

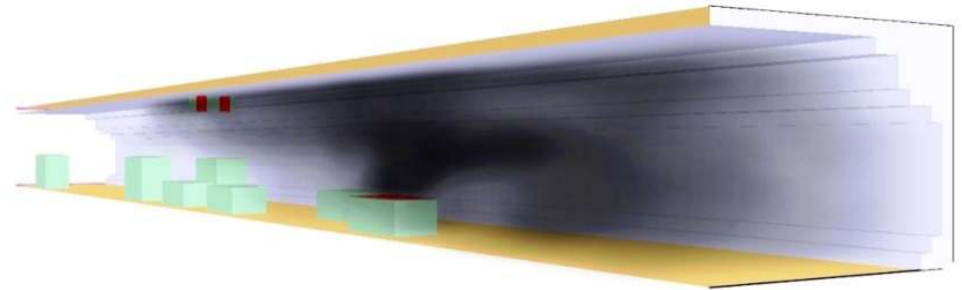
# Modelování požáru v tunelových stavbách stavbách

Petr Kučera

Fakulta bezpečnostního inženýrství, VŠB-TUO

Tunelářské odpoledne 1/2026 | Praha





## Obsah prezentace

- I. Inženýrské metody pro popis požáru
- II. Vstupní a výstupní parametry pro simulaci požáru v tunelových stavbách
- III. Případové studie simulací požáru v tunelových stavbách
- IV. Závěr

# I.

## Inženýrské metody pro popis požáru

## Sledované parametry požáru a validace



**HRR (rychlost  
uvolňování tepla)**



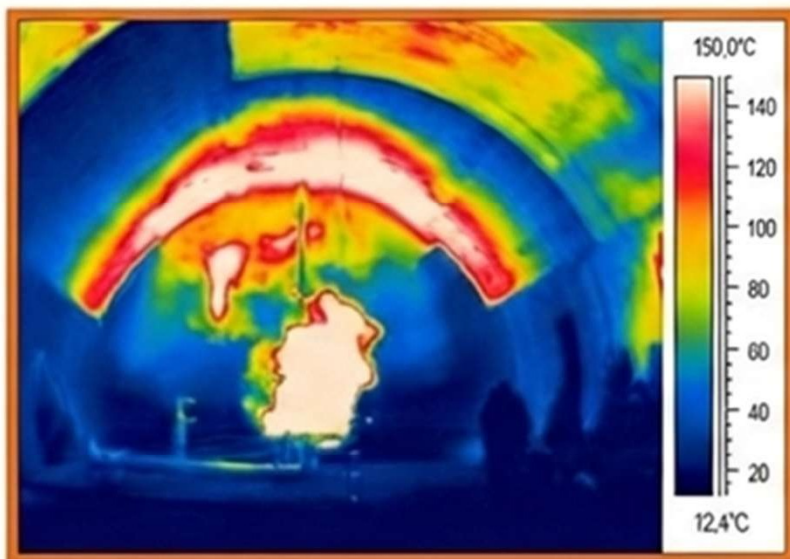
**Toxicita**



**Radiace**

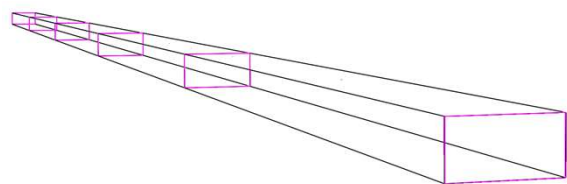


**Optická hustota  
kouře**

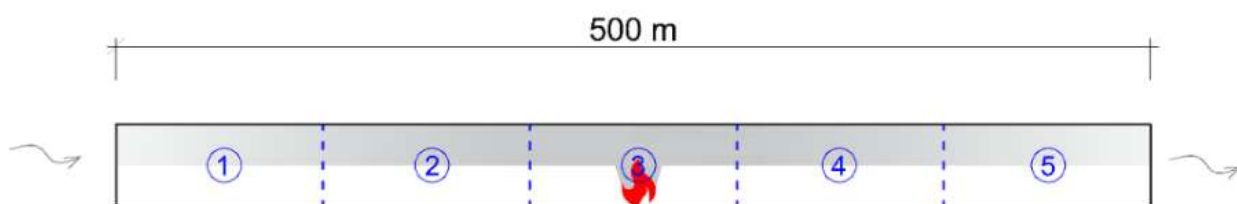


Fyzikální validace: Velkorozměrové zkoušky, ověření větrání a kalibrace matematických modelů.

## Zónové modely požáru



|                                                                                   |        |
|-----------------------------------------------------------------------------------|--------|
|  | ARGOS  |
|  | B-RISK |
|  | CFAST  |
|  | OZONE  |



### POSITIVUM

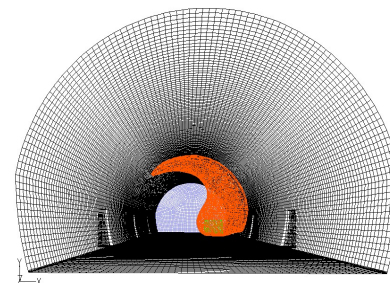
jednoduchost a rychlost



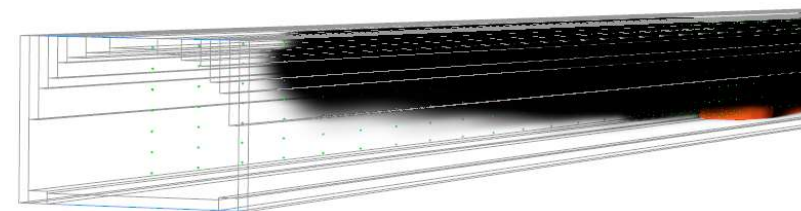
### NEGATIVUM

zjednodušení podmínek požáru

## CFD modely požáru



|                                                                                     |               |
|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
|  | ANSYS FLUENT  |
|  | FireFOAM      |
|  | FDS (PYROSIM) |
|  | SOLVENT       |



### POSITIVUM

přesnější výpočet a univerzálnost



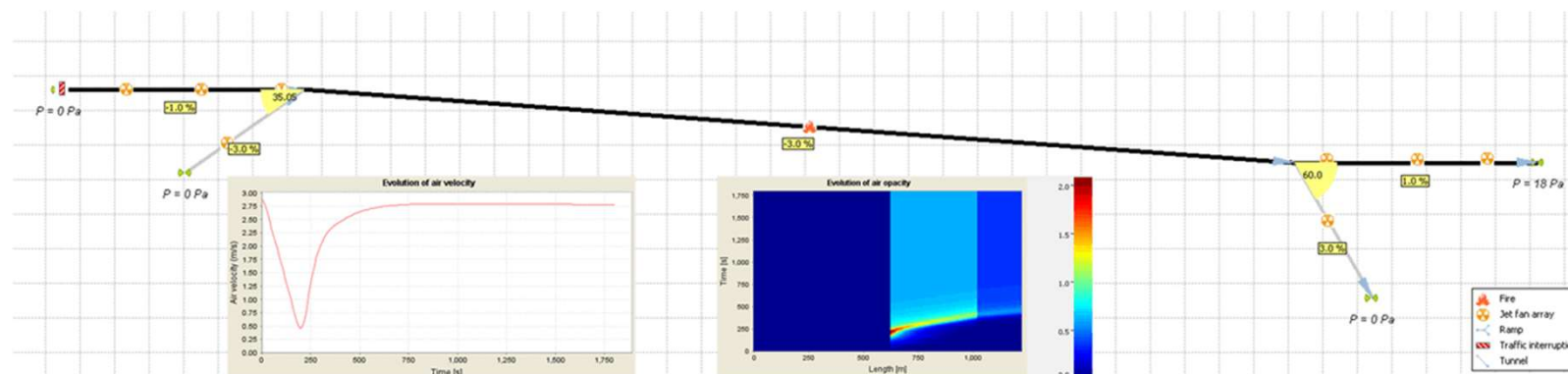
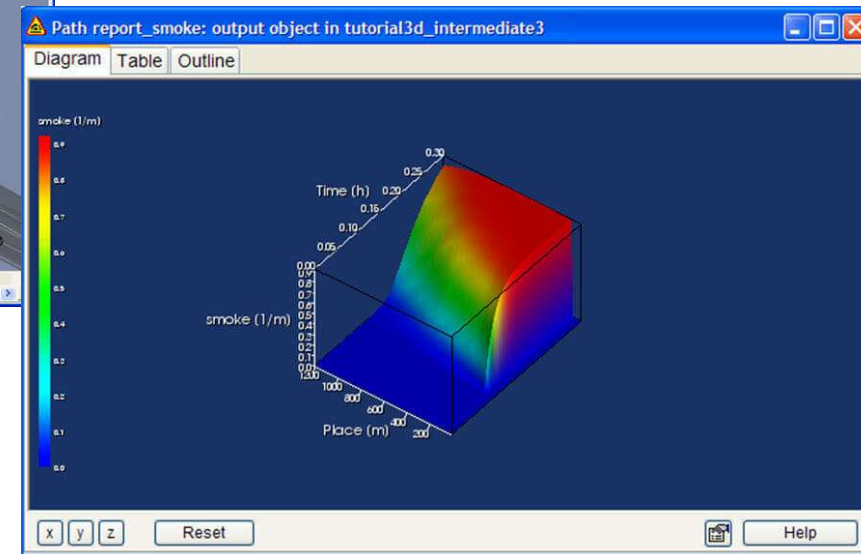
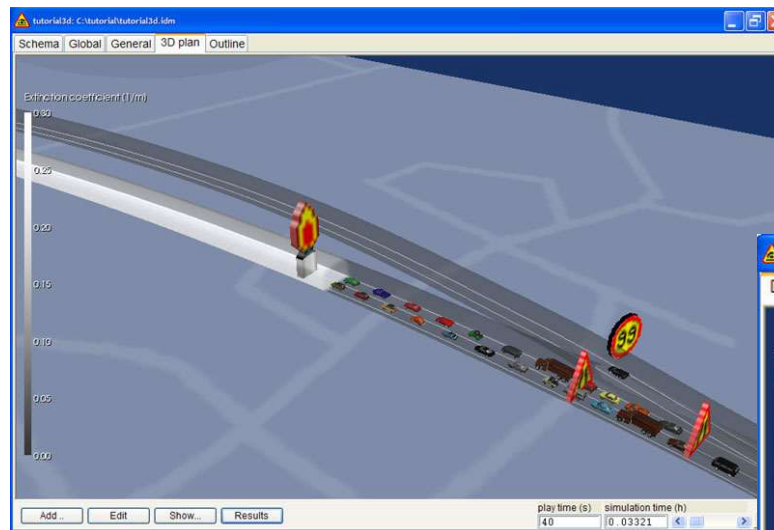
### NEGATIVUM

čas potřebný pro výpočet (hardware)

# Síťové modely větrání tunelů

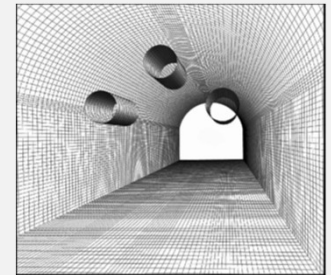
-  Subway Environment Simulation (SES)
-  IDA Tunnel
-  Cammatt

- výpočet proudění a šíření kouře
- zadání požáru pomocí tepelného výkonu
- vhodné pro ověření funkce větrání



## II.

# Vstupní a výstupní parametry pro simulaci požáru v tunelových stavbách



## Rozvoj požáru - tepelný výkon (HRR)

- **tepelný výkon (HRR) v tunelu**  
až 4x vyšší než na otevřeném prostranství
- **podmínky požáru (palivo vs. větrání)**
  - nedostatek kyslíku v zóně hoření
  - nedokonalé spalování,
- **vliv větrání tunelu na rozvoj HRR**
  - urychlení rozvoje požáru
  - šíření toxických zplodin
  - Ztížení zásahu hasičů

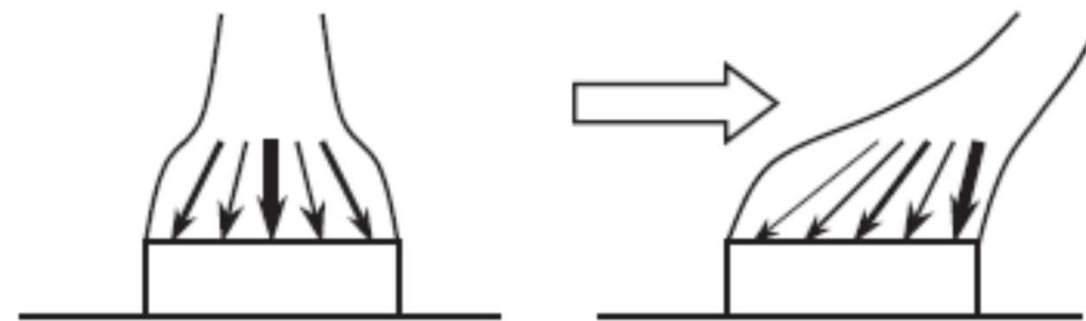
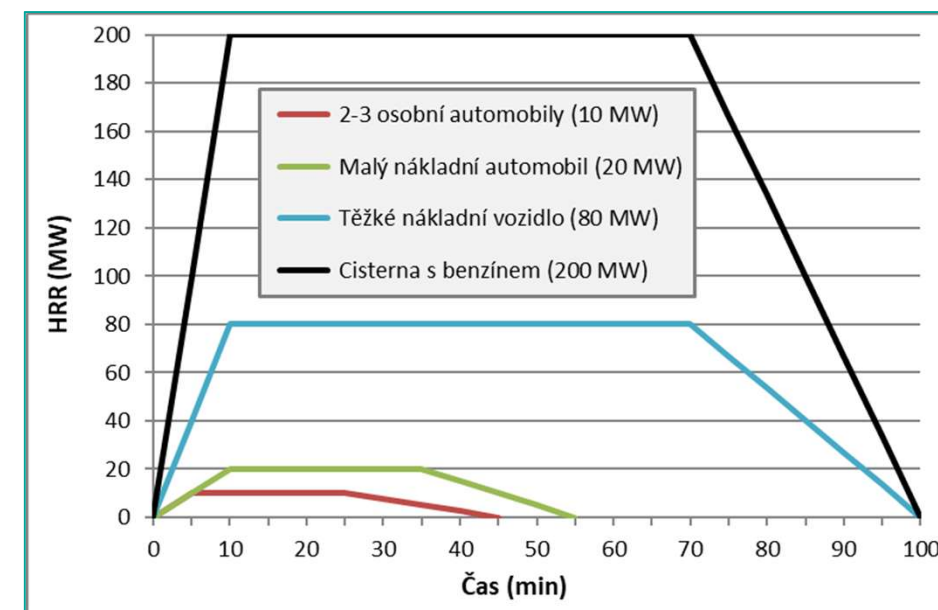


Schéma vlivu větrání tunelu na přenos  
tepla na hořící objekt

| Typ vozidla               | Maximální výkon (MW) | Přibližná uvolněná energie (GJ) |
|---------------------------|----------------------|---------------------------------|
| Osobní automobil          | 5 – 10               | 3 – 7                           |
| Osobní automobily (2 - 3) | 10 – 20              | 15                              |
| Autobus/dodávka           | 20 – 30              | 40                              |
| Nákladní automobil        | 30 – 100             | 65 – 240                        |
| Cisterna s benzínem       | 200 – 300            | 1000 - 1500                     |



Pozn. tepelný výkon  $Q = \text{HRR}$  (MW)

## Vlivy na rozvoj HRR

- **rychlost větrání** (viz tabulka, možnost rozvoje požáru)
- **geometrie tunelu** (rozměry, sklon)
- **konstrukční a nekonstrukční prvky** (zatížení ostění, riziko odprýskávání)

## Tepelný výkon v programu FDS (empirický pyrolyzní model)

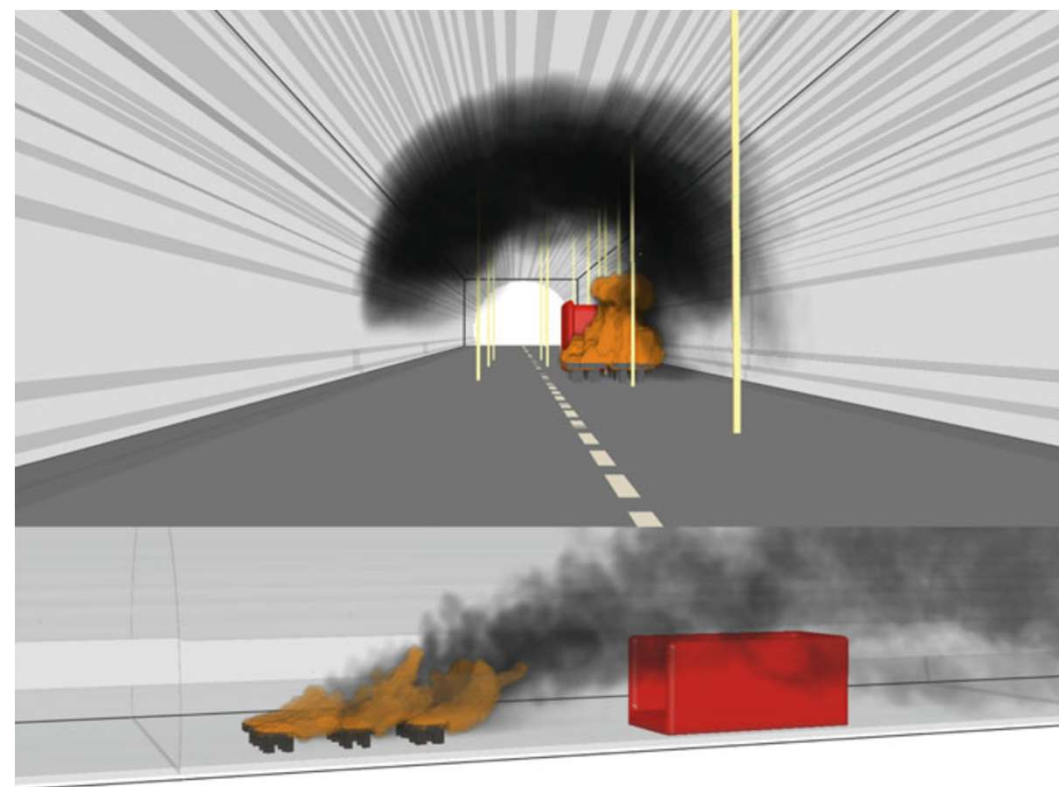
**HRRPUA – rychlost uvolňování tepla  
na jednotku plochy (kW/m<sup>2</sup>)**

zadáva se tepelný výkon na plochu „hořáku“

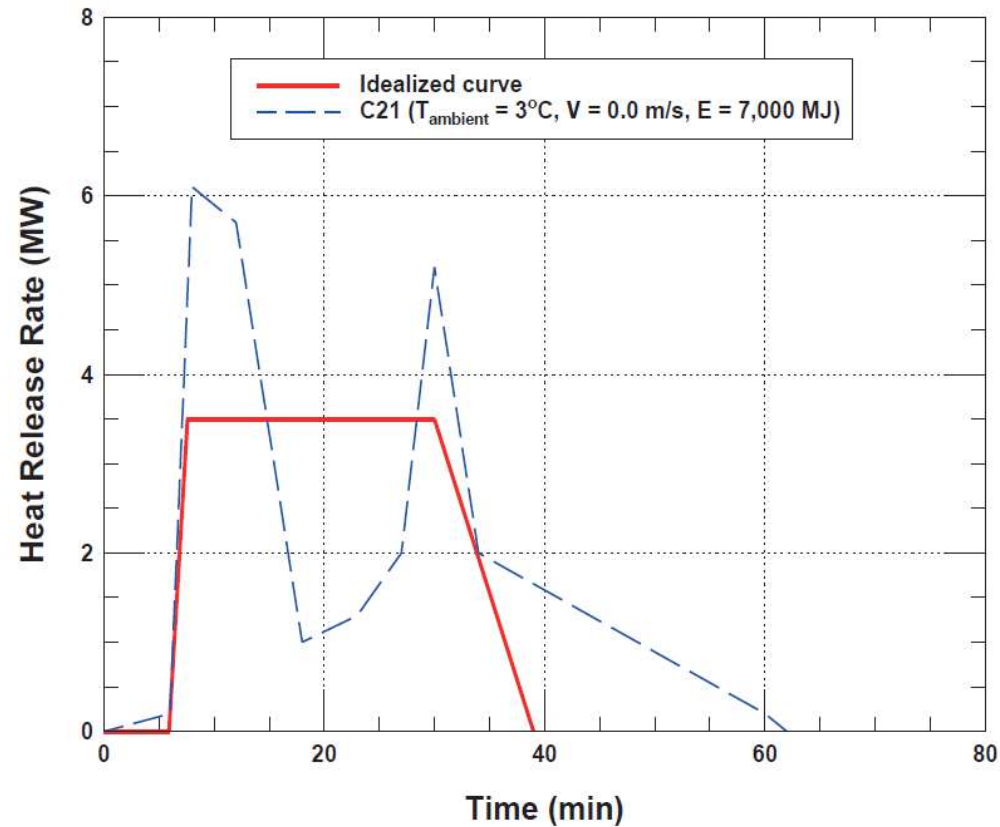


## Faktory ovlivňující rozvoj požáru (HRR)

| Rychlost větrání<br>(m/s) | Rychlost nárůstu<br>tepelného výkonu |
|---------------------------|--------------------------------------|
| menší než 1 m/s           | 5 MW/min                             |
| přibližně 3 m/s           | 15 MW/min                            |
| přibližně 6 m/s           | 10 MW/min                            |

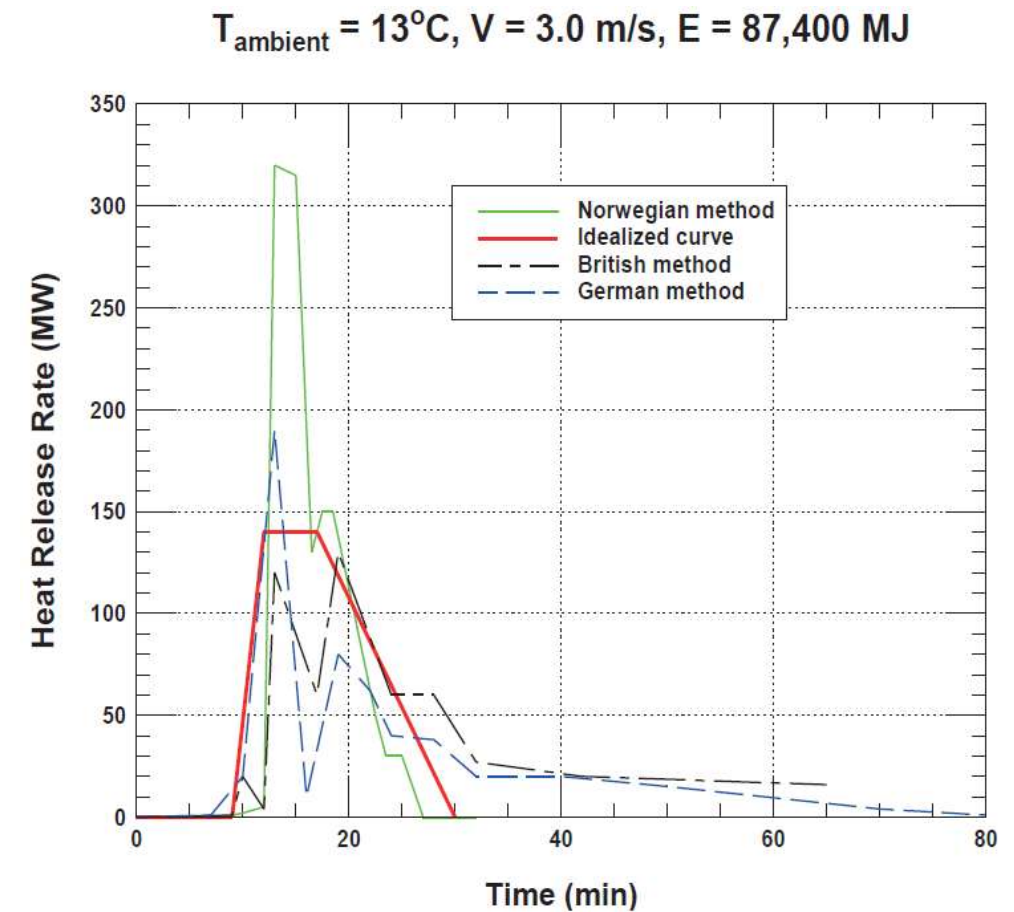


# Průběh tepelného výkonu požáru v čase

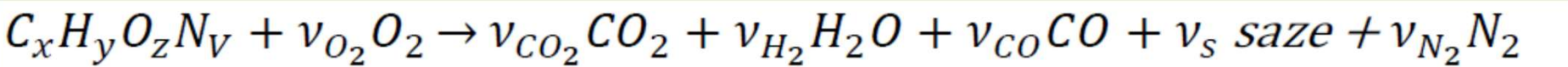


Tepelný výkon požáru  
osobního automobilu

Tepelný výkon požáru  
nákladního automobilu



## Obecná spalná reakce



hořlavá látka

stechiometrické koeficienty produktů hoření

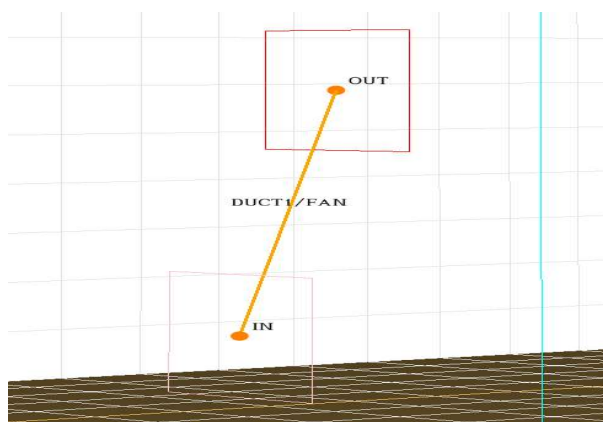
- definice paliva pomocí **efektivní výhřevnosti**  
(např. propan  $C_3H_8 + 5O_2 \rightarrow 3CO_2 + 4H_2O$ )
- definice paliva pomocí poměrného počtu atomů **C, H, O a N**
- doplnění parametrů zplodin hoření:
  - SOOT\_YIELD** (kg/kg)  
podíl hmotnosti sazí na hmotnosti paliva
  - CO\_YIELD** (kg/kg)  
podíl hmotnosti CO na hmotnosti paliva
- složitější stechiometrické vztahy

| Fuels                      | $\gamma_{CO_2}$<br>(g/g) | $\gamma_{CO}$<br>(g/g) | $\gamma_s$<br>(g/g) |
|----------------------------|--------------------------|------------------------|---------------------|
| Propane                    | 2.85                     | 0.005                  | 0.024               |
| Acetylene                  | 2.6                      | 0.042                  | 0.096               |
| Ethanol (ethyl alcohol)    | 1.77                     | 0.001                  | 0.008               |
| Heptane                    | 2.85                     | 0.01                   | 0.037               |
| Polystyrene                | 2.3                      | 0.06                   | 0.16                |
| Nylon                      | 2.06                     | 0.038                  | 0.075               |
| Polyurethane (flexible) PU | 1.5                      | 0.031                  | 0.23                |
| Polymethyl methacrylate    | 2.1                      | 0.01                   | 0.022               |
| Wood                       | 1.33                     | 0.005                  | 0.015               |
| Polyvinyl chloride (PVC)   | 0.46                     | 0.063                  | 0.14                |

Zdroj: Tewarson (SFPE Handbook)

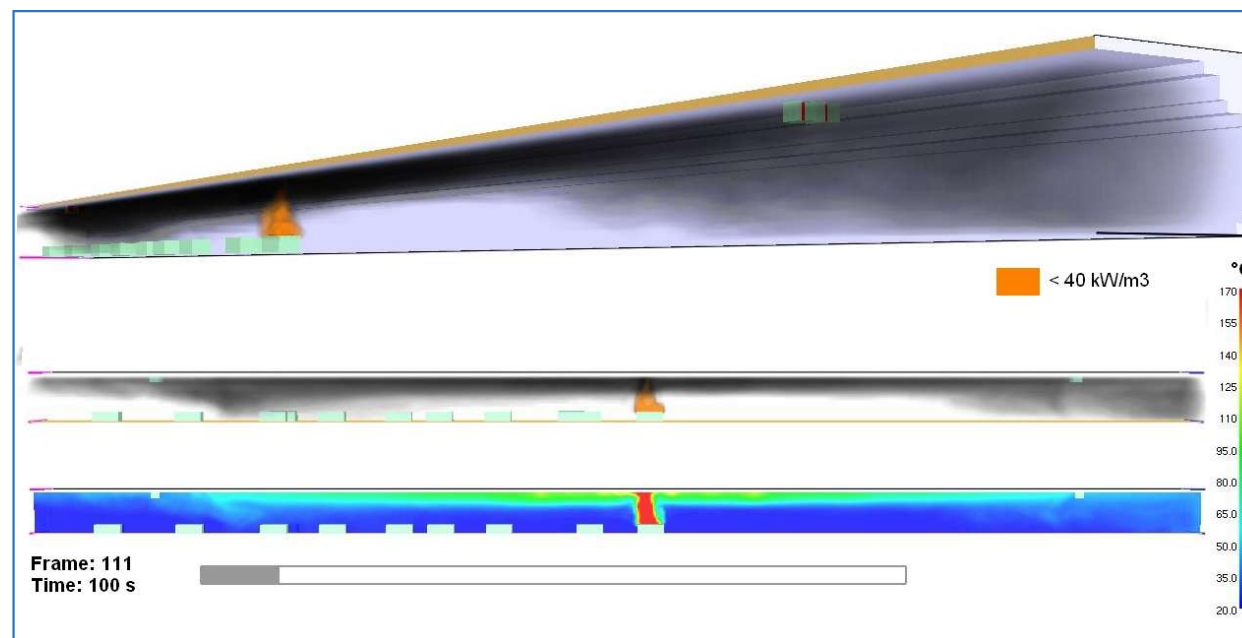
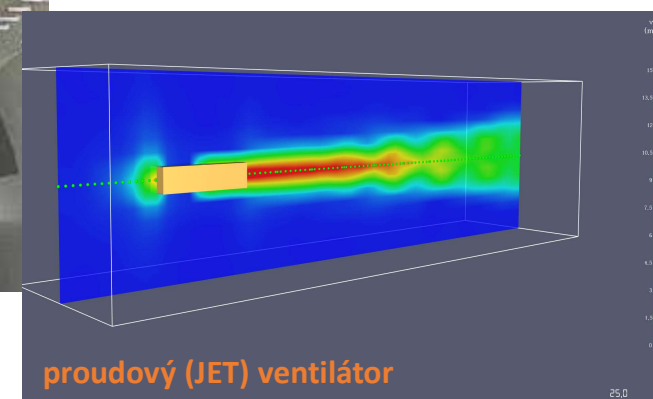
## Proudové ventilátory (program FDS)

- původně modelování větrání pomocí jednoduchých přírodních a odvodních otvorů (**VENT**)
- Ve verzi FDS 6 (2013) byl zaveden **HVAC řešič** – síťový model (potrubí a uzly), který umožňuje modelovat nejen jednoduché systémy VZT, ale i složité soustavy



Zjednodušený model  
systému VZT

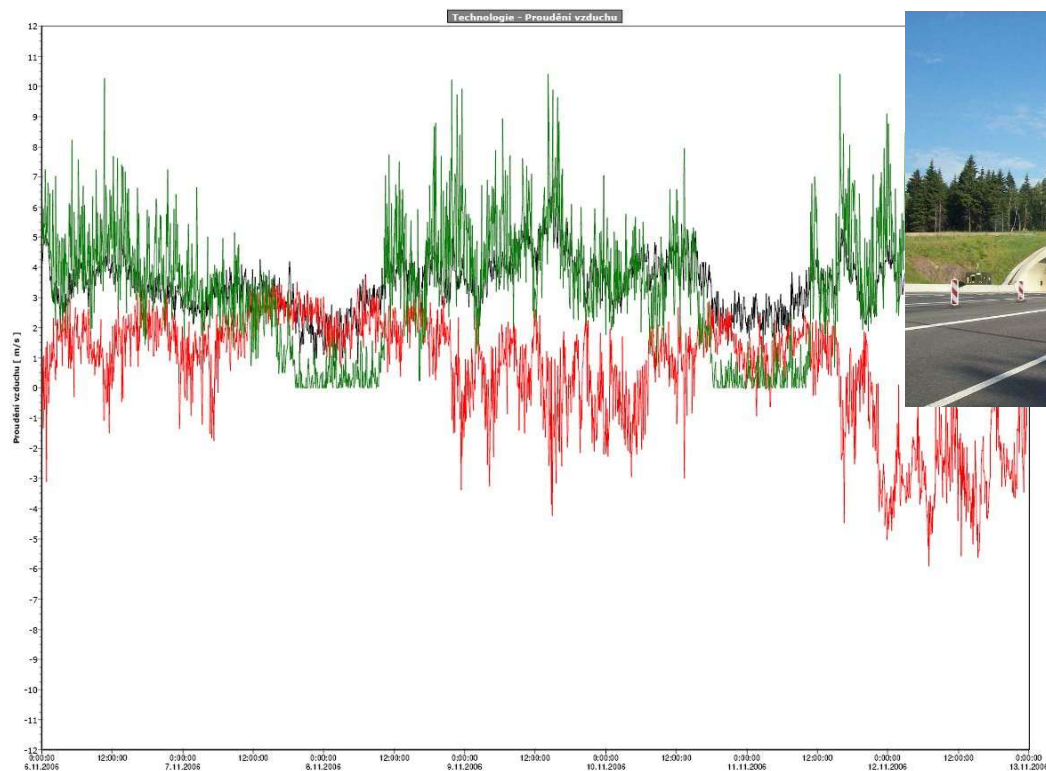
- simulace proudových (jet) ventilátorů



Simulace účinnosti proudových ventilátorů

## Meteorologické podmínky (portály)

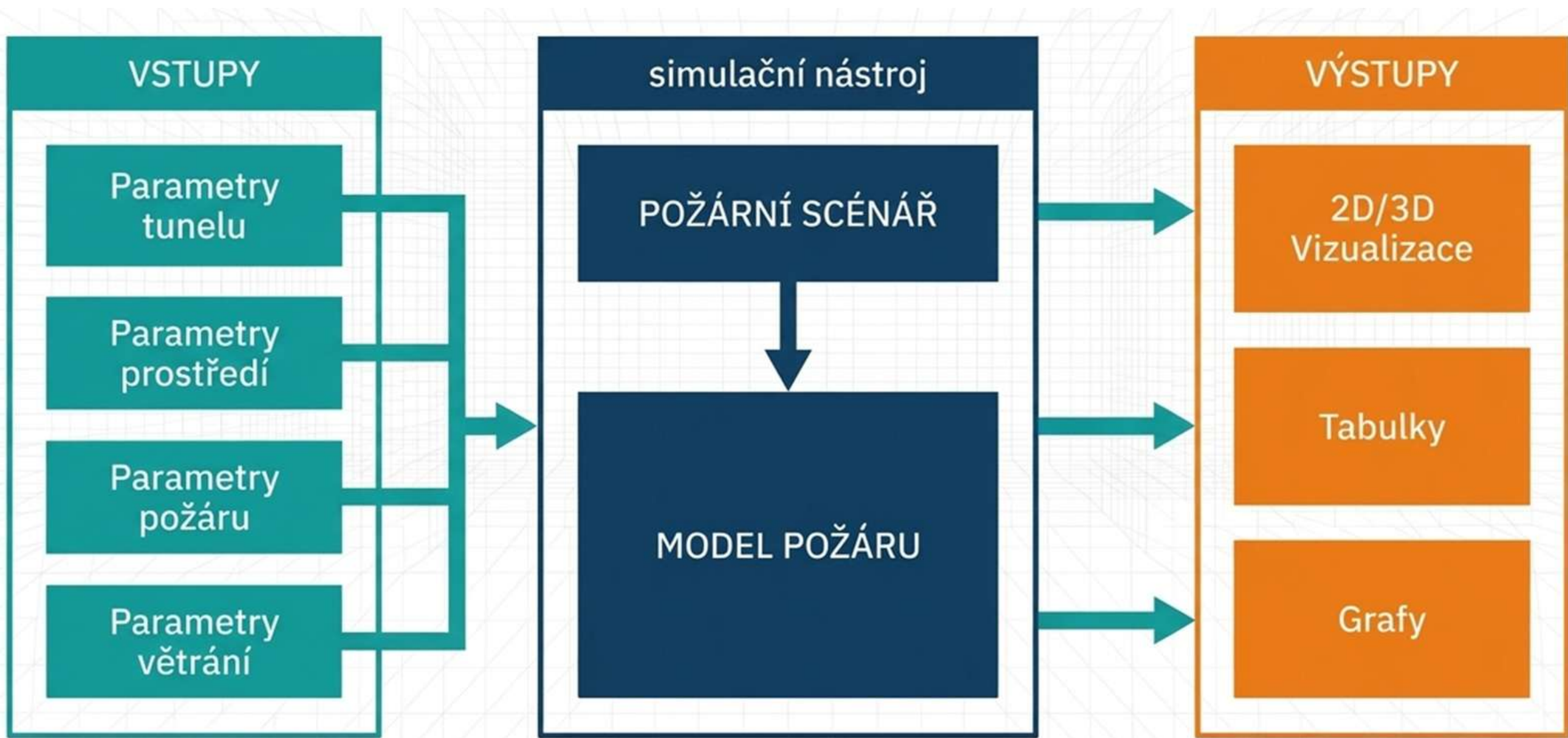
- **meteorologická situace na portálech tunelu**
  - pro řízení větrání tunelu při mimořádných událostech
  - pro modelování požáru
- **sledování směru a rychlosti větru a teploty na portálech tunelu**
  - součást řídicího systému tunelu



Kombinovaná meteorologická stanice a stanice dopravního značení (zdroj: ELTODO)

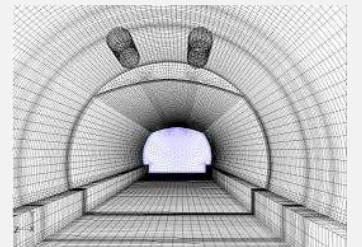
- IP kamera s IR reflektorem
- vozovkový senzor
- senzor teploty a vlhkosti vzduchu
- senzor rychlosti a směru větru
- srážkový senzor a senzor viditelnosti

## Proces simulace požáru v tunelu



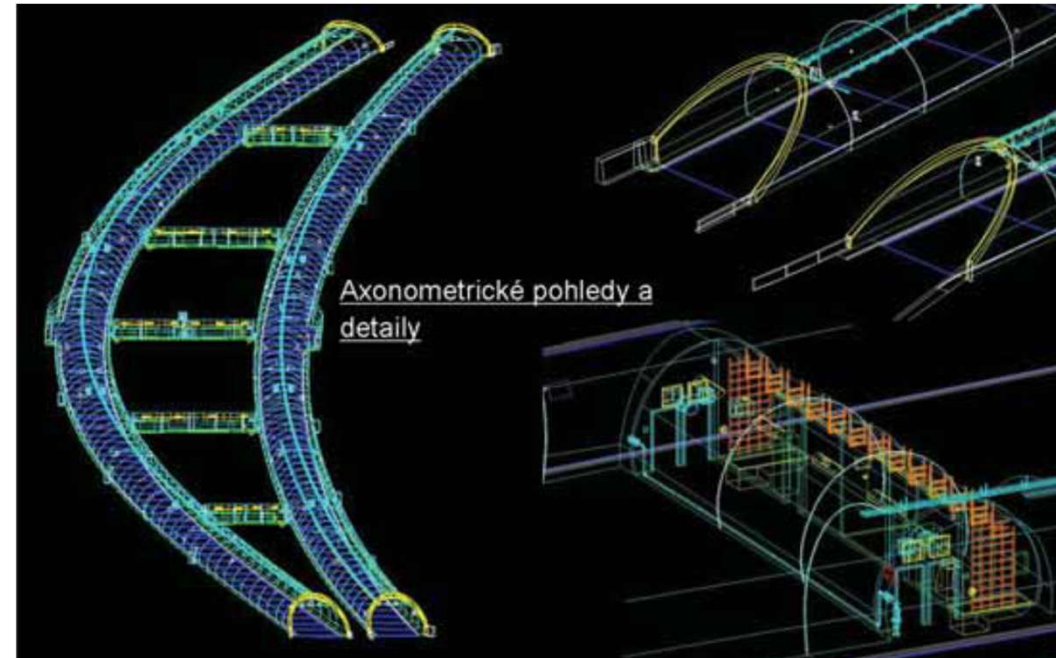
### III.

## Případové studie simulací požáru v tunelových stavbách



## Modelování požáru

Simulace podélného větrání  
při požáru v silničním tunelu



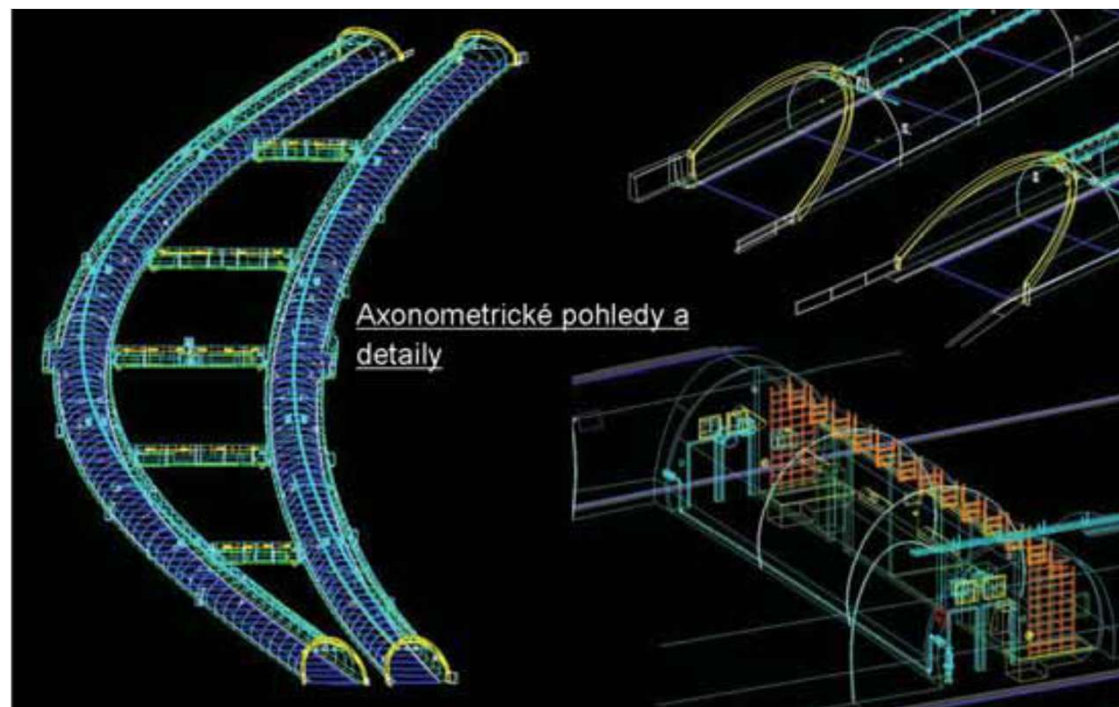
## Dálniční tunel Klimkovice – základní informace

### Stavební provedení:

- jednosměrný tunel se dvěma tunelovými troubami (5 propojkami)
- délka tunelu cca 1 000 m
- šířka vozovky 9,5 m, šířka oboustranných chodníků do 1,2 m
- průjezdná výška 4,8 m
- podélný sklon 0,6 %

### Technologie větrání:

- instalováno podélné větrání (8 párů proudových ventilátorů)
- funkčnost při teplotách 400 °C po dobu 90 min (uvedení do provozu do 5 s)



Axonometrické pohledy a detaily tunelu Klimkovice (zdroj: V. Středa)



Zjednodušená geometrie tunelu ve FDS

## Dálniční tunel Klimkovice – parametry požárních scénářů

|                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|--------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>místo požáru:</b>     | ve vzdálenosti 256 m od vyššího portálu ve směru jízdy (cca v jedné třetině délky tunelu)                                                                                                                                                                                                                               |
| <b>výkon požáru:</b>     | 5 MW (osobní automobil)<br>30 MW (lehký nákladní automobil)                                                                                                                                                                                                                                                             |
| <b>způsob větrání:</b>   | podélné větrání (hlavní tah je veden proti spádu tunelu)                                                                                                                                                                                                                                                                |
| <b>rychlost větrání:</b> | $0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , $1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , $2,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , $3,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ |
| <b>požární model:</b>    | FDS (Fire Dynamics Simulator)                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| <b>podmínky v FDS:</b>   | počáteční – teplota $15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a relativní vlhkost 70 %<br>okrajové – tepelně technické vlastnosti betonového ostění<br>výpočtová síť s velikostí buněk $0,5 \times 0,5 \times 0,5 \text{ m}$                                                                                                        |



Situování požáru v tunelu ve FDS

# Dálniční tunel Klimkovice – cíle a hodnotící kritéria

## CÍL STUDIE

Srovnání vlivu rychlosti proudění vzduchu na stratifikaci kouře pro různé varianty požáru (5 a 30 MW).

### VIDITELNOST (m) – hodnotící kritérium

- měřicí body viditelnosti po 50 m v ose tunelu ve výšce 2,5 m nad vozovkou (bezpečnost osob před ohrožení kouřem)
- za limitní hodnotu porušení stratifikace kouře byl stanoven pokles viditelnosti na 15 m (osoby neznalé prostředí, možný vznik paniky)

### BEZPEČNOST OSOB

- za bezpečnou vzdálenost pohybu osob na nechráněné únikové cestě lze považovat přibližně 75 m

## Vizualizace průběhu požáru

pohyb kouře v 600. sekundě



HRR = 5 MW,  $v = 0 \text{ m.s}^{-1}$

600,0



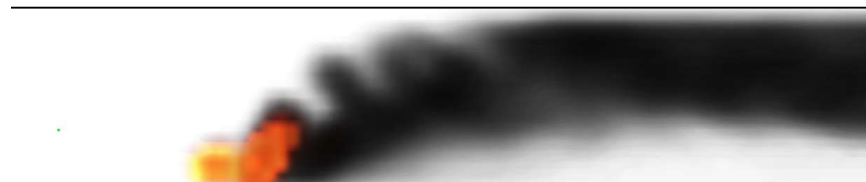
HRR = 5 MW,  $v = 0,5 \text{ m.s}^{-1}$

600,0



HRR = 5 MW,  $v = 1,0 \text{ m.s}^{-1}$

600,0



HRR = 5 MW,  $v = 3,5 \text{ m.s}^{-1}$

600,0



HRR = 30 MW,  $v = 0 \text{ m.s}^{-1}$

600,0



HRR = 30 MW,  $v = 0,5 \text{ m.s}^{-1}$

600,0



HRR = 30 MW,  $v = 1,0 \text{ m.s}^{-1}$

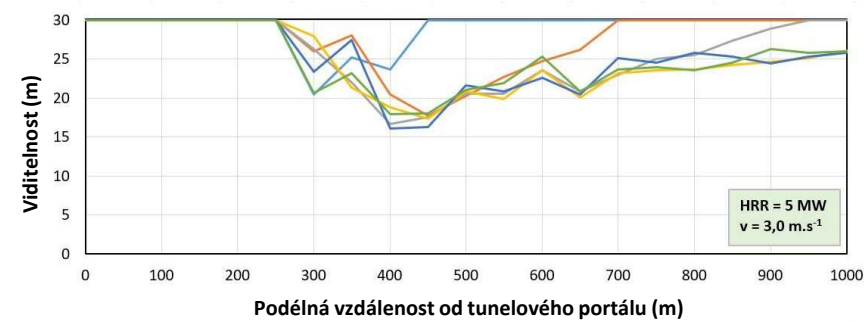
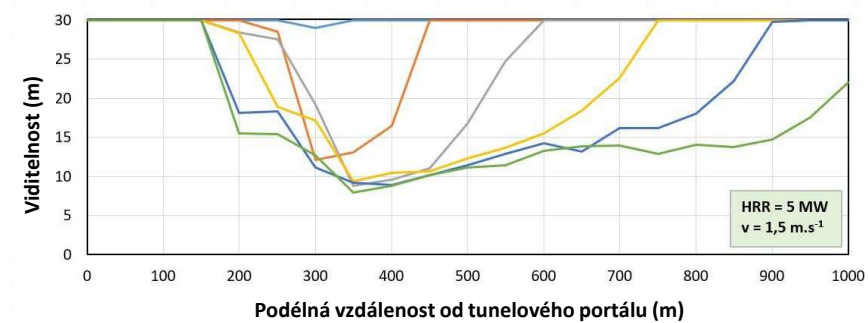
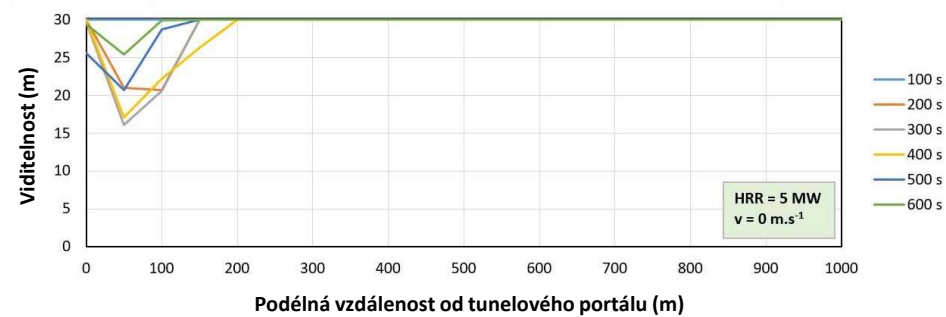
600,0



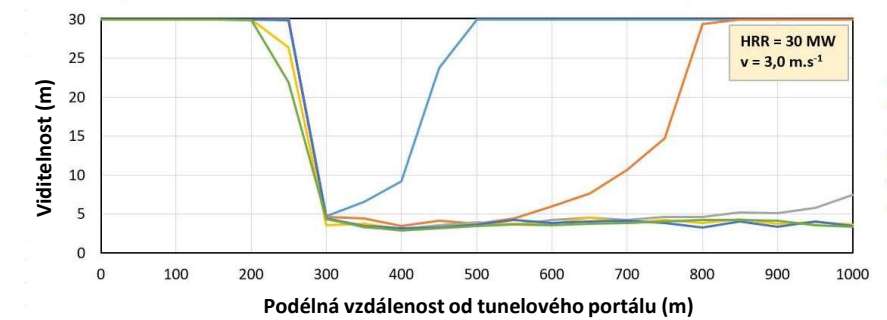
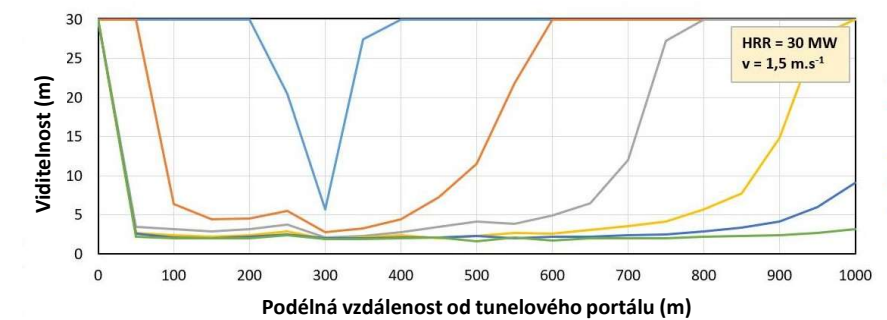
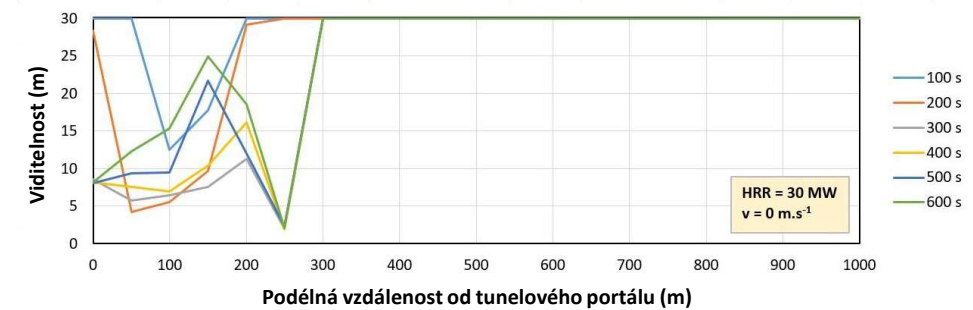
HRR = 30 MW,  $v = 3,5 \text{ m.s}^{-1}$

600,0

## Průběhy proudění v grafech



## Dálniční tunel Klimkovice – grafy



# Dálniční tunel Klimkovice – výsledky

| Rychlost proudění<br>(m.s <sup>-1</sup> ) | Vzdálenost v tunelu s kritickou viditelností (m) |     |                              |     |
|-------------------------------------------|--------------------------------------------------|-----|------------------------------|-----|
|                                           | HRR = 5 MW                                       |     | HRR = 30 MW                  |     |
|                                           | Doba rozvoje požáru<br>t (s)                     |     | Doba rozvoje požáru t<br>(s) |     |
|                                           | 300                                              | 600 | 300                          | 600 |
| 0,0                                       | 0                                                | 0   | 250                          | 435 |
| 0,5                                       | 195                                              | 460 | 435                          | 615 |
| 1,0                                       | 300                                              | 610 | 585                          | 980 |
| 1,5                                       | 220                                              | 650 | 700                          | 975 |
| 2,0                                       | 305                                              | 275 | 745                          | 925 |
| 2,5                                       | 5                                                | 60  | 790                          | 870 |
| 3,0                                       | 0                                                | 0   | 725                          | 735 |
| 3,5                                       | 0                                                | 0   | 720                          | 720 |
| 5,0                                       | 0                                                | 0   | 720                          | 720 |

## Diskuse

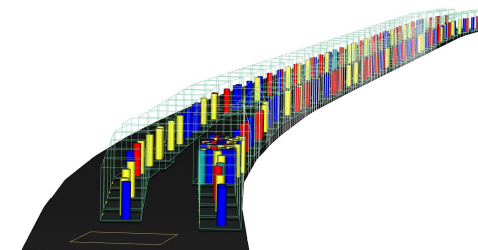
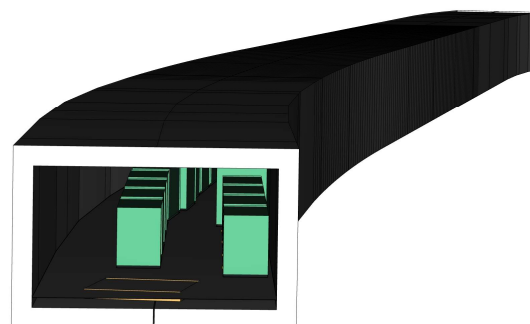
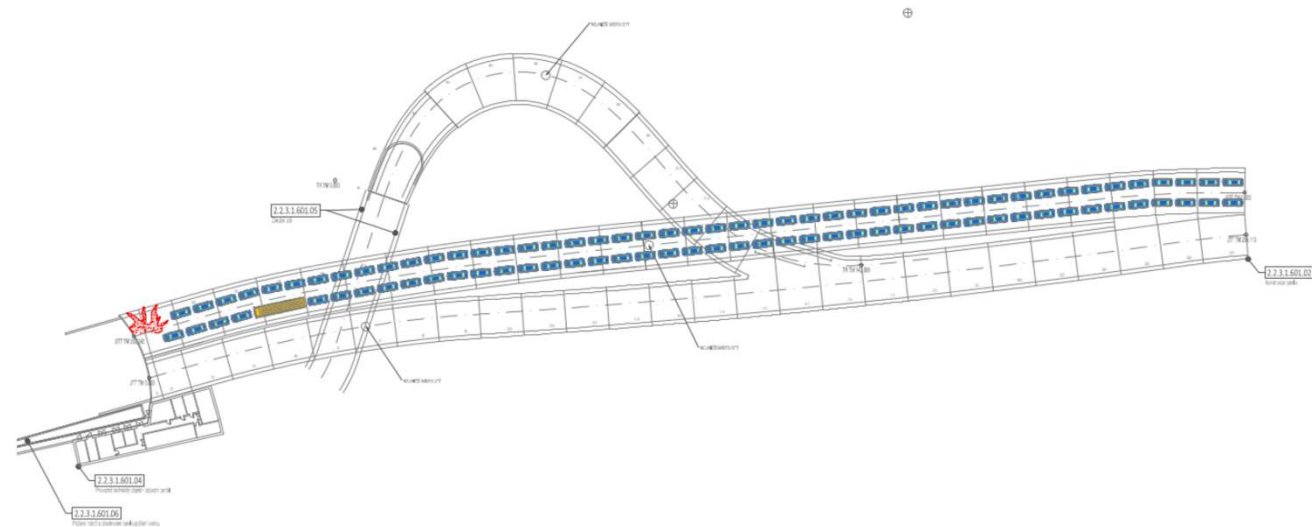
- **tepelný výkon (5 MW)** – překročení úrovně kritické viditelnosti na vzdálenost delší než 75 m od místa požáru dochází při rychlostech proudění 0,5 až 2 m.s<sup>-1</sup>
- **tepelný výkon (30 MW)** – dochází k překročení kritické úrovně viditelnosti při všech rychlostech proudění

## Závěr

**Vliv nízkých rychlostí proudění na stratifikaci kouře nelze jednoznačně určit.**

# Modelování požáru a evakuace

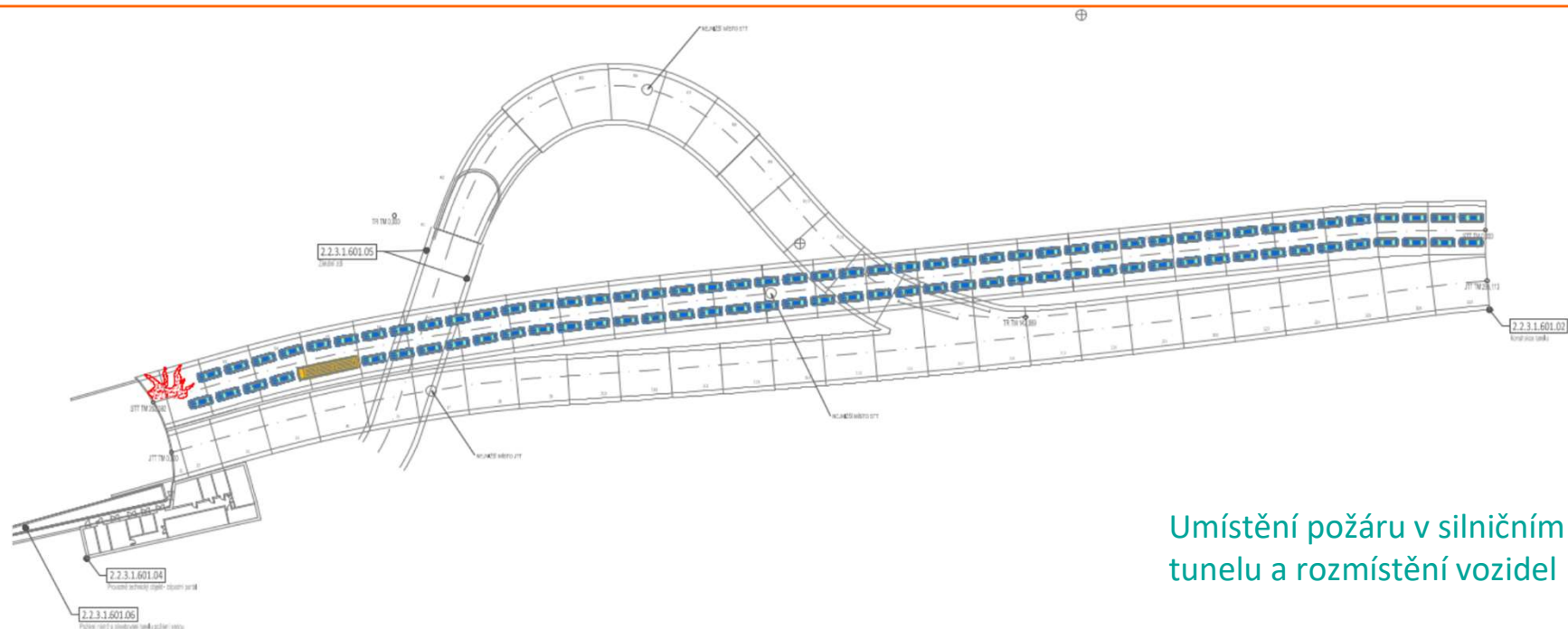
## Silniční tunel



## Příčný řez tunelem

## Silniční tunel – parametry požárního scénáře

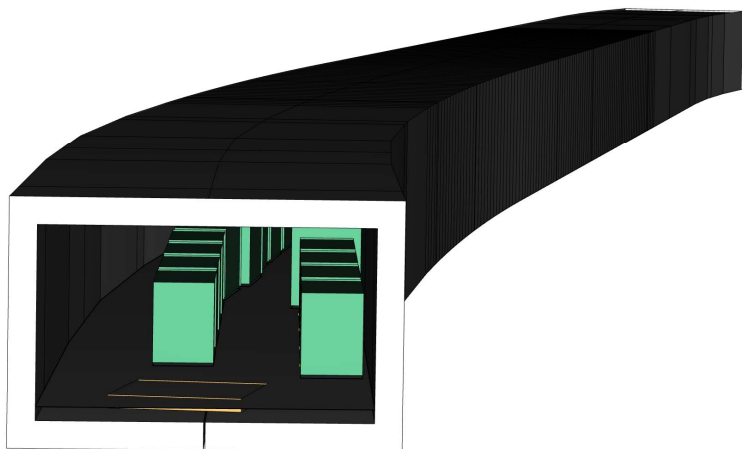
|                              |                                                                                                                                                         |
|------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Místo požáru:</b>         | na začátku západního portálu severní tunelové trouby                                                                                                    |
| <b>Tepelný výkon požáru:</b> | 30 MW – malý nákladní automobil (dle metodiky Ministerstva dopravy ČR)                                                                                  |
| <b>Způsob větrání:</b>       | přirozené větrání                                                                                                                                       |
| <b>Požární model:</b>        | FDS (Fire Dynamics Simulator)                                                                                                                           |
| <b>Podmínky v FDS:</b>       | počáteční – teplota 15 °C, relativní vlhkost 70 %<br>okrajové – tepelně technické vlastnosti betonového ostění<br>výpočtová síť – 0,2 m × 0,2 m × 0,2 m |



Umístění požáru v silničním tunelu a rozmístění vozidel

## Silniční tunel – parametry evakuačního scénáře

|                                |                                                                           |
|--------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| <b>Evakuační scénář:</b>       | evakuace 90 osobních automobilů a 1 autobusu v úseku tunelu o délce 262 m |
| <b>Počet osob:</b>             | celkem 185 osob (50 v autobusu + 135 v automobilech)                      |
| <b>Věková struktura:</b>       | dle demografické struktury České republiky                                |
| <b>Rychlost chůze:</b>         | 0,58 – 1,54 m/s v závislosti na věku                                      |
| <b>Doba zpoždění evakuace:</b> | 0,5 až 2 minuty                                                           |



Model tunelu s plným ostěním

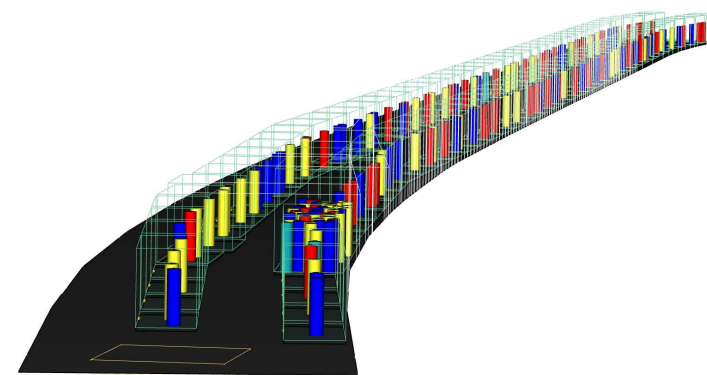
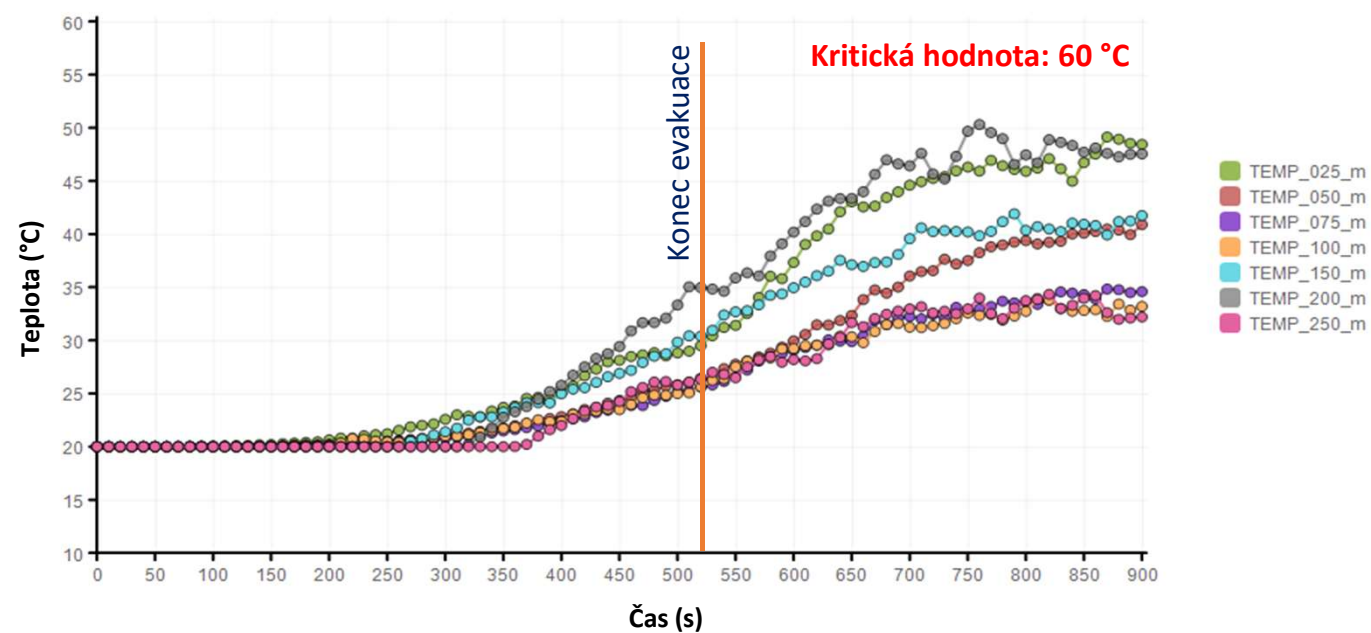
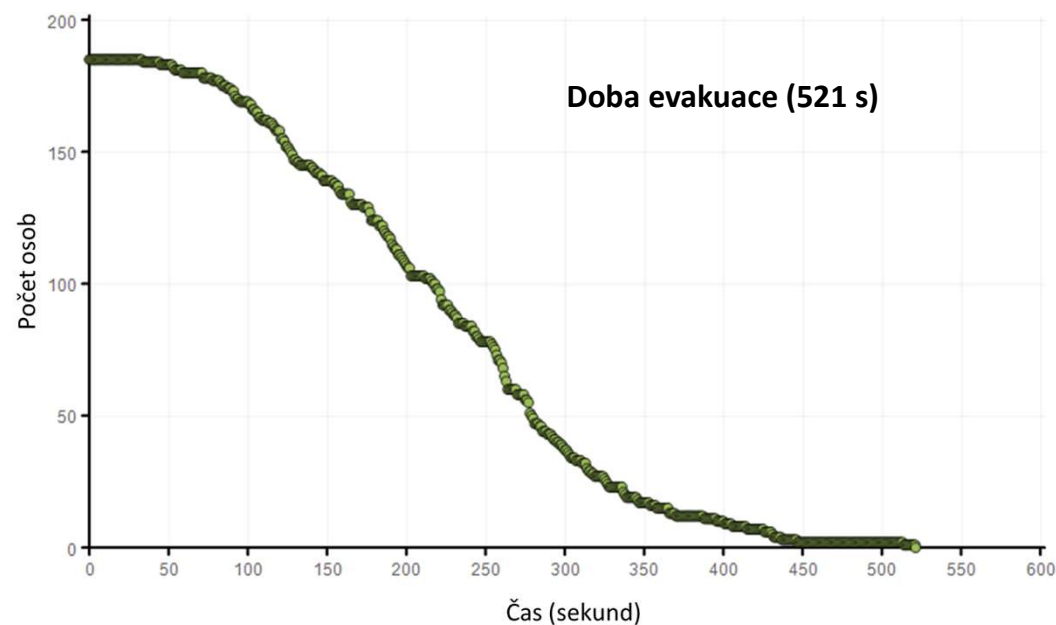
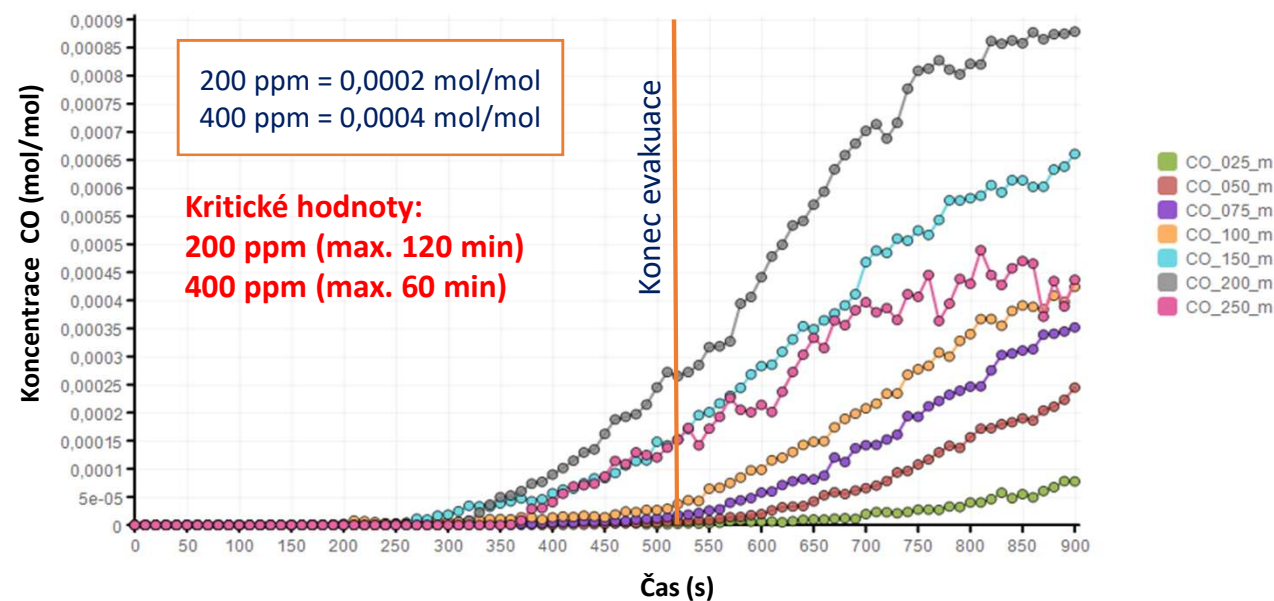


Schéma tunelu v transparentním režimu (wireframe)

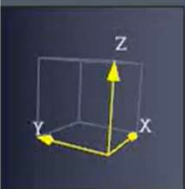
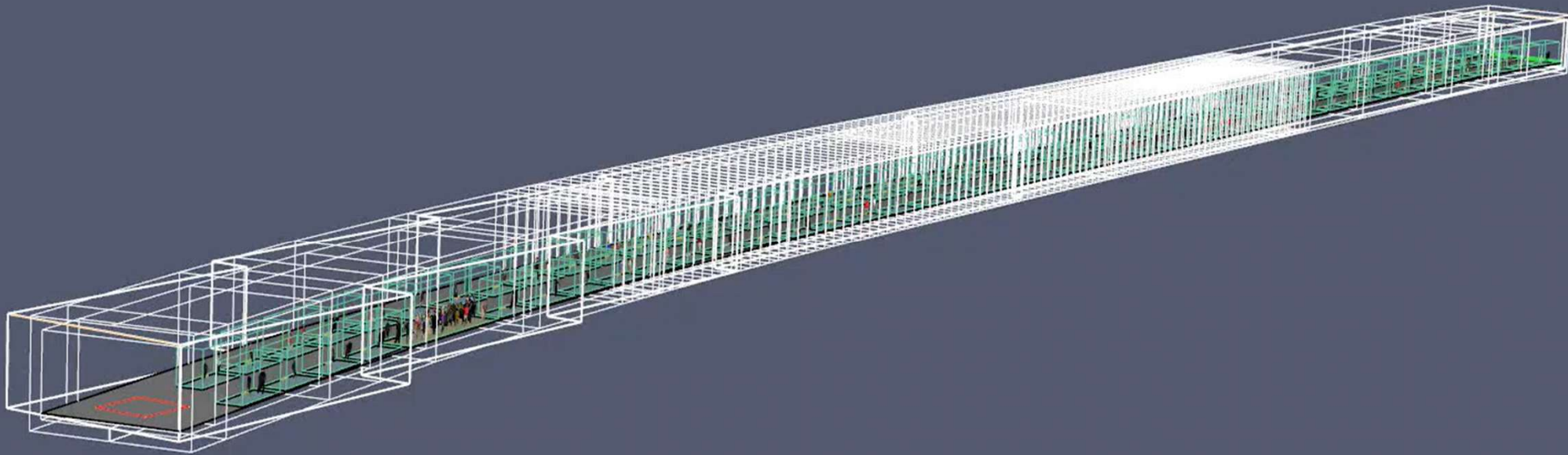


## Závěr

Bezpečná evakuace byla zajištěna  
v celém tunelu.  
Instalace proudových ventilátorů  
není v tomto případě nutná.

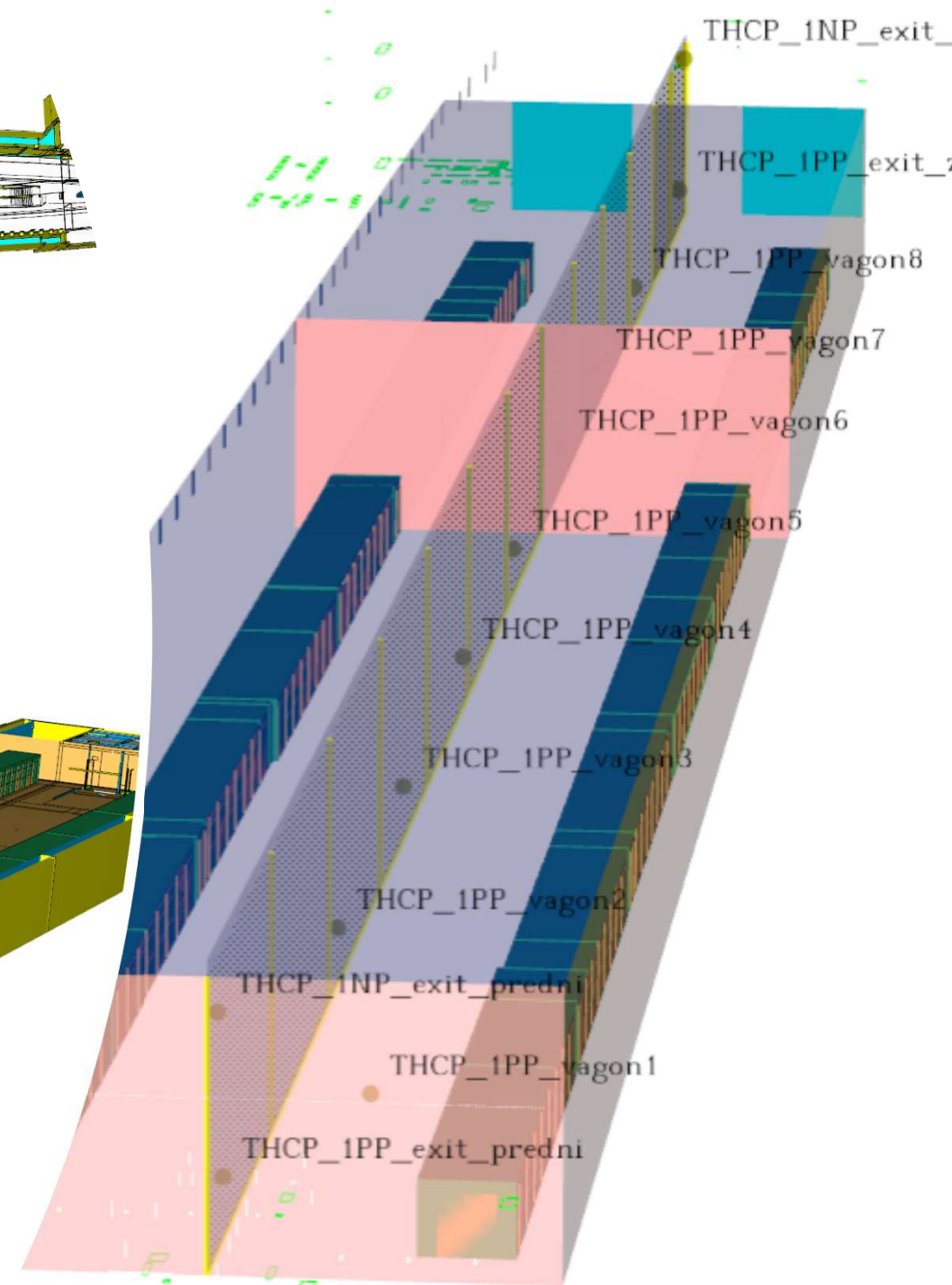
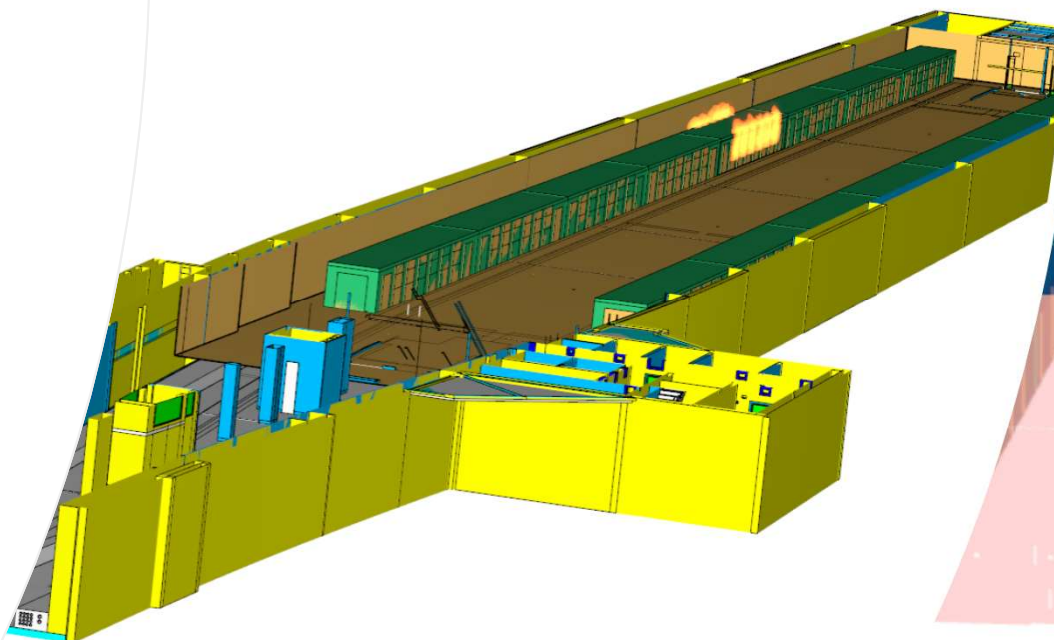
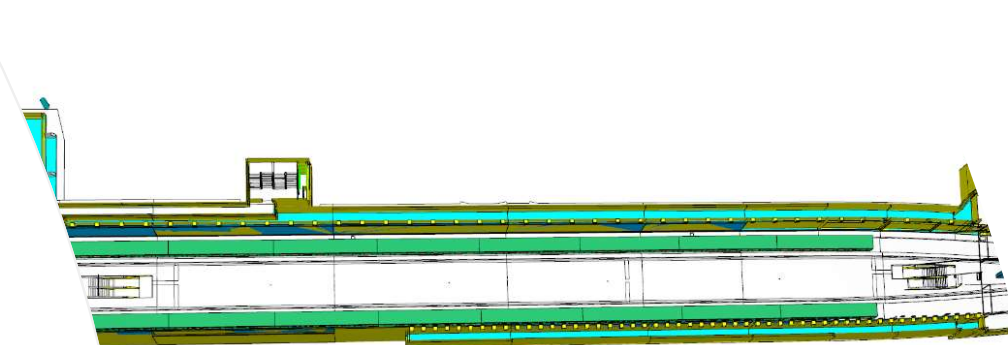


Exited: 0/185



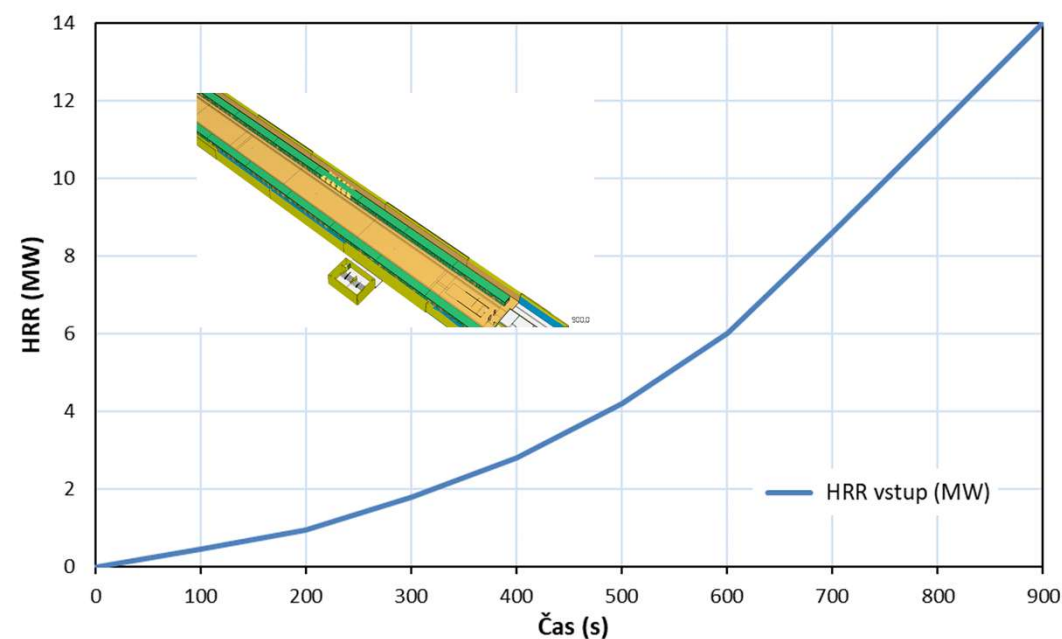
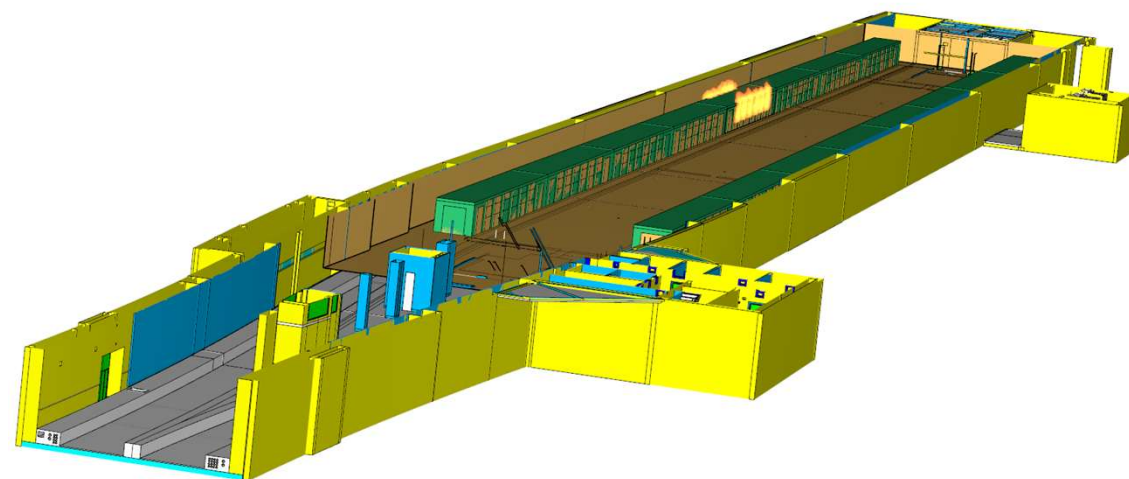
# Modelování požáru a evakuace

## Terminál vlakové stanice



# Terminál vlakové stanice – vstupy modelování požáru

|                         |                                                                             |
|-------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| <b>Definice požáru:</b> | tepelný výkon požáru na základě reálných zkoušek osobních železničních vozů |
| <b>Souprava vlaku:</b>  | 8 vozů (požár ve 4. voze)<br>postupné porušování oken                       |
| <b>Výpočtová síť:</b>   | přibližně 5 milionů buněk                                                   |
| <b>Termočlánky:</b>     | podél nástupiště a uvnitř vozů                                              |
| <b>Senzory:</b>         | viditelnost, koncentrace CO aj.                                             |
| <b>ZOKT:</b>            | nucený odvod kouře a tepla<br>nástupiště                                    |

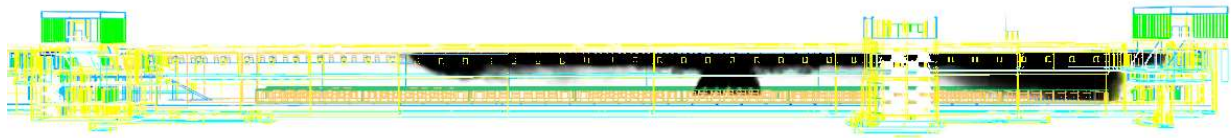


# Terminál vlakové stanice – výstupy simulace požáru

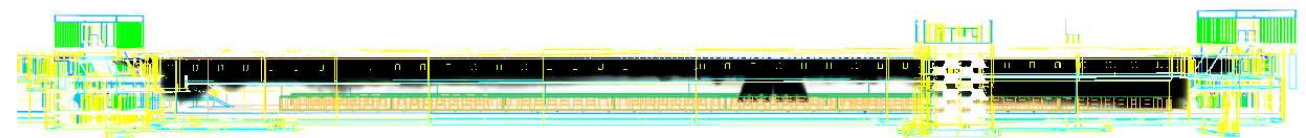
## Vizualizace šíření kouře

se ZOKT

bez ZOKT



05:00,0

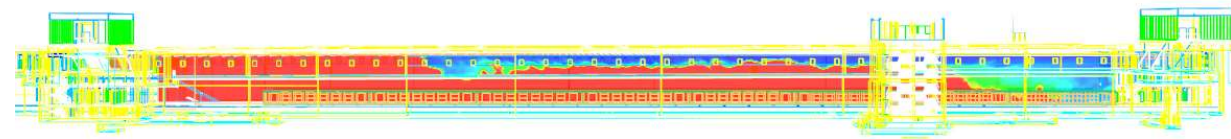


05:00,0

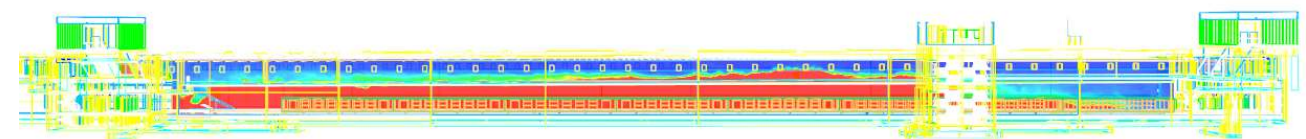
## Viditelnost ve stanici (m)

se ZOKT

bez ZOKT



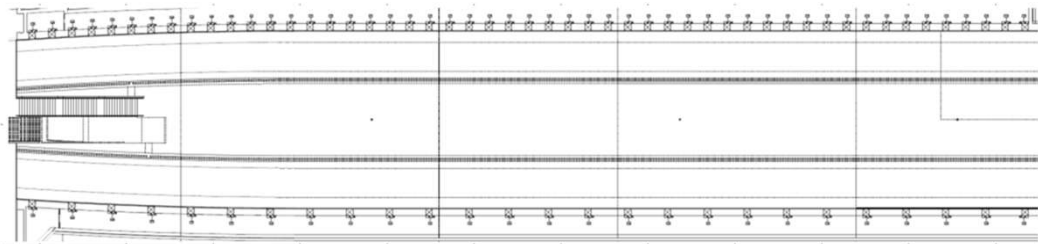
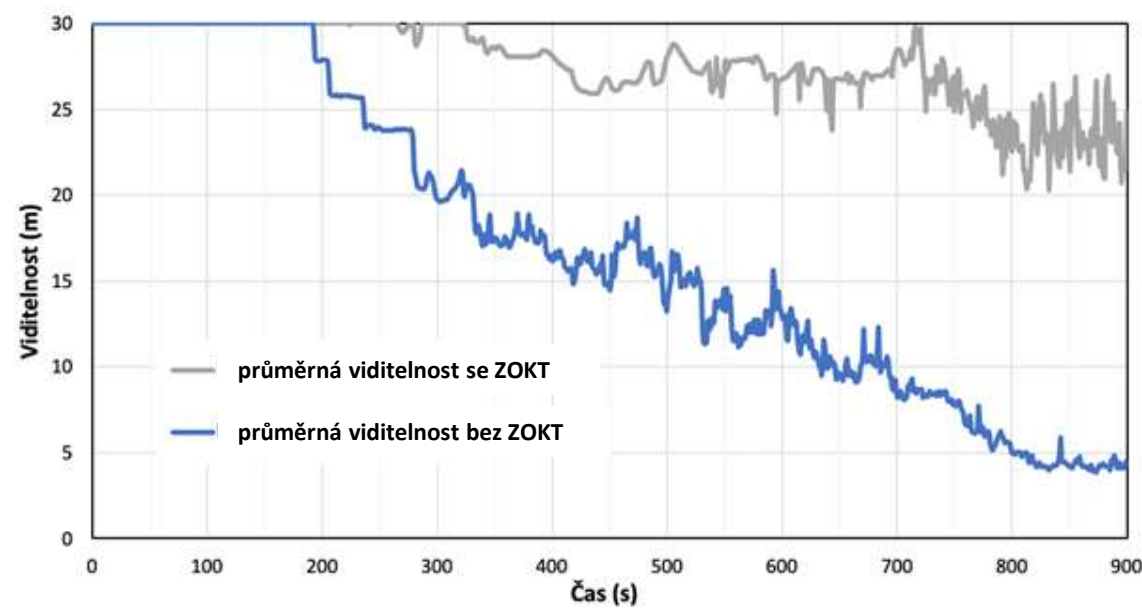
05:00,0



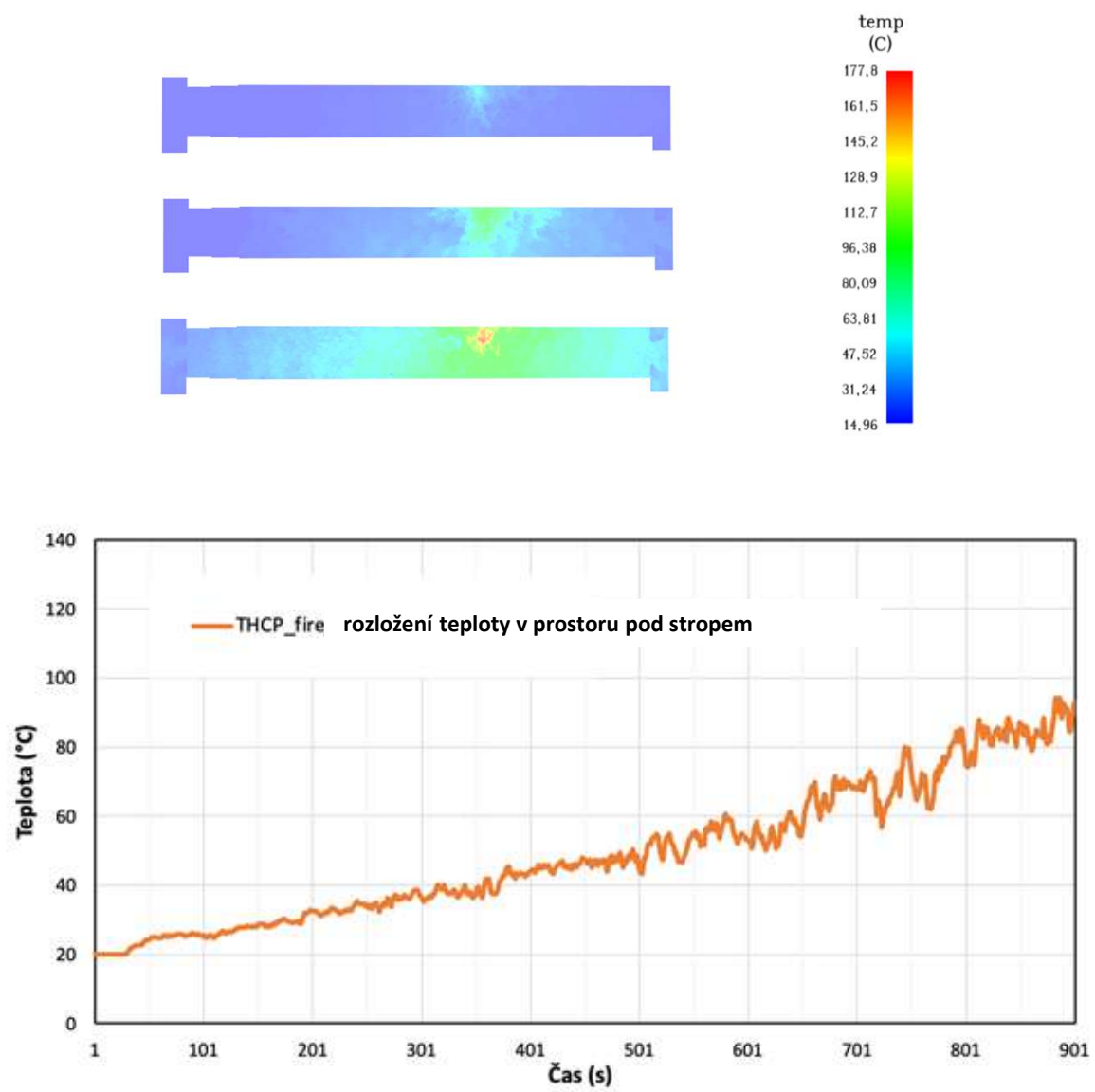
05:00,0

# Terminál vlakové stanice – výstupy simulace požáru

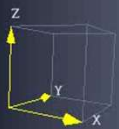
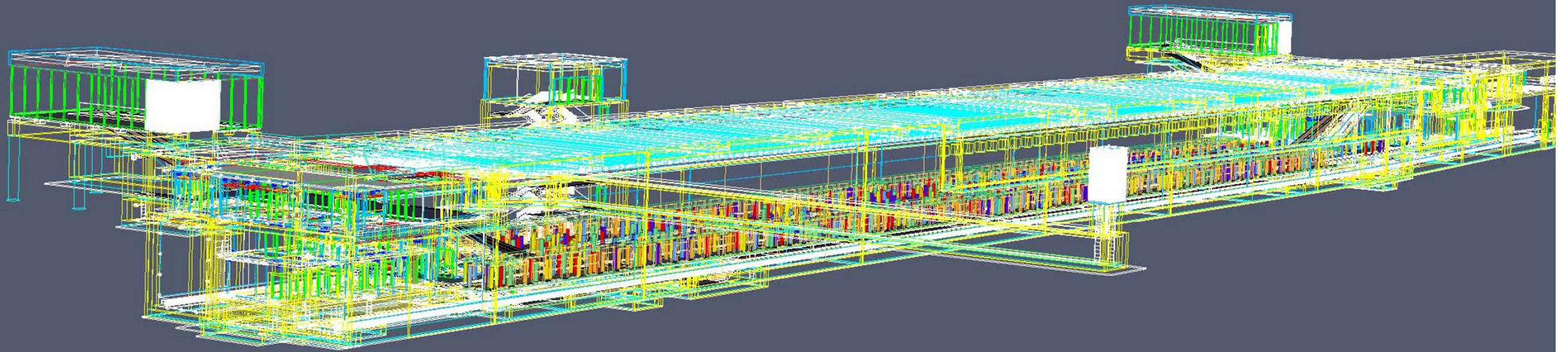
## Vliv instalace ZOKT



## Hodnocení teplot pod stropem stanice



Exited: 0/1000



## IV. Závěr



## Návrhové scénáře

Tvorba vysoce přesných návrhových scénářů na míru konkrétní geometrii tunelové stavby.



## Optimalizace technologií

Exaktní upřesnění požadavků na požární větrání a identifikace nedostatků v celkovém návrhu (zamezení předimenzování).



## Garance bezpečnosti

Fyzikálně podložené ověření bezpečnosti únikových cest a reálné proveditelnosti evakuace.

# Děkuji Vám za pozornost

**doc. Ing. Petr Kučera. Ph.D.**

vedoucí katedry  
Katedra požární ochrany

VŠB-Technická univerzita Ostrava  
Fakulta bezpečnostního inženýrství  
Lumírova 13, 700 30 Ostrava-Výškovice

mobil: +420 777 937 345  
e-mail: [petr.kucera@vsb.cz](mailto:petr.kucera@vsb.cz)

