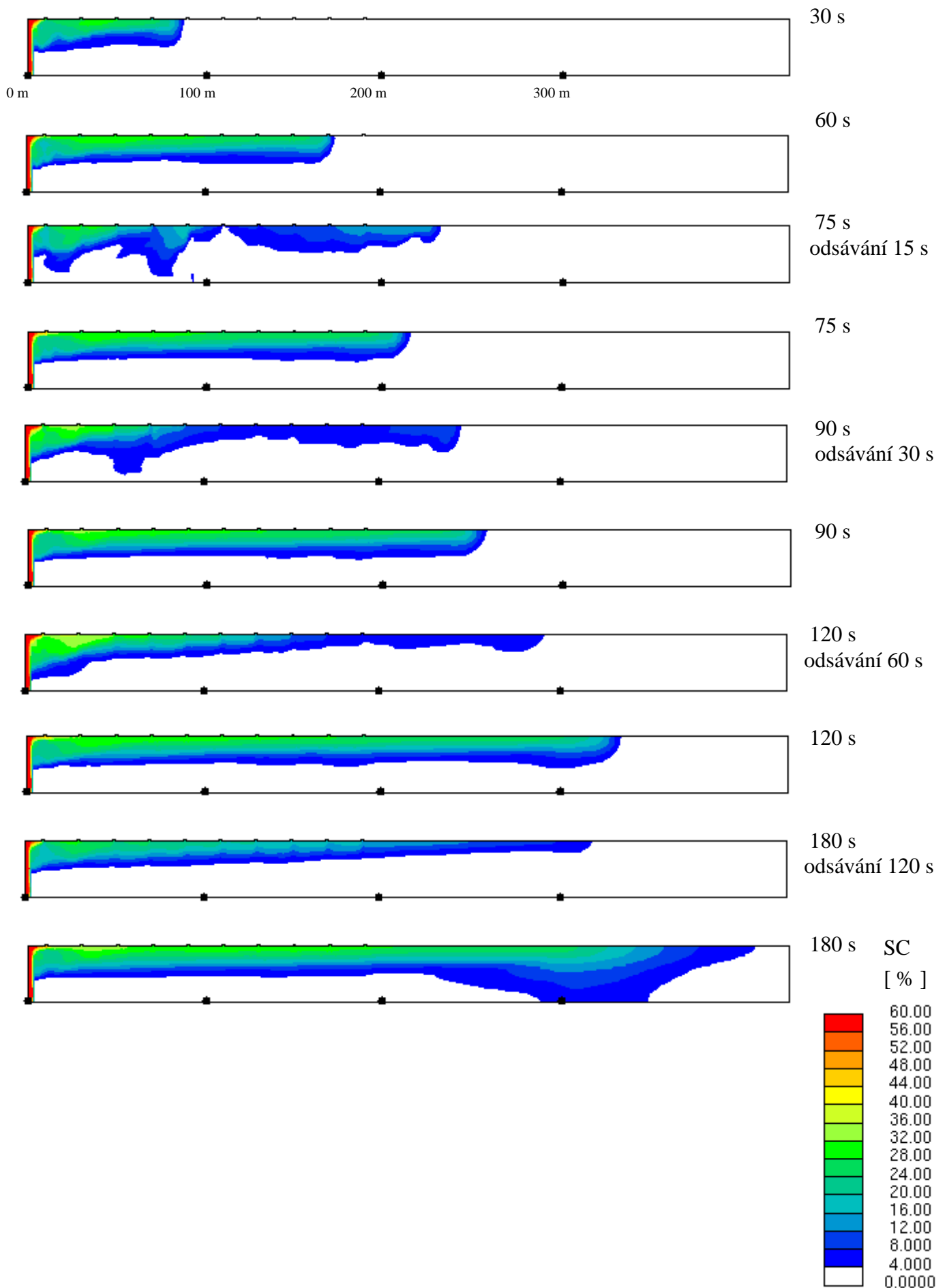
Vliv úhlu sklonu vozovky a rychlosti proudění

- 0 %; 2m/s;
- 4,5%; 2m/s;
- 4,5%; -2m/s;

ČAS 140 s

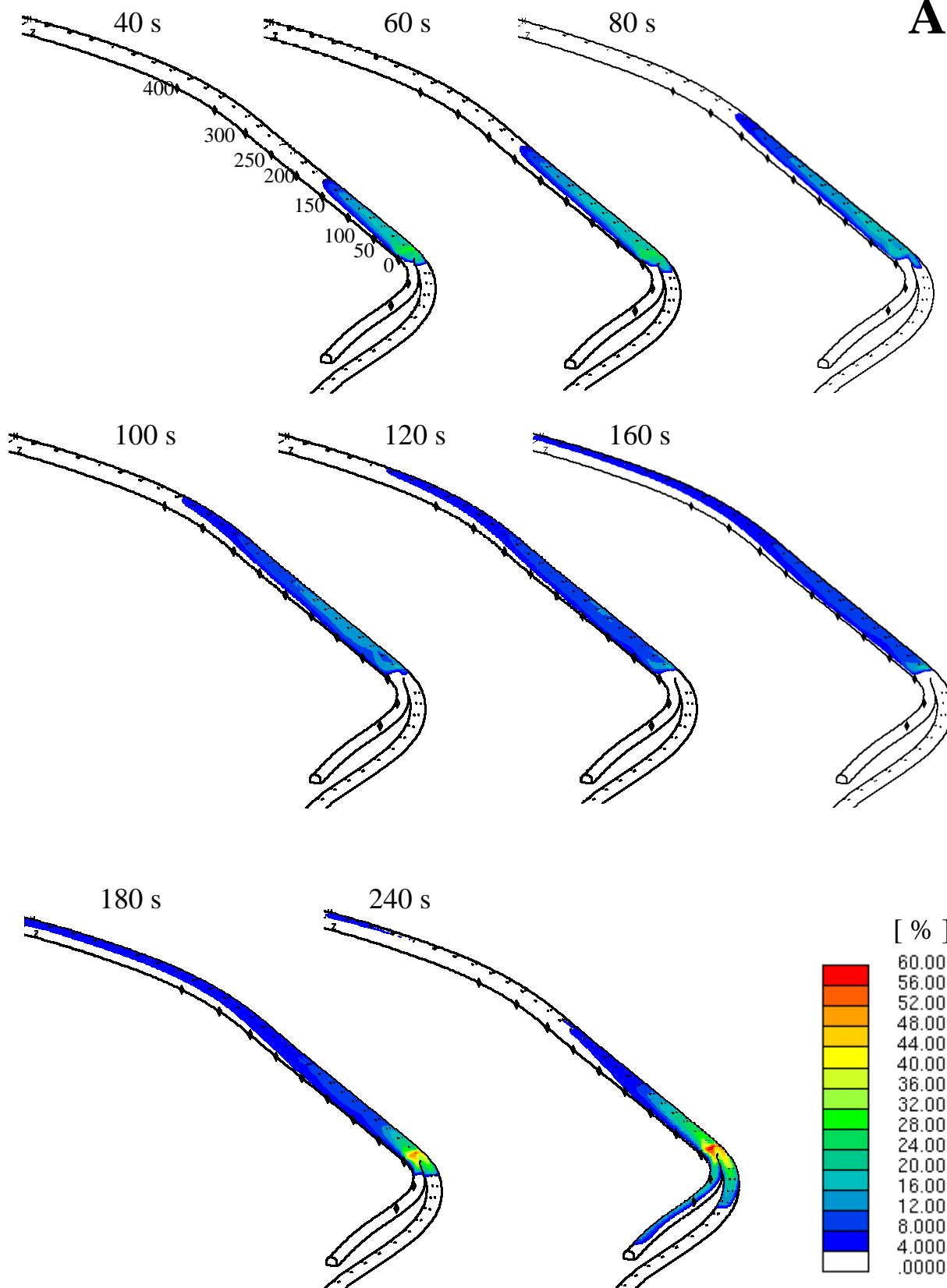


Příloha 5.2

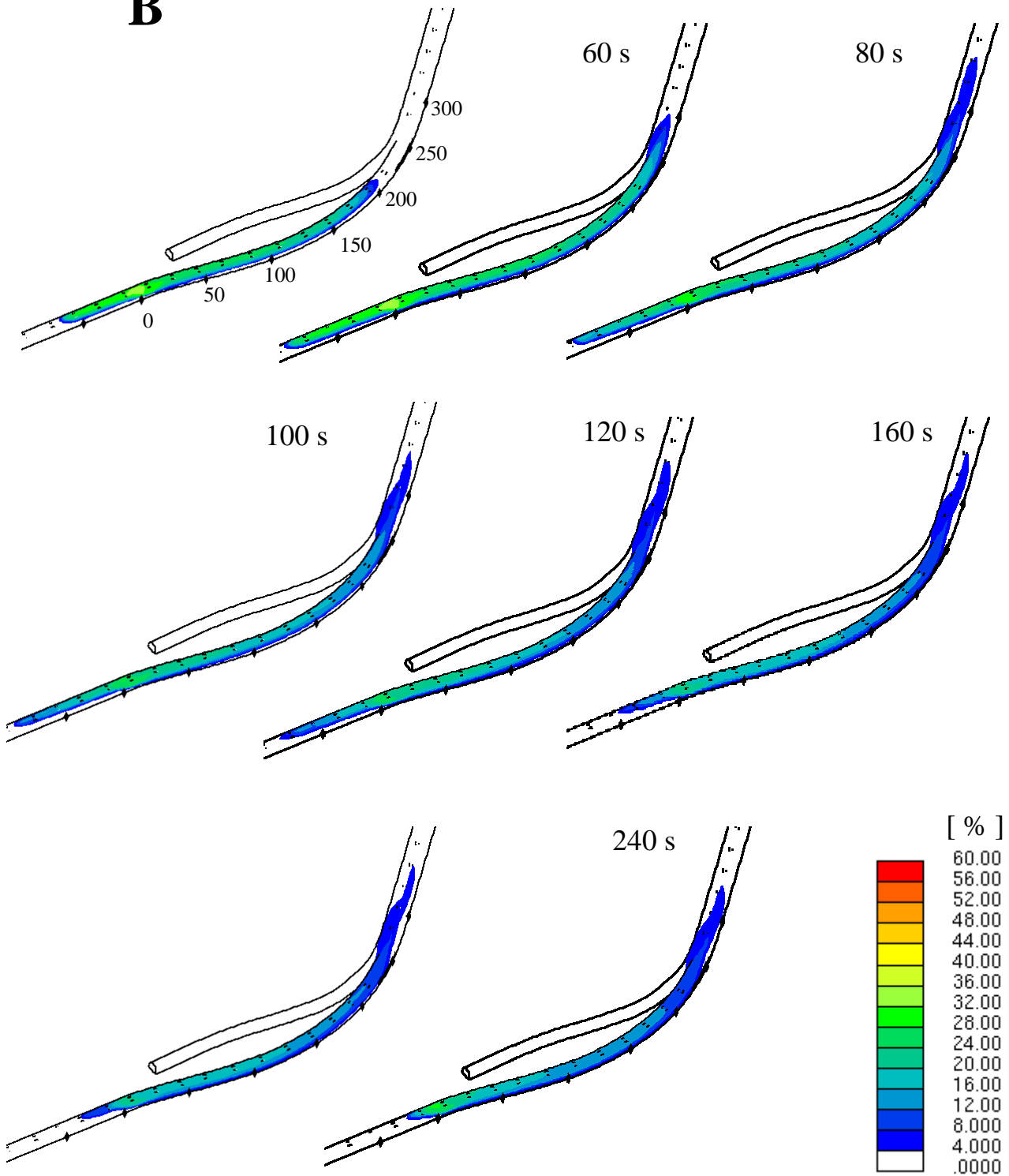


Příloha č. 3

A

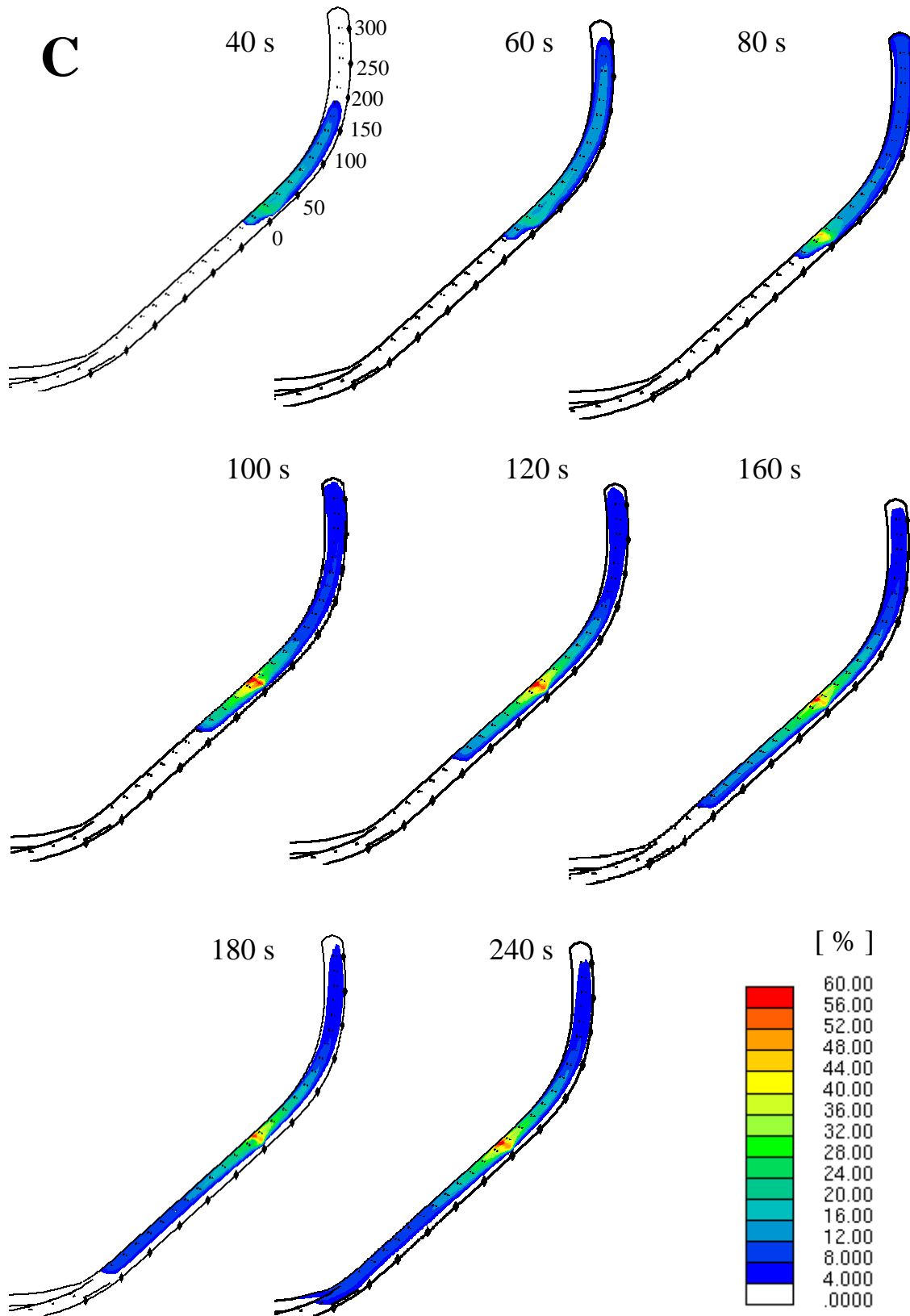


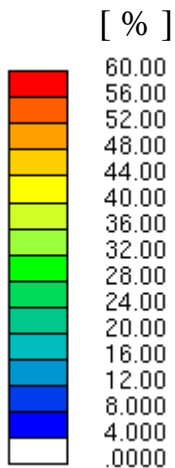
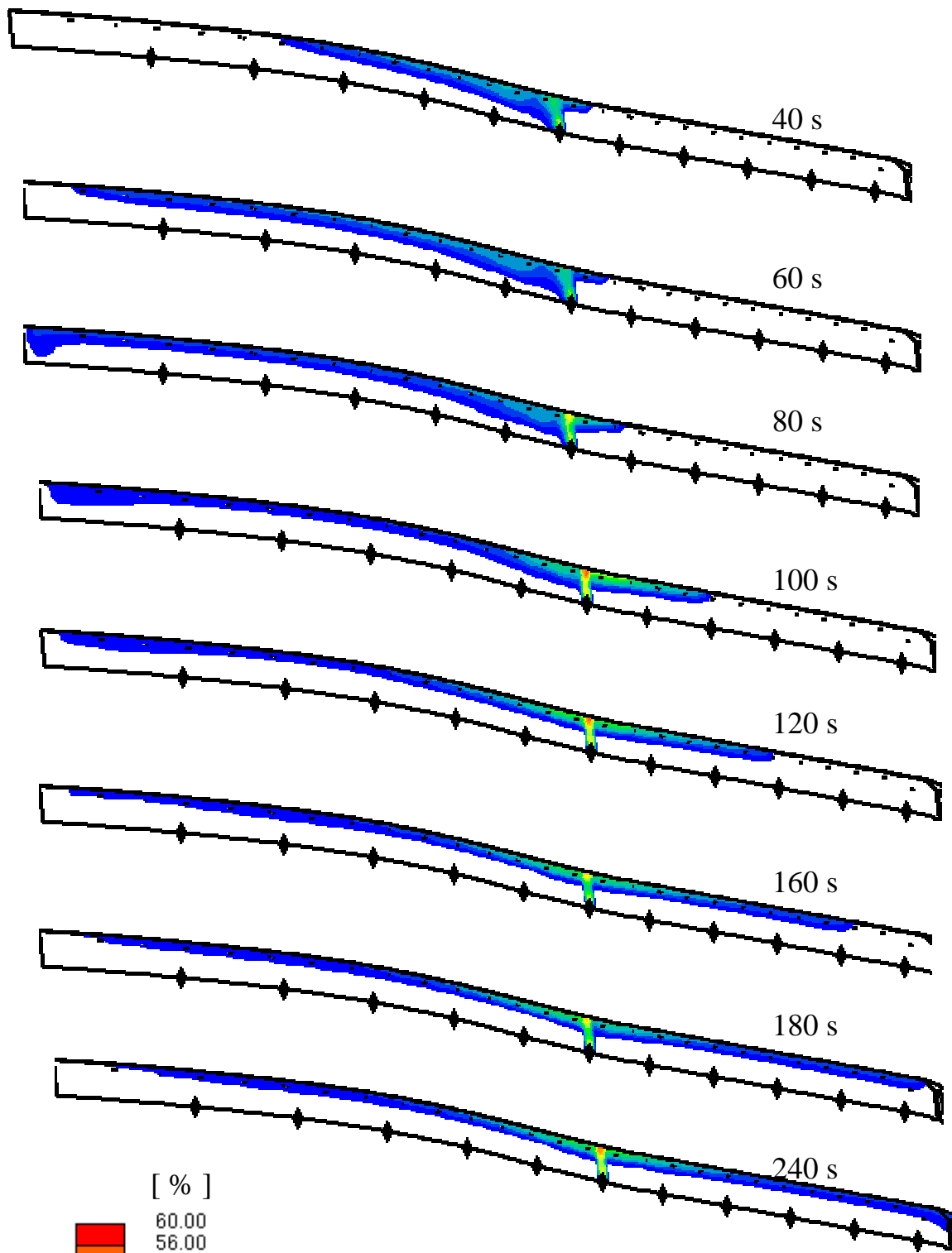
B



Příloha č. 6

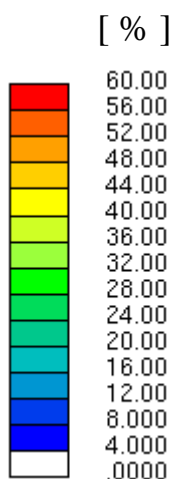
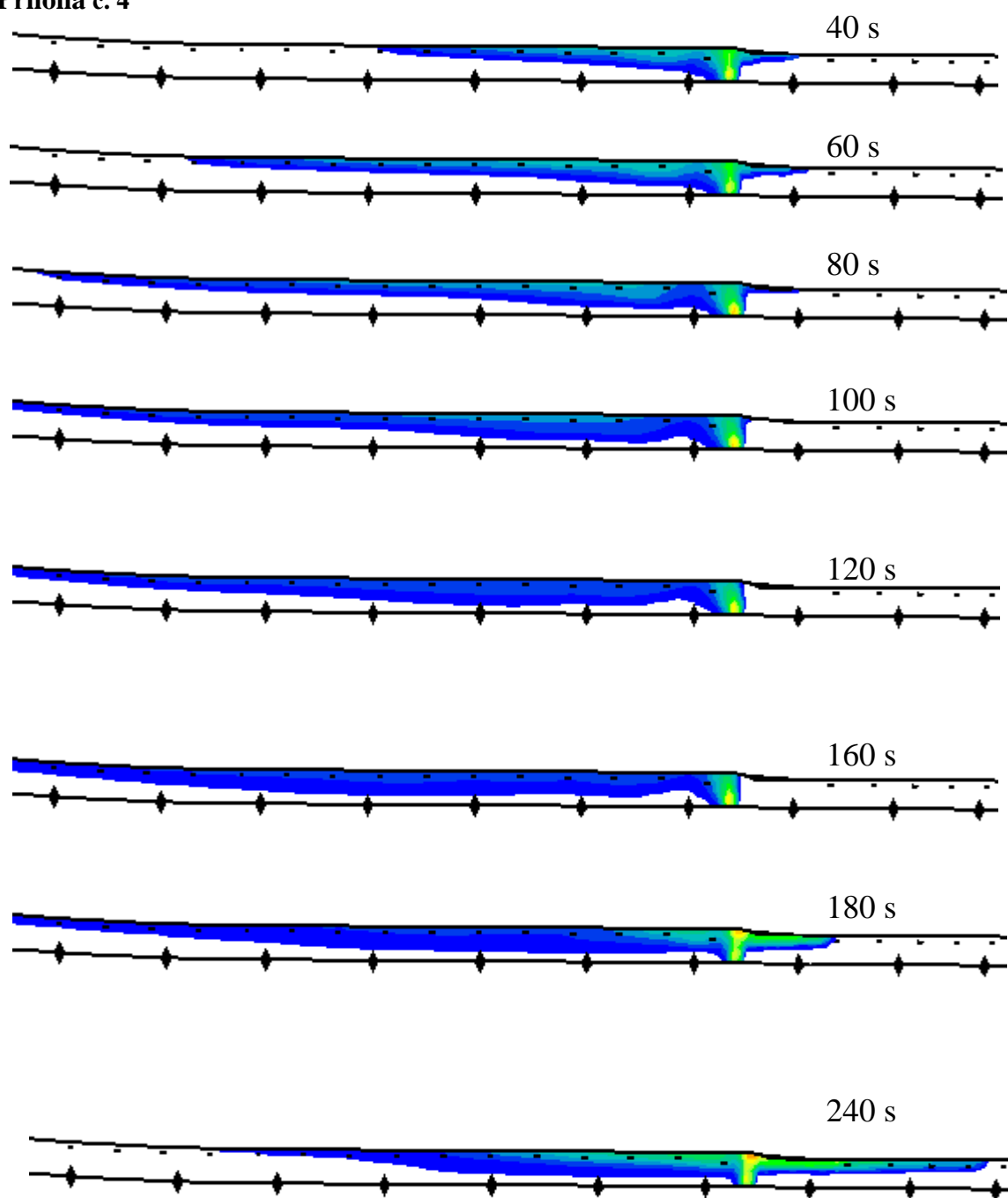
C



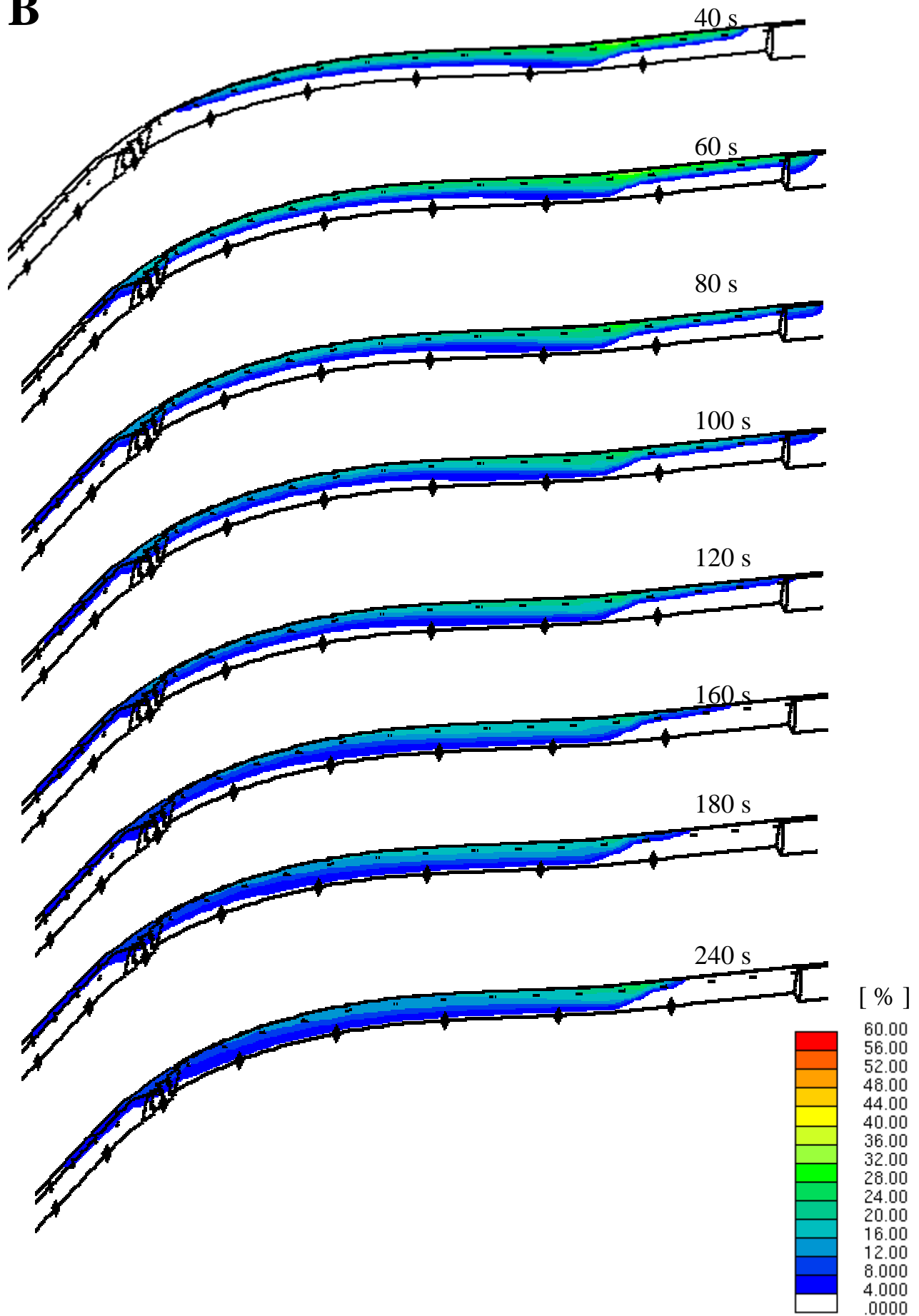


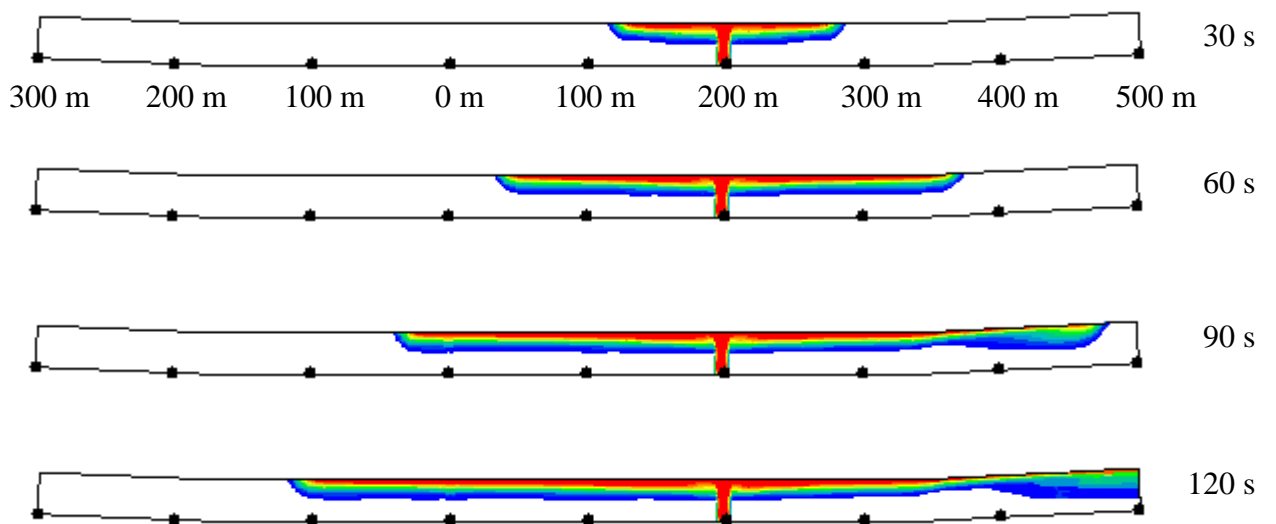
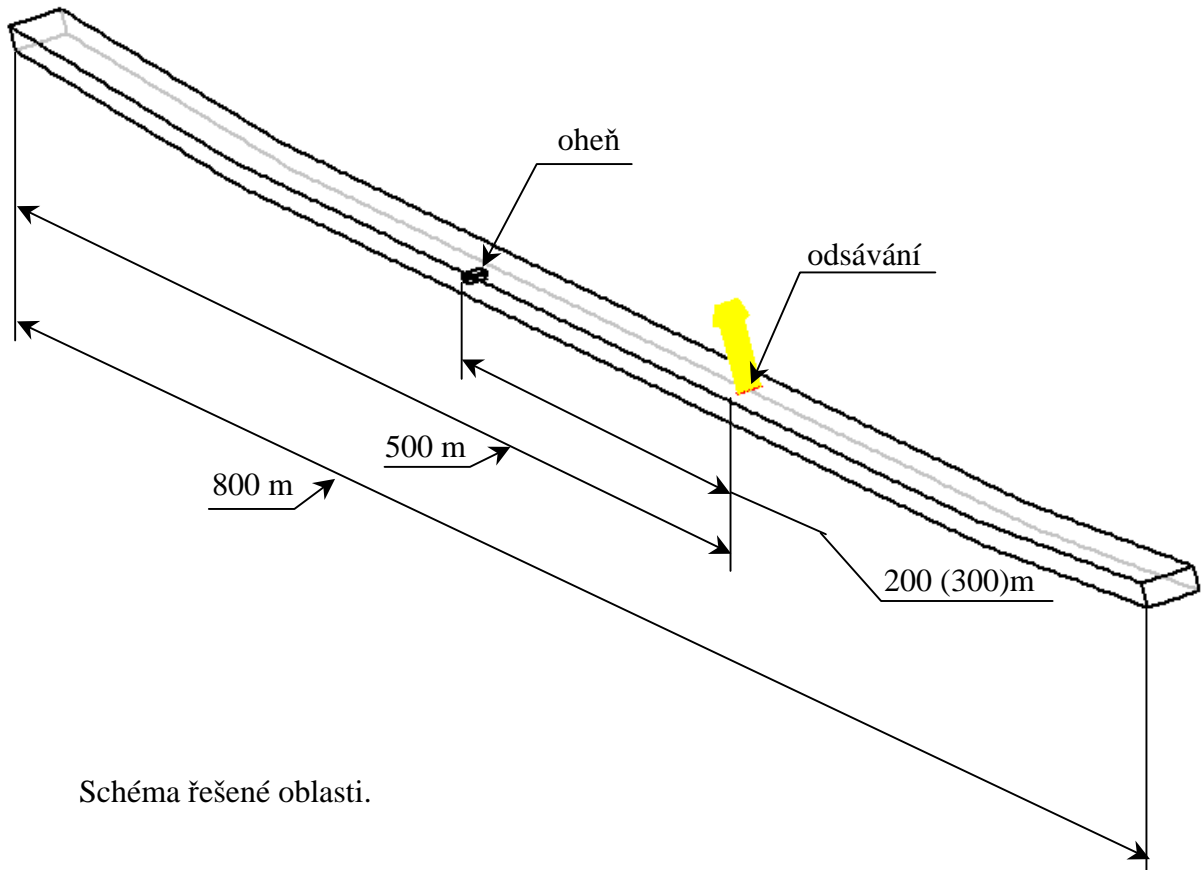
Příloha č. 4

A

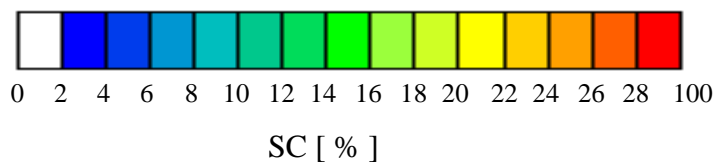


B

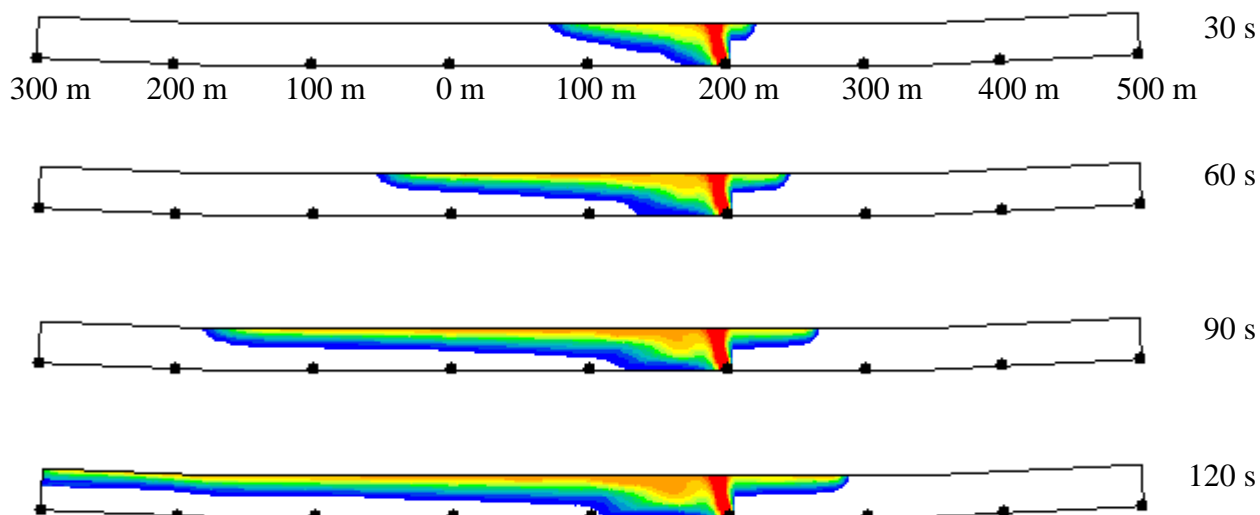




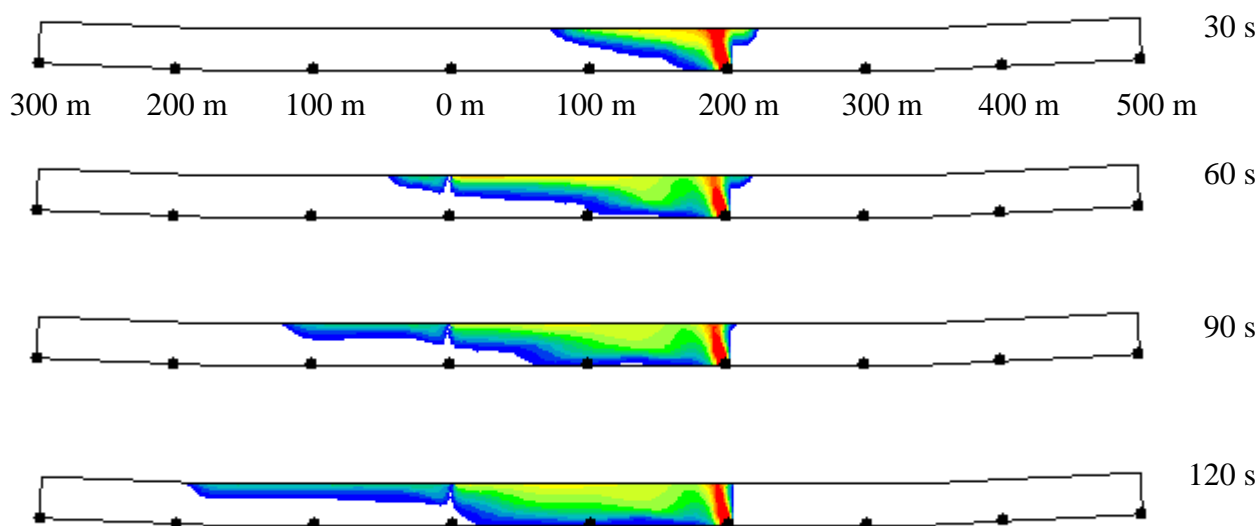
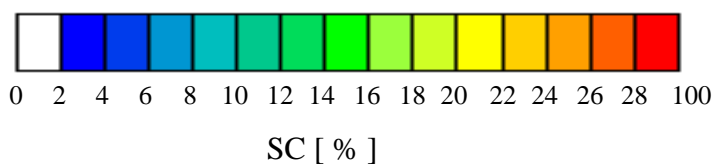
Obr. 1



Příloha č. 9

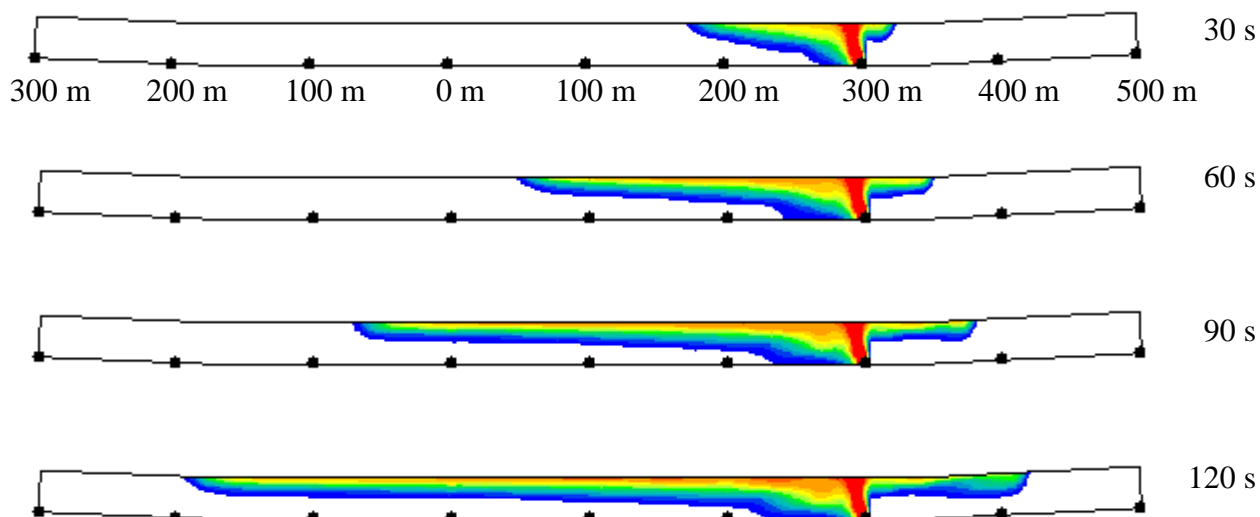


Obr. 2

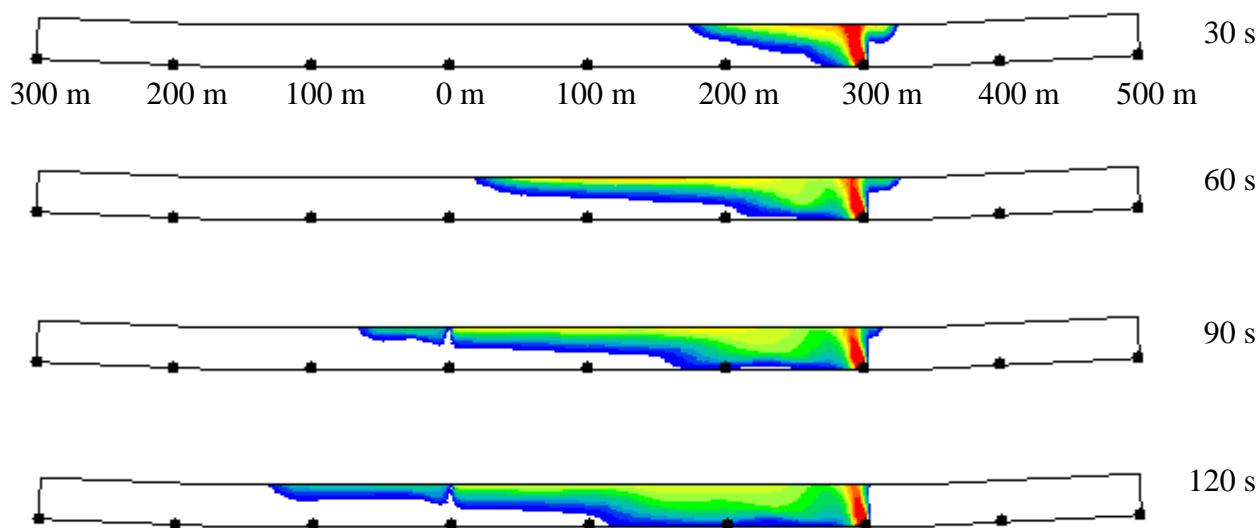
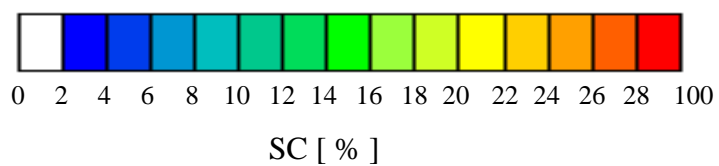


Obr. 3

Příloha č. 10

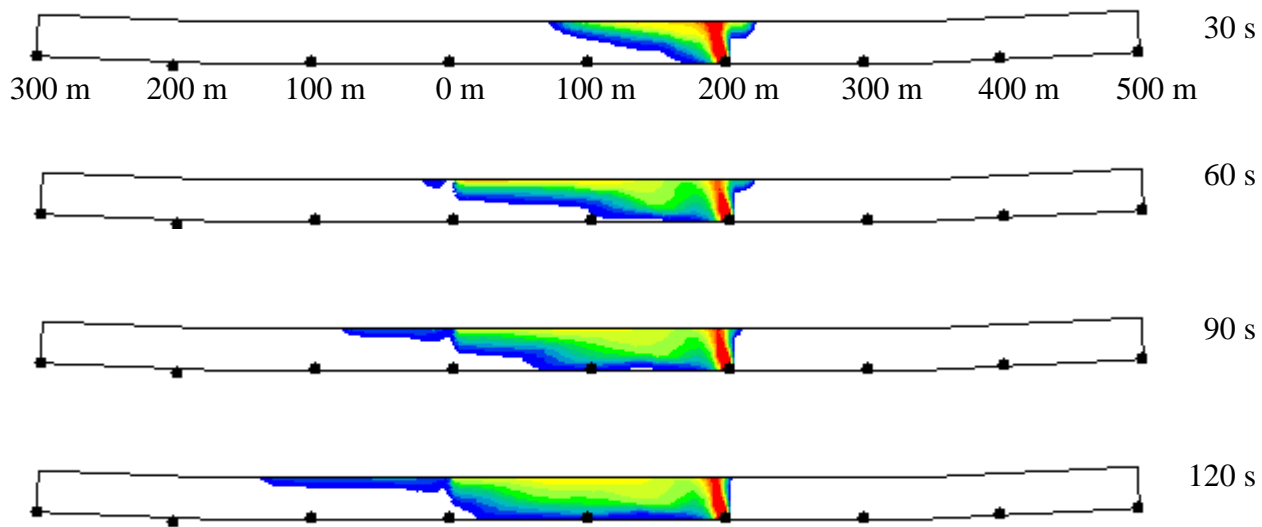


Obr. 4

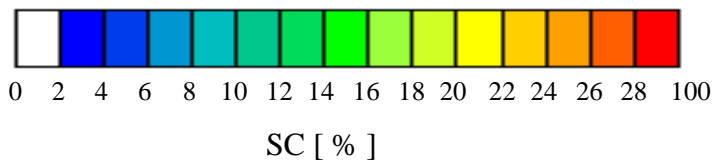


Obr. 5

Příloha č. 11

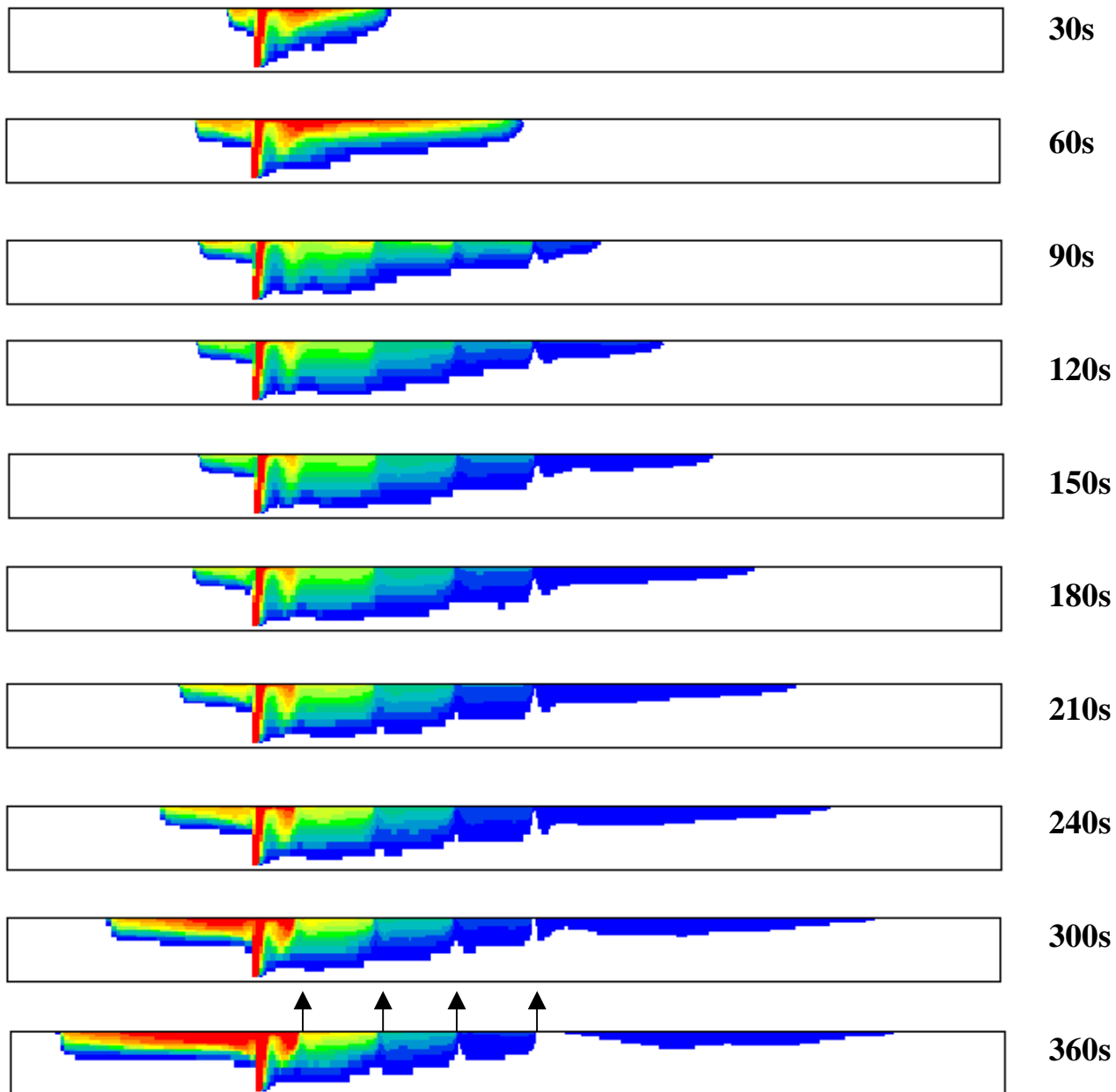


Obr. 6



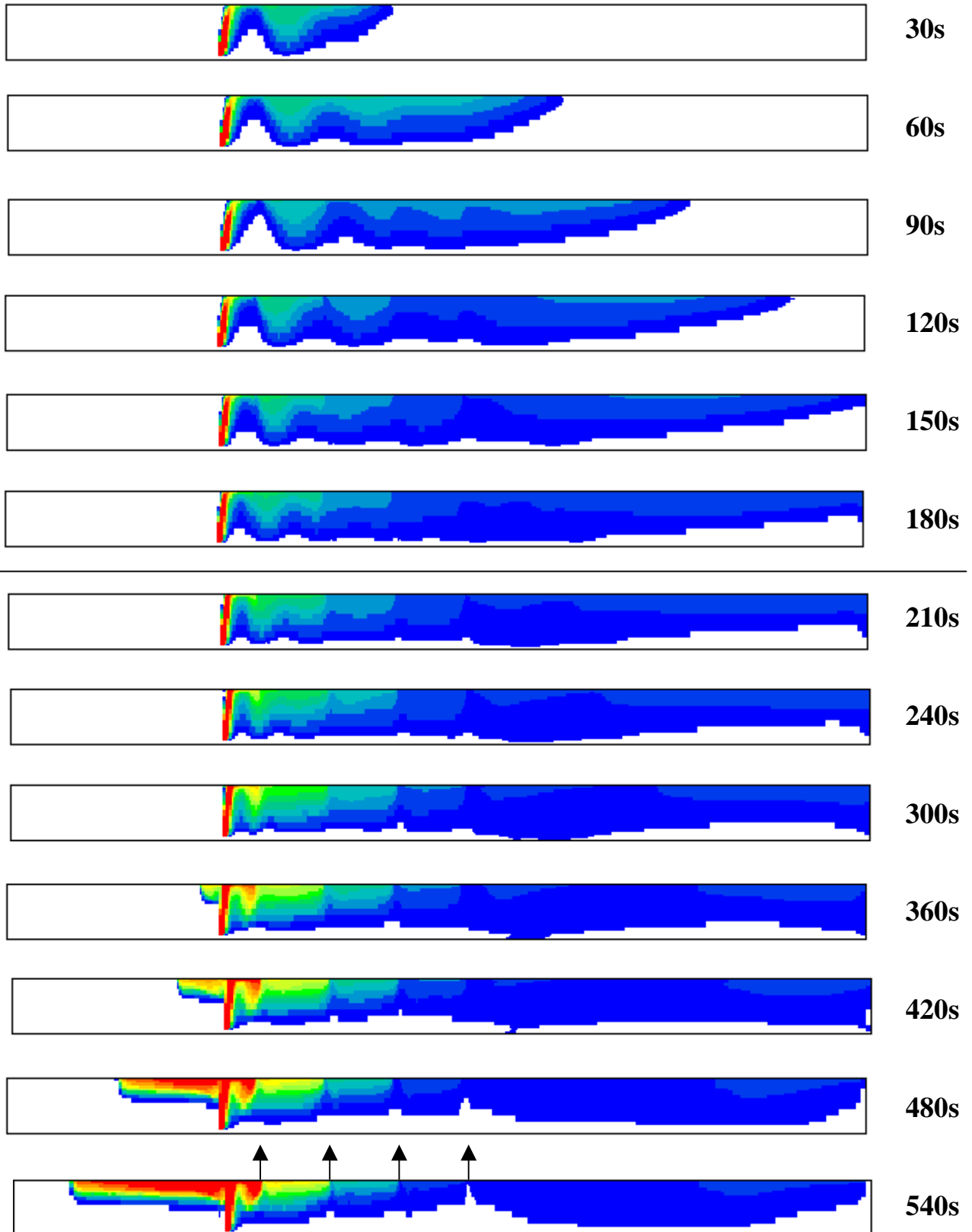
1.
Odvod: 240 m³/s
u_o = 2 m/s

T₀-T₆₀ – přirozené šíření kouře
T₆₀-T₃₆₀ – odvod 4x 60m³/s
Sklon 0%;
Bez regulace rychlosti podélného proudění



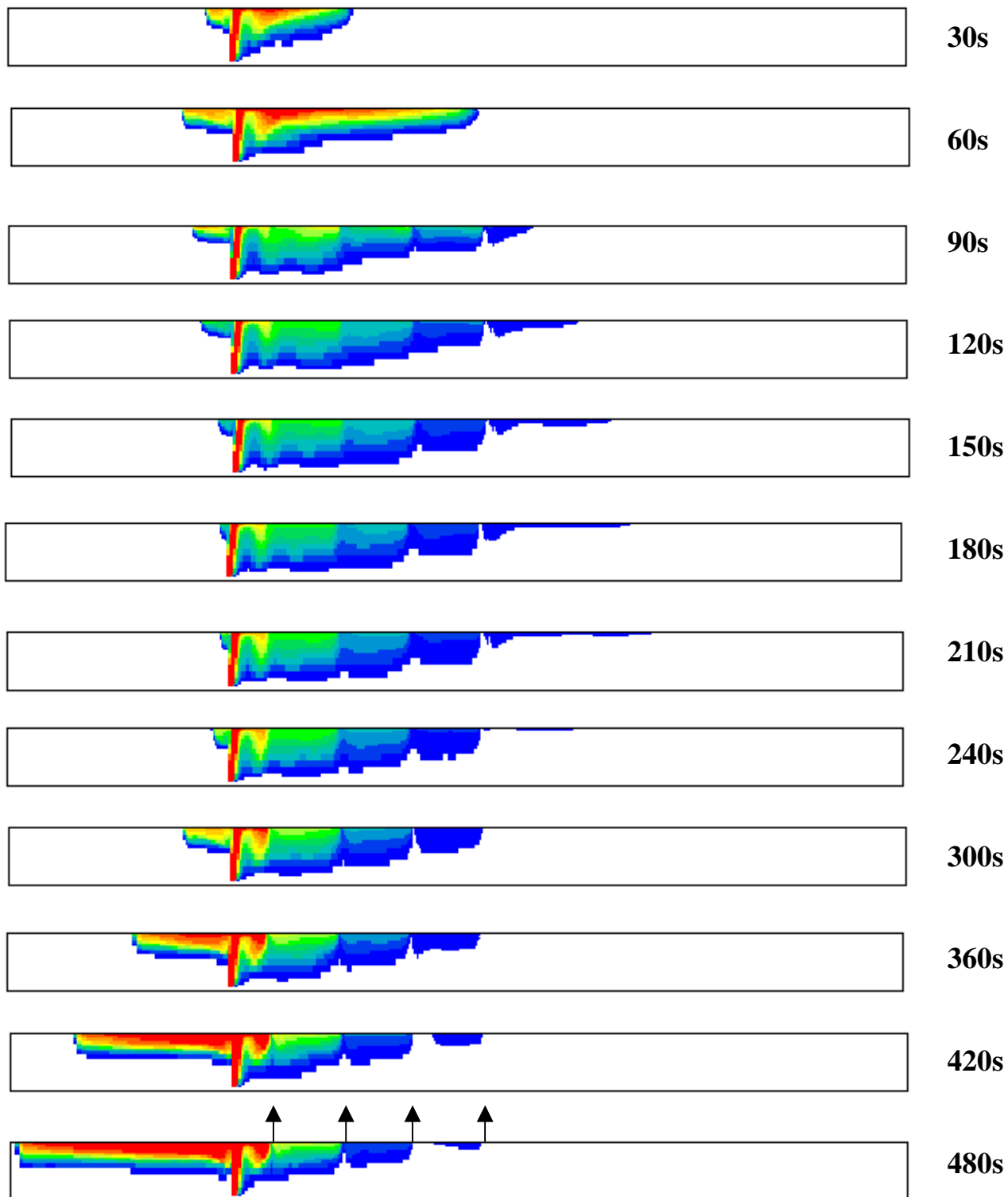
2.
Odvod: 240 m³/s
u_o = 5 m/s

T₀-T₆₀ - přirozené šíření kouře
T₆₀-T₅₄₀ - odvod 4x 60m³/s
Sklon 0%;
Bez regulace rychlosti podélného proudění



5.
Odvod: 320 m³/s
u_o = 2 m/s

T₀-T₆₀ - přirozené šíření kouře
T₆₀-T₄₈₀ - odvod 4x 80m³/s
Sklon 0%;
Bez regulace rychlosti podélného proudění



6.

Odvod: $320 \text{ m}^3/\text{s}$

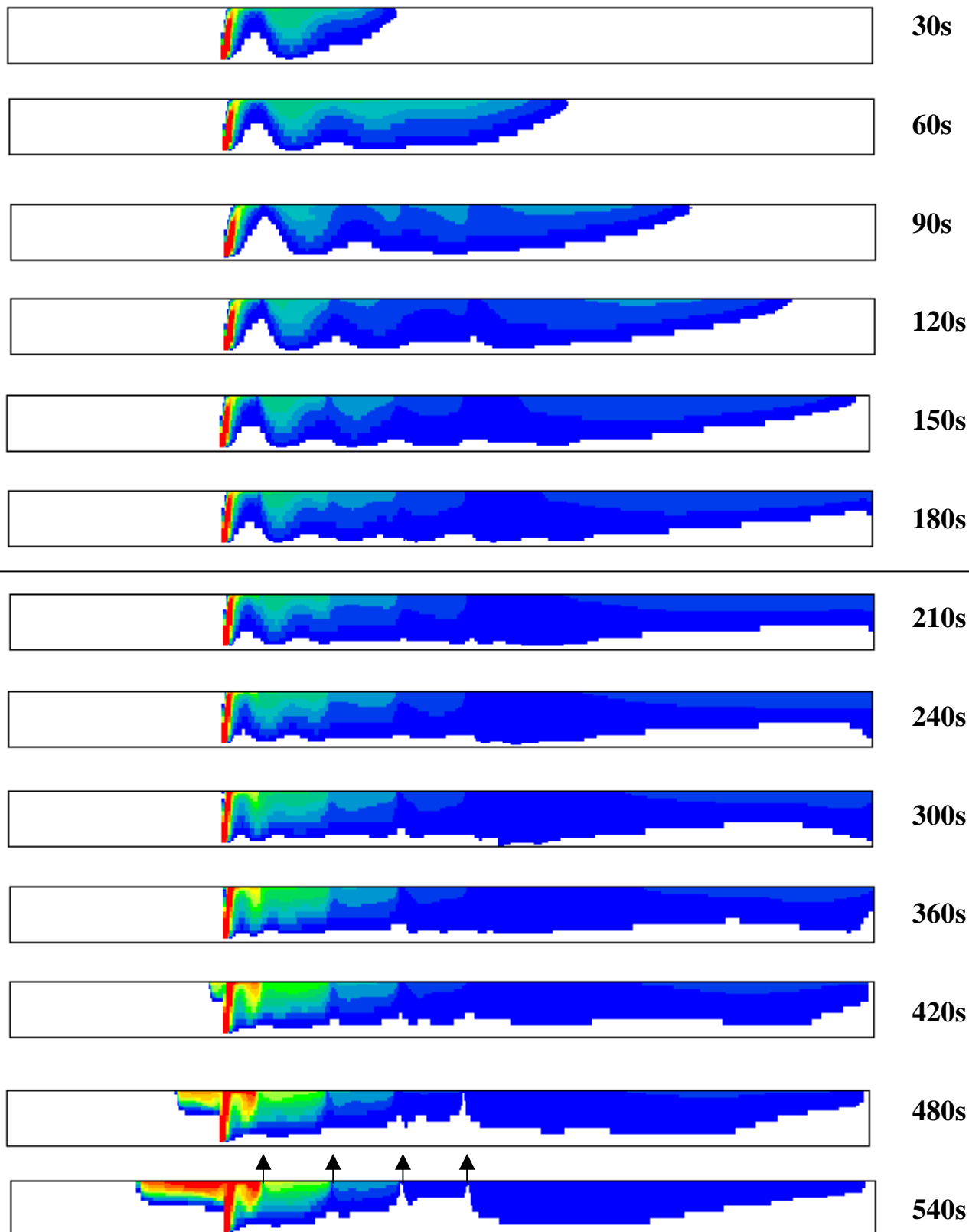
$u_o = 5 \text{ m/s}$

T_0-T_{60} – přirozené šíření kouře

$T_{60}-T_{540}$ – odvod $4 \times 80 \text{ m}^3/\text{s}$

Sklon 0% ;

Bez regulace rychlosti podélného proudění



3.

Odvod: $300 \text{ m}^3/\text{s}$

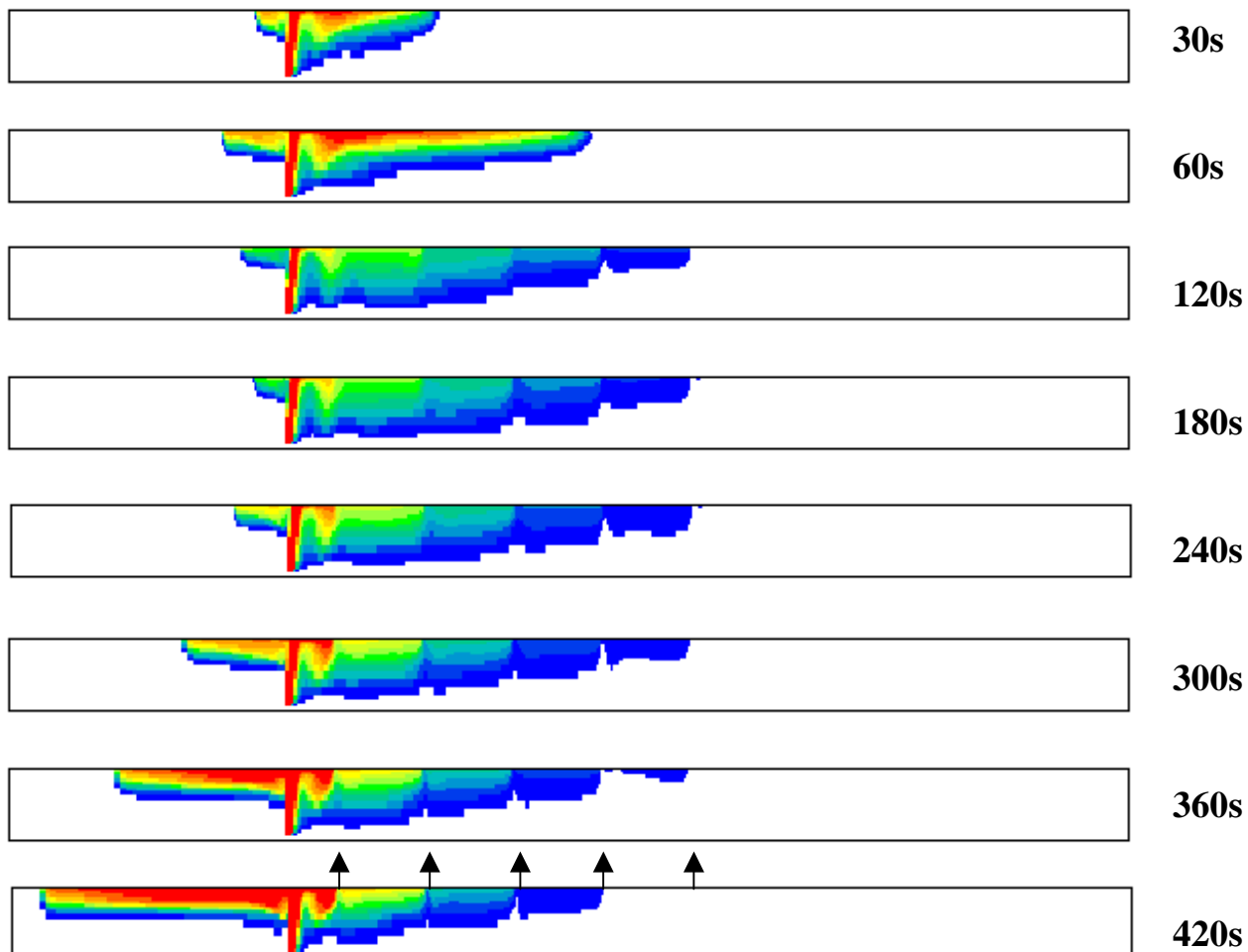
$u_0 = 2 \text{ m/s}$

$T_0 - T_{60}$ – přirozené šíření kouře

$T_{60} - T_{420}$ – odvod $5 \times 60 \text{ m}^3/\text{s}$

Sklon 0% ;

bez regulace rychlosti podélného proudění



4.

Odvod: $300 \text{ m}^3/\text{s}$

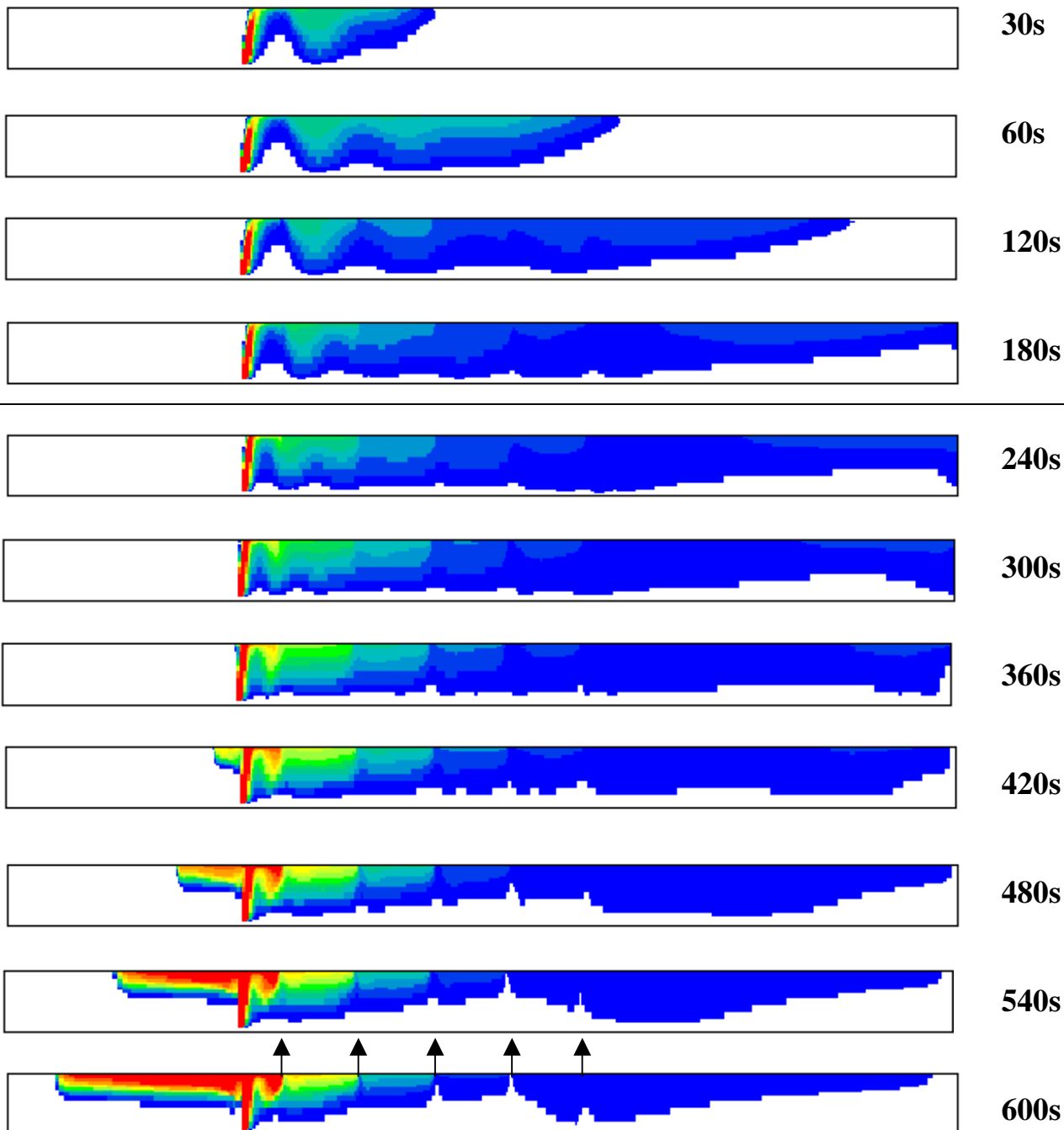
$u_0 = 5 \text{ m/s}$

T_0-T_{60} – přirozené šíření kouře

$T_{60}-T_{600}$ – odvod $5 \times 60 \text{ m}^3/\text{s}$

Sklon 0% ;

bez regulace rychlosti podélného proudění



8.

Odvod: $360 \text{ m}^3/\text{s}$

$u_0 = 5 \text{ m/s}$;

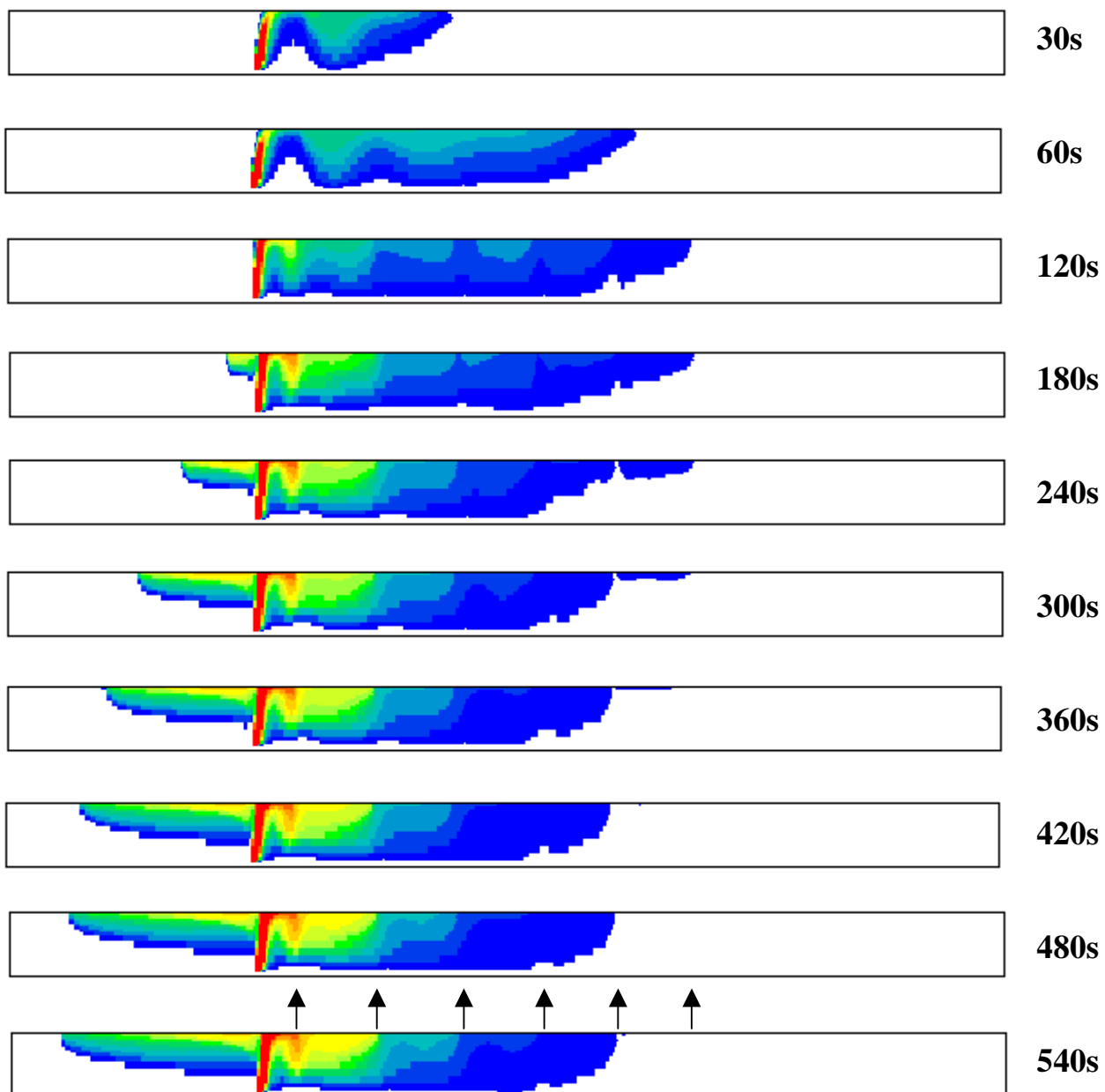
klesání 3,5%

T_0-T_{60} - přirozené šíření kouře $u_0 = 5 \text{ m/s}$

$T_{60}-T_{120}$ - fáze plynulého brždění na $u_r = 2,5 \text{ m/s}$

$T_{60}-T_{540}$ - odvod $6 \times 60 \text{ m}^3/\text{s}$

S regulací rychlosti podélného proudění na $u_r = 2,5 \text{ m/s}$



Jižní tunel
Myslbekova - Pelc-Tyrolka

7.

Odvod: $360 \text{ m}^3/\text{s}$

$u_0 = 5 \text{ m/s}$;

stoupání 3,5%

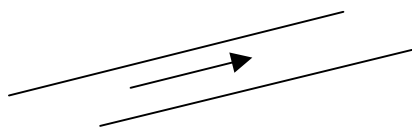
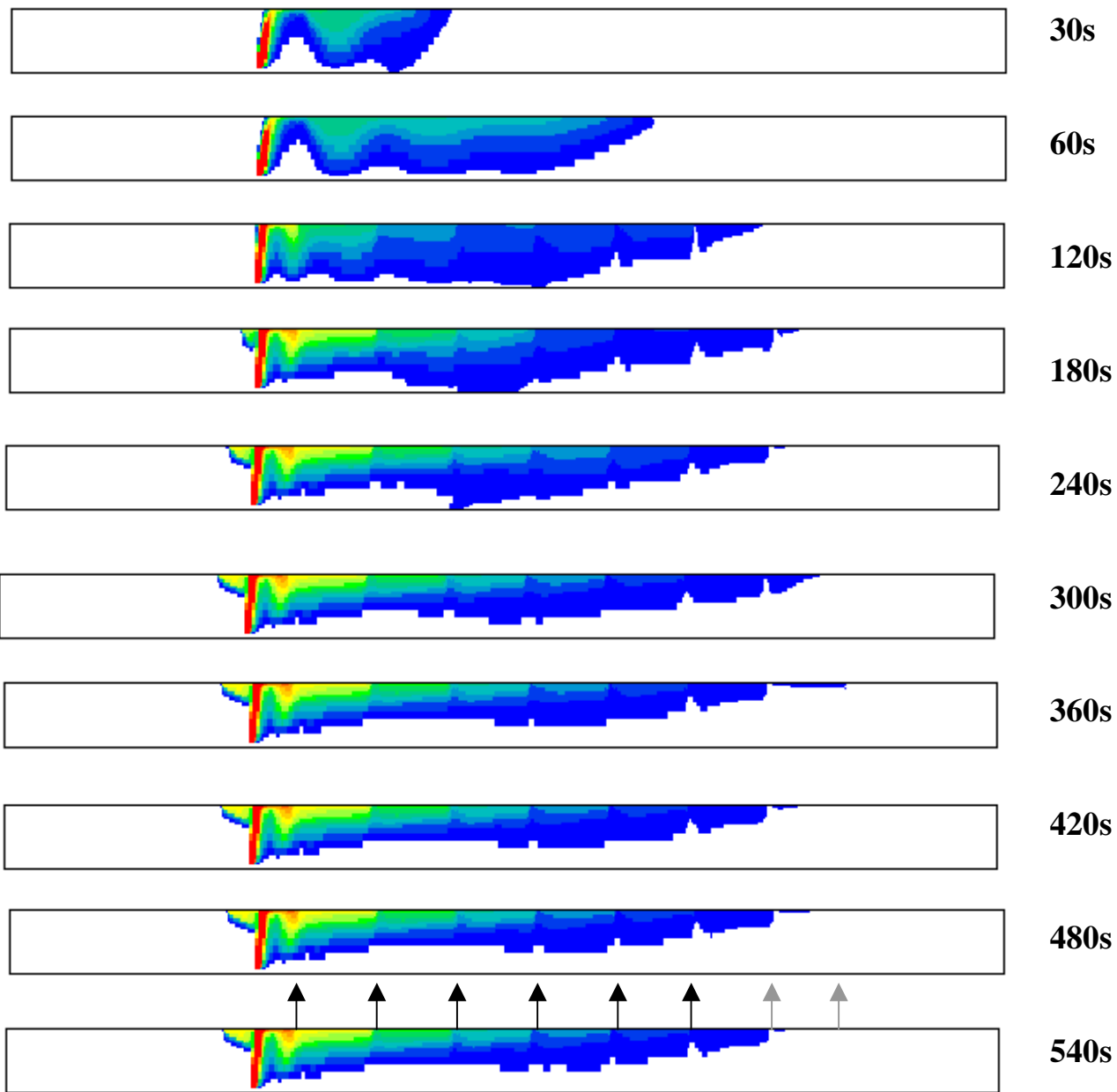
T_0-T_{60} - přirozené šíření kouře $u_0 = 5 \text{ m/s}$

$T_{60}-T_{120}$ - fáze plynulého brždění na $u_r = 2,5 \text{ m/s}$

$T_{60}-T_{120}$ - odvod $6 \times 60 \text{ m}^3/\text{s}$

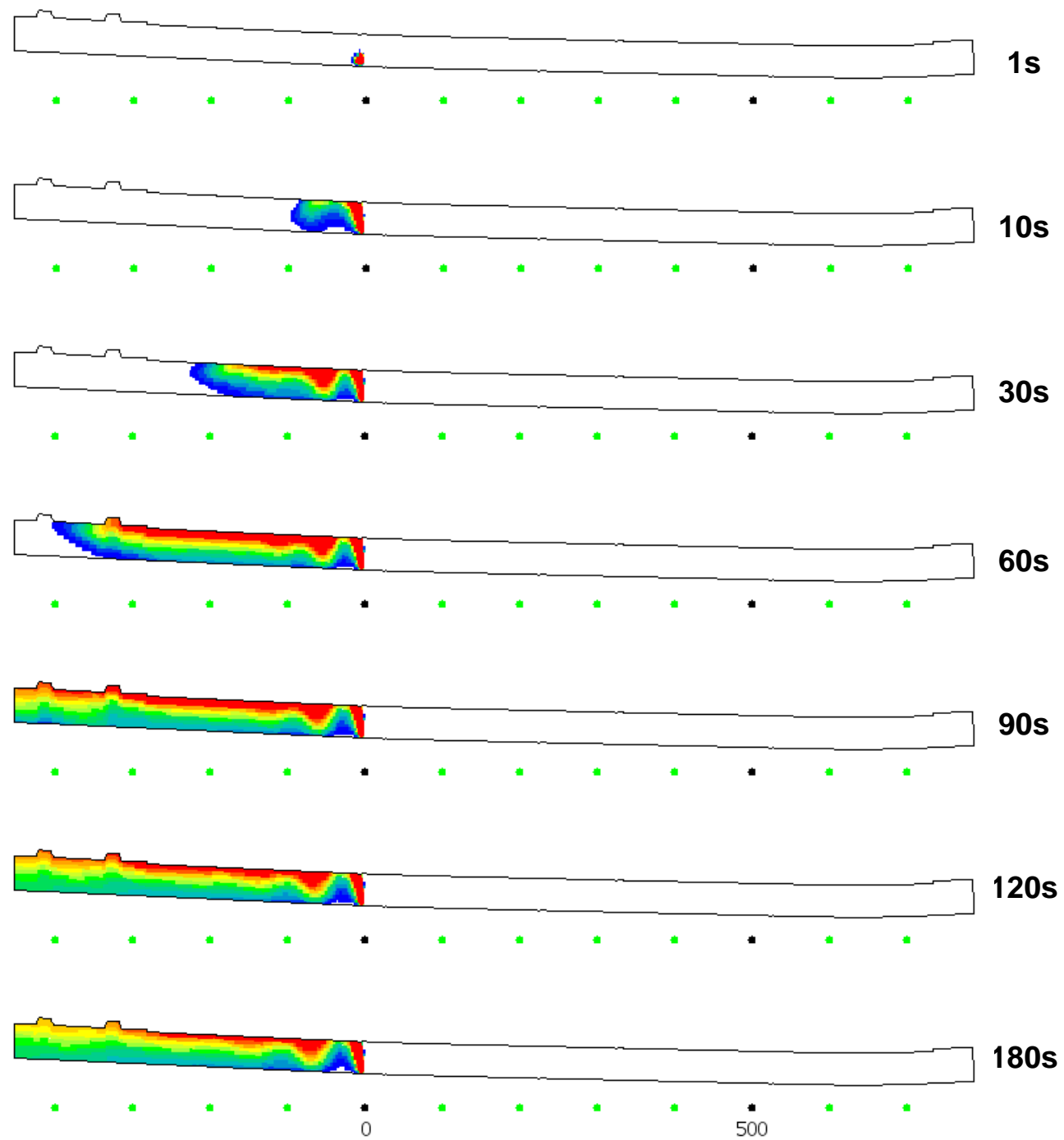
$T_{120}-T_{540}$ - odvod $8 \times 45 \text{ m}^3/\text{s}$

S regulací rychlosti podélného proudění na $u_r = 2,5 \text{ m/s}$

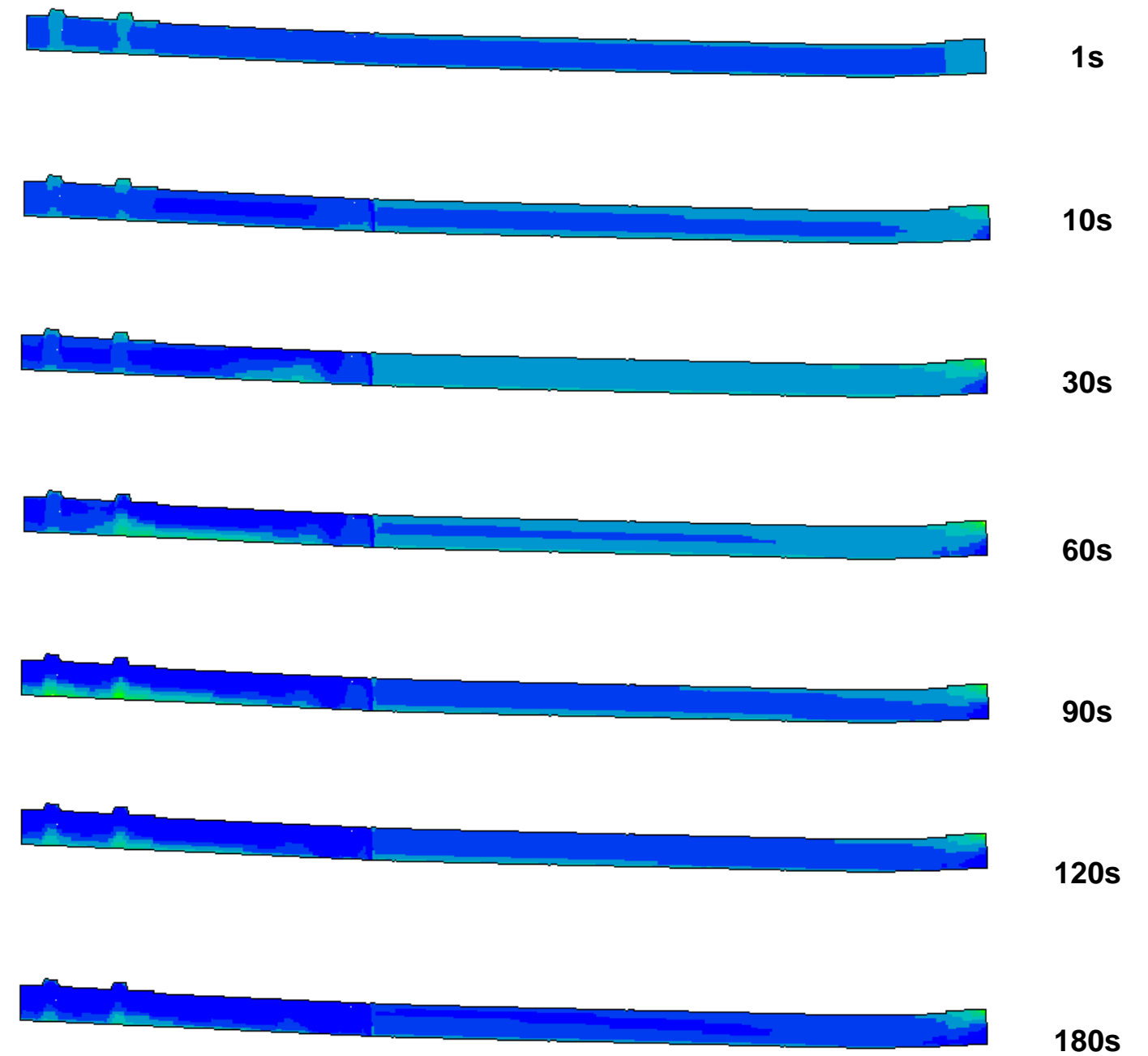
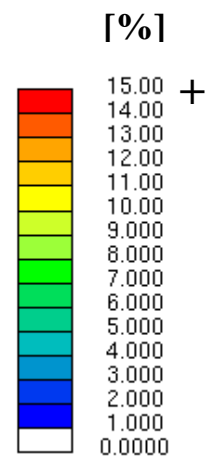


Severní tunel
Myslbekova - Pelc-Tyrolka

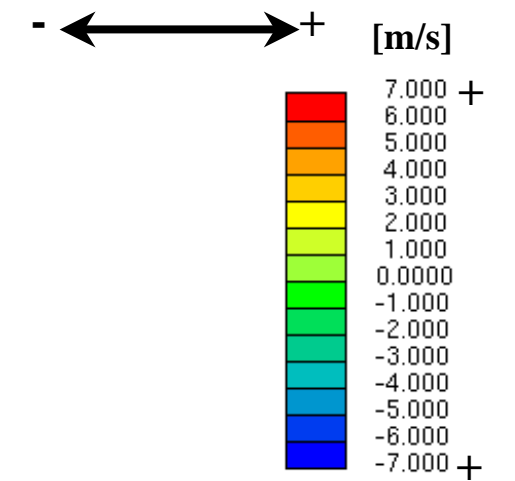
MODEL A bez odsávání

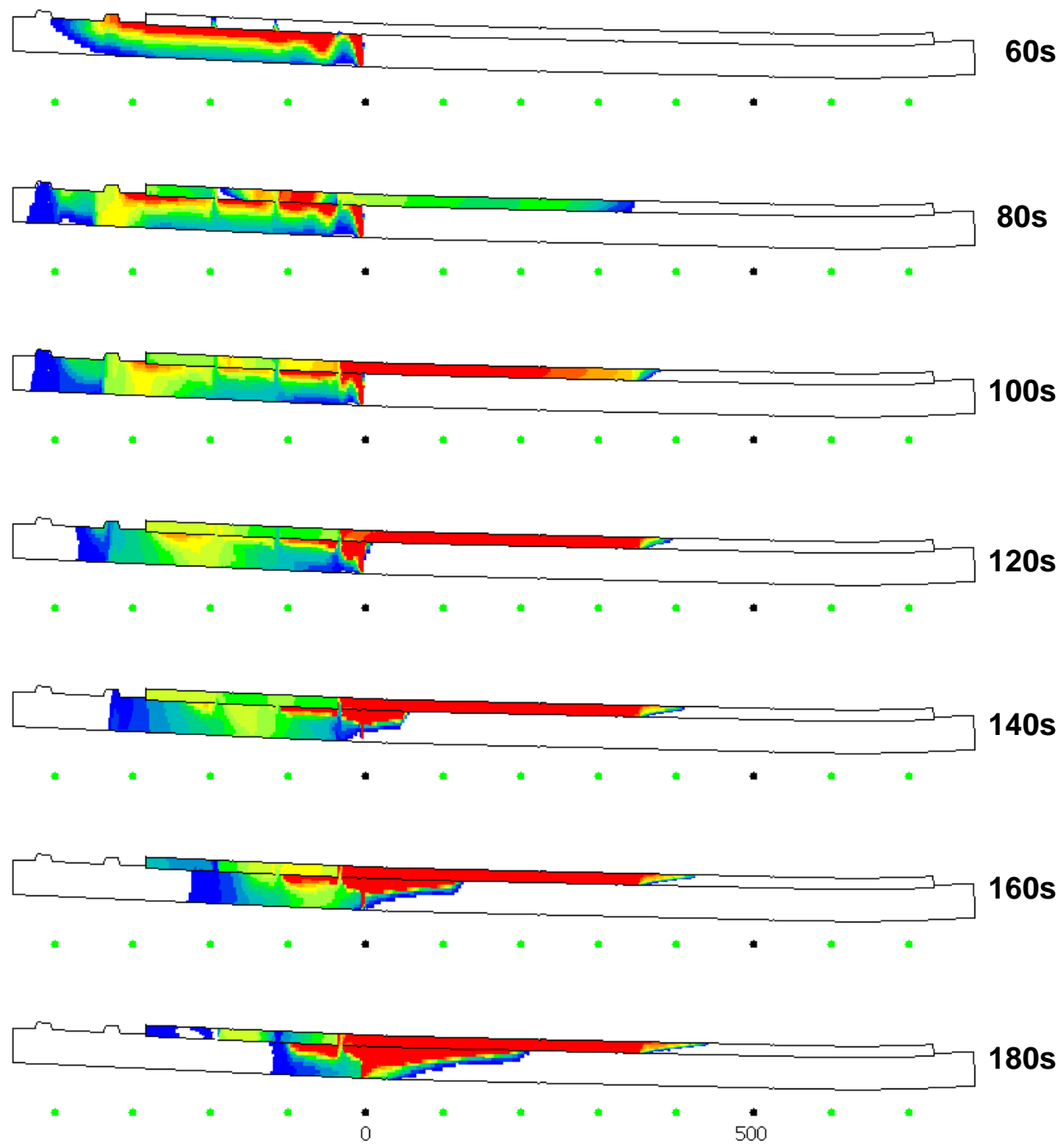


Obr. 1a Pole koncentrací kouře ve stoupajícím tunelu-1 (MODEL A bez odsávání)

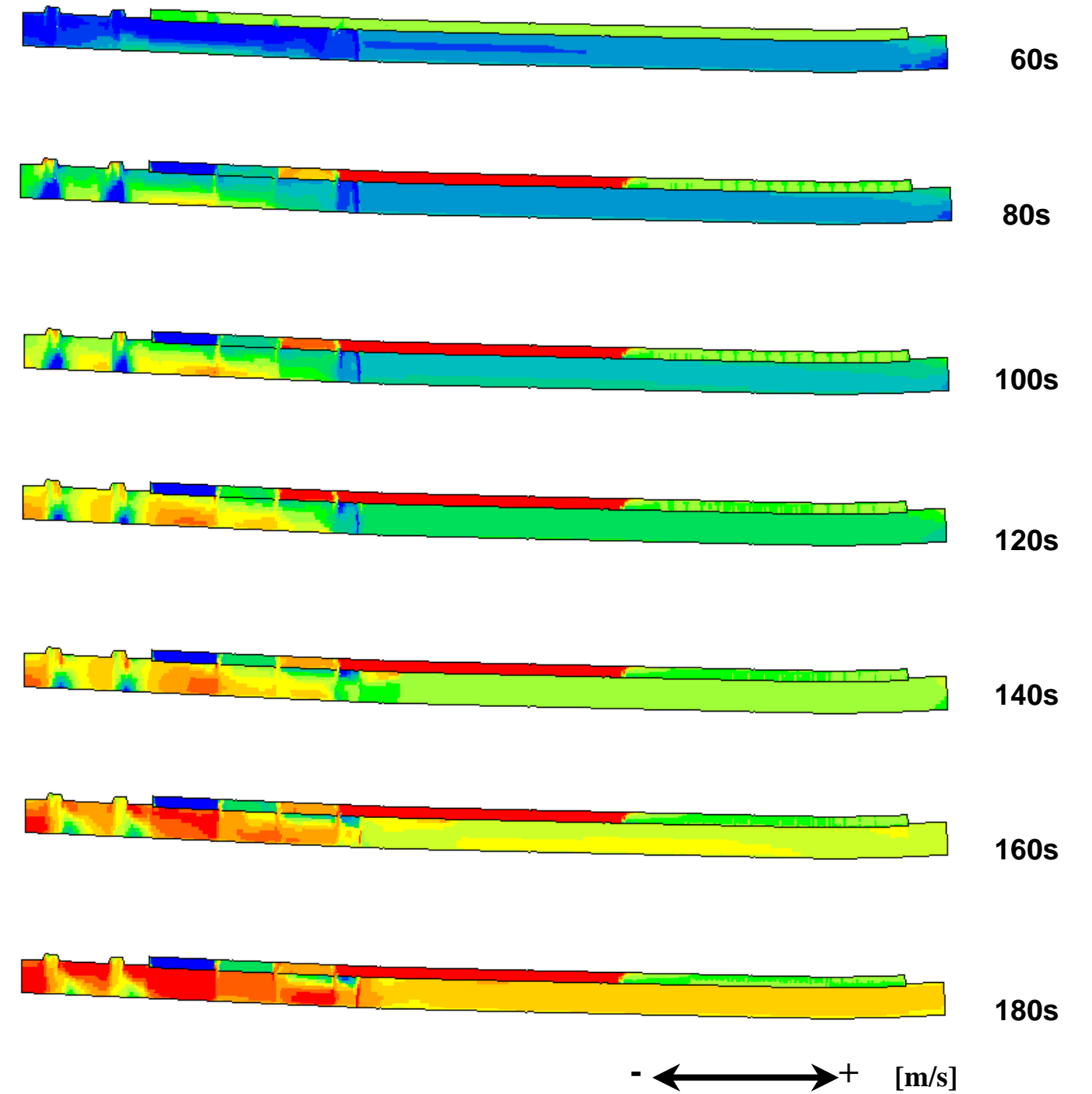
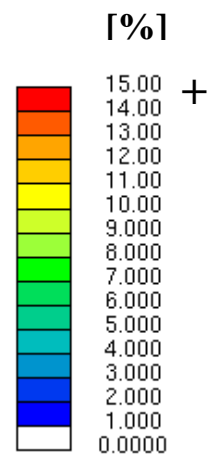


Obr. 1b Pole podélné složky rychlosti ve stoupajícím tunelu-1 (MODEL A bez odsávání)

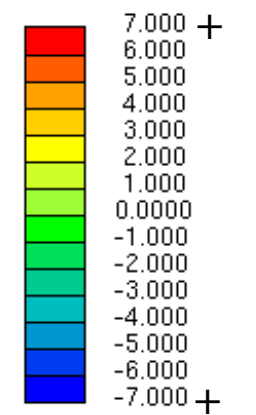




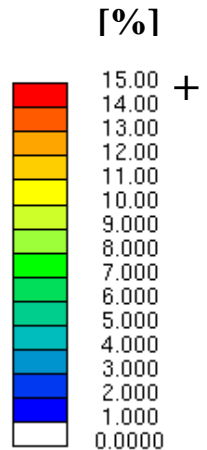
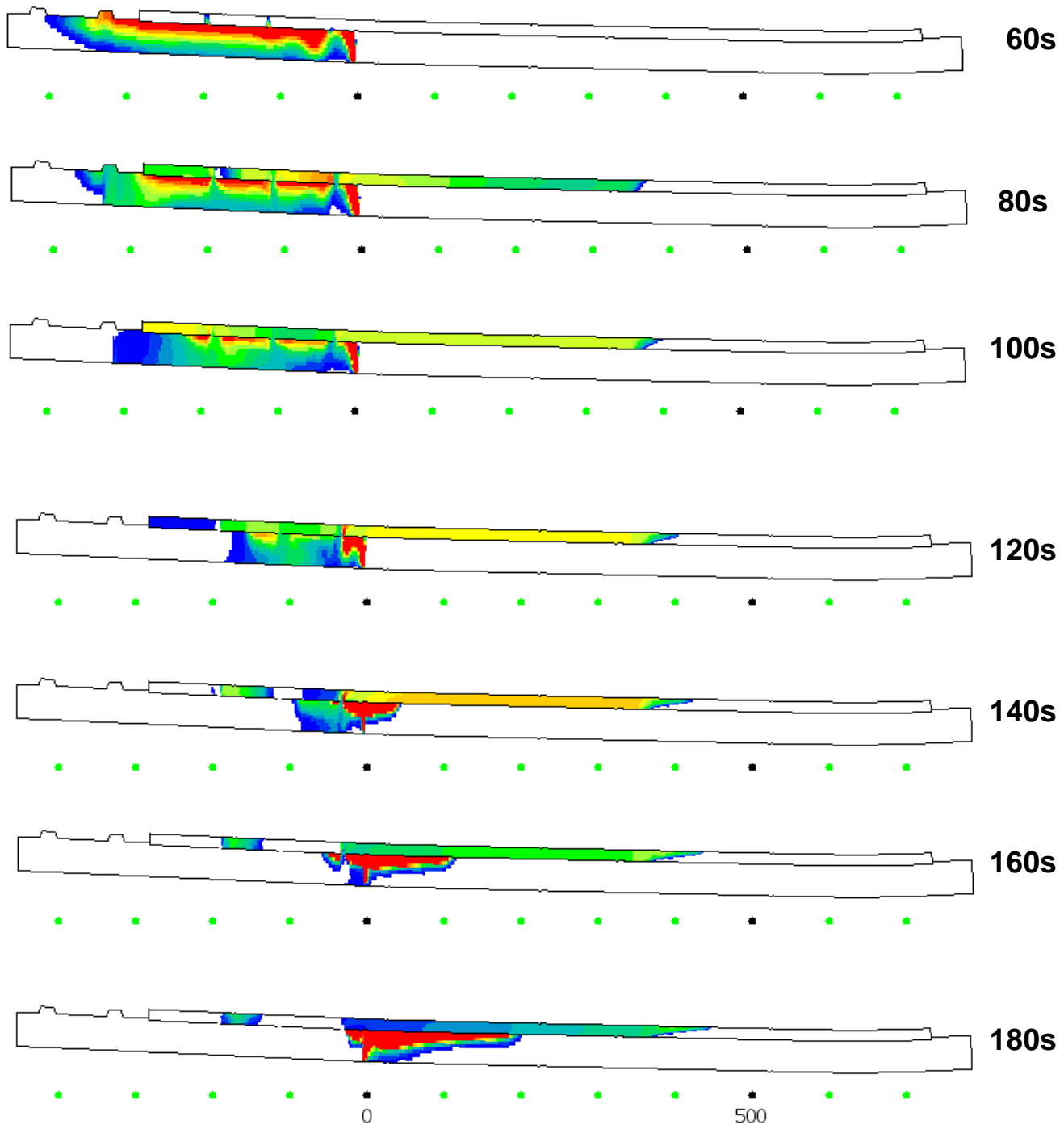
Obr. 2a Pole koncentrací kouře ve stoupajícím tunelu-1 (MODEL A odsávání 165 m³/s)



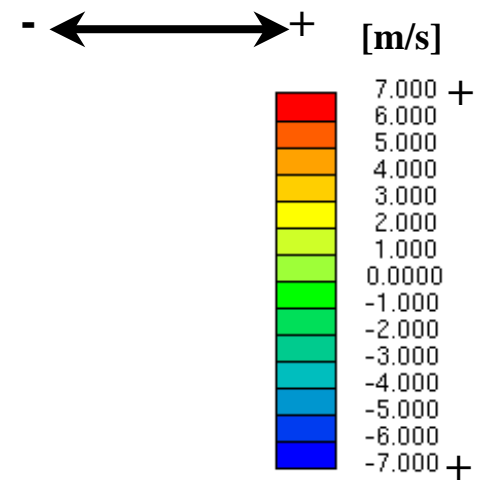
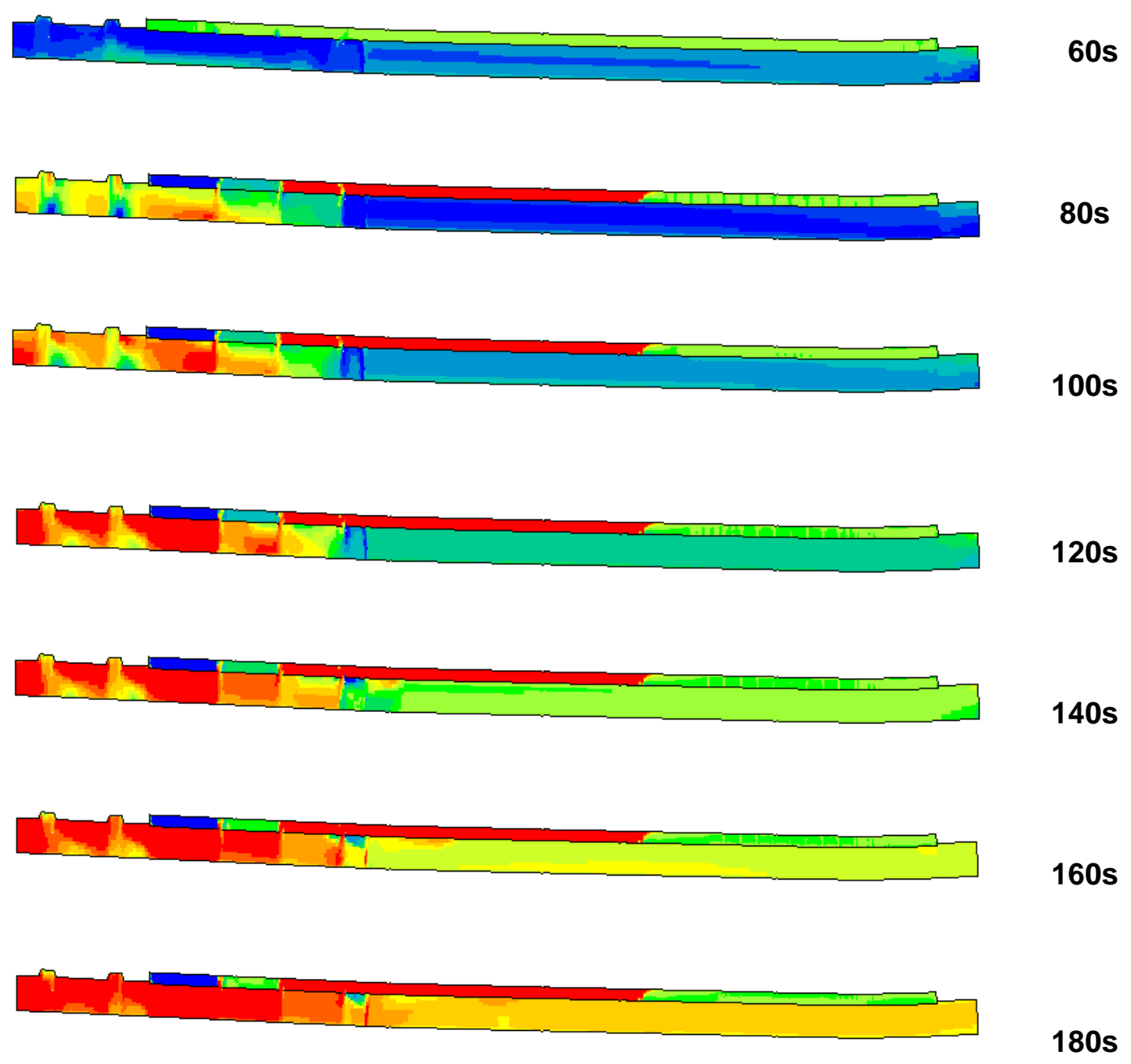
Obr. 2b Pole podélné složky rychlosti ve stoupajícím tunelu-1 (MODEL A odsávání 165 m³/s)



MODEL A odsávání 300 m³/s

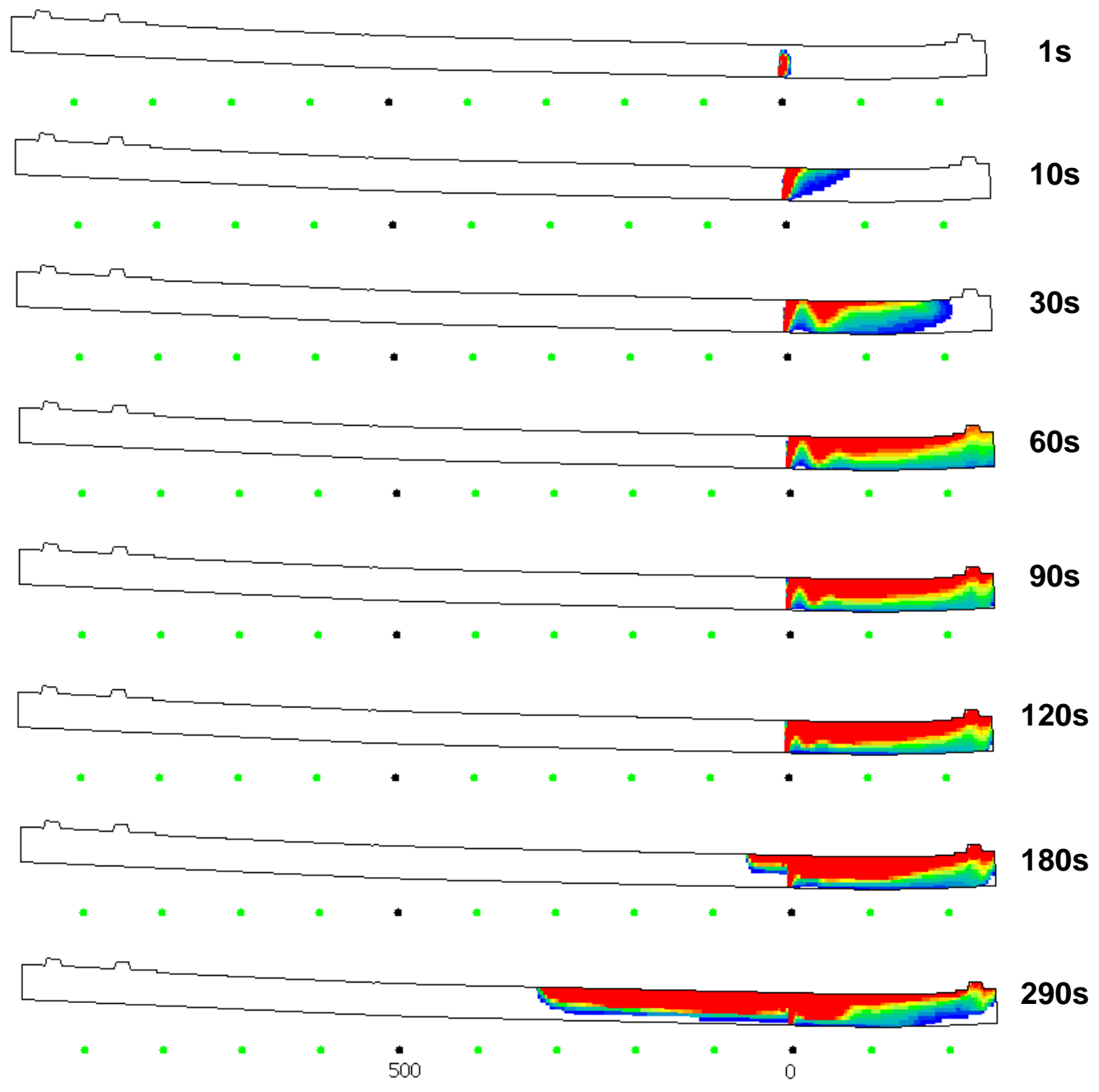


Obr. 3a Pole koncentrací kouře ve stoupajícím tunelu-1 (MODEL A odsávání 300 m³/s)

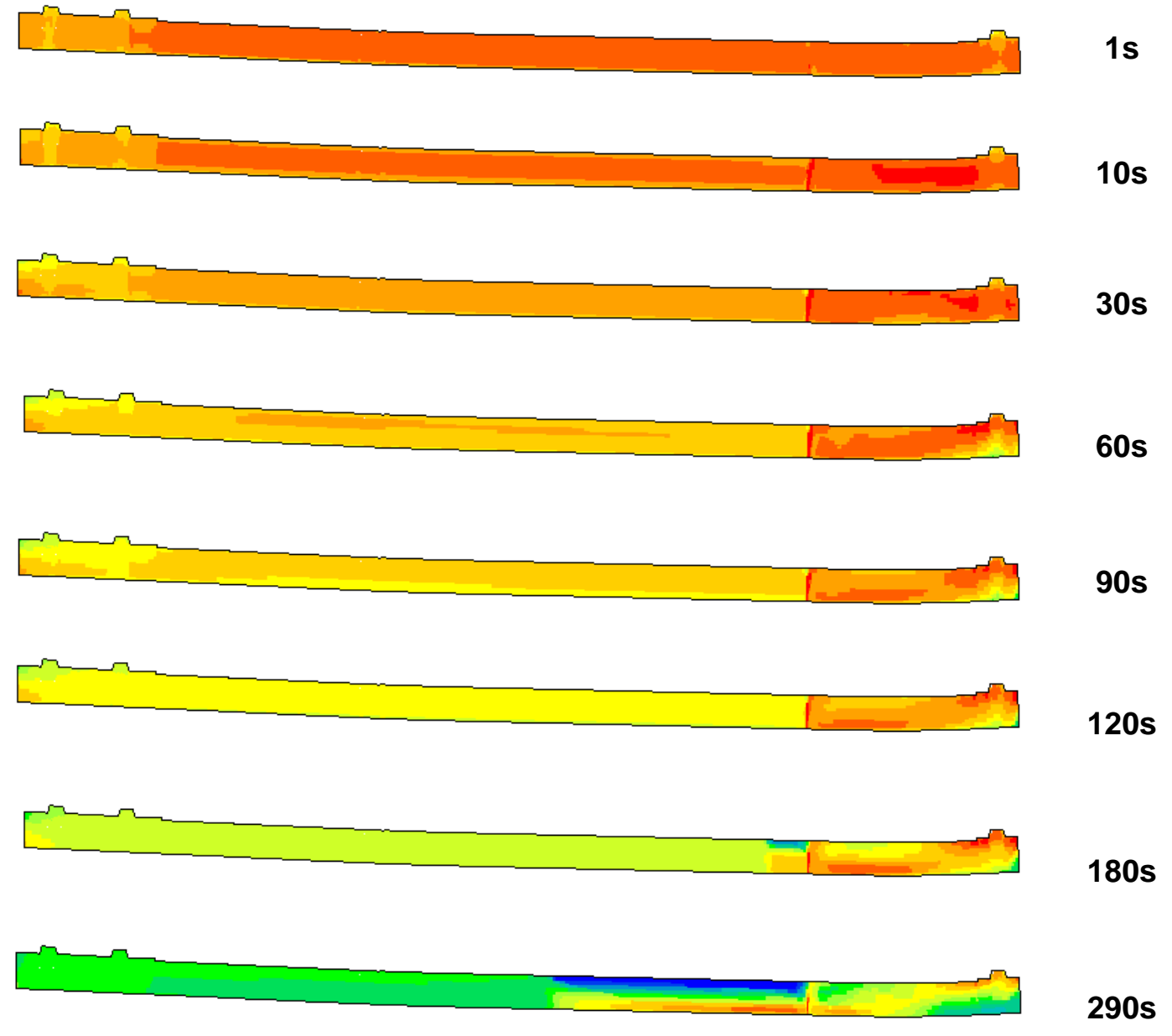
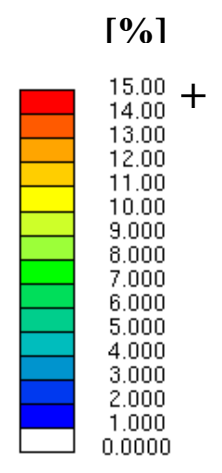


Obr. 3b Pole podélné složky rychlosti ve stoupajícím tunelu-1 (MODEL A odsávání 300 m³/s)

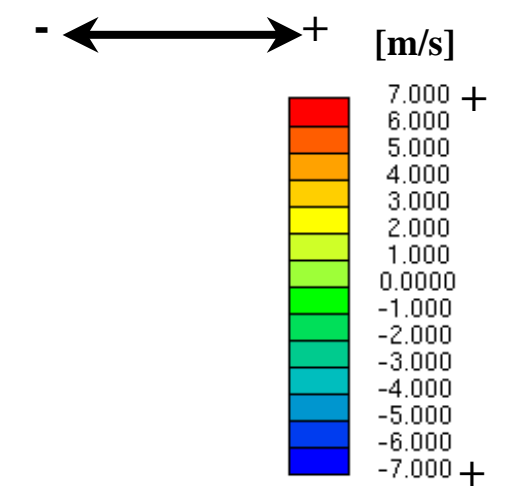
MODEL B bez odsávání

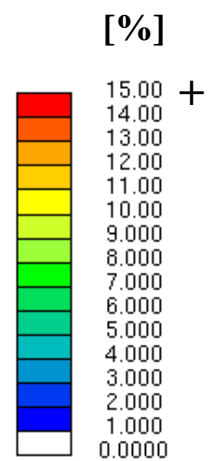
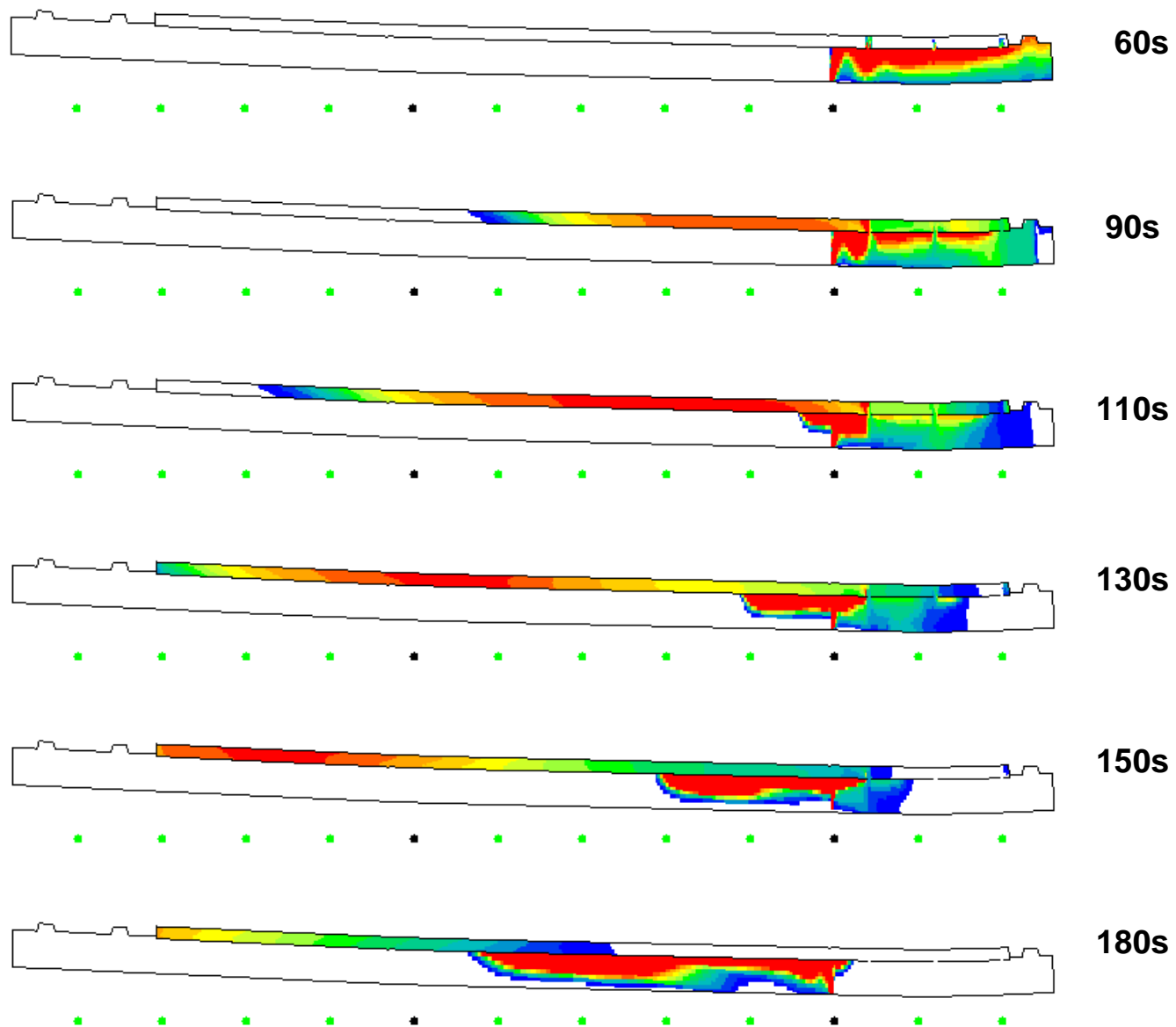


Obr. 4a Pole koncentrací kouře v klesajícím tunelu-2 (MODEL B bez odsávání)

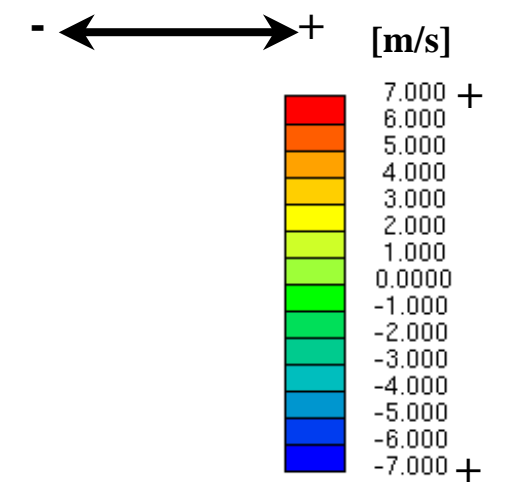
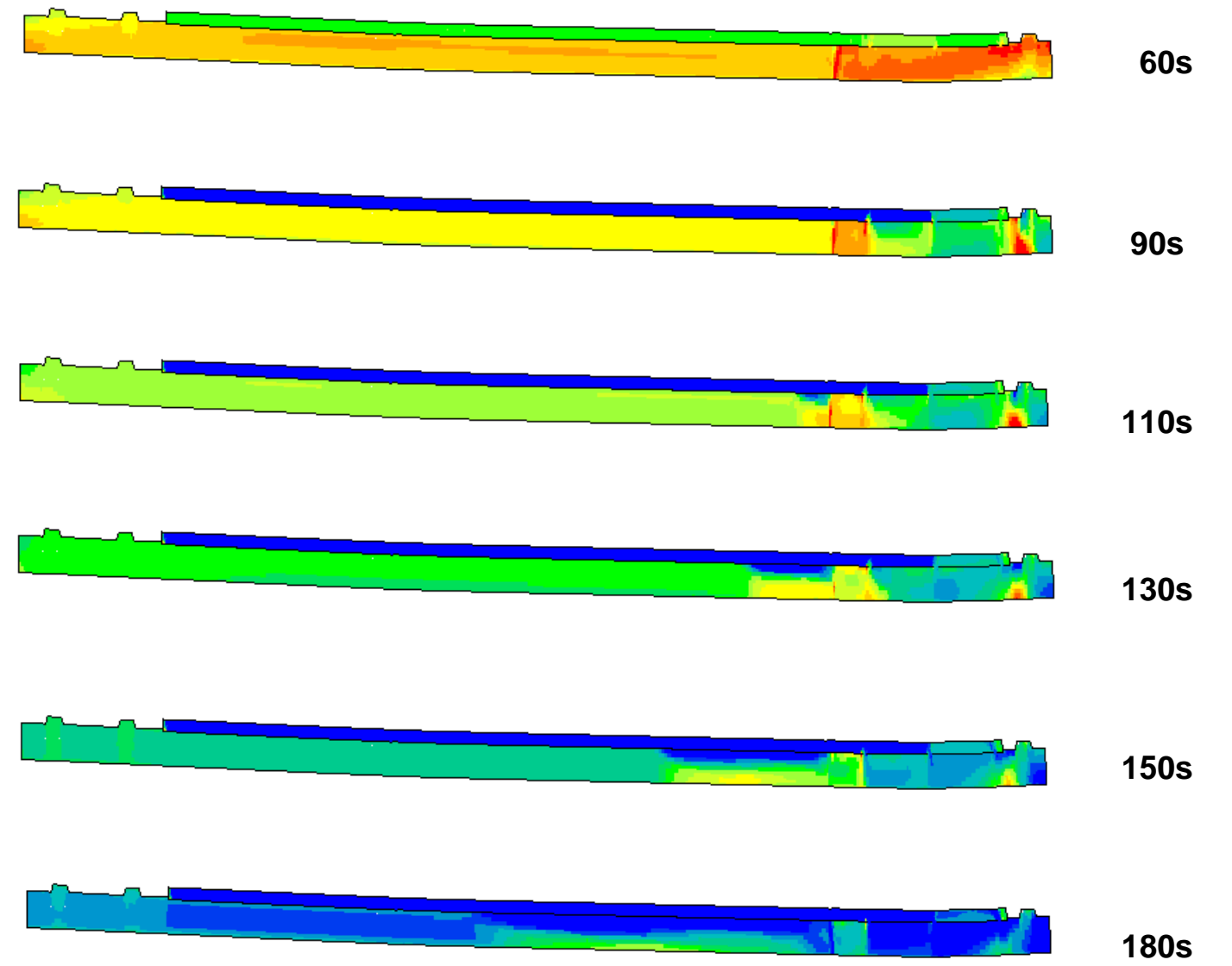


Obr. 4b Pole podélné složky rychlosti v klesajícím tunelu-2 (MODEL B bez odsávání)

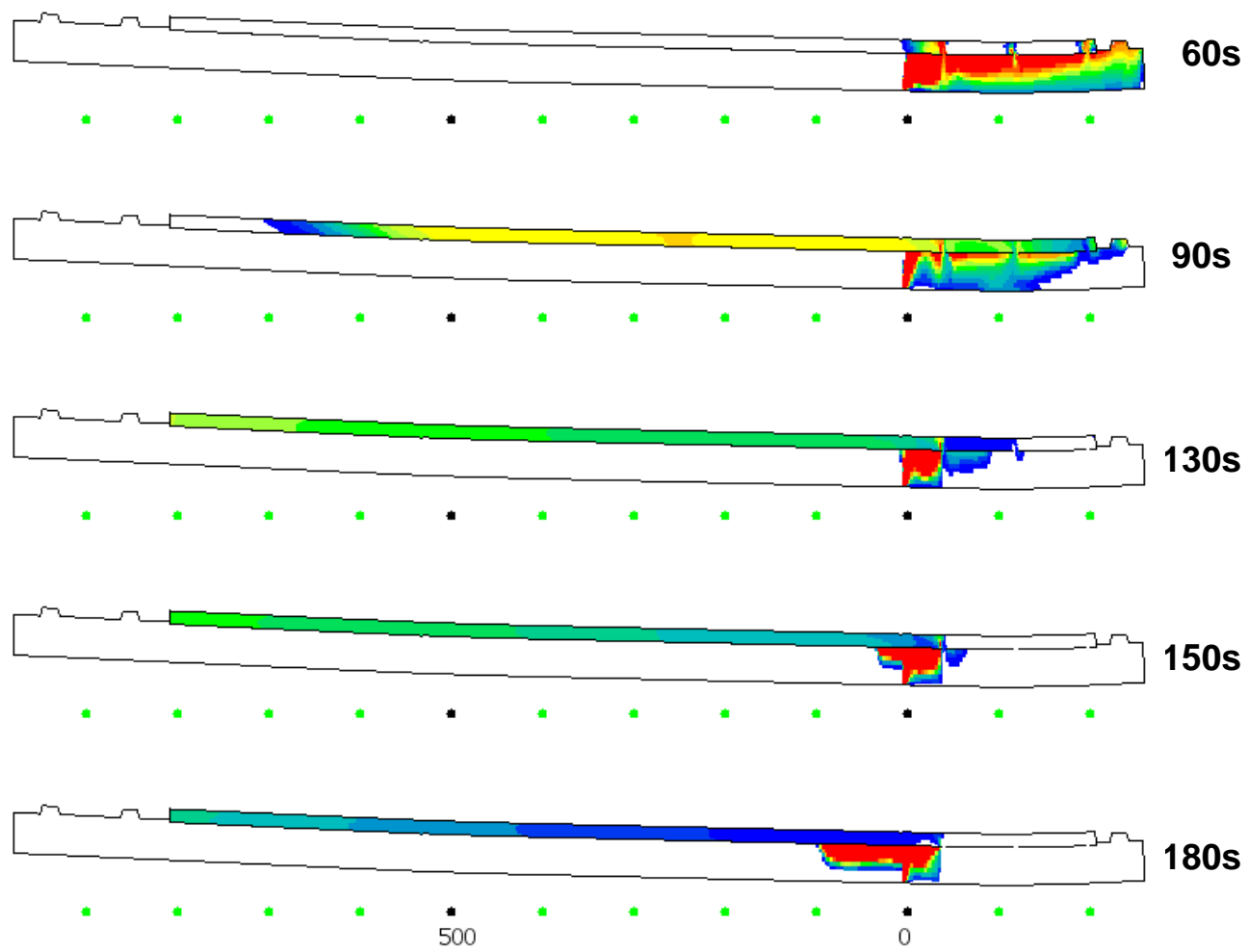




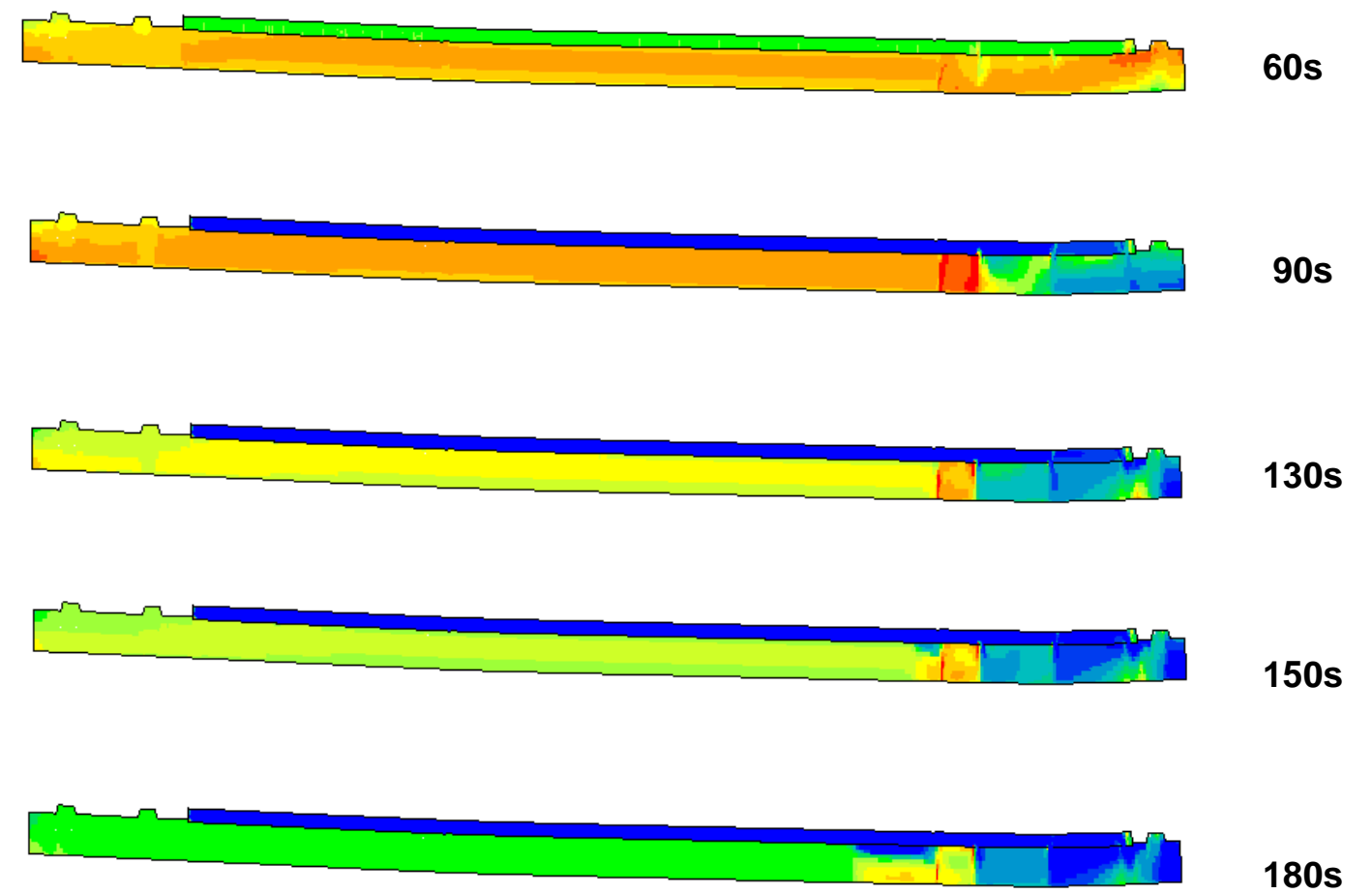
Obr. 5a Pole koncentrací kouře v klesajícím tunelu-2 (MODEL B odsávání 165 m³/s)



Obr. 5b Pole podélné složky rychlosti v klesajícím tunelu-2 (MODEL B odsávání 165 m³/s)



Obr. 6a Pole koncentrací kouře v klesajícím tunelu-2 (MODEL B odsávání 300 m³/s)



Obr. 6b Pole podélné složky rychlosti v klesajícím tunelu-2 (MODEL B odsávání 300 m³/s)