

Verfasser  
Author  
Auteur

P. Reinke, S. Nyfeler

Datum / Version  
Date / Version  
Date / Version

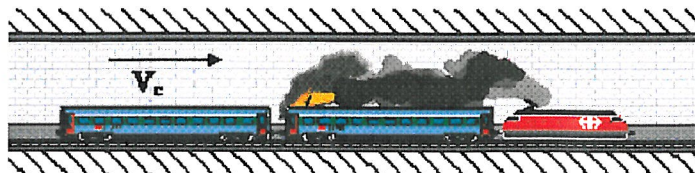
2008-12-08 / Version 0.1

HBI-Projektnummer  
HBI Project Number  
HBI Numéro de Projet

20.07605.00.00.01

HBI-Berichtsnummer  
HBI Report Number  
HBI Numéro de Rapport

---



HBI HAERTER AG BERATENDE INGENIEURE • HBI HAERTER LTD CONSULTING ENGINEERS • HBI HAERTER SA INGÉNIEURS CONSEILS



Stockerstrasse 12  
CH-8002 Zürich  
Tel. +41 (0)44 289 39 00  
Fax +41 (0)44 289 39 99  
info.zh@hbi.ch






Thunstrasse 32  
CH-3005 Bern  
Tel. +41 (0)31 357 24 24  
Fax +41 (0)31 357 24 25  
info.be@hbi.ch

Heinrich-Maierstrasse 13  
D-89518 Heidenheim  
Tel. +49 (0)7321 98 23 10  
Fax +49 (0)7321 98 23 29  
info.hdh@hbi.ch



www.hbi.ch

**Aktualizace 07/2009**  
**Aktualizace 10/2007**

 <b>METROPROJEKT Praha a.s.</b> I.P.Pavlova 2/1786, 120 00 Praha 2 Generální ředitel: Ing. Jiří Pokorný sekretariát tel.: +420 296 154 105 fax: +420 296 325 153 www.metroprojekt.cz e-mail: metroprojekt@metroprojekt.cz		Souprava č.:	
HIP: Ing. Miroslav Krsek 		Podpis:  Název a účel díla: <b>Praha - Beroun, nové železniční spojení</b>	
Stupeň: Přípravná dokumentace			
Zpracovatelský útvar: <b>510</b> tel.: 296 154 514		Název části díla: <b>Odolnost a zabezpečení stavby</b>	
Vedoucí útvaru: Ing. Jiří Růžička 		Podpis: <b>Bezpečnostní koncepce tunelu Barrandov</b>	
Odpovědný projektant: Ing. Otakar Hasík 		Název přílohy: <b>Výpočet doby úniku při současném šíření kouře</b>	
Vypracoval:		Změna: -	
Skart. znak: V20/2029 Datum: 07/2009		Číslo příl.: 002	
Počet formátů: x A4	Měřítka:	Identifikační číslo dokumentu: 07 4230 001 04 01 07	

**Obsah:***strana:*

1. Úvod .....	5
2. Cíle .....	5
3. Omezení .....	5
4. Metodika .....	6
5. Metody projektování bezpečnosti železničních tunelů .....	6
5.1. Obecné poznámky .....	6
5.2. Metody .....	7
5.3. Důsledky pro projekt tunelu Praha - Beroun .....	8
6. Nástroje .....	9
6.1. Jednorozměrové simulace THERMOTUN .....	9
6.2. Jednorozměrový výpočet dob evakuace .....	9
7. Podklady .....	10
7.1. Geometrie .....	10
7.2. Aerodynamická data .....	10
7.3. Systém ventilace .....	10
7.4. Kritická rychlost .....	12
7.5. Data vlaku .....	12
7.6. Rychlost vlaku .....	13
7.7. Model požáru .....	13
7.8. Parametry charakterizující kvalitu vzduchu během požáru a důsledky jednorozměrové analýzy .....	14
7.9. Scénář pro simulaci ventilace a evakuace .....	14
7.10. Scénář pro simulaci evakuace .....	15
7.11. Doba evakuace .....	16
8. Výsledky .....	17
8.1. Výsledky jednorozměrových výpočtů šíření kouře .....	17
8.2. Výsledky jednorozměrových simulací evakuace .....	20
9. Závěry .....	22
9.1. Závěry týkající se šíření kouře .....	22
9.2. Závěr pro simulace evakuace .....	23
10. Doporučení .....	23
10.1. Doba zahájení ventilace v nezasaženém tubusu .....	23
10.2. Nepříznivé mezní podmínky .....	23
10.3. Koncept ventilace propojek .....	24
10.4. Ventilace během fáze zásahu externích záchranných jednotek .....	24
10.5. Detailní třírozměrná analýza simulace šíření kouře a evakuace .....	24
10.6. Směrnice pro strojvedoucího .....	24
11. Další postup práce .....	25

**Shrnutí****Předmět studie**

Mezi Prahou a Berounem je plánována výstavba nové vysokorychlostní železnice. Klíčovým prvkem nového železničního spojení bude dvojitý tunel s jednou kolejí v každém tunelu, o délce 25km. Maximální rychlost by měla dosáhnout až 250 km/h.

Předmětem studie je výpočet doby úniku při současném šíření kouře pro investiční akci „Praha - Beroun, nové železniční spojení“ (tunel Barrandov) v následujícím rozsahu:

Ověření navržených únikových cest.

Název akce	Praha - Beroun, nové železniční spojení	stránka	/	celkem
Vypracoval	HBI	1	/	25

Výpočtem vyhodnotit počet a velikost propojek mezi tunely.

Výpočtem prověřit kapacity únikových cest (chodníků) v tunelu.

Výpočet bude proveden pro typický scénář mimořádné události. Pro případ požáru bude modelováno šíření kouře v tunelu, ovlivněné spuštěným větráním.

Výsledek bude sloužit jako podklad pro jednání s hasičským záchranným sborem (HZS), jemuž musí být poskytnout důkaz o to, že návrh tunelů poskytuje rozumnou úroveň bezpečnosti úniku z ohroženého tunelu, v souladu s národními i mezinárodními předpisy a projekty.

V případě, že z výpočtu vyplynou nezbytná technická a stavební opatření, ke zlepšení stavebního nebo mechanického návrhu únikových cest, nebo počtu propojek a jejich velikosti budou tato opatření navržena.

## Cíle, omezení a metodika

Studie má následující cíle:

- vyhodnocení dob evakuací pro typický krizový scénář v tunelu
- simulace šíření kouře v tunelu
- porovnání výsledků získaných pro doby evakuace a šíření kouře
- potvrzení vzdálenosti 400m mezi propojkami jako dostatečné

Další cíle, omezení a metodika jsou uvedeny ve zprávě.

## Výsledky pro šíření kouře

Pokud v tunelu zastaví hořící vlak, kouř se bude šířit ve směru jízdy vlaku. Cestující za místem požáru mohou bezpečně uniknout. Kouřová stopa za vlakem bude mít nízkou koncentraci, tj. viditelnost větší než 10 m. Pro cestující ve směru požáru se předpokládají koncentrace s průměrnou viditelností menší než 10 m. Tento výsledek vychází z jednorozměrové simulace. Výsledky jednorozměrových simulací ukazují vyšší koncentrace kouře, než jaké by mohly být ve výšce chodníku nebo evaluační stezky pro cestující.

Obecně platí, že tubus nezasažený požárem a propojky budou bez kouře. Pouze propojka nacházející se v bezprostřední blízkosti požáru se na malou chvíli zaplní kouřem. Po fázi samozáchrany bude ventilace tunelu schopná vytvořit podélný proud vzduchu o kritické rychlosti, tj. lze zabránit tzv. backlayering jevu (otočení kouře vlivem rozdílu hustot).

## Výsledky pro doby evakuace

Podle konzervativních nebo optimistických předpokladů se uvažují doby evakuace ze zasaženého do nezasaženého tubusu v rozmezí 6 až 11 minut. Všeobecně platí, že rozhodujícím faktorem pro dobu evakuace je předpokládaná nízká rychlost pohybu cestujících. V některých případech, které nebyly předmětem šetření, by mohla být omezujícím prvkem na evakuační stezce šířka dveří propojky.

## Závěry

Obecně lze říct, že tunel a koncept jeho odvětrání odpovídají parametrům jiných evropským vysokorychlostních tunelů stavěných v současné době. Počet a velikost propojek, velikost chodníků a výkon ventilačního systému odpovídají nebo překračují mezinárodní požadavky nebo parametry jiných projektů.

Hlavní závěry studie simulace šíření kouře jsou následující:

- Podle očekávání pro zkoumaný scénář se kouř bude nejdříve šířit ve směru pohybu vlaku. Během fáze samozáchrany bez provozu ventilace tunelu bude zóna zaplněná kouřem s viditelností menší než 10 m sahát do vzdálenosti několika stovek metrů od požáru ve směru jízdy vlaku.

Název akce	Praha - Beroun, nové železniční spojení	stránka	/	celkem
Vypracoval	HBI	2	/	25

- Tomuto základnímu jevu nelze zabránit ani použitím odpovídajících technologií. Viditelnost ve výšce cestujících evakuovaných z vlaku bude lepší, než se předpokládá podle jednorozměrových simulací.
- Pomocí zvoleného ventilačního systému lze regulovat šíření kouře v podélném směru tunelu (definované podmínky/přístup pro záchrannou službu po 20 min). Takže pro zkoumaný případ má ventilace dostatečný výkon.
- Ventilace propojek umožňuje snížení koncentrace kouře v otevřených propojkách. Vniknutí kouře do propojky však nelze však úplně zabránit.
- Ventilace tunelu s odlišnými rychlostmi proudění vzduchu zabraňuje vniknutí kouře do nezasaženého tubusu (přívodní kapacita nezasaženého tubusu je 180 m<sup>3</sup>/s; zasažený tubus má odváděcí kapacitu 220 m<sup>3</sup>/s). V nezasaženém tubusu se udržuje viditelnost > 100 m.
- Hlavní zjištění evakuačních výpočtů jsou následující:
- Podle konzervativních předpokladů se uvažuje maximální doba samozáchrany asi 11 min. Za příznivějších okolností lze uvažovat, že fáze samozáchrany bude trvat 6 min.
- Rychlosti chůze podle NFPA 130 ([6]) jsou nižší ve srovnání s ostatními směrnicemi; zejména při dobré viditelnosti.
- Šířka chodníku 1,2 m je dostatečná. Podle NFPA 130 se požaduje 0,61 m. Podle TSI se požaduje 0,75 m ([9]).
- V závislosti na daném scénáři je omezujícím faktorem šířka dveří propojky.
- Časy pro evakuaci by bylo možné zkrátit včasnými a jasnými informacemi (oznámení ve vlaku, nepřehlédnutelný systém značek, madla, viditelnost >> 10 m, atd.)
- Pokud by vlak zastavil přímo před propojkou, slabinou bude kapacita dveří o šířce 1,4 m, což bude mít za následek vznik čekací doby. Dveře propojky o šířce 2,2 m by zajistily dostatečnou kapacitu.

Zatím ještě nebylo potvrzeno, zda je během evakuace přijatelná koncentrace kouře ve vztahu k době evakuace a době expozice kouřem v oblasti směru proudění kouře.

## Doporučení

Na základě analýzy šíření kouře a evakuačních dob byla vydána následující doporučení. Je možné, že tato doporučení již byla zohledněna v průběhu stávajícího projektu. Souhrn doporučení:

- Ventilace v nezasaženém tubusu tunelu by měla být spuštěna okamžitě po aktivaci alarmu.
- Je nutné zohlednit nežádoucí mezní podmínky (vítr v jednom portálu, termální proudění po větru a proti větru, několik otevřených dveří propojek, malé rozdíly mezi propojkami v blízkosti portálu tunelu z důvodu odvětrání tunelu, porucha ventilátoru, tj. požadavek na záložní kapacitu / zvýšení kapacity, zablokování tunelu jiným vlakem).
- Doporučujeme ověřit koncept ventilace propojek.
- Je zapotřebí definovat ventilaci pro fázi externí záchranné akce.
- Měla by být provedena 3D analýza šíření kouře ve směru před místem požáru a simulace paralelní evakuace.
- Měly by být vydány závazné směrnice pro strojvedoucí s pokyny zda má vlak tunel opustit nebo v něm zastavit po aktivaci požárního alarmu.

## Další postup prací

Tuto zprávu lze použít jako podklad pro další studie a detailní plánování problémů nastíněných v této práci. Doporučujeme zvážit následující hlavní kroky:

- Projednání předpokladů uvedených v této studii s orgány dozoru nad bezpečností
- Prošetření možností požadovaných úprav
- Provedení optimalizace evakuačních prostředků
- Provedení optimalizace systému ventilace

Název akce	Praha - Beroun, nové železniční spojení	stránka	/	celkem
Vypracoval	HBI	3	/	25

– Pomocí výpočtů potvrdit funkčnost systémů  
Další práce bude definovaná klientem.

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Ventilace v tunelech a propojkách.....	14
Tabulka 2: Parametry vlaku (*: podle definicí použitých v programu THERMOTUN) .....	16
Tabulka 3: Pořadí akcí scénáře pro simulaci.....	20
Tabulka 4: Výsledky pro případ A: Optimistický scénář simulací evakuace .....	27
Tabulka 5: Výsledky pro případ B: Konzervativní scénář pro simulace evakuace .....	28

## Seznam obrázků

Obrázek 1: Celkový přehled systému tunelu železničního koridoru Praha - Beroun .....	13
Obrázek 2: Přehled předpokládaného režimu ventilace použitého pro vyhodnocení šíření kouře v tunelu a propojkách .....	15
Obrázek 3: Kritická rychlost $V_c$ , požadovaná pro zabránění vzniku backlayering jevu (otáčení kouře).....	16
Obrázek 4: Vlaková jednotka CD 680 (Pendolino); lze kombinovat dvě jednotky .....	17
Obrázek 5: Rychlostní profil porouchaného vlaku .....	17
Obrázek 6: Přejídné vyhodnocení vyzářeného tepelného výkonu a rychlosti spalování modelového požáru	
Obrázek 7: Scénář pro simulace evakuace .....	21
Obrázek 8: Rychlosti proudění vzduchu v zasaženém (Obrázek 3 & 4) a nezasaženém tubusu (Obrázek 1 & 2) na obou stranách místa nehody.....	22
Obrázek 9: Rychlosti proudění vzduchu v propojkách během nouzového scénáře .....	23
Obrázek 10: Viditelnost pod 10 m v podélném směru tunelu .....	24
Obrázek 11: Viditelnost pod 100 m v podélném směru tunelu .....	25
Obrázek 12: Viditelnost v propojkách .....	26
Obrázek 13: Případ A: Optimistický scénář pro simulace evakuace .....	26
Obrázek 14: Případ B: Konzervativní scénář pro simulace evakuace .....	28

Název akce	Praha - Beroun, nové železniční spojení	stránka	/	celkem
Vypracoval	HBI	4	/	25

## 1. Úvod

Součástí bezpečnostního konceptu musí být stanovení racionálních dob evakuace pro případ vzniku nouzové situace v tunelu. Kromě opatření pro železniční park je nutné, aby i tunel byl vybaven odpovídajícími evakuačními prostředky. Klíčové parametry ovlivňující doby evakuace do bezpečných bodů v tunelu zahrnují vzdálenost a rozměry evakuačních chodníků, lávek, východů a schodišťových šachet.

V případě požáru osobního vlaku se doby evakuace vztahují zejména k šíření kouře v tunelovém systému. To umožňuje provést porovnání, zda bude evakuace probíhat dostatečně rychle ještě předtím, než bude dosaženo nepříjemné koncentrace kouře pro evakuované cestující.

## 2. Cíle

Hlavním cílem práce je potvrzení dostatečného počtu a velikosti propojek a evakuačních chodníků v tunelu na trase Praha - Beroun. Je nutné provést výpočty pro vyhodnocení evakuačních dob pro typický krizový scénář v tunelu. Nedílnou součástí analýzy bude šíření kouře v železničním tunelu. Modelování šíření kouře bude provedeno současně s realizací ventilace. Výsledky získané ve studii evakuace budou porovnány s výsledky získanými při simulaci šíření kouře. V případech, kdy nebudou splněny příslušné požadavky, budou navržena opatření pro zlepšení stavebních nebo mechanických prvků.

Studie má následující cíle:

- vyhodnocení dob evakuace pro typický krizový scénář v tunelu
- simulace šíření kouře v tunelu
- porovnání výsledků získaných z výpočtů dob evakuace a šíření kouře
- potvrzení vzdálenosti 400m mezi propojkami jako dostatečné

Rovněž zde bude zahrnut stručný úvod do projektování bezpečnostních opatření.

## 3. Omezení

Obsah této studie je omezen cíly uvedenými v kapitole 2. Záměrem je potvrzení správné velikosti evakuačních východů. Detailní záběr odpovídá současnému stavu projektování projektu. Simulace ventilace bude provedena pouze pro jeden předem definovaný scénář.

Tato zpráva slouží jako první analýza pro potvrzení proveditelnosti několika základních konstrukčních parametrů. V pozdější fázi bude nutné provést mnohem detailnější zkoumání, pravděpodobně na základě problémů záležitostí zjištěných v této studii.

V této studii nejsou konkrétně zahrnuty následující okruhy:

- definování konceptu ventilace pro různé provozní režimy, tj. normální provoz, přetížený provoz, narušený provozní režim, režim údržby a nouzový provoz a odpovídající koncepty řízení;
- komplexní studie dob evakuace zahrnující mnohočetné statistické kombinace lidského chování při koncentraci kouře (např. jak je stanoveno simulačním nástrojem pro pohyb cestujících "BuildingExodus", který lze použít v pozdější etapě projektu);
- interakce 3D prostředí šíření kouře – pouze jednorozměrová analýza šíření kouře;
- optimalizace daného systému ventilace a evakuace;
- interakce cestujících a záchranných týmů;
- analýza více typů vlakových souprav a scénářů – pouze vzorové případy;
- tvorba konceptu ventilace
- vypracování a dokumentace obecného konceptu požární bezpečnosti

Název akce	Praha - Beroun, nové železniční spojení	stránka	/	celkem
Vypracoval	HBI	5	/	25

## 4. Metodika

HBI studii vypracovala ve 4 hlavních krocích:

1. Obecné poznámky o bezpečnosti v železničních tunelech: Projektování bezpečnosti pro případy požáru v tunelech
2. Evakuační studie s vyhodnocením dvou evakuačních scénářů: jeden vlak zastaví mezi dvěma propojkami; pro evakuaci se rovnoměrně využívají 1 nebo 2 propojky
3. Studie šíření kouře s vyhodnocením 1 scénáře rozšiřování kouře: Vlak zastaví uprostřed tunelu a kouř se šíří podle proudění vzduchu vyvolaného zastaveným vlakem, požárem a ventilací.
4. Syntéza: Budou porovnány výsledky studie evakuace a šíření kouře.

## 5. Metody projektování bezpečnosti železničních tunelů

### 5.1. Obecné poznámky

Problematika projektování a konstrukce železničních tunelů z hlediska bezpečnosti se v posledních letech stala velmi důležitou. Konkrétně v případech kombinace dlouhých tunelů určených pro vysokorychlostní vlaky s přepravou zboží a cestujících je systematické projektování bezpečnostních opatření jedním z hlavních prvků konstrukce tunelu.

Skutečné riziko plynoucí z používání železničního tunelu je mnohem nižší než v případě silničního tunelu a jízdy na širé trati. V posledních 30 letech se stalo jenom velmi málo případů úmrtí nebo závažných poranění v tunelech hlavních železničních koridorů. Ačkoliv lze pravděpodobnost vzniku nehodové události považovat za nízkou, možné důsledky takovýchto událostí v tunelech mohou být katastrofální. Tudíž úroveň provozní bezpečnosti tunelu je zásadním aspektem projektování tunelu. Z etického i právního hlediska je bezpečnost rozhodující a ovlivňuje povědomí o tunelu mezi širokou veřejností i politiky. Bezpečnost tunelu je rovněž klíčovým faktorem pro výši pojistného a náklady na údržbu po celou dobu jeho životnosti.

Z mezinárodního hlediska jsou některé oblasti železničních technologií standardizované a běžně se používají pro řešení problematiky bezpečnosti (např. bezpečnostní standardy pro souost kolejnič, řízení přepínání, signalizace, atd.). Avšak bezpečnost při nehodách v podzemních tratích se v různých zemích řeší odlišně. Hlavní důvody pro tyto rozdíly jsou uvedeny níže:

- Těžké nehody s mnoha oběťmi na životech se stávají pouze výjimečně (požár, tvorba nebezpečných plynů, vykolejení, srážka, atd.). Z důvodu malého počtu závažných nehod je pouze omezená motivace pro tvorbu a používání bezpečnostních standardů.
- V různých zemích existují různé mezní projekční podmínky (hustota a druh železniční dopravy; typ a stáří železničního parku; počet, druh a vlastnosti tunelů, zkušenost s provozem železničních tunelů, odlišná dostupnost a organizace záchranných služeb, atd.).
- Hodnocení rizik s značně liší v různých typech společností. Zatímco v jedné zemi má nehoda s oběťmi na životech za následek zavedení drastických opatření, v jiné zemi není důvodem pro jakoukoliv změnu.
- Mezi koncepčním projektem a zprovozněním tunelu uplyne velmi dlouhá doba (např. 25 let v případě bázevého gotthardského tunelu). Tunely zprovozněné v poslední době jsou postavené podle bezpečnostních standardů používaných před deseti nebo i více roky.
- Legislativa jenom pomalu reflektuje běžnou praxi.

Takto vznikla situace, které se v mnohém liší od silničních tunelů, a kterou lze charakterizovat následovně:

- Existuje pouze omezená mezinárodní standardizace.

Název akce	Praha - Beroun, nové železniční spojení	stránka	/	celkem
Vypracoval	HBI	6	/	25

- Ochota investovat do bezpečnostních opatření se liší v širokém spektru investic. Tomu odpovídají odlišná hodnocení bezpečnosti v různých zemích (přístup typu „Udělejte co je technicky možné!“ vs „Udělejte to jednoduše!“).
- Tunely uvedené do provozu v současné nebo nedávné době jsou často postavené podle bezpečnostních standardů používaných nejméně před 10 lety. Nedávno otevřené tunely pravděpodobně nepředstavují nejmodernější metody plánování bezpečnosti železničních tunelů.
- Projektanti, zadavatelé i orgány dozoru nad bezpečností nemají jasnou představu o vhodných scénářích a případech ke zvážení a úrovních bezpečnosti, které se mají dosáhnout pomocí bezpečnostních opatření.
- Mezi projektanty, zadavateli a orgány dozoru nad bezpečností panuje nejistota ohledně efektivity (neznámý poměr náklady-výhody).

U stávajících projektů se používá směs metod pro navrhování bezpečnosti železničního tunelu.

- legislativní metoda na základě norem, standardů a předpisů
- funkční metoda, např. kvantitativní analýza rizik
- referenční metoda dosažení "nejmodernějších" systémů vycházející z porovnání s jinými obdobnými projekty
- bezpečnostní zásady, jako například „reálná šance evakuace pasažérů“

V rámci předběžného shrnutí lze konstatovat, že lze použít různé formy řešení otázek bezpečnosti.. V mezinárodním měřítku neexistuje žádná jedinečná metodika bezpečnosti. Pro různé projekty se uplatňují individuální přístupy. Bezpečnostní opatření nelze kvalifikovat jako naprosto správná nebo špatná, tj. záleží na individuálním posouzení. Každá metoda zahrnuje kombinaci různých prvků. Projektování bezpečnosti znamená vytvoření řady opatření, která se musí odsouhlasit s příslušnými orgány dozoru nad bezpečností.

V mezinárodním měřítku nebyl pojem "standardně bezpečný tunel" ještě definován, protože určité úrovně bezpečnosti lze dosáhnout různými kombinacemi opatření, přičemž mezní podmínky tunelů se značně liší případ od případu.

## 5.2. Metody

Bezpečnost tunelu závisí na mnoha aspektech, jako je železniční technologie, železniční vozový park, stavební konstrukce, vybavení, provoz, školení a organizace záchranných složek. Ucelený koncept bezpečnosti musí zohlednit všechny podílející se prvky. Konečné rozhodnutí o úrovni bezpečnosti a stanovení priorit opatření je odpovědností příslušných orgánů dozoru nad bezpečností.

Z hlediska projektantů a zadavatelů lze použít následující pragmatický přístup pro stanovení vhodných bezpečnostních opatření:

- Dodržení norem, směrnic, smluvních specifikací a doporučení (a pokud lokálně neexistují, použít legislativu platnou v zemích se značnou zkušeností s navrhováním a provozem železničních tunelů, např. TSI, UIC)

Požární bezpečnostní opatření pro vysokorychlostní železniční tunely jsou stále velmi odlišná (v tunelech německých drah není žádná ventilace, např. tunel Katzenberg; tunely s vysokokapacitní ventilací, např. alpské bázové tunely, tunel Le Perthus, Guadarrama, HZL-Zuid, atd.). V rámci TSI jsou specifikovány pouze minimální požadavky. Z vlastní zkušenosti víme, že nemá příliš velký význam projednávat otázky bezpečnosti s orgány odpovědnými za bezpečnost silničních tunelů. Naopak, zásadní otázky týkající se nebezpečí požárů v železničních tunelech je nutné projednat s příslušnými odpovědnými orgány.

Název akce	Praha - Beroun, nové železniční spojení	stránka	/	celkem
Vypracoval	HBI	7	/	25



- Použití výsledků získaných složitými metodami (např. analýza rizik) pro hlavní konstrukční rozhodnutí (např. tunel s jedním dvoukolejným tubusem nebo se dvěma jednokolejnými tubusy)
- Porovnání s opatřeními zavedenými u obdobných projektů a aplikace „nejmodernějších“ poznatků
- Ověření upotřebitelnosti v místních podmínkách a zdůvodnění odchylek
- Vytvoření obdobné bezpečnostní úrovně pro okolní tunely na stejném železničním koridoru (podle okolností), tj. zavedení převažujících opatření
- Uspořádání, kategorizace a zdůvodnění bezpečnostního konceptu a opatření v dokumentaci, např. specifikace prevenčních a zmírňujících opatření a opatření pro zlepšení možnosti evakuace a usnadnění záchranných prací
- Podpora zadavatele a orgánů dozoru nad bezpečností formou spolupráce

Volbu použitého systému a odpovídající úrovně bezpečnosti je nakonec nutné projednat s příslušnými orgány a zadavatelem na základě odborného posudku projektanta.

### 5.3. Důsledky pro projekt tunelu Praha - Beroun

Ve všech etapách projektování je nutné zohledňovat aspekt bezpečnosti při možných nehodách v tunelu Praha – Beroun. Z hlediska projekce ventilace a evakuace se doporučuje začít vyřešením všech bezpečnostních požadavků s odpovědnými orgány, a to už v počáteční fázi projektu.

Základní principy pro projektování systému ventilace a evakuace by měly být tyto:

- Bezpečnostní opatření a metody plánování bezpečnosti by měly být stejné, jako u obdobných evropských železničních projektů. Toto je nejspolehlivější způsob zdůvodnění bezpečnostních opatření nebo obhájení nerealizace dalších možných opatření.
- Neměly by se řešit nepravděpodobné situace, např. porucha více technických zařízení.

Je nutné akceptovat, že určité riziko bude vždy existovat, a že musí existovat rovnováha mezi investicemi do bezpečnostní opatření a jejich účinností.

- Neměl by docházet k znevýhodňování železničních projektů nabízejících vysokou úroveň bezpečnosti vůči ostatním dopravním prostředkům tím, že se nastaví mnohem vyšší úroveň bezpečnosti, než je běžné pro tyto ostatní dopravní prostředky.

při projektování tímto způsobem budou splněny následující body:

- Racionálně jednající člověk bude mít reálnou šanci uniknout z hořícího vlaku do bezpečného místa v tunelu.
- V rámci vzdáleností a dob obdobných, jako u jiných moderních železničních tunelů v Evropě by se měli cestující z hořícího vlaku dostat do bezpečí.
- Ventilace by měla být navržena tak, aby bylo zajištěno bezpečné místo pro cestující po dobu jejich samozáchrany a vnější záchranné akce.
- Ventilace by měla poskytnout podporu pro záchranné a požární aktivity tím, že zabezpečí definované směry šíření kouře. Během fáze vnější záchranné akce by se mělo co nejlépe využít ventilační zařízení navržené podle požadavků na fázi samozáchrany. Ventilace by však neměla být omezena požadavky na fázi vnější záchranné akce, ale musí splňovat především požadavky na fázi samozáchrany.

V rámci Evropy lze odkázat na následující tunely:

- Tunel Guadarrama ve Španělsku; tunel se dvěma jednokolejnými tubusy, délka 28 km; pouze pro osobní dopravu; uvedení do provozu 2009

Název akce	Praha - Beroun, nové železniční spojení	stránka	/	celkem
Vypracoval	HBI	8	/	25

- Bázový tunel Ceneri ve Švýcarsku; tunel se dvěma jednokolejnými tubusy; délka 15 km; kombinovaný provoz; uvedení do provozu 2019
- Tunel Koralm v Rakousku; tunel se dvěma jednokolejnými tubusy; délka 33 km; kombinovaný provoz; uvedení do provozu 2020

## 6. Nástroje

### 6.1. Jednorozměrové simulace THERMOTUN

Pro kvantitativní analýzu byl použit počítačový kód THERMOTUN/6. Tento program vytvořil profesor Alan Vardy z univerzity Dundee (UK) během posledních 30 let. Původně byl vyvinut jako konstrukční nástroj pro snížení tlakových rázů ve vysokorychlostních tunelech britských železnic. Od té doby byl použit pro širokou škálu mezinárodních projektů železnic a metra.

V současné době je THERMOTUN respektovaným a předním nástrojem pro provádění aerodynamických a termodynamických analýz tunelů železnic a metra. Tento program výrazně těží z výhod společného mezinárodního výzkumu, rozsáhlé validace měření a nepřetržité odezvy jeho uživatelů profesorovi Vardymu. THERMOTUN byl rozsáhle ověřen v několika projektech a experimentech.

THERMOTUN je program používaný pro aerodynamické simulace v železničních tunelech. Vychází z jednorozměrové metody charakteristik a jeho výsledky se ověřují na základě několika měření. Tento program se používá k modelování jednoduchých i složitých tunelových systémů s cílem získat následující aerodynamické údaje: rychlosti proudění vzduchu, průběh tlaku, odchylky tlaku, trakční sílu, atd. THERMOTUN dále umožňuje modelování činnosti ventilace tunelu (ventilátory, tlumiče, atd.) nebo výpočet rozptýlení imisí a tepla. THERMOTUN je mezinárodně schválený nástroj uznávaný pro své výjimečné predikční schopnosti.

### 6.2. Jednorozměrový výpočet dob evakuace

Pro vyhodnocení evakuace velkého počtu osob z tunelu byly použity korelace podle americké normy NFPA 130 [6].

Numerické studie provedené pomocí počítačových nástrojů s cílem získat detailní údaje o toku osob se zohledněním více statistických odchylek lze provést v pozdější etapě projektu.

K tomu lze použít softwarové nástroje, jako je např. BuildingExodus. Pro stávající fázi projektu Praha-Beroun to však není dostatečné.

Modelování dob evakuace vyžaduje různé pracovní předpoklady. Existuje široká škála možných předpokladů, které vedou k širokému spektru možných výsledků. Výpočty mohou vycházet z různých nástrojů a celé řady parametrů. Ať už se jedná o prosté korelace nebo komplexní numerické nástroje, finální doby evakuace se mohou značně odlišovat. V rámci určitých limitů neexistují žádné správné nebo špatné výsledky výpočtů dob evakuace.

Široké spektrum teoretických výsledků odpovídá širokému spektru dob evakuace zjištěných praktickým ověřováním v tunelech (např. v bázovém tunelu Loetschberg).

V rámci rozmezí nepřesnosti představuje 11 nebo 17 min přijatelný výsledek.

Jako další příklad viz připojená simulace dob evakuace pro bázový tunel Loetschberg (Egress\_Time\_LBT.pdf). Naše metoda stanovení doby evakuace odpovídá metodice NFPA 130.

Tato metoda byla stejným způsobem použita pro několik podzemních projektů.

Akceptujeme skutečnost, že různé doby evakuace jsou stanoveny pomocí jiných metod.

Pro dosažení dohody s orgány dozoru nad bezpečností navrhuje zahájit s těmito orgány otevřenou diskuzi, jejímž výsledkem by mělo být definování metody pro potvrzení odpovídající

Název akce	Praha - Beroun, nové železniční spojení	stránka	/	celkem
Vypracoval	HBI	9	/	25

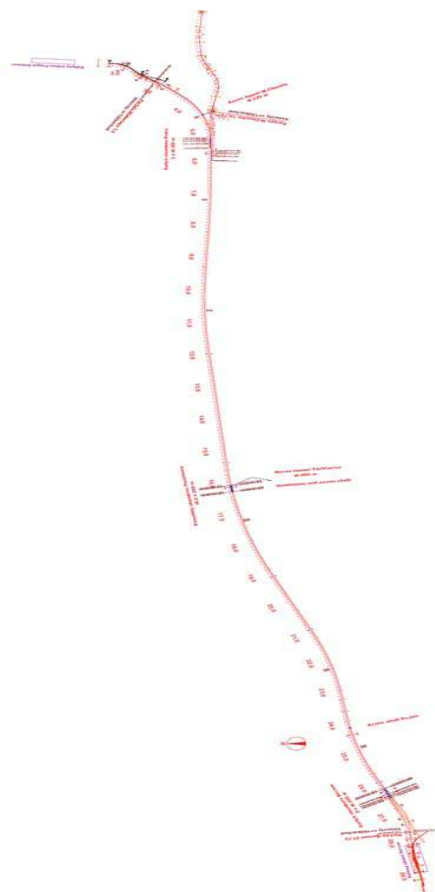
bezpečnosti tunelového systému (použití odpovídajících scénářů, nástrojů a parametrů). K tomu se obvykle používá iterativní přístup, tj. předkládání vašich názorů a hlavních alternativ.

Je nutné zvolit přiměřené nehodové scénáře. Podkladem by se neměl stát nejhorší případ.

Také je vhodné srozumitelně předkládat výsledky plynoucí z různých metod. Na konci tohoto procesu musí orgán odpovědný za bezpečnost definovat přijatelné doby evakuace a akceptované metody pro jejich potvrzení.

## 7. Podklady

### 7.1. Geometrie



Obr. 1 přehled systému tunelu železničního koridoru Praha - Beroun

### 7.2. Aerodynamická data

### 7.3. Systém ventilace

Tabulka 1: Ventilace v tunelech a propojkách

Normální provoz

Provádění údržby

Narušený provoz (např. výpadek napájení, stojící vlaky)

Nouzový provoz – samozáchrana

Nouzový provoz – zásah externích záchranných jednotek

Název akce	Praha - Beroun, nové železniční spojení	stránka	/	celkem
Vypracoval	HBI	10	/	25

TSI doporučuje použití mechanické ventilace v železničních tunelech pouze za určitých podmínek. Ventilace BBT, GBT a LBT se používá pro regulaci mimo režim nouzových zastavení a během fáze samozáchrany a zásahu externích záchranných jednotek, tj. pro odstranění kouře v nezasaženém tubusu nebo pro umožnění definovaného přístupu záchranné služby. Faktem je, že pro fázi zásahu externích záchranných jednotek není ventilace standardem; avšak instalovaná ventilace by měla být použita takovým způsobem, aby maximálně usnadnila zásah záchranných jednotek.

Jak bylo uvedeno výše, TSI specifikuje pouze minimální standardy. Z právního hlediska je rovněž nutné zohlednit „nejnovější“ technologie v oblasti ventilace železničních tunelů. V této souvislosti a pro případné právní spory je nutné uvést, co bylo použito v dalších obdobných projektech. Je velmi pravděpodobné, že splnění požadavků TSI nebude pro vaše orgány dozoru nad bezpečností postačující.

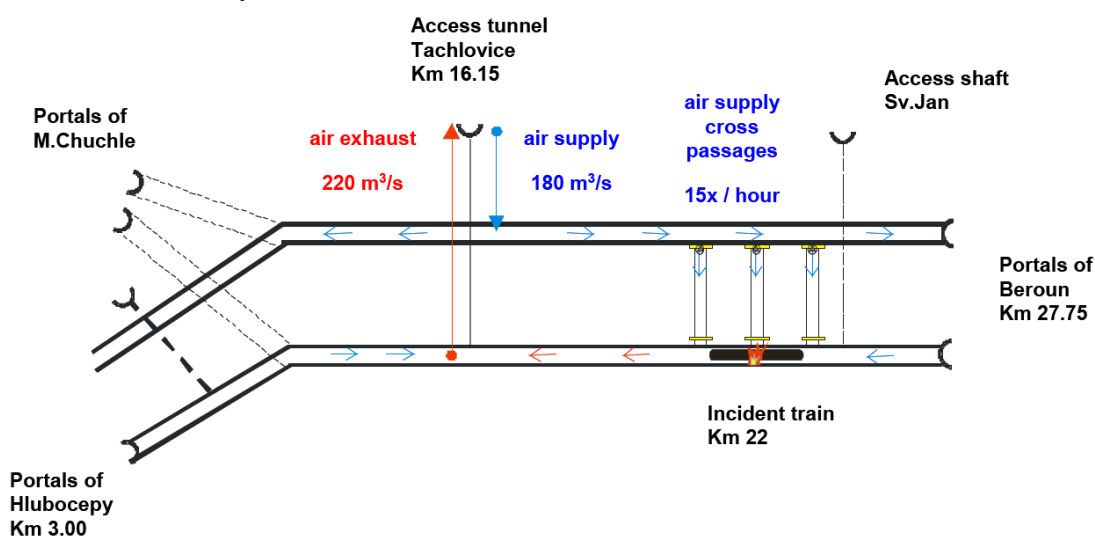
### 7.3.1. Ventilace tunelu

Přístupový tunel Tachlovice je navržen jako ventilační šachta. Nachází se přibližně uprostřed tunelu ve vzdálenosti 16,15 km a je vybaven komorou pro napájení a strojovnu odvětrávací ventilace.

Odvětrávací ventilátory v postiženém tubusu mají maximální kapacitu 220 m<sup>3</sup>/s. Hlavním cíle ventilace tunelu je vytvoření kritické rychlosti v železničních tunelech, aby se zbránilo vzniku backlayering jevu (otočení kouře). Přívodní kapacita do nepostiženého tunelu bude 180 m<sup>3</sup>/s.

Díky rozdílu tlaků v obou tubusech a neexistenci výraznějších poruch ze zasaženého tubusu nepronikne žádný kouř do nezasaženého tubusu. Po ukončení fáze samozáchrany bude prováděna regulace ventilace podle požadavků záchranné jednotky.

Centrální umístění ventilační šachty umožňuje rozdělení tunelového systému na čtyři rozdílné sekce. Protože tunel má signalizaci v každé z těchto čtyřech zón, je možné omezit počet vlaků v každé ventilační sekci na jeden. V případě požáru bude kouřem zasažena pouze jedna sekce a pouze jeden vlak. Předpokládá se, že v každé sekci tunelu se vždy bude nacházet pouze jeden vlak (mezi portálem a ventilační šachtou Tachlovice). Takže v případě nehody nebude ve stejném tubusu zasažen kouřem žádný další vlak.



Obr. 2 Přehled předpokládaného režimu ventilace použitého pro vyhodnocení šíření kouře v tunelu a propojkách

### 7.3.2. Ventilace propojek

Ventilační zařízení nainstalované v každé propojce udržuje v propojkách přetlak vzduchu 10-30 Pa po celou dobu, kdy jsou jejich dveře zavřené. V případě požáru v tunelu je zajištěna výměna vzduchu v intervalu min. 15x/hod. Každá propojka má dva ventilátory do každého tubusu a tlumič. V případě požáru se bude do propojek přivádět čerstvý vzduch z nezasaženého tubusu tunelu.

Název akce	Praha - Beroun, nové železniční spojení	stránka	/	celkem
Vypracoval	HBI	11	/	25

Vzduch bude proudit z nezasazeného tunelu ve směru zasaženého tunelu, vždy proti směru evakuace cestujících.

V případě požáru cestující otevřou asi 3 až 4 propojky, aby se mohli dostat do souběžného tunelu. Ventilace propojky se aktivuje současně s otevřením vstupních dveří.

## 7.4. Kritická rychlost

Při požáru v tunelu je nutné dosáhnout kritické rychlosti proudění vzduchu, aby se zabránilo vzniku tzv. backlayering efektu – otočení kouře.

Pro případ nehody (požár vlaku) byla v dokumentaci [3] stanovena hodnota kritické rychlosti  $V_c$  2,4 m/s. Proudění kritickou rychlostí probíhá směrem dopředu od místa požáru v prstencové formaci kolem vlaku.



Obr. 3 Kritická rychlost  $V_c$ , požadovaná pro zabránění vzniku backlayering jevu (otáčení kouře)

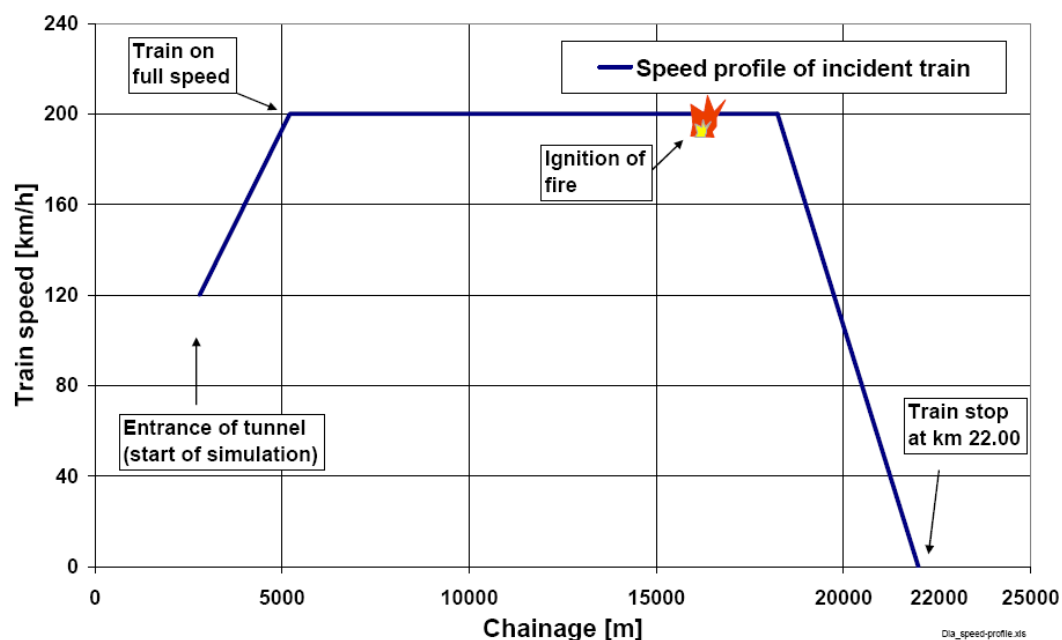
## 7.5. Data vlaku



Obr. 4 Vlaková jednotka CD 680 (Pendolino); lze kombinovat dvě jednotky

Název akce	Praha - Beroun, nové železniční spojení	stránka	/	celkem
Vypracoval	HBI	12	/	25

## 7.6. Rychlost vlaku



Obr. 5 Rychlostní profil porouchaného vlaku

## 7.7. Model požáru

Obrázek 6 znázorňuje definici výpočtu požáru vlaku použitou pro simulaci šíření kouře v tunelu.

Pro numerické simulace se používá požární křivka s maximální rychlostí uvolňování tepla (HetReleaseRate) 20 MW a rychlostí spalování (R). Výpočet požáru znázorňuje kvadratický nárůst rychlosti uvolňování tepla na hodnotu 20 MW a na hodnotu 1,2 kg/s pro rychlost spalování během prvních 20 min a poté zůstává konstantní. Kvadratický nárůst v závislosti na čase je popsán následujícími rovnicemi:

- Rychlost uvolňování tepla

$$Q = 0,0014 \cdot t^2$$

(Rovnice 1)

s:

•Q

[kW] rychlost uvolňování tepla (HRR)

t [s] čas

- Rychlost spalování

$$R = 0,00083 \cdot t^2$$

(Rovnice 2)

s:

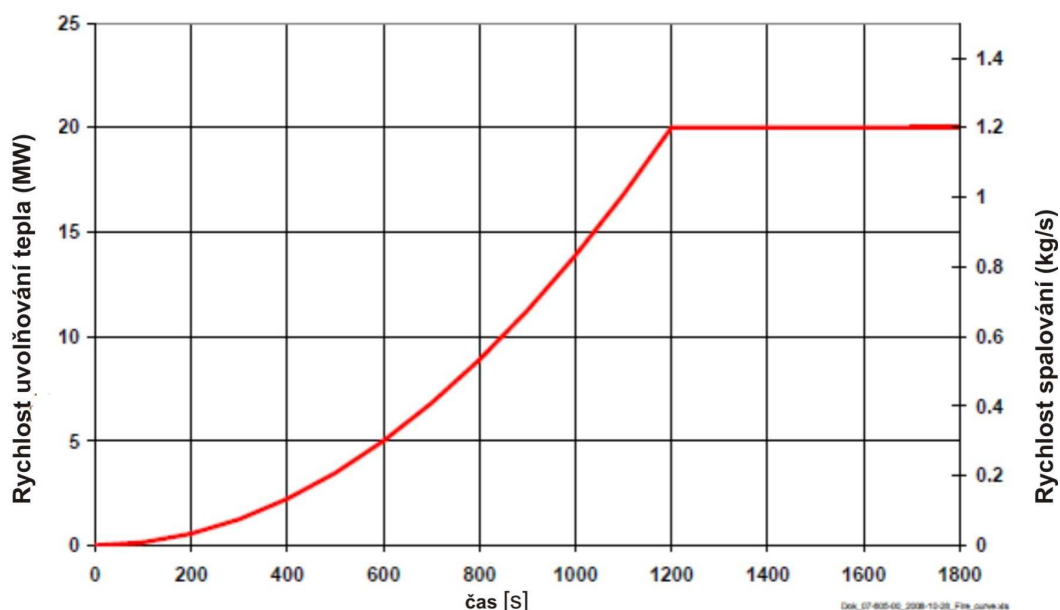
•R

[g/s] rychlost spalování (R)

t [s] čas

Rychlost uvolňování tepla a rychlost spalování ve výpočtu požáru jsou znázorněny v Obrázku 6.

Název akce	Praha - Beroun, nové železniční spojení	stránka	/	celkem
Vypracoval	HBI	13	/	25



Obr. 6 : Přechodné vyhodnocení vyzářeného tepelného výkonu a rychlosti spalování modelového požáru  
Maximální rychlost uvolňování tepla odpovídá nebo překračuje výsledky modelových požárů v obdobných projektech evropských železničních tunelů. Například modelový požár v bazovém gotthardském tunelu ve Švýcarsku vykazuje 10 MW po 20 min (1'200 s).

## 7.8. Parametry charakterizující kvalitu vzduchu během požáru a důsledky jednorozměrové analýzy

Byla vytvořena různá kritéria pro stanovení nebezpečné situace pro evakuované cestující, například společností STUVA (německá výzkumná společnost pro podzemní dopravní systémy). Níže jsou uvedena některá kritéria pro klasifikaci akceptovatelné vrstvy vzduchu/kouře:

- viditelnost:  $s \geq 10$  m
- koncentrace  $CO_2$ :  $c(CO_2) \leq 1$  Vol.-%
- koncentrace  $CO$ :  $c(CO) \leq 500$  ppm
- teplota:  $T \leq 50^\circ C$

Obecně platí, že nejkritičtějším parametrem je viditelnost, tj. teplota, koncentrace  $CO$  a  $CO_2$  se stávají kritickými až v pozdější fázi požáru. Takže pro zkoumaný případ bude zobrazena pouze viditelnost.

V této studii je provedena jednorozměrová analýza šíření kouře. Nebude uvažováno usazování kouře ve výšce tunelu, ale bude vypočítána rovnoměrná koncentrace kouře pro průřez tunelu.

V případě skutečného požáru v tunelu a při středních rychlostech podélného proudění vzduchu lze rozlišovat mezi dvěma vrstvami kouře. U stropu se nachází zóna kouře s vysokou koncentrací. Na úrovni chodníku se nachází zóna kouře se značně sníženou koncentrací. Takže pomocí jednorozměrové analýzy se dosáhne zprůměrování koncentrace kouře v průřezu tunelu. Díky tomu poskytují výsledky jednorozměrových simulací větší koncentrace kouře, než jaké mohou skutečně být ve výšce chodníku nebo evakuační stezky pro cestující.

## 7.9. Scénář pro simulaci ventilace a evakuace

Po vzniku požáru cestující nebo personál vlaku spustí požární alarm. Pokud hořící vlak nebude moci opustit tunel, bude muset v tunelu zastavit. Po pečlivém vyhodnocení situace posádka vlaku vyzve cestující, aby vlak opustili na straně chodníku a propojek. Cestující se budou pohybovat po

Název akce	Praha - Beroun, nové železniční spojení	stránka	/	celkem
Vypracoval	HBI	14	/	25



chodníku a přes propojky opustí zasažený tubus a vstoupí do nezasaženého tubusu (vzdálenost mezi propojkami je 400 m).

Propojky jsou vybavené ventilačním systémem zabraňujícím průniku kouře a tepla do propojky a nezasaženého tunelu. Dveře k propojkám jsou normálně zavřené. Tyto dveře mají šířku 1,4 m a výšku 2,0 m. To odpovídá požadavkům TSI (viz [9]).

Na začátku požáru se u stropu tunelu akumuluje velké množství horkého kouře. Avšak díky jeho rozvrstvení bude viditelnost ve spodní části tunelu mnohem lepší než u stropu. K tomu je zapotřebí, aby podélné proudění vzduchu v tunelu mělo rychlost 2 m/s nebo nižší. Pod kouřovou vrstvou mohou cestující přes propojky uniknout do vedlejšího tunelu. Po fázi samozáchrany bude aktivována sací a odvětrávací ventilace tunelu. Regulace ventilace se bude provádět podle požadavků záchranného týmu.

Scénář použitý pro simulaci je uveden v tabulce 3. Reakční časy vycházejí z [8].

Tabulka 3: Pořadí akcí scénáře pro simulaci

Čas	Akce	Poznámka
$t < 0$ s	- Porouchaný vlak vjíždí do pražského portálu tunelu rychlostí 120 km/h	- Druhý vlak v zasaženém tubusu míjí km 16 rychlostí 200 km/h
$t = 0$ s	- Vznik požáru	
$t = 30$ s	- Je detekován požár ve vlaku	
$t = 60$ s	- Požární alarm pro strojvedoucího - Vlak začíná zpomalovat	
$t = 195$ s	- Vlak zastavuje na km 22	- Požadavek, aby cestující opustili vlak
$t = 225$ s	- Otevřeny dveře první propojky - Spouští se ventilace propojky	
$T = 285$ s	- Jsou otevřeny dveře druhé a třetí propojky - Ventilace propojek v provozu	
$T = 560$ s	- Konec fáze samozáchrany	- Asi 6 min po zastavení vlaku
$T = 675$ s	- Zapnutí odsávacího a přírodního ventilátoru (doba rozběhu 60 s)	- Asi 8 min po zastavení vlaku
$T = 735$ s	- Odsávací a přírodní ventilátor běží na maximální výkon	
$T = 1200$ s	- Rychlost uvolňování tepla dosahuje maxima	
$T > 1200$ s	- Rychlost uvolňování tepla se udržuje na maximální hodnotě	

## 7.10. Scénář pro simulaci evakuace

Pro studii dob evakuace lze definovat různé scénáře. Na následující parametry je možné použít vhodné variace:

Název akce	Praha - Beroun, nové železniční spojení	stránka	/	celkem
Vypracoval	HBI	15	/	25



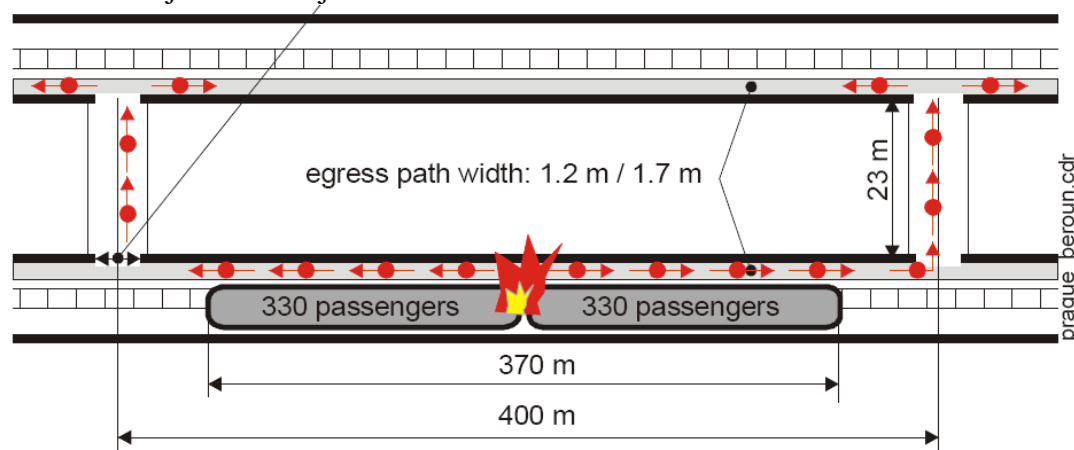
- umístění stojícího vlaku v tunelovém systému
- výsledné vzdálenosti k propojkám v blízkosti vlaku
- místo požáru ve vlaku
- velikost chodníků a dveří propojek, tj. jejich šířka
- převažující mezní podmínky (rychlost proudění vzduchu)
- typ, pohyblivost a počet cestujících
- stupeň racionálního chování cestujících
- atd.

Kombinace všech parametrů povedou k nesčetné řadě možných případů. Pro omezení množství výpočtů v první metodě jsou předmětem zkoumání pouze odpovídající reprezentativní případy.

Je zřejmé, že pro každý horší scénář lze definovat ještě mnohem těžší případ. Navíc je očividné, že každá reálná situace se bude v detailech odlišovat od zkoumaných případů, zejména z důvodu složitosti a množství ovlivňujících faktorů. Lze však očekávat, že výsledky poskytnou dostatečně dobrou indikaci toho, zda byly hlavní projekční parametry definované správně či nikoliv.

Obrázek 7 zobrazuje daný scénář evakuace. Ten je následující:

- Jeden vlak (2 jednotky) zastaví mezi dvěma propojkami.
- pro vyhodnocení dob evakuace časů se uvažuje 660 cestujících.
- Případ A – Optimistická verze: pro evakuaci se rovnoměrně používají 2 propojky; pro každý směr se uvažuje 330 cestujících (polovina).
- Případ B – Konzervativní verze: pro evakuaci se používá pouze jedna propojka; pro jeden směr se uvažuje 660 cestujících.



Obrázek 7: Scénář pro simulaci evakuace

Předpokládá se, že cestující budou informováni o zamýšleném zastavení vlaku ještě před jeho úplným zastavením. Z toho důvodu se neuvažuje žádná reakční doba pro zahájení evakuace. Evakuace začíná okamžitě po zastavení vlaku.

## 7.11. Doba evakuace

Není stanoven žádný finální požadavek na maximální dobu evakuace ze zasaženého tunelu. Tuto dobu lze definovat v pozdější fázi projektu, například po analýze charakteristické kvality vzduchu pomocí třírozměrových metod v oblasti před stojícím vlakem.

Název akce	Praha - Beroun, nové železniční spojení	stránka	/ celkem
Vypracoval	HBI	16	/ 25

## 8. Výsledky

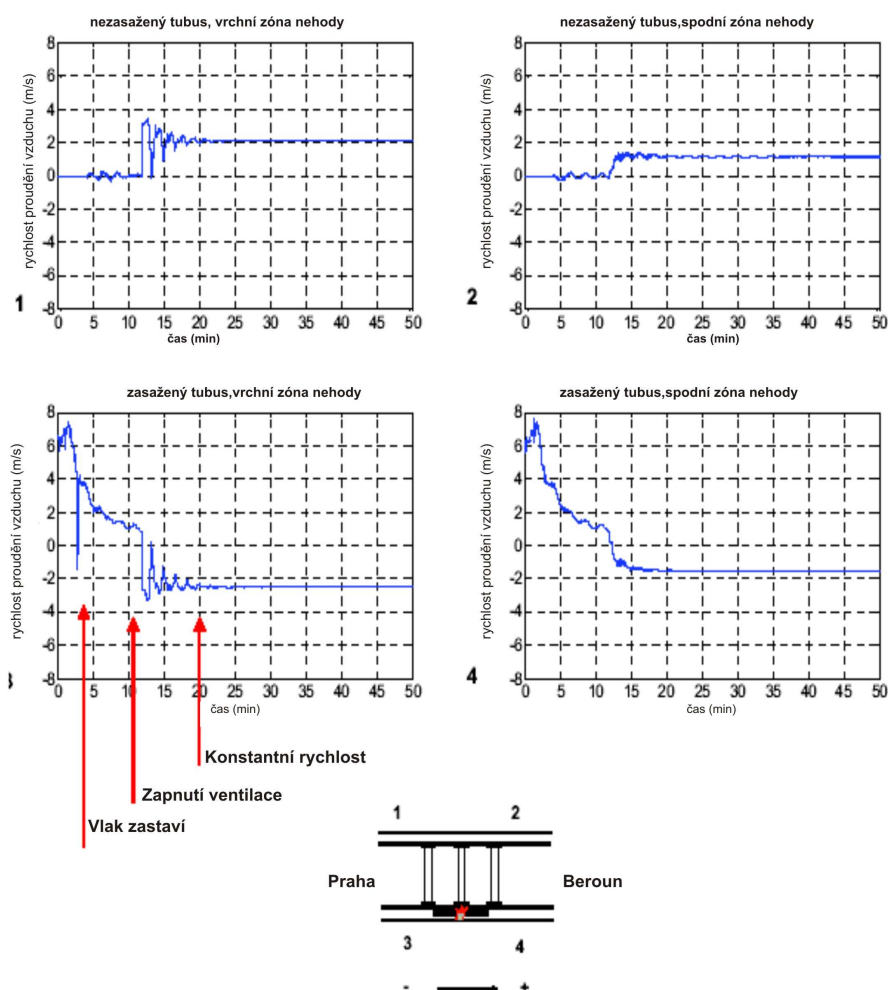
### 8.1. Výsledky jednorozměrových výpočtů šíření kouře

#### 8.1.1. Rychlosti prodění vzduchu

Pomocí nástroje THERMOTUN byla provedena simulace scénáře popsaného v předchozí kapitole. Hlavní vstupy simulací jsou dány takto:

- Obrázek 5 – Rychlostní profil vlaku v tunelu
- Obrázek 6 – Časový průběh rychlosti uvolňování tepla modelového požáru
- Tabulka 3 – Pořadí akcí v průběhu scénáře

Výsledné rychlosti proudění vzduchu jsou uvedené v Obrázku 8 se čtyřmi grafy. Graf 1 a graf 2 zobrazují rychlosti proudění vzduchu v nezasaženém tubusu na obou stranách místa nehody. Graf 3 a graf 4 zobrazují podélnou rychlost prodění v zasaženém tunelu.



Obrázek 8: Rychlosti proudění vzduchu v zasaženém (grafy 3 & 4) a nezasaženém (grafy 1 & 2) tubusu na obou stranách místa nehody

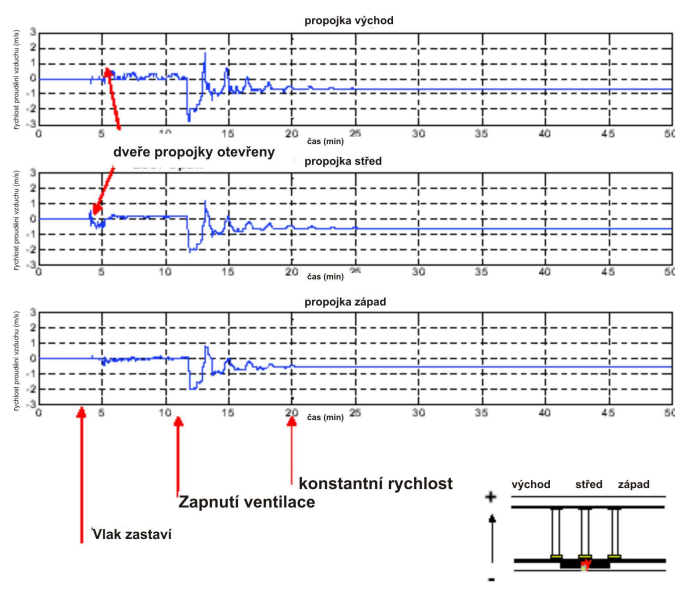
Počáteční, vlakem vyvolaná rychlost proudění vzduchu v zasaženém tubusu je asi 6 m/s až 8 m/s. Po aktivaci alarmu a zpomalení vlaku se rovněž sníží rychlost proudění vzduchu v tunelu. Z důvodu inerce vzduchového sloupce v tunelu se stále pohybuje rychlostí přibližně 4 m/s okamžitě poté, co vlak zastaví. Jakmile vlak zastaví, rychlost proudění vzduchu během 2 min klesne ze 4 m/s na méně než 2 m/s. Přibližně 11 min po vzniku požáru se zapíná ventilace. Po dalších 6 až 8 min dosáhne

Název akce	Praha - Beroun, nové železniční spojení	stránka	/ celkem
Vypracoval	HBI	17	/ 25

rychlost podélného proudění vzduchu v tunelovém systému konstantní hodnoty asi 2,3 m/s mezi ventilační šachtou a první otevřenou propojkou.

Obrázek 8 nenaznačuje, zda kritická rychlost zůstane zachovaná i po aktivaci ventilace tunelu. Rozbor dat však ukázal, že v prstenci směrem od požáru do zadní části vlaku, tj. na straně, kde čerstvý vzduch mívá vlak, je dosaženo kritické rychlosti  $V_c = 2,4$  m/s podle kapitoly 7.4. Takže pro zkoumaný případ je ventilace je dostatečně výkonná.

Obrázek 9 zobrazuje rychlosti proudění vzduchu v propojkách. Dveře první propojky (prostřední) jsou otevřeny po 4 minutách. Zbývající dvojce dveře jsou otevřeny po uplynutí doby 5 min. Přibližně 11 min po začátku požáru se zapíná ventilace. Po dalších 6 až 8 min dosáhne rychlost proudění vzduchu v propojkách konstantní hodnoty 0,5 m/s. Ve volné oblasti dveří propojek bude rychlost proudění vzduchu asi 3 m/s.



Obrázek 9: Rychlosti proudění vzduchu v propojkách během krizového scénáře

### 8.1.2. Šíření kouře

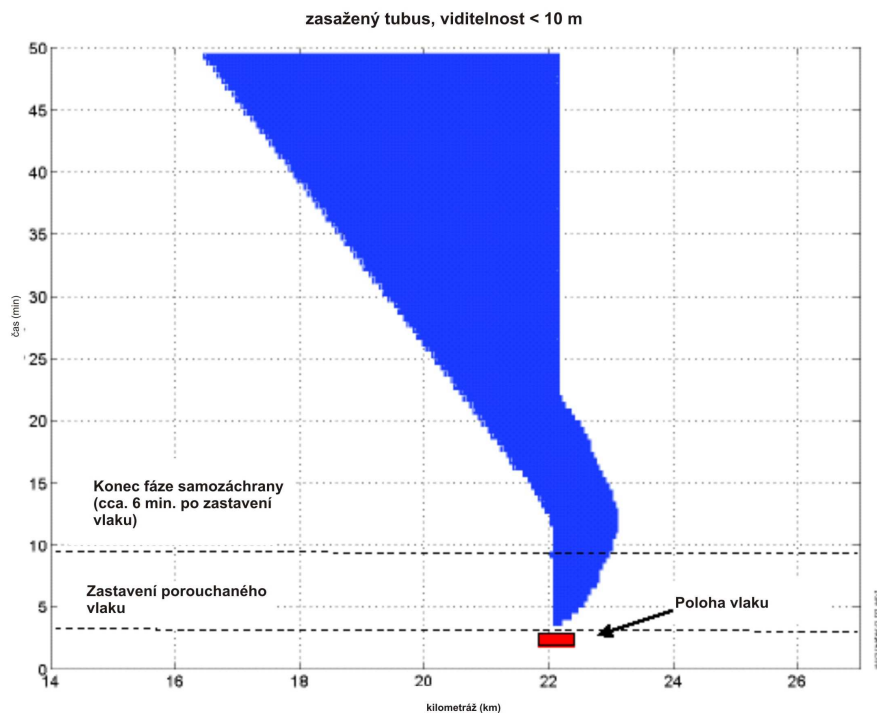
Simulace proudění vzduchu vyvolaného vlakem a ventilací. Souběžně s tím se provádí výpočet koncentrace uvolnění kouře. Zatímco se rychlost proudění vzduchu snižuje a dosahuje podmínek při nezapnuté ventilaci, rychlost uvolňování kouře a tepla se bude zvyšovat podle modelového požáru. Takže koncentrace kouře se náhle zvýší, což způsobí nárůst množství kouře v délce tunelu.

Obrázek 10 ukazuje oblast v zasaženém tubusu s průměrnou viditelností menší než 10 m v podélném směru tunelu. Zóna vysoké koncentrace kouře je důsledkem proudění vzduchu v tunelu. Kouř se bude nejdříve šířit ve směru jízdy vlaku až ke km 23. V důsledku ventilace se otočí směr proudění kouře. Kouřový sloupec se zastaví. Je zabráněno dalšímu šíření kouře směrem k portálu Beroun. Po 10 min bude oblast kouře s průměrnou viditelností menší než 10 m pokrývat plochu asi 1 km. V důsledku ventilace v podélném směru se po 20 min bude kouř nacházet pouze před požárem, tj. mezi místem požáru a ventilační šachtou.

Cestující nacházející se za místem požáru, tj. cestující v zadní části vlaku, mohou uniknout bez větších problémů. Kouřová stopa za vlakem bude mít nízkou koncentraci, tj. s viditelností větší než 10 m.

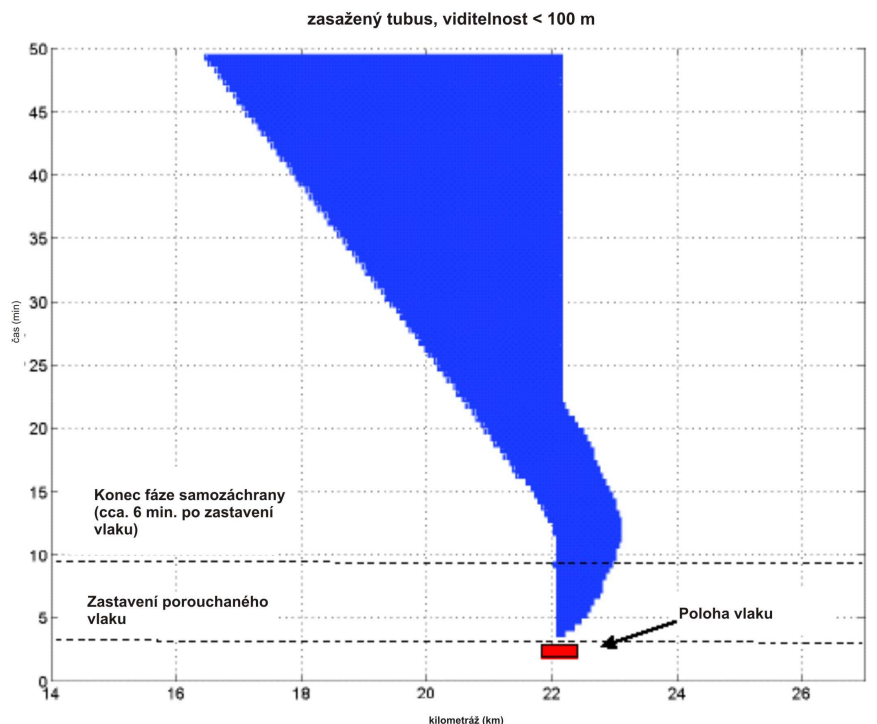
Pro cestující před místem požáru se předpokládají koncentrace kouře s průměrnou viditelností nižší než 10 m. Tento výsledek vychází z jednorozměrové simulace. Jak bylo vysvětleno v kapitole 7.8, výsledky jednorozměrových simulací vedou k vyšším koncentracím kouře, než jaké mohou skutečně nastat ve výšce chodníku nebo evakuační stezky pro cestující. Tyto vrstvy horkého kouře však mohou být rozrušeny turbulencemi při rychlostech proudění vyšších než 2 m/s.

Název akce	Praha - Beroun, nové železniční spojení	stránka	/	celkem
Vypracoval	HBI	18	/	25



Obrázek 10: Viditelnost v podélném směru tunelu menší než 10 m

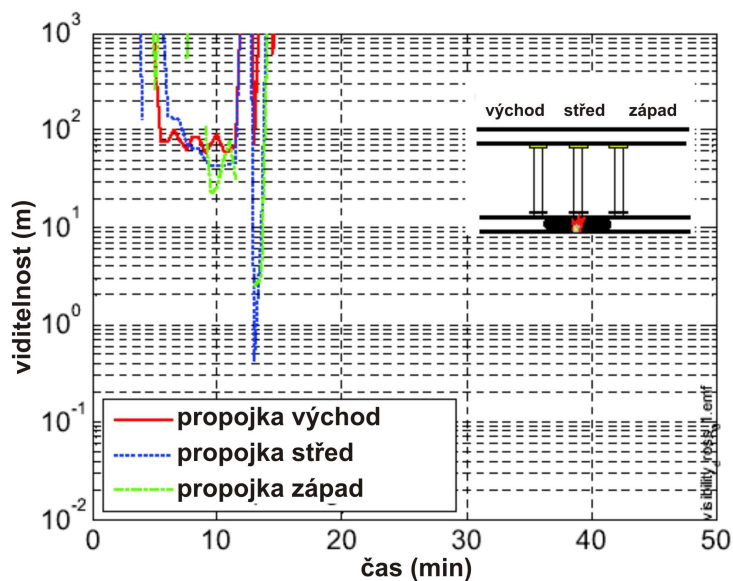
Obrázek 11 znázorňuje výsledky stejné simulace, ale pro oblast tunelu s viditelností menší než 100 m. Podle očekávání tato oblast zahrnuje větší část zasaženého tubusu.



Obrázek 11: Viditelnost v podélném směru tunelu menší než 100 m

Obrázek 12 znázorňuje viditelnost v propojkách. Viditelnost během fáze samozáchrany je menší než 100 m. V propojce nacházející se v blízkosti požáru vlaku se viditelnost ve velmi krátké době sníží pod 10 m. Po spuštění ventilace tunelu zůstane viditelnost nad 100 m.

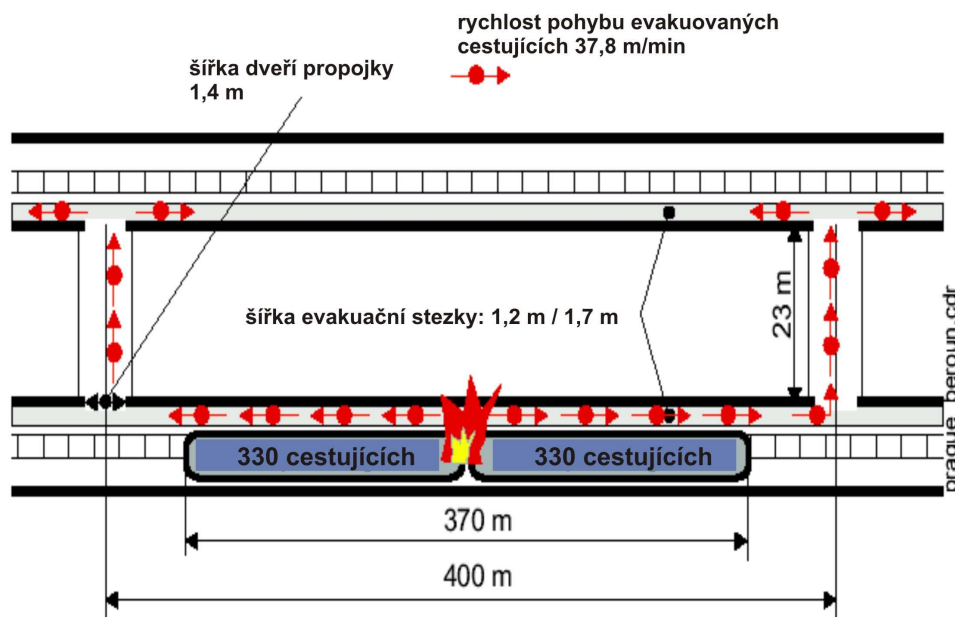
Název akce	Praha - Beroun, nové železniční spojení	stránka	/	celkem
Vypracoval	HBI	19	/	25



Obrázek 12: Viditelnost v propojkách

## 8.2. Výsledky jednorozměrových simulací evakuace

První scénář evakuace je zobrazen v Obrázku 13. Tento Případ A představuje optimistický scénář. Polovina cestujících se evakuuje přes jednu propojku, tj. každým směrem půjde 330 cestujících.



Obrázek 13: Případ A: Optimistický scénář simulací evakuace

Jak je uvedeno v tabulce 4, celková doba evakuace všech 660 cestujících ze zasaženého tubusu je asi 6 min. Určujícím faktorem pro takovou dobu evakuace je omezená rychlost chůze 37,8 m/min (6 min pro 223 m). Takováto „velmi malá“ rychlost chůze byla stanovena z důvodu zohlednění omezené viditelnosti.

Název akce	Praha - Beroun, nové železniční spojení	stránka	/	celkem
Vypracoval	HBI	20	/	25

*Tabulka 4: Výsledky pro případ A: Optimistický scénář simulací evakuace*

Parametr	Výsledek pro evakuační stezku širokou 1,2 m <sup>1</sup>	Výsledek pro evakuační stezku širokou 1,7 m
Rychlost pohybu evakuovaných cestujících	37,8 m / min	37,8 m / min
Kapacita evakuační stezky	0,0819 osob / mm min	0,0819 osob / mm min
Kapacita evakuační stezky	98,28 osob / min	<b>139,23</b> osob / min
Kapacita dveří	0,0893 osob / mm min	0,0893 osob / mm min
Kapacita dveří o šířce 1,4 m	125 osob / min	<b>125</b> osob / min
Doba evakuace	<b>5 min 53 s</b>	<b>5 min 53 s</b>

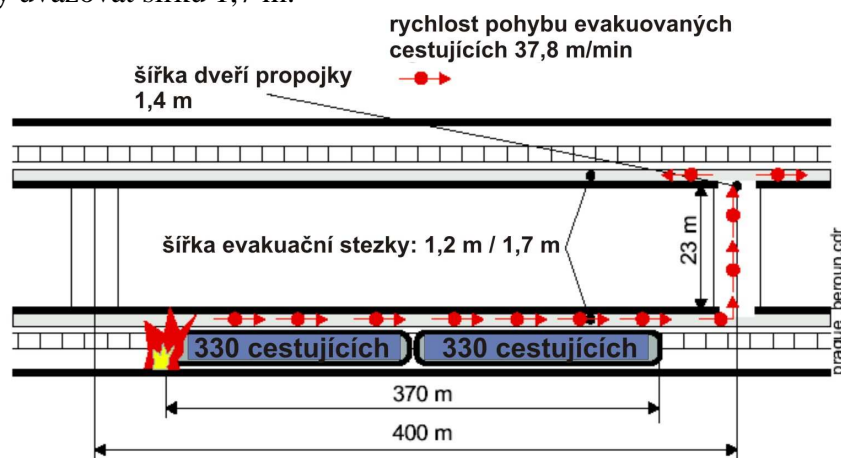
Tato metoda rychlosti pohybu cestujících přináší poměrně dlouhé doby evakuace, protože podle nové verze NFPA 130, edice 2007, byla rychlost pohybu evakuovaných cestujících větší než 60 m/min (viz [6]). V nové edici NFPA 130 je uvedena rychlost pohybu 37,8 m/min. Ve starších edicích NFPA 130 byla tato rychlost 37,8 m/min uváděna jako rychlost pohybu evakuovaných cestujících, kteří stoupají po schodišti.

Doba pro opuštění vlaku je limitovaná kapacitou evakuační stezky, tj. její velikostí. Stezka se šířkou 1,2 m má kapacitu 98,28 osob za minutu. Chodník o šířce 1,7 m má kapacitu 139 osob za minutu. Pokud nebude tok cestujících na chodníku rovnoměrně rozložen, lze u dveří propojky předpokládat čekací nebo shromažďovací dobu. Omezujícím faktorem bude kapacita dveří propojky, protože ty mají nižší propustnost, než evakuační stezka. V závislosti na počtu evakuovaných lidí a kapacitě dveří se mohou dveře propojky stát slabinou celé evakuace.

Vstup do bezpečného tunelu z propojky by neměl způsobovat čekací dobu, protože z každých dveří propojky mohou cestující zamířit vlevo nebo vpravo.

Druhý scénář evakuace je znázorněn v obrázku 14. tento případ B představuje konzervativní scénář. Všichni cestující se budou evakuovat pouze přes jednu propojku, tj. 660 cestujících se bude na chodníku pohybovat jedním směrem.

<sup>1</sup> Poznámka k této předběžné zprávě: Je zapotřebí vyjasnit si s Metroprojektem, zda lze pro všechny propojky uvažovat šířku 1,7 m.


*Obrázek 14: Příklad B: Konzervativní scénář simulací evakuace*

Název akce	Praha - Beroun, nové železniční spojení	stránka	/	celkem
Vypracoval	HBI	21	/	25



Jak je uvedeno v tabulce 5, celková doba evakuace všech 660 cestujících ze zasaženého tubusu je asi 11 min. Určujícím faktorem je opět rychlost pohybu (rychlost chůze 37,8 m/min na vzdálenost 408 m je ve výsledku 11 min). Pokud se uvažuje rovnoměrné rozložení cestujících na chodníku, nebude rozměr dveří propojky omezujícím faktorem. Může se však stát omezujícím faktorem, pokud by došlo k nerovnoměrnému rozložení cestujících na chodníku. V takovémto případě se musí u dveří propojky předpokládat čekací nebo shromažďovací dobu, protože dveře mají menší propustnost než evakuační stezka. Kapacita evakuační stezky je 196 osob za minutu a kapacita dveří propojky je 125 osob za minutu.

Tabulka 5: Výsledky pro případ B: Konzervativní scénář simulací evakuace

Parametr	Výsledek pro evakuační stezku širokou 1,2 m
Kapacita 2. evakuační stezky	196,56 osob / min
Kapacita dveří	0,0893 osob / mm min
Kapacita dveří o šířce 1,4 m	<b>125 osob / min</b>
Dostatečná šířka dveří propojky	<b>2'200 mm</b>
<b>Doba evakuace</b>	<b>10 min 55 s</b>

Slabinou celé evakuace se mohou stát dveře propojky, pokud se bude používat pouze jediná propojka a jestliže se tato propojka bude nacházet v místě stojícího vlaku. Cestující potom budou přicházet ze dvou směrů k jednomu dveřím propojky. V takovémto případě by byla vyhovující šířka dveří propojky cca. 2,2 m.

## 9. Závěry

Obecně lze konstatovat, že koncept tunelu a jeho ventilace odpovídá obdobným vysokorychlostním železničním tunelům v Evropě, které se v současné době budují. Počet a rozměry propojek, velikost chodníků a výkon ventilačního systému odpovídají nebo převyšují základní mezinárodní požadavky.

### 9.1. Závěry týkající se šíření kouře

Hlavní zjištění ze simulace šíření kouře jsou následující:

- Podle očekávání pro zkoumaný scénář se kouř bude nejdříve šířit ve směru pohybu vlaku. Během fáze samozáchrany bez spuštěné ventilace tunelu bude zóna zaplněná kouřem s viditelností menší než 10 m sahát do vzdálenosti několika stovek metrů od požáru ve směru jízdy vlaku. Tomuto základnímu jevu nelze zabránit ani použitím odpovídajících technologií. Viditelnost ve výšce evakuovaných cestujících bude lepší než předpokládaná na základě jednorozměrové simulace.
- Pomocí zvoleného ventilačního systému lze regulovat šíření kouře v podélném směru tunelu (definované podmínky/přístup pro záchranou službu po 20 min). Pro daný scénář je dosažená kritická rychlost.
- Během fáze samozáchrany umožňuje ventilace propojek omezení koncentrace kouře v otevřených propojkách, avšak nedokáže beze zbytku zabránit chvilkovému vniknutí kouře do propojky.
- Po ukončení fáze samozáchrany ventilace tunelu vytvoří rozdílné rychlosti proudění vzduchu v nezasaženém tubusu (přívodní kapacita 180 m<sup>3</sup>/s) a zasaženém tubusu (odvětrávací kapacita 220 m<sup>3</sup>/s) a zabráni tak vniknutí kouře do nezasaženého tubusu. V nezasaženém tubusu se udržuje viditelnost > 100 m.

Název akce	Praha - Beroun, nové železniční spojení	stránka	/	celkem
Vypracoval	HBI	22	/	25

## 9.2. Závěr pro simulace evakuace

Hlavní zjištění výpočtů dob evakuace jsou následující:

- Podle konzervativních předpokladů se uvažuje maximální doba samozáchrany asi 11 min. Za příznivějších okolností lze uvažovat, že fáze samozáchrany bude trvat 6 min.
- Rychlosti chůze podle NFPA 130 ([6]) jsou nižší ve srovnání s ostatními směrnicemi; zejména při dobré viditelnosti.
- Šířka chodníku 1,2 m je přijatelná. NFPA 130 požaduje pouze 0,61 m. TSI požaduje 0,75 m ([9]).
- V závislosti na scénáři je omezujícím faktorem šířka dveří propojky.
- Doby samozáchrany mohou být kratší za předpokladu poskytnutí včasných a jasných informací (oznámení, nepřehlédnutelný systém značek, madla, viditelnost >> 10 m, atd.)
- Pokud by vlak zastavil přímo před propojkou, slabinou se stane propustnost dveří o šířce 1,4m a bude mít za následek vznik čekací doby. Dveře propojky o šířce 2,2 m by zajistily dostatečnou propustnost.

Cestující evakuovaní směrem dopředu od požáru budou vystaveni kouři. Z důvodu jednorozměrové metody výpočtů šíření kouře nelze přesně stanovit koncentraci kouře ve výšce evakuovaných cestujících. Také není potvrzeno, zda je či není přijatelná hodnota koncentrace kouře ve vztahu k době evakuace a době vystavení kouři.

## 10. Doporučení

Na základě analýzy parametrů ventilace a evakuace obsažených v této zprávě byla odvozena následující doporučení:

### 10.1. Doba zahájení ventilace v nezasaženém tubusu

Je vhodné, aby v zasaženém tunelu nedošlo k žádným zásadním vzduchovým poruchám. Konkrétně se nedoporučuje měnit směr proudění vzduchu během fáze samozáchrany. Pokud by ventilace v zasaženém tubusu měla způsobit obrácení proudění, musí se zapnout teprve po skončení fáze samozáchrany.

Ventilace v nezasaženém tubusu by však měla být spuštěna okamžitě po aktivaci alarmu. Tím se spolehlivěji zabráni vniknutí kouře do otevřených propojek a/nebo se sníží koncentrace jakéhokoli zbytkového kouře v nezasaženém tubusu. Je možné, že včasné spuštění může nahradit ventilaci propojek nebo snížit počet instalací v propojkách nacházejících se v blízkosti portálů.

### 10.2. Nepříznivé mezní podmínky

Tato studie proudění vzduchu a kouře vyvolaného pohybem vlaku a ventilací vychází pouze z jednoho standardního scénáře. Může však dojít ke vzniku více nepříznivých mezních podmínek. Například:

- Silný vítr u jednoho z portálů
- Termální proudění v tunelu po větru a proti větru z důvodu termálních vlivů
- Současné otevření několika dveří propojek
- Vlak zastaví v blízkosti portálu, kde jsou malé rozdíly mezi propojkami z důvodu ventilace tunelu
- Porucha ventilátoru, tj. požadavek na záložní kapacitu / navýšení kapacity
- Zablokování tunelu jiným vlakem
- Ventilace v jiných tunelových větvích a jejich propojkách v blízkosti portálu

Tyto další nepříznivé mezní podmínky mohou způsobit, že ventilace nebude poskytovat dostatečný

Název akce	Praha - Beroun, nové železniční spojení	stránka	/	celkem
Vypracoval	HBI	23	/	25



výkon. Tyto aspekty je však zapotřebí zohlednit při navrhování parametrů systému ventilace.

### 10.3. Koncept ventilace propojek

Propojky jsou vybavené nákladnými ventilačními systémy. Obrázek 12 však ukazuje, že kouř může do propojky přechodně vniknout. Takže samotná ventilace propojek nepostačuje k tomu, aby je zabránila pronikání kouře do propojek. Podmínky by se mohly zlepšit včasným zapnutím ventilace v přívodním režimu pro nezasazený tubus (viz výše, část 10.1). Protože stávající koncept ventilace propojek nesplňuje požadavky, stojí za zvážení zjistit, zda je vůbec jeho instalace nezbytná. To však rovněž vyžaduje ověření požadavků pro provoz v normálním, údržbovém, přetíženém a nouzovém režimu. Doporučuje se znovu ověřit návrh ventilace propojek s cílem optimalizovat jeho funkci a snížit investice.

### 10.4. Ventilace během fáze zásahu externích záchranných jednotek

Doporučujeme provést kontrolu splnění požadavků na ventilaci během fáze zásahu externích záchranných jednotek. Pokud se pro odvětrání kouře použije pouze ventilace tunelu, potom je nutné určit, ze které strany bude veden zásah proti požáru. Tím se definuje přístupová strana pro požární jednotky. Pokud o straně zásahu budou flexibilně rozhodovat požární jednotky, potom je nutné, aby bylo možné kouř odvětrat z obou směrů podle aktuálních potřeb. V takovémto případě je nutné, aby ventilátory umožňovaly oboustranný provoz.

### 10.5. Detailní třírozměrná analýza simulace šíření kouře a evakuace

Cílem této zprávy je prozkoumání hodnot typických dob evakuace. V této fázi projektu je vhodné použít jednoduchou metodu a provést analýzu dob evakuace pomocí korelací a metod, které jsou navrhnuté v NFPA 130 ([6]). V pozdější fázi projektu doporučujeme provést mnohem podrobnější numerické studie v kombinaci s trojrozměrnou studií šíření kouře. To umožní provedení detailní analýzy a potvrzení evakuačních podmínek v oblasti před požárem. Očekáváme, že výpočty potvrdí přijatelné doby evakuace cestujících.

Stávající návrh tunelu Praha-Beroun splňuje požadavky TSI na frekvenci a velikost propojek (viz [9]; TSI: každých 500 m a minimální šířka dveří 1,4 m; současná projekce pro tunel Praha-Beroun: každých 400 m a minimální šířka dveří 1,4 m). Eventuálně by bylo možné provést optimalizaci počtu a velikosti propojek. Například větší vzdálenost mezi propojkami se širšími dveřmi by mohly přinést stejné kvalitativní parametry evakuace při nižších investicích. V obdobných projektech se používají širší dveře pro stejnou šířku propojek. Koncept dveří je nutné definovat co možná nejdříve (posuvné dveře, závěsné dveře, nové systémy, atd.).

### 10.6. Směrnice pro strojvedoucího

Při vzniku požáru nastává dilema, zda vlak zastavit v tunelu nebo s ním vyjet ven z tunelu. Na jedné straně jsou podmínky pro bezpečnou evakuaci z hořícího vlaku mnohem lepší mimo tunel než v tunelu. Rovněž zásah záchranných jednotek je mnohem efektivnější a bezpečnější, pokud se provádí mimo tunel. Na druhé straně se s časem rychle zvětšuje množství uvolněného kouře a tepla. Po začátku požáru je množství kouře a tepla takové, že se jeho koncentrace účinně sníží charakteristickým prouděním vzduchu vyvolaným náhlým zastavením vlaku v tunelu. Pouze v pozdější fázi požáru vede uvolňování tepla a kouře k vytvoření nepříjemných podmínek v tunelu. Takže, jakmile je zjištěn požár, je nutné učinit rozhodnutí, zda má vlak okamžitě zastavit, nebo zda se má pokusit dosáhnout druhého portálu.

Název akce	Praha - Beroun, nové železniční spojení	stránka	/	celkem
Vypracoval	HBI	24	/	25

Typický požár ve vlaku lze charakterizovat následujícími aspekty:

- dlouhé vzdálenosti mezi strojvedoucím, ohniskem požáru a personálem
- omezený počet obsluhujícího personálu ve vlaku
- omezený přístup k ohnisku požáru pro další rozhodnutí
- omezená možnost komunikace obsluhujícího personálu se strojvedoucím

V důsledku těchto mezních podmínek strojvedoucí pravděpodobně nebude schopen učinit racionální rozhodnutí na základě získaných informací. Proto se musí pro strojvedoucího připravit základní pokyny, zda má vlak zastavit nebo se pokusit o vyjetí z tunelu.

Doporučujeme sestavit příručku obsahující informace o tom, zda se má vlak pokusit o opuštění tunelu či nikoliv. Po spuštění požárního alarmu a zjištění požáru doporučujeme vlak ihned zastavit, pokud se vlak stále nachází v určité vzdálenosti od výjezdového portálu (např. více než 5 km).

Jakékoliv výjimky od této zásady by měly vycházet z výslovného doporučení obsluhujícího personálu strojvedoucímu.

## 11. Další postup práce

Tuto zprávu lze použít jak podklad pro další studie a detailní rozpracování problémů uvedených v této práci. Doporučujeme zvážit následující hlavní kroky:

- Projednání předpokladů uvedených v této studii s orgány dozoru nad bezpečností
- Prošetření možností požadovaných úprav
- Provedení optimalizace evakuačních prostředků
- Provedení optimalizace systému ventilace
- Potvrzení funkčnosti systémů pomocí výpočtů

Další práce definuje klient.

Název akce	Praha - Beroun, nové železniční spojení	stránka	/	celkem
Vypracoval	HBI	25	/	25