

TP229

**MINISTERSTVO DOPRAVY
ODBOR SILNIČNÍ INFRASTRUKTURY**

BEZPEČNOST V TUNELECH POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

TECHNICKÉ PODMÍNKY



Eltodo EG a.s.

TP229

**MINISTERSTVO DOPRAVY
ODBOR SILNIČNÍ INFRASTRUKTURY**

BEZPEČNOST V TUNELECH POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ



TECHNICKÉ PODMÍNKY

Schváleno MD - OSI, čj. 1014/10-910-IPK/1 s účinností od 1. prosince 2010

© ELTODO EG a.s.
2010



Ministerstvo dopravy

nábřeží Ludvíka Svobody 1222/12
PO BOX 9, 110 15 Praha 1

Pragoprojekt, a.s.
K Ryšánce 16
147 54 Praha 4


Váš dopis značky / ze dne /	Naše značka 1014/2010-910-IPK/1	Vyřizuje / linka Mráz Václav, Mgr. / 225 131 681	Praha 22.11.2010
--------------------------------	------------------------------------	---	---------------------

Věc: Schválení TP 229 Bezpečnost v tunelech pozemních komunikací

Sdělujeme Vám, že návrh výše uvedených TP (předložený zpracovatelem 30. 8. 10) byl schválen MD – OSI čj. 1014/10-910-IPK/1 ze dne 22.11.10, s účinností od 1. prosince 2010; ev.č. TP 229.

Schvalovací doložku doplňte na titulní straně. Před obsah zařadíte 1 stranu stanoviska MV GR HZS ČR z 15.9.10. Dílčí připomínky Vám byly předány.

Očekáváme, že tisk a distribuci TP 229 na objednávky uživatelů bude zabezpečovat firma Eltodo. MD zajistí informaci o vydání TP a požádá ŘSD o objednání tisku pro vybrané silniční organizace. Žádáme o předložení tiskové i elektronické konečné verze TP. Také předpokládáme umístění TP 229 na CD ČKAIT-MD.


Ing. Josef Kubovský
ředitel
Odbor silniční infrastruktury

Co: Eltodo
ŘSD





MVCRX00EBUY2
prvotní identifikátor

MINISTERSTVO VNITRA
generální ředitelství Hasičského záchranného sboru České republiky
Kloknerova 2295/26, Praha 414, 148 01

Č. j. MV- 86002-2/PO-PRE-2010

Praha 15. září 2010

Počet listů: 1

Ministerstvo dopravy
odbor silniční infrastruktury
nábř. L. Svobody 12
110 15 Praha 1

Technické podmínky Bezpečnost v tunelech pozemních komunikací

Technické podmínky Bezpečnost v tunelech pozemních komunikací (dále jen „TP“) dávají přehled o celém procesu a metodách analýzy rizik doporučených pro přezkoumávání bezpečnosti tunelů pozemních komunikací. Řízení rizik je trvalý proces mapující celou dobu provozování tunelu.

Tyto „TP“ umožní v několika krocích posuzovat stavební i technologické vybavení tunelu z hlediska bezpečnosti. Jsou základem pro systémově sjednocené hodnocení míry rizika a bezpečnosti tunelových staveb v České republice. Cílem těchto podmínek je stanovení principiálních zásad pro posuzování míry bezpečnosti tunelového systému pro dopravní veřejnost. Vhodnou volbou použitých prvků a zařízení se do jisté míry eliminuje vznik dopravních událostí nebo se alespoň snižují jejich následky, což se samozřejmě projeví i na snížení ekologických dopadů a úsporu nákladů na likvidaci následků. I proto je ze strany Ministerstva vnitra – generálního ředitelství Hasičského záchranného sboru České republiky vítáno vydání těchto „TP“.

Ministerstvo vnitra – generální ředitelství Hasičského záchranného sboru České republiky souhlasí s jejich vydáním.

brig. gen. Ing. Miloš Svoboda
náměstek generálního ředitele HZS ČR
Podepsáno elektronicky

Vyřizuje: kpt. Ing. Lukáš Foukal, tel.: 950 819 860, e-mail: lukas.foukal@grh.izs.cz

Obsah

VŠEOBECNĚ	7
ÚVOD	8
TERMÍNY A DEFINICE	8
KATEGORIE BEZPEČNOSTI TUNELŮ	11
PŘEHLED METOD PRO ANALÝZU RIZIK	12
METODY ANALÝZY A ŘÍZENÍ RIZIK	12
<i>Výběr metod pro analýzu rizik</i>	<i>13</i>
PROCES ŘÍZENÍ RIZIKA – SHRNUÍ	15
<i>Vztah analýzy scénářů a kvantitativní analýzy rizik</i>	<i>17</i>
ZÁVĚR	18
AKCEPTOVÁNÍ RIZIKA	19
INDIVIDUÁLNÍ RIZIKO	19
SPOLEČENSKÉ RIZIKO	19
EKONOMICKÉ RIZIKO	22
ENVIRONMENTÁLNÍ RIZIKO	24
PŘIJATELNÉ SPOLEČENSKÉ RIZIKO	24
<i>Interpretace výsledků</i>	<i>25</i>
ZÁVĚR	25
KATEGORIE A ČETNOSTI UDÁLOSTÍ	26
TYPY UDÁLOSTÍ	26
<i>Zastavení vozidla</i>	<i>26</i>
<i>Nehoda</i>	<i>26</i>
<i>Požár</i>	<i>26</i>
ANALÝZA ZAHRANIČNÍCH ÚDAJŮ	27
<i>Četnosti událostí dle Rakouské směrnice</i>	<i>27</i>
<i>Četnosti událostí dle německého předpisu</i>	<i>28</i>
<i>Porovnání rakouské směrnice, německého předpisu a dat z českých tunelů při určování četnosti nehod a požárů</i>	<i>30</i>
ZÁVĚR	31
ROZLOŽENÍ VOZIDEL V OKAMŽIKU NEHODY	32
ROZLOŽENÍ VOZIDEL V TUNELU	32
MOŽNOSTI EVAKUACE Z TUNELU	34
PROCEDURA EVAKUACE	34
MODEL EVAKUACE	35
<i>Zjednodušený model front</i>	<i>35</i>
<i>Modely evakuace založené na simulačních programech</i>	<i>40</i>
ZÁVĚR	44
KVALITATIVNÍ RIZIKOVÁ ANALÝZA	45
METODA „KONTROLNÍ SEZNAM“	45
<i>Identifikátor bezpečnostního řešení tunelu pozemní komunikace</i>	<i>45</i>
ANALÝZA RIZIK METODOU SAFMEA	48
3.2.2. Pracovní postup	49
ZÁVĚR	53
KVANTITATIVNÍ ANALÝZA- METODA STROMKOVÝCH DIAGRAMŮ	54
ÚVOD	54
<i>Metoda FTA</i>	<i>55</i>
ČETNOST NÁSLEDKŮ ETA	56

MODEL QRA	58
METODA ANALÝZY SCÉNÁŘŮ	60
SEKVENČNÍ DIAGRAM ZÁCHRANY OSOB	60
PROCEDURA EVAKUACE	61
MODEL EVAKUAČNÍHO PROCESU	62
POSTUP ŘEŠENÍ	64
ODHAD MORTALITY	66
ODHAD MORTALITY DLE NĚMECKÉ SMĚRNICE	66
ODHAD MORTALITY DLE RAKOUSKÉ SMĚRNICE	67
POŽADAVKY NA ZÁZNAM UDÁLOSTÍ.....	70
TECHNICKÉ ŘEŠENÍ.....	70
ZÁZNAM UDÁLOSTÍ	70
ORGANIZACE A PLNĚNÍ	71
DOPORUČENÝ POSTUP – SHRUTÍ.....	73
ZÁVĚR	74
LITERATURA	74
PŘÍLOHA.....	76
JEDNOTNÁ METODIKA PRO ANALÝZU NÁKLADŮ A PŘÍNOSŮ	76
Z HLEDISKA BEZPEČNOSTNÍHO VYBAVENÍ TUNELŮ POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ.....	76
A. PRINCIPY METODY PRO HODNOCENÍ NÁKLADŮ A PŘÍNOSŮ	77
A.1 STRUKTURA ANALÝZA NÁKLADŮ A PŘÍNOSŮ.....	77
A.2 VYČÍSLENÍ PŘÍNOSŮ UVAŽOVANÝCH INVESTIC.	77
A.2.1 <i>Hodnocení systémů včasné informovatelnosti</i>	78
A.2.2 <i>Vyčíslení přínosů preventivních opatření</i>	79
A.3 HODNOCENÍ KATEGORIE BEZPEČNOSTI TUNELU	79
A.3.1 <i>Volba typu fuzzy systému</i>	80
A.3.2 <i>Nastavení lingvistických proměnných</i>	80
A.3.3 <i>Přístup k nastavování inferenčního mechanismu</i>	84
A.4 HODNOCENÍ PROVOZNÍCH A INVESTIČNÍCH NÁKLADŮ	85
B. PŘÍKLAD HODNOCENÍ.....	86
B.1 ZADÁNÍ ZÁKLADNÍCH PARAMETRŮ TUNELU	86
B.2 ZADÁNÍ PARAMETRŮ PRO C/B ANALÝZU	86
B.3 VOLBA PROVOZNÍCH SOUBORŮ VYBAVENÍ TUNELU	86
B.4 DOPLŇUJÍCÍ VÝPOČTOVÉ PARAMETRY	87
B.5 NÁKLADY NA JEDNOTLIVÉ TECHNOLOGIE.....	87
B.6 NASTAVENÍ SOCIO-EKONOMICKÝCH PARAMETRŮ	87
B.7 VÝSTUPNÍ STRUKTURA CBA	88
B-8 VÝSLEDEK HODNOCENÍ ANALÝZY NÁKLADŮ A PŘÍNOSŮ	89
REFERENCE.....	89

Určení technických podmínek

Technické podmínky jsou určeny projektantům, pověřeným osobám, investorům, správcům a provozovatelům, dále silničním správním orgánům a orgánům a subjektům zodpovědným za bezpečnost tunelů pozemních komunikací. Těmto organizacím dávají přehled o celém procesu a metodách rizikové analýzy doporučených pro přezkoumávání bezpečnosti tunelů pozemních komunikací. Technické podmínky nedávají návod, jak analýzu provádět, protože to je záležitost specialistů s dostatkem teoretických i praktických znalostí. Základní myšlenkou je, že řízení rizik je trvalý proces mapující celou dobu provozování tunelu.

Souhlas s řešením vybavení tunelů na pozemních komunikacích, které se z hlediska bezpečnosti odchyluje od navržených standardů, může vydat Ministerstvo dopravy po souhlasu dotčených ústředních správních úřadů a to na základě podrobné analýzy rizik.

VŠEOBECNĚ

Technické podmínky „Bezpečnost v tunelech pozemních komunikací“ (dále TP) umožní v několika krocích posuzovat stavební i technologické vybavení tunelu z hlediska bezpečnosti a to i z hlediska NV č. 264/2009 Sb. o bezpečnostních požadavcích na tunely pozemních komunikací, lit. [1].

V prvním jednodušším kroku se pomocí metod kvalitativní analýzy „Kontrolní seznam“ a/nebo SAFMEA posuzuje, zda tunelové vybavení vyhovuje z hlediska bezpečnosti platným národním standardům, výše uvedenému nařízení vlády a Evropské direktivě 54/2004/ES „Directive of the European Parliament and of the Council on Minimum Safety Requirements for the Tunnels in the Trans-European Road Network“, lit. [2].

Ve druhé etapě se provádí kvantitativní ohodnocení tunelu a stanovuje se pravděpodobnost ohrožení zdraví účastníků provozu na pozemních komunikacích vedoucích tunelem. Doporučuje se využití metody pravděpodobnostních stromů, resp. metody QRA, která byla vytvořena a je podporována Mezinárodní silniční asociací PIARC. Dále je popsána metoda CAPITA, která patří do skupiny metod analýzy scénářů. Ta umožňuje hodnotit i kvalitu technologického vybavení tunelu ve vztahu na počty ohrožených osob.

TP jsou základem pro systémově sjednocené hodnocení míry rizika a bezpečnosti tunelových staveb v České republice. Trvalé hodnocení tunelů pozemních komunikací je požadováno směrnicí Evropské komise a parlamentu 54/2004/ES.

Úvod

Cílem těchto technických podmínek je stanovení principiálních zásad pro posuzování míry bezpečnosti tunelového systému pro dopravní veřejnost.

Vhodnou volbou použitých prvků a zařízení se do jisté míry eliminuje vznik dopravních událostí nebo se alespoň snižují jejich následky, což se samozřejmě projeví i na snížení ekologických dopadů a úsporu nákladů na likvidaci následků. Žádnou událost nejde zcela eliminovat, ať už se jedná o pouhé zastavení vozidla, dopravní nehodu nebo požár. Provozovatel tunelu musí mít stále na paměti, že i ze zdánlivě malé a nepodstatné události může vzniknout velká a závažná událost, jejíž následky mohou mít vysoké materiální ztráty a, co je závažnější, může vzniknout velká škoda na lidských životech (úmrtí či závažné úrazy).

Termíny a definice

Terminologie má při analýze a řízení rizik zásadní význam. Vzhledem k tomu, že v žádném národním dokumentu není tato terminologie ve vztahu k tunelům pozemních komunikací řešena, je v této kapitole převzat základní přehled terminologie z projektu ministerstva dopravy „Analýza a řízení rizik tunelů pozemních komunikací“ (řešitel Eltodo EG, 2001-3):

Přijatelné riziko (Acceptable risk): Stupeň rizika, které ještě není jednotlivcem nebo společností vnímáno jako vážné, a které může být považováno za referenční bod v kritériu rizik.

Pozn.: Lze očekávat, že vnímání rizik určitou společností ovlivní kulturní, společenská, psychologická, ekonomická a další hlediska.

Analýza příčin (Causal analysis): Postup pro popsání a/nebo výpočet pravděpodobnosti příčin příznivých i nepříznivých jevů.

Následek (Consequence): Možný výsledek očekávaných nebo neočekávaných jevů.

Pozn.: Následek může být slovní nebo číselné vymezení ztrát lidských životů, zranění nebo ekologických škod a ekonomických ztrát

Analýza následků (Consequence analysis): Systematický postup použitý k popisu a/nebo výpočtu následků.

Kritéria rizika (Criteria of risk): Referenční body, které se používají k hodnocení výsledků analýzy rizik. Kritéria se obecně opírají o ustanovení směrnic a norem, zkušenosti a teoretické poznatky použité jako podklad pro rozhodnutí o přijatelném riziku.

Pozn.: Kritéria rizik mohou uvažovat různá hlediska včetně kulturních, společenských, psychologických, ekonomických a jiných [1]. Kritéria mohou být vyjádřena slovně nebo číselně [11].

Četnost (Frequency): Počet výskytů daného jevu za časovou jednotku.

Nebezpečí (Hazard): Řada okolností, které mohou způsobit jevy s možnými nežádoucími následky.

Pozn. 1: Nebezpečím může být řada okolností s teoreticky možným nepříznivým vlivem, jako jsou účinky vnějšího prostředí, nedostatečná pevnost nebo odolnost, nadměrné odchylky od zamýšlených rozměrů, výskyt nebezpečných chemikálií s možností nepříznivých následků [6].

Pozn. 2: V některých dokumentech (např. v návrhu EN1990 [19]), se nebezpečí (hazard) definuje jako jev, zatímco v rizikové analýze jako podmínka pro vznik jevu. V analýze rizik je tedy nebezpečí (hazard) chápáno jako řada okolností, které nemusí nezbytně nastat.

Identifikace nebezpečí (Hazard identification): Postup rozpoznání nebezpečí a stanovení jejich charakteristik.

Scénář nebezpečí (Hazard scenario): Pořadí možných jevů s nežádoucími následky, které mohou nastat při daném nebezpečí.

Pozn.: Ke stanovení možných jevů, které mohou nastat u systému nebo jeho podsystémů, je třeba provést analýzu rizik. To vyžaduje podrobný rozbor systému do všech detailů.

Objektivní pravděpodobnost (Objective probability): Pravděpodobnost stanovená použitím teoretických argumentů nebo odpovídajících statistických dat.

Objektivní riziko (Objective risk): Odhadnuté riziko systému získané na základě teoretických argumentů nebo odpovídajících statistických dat (např. počet ročních očekávaných úmrtí při dopravních nehodách) nebo kvantifikovaných metod analýzy rizik (QRA).

Analýza alternativ (Option analysis): Postup použitý ke stanovení možných alternativ pro řízení rizik.

Pravděpodobnost (Probability): Věrohodnost nebo stupeň jistoty výskytu jednotlivých jevů v daném období nebo v průběhu daného časového intervalu.

Pozn.: Pravděpodobnost může významně záviset na době, ve které se mohou jednotlivé jevy vyskytnout.

Spolehlivost (Reliability): Schopnost systému nebo jeho částí plnit stanovené požadavky v průběhu daného časového intervalu (např. po dobu návrhové životnosti).

Pozn. 1: Spolehlivost se často vyjadřuje jako pravděpodobnost vztažená na danou podmínku a časový úsek [8], [9].

Pozn. 2: Spolehlivost s ohledem na mezní stavy únosnosti se často chápe jako bezpečnost, spolehlivost s ohledem na mezní stavy použitelnosti se často uvádí jako použitelnost [8], [9], [10].

Riziko (Risk): Očekávaný rozsah následků, nepříznivých jevů pro osoby, životní prostředí nebo ekonomické hodnoty. Riziko je zpravidla vyjádřeno jako součin pravděpodobnosti a následků.

Pozn. 1: Riziko se často odhaduje jako očekávaná hodnota následků nepříznivých jevů. Pak je to násobek (pravděpodobnost x následek). V obecnějším výkladu rizik se někdy udává pravděpodobnost a následek odděleně.

Toto pojetí je někdy užitečné, zejména když se uvažuje spektrum následků s rozdílnými pravděpodobnostmi výskytu, [6].

Pozn. 2: Obecně se rozlišují různé stupně rizik, např. přijatelné riziko, tolerovatelné riziko, objektivní riziko (viz definice těchto termínů), [11].

Analýza rizik (Risk analysis): Použití dostupných informací ke stanovení rizik sociálních, ekonomických a dalších pro jednotlivce, společnost, majetek nebo životní prostředí, s ohledem na daná nebezpečí.

Pozn.: Analýza rizik obecně zahrnuje definici rozsahu rozboru, identifikaci nebezpečí a odhad rizik.

Hodnocení rizik (Risk assessment): Postup použitý k odhadu rizik, jejich vyhodnocení a k analýze alternativ.

Pozn.: Hodnocení rizik se často rozumí identifikace nebezpečí a vyhodnocení rizik, které zahrnuje ověření rizik a analýzu alternativ (viz definici vyhodnocení rizik).

Komunikace o riziku (Risk communication): Výměna informací a domněnek, týkajících se rizika mezi hodnotiteli rizik, manažery rizik, zákazníky a dalšími zainteresovanými stranami.

Pozn.: Tato definice je převzata z dokumentu [8], podobné definice se uplatňují v normách [1] a [6]. Je třeba zdůraznit, že komunikace o riziku nezahrnuje pouze přenášení technických informací o riziku, ale širší pojetí vztahující se k názorům, reakcím atd.

Odhad rizik (Risk estimation): Postup použitý k odhadu míry rizika.

Pozn.: Odhad rizik je založen na identifikaci nebezpečí a obecně obsahuje následující kroky: vymezení rozsahu, rozbor četnosti, rozbor následků a jejich integraci, [6].

Vyhodnocení rizik (Risk evaluation): Postup použitý k ověřování rizik a k analýze alternativ.

Management rizik (Risk management): Kompletní postup hodnocení a řízení rizik.

Pozn.: Kompletní management rizik schematicky zachycuje obrázek 1, převzatý z normy [6].

Bezpečnost (Safety): Stav vhodné ochrany proti nehodě nebo zranění, vyloučení nebezpečí.

Pozn.: Ve spolehlivosti konstrukcí je bezpečnost často chápána jako spolehlivost vztažená na mezní stav únosnosti (viz definice spolehlivosti).

Management bezpečnosti (Safety management): Systematický postup přijatý organizacemi k dosažení a udržení stupně bezpečnosti, který plní stanovený účel.

Subjektivní pravděpodobnost (Subjective probability): Pravděpodobnost stanovená použitím intuice nebo příslušných zkušeností.

Systém (System): Ohraničená soustava souvisejících, vzájemně závislých nebo vzájemně působících prvků.

Pozn. 1: Tato definice naznačuje, že systém, který lze jednoznačně identifikovat, je vytvořen ze vzájemně působících prvků nebo subsystémů. Všechny prvky a hranice systému mají být tedy jednoznačně identifikovatelné.

Pozn. 2: V podmínkách technologických nebezpečí systém zpravidla zahrnuje fyzické subsystémy, sociální subsystémy, jejich management a životní prostředí, [6].

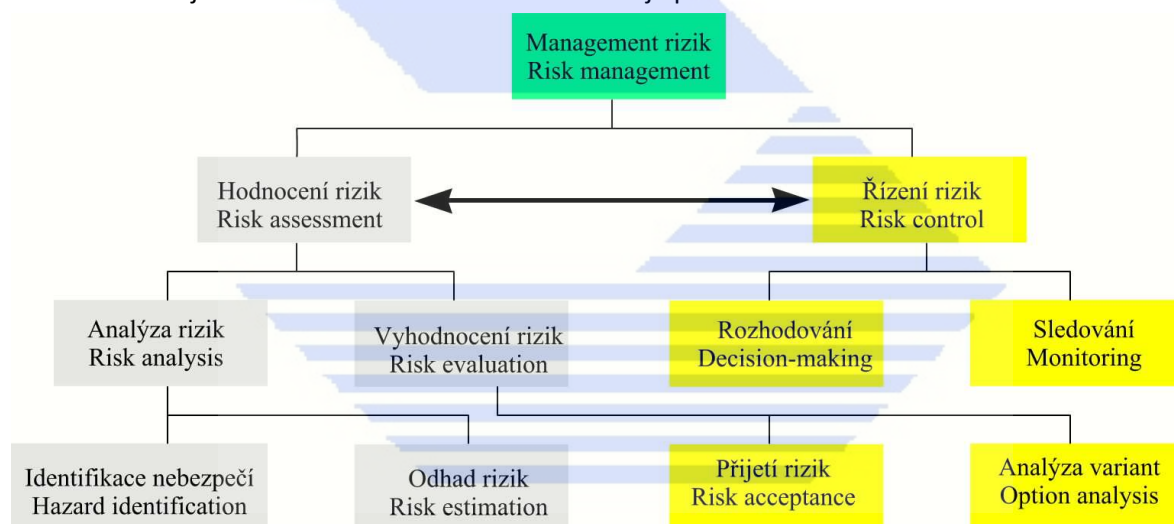
Tolerovatelné riziko (Tolerable risk): Stupeň rizika, které jsou jednotlivci nebo společnost ochotni podstoupit k zajištění jistých výhod za předpokladu, že riziko bude odpovídajícím způsobem řízeno.

Pozn.: Tolerovatelné riziko nemusí být zanedbatelné, musí však být pod stálou kontrolou.

Nepříznivé jevy (Undesired events): Jevy, které mohou způsobit smrtelné úrazy, zranění nebo ekologické nehody a ekonomické ztráty.

Na Obr. 1 je struktura managementu rizik. Management rizik má dvě větve – hodnocení rizik a řízení rizik. Hodnocení rizik se dále člení na analýzu a vyhodnocení rizik. Analýzou se rozumí zjištění jevů, které vedou ke vzniku ekonomických a sociálních ztrát nebo nepříznivého vlivu na životní prostředí – identifikace nebezpečí. Odhad rizik je postup, který je použit k odhadu míry rizika. Ten je založen na identifikovaném nebezpečí. V rámci odhadu rizik je zapotřebí vymezit hodnocený rozsah a z praktických zkušeností vytvořit přehled četnosti výskytu nepříznivého jevu. Vyhodnocení je potom postup použitý k vyhodnocování rizik, které mohou nastat vlivem jednotlivých nepříznivých jevů. V rámci tohoto kroku je také definováno přijatelné riziko a je vytvářena analýza jednotlivých očekávaných i neočekávaných následků.

Řízení rizik je velmi úzce spojeno s hodnocením rizik. Po vyhodnocení možných rizik musí dojít k jejich eliminaci na nejnížší možnou úroveň. Toho se dosahuje právě řízením rizik.



Obr. 1: Management rizik

Spolehlivost systému – míra pravděpodobnosti, že po jistou dobu či v jistém rozpětí jiných na systém působících nezávisle proměnných se jejich systémové funkce nebudou odchylvat od požadovaných hodnot více než o dovolené odchylky, [11].

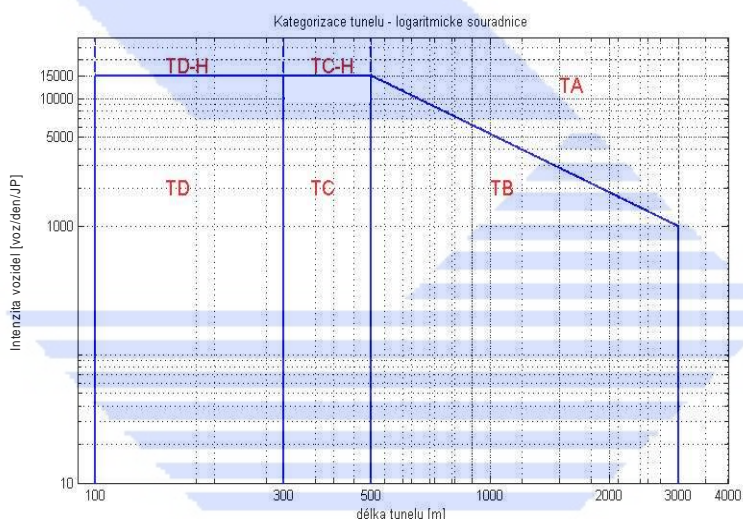
Bezpečnost systému – míra pravděpodobnosti, že ani činností těchto soustav, ani selháním jejich funkcí nedojde ke škodám a úhoně lidské společnosti a jejího životního prostředí, resp. určité skupiny lidí, [11].

KATEGORIE BEZPEČNOSTI TUNELŮ

Tunel je složitou a náročnou dopravní stavbou. Protože se jedná o uzavřený prostor, je nezbytně nutné ho vybavit takovým stavebním, technickým a technologickým zařízením, aby byla eliminována pravděpodobnost vzniku nebezpečných jevů na minimum. Pokud je toto vybavování prováděno ve shodě s NV č. 264/2009 Sb., normou pro projektování tunelů, lit. [3], ale hlavně dle technických podmínek TP98 a jejich změnou ([12], [13]) je do jisté míry zabezpečeno, že tunel bude vyhovovat požadavkům na přiměřenou bezpečnost. K tomu je nutné, aby se tunel provozoval ve smyslu TP154 a metodického pokynu k výuce obsluh tunelů ([14], [15]). Je to dáno tím, že všechny uvedené předpisy stanovují minimální požadavky na bezpečnost, které nezbytně musí návrh a provozování respektovat.

Na druhé straně je ale nezbytné zajistit, aby nedocházelo ke zbytečnému předimenzování bezpečnostních prvků a opatření. Proto jsou v řadě zemí zavedeny kategorie, kterým je přiřazena povinná a doporučená bezpečnostní výbava. Tyto kategorie jsou rozděleny podle délky tunelu a podle předpokládané intenzity provozu. Kombinací těchto dvou parametrů je dosaženo vždy, přibližně shodné, bezpečnosti z hlediska vybavení tunelů. V první verzi TP98 (vydání 1998) byly vytvořeny tři kategorie vybavení - kategorie TA, TB a TC, vycházející z doporučení mezinárodní silniční organizace PIARC.

Toto rozdělení bylo příliš hrubé, hlavně v oblasti krátkých tunelů, a proto byly zavedeny změnou TP98 (TP98-Z1) nové kategorie TD, TD-H a TC-H, viz Obr. 2.



Obr. 2: Kategorizace tunelů z hlediska bezpečnostního vybavení (logaritmické měřítko)

Detailní popisy jednotlivých kategorií lze najít v TP98-Z1/2010.

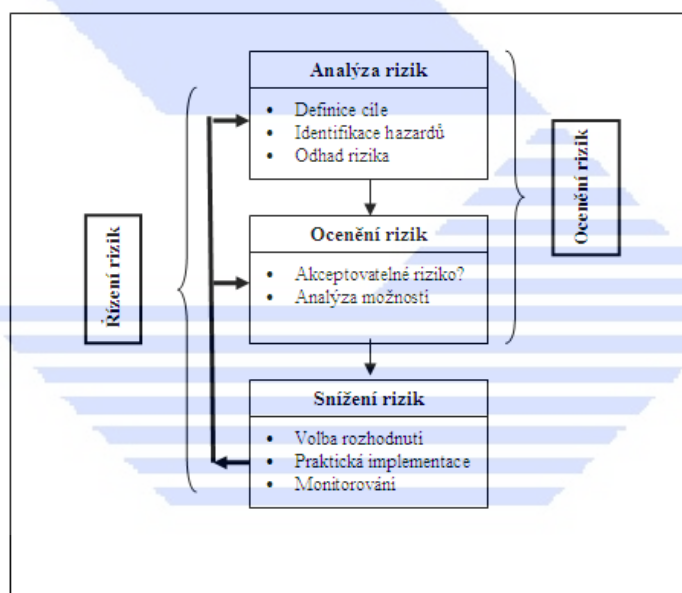
PŘEHLED METOD PRO ANALÝZU RIZIK

Tato kapitola poskytuje teoretický základ a vysvětluje, co je a čím se zabývá analýza a řízení rizik. Stručné uvedení do problematiky je nutné, neboť tyto metody nejsou fixovány v žádném předpisu, souvisejícím s bezpečností v tunelech. Podrobnější informace poskytuje kniha „Analýza a řízení rizik v dopravě“, lit. [16].

Metody analýzy a řízení rizik

Metodika analýzy rizik předpokládá postupovat v jistých krocích, které by měly být vždy zachovány a měly by být v průběhu procesu i jasně dokumentovány. Tyto kroky lze shrnout do následujících bodů, viz Obr. 3:

1. Jasná definice cíle/a případných omezení analýzy.
2. Identifikace a ocenění rizik souvisejících s touto analýzou.
3. Analýza (kvantifikace) rizik.
4. Určení tolerancí v systému (identifikace rizikových faktorů).
5. Redukce rizik (pokud je potřeba).



Obr. 3: Základní články Řízení rizik (Risk Management), IEC 1995

Graf vyjadřuje tři základní kroky nutné pro úspěšnou realizaci procesu řízení rizik. První krok definuje *cíle analýzy a okrajové podmínky*, které jsou nutné pro správné vymezení problému. Tento krok by měl být vždy konzultován se zadavatelem. Tím je určena i míra podrobnosti řešení.

Srdcem celého procesu je *ocenění rizik* v kvalitativní či kvantitativní podobě. Pokud je k dispozici dostatek podkladů, statistických hodnot apod., je dáвана přednost kvantitativním výsledkům. Rozsáhlý přehled metod pro analýzu rizik je uveden v lit.[17]. Metody doporučené aplikovat v rámci těchto technických podmínek jsou detailněji popsány v dalším textu.

Základním výstupem analýzy je tedy ocenění rizik, na které by mělo navazovat *přijímání opatření* (pokud je to nutné) z hlediska jejich snižování. Jednou z použitelných metod je využití cost-benefit analýzy (analýza nákladů a přínosů), jejíž příklad v aplikaci pro tunely je uveden v Příloze těchto TP. Ta je nástrojem pro správce a provozovatele tunelu, aby přijali „správné“ rozhodnutí. Umožní jim

zkoumat přínosy ve snížení rizik při vynakládání různých prostředků. Tyto technické podmínky se třetí etapou „Snížování rizik“ nezabývají.

Výběr metod pro analýzu rizik

Analýza rizik je používána prakticky ve všech oborech lidské činnosti. V této kapitole jsou komentovány pouze metody, které jsou vhodné a byly testovány pro hodnocení tunelů. Metody jsou rozděleny do příslušných kategorií. V úvahu při jejich aplikacích lze brát to, že každá z existujících metod pro stanovení rizik byla generována pro určitý specifický problém, a proto jednotlivé výstupy obvykle nejsou vzájemně porovnatelné, ale spíše se komplementárně doplňují.

Metody kvalitativní

„Expertní hodnocení“ (*Expert Judgment*) využívá skupiny (více než pěti) expertů pro hodnocení určitého problému. Kvalita je dána jejich znalostmi, schopností formulovat závěry, ale i veřejným míněním. Diskuse musí být řízená. Výstup je kvalitativní, kvantitativní výstupy jsou většinou udávány v relativních jednotkách. Relativní hodnocení se převážně používá při porovnávání se stávajícími systémy. Hodnocení se používá, pokud chybí data a statistické údaje pro exaktnější porovnání. Výsledky by ale měly být dobře strukturované, aby umožnily i následnou kontrolu.

Tato metoda nemá přímo formalizovatelné postupy a je vhodné ji použít v prvních stádiích hodnocení, protože může upozornit na evidentní problémy.

„Kontrolní seznam“ (*Check List*): jednoduchý kvalitativní nástroj k hodnocení předem stanovené problematiky. Seznamy kontrolních otázek (*checklists*) musí být předem připraveny a na jejich hodnocení se nezávisle podílí více dotčených osob. V tomto případě, kromě expertů, se mohou podílet i projektanti, správce apod. Obecně kontrolní seznam vyhovuje minimálním standardům bezpečnosti a v kvalitativním hodnocení hlavně upozorňuje na možná rizika a je to vlastně první (nebo i pravidelně opakovaná) inspekce systému. Jistou nevýhodou může být malá komplexnost, výhodou je pak jasná struktura.

Příkladem jednoho z přístupů je softwarový nástroj „IDET: Identifikátor bezpečnostního řešení“ popsáný v projektu Analýza a řízení rizik v tunelech pozemních komunikací, lit.[36] Tento nástroj se soustřeďuje pouze na shodu řešení tunelového systému se zavedenými standardy a ve formě odpovědí „ano/ne“ tuto shodu kontroluje.

„Analýza typu „co – když“ (*What – If Analysis*): postup hledání možných dopadů nežádoucích provozních situací a slabých míst; metoda je založena na týmové práci, kdy specialisté kladou otázky „co se stane, když“; metoda není tak strukturovaná jako jiné metody, ale výsledkem kvalitní diskuse je seznam scénářů událostí, které mohou v tunelu nastat, hodnotí se i jejich následky, případně se navrhuje opatření pro omezení rizika. Metoda není vhodná pro komparativní porovnávání více tunelů.

Metoda opět nemá formalizované postupy. Pro její úspěšnou aplikaci je nutné, aby se jednalo o řízenou diskusi vedenou rizikovým analytikem.

„Analýza statistických dat“ (*Statistical Data Analysis*) je vhodná pro tunely vybavené technologií zaznamenávající požadované soubory dat. Těmi jsou soubory dopravních, případně i fyzikálních (počasí, námraza atd.) dat a dále databáze všech mimořádných událostí¹. Tyto soubory jsou využity pro analýzu četností událostí i následků daného tunelu a to ve formě hodnoty četnosti [událost/voz.km] v členění dle typu událostí a druhu vozidel.

Pokud se jedná o dostatečně dlouhé údobí a dostatečně velký soubor dat, lze vypočítat například střední hodnotu četnosti určitých událostí, rozptyl a další statistické údaje tvořící

¹ Z direktivy 54/2004/ES vyplývá povinnost zaznamenávat všechny mimořádné události ve všech tunelech. Je k tomu využívána internetová aplikace AZMUT, viz další kapitoly.

základ pro kvantitativní analýzu. Pro ověření toho, zda jsou změřené parametry reprezentativní, je vhodné použít hodnocení koincidenčního intervalu. Tím se ověří, zda náhodný výběr z určitého rozdělení lze považovat za reprezentativní a zda se rozdělení pravděpodobnosti blíží danému parametru.

„Analýza příčin a následků poruch“ (*Failure Modes and Effects Analysis, FMEA*): technika poprvé formulována v roce 1949 v americkém armádním předpisu Mil-Std-1629 spolehlivostními inženýry na určení problémů, které by mohly vzniknout nesprávným fungováním vojenských systémů. Její popis obsahuje i v český standard ČSN IEC 812/1992. Metoda má dvě fáze: první, realizovaná brainstormingovou diskusí expertů se zaměřuje na identifikaci a popis všech druhů poruch, zatímco ve druhé fázi experti přiřazují jednotlivým poruchám odhady rizik (závažnost poruchy) na relativní stupnici.

Pro analýzu tunelových systémů se doporučuje využít její modifikaci nazvanou SAFMEA, která značně eliminuje různé hodnocení expertů tím, že používá statistické hodnocení souboru expertních odpovědí. Principy metody a její využití jsou vysvětleny v těchto technických podmínkách.

Techniky založené na použití stromů (tzv. stromkové diagramy):

„Analýza příčin a důsledků“ (*Cause-Consequence Analysis*): technika kombinující analýzu příčin (stromy poruchových stavů) s analýzou důsledků (stromy událostí); poruchy (nehoda, požár ...) jsou analyzovány metodou FTA a následky (materiální škody, poškození zdraví a smrtelné události) metodou ETA.

„Analýza stromu poruch“ (*Fault Tree Analysis, FTA*): široce používaná technika založená na deduktivní logice, jejíž koncept byl představený již roku 1962; metoda je založena na logickém vývoji události postihující chyby systému i lidské chyby; výsledkem je stromový diagram tvořený uzly a popisující vztahy mezi událostí a příčinou jejího vzniku; deduktivní logika pracuje se „zpětnými úvahami“, kdy se vychází z definované výsledné události a zpětně se hledají příčiny; výsledek může být i kvalitativní, ale pro analýzu tunelů a s doplněnými pravděpodobnostmi výskytu poruch je kvantitativní.

„Analýza stromu událostí“ (*Event Tree Analysis, ETA*): technika založená na induktivní logice hodnotící možné následky poruch; sleduje průběh procesu od iniciační události přes sekvenci událostí hodnotící funkce technických zařízení (identifikace požáru, informování cestujících ...) a bezpečnostní funkce systému vždy na základě dvou možností – příznivé a nepříznivé; výsledek je, po doplnění pravděpodobnostmi výskytu poruch, kvantitativní.

Deterministické analýzy rizik:

„Analýza scénářů“ (*Scenario Analysis*) je velmi používaná kvantitativní metoda, spočívající v hodnocení následků události, přičemž se jedná o konkrétní událost v konkrétním místě a čase, a proto i analýza scénářů popisuje prostorově-časový vývoj události a reakcí všech stavebních, technologických a lidských entit na tuto událost. Vždy se jedná o detailní rozbor události, která je modelována, a pokud možno kalibrována se skutečností; obvykle se sledují detailně možnosti záchrany osob či majetku, nepřesnost do modelu může vnášet nepředvídatelné chování osob.

Pokud je metoda doplněna modelem fyzikálních jevů a evakuačním modelem, je v těchto technických podmínkách řazena mezi kvantitativní metody.

„Model fyzikálních jevů“: popisuje dynamický vývoj důsledku události ve formě matematického modelu různých fyzikálních jevů (šíření tepla, kouře atd.); pro modelování se používají analytické metody nebo numerické metody, jakou je metoda konečných prvků.

„Evakuační modely“: pokud možno věrně simulují chování cestujících v místě události od okamžiku, kdy si uvědomí nebezpečí, až po jeho únik do bezpečí; model tedy popisuje první okamžiky

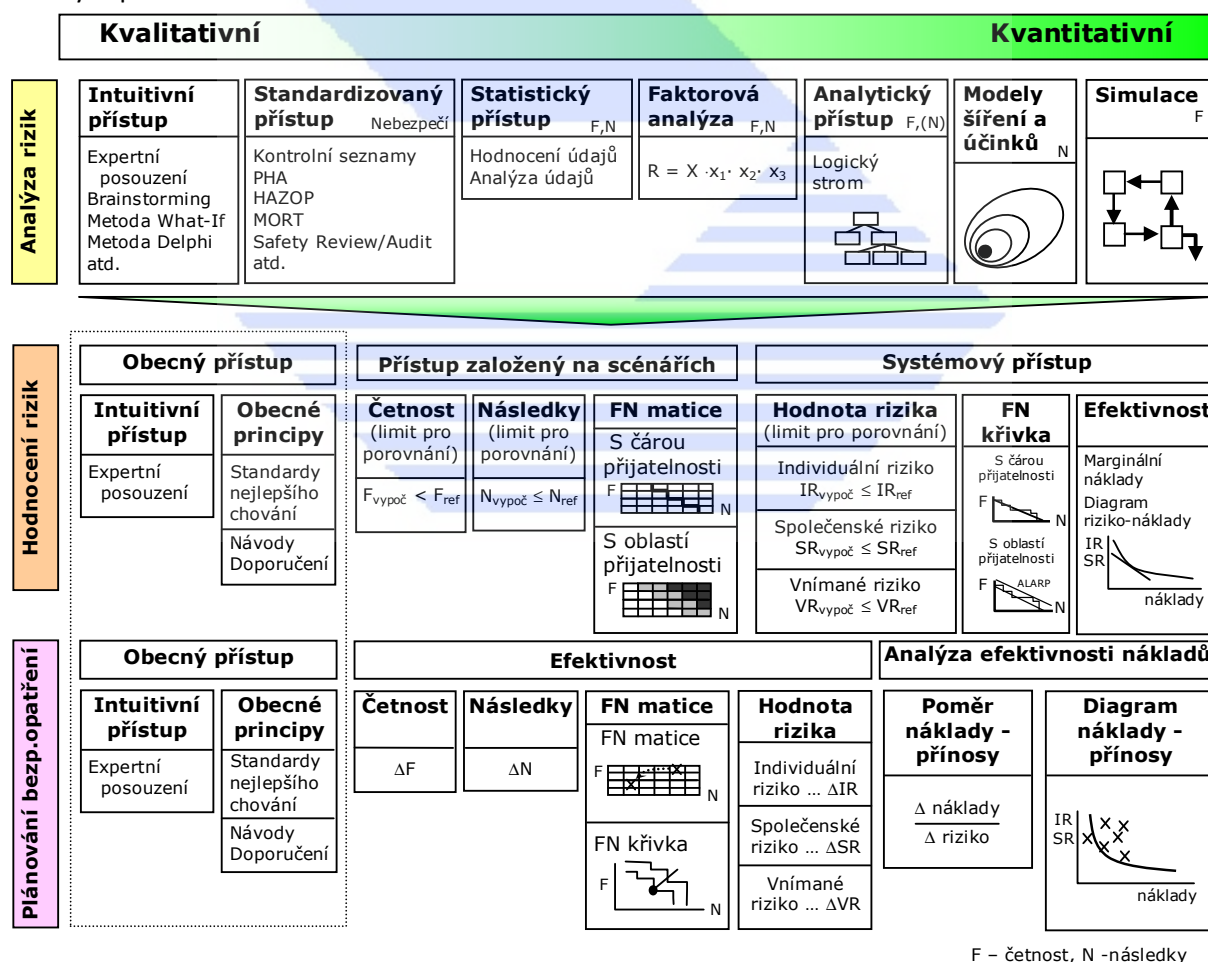
po vzniku události, tedy údobí samozáchrany; hrubou orientaci poskytují analytické vztahy, pro detailní rozbor lze využít programy pro simulaci pohybu osob.

Proces řízení rizika – shrnutí

Přehled o metodách analýzy rizik, hodnocení rizik a řízení rizik vyplývajících z Obr. 4 je uveden v dokumentu PIARC, lit. [17]. V horní třetině obrázku jsou uvedeny vybrané metody analýzy rizik. Oblast kvantitativní analýzy začíná nejjednodušším intuitivním přístupem, pokračuje metodou kontrolního seznamu až ke statistickým a analytickým metodám. Dále sem patří analýzy scénářů, fyzikální modely a simulace.

Oblast oceňování rizik je tvořena třemi hlavními přístupy: Obecný přístup, kam patří například expertní hodnocení či porovnávání shody se standardy, další přístup je založen na Analýze scénářů, kdy se hodnotí, zda četnost nebo důsledky jsou nižší než jisté referenční hodnoty. Systémově orientovaný přístup stanovuje hodnoty rizika (individuální, sociální atd.) nebo FN křivky.

Třetí oblastí je snižování rizika, resp. plánování bezpečnostních opatření. Zde lze také, v nejjednodušším případě, volit obecný přístup, který například bere srovnání s dobrými příklady aplikací. Dále je možné hodnotit efektivitu vložených prostředků a to například jako poměr snížení četnosti nehod nebo jejich následků při aplikování navržených přístupů. Součástí hodnocení může být i analýza příčin a následků.



Obr. 4: Přehled metod řízení rizik, PIARC, [17]

Metody analýzy rizik jsou tedy principiálně rozděleny na kvalitativní a kvantitativní. Kvalitativní metody mají nižší komplexnost než kvantitativní a jsou hlavně založeny na obecně známých a

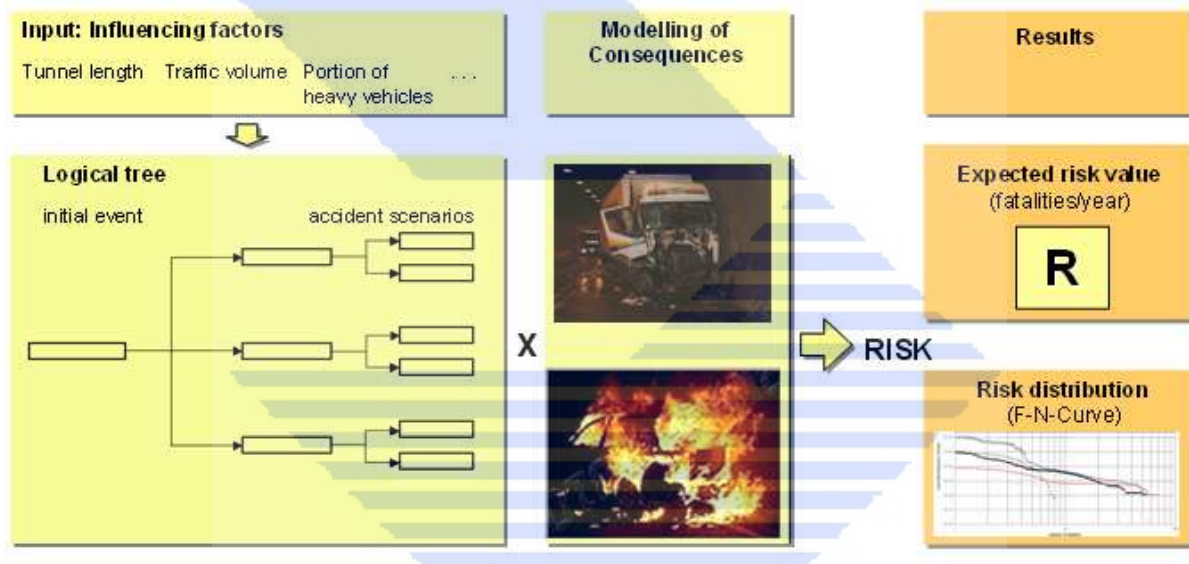
používaných principech a standardech. Jsou také většinou jednodušší na používání a více flexibilní, takže lze řešit i problémy, kdy pro kvantitativní analýzu chybí data. Na druhé straně jsou značně subjektivní a není zaručeno, že budou vždy reprodukovatelné.

Kvantitativní přístup zkoumá strukturu událostí v systému v logické posloupnosti. Předpokládá se znalost veličin charakterizujících danou událost, což umožní stanovit číselně míru rizika. Podstatnou výhodou těchto metod je transparentnost a opakovatelnost postupů a tím i jejich lepší kontrolovatelnost. Na druhé straně ne každý děj může být modelován odpovídajícím způsobem a velmi často nejsou k dispozici potřebná data.

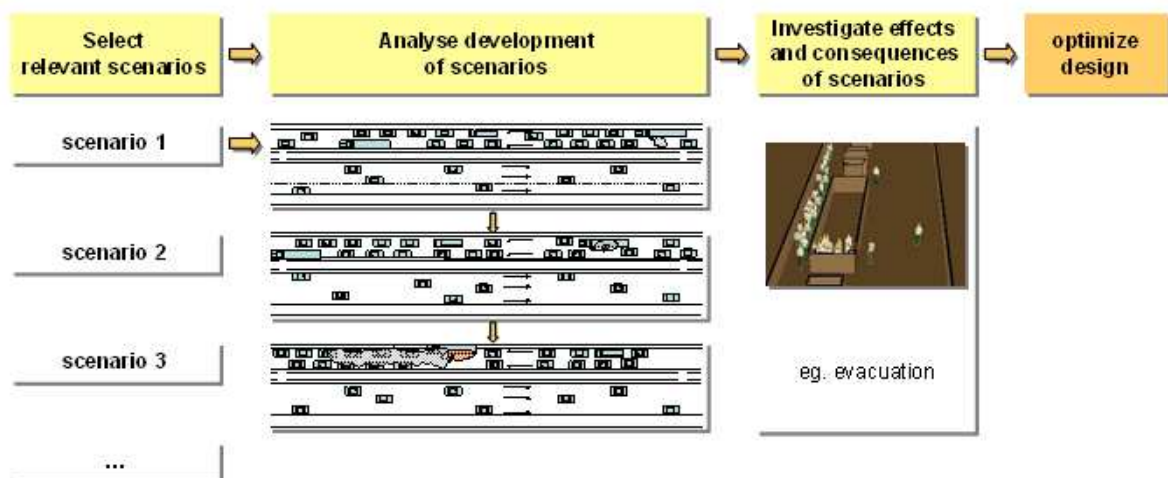
Další možnost dělení metod uvedených výše je dle možných přístupů:

- Systémově orientovaný přístup:** v systémovém přístupu jsou rizika hodnocena pro celý systém. V úvahu jsou brány všechny události, které mohou nastat. Příkladem je metoda příčin a následků.
- Scénářově orientovaný přístup:** četnost specifické události a její následky, spočívající v jednoznačné posloupnosti dějů, jsou analyzovány. Riziko je hodnoceno zvlášť pro každý scénář.

Rozdíl obou přístupů je schematicky znázorněn v Obr. 5 a Obr. 6.



Obr. 5: Analýza rizik: systémový přístup, lit. [17]

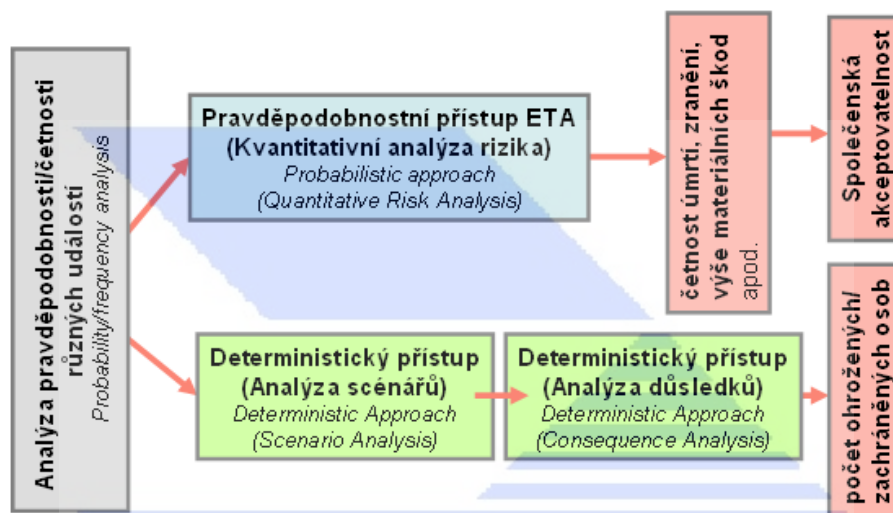


Obr. 6: Analýza rizik: přístup využívající scénářů, lit. [17]

Vztah analýzy scénářů a kvantitativní analýzy rizik

Kvantitativní analýza rizik a analýza scénářů spolu velmi úzce souvisí. Oba přístupy se věnují účinkům a důsledkům nežádoucích událostí, které jsou popisovány jako „scénáře nehod“. Rozdíl je v tom, že kvantitativní analýza rizik poskytuje pravděpodobnost důsledků události, zatímco deterministická analýza scénářů se soustřeďuje na průběh události a hledá slabé a silné stránky. Vzájemný vztah je znázorněn na Obr. 7.

Výstup analýzy ETA poskytuje pravděpodobnosti zranění, úmrtí nebo výši materiálních škod (následků události). Důležitou součástí hodnocení rizik je porovnání sociálního rizika vypočítaného pro hodnocený tunel, které obvykle představuje počet smrtelných úrazů se společensky přijatelným rizikem. Podle tohoto kritéria lze riziko považovat za přijatelné, pokud například dojde k jednomu smrtelnému úrazu na km tunelu za rok s pravděpodobností menší než 0,01. Pokud by byla vypočítaná pravděpodobnost vyšší, nemuselo by to být **z hlediska společnosti akceptovatelné** a bylo by nutné činit dodatečná bezpečnostní opatření.



Obr. 7: Kvantitativní analýza rizik a analýza scénářů na stupnici od analýzy pravděpodobností k analýze důsledků

Oproti tomu se analýza scénářů soustřeďuje na zcela konkrétní scénář a zcela konkrétní dopravní poměry i konkrétní vybavení tunelu. Její součástí je detailní analýza možnosti záchrany osob. Analýza se tedy **nezabývá otázkou akceptování rizika společnosti**, ale soustřeďuje se na konkrétní možnosti ochrany ohrožených osob. Jejím výstupem také může být doporučení na úpravu bezpečnostního vybavení tunelu nebo doporučení na změny organizace.

Výše uvedený výčet není úplný, v lit. [16] jsou uvedeny i další metody. Obecně lze konstatovat, že metody pro **kvalitativní analýzu** vycházející z expertních znalostí umožní, na základě vymezení systému a jeho rozsahu, identifikovat a popsat nebezpečí, poruchové režimy a scénáře. Řada metod poskytuje i návody na eliminaci rizik. Jejich výstupem může být i relativní stupnice nebezpečí.

Metody pro **kvantitativní analýzu** umožňují určit pravděpodobnosti a důsledky definovaných událostí v měřitelných jednotkách, jakými jsou například usmrcení či zranění osob vyjádřené ve finančním ekvivalentu. Deterministické metody kvantitativně popisují fyzikální jevy či proces evakuace osob.

Závěr

Analýza rizik se stala nedílnou součástí bezpečnostní dokumentace, byť její konkrétní náplň není nikde v Evropě formalizovaná. Výjimkou je Rakousko, které publikovalo směrnici popisující metodu TuRisMo, doporučenou pro analýzu rizik, lit.[20].

Při zpracovávání prvních stupňů dokumentace (studie, DUR) je nutné mít rámcovou představu o bezpečnostním řešení, které lze získat na základě jejich expertního posouzení metodami „Expert Judgement“ nebo „What-If Analysis“. Po zpracování DSP/ZDS je možné formálně kontrolovat shodu navrženého řešení se standardy metodou „Check List“. Velmi efektivní metodu, která hodnotí riziko na relativní stupnici, představuje SAFMEA, která je také doporučena těmito technickými podmínkami.

Pro kvantitativní posouzení udávající četnost a důsledky událostí se doporučuje metoda pravděpodobnostních stromů QRA, viz dále. V případě, kdy nejsou k dispozici odhady pravděpodobností a nelze tedy věrohodně aplikovat metody stromů, je nutné analyzovat konkrétní možné události a jejich důsledky analýzou scénářů (Scenário Analysis).



AKCEPTOVÁNÍ RIZIKA

Tato kapitola pojednává o riziku. Tímto pojmem je označován očekávaný rozsah následků nepříznivých jevů pro osoby, životní prostředí nebo ekonomické hodnoty. Riziko je zpravidla vyjádřeno jako součin pravděpodobnosti vzniku události a jeho následků.

Při hodnocení rizika je nutné rozlišovat různé stupně rizik, např. individuální riziko, společenské riziko, ekonomické riziko, tolerovatelné riziko, objektivní riziko (viz definice těchto termínů v úvodu TP).

Individuální riziko

Individuální riziko (*Individual Risk, IR*) je definované jako pravděpodobnost, že průměrná nechráněná osoba, nacházející se v určitém místě je usmrcena v důsledku nehody způsobené existujícím nebezpečím:

$$IR = P_f \cdot P_{d|f}, \quad (1)$$

kde: P_f - pravděpodobnost nehody;

$P_{d|f}$ - pravděpodobnost usmrcení jedince v případě nehody.

Tento parametr bývá též v literatuře označován jako roční individuální riziko (*Individual Risk Per Annum, IRPA*) a závisí na místě, kde se jedinec nachází v daném čase a na obsahové náplni jeho činnosti. Pokud definice *IR* předpokládá trvalou přítomnost jedince na daném místě, je vhodná např. na určování rizika bydlení v záplavových zónách vodních staveb (přehrad, nádrží) apod. V oblasti dopravy se individuální riziko většinou udává jako počet usmrcených osob na vozidlo.km nebo na osobo.km. Vztah mezi oběma vyjádřeními je zřejmý: vozidlo s 2 osobami jedoucí na vzdálenost 100 km odpovídá 100 vozidlo.km nebo 200 osobo.km. V letecké dopravě se někdy riziko vztahuje na počet letů, neboť vzdálenosti jsou velmi velké a letecké nehody závisí především od počtu přistání a vzletů, ne na množství letových kilometrů.

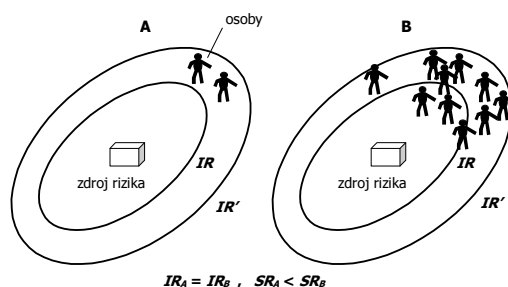
Kromě uvedeného parametru *IR* se používá řada dalších možných vyjádření, v literatuře lze najít popis i dalších čtyř parametrů:

1. Očekávání ztráty života (*Loss of Life Expectancy*) – ukazuje pokles v očekávání ztrát života v důsledku různých příčin;
2. Přírůstek roční pravděpodobnosti úmrtí (*Delta Yearly Probability of Death*) – počítá jak se změna různých příčin (ve vhodných jednotkách) může podílet na růstu roční pravděpodobnosti úmrtí;
3. Hodinová úmrtnost při specifické činnosti (*Activity Specific Hourly Mortality Rate*) – zohledňuje pravděpodobnost úmrtí vztahenou na jednotku času, která je spojena s určitou specifickou činností – jako konkrétní příklad lze uvést parametr „intenzita smrtelných nehod“ (*Fatal Accident Failure Rate, FAFR*), který udává počet usmrcených osob za 1000 hodin expozice (vystavení se) určitému riziku;
4. Úmrtí za jednotkovou činnost (*Death per Unit Activity*) – nahrazuje časovou jednotku jednotkou pro hodnocení množství činnosti, jako je např. počet pracovních úkonů nebo množství ujetých kilometrů.

Společenské riziko

Společenské riziko (*Societal Risk, SR*) je definováno jako vztah mezi četností událostí a počtem osob v dané populaci, které jsou postiženy specifikovanou úrovní poškození v důsledku působení specifikovaných nebezpečí. Zatímco individuální riziko uvádí pravděpodobnost úmrtí na konkrétním místě, společenské riziko udává počet usmrcených pro celou oblast bez ohledu na to, kde přesně v této oblasti k poškození došlo. Rozdíl je vysvětlený na Obr. 8 – obě situace mají stejné úrovně

individuálního rizika (IR a IR'). Protože však v situaci B je vyšší hustota osob v zóně ohrožení, B má vyšší společenské riziko SR_B .



Obr. 8 Rozdíl mezi individuálním a společenským rizikem

Vyjádřit společenské riziko lze opět různě. I když výpočty individuálního a společenského rizika často vychází ze stejných údajů, zatím nebyl definován žádný celosvětově uznávaný matematický vztah mezi individuálním rizikem a funkcí hustoty pravděpodobnosti počtu usmrcených osob.

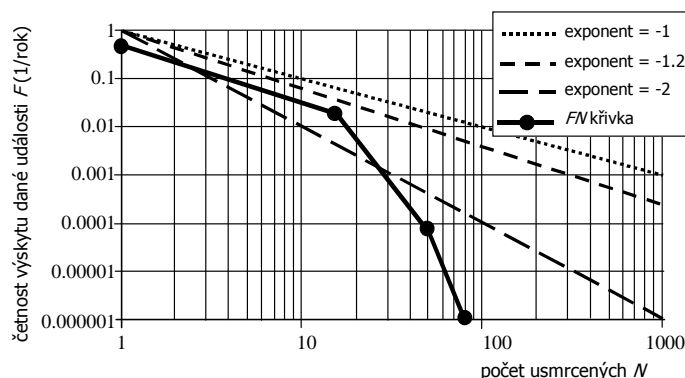
Společenské riziko se často graficky vyjadřuje ve tvaru *FN křivky* (*FN curve*)². Tato křivka znázorňuje „pravděpodobnost překročení“ daného limitu jako funkci počtu usmrcených osob x na dvojité logaritmické stupnici

$$1 - F_N(x) = P(N > x) = \int_x^{\infty} f_N(x) \cdot dx, \quad (2)$$

kde

$f_N(x)$ - funkce hustoty pravděpodobnosti počtu usmrcených osob za rok;
 $F_N(x)$ - funkce rozdělení pravděpodobnosti počtu usmrcených osob za rok.

Kritéria pro porovnávání *FN* křivek lze vytvořit několika způsoby. Například je možné vyjít z historických údajů – takové kritérium potom odráží přání společnosti udržet současnou úroveň rizika. Jiným způsobem, jak vytvořit kritérium pro *FN* křivku, je začít rozhodování o četnosti F pro $N = 1$ nebo více usmrcených. Tímto číslem by mohla být např. průměrná úmrtnost na jedno vozidlo. Dalším krokem by bylo rozhodnutí o strmosti křivky, která se obvykle udává exponentem. Typické exponenty jsou -1 a -2 . Znamená to, že pokud je $N = 1$, potom četnost pro $N = 10$ musí být 10-krát nižší, pokud je exponent -1 , tj. 10^{-1} . Použití exponentu -2 by znamenalo, že četnost by měla být 100-krát nižší, tj. 10^{-2} . Příklady *FN* křivky a různých kritérií jsou na Obr. 9.



Obr. 9: Příklad *FN* křivky a různých kritérií

² Alternativní názvy: *F/N diagram* (angl. *F/N plot*), resp. *graf kumulativní četnosti* (angl. *Cumulative Frequency Graph*)

Protože kritéria reprezentují kumulovanou četnost pro N nebo více smrtelných nehod, použití exponentu menšího než (-1) reprezentuje společenskou averzi vůči velkým nehodám.

Jednoduchým vyjádřením míry společenského rizika je tzv. očekávaná hodnota (*Expected Value*) počtu usmrčených osob za rok, $E(N)$, někdy též nazývaná „potenciální ztráta života“ (*Potential Loss of Life, PLL*)³:

$$E(N) = \int_0^{\infty} x \cdot f_N(x) \cdot dx \quad (3)$$

Dalším používaným parametrem je „nehodovost s následkem smrti“ (*Fatal Accident Rate, FAR*), definovaná jako potenciální počet usmrčených ve skupině osob vystavených po určitou dobu nebezpečí. Obecně se vyjadřuje jako pravděpodobnost úmrtí na 100 mil hodin expozice pro danou činnost. Používá se hlavně při porovnávání rizika úmrtnosti různých činností. Míru rizika FAR pro konkrétní místo (zónu) lze vypočítat:

$$FAR_{zóna} = \frac{PLL_{zóna} \cdot 10^8}{N_{zóna} \cdot 8760} \quad (4)$$

kde

$FAR_{zóna}$ - parametr FAR specifický pro danou zónu (1/rok);
 $PLL_{zóna}$ - potenciální ztráta života v zóně za rok (1/rok);
 $N_{zóna}$ - osoby nacházející se v zóně vypočítané jako střední hodnota v typickém roce provozu.

Britský orgán *The British Health and Safety Executive (HSE)* používá jako míru společenského rizika tzv. integrál rizika (angl. *Risk Integral, RI*), [22]:

$$RI = \int_0^{\infty} x \cdot (1 - F_N(x)) \cdot dx \quad (5)$$

V lit. [23] je matematicky dokázáno, že RI je možné vyjádřit dvěma závislostmi funkce hustoty pravděpodobnosti – tzv. očekávanou hodnotou $E(N)$ a standardní odchylkou $\sigma(N)$:

$$RI = \frac{1}{2} (E^2(x) + \sigma^2(x)) \quad (6)$$

Míry rizika lze popsat následujícím obecným výrazem:

$$RI = \int x^{\alpha} \cdot C(x) \cdot f_N(x) \cdot dx \quad (7)$$

Koeficient $\alpha \geq 1$ reprezentuje averzi společnosti vůči nehodám s mnohými oběťmi na životech. Averse existuje tehdy, pokud společnost považuje např. jednu nehodu se 100 usmrčenými osobami v určitém smyslu slova za horší než 100 nehod, kde při každé z nich je usmrčena právě jedna osoba. Různí autoři navrhuji různé hodnoty pro α (od 1 do 2) a faktor C , což je konstanta funkce x . V literatuře [24] je navržena další míra rizika, nazvaná celkové riziko (*Total Risk, TR*). Je sestavená z očekávané hodnoty počtu usmrčených osob a standardní odchylky, která je násobená faktorem averze vůči riziku k :

$$TR = E(N) + k \cdot \sigma(N) \quad (8)$$

Standardní odchylka je relativně vysoká pro nehody s nízkou pravděpodobností výskytu a závažnými důsledky.

³ Pro danou událost i lze i počítat: $PLL_i = f_{0i} \cdot N_{bi} \cdot P_{fi}$, kde PLL_i – potenciální ztráta života způsobená událostí i , (1/rok); f_{0i} – četnost následku události i , (1/rok), N_{bi} – počet osob vystavených účinkům události i , P_{fi} – pravděpodobnost usmrčení související s událostí i .

Z uvedeného přehledu různých vyjádření společenského rizika vyplývá, že můžeme principiálně rozlišit dva základní typy vyjádření. Očekávaná hodnota $E(N)$ a FN křivka jsou přímo odvozované z funkcí hustoty pravděpodobnosti. Některé země limitují riziko různých nebezpečných aktivit (včetně provozu tunelů) definováním kritérií v rámci FN diagramů. Takovéto standardy lze popsat následujícím obecným vztahem:

$$1 - F_N(x) < \frac{C}{x^n}, \quad (9)$$

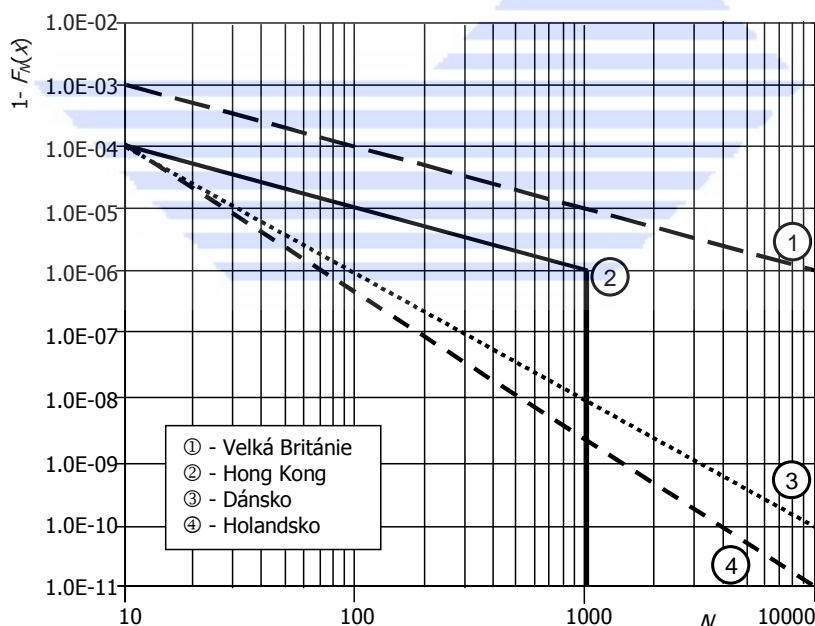
kde

- $1 - F_N(x)$ - pravděpodobnost více než x usmrcených osob za rok;
- n - strmost limitní přímky;
- C - konstanta určující polohu FN limitní přímky.

Standard se strmostí $n = 1$ bývá označován jako neutrální vůči riziku. Pokud je strmost $n = 2$, standard reprezentuje averzi vůči riziku – v tom případě mají větší nehody vyšší váhu a jsou akceptovány s relativně menší pravděpodobností. Tab. 1 uvádí pouze pro ilustraci koeficienty některých mezinárodních norem, limitní přímky pro FN křivky jsou znázorněny na Obr. 10.

Země	n	C
Velká Británie (HSE)	1	10^{-2}
Hong Kong (zalomené)	1	10^{-3}
Holandsko (VROM)	2	10^{-3}
Dánsko	2	10^{-2}

Tab. 1: Některé mezinárodní standardy limitující FN křivku



Obr. 10: Některé mezinárodní normy ve tvaru FN křivky

Ekonomické riziko

Kromě rizika ztrát lidských hrají při rozhodování významnou roli i ekonomická rizika. Z mnohých přístupů k jejich možné kvantifikaci lze uvést alespoň některá: FD křivku, očekávanou hodnotu

ekonomických škod $E(D)$, ekonomickou optimalizaci $\min(C_{tot})$ a ekonomickou optimalizaci a neurčitost $\min(\mu(C_{tot})) + k \cdot \sigma(C_{tot})$.

FD křivka ukazuje pravděpodobnost překročení určité hodnoty jako funkci ekonomických škod. FD křivku a očekávanou hodnotu ekonomických škod lze odvodit z funkce hustoty pravděpodobnosti ekonomické škody $f_D(x)$:

$$1 - F_D(x) = P(D > x) = \int_x^{\infty} f_D(x) \cdot dx, \quad (10)$$

$$E(D) = \int_x^{\infty} x \cdot f_D(x) \cdot dx, \quad (11)$$

kde

$FD(x)$ - funkce rozdělení pravděpodobnosti ekonomické škody;
 $E(D)$ - očekávaná hodnota ekonomické škody (damage, D).

Analogicky jako v případě FN křivky a očekávaného množství usmrčených osob lze dokázat, že plocha ležící pod FD křivkou je rovná očekávané hodnotě $E(D)$.

Problém akceptovatelné úrovně rizika lze též formulovat jako problém ekonomického rozhodování. V metodě ekonomické optimalizace se určí celkové náklady systému C_{tot} sečtením nákladů I na bezpečnější systém a očekávané hodnoty ekonomické škody. V optimální ekonomické situaci jsou celkové náklady v systému minimalizovány:

$$\min(C_{tot}) = \min(I + E(D)). \quad (12)$$

Tímto kritériem lze určit optimální pravděpodobnost selhání systému, pokud jsou investice I a očekávaná ekonomická škoda $E(D)$ funkcí pravděpodobnosti selhání systému. V případě investic do bezpečnostních opatření v tunelu lze předcházet nebo zmírňovat škody D vzniklé v důsledku událostí. Ekonomická škoda se skládá z přímých ztrát na stavební části tunelu a vybavení tunelu (tj. investic na jejich opětovné vybudování) a nepřímých ztrát v důsledku přerušení dopravního spojení a nutnosti objíždět tunel obvykle delší trasou. Pokud je známa pravděpodobnost různých nehodových scénářů, lze odhadnout očekávanou ekonomickou ztrátu a odvodit optimální úroveň investic do bezpečnostních opatření.

Předpokládejme, že určitý scénář vyústí ve smrt N osob a že každá osoba má ekonomicky vyčíslitelnou hodnotu d (stanovenou např. jako část národního důchodu připadající na jednoho občana). Potom lze opět najít ekonomické minimum minimalizací celkových nákladů:

$$\min(C_{tot}) = \min(I + E(D) + N \cdot d). \quad (13)$$

Oceňování lidského života je však vždy vnímáno jako závažný etický a morální problém. Zkušenosti ukazují, že vliv ztráty života na ekonomickou analýzu je relativně omezený, neboť se obtížně kombinují finanční ztráty na stavbě a zařízení s ohodnocením života či zranění. Proto se většinou ztráty lidského života hodnotí samostatně.

V lit. [25] je ukázáno, jakým způsobem lze modelovat neurčitost a averzi vůči riziku v metodě ekonomické optimalizace. Investice a ekonomická škoda jsou považovány za stochastické parametry. Při určování optimální úrovně ochrany se berou do úvahy standardní odchylka celkových nákladů a faktor averze vůči riziku k . Postoj k neurčitosti a k averzi vůči riziku je možné měnit hodnotou faktoru k . Potom ekonomické optimum lze vyjádřit jako:

$$\min(\mu(C_{tot})) + k \cdot \sigma(C_{tot}), \quad (14)$$

Environmentální riziko

Analogické přístupy jsou uplatňovány i při kvantifikaci rizika z poškození životního prostředí - např. definováním pravděpodobnosti překročení času, který je potřebný na to, aby se ekosystém vzpamatoval ze vzniklých škod:

$$1 - F_T(x) = P(T > x) = \int_x^{\infty} f_T(x) dx, \quad (15)$$

kde

- $F_T(x)$ - funkce rozdělení pravděpodobnosti času na obnovu;
- $f_T(x)$ - funkce hustoty pravděpodobnosti času obnovy ekosystému.

Dalším možným parametrem pro vyjádření míry environmentálního rizika je index energetického vlivu (*Energetic Impact Index*), který slouží k vyjádření množství energie ztracené za 1 rok, v joulech. Tento přístup pohlíží na člověka jako na součást ekosystému a umožňuje vyjádřit ztrátu života nebo zranění v joulech, podobně jako i jiné škody způsobené přírodě (lidský život je rovný určitému množství energie, okolo 800 bilionů joulů). Výsledkem je vztah:

$$GPP_{lost} = EPP + GPP'T, \quad (16)$$

kde

- GPP_{lost} - účinek na ekosystém a lidi v joulech;
- EPP - energetické ztráty systému;
- GPP' - množství energie potřebné na obnovu poškozených organismů během období T .

Přijatelné společenské riziko

Četnost každé události vychází ze statistických hodnot a odhaduje se například metodou FTA. Odhadovat počet obětí je nepoměrně složitější, neboť záleží na množství okrajových podmínek, vč. psychologie lidí v centru událostí a dispečerů, a proto jsou velmi cenné údaje zjištěné na základě skutečných událostí.

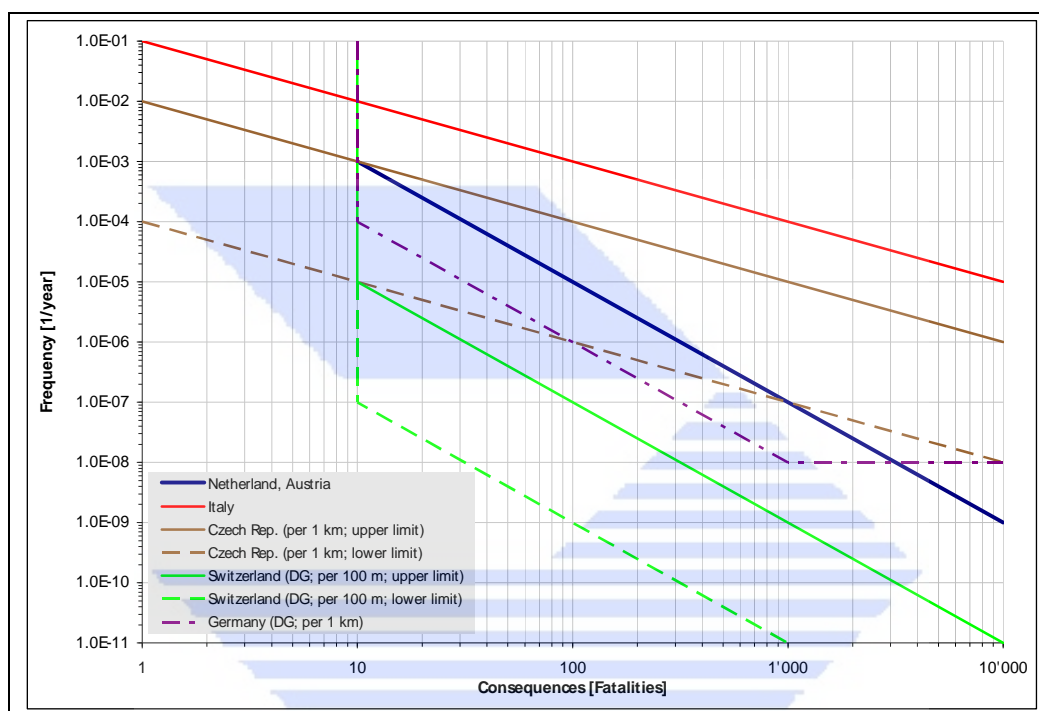
V Tab. 2 je uveden ilustrativní příklad počtu obětí pro každý uvedený scénář a četnost výskytu každého scénáře za rok uvedený v lit. [26]. Při stanovování počtu obětí se vychází z předpokladu, že nezůstane žádný pasažér uvězněn ve vozidle a že bude mít možnost se evakuovat. To je důvod, proč pro scénář nehody osobního a nákladního vozidla se neuvažují žádné oběti na životech, neboť se předpokládá, že lidé opustí prostor, který byl bezprostředně zasažen událostí.

Událost	Četnost za rok	Očekávaný počet obětí
Osobní vozidlo (nehoda)	$7,20 \cdot 10^{-7}$	0
HGV 1 – Lehké nákladní vozidlo (nehoda)	$1,26 \cdot 10^{-7}$	0
HGV 2 – Těžké nákladní vozidlo (nehoda)	$1,40 \cdot 10^{-7}$	0
Malý požár	$5,91 \cdot 10^{-8}$	2
Střední požár	$1,39 \cdot 10^{-8}$	124
Velký požár	$2,74 \cdot 10^{-9}$	339
Požár cisterny	$5,02 \cdot 10^{-8}$	362
Výbuch zvlášť hořlavého materiálu	$7,33 \cdot 10^{-9}$	197
Výbuch hořlavého materiálu	$1,15 \cdot 10^{-7}$	121
Výbuch hořlavých koncentrací	$1,89 \cdot 10^{-9}$	362
Výbuch	$1,89 \cdot 10^{-9}$	121
Výbuch tržaskavin	$1,40 \cdot 10^{-7}$	324

Tab. 2: Četnost a počet obětí pro jednotlivé scénáře

Interpretace výsledků

Za účelem zhodnocení rizika musí být možno porovnat výsledek s přijatelnou mírou rizika nebo se k výsledku a rozhodnutí, jestli je zjištěná míra rizika přijatelná, nepřijatelná nebo přijatelná s určitým přizpůsobením nebo omezením rizika dopracovat jinou odbornou znalostí. Od doby, kdy se hodnotí rizika se různé země staví jinak k uváděným výsledkům a samy rozhodují, zda výsledky analýz přijmou nebo nepřijmou. Dnes se riziková analýza provádí v několika zemích. Na Obr. 11 jsou výsledky publikované dokumentu PIARC, lit. [17] i pro Českou republiku. Z hlediska četnosti mortality nad 10, ale pod 40 osob jsme mírnější než Itálie, velmi podobní Rakousku. Německá křivka je mírně přísnější, podstatněji se vymyká švýcarská. Požadavky obou zemí jsou dány i tím, že provozují řadu dlouhých tunelů (nad 5 km) a navíc, dosud je hodně tunelů obousměrných, což se v České republice nepředpokládá. Tyto technické podmínky doporučují brát střední hodnotu mezi oběma hranicemi pro českou křivku.



Obr. 11: Křivky přijatelnosti rizika pro Holandsko a Švýcarsko a doporučení pro Českou republiku

Často se udává, že lze riziko tunelu považovat za přijatelné, pokud k jednomu smrtelnému úrazu na jednom km tunelu za rok dojde s pravděpodobností menší než 0,1.

Závěr

Křivky přijatelnosti rizika jsou diskutovány na různých fórech, včetně výboru „Road Tunnel Operation“ PIARC. Vzhledem k nedostatku statistických hodnot z našich tunelů je nutné respektovat křivky uvedené pro Českou republiku v dokumentu PIARC, viz Obr. 11.

KATEGORIE A ČETNOSTI UDÁLOSTÍ

V této kapitole jsou přehledně uvedeny události, které jsou obvykle předmětem analýzy rizik. Jsou zde uvedeny i číselné hodnoty typických událostí zpracované z rakouské směrnice, lit. [20] a německé zprávy [27]. Pro porovnání jsou uvedeny výsledky analýzy mimořádných událostí v našich tunelech.

Bezpečnost účastníků provozu mohou ovlivnit i problémy s technologií, jako je třeba výpadek řídicího systému. Výpočty spolehlivosti, resp. bezporuchového provozu technologických zařízení a případné důsledky špatné funkčnosti, nejsou předmětem těchto technických podmínek.

Typy událostí

Podle potenciálního rizika rozlišujeme tři základní události, které mají vliv na zdraví účastníků, či na materiální škody:

- Zastavení vozidla.
- Nehoda.
- Požár.

Každá z uvedených událostí má jinou četnost výskytu a jiný dopad na účastníky provozu. Dále dělíme události dle kategorie vozidel, která jsou událostí postižena:

- Osobní vozidla.
- Nákladní vozidla.
- Autobusy.
- Vozidla s nebezpečným nákladem.

Zastavení vozidla

Událost typu „Zastavení vozidla“ nastává nejčastěji z uvažovaných událostí. Událost „Zastavení vozidla“ je ze všech posuzovaných událostí nejméně závažná. Většinou se obejde bez materiálních škod nebo ztrát na životě. Je ale zdrojem potenciálního ohrožení a roste pravděpodobnost vzniku události „Nehoda“ nebo „Požár“. Proto je důležité tuto událost včas detekovat a nastavit opatření k zabránění vzniku rizikové situace například tím, že dispečer přebírá dohled nad provozem, popřípadě uzavírá jízdní pruh, v němž stojí vozidlo a ve zvlášť závažných případech tunel uzavírá.

Podle lit. [28] je výskyt zastavení vozidla (poruchy, dojití paliva, závady) 10,98 krát častější než nehoda s věcnou škodou. Je udávána četnost 22 poruch/1 mil. voz.km.

Nehoda

Událost typu „Nehoda“ je charakterizovaná náhlou změnou parametrů dopravního proudu (rychlosti), která svojí přítomností na komunikaci nemusí vytvořit následnou kongesci, ale ohrožuje bezpečnost provozu na pozemních komunikacích.

Hodnocení rizika pro dopravní nehody má zásadní význam pro posuzování bezpečnosti systému tunelů, neboť se tyto nehody, na rozdíl od požáru, vyskytují relativně často a jsou potenciálním zdrojem nebezpečné situace typu „Požár“.

Podle lit. [28] je výskyt nehod bez zranění/se zraněním 2,5 nehody/1 mil. voz.km. Poměr nehod se zraněním je v poměru 0,22 krát více než nehody s věcnou škodou, viz dále nehody v čs. tunelech.

Požár

Jedná se o nejzávažnější události, většinou spojené s ohrožením zdraví a dlouhodobějšími uzavěrami tunelu. Na druhé straně je nutné uvažovat, že se jedná o události s významně nejnížší pravděpodobností výskytu.

Událost typu „Požár“ je charakterizována otevřeným ohněm vozidla nebo nákladového prostoru spojená s tvorbou a šířením kouře. Mezi největší zdroje ztrát na životech nepatří pouze teplo vyvíjené při požáru, ale často má podstatnější vliv kouř. Této události může předcházet událost typu „nehoda“ nebo „zastavení vozidla“, nebo může vzniknout samovolně, např. technickou závadou vozidla, přehřátím brzd, vznícením nákladu, apod. Tuto událost je nutno detekovat v co nejkratším čase a i zásah musí být proveden v co nejkratší době, aby nedošlo k rozšíření požáru na další vozidla a ohrožení dalších životů a nárůstu materiálních škod.

Pro požáry má dominantní význam vznik kouře, tepelné záření a vznik toxických zplodin. Model pro havárii jen s poruchami materiálu je modelován požárem, který během 15 minut dosáhne maxima 5 MW pro osobní vozidla, 20 MW pro autobusy a nákladní vozidla bez hořlavého materiálu, 100 MW pro nákladní vozy s hořlavým nákladem a (200 – 300) MW pro požáry nebezpečných nákladů, které obvykle dosahují maxima okamžitě.

Podle lit. [28] je výskyt požáru srovnatelný s výskytem požáru na volné komunikaci. Tato hodnota odpovídá 0,05 – 0,15 požáru/1 mil.voz.km, viz dále požáry v čs. tunelech.

Analýza zahraničních údajů

Zahraníční zkušenosti a hlavně dlouholeté vyhodnocování mimořádných situací má základní význam pro odhadování četnosti událostí v našich tunelech, pro které zatím nemáme větší soubory dat. V dalším textu je uveden výtah z komparativní analýzy, lit. [28], mezi rakouskou a německou směrnicí a jsou uvedeny statistické výsledky získané z aplikace AZMUT pro české tunely, viz dále. Jistou nevýhodou porovnání je, že obě země zvolily různá rozlišující kritéria mezi kategoriemi nehod.

Četnosti událostí dle Rakouské směrnice

Rakouská směrnice bere v potaz 447 nehod, při kterých se zranili lidé, z rakouských tunelů za roky 1992 až 2003.

V následující Tab. 3 je shrnuto, jak se událost typu „nehoda“ dělí dle faktorů určujících různé scénáře. Nehodovost je ovlivněná typem tunelu a určuje jí, zda se jedná o tunely jednosměrné či obousměrné a dále samozřejmě i to, na jakém druhu pozemních komunikací tunel leží.

Vzhledem k tomu, že se dle platných doporučení a evropské Direktivy 54/2004/ES obousměrné tunely, z hlediska bezpečnosti, nemají stavět, jsou v dalším rozboru uvažovány pouze tunely jednosměrné a zájemce o obousměrné tunely se musí obrátit na citovanou rakouskou směrnici.

Pro konkrétní tunel je vždy nutné hodnoty počáteční četnosti uvedené v tabulce korigovat pro:

- danou délku tunelu,
- intenzitu dopravy,
- ne/přítomnost křižovatek.

Vzorce pro korekci na základě délky tunelu, intenzity dopravy a ne/přítomnosti křižovatek jsou ve směrnici.

Nehoda	Typ tunelu		Četnost nehod [nehoda/1 mil. kilometrů]	Rozdělení nehod na základě typu provozu a tunelu [%]			Typ vozidla [%]						Vznik následnéh o požáru [%]		Vliv nebezpečného nákladu [%]	
	Obousměrný tunel	Místní komunikace		1 účastník	2 a více účastníků v jednosměrném provozu	2 a více účastníků v obousměrném provozu	1 účastník			2 a více účastníků			1 účastník	2 a víc účastníků	Vznícení nebezpečného nákladu	Unikání nebezpečného nákladu
							OV	NV	BUS	OV	NV	BUS				
Jednosměrný tunel	Dálnice a rychlostní silnice	0,112	40	59	1	90,6	9,3	0,1	63,6	34,4	2	2,3	0,5			
			0,077	17	50	33				37,7	59	3,3		4,9	1,875	0,1
			0,082	30	49	21										

Hodnoty získané na základě 447 nehod v rakouských tunelech

Hodnoty získané na základě databáze 139 nehod

Hodnoty získané z databáze 7 požárů.

posuzuje se při nehodách, na kterých se podílejí nákladní automobily

Tab. 3: Členění počáteční události "nehoda" podle RVS

Směrnice RVS rozděluje nehody do několika skupin:

- nehoda 0. typu: týká se jediného účastníka v jednosměrném provozu,
- nehoda 1. typu: týká se dvou a více účastníků v jednosměrném provozu,
- nehoda 2. typu: týká se dvou a více účastníků v obousměrném provozu.

Rozdělení uvažuje s nehodou osobního, nákladního vozidla a autobusů. Do úvahy se bere, zda se nehoda stala v jednosměrném či obousměrném provozu a zda se na nehodě podílel jeden nebo více účastníků. Hodnoty uvedené v tabulce, které reprezentují procentuální rozdělení pravděpodobnosti nehodovosti jednotlivých typů vozidel, vycházejí z databáze 139 nehod. Tyto základní hodnoty platí pro situaci, kdy se na celkové dopravě podílejí osobní automobily ze 76,5%, nákladní automobily z 20% a autobusy z 3,5%. Pokud se změní poměr jednotlivých typů vozidel, je nutné hodnoty korigovat dle lit. [20], kap. 1.4/tabulka 5.

Hodnoty, které jsou uvedené v tabulce pro vznik požáru, vycházejí z databáze 7 požárů a procentuální podíl je u všech typů vozidel stejný, protože pro případné další dělení nejsou k dispozici relevantní data.

Četnosti událostí dle německého předpisu

Německý předpis definuje jako inicializační události 5 významných typů scénářů. Jsou to:

- porucha vozidla,
- kolize (bez požáru),
- požár (bez nebezpečného nákladu),
- událost s únikem nebezpečného nákladu,
- vlivy z vnějšku tunelu.

Scénář „porucha“, která zapříčiňuje přerušení provozu, nemusí vést přímo k nebezpečné situaci a scénář „vliv z vnějšku tunelu“, jehož výskyt je velmi zřídka a omezený, se z bezpečnostního hlediska považují za méně významné v porovnání s ostatními scénáři a nejsou dále uvažovány.

Rovněž se neuvažuje scénář „událost s únikem nebezpečného nákladu“, protože na detailní vyšetřování tohoto scénáře se používá počítačový model QRA vyvinutý OECD/PIARC.

Základní statistické hodnoty byly získány rozбором 979 nehod v 80 tunelech v Německu. Relevantní charakteristiky, které se uvažují při výpočtech:

- typ tunelu/typ provozu,
- délka tunelu,
- intenzita dopravy,
- tunel s/bez křižovatek.

Pro určení inicializační četnosti nehod v konkrétním tunelu je nutné použít vzorec:

$$H_{kol} = \alpha \cdot L \cdot DTV_{segment} \cdot 0,365 \quad (17)$$

kde

H_{kol} ... četnost kolize v tunelovém segmentu [1/rok]

α ... statistická hodnota nehod [1/vozidlo·km]

$DTV_{segment}$... průměrná denní dopravní zátěž [vozidel/den]

L – délka vyšetřovaného tunelového segmentu [km]

V následující Tab. 4 je znázorněno, jak se událost „nehoda“ dělí dle faktorů, které mají významný vliv na četnost individuálních nehodových scénářů. Dle německého předpisu se v silničním tunelu mohou vyskytnout následující typy nehod:

- nehoda typu 1: nehoda bez účasti dalšího účastníka (např. kolize s tunelovou infrastrukturou),
- nehoda typu 3: kolize při odbočování či změně směru v prostoru křižovatek,
- nehoda typu 6: nehoda v podélném směru (kolize za sebou jedoucích vozidel nebo vozidel při změně jízdního pruhu v jednosměrném provozu),
- nehoda typu 7: jiná nehoda (kolize s objektem, náhlá fyzická neschopnost, porucha vozidla).

				Rozdělení podmíněných pravděpodobností nehodových typů [%]											
Statistická hodnota nehod $\alpha[1/(\text{vozidlo} \cdot \text{km})]$				nehoda typu 1			nehoda typu 7			nehoda typu 3			nehoda typu 6		
Typ tunelu	připojovací a odbočovací pruhy			Délka tunelu [m]											
				< 600	600 - 1200	≥ 1200	< 600	600 - 1200	≥ 1200	< 600	600 - 1200	≥ 1200	< 600	600 - 1200	≥ 1200
Nehoda	Obousměrný tunel	ano	9,81*10e-7	13	7,1	1,7	29,7	16,2	2,3	28,9	13,3	4,6	28,5	63,5	91,5
		ne	6,81*10e-7	15,2	9,9	2,7	34,8	22,5	3,7	0	0	0	50	67,7	93,6
	Jednosměrný tunel	ano	5,28*10e-7	19,2	10,2	7,8	12,8	8,2	5,3	15,9	9,1	3,9	52,2	72,6	83
		ne	2,28*10e-7	46,2	24,4	12,8	30,8	19,5	8,7	0	0	0	23,1	56,1	78,5
Statistické hodnoty byly i získány na základě 979 nehod v 80 tunelech				1 účastník nehody						2 a více účastníků					

Tab. 4: Členění počáteční události „nehoda“ dle německého předpisu

Porovnání rakouské směrnice, německého předpisu a dat z českých tunelů při určování četnosti nehod a požárů

Detailní komparativní analýza je uvedena v lit. [29]. V této kapitole jsou shrnuty výsledky z obou směrnic a záznamů mimořádných událostí z deseti českých tunelů: Mrázovka, Strahovský tunel, Husovický, Letenský, Pisárecký, Těšnovský, Zlíchovský tunel, tunel Hlinky, Hřebeč a Klimkovice. V databázi jsou zaznamenány veškeré mimořádné události, počínaje bombou v tunelu přes vniknutí zvěře až po nehody a požáry. V databázi však není uvedeno, na rozdíl od obou směrnic, zda se událost týkala osobního nebo nákladního vozidla či autobusu. Od prosince 2004 do prosince 2009 se v těchto tunelech vyskytly následující události:

- požár ... 10
- nehoda ... 301
- zastavení vozidla ... 971

Pro výpočet četností je nutné znát i roční intenzity vozidel. Pro zkoumané údobí byly intenzity získány pouze z následujících tunelů: Mrázovka, Letenský tunel, Strahovský tunel, Těšnovský a Zlíchovský tunel, pro které je provedeno porovnání. Ve jmenovaných tunelech byly následující typy a počty událostí:

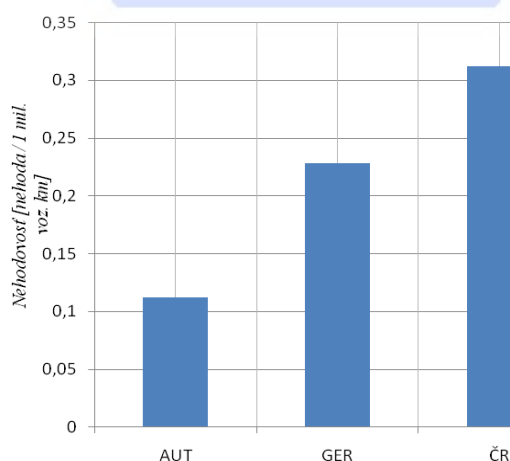
Typ události	Absolutní počet (2005-2009)	Četnost/1 mil.voz.km
požár	5	0,311894937
nehoda	200	0,007797373
zastavení vozidla	566	0,038986867

Tab. 5: Četnosti událostí v Českých tunelech

Porovnání s výše uvedenými směrnici je v následující tabulce:

	RVS 09. 03. 11	FE 03.0378/2004/FRB	AZMUT ČR
Statistická hodnota nehodovosti	0,112	0,228	0,312
	[nehod/1 mil. vozidlo kilometrů]	[nehod/1 mil. vozidlo kilometrů]	[nehod/1 mil. vozidlo kilometrů]
Poznámka	Hodnota z databáze 447 nehod	Hodnota z databáze 979 nehod	Hodnota z databáze 200 nehod

Tab. 6: Porovnání četnosti nehod

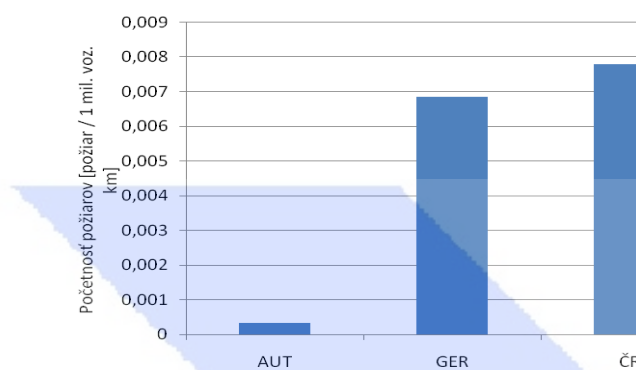


Obr. 12: Grafické porovnání mezi Rakouskem, Německem a ČR

Porovnání četností požárů je pouze orientační, protože se jedná o malé soubory dat a různé charaktery požárů. V hodnoceném údobí byl v ČR zaznamenán pouze jeden větší požár (osobní vozidlo).

	RVS 09. 03. 11	FE 03.0378/2004/FRB	AZMUT ČR
Statistická hodnota požárů	0,0003304 [požárů/1 mil. vozidlo kilometrů]	0,006840003 [požárů/1 mil. vozidlo kilometrů]	0,007797373 [požárů/1 mil. vozidlo kilometrů]
Poznámka	Hodnota z databáze 7 požárů	Hodnota z databáze 3 požárů	Hodnota z databáze 5 požárů

Tab. 7: Porovnání četnosti požárů



Obr. 13: Grafické porovnání mezi Rakouskem, Německem a ČR

Závěr

Kapitola poskytuje základní rozdělení mimořádných událostí, které koresponduje s dělením v TP154.

Hodnoty četností nehod odpovídají poměrům na českých silnicích a je nutné je respektovat při dalších výpočtech v analýze rizik. Obezřetněji je nutné postupovat s četnostmi výskytu požárů, které však poskytují dobrou shodu s německými údaji. Proto je i v tomto případě silně doporučeno používat hodnotu ze statistiky.

ROZLOŽENÍ VOZIDEL V OKAMŽIKU NEHODY

Metoda scénářů je založena na hodnocení úniku osob. V této kapitole je uveden základ pro toto hodnocení. Základem je znalost rozložení vozidel bezprostředně po nehodě, ze kterého potom vychází počet ohrožených osob. Pro co nejvěrnější modelování rozložení vozidel je nutné využít dopravní simulace.

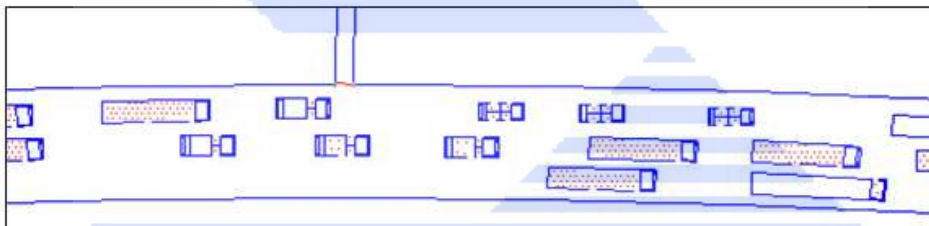
Rozložení vozidel v tunelu

Mikrosimulace dopravy je založena na matematickém modelu každého jednotlivého vozidla, takže napodobuje téměř přesně reálné chování dopravního proudu. Tím je možné velmi přesně odhadovat vývoj a délky kolon v závislosti na geometrii tunelu, jeho gradientu, přípustné rychlosti, skladbě dopravního proudu a hlavně i intenzit dopravy.

Vozidla ovšem nenajíždějí do tunelu v pravidelných rozestupech, ale jsou generována pseudonáhodně, dle pravděpodobnostních rozdělení. V programu je možné nastavit Poissonovo, binomické, logaritmické a další rozdělení.

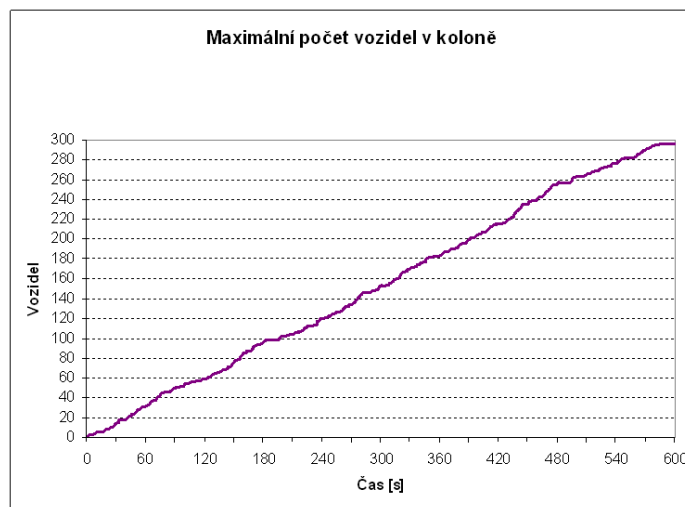
Charakteristiky vozidel se nastavují také velmi realisticky podle kategorií skutečných vozidel. Kromě délky, šířky, hmotnosti se nastavuje například i akcelerace a decelerace.

Výsledkem modelu je potom reálný obraz vývoje kolon se všemi potřebnými statistickými údaji. Lze simulovat i částečné omezení jednoho jízdního pruhu, snížení rychlosti apod.



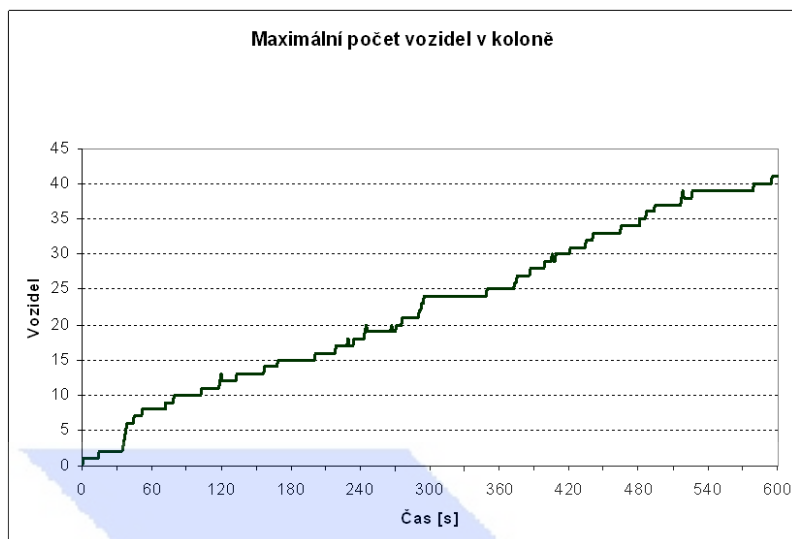
Obr. 14: Příklad výstupu simulace dopravního proudu, okamžik těsně před nehodou

Pro představu o výsledcích simulace byl simulován nárůst kolony v městském tunelu s hodinovou intenzitou 1500 vozidel a nulovým gradientem, rychlostí $70 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ a dvěma jízdními pruhy. Dopravní proud složen z osobních (96,9%) a lehkých nákladních vozidel (2,1%) a dále zde bylo 1% autobusů. Počet vozidel v koloně v závislosti na čase je patrný z Obr. 15.



Obr. 15: Vývoj kolon v městském tunelu ($1500 \text{ voz} \cdot \text{h}^{-1}$), lit. SAFETUN 2007

Z rychlosti vývoje kolon vyplývají požadavky na dopravně technologická zařízení, která musí zajistit co nejrychlejší uzavření tunelu v případě mimořádné události. Nejstříktnější požadavky jsou na městský tunel, neboť již po dvou minutách je v koloně cca 60 vozidel. V případě dálničního tunelu s intenzitou 200 voz.h⁻¹ a skladbou dopravního proudu BUS 5 %, NV 15 % a OV 80 % a maximální rychlostí 80 km.h⁻¹ je vývoj kolony mnohem pomalejší, viz Obr. 16, a tím je i menší počet ohrožených osob.



Obr. 16: Vývoj kolon v tunelu při nočních intenzitách dopravy (200 voz.h⁻¹), lit. SAFETUN 2007

Po nehodě se tedy vytvoří kolona ve složení a délce odpovídající dopravním parametrům, přičemž se předpokládá průměrná obsazenost vozidel, obvykle osobní vozidlo dvě osoby, nákladní jedna a autobus třicet osob. Výstupem modelu je prostorové (liniové) rozložení osob při vzniku události.

Počet fatálně ohrožených osob

Po iniciaci požáru je přirozené, že osoby unikají směrem k únikovým východům. Evakuační modely počítají vždy s nejhorším případem, kdy požár vznikl u nouzového východu a je tedy nutné unikat nejdelší trasou. Zároveň se vnáší psychické vlastnosti, např. jisté váhání účastníků, kteří jsou dále od požáru. Rychlost evakuace lze odhadovat „manuálně“ či pomocí simulačních programů, viz dále.

Počet úspěšně evakuovaných osob závisí na následujících hlavních parametrech:

Vzdálenosti únikových východů.

Tepelném působení ohně a způsobu šíření kouře (stratifikace).

Vybavenosti tunelu informačním, dopravním, požárně-bezpečnostním a ventilačním systémem.

Situace, kdy jsou osoby zraněné a nemohou se pohybovat, či je celý profil zablokován, že jsou osoby „uvězněny“ nebo podobné katastrofické scénáře nelze zahrnout do výpočtů rizika, neboť ty předpokládají průměrné podmínky.

MOŽNOSTI EVAKUACE Z TUNELU

Zásadním problémem při zjišťování počtu a rozsahu zranění či dokonce usmrcení osob je předpovězení, jak budou lidé reagovat na krizovou situaci, což je obecně velmi těžké a neexistuje zde obecná odpověď. Jak lidé reagují je ovlivněno vnějšími podmínkami a jejich individuální psychikou. Těmito otázkami se zabývala řada výzkumných prací a bylo nalezeno několik faktorů, které lze v reakcích lidí rozeznat. Marsden, lit. [30], definuje pět identifikovatelných bodů:

Chování je ovlivněno tím, kde se událost odehrává

Znamená to, že se lidé chovají jinak, pokud jsou si vědomi, že se jedná o tunel pod vodní hladinou nebo o tunel v horách.

Člověk aktivně vnímá své okolí

Lidé si přizpůsobují vjem okolí nebo události svým představám. Obecně neplatí, že lidé začnou utíkat, když ucítí nebo uvidí kouř. Dokonce se mohou vydat únikovou cestou směrem k události, pokud jí vnímají jako lepší či příjemnější.

Významná je role osob majících možnost ovlivnit chování lidí

Jedná se hlavně o dispečery tunelu. Je nutné, aby si lidé, kteří mají možnost ovlivnit pozitivně chování ostatních lidí, tuto úlohu uvědomili a využívali ji. Kritickým bodem komplexní bezpečnosti v tunelu je vzdělávání obsluh tunelu. Ti přebírají vedoucí roli a zodpovědnost v prvních kritických minutách.

Chování lidí je orientováno schematicky

Pokud člověk cestuje tunelem, má pro to jasný důvod, například jede nakoupit. Tento důvod také často ovlivňuje to, jak se lidé budou chovat. Proto je otázkou, zda evakuační cvičení mohou plně postihnout reakce lidí v reálné situaci.

V nebezpečných situacích se lidé mohou chovat iracionálně

Předvídat chování v normálních podmínkách je velmi obtížné. Jsou známy případy, že lidé ohrožovali ostatní, aby se sami dostali k únikovému východu.

Výše uvedené body je vhodné brát v úvahu, pokud se zpracovává evakuační analýza.

Procedura evakuace

Proceduru evakuace lze definovat jako čas, který uplyne od doby, kdy lidé událost identifikují do doby, kdy se dostanou na bezpečné místo. Tento čas lze rozdělit na několik časových úseků, které mohou být analyzovány zvlášť, protože jsou specifické z hlediska chování lidí i akcí, které jsou vykonávány. Evakuační proces lze tedy rozdělit na:

- Dobu zjištění události.
- Dobu reakce.
- Dobu pro únik.

Podrobnější popis jednotlivých fází je v kap. „Procedura evakuace“.

Model evakuace

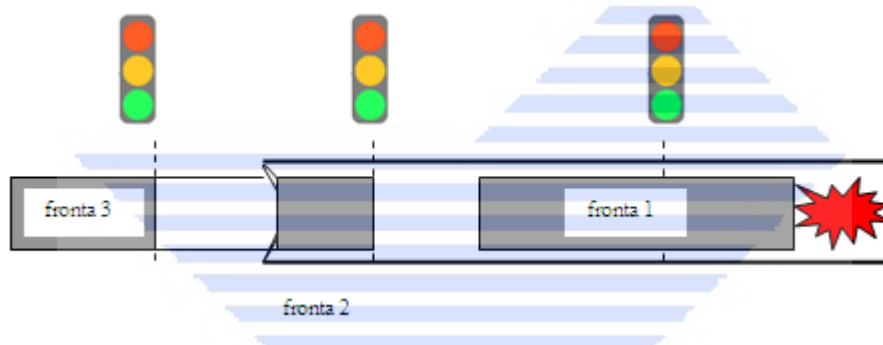
Faktory zmíněné v předchozí kapitole mají vliv na přesnost modelu a musí se počítat s tím, že se vždy pracuje s jistým stupněm neurčitosti a s jistým zjednodušením. Proto je nezbytné si tato zjednodušení uvědomovat a při tvorbě modelu je definovat. Na druhé straně jsou tyto modely velmi důležité, neboť umožňují buď ve stádiu návrhu projektantům identifikovat a pojmenovat problém, anebo v případě hotových tunelů modelovat situace, které mohou nastat pro události různého druhu.

Pro účely zjištění, jaký čas potřebují lidé, aby se evakovali, je možné pracovat se zjednodušeným modelem. Model vychází z předem definovaných rychlostí chůze. Jednoduchým výpočtem je možné stanovit kapacitu únikových východů a fronty, které vznikají.

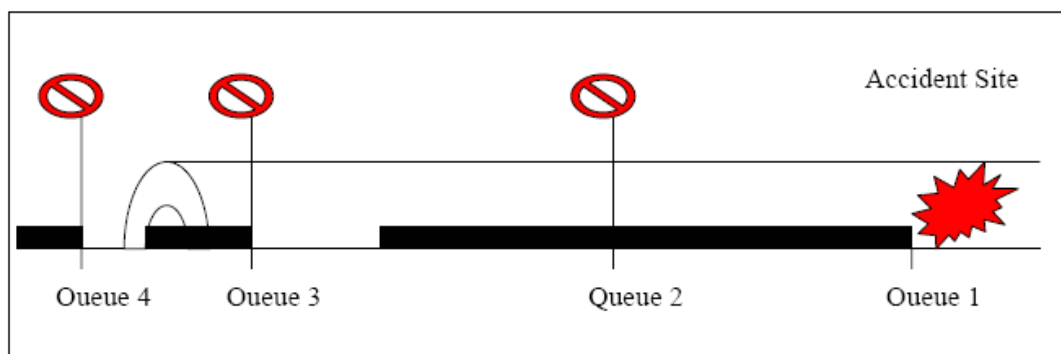
Zjednodušený model front

Hlavním výstupem modelu front je stanovení způsobu evakuace osob, po vzniku požáru. První fronta vozidel se vytváří v bezprostřední blízkosti před místem požáru. Předpokládá se, že vozidla po směru jízdy za požárem tunel bezpečně opustí. Velikost kolony před požárem závisí na intenzitě provozu, době detekce požáru, pozici světelných signálů (signál Stop) vůči ohnisku požáru a rychlosti, jak je signál Stop zapnut. Také se musí vzít v úvahu, že některá vozidla nemusí zastavit na signál Stop a pokračují k bližší koloně před požárem.

Pokud se předpokládá, že například osobní vozidlo veze tři osoby, mikrobuses pět osob, autobus v průměru 20 pasažérů a nákladní vozidlo jednoho řidiče, lze vypočítat počet ohrožených osob. Metodika je popsána v lit. [26], příloze E. Tam je také uveden následující obrázek:



Pro stanovení počtu uvíznutých osob byl navržen následující konkrétní scénář: tunel uvažovaný pro modelování evakuačního scénáře má dva tubusy délky 1000 m. Uvažovaná událost vznikne v polovině délky tunelu. Tedy 500 metrů po vjezdu vozidel do tunelu. V prostorách tunelové trouby se v důsledku nehody na kótě 500 m začnou vytvářet 4 skupiny a to před nehodou a před návěstními signály STOP, viz Obr. 17.



Obr. 17: Počáteční formování front v modelu front

Do modelu jsou započítána vozidla dle Tab. 8:

Vozidlo	Uvažované délky v (m)	Procentní podíl
Osobní auto	3,5	80 %
Užitkové auto	4,5	5%
Nákladní vozidlo	20	10%
Autobus	20	5%

Tab. 8: Poměr typů vozidel pro modelování front

V závislosti na době detekce varovnými systémy a na pozici varovných zařízení se budou vytvářet před místem nehody fronty s rozličnou délkou. Ve značném zjednodušení lze předpokládat: intenzita provozu je 44 300 vozidel za den. Tedy 30 vozidel vjede do tunelu za minutu, a každé nové vozidlo vjede do tunelu každou druhou sekundu (za předpokladu rovnoměrného rozložení). Po vzniku nehody, s každou novou minutou, přibude do prostor tunelu 30 nových vozidel. Tato vozidla se řadí do uvedených čtyř front.

Fronta Q1 se formuje ihned před místem události. Událost se stane v čase t_0 . V jistém čase t_d (detekční čas, 2 minuty) se aktivují první světelné signály v tunelu. Před nimi se vytváří druhá fronta vozidel, Q2. Třetí fronta Q3 se formuje u dalších světelných signálů po 3 minutách od události. Vzdálenost mezi Q1 a Q2 je 190 m.

Po třech minutách do prostor tunelu najede celkem 90 vozidel, dle původního propočtu. Těchto 90 vozidel utvoří frontu přibližně 270 metrů dlouhou. Mezi frontami Q1 a Q2 tedy nebude žádné volné místo. Dále, jediná vozidla, která se připojí k této frontě po třech minutách, budou vozidla v tunelu stojící mezi frontami Q3 a Q2. Tam je vzdálenost 220 metrů, tudíž se vyskytne dalších 5 vozidel, která se připojí k počáteční frontě v přímé blízkosti události. V této frontě bude celkem stát 95 vozidel. Složení fronty vozidel je dáno tabulkou Tab. 9:

Vozidla	Osoby
76 OA po 3 lidech	228
5 užitkových vozidel po 5ti lidech	25
9 NV s 1 osobou	9
5 BUS s 20-ti osobami	100

Tab. 9: Počet osob ve vozidlech

Ve sledovaném modelu bude tedy celkem 362 osob (uvíznutých osob). Předpoklady pro výpočet takto koncipovaného modelu front:

- Všechna vozidla jedou rychlostí 80 km.h^{-1} .
- Vzdálenosti mezi vozidly stojícími ve frontách jsou zanedbatelné.
- Čas, pro registrování světelných značek a zastavení řidiči je stanoven na 1 minutu.
- Lidé z vozidel stojících ve frontách Q3 a Q4 se evakuují z tunelu vjezdovým portálem.
- Osoby budou rovnoměrně rozmístěny do 3 zón, tj. 120 osob v každé zóně.
- K reakčním časům osob byly přidány 3 minuty, z důvodu zpoždění formování kolony (čas pro umístění vozidel v koloně).

Dále se v modelu předpokládá, že vozidla, která se pohybovala v době nehody za havarovaným vozidlem, vyjela bezpečně z tunelu ve směru jízdy výjezdovým portálem.

Zónový model

Velice těžkým, leč důležitým úkolem, je stanovení odpovídajících (realistických) evakuačních časů, pro určení podílu osob, které by mohly být v reálných podmínkách vystaveny životu ohrožujícím podmínkám při vzniku nehody v tunelové troubě.

Je důležité také zdůraznit, že získané evakuační doby mají pouze informativní charakter a mohou být užity bezpečnostními tunelovými experty jako nástroj pro identifikaci potenciálních problémů řešeného tunelu. Obecně je tedy velice obtížné určit (předem stanovit) časy pro reakce osob v tunelu. Avšak toto (jakékoliv expertní) určení je nezbytné pro další vyobrazení sledu událostí „co se bude dít po vzniku nehody“.

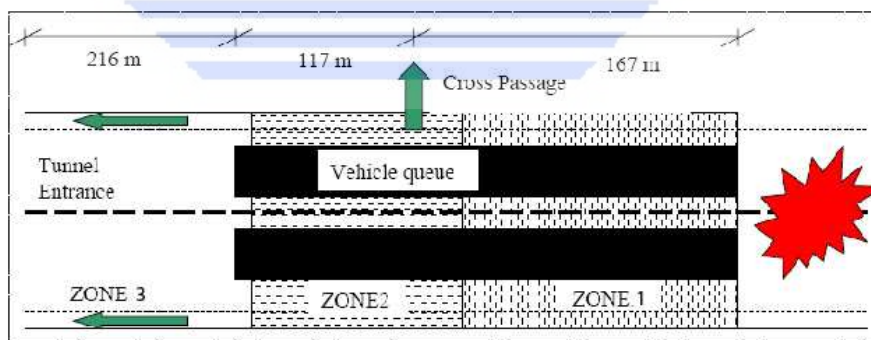
V popisovaném díle autor určil doby reakcí osob dle svého expertního odhadu. Doba před samotným pohybem k úniku (doba uvědomění si události a doba reakce) je zde rozložena v závislosti na vzrůstající vzdálenosti od místa nehody. Čím blíže k místu události, tím dříve bude situace osobě známa. Časy uvědomění si události a reakční časy jsou rozděleny do zón tunelu dle Tab. 10:

	Zóna 3	Zóna 2	Zóna 1
Délka zóny (od nehody)	250 – 500 (portál)	150 – 250 m	0 – 150 m
Doba zjištění události	4 minuty	3 minuty	2 minuty
Doba reakce	0,5 minuty	1 minuta	1,5 minuty

Tab. 10: Časy uvědomění si nebezpečí a časy reakce

Dle Tab. 10 a Obr. 18 lze rozpoznat, že zóna 1 je uvažována od místa vzniku nehody v délce 150 metrů, zóna 2 se uvažuje od 150 do 250 metrů a zóna 3 od 250 m do konce tunelové trouby.

Rozložení doby reakce podle zón probíhá opačně nežli doby uvědomění si události. Tento fakt je odůvodněn tím, že osoby vzdálenější od místa nehody jsou již nabádány jistým způsobem k pohybu osobami z bližších míst směrem k nehodě. A přestože osoby v zóně 1 jsou k nebezpečí blíže a jejich doba pro uvědomění si události je krátká, budou potřebovat delší dobu reakce než ostatní v jiných zónách, protože spotřebují více času na „ujištění se“ o správném způsobu svých reakcí. Zatímco ve vzdálené zóně mají osoby více času na ujištění se o svých akcích ještě před tím, než se obeznámí s událostí, a tudíž provedou své reakce rychleji.



Obr. 18: Znázornění rozložení evakuačních zón v modelu tunelu, lit. [26]

Dalším krokem pro modelování procedury evakuace je proces opuštění vozidla osobami. Tento čas je zanedbatelný pro osoby vystupující z osobního a nákladního vozidla. Ale v případě výstupu osob z autobusu již tento čas musí být uvažován a zapracován do plánu evakuace. Čas pro výstup z autobusu je vypočítán na základě kapacity dveří 49 osob/1 min/1 metr šířky dveří pro tlačící se dav lidí. Za předpokladu šířky dveří autobusu 0.8 metru platí, že 20 osob se dostane z autobusu za 30 vteřin.

Poté, co osoby opustí svá vozidla, mají možnost se rozhodnout, který únikový východ použijí. V tomto případě je to jedna úniková propojka 167 m od nehody (v zóně 2), a portál tunelu, od nehody 500 metrů.

Předurčení toho, kam se utíkající osoby uchýlí, je velice obtížné. Logicky je ovšem možno navrhnout, a předpokládat, že většina osob ze zóny 1 použije k úniku nejbližší možný únikový východ. Na druhou stranu osoby ze zóny 3, pokud se jednou rozhodly pro výběr únikové cesty, budou mít na výběr pouze jeden východ. Tudíž je bráno v úvahu, že velký podíl osob ze zóny 3 (80 %) použije k úniku právě tunelový portál.

Dále byla vypočítána kapacita dveří únikové propojky. Úniková propojka je široká 4,7 metrů s výškou 3,9 metrů. Uprostřed této propojky jsou dveře oddělující tunelové trouby. Šířka těchto dveří je 1,2 metru. Je známo, že cca 56 osob projde dveřmi za 1 minutu při šířce dveří 1 metr a pro umírněný dav lidí. Pro tyto dveře šířky 1,2 metru bude předpokládáno, že projde 67 osob za 1 minutu.

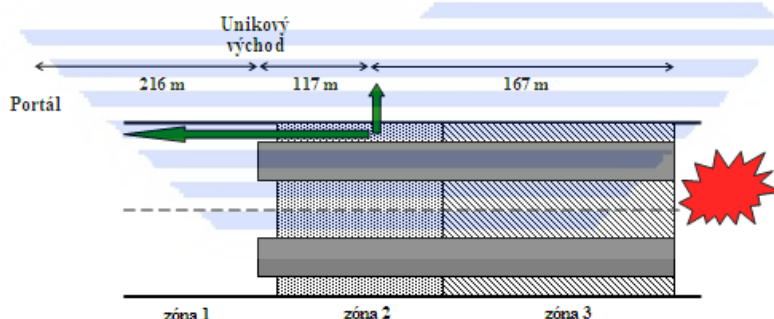
Příklad výpočtu počtu ohrožených osob

Pro příklad výpočtu je zvolena situace dle Obr. 19. Výsledné časy pro evakuaci závisí samozřejmě na schopnosti si uvědomit, o jaké nebezpečí se jedná a proto mají vždy výpočty indikativní charakter.

Doby pro zjištění události lze rozdělit podle tří zón v tunelu. V zóně 1, kde vznikla událost a jejíž délka je odhadnuta na 150 m, je doba pro zjištění události cca 2 min. V zóně 2, která leží mezi 150 a 250 m, je tato doba cca 3 min. Konečně ve třetí zóně, která se rozkládá od 250 m až k portálu, je doba uvědomění asi 4 min.

Doba reakce má opačný charakter, viz Tab. 11 a je delší těsněji k události a kratší v zóně 3. Důvodem je, že unikající lidé ovlivňují chování nerozhodnutých jedinců a přispívají ke zrychlení jejich reakcí. Také se zde uplatní to, že si řidiči stojících vozidel mohou rozmyslet co dělat a orientují se vzhledem k únikovým východům.

Pokud se lidé dostali ze svých vozidel, musí se rozhodnout, jakou cestu úniku zvolí. Na Obr. 19 je ukázáno, že mohou zvolit cestu únikového východu nebo jít k portálu. Předpokládá se, že zde není problém s nakupenými vozidly, a že není problém s únikovými cestami. Lze předpokládat, že lidé ze zóny 1 se vydají směrem k východu z tunelu, zatímco lidé ze zóny 3 zvolí jeden z únikových východů ve směru od ohniska požáru.



Obr. 19: Ilustrace situace v tunelu (zóna 1 a 3 jsou v obr. přehozeny)

Oblast	Doba pro zjištění události [min] (+ 3 min pro tvorbu kolony)	Doba reakce [min]	% lidí na každý exit (počet lidí)		Max. délka chůze k únikovému východu [m]	Max. čas k únikovému východu; rychlost 0,7 m/s
			východ	portál		
zóna 1	2	1,5	90 (109)	10 (12)	167	239
zóna 2	3	1,0	50 (61)	50 (61)	83	119
zóna 3	4	0.5	20 (24)	80 (97)	129	184

Tab. 11: Informace vztahované k evakuaci

Na příkladu v Tab. 12 lze ukázat, jak se při výpočtech a úvahách postupuje. Vstupním předpokladem je, že 362 lidí je rovnoměrně rozloženo v zónách, což znamená, že v každé ze tří zón je 121 lidí. Tabulka ukazuje, že 194 lidí použije pro únik únikové východy, což s předpokládanou a zmíněnou kapacitou vyžaduje 173 sekund. Jak bude ukázáno dále, není tento čas limitujícím faktorem.

Dále je uvažována kapacita únikových cest. Pro 59 lidí za minutu a únikové cesty běžné šířky je kapacita únikové cesty cca 1,2 člověka za sec. Tato hodnota je vyšší, než by se očekávalo při rychlosti $0,7 \text{ m.s}^{-1}$. Proto je rychlost unikajících lidí brána v potaz jako rozhodující faktor. Lidé začínají opouštět zónu 1 rychlostí 0,5 člověka za sec. Nicméně je nutné brát v úvahu nejhorší scénář, kdy je autobus jedním z prvních vozidel za událostí, což může teoreticky znamenat, že poslední osoba opouští zónu po cca 11 minutách (659 s). Zde se počítá se 180 s pro formování kolony + 210 s na zjištění + 30 s na únik z autobusu + $167 \text{ m}/0,7 \text{ m.s}^{-1}$ pro zjištění evakuačního času. Pro kompenzaci tohoto nepříznivého výsledku se bude uvažovat, že po 600 s budou v zóně 1 pouze lidé opouštějící autobus. Tedy po této době je rychlost opuštění zóny 1 0,3 osoby za sec.

Lidé opouštějící zónu 1 únikovým východem musí ujít ještě 17 m v zóně 2, aby se dostali k únikovému východu. To znamená, že v době 420 sec po reagování na událost dosáhne 12 lidí ze zóny 1 zónu 2 ($17 \text{ m}/1,4 \text{ m/osobu}$). Dále se předpokládá, že se 8 lidí vydá k tunelovému portálu.

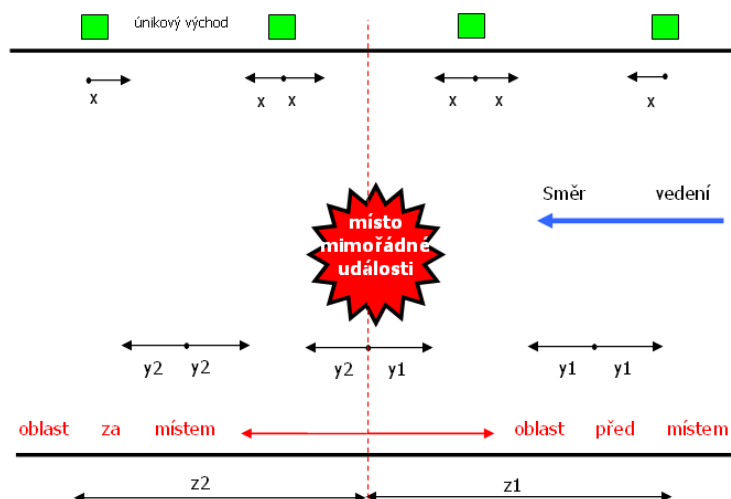
Výsledky rozboru, který je velmi podrobně komentován v citované literatuře, je pro zajímavost uveden v následující tabulce:

Čas po vypuknutí požáru [s]	Lidé zůstávající v tunelu		
	zóna 1	zóna 2	zóna 3
360	121	121	121
420	106	121+8+12	121
450	91	91+8+12	121+15
480	76	61+8+12	106+30
510	61	31+8+12	97+45
540	46	16+8+12	97+60+8
570	31	1+8+12	97+60+12
600	16	0+12	169
630	7	0+2	169
660	0	0	169
690	0	0	169
720	0	0	169
750	0	0	169
780	0	0	139
810	0	0	109
840	0	0	79
870	0	0	49
900	0	0	19
930	0	0	0

Tab. 12: Časový vývoj počtu lidí v zónách

Vliv únikových východů

Výpočet následků pro všechny účastníky silničního provozu je tedy prováděn podle ohodnocení vzdálenosti únikových východů a výpočtu evakuačních časů. Účastník silničního provozu, aby unikl následkům (poškození zdraví, smrt) vyvolaným mimořádnou událostí (MU), musí překonat jisté vzdálenosti k únikovým východům, které jsou pro potřeby výpočtu členěny dle Obr. 20.



Obr. 20: Únikové vzdálenosti v silničním tunelu při mimořádné události, lit.[26]

Legenda k obrázku:

- x ... „**volná úniková vzdálenost**“ – vzdálenost osoby od únikového východu, měla by být menší než polovina vzdálenosti mezi dvěma únikovými východy, nedochází k žádnému úmrtí,
- y1 ... „**účinná vzdálenost před místem MU**“ – vzdálenost k únikovému východu pro osobu před místem MU je delší než „volná úniková vzdálenost“ a menší než vzdálenost mezi únikovými východy, dochází k 1 % úmrtí,
- y2 ... „**účinná vzdálenost za místem MU**“ – vzdálenost k únikovému východu pro osobu za místem MU je delší než „volná úniková vzdálenost“ a menší než vzdálenost mezi únikovými východy, dochází k 2 % úmrtí,
- z1 ... „**maximální účinná vzdálenost před místem MU**“ – vzdálenost od místa MU k druhému únikovému východu ve směru vedení dopravy, míra úmrtí není hodnocena,
- z2 ... „**maximální účinná vzdálenost za místem MU**“ – vzdálenost od místa MU k druhému únikovému východu proti směru vedení dopravy, míra úmrtí není hodnocena.

Pro různé vzdálenosti osob od únikových východů a jejich pozice vzhledem k místu MU byly stanoveny pravděpodobnosti možnosti jejich úmrtí. Výše uvedené charakteristiky, důležité pro únik osob, závisí na mnoha parametrech, které určují průběh MU, chování lidí, rychlost a způsob detekce MU, reakce řídicího systému a operátora, režim ventilace, požární odolnost tunelu a existence komunikačního systému.

Pro vzdálenosti osob od místa MU větší než $z1$ a $z2$ se předpokládá, že se všechny osoby zachrání. Některé případy MU, které vedou k nárůstu počtu úmrtí účastníků silničního provozu a jsou významně ovlivněny aktuální hodnotou „volné únikové vzdálenosti“: jedná se o MU se zablokováním únikového východu, pro unikající osoby vzhledem k rychlosti průběhu MU a ohrožená osoba musí při úniku překonat vzdálenost až k dalšímu (sousednímu) únikovému východu,

Modely evakuace založené na simulačních programech

Modely evakuace založené na simulaci úniku osob patří do vyšší kategorie modelů, neboť jsou poměrně přesné a velmi dobře napodobují chování skutečných osob. Je to dáno tím, že mají zabudován skutečný psychomotorický algoritmus pohybu a chování osob. Jedním z představitelů těchto programů je program SIMULEX, který byl analyzován v rámci projektu SAFETUN a na základě analýz je tímto doporučen pro využívání v ČR.

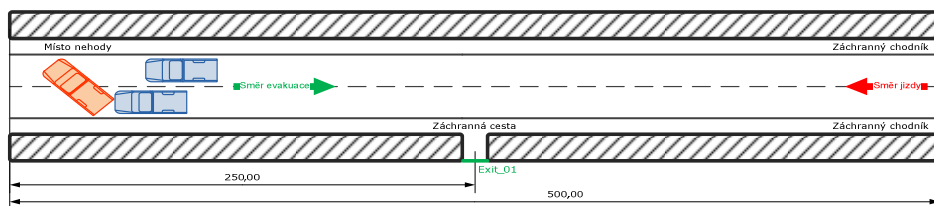
Stručný popis práce s programem

Postup tvorby simulace evakuace osob ze silničního tunelu lze rozdělit do základních bodů:

- náčrtek silničního tunelu,
- vstupní podklad k simulaci,

- výpočet simulace,
- výstupy z provedené simulace.

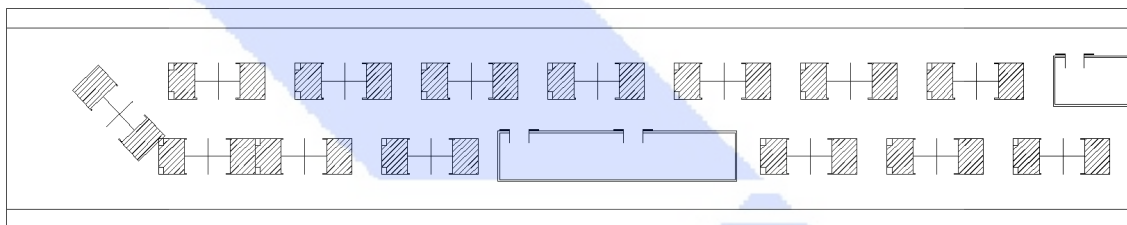
Nejprve je potřeba vytvořit schematický náčrtek požadované lokality evakuace se všemi potřebnými prvky (Obr. 21), ze kterého se dále vytvoří 2D model v měřítku 1:1 (např. v CAD).



Obr. 21: Schematický náčrtek silničního tunelu s umístěním východů a směrem evakuace

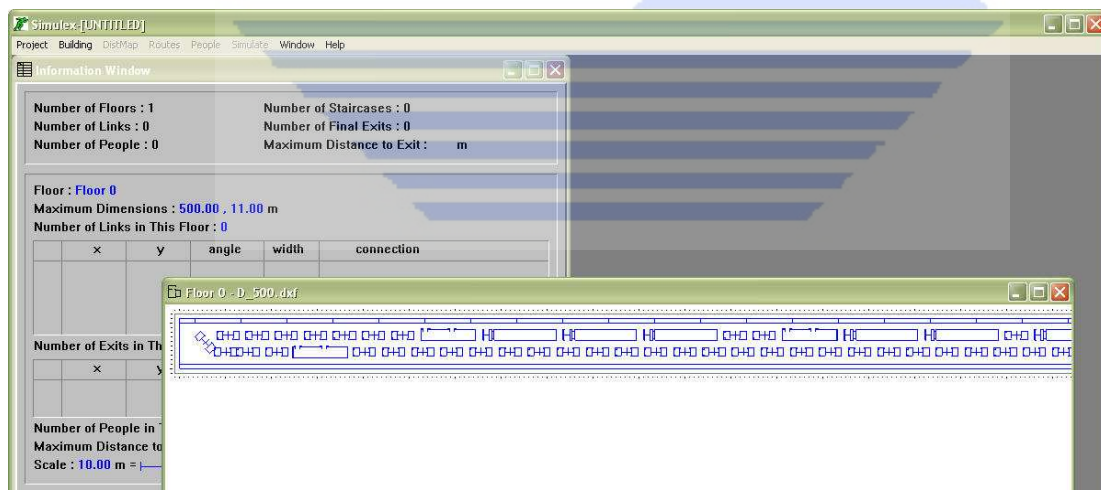
Pro konečnou fázi CAD souboru, který obsahuje všechny potřebné překážky v tunelu, je nutné vzít v úvahu:

- rozmístění stojících vozidel (Obr. 22),
- rozmístění evakuačních východů,
- opláštění tunelu atd.



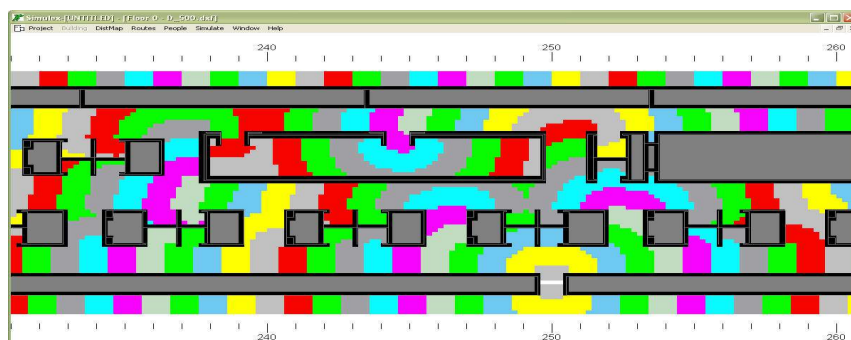
Obr. 22: Schematické rozmístění části vozidel v tunelu v CAD

Konečný soubor CAD se načítá do aplikace Simulex, kde je zobrazen (Obr. 23).



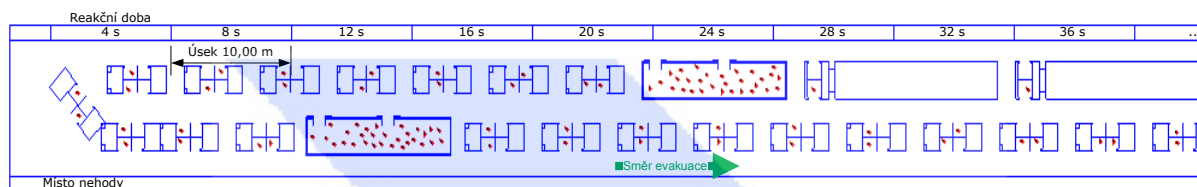
*Obr. 23: Konečný export *.dxf souboru do programu Simulex*

Pro konkrétní simulaci se musí vytvořit únikové východy v silničním tunelu a provést přepočítání vzdálenostní mapy pro celý tunel. Tato vzdálenostní mapa může být vyobrazena na modelu graficky jakoby vzdálenostní vrstevnice rozlišené barevně (Obr. 24).



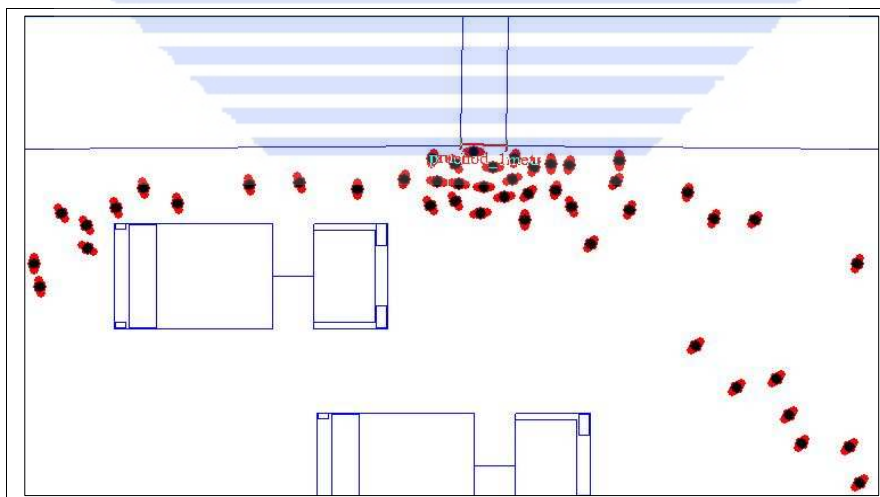
Obr. 24: Vyobrazení grafického modelu distanční mapy silničního tunelu

Nyní je možno umisťovat do modelu účastníky provozu, tedy osoby ve vozidlech v prostoru modelovaného silničního tunelu, a to po jednotlivcích či celých skupinách. Při vkládání osob je možné navolit v dialogovém okně typ osoby, která bude do modelu přidána, jako např. velikost těla, podíl žen, mužů a dětí ve skupině, individuální maximální rychlost chůze apod.

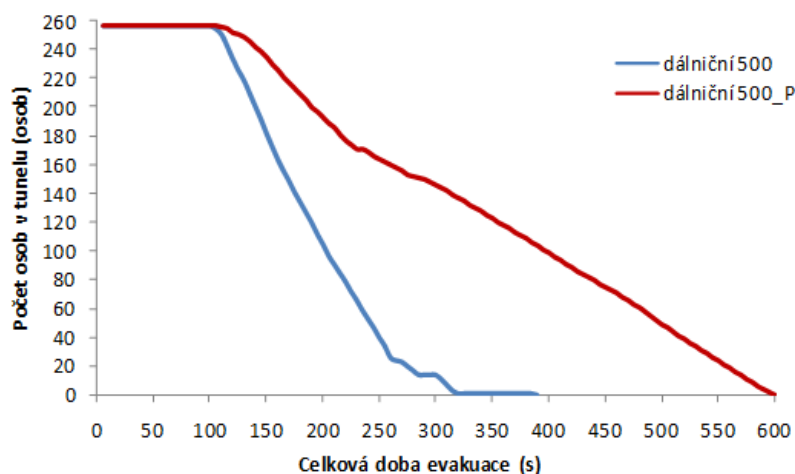


Obr. 25: Ilustrační uspořádání vozidel a osob v tunelu v úsecích s různou reakční dobou

Po nastavení výše zmíněných podmínek, lze přistoupit k samotnému výpočtu simulace evakuace osob ze silničního tunelu. Při samotném běhu simulace lze sledovat, jak se rozmístěné osoby pohybují směrem k nadefinovaným únikovým východům. Jak vznikají fronty, zácpy, či jak se osoby přecházejí, Obr. 26. Lze sledovat i počty osob zbylých v prostorách evakuace v kterémkoli čase a celkovou dobu evakuace, Obr. 27. Pohyb osob je zaznamenáván každých 0,1 s při běhu programu.



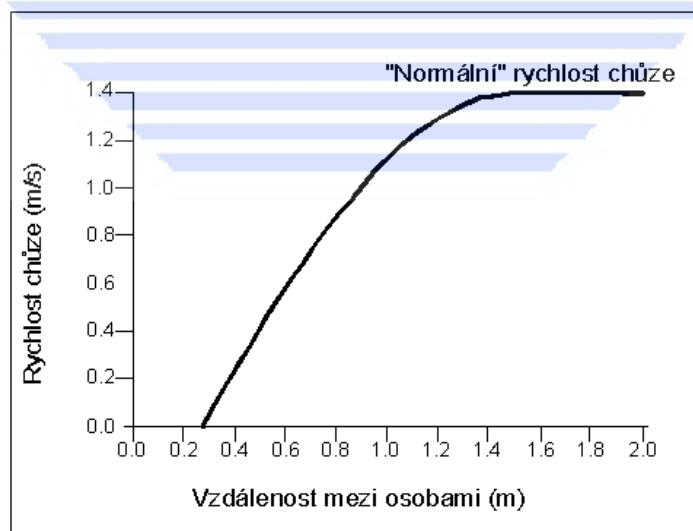
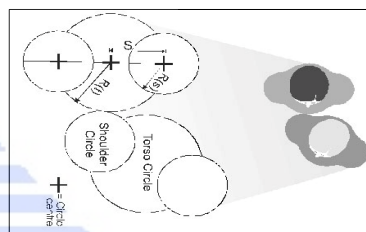
Obr. 26: Detail situace u jednoho z únikových východů



Obr. 27: Průběh evakuace dálničního tunelu pro rychlost $0,7 \text{ m.s}^{-1}$ (P) a $1,4 \text{ m.s}^{-1}$

Jedním z výstupů z programu Simulex je grafické-video zachycení celého běhu. Dalším výstupem je textový soubor uložený ve formátu *.txt, který obsahuje všeobecné informace k toku pohybu osob během evakuačního běhu. Do souboru program zaznamenává kromě počátečního nastavení modelu, počtu východů, i například počty osob, které opustili sledované únikové východy a jejich evakuační čas těmito východy.

Do programu je možné zadat velmi detailně úplné charakteristiky osob, jako je poměr mužů, žen a dětí, věkové rozložení, charakteristiky chůze apod. Na obrázku je ukázán způsob zadávání rozměrů lidí. Zajímavým parametrem, zadaným implicitně je, jak se mění rychlost chůze se změnou vzdálenosti mezi za sebou jdoucími osobami.



Obr. 28: Změna rychlosti chůze s tím, jak jdou osoby za sebou

Výstupem simulace jsou grafická znázornění formací unikajících osob a samozřejmě i číselné hodnoty evakuačních časů a další údaje.

Závěr

Metody pro zjišťování počtu ohrožených osob založené na analýze scénářů mohou být, v současné době, poměrně přesné a s malým stupněm neurčitosti, neboť pozice vozidel v tunelu lze odvodit z mikrosimulačních programů simulujících jízdu vozidel po pozemních komunikacích. Metody byly mnohokrát ověřeny a jsou základem dopravního inženýrství.

Díky znalosti rozložení vozidel v době po vzniku události lze poměrně přesně odhadnout počet ohrožených osob. Pro výpočet vlastní evakuace je tímto dokumentem navržena explicitní hodnota pro dobu zjištění – 120 s a dobu reakce – 90 s. Těmito technickými podmínkami je doporučeno používat modely simulující únik osob, které jsou velmi věrné, neboť mají implementován psychomotorický model pro pohyb davu osob.



KVALITATIVNÍ RIZIKOVÁ ANALÝZA

Výše uvedené metody „Expert Judgement“ nebo „What-If Analysis“, viz kap. „Přehled metod pro analýzu rizik“ nemají formalizovaný popis a jejich aplikace leží v rukou experta, resp. analytika rizik. V této kapitole je popsán princip preskriptivní metody „Check List“, což je relativně přehledný postup, spočívající v porovnávání navrhovaných či již aplikovaných zařízení a jejich parametrů se standardy, které jsou předepsány pro vybavování tunelu. Kromě fyzických zařízení lze modifikací metody kontrolovat i shodu řešení s provozními předpisy či organizačními řády.

Velmi efektivní metodou, která hodnotí riziko na relativní stupnici, představuje SAFMEA, jejíž principy jsou popsány ve druhé části kapitoly. Aplikování této metody již vyžaduje značnou znalost v oboru analýzy rizik a nezbytností je také spolupráce s více experty.

Metoda „Kontrolní seznam“

Metoda kontrolního seznamu (Check List) je základním a nejjednodušším hodnocením sloužícím projektantům (investorům, budoucím provozovatelům) pro prvotní hodnocení plánovaného objektu nebo pro následnou analýzu a hledání krizových uzlů již hotového díla. Nejedná se zde o analýzu rizik, ale o komparativní porovnání řešeného tunelu s platnými standardy⁴.

Základní ideou metody je, že zpracovatel (projektant, specialista investora, správního subjektu, atd.) odpovídá na soubor předem definovaných otázek souvisejících s bezpečnostním řešením. Po vyplnění, nejlépe elektronické formy dotazníku, a případném upřesnění některých otázek, analytik rizik vyznačí problémové oblasti v bezpečnostním řešení tunelu, na které je nutno se zaměřit a které je nutno neopominutelně podrobit další analýze.

Zadavatel zpracování analýzy rizik je tak přehlednou a jednotnou formou informován o kvalitě bezpečnostního vybavení tunelu a je nejenom upozorněn na možné problémové oblasti, ale rovněž na řešení bezpečnostně předimenzovaná a to ve vztahu k porovnávaným dokumentům. Analýza tedy může odhalit i neefektivní investici do vybavení tunelu.

Identifikátor bezpečnostního řešení tunelu pozemní komunikace

V rámci přípravy metody „Kontrolní seznam“ pro praktické využití je vhodné zpracovat dotazníky ve vhodném programovém prostředí. Vzhledem k tomu, že se nejedná o reálnou analýzu rizik, ale spíše o jejich identifikaci, je doporučeno používat pro tuto část bezpečnostní dokumentace název „Identifikátor bezpečnostního řešení“ (IDET).

Zařazení tunelu do bezpečnostní kategorie

V prvním kroku řešení je tunel na základě TP98-Z1 zařazen do bezpečnostní kategorie jako tunel TA, TB, TC, TC-H, TD a TD-H. Vlastní myšlenka identifikace jednotlivých položek bezpečnostního řešení tunelu vychází z rozdělení tunelu na subsystémy související s bezpečností, jako jsou například Osvětlení tunelu, Větrání tunelu, Bezpečnostní vybavení atd., a dalšího strukturovaného dělení na prvky (např. Nouzové únikové osvětlení nechráněných únikových cest, atd.) a z hodnocení shody prvků se standardy.

Struktura a počet objektů a prvků striktně vychází z TP98 (TP98-Z1), z normy ČSN 73 7507 „Projektování tunelů pozemních komunikací“, NV 264/2009 Sb., směrnice EU 2004/54/EC a případně dalších předpisů, které vyžaduje respektovat objednatel stavby.

4

V rámci projektu ministerstva dopravy „Analýza a řízení rizik na pozemních komunikacích“ (2001-03) byl vyvinut tzv. „Rizikový kalkulátor“. Ten byl vytvořen jako softwarový nástroj v programovém prostředí Excel a umožňoval provádět orientační hodnocení bezpečnostního vybavení tunelu. Jednalo se o originální, do té doby nepublikovaný přístup, který ve stejné době aplikoval ve velmi podobné podobě, ale nezávisle i německý automobilklub ADAC pro hodnocení bezpečnosti evropských tunelů.

Podklady pro vyplňování formuláře

Základními podklady pro vyplňování formuláře je platná dokumentace pro výstavbu, uvedení do provozu a provoz předmětného tunelu. Pro vyplňování dotazníku se tedy nepředpokládá měření, zjišťování rozměrů nebo hodnot, či osobní rekognoskace komplexu tunelové stavby.

Struktura formuláře

Při provádění komparativní analýzy metodou Kontrolního seznamu, porovnáním řešeného tunelu se skutečností jsou analyzovány následující systémové oblasti:

- Stavební řešení
- Zásobování elektrickou energií
- Větrání komplexu tunelu
- Osvětlení
- Požární zabezpečení
- Zařízení bezpečnostního systému
- Spojení a dorozumívací zařízení
- Systém videodohledu
- Řízení dopravy
- Řídicí systém (a případně i další)

Všechny uvedené oblasti jsou dále detailněji členěny. Pro každou systémovou oblast je uveden soubor otázek, položek, které vychází z členění výše uvedených norem a standardů. Na tento soubor otázek zpracovatel dotazníku odpoví označením správné odpovědi z možností:

- Vyhovuje TP98, ČSN 73 7507 a NV 264/2009 Sb.
- Vyhovuje Direktivě 54/2004/ES.
- Nevhovuje oběma předpisům: poddimenzováno.
- Významněji přesahuje požadavky dané normou.

Uvedené možnosti a odkazy na standardy jsou příkladem použitým v praxi, viz Obr. 29. V zásadě by vybavení mělo vyhovovat národním legislativním a normativním ustanovením, pokud vyhovuje pouze Direktivě, která je v mnoha bodech mírnější, je nutné uvedený bod přezkoumat stejně, jako když zařízení nevyhovuje či je předdimenzované.

Při elektronickém zpracování dotazníku lze s výhodou položky dotazníku doplnit „vysunovacími“ informačními texty, případně doplněnými potřebnými grafickými či tabulkovými výstupy, viz příklad v Tab. 13. Neshody se vyznačují do políčka Rizikový faktor.

Obsah otázek je značně různorodý. Odpovědi na některé otázky vyžadují poměrně značné odborné znalosti (např. zda postup návrhu normálního osvětlení tunelové trouby odpovídá postupu předepsanému), na některé je posouzení odpovědi jednoduché a vychází přímo z konkrétních údajů z projektové nebo provozní dokumentace (např. je-li navržen nebo realizován požární vodovod; je-li v souladu s předpisy zajištěno zásobování požární vodou ...).

Rizikový kalkulátor vybavení tunelu			Výstupy kalkulaci:			
			Rizikový faktor	Shoda s TP98	Shoda se směrnici EU	Předimenzováno
	Objekt	Prvek				
1.	Osvětlení tunelu					
1.1		Normální osvětlení				
1.2		Nouzové únikové osvětlení				
1.3		Náhradní osvětlení				
2.	Větrání tunelu					
2.1		Normální režim-dimenzování množství vzduchu				
2.2		Normální režim-kongesce				
2.3		Větrání propojek a úniků				
2.4		Rízení v případě požáru				
2.5		Teplotní odolnost				
2.6		Účinky imisí				
2.7		Kvalita řízení				
3.	Dopravní systém					
3.1		Dopravní režimy tunelu				
3.2		Kategorie vybavení tunelu dopravním značením				
3.3		Orientační dopravní značení				
3.4		Světelné signály				
3.5		Světelné signály pro jízdu v pružích				
3.6		Zařízení pro provozní informace				
3.7		Reflexní elementy				
3.8		Zábrany				
3.9		Kvalita a pokrytí dopravními detektory				
3.10		Měření dopravních parametrů				
3.11		Možnosti identifikace kongescí				
3.12		Možnosti identifikace zastavení vozidel				

Obr. 29: Příklad části dotazníku IDET v prostředí EXCEL

Označení položky/ Informační text

2.2.1
11.2 TP 98 Pokud není možné zajištění napájení elektrickou energií z distribuční sítě ze dvou nezávislých zdrojů, je nutno použít jako druhý nezávislý zdroj nezávislý záložní zdroj elektrické energie. 3.1.61 ČSN 73 7507 Nezávislý záložní zdroj napájení elektrickou energií je zdroj napájení komplexu silničního tunelu, nezávislý na elektrodistribuční síti, využívaný v případě výpadku zdroje normálního napájení elektrickou energií a zajišťující omezený provoz komplexu silničního tunelu, resp. uzavření tunelu.
2.2.2
12.9.6 Pokud je pro náhradní napájení elektrickou energií navržen nezávislý záložní zdroj napájení elektrickou energií v provedení motorgenerátoru, musí být jeho výkon a provozní podmínky navrženy tak, aby pro zařízení z vybavení tunelu, uvedená v člancích 12.9.3 a 12.9.4, byla zabezpečena dodávka elektrické energie nejméně po dobu 4 hodiny. ČSN 73 7507
2.2.3
12.9.2 Napájením ze dvou na sobě nezávislých napájecích zdrojů, se splněním požadavku samočinného přepnutí na zdroj (zdroje) náhradního napájení bez přerušení dodávky elektrické energie, musí být zabezpečena zařízení z vybavení tunelu, uvedená v následujících člancích 12.9.3 a 12.9.4. ČSN 73 7507
2.2.4
12.9.5 Pokud není z technicko-ekonomických důvodů řešeno napájení ZOKT náhradním napájením elektrickou energií, musí být v případě výpadku normálního napájení elektrickou energií zajištěno provozními opatřeními okamžité uzavření tunelu pro provoz na pozemních komunikacích. ČSN 73 7507

Tab. 13: Doplnující vysvětlení k otázkám dotazníku

Výsledkem analýzy je vyhledání slabších (či předimenzovaných) míst. Pokud se vyskytují pochybnosti, je vhodné nechat dotazník zpracovat dalšímu expertovi.

Analýza rizik metodou SAFMEA

Tato kapitola popisuje systematický postup analýzy rizik SAFMEA založený na expertním posuzování a následném statistickém vyhodnocení. Proces hodnocení je založen na následujících krocích:

- Identifikace možných poruch/událostí.
- Identifikace možných následků poruch.
- Kvantifikaci rizika indexem RPN a dalšími parametry.
- Kvalifikace a reprezentace poruch, co do závažnosti.
- Interpretace rizika v rámci projektu.

Celý proces řídí rizikový analytik (RA), který je znalý problematiky rizikového inženýrství a měl by mít i schopnost práce s kolektivem pracovníků. Vypovídací schopnost analýzy roste s počtem expertů, a proto by jejich počet neměl být nižší než pět. Na analýze může pracovat několik specializovaných týmů expertů. Pro každou fázi může být jiný pracovní tým. Například tým pro přípravu formuláře SAFMEA č. 1, což je formulář pro vyhledání rizikových faktorů, může být menší. Zatímco vlastního vyplňování formuláře č. 2 by se mělo účastnit co nejvíce expertů.

Velmi vhodné je uskutečnit vstupní instruktáž o podstatě metody, kde je nutné vysvětlit i úlohu expertů v analýze rizika. Proces tvořen dvěma hlavními fázemi:

(1) Fáze identifikace: v prvním kroku se stanoví aspekty projektu, ve kterých by se mohla vyskytovat nějaká rizika. Aspektem může být „Stavba tunelu“ nebo „Provozování tunelu“. Aspekty, které mají být zkoumány, jsou obvykle již předmětem zadání.

V dalším kroku experti vytipují segmenty, kde by se mohla vyskytovat rizika. Pro aspekt výstavby to může být „Územní plán“, „Technické řešení“ atd., pro aspekt provozu „Kvalita dopravní funkce“ nebo „Možnost evakuace osob“ apod.

Pokud se nalezne shoda ve vytipovaných segmentech, ve třetím kroku experti identifikují konkrétní rizikové faktory (RF). Ty musí být jednoznačně definované, musí mít vymezen rozsah a musí být hodnotitelné.

Rizikové faktory projektu musí být popsány stručně, srozumitelně a strukturovaně. V této fázi se postupuje řízenou diskusí, ale vhodná je i korespondenční forma.

(2) Numerická fáze: experti hodnotí jednotlivé RF z hlediska

- a) závažnosti události: S_v ,
- b) pravděpodobnosti vzniku události L_k .

Pro číselné hodnocení se používají numerické hodnoty z relativní stupnice celočíselných hodnot⁵. Stupnice se volí libovolně, měla by však odpovídat navyklému myšlení, proto se doporučuje např. 1 až 5. V případě hodnocených projektů, které jsou citlivé z hlediska rizika je pro závažnost události S_v vhodné použít nelineární stupnici, např. v členění: 1, 2, 4, 8, 16, 32. O tomto postupu rozhoduje analytik rizik.

Pro každou událost se vypočítá index RPN, viz rovnici (18). Ten pak udává relativní hodnotu rizika.

Metodu lze použít dvěma způsoby: v prvním případě se berou v potaz všechny rizikové faktory a stanovuje se vždy individuální index RPN_j . Součtem všech j hodnot se získá sumární index RPN_{SUM} . Tento index nemá jasnou interpretaci, lze však porovnávat jeho změny, pokud se ne/použijí bezpečnostní úpravy celého hodnoceného systému.

Ve druhém případě se porovnávají významné události (závažná nehoda, požár), na kterých se podílí různé bezpečnostní entity. Pak lze porovnávat $RPN_{POŽ}$ pro požár s RPN_{NEH} pro závažnou nehodu. Tento přístup je doporučen pro praktické využití.

⁵

Stupnice nesmí začínat nulou.

3.2.2. Pracovní postup

Metoda SAFMEA vyžaduje, aby ji aplikoval specialista na rizikovou analýzu. V detailu je popsána např. v lit. [31] nebo [16]. Při angažování většího počtu nezaopatřených expertů se snižuje míra neurčitosti a výsledky dobře kvantifikují rizika. V následujícím textu jsou zdůrazněny pouze hlavní zásady a principy tak, jak jsou používány:

I. Přípravná fáze

Rizikový analytik se seznámí s projektem a vybere nebo dostane zadané aspekty projektu, na které se má riziková analýza zaměřit. Může to být nejenom aspekt výstavby, ale hodnotit lze i provoz a další „jemnější“ aspekty, viz výše.

Společně je vybrána skupina expertů, kteří by měli zkoumané aspekty nahlížet z různých hledisek, a proto by měli zastupovat širší spektrum. Navíc platí, že větší skupina expertů snižuje statistickou chybu.

II. Určení rizikových segmentů a rizikových faktorů (Formulář č. 1)

Experti nejprve formulují segmenty (oblasti, domény) projektu, které tvoří rizika pro zkoumaný aspekt. Segment lze chápat jako obecnou entitu (zařízení, stavba, organizační uspořádání). Dále se segment, např. Územní plán, rozpadá se na tzv. Rizikové faktory (RF). Rizikovým faktorem může být např. „Riziko nesouladu se stávajícím ÚP“ nebo „Riziko nesplnění územně technických cílů“ apod.

Jednotlivé rizikové faktory s přesným názvem a definicí jsou analytikem rizik, na základě podkladů od expertů, uspořádány v databázi v tzv. Formuláři č. 1

III. Expertní hodnocení rizikových faktorů (Formulář č. 2)

Analytik rizik, vycházejí z odsouhlaseného formuláře č. 1, v tomto kroku zpracuje formulář č. 2, který obsahuje kompletní seznam rizikových faktorů a dva sloupce pro ocenění závažnosti události: Sv a pravděpodobnosti jejího vzniku Lk.

Analytik rozhodne i o metrice systému volbou rozsahu číselných hodnot a volbou lineární či nelineární stupnice. Příklad metriky z formuláře č. 2 je v následující tabulce:

<u>Sv - Závažnost nebezpečí pro vyšetřovaný rizikový faktor (dopad události)</u>	Numerické hodnocení
- Nepodstatné pro výstavbu i provoz; zanedbatelný dopad	1
- Zpoždění výstavby, vyšší finanční nároky na realizaci a provoz, ekologické dopady jsou na mezí rozpoznatelnosti; malý dopad	2
- Zpoždění výstavby, vyšší finanční nároky na realizaci a provoz, ekologické dopady jsou podstatné a činí řádově desítky procent; velký dopad	8
- Vzniklé škody jsou podstatné a zásadně ovlivní výstavbu i provoz; kritický dopad	16
<u>Lk - Pravděpodobná možnost realizace nebezpečí během vyšetřovaného projektu</u>	Numerické hodnocení
- Nelze ji očekávat; nepravděpodobná	1
- Velice malá; málo pravděpodobná	2
- Lze očekávat, že nastane; značně pravděpodobná	3
- Nastane (zcela, téměř) jistě	4

Tab. 14: Nelineární stupnice pro hodnocení závažnosti a lineární pro hodnocení pravděpodobnosti výskytu

Experti následně obdrží výsledný tvar formulářů a pokyny pro jeho vyplnění. Pokyny musí vyznít poměrně striktně, neboť je snahou, aby se případně nevyplňovaly RF chybně. Jeden z principiálních pokynů říká, že expert nemá hodnotit RF, pokud si není zcela jist, že mu rozumí. Platí zásada – raději vůbec, než chybně.

IV. Vyhodnocení indexu RPN

Následuje matematické zpracování výsledků. Vzhledem k obvykle velkému množství vstupních proměnných ($n_{RF} \times k$ -expertů) je nutné nad touto databází vytvořit program pro zpracování výsledků. Primárním výstupem je hodnocení rizika RPN daného rizikového faktoru. Způsob vyhodnocení probíhá v následujících krocích:

1. V každém řádku j formuláře se pro každého experta k vypočtou hodnoty indexu RPN_{jk}^E ze vztahu

$$RPN_{jk}^E = Sv_{jk}^E \times Lk_{jk}^E \quad (18)$$

Pro každý řádek je tedy zjištěno n_e expertních hodnot.

2. Pro každý řádek (rizikový faktor) se vypočte střední hodnota základního souboru RPN_j^E

$$mRPN_j^E = \frac{\sum_{k=1}^{n_e} RPN_{jk}^E}{n_e} \quad (19)$$

3. Pokud je expertů více než pět, lze stanovit směrodatnou odchylku každého řádku

$$sRPN_j^E = \sqrt{\frac{1}{n_e - 1} \sum_k (RPN_{jk}^E - mRPN_j^E)^2} \quad (20)$$

a dále je vhodné stanovit odhad kvantilu rozdělení RPN_j^E (kvantil je orientační hodnota „průměr plus směrodatná odchylka“ dávající představu o náhodnosti indexu. Pokud by šlo o soubor s normálním rozdělením, byla by hodnota $qRPN_j^E$ rovna 0,84 kvantilu rozdělení pravděpodobnosti)

$$qRPN_j^E = mRPN_j^E + sRPN_j^E \quad (21)$$

4. V dalším kroku se vyhledá maximální hodnota $\max Sv_{jk}^E$ s uvedením experta k , který tuto hodnotu odhadl.

Důvodem vyhodnocování samostatně závažnosti nebezpečí Sv je, že index RPN nemusí sám o sobě dát správný obraz o nebezpečích, jejichž realizace má velice malou pravděpodobnost výskytu (a bude tedy pro ně podle stupnice v Tab. 14 $Lk = 1$), avšak závažnost je veliká ($Sv = 5$). *Například: pravděpodobnost vykolejení vlakové soupravy během jejího průjezdu tunelem je velmi malá, událost je snadno zjištělná, avšak závažnost události bezesporu mohutná. Vykolejení by se tedy dostalo do spodní části pořadí trojic [Prvek, Následek].*

V tomto kroku se tedy jedná o individuální posuzování závažných událostí, které provádí, a závěry vyvozuje, analytik rizik.

V. Ohodnocení způsobů a následků

Výsledné matematické hodnocení se seřadí do tabulek a to vždy od nejvyšší hodnoty k nejnižší:

- A. Podle střední hodnoty rizika $mRPN_j^E$, přičemž je vhodné zároveň uvést i směrodatnou odchylku $sRPN_j^E$.
- B. Dle směrodatné odchylky $sRPN_j^E$.
- C. Podle $qRPN_j^E$.
- D. Podle $\max Sv_{jk}^E$.

O	Prvek projektu	Možný způsob poruchy	Možné následky poruchy	mRPN _j ^E	sRPN _j ^E	qRPN _j ^E	n
85	Činnost	pád cizího předmětu z okolí do příjezdového pásu tunelu	zastavení provozu tramvají	20,00	15,53	35,53	8
95	Činnost	teroristický čin v tunelu (např. zapálení pneumatik, bomba)	poničená technologie tunelu, kolize tramvají	17,43	16,52	33,95	7
28	Osoba	sebevražedné jednání	střet s tramvajovou soupravou	17,33	5,47	22,80	6
26	Osoba	sebevražedné jednání	zabránění vniknutí osob	16,00	5,66	21,66	5

Tab. 15: Třídění RF dle střední hodnoty rizika, lit. [32]

O	Prvek projektu	Možný způsob poruchy	Možné následky poruchy	mRPN _j ^E	sRPN _j ^E	qRPN _j ^E	n
96	Činnost	vandalismus	poničená technologie tunelu, kolize tramvají	15,00	16,86	31,86	6
95	Činnost	teroristický čin v tunelu (např. zapálení pneumatik, bomba)	poničená technologie tunelu, kolize tramvají	17,43	16,52	33,95	7
85	Činnost	pád cizího předmětu z okolí do příjezdového pásu tunelu	zastavení provozu tramvají	20,00	15,53	35,53	8
87	Činnost	uložení cizích předmětů do kolejíště, na kolejnice	zastavení provozu tramvají,	14,75	14,34	29,09	8

Tab. 16: Třídění RF dle směrodatné odchylky, lit. [32]

O	Prvek projektu	Možný způsob poruchy	Možné následky poruchy	mRPN _j ^E	sRPN _j ^E	qRPN _j ^E	n
85	Činnost	pád cizího předmětu z okolí do příjezdového pásu tunelu	zastavení provozu tramvají	20,00	15,53	35,53	8
95	Činnost	teroristický čin v tunelu (např. zapálení pneumatik, bomba)	poničená technologie tunelu, kolize tramvají	17,43	16,52	33,95	7
96	Činnost	vandalismus	poničená technologie tunelu, kolize tramvají	15,00	16,86	31,86	6
87	Činnost	uložení cizích předmětů do kolejíště, na kolejnice	zastavení provozu tramvají,	14,75	14,34	29,09	8

Tab. 17: Třídění RF dle kvantilu, lit. [32]

Takto seřazené řádky slouží pro základní analýzu rizika a je možné je využít i z hlediska omezení rizika a návrhu opatření na jejich omezení.

Po aplikaci protirizikových opatření (zkvalitnění vybavení) se celý proces může opakovat.

VI. Závěrečné posouzení

Závěrečné hodnocení a hledání doporučení je bezpochyby zásadní etapou práce a ve značné míře se na něm podílí analytik rizik.

V prvním kroku je nutné vytipovat oblasti přijatelnosti rizik. Grafickou představu významu hodnocení faktorů rizika z hlediska závažnosti události a pravděpodobnosti jejího vzniku udává Tab. 18. Přijatelné riziko je vyznačeno zelenou barvou, podmíněně přijatelné riziko je žluté a červeně je vyznačena oblast nepřijatelného rizika, viz tabulku na str. 50.

<i>Hodnocené riziko</i>				
Závažnost události	Pravděpodobnost vzniku události			
	1	2	3	4
16	16	32	48	64
8	8	16	24	32
2	2	4	6	8
1	1	2	3	4

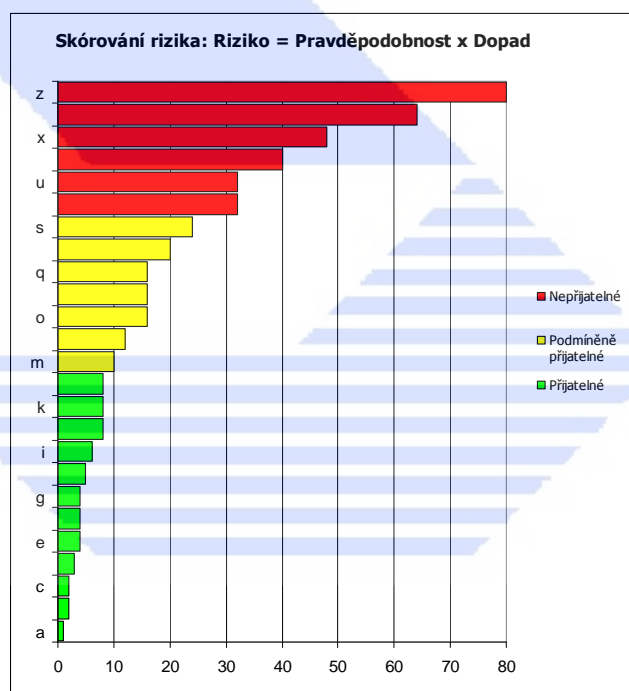
Tab. 18: Oblasti ne/přijatelnosti rizika pro projekt MO a Libeňské spojky

Hodnoty kritéria *mRPN* pro stanovení přijatelnosti rizika byly v tomto příkladu zvoleny následovně:

<i>mRPN</i>	Úroveň rizika
1 ÷ < 16	riziko je přijatelné
≥16 ÷ < 32	riziko je podmíněně přijatelné
≥32 ÷ 64	riziko je nepřijatelné

Při skórování ještě zřetelněji vystupuje význam volby nelineární stupnice pro ohodnocení intenzity negativních dopadů faktorů rizika. Při použití lineární stupnice pro dopad, např. 1, 2, 3, 4 by faktor s téměř jistou pravděpodobností výskytu a zanedbatelným dopadem ($5 \times 1 = 5$, tedy nevýznamný faktor), byl hodnocen stejně jako faktor s malou pravděpodobností vzniku ale s kritickou intenzitou dopadu ($1 \times 5 = 5$), který je třeba považovat za významný.

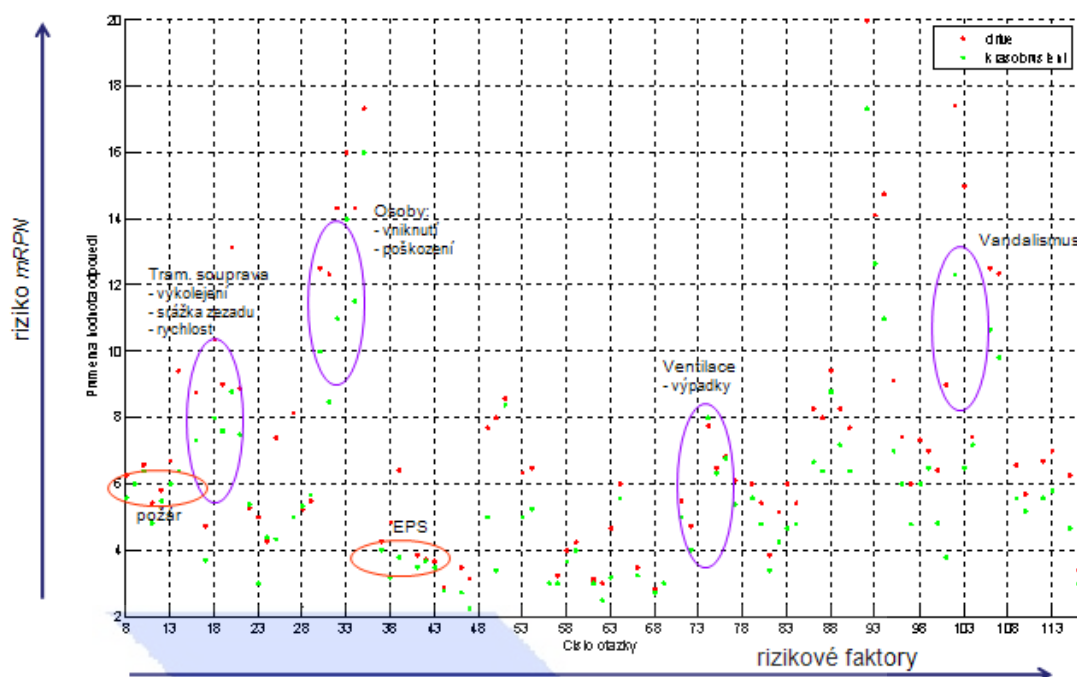
Výsledky hodnocení lze také zobrazit graficky. Jednotlivé rizikové faktory pro každou hodnocenou variantu projektu lze tak seřadit podle hodnoty *mRPN* a určit tak přehledně priority z hlediska dalšího řízení rizika projektu.



Obr. 30: Jiná reprezentace hodnocení rizika, lit. [37]

Velmi zajímavá a přehledná reprezentace rizik pro všechny rizikové faktory současně nebo v uspořádání dle aspektů projektu byla použita v projektu, lit. [32].

V Obr. 31 jsou jednotlivé rizikové faktory vyneseny ve 2D, což následně umožnilo shlukovat podobná rizika typu „Rizika vyplývající z provozu tramvajové soupravy“, „Rizika z působení osob“, „Rizika díky vadné ventilaci“ ... Výsledky mohou být velmi zajímavé, zde např. experti hodnotili vniknutí osob a vandalismus výše než poruchy elektropožární signalizace.



Obr. 31: Grafická reprezentace rizika pro 118 rizikových faktorů s filtrací extrémních hodnot (označeno - krasobruslení)

Po grafické reprezentaci výsledků následuje vlastní hodnocení, které bude v tomto případě členěno dle segmentů projektu. Znamená to, že např. pro segment A1 „Územní plán“ bude hodnoceno 5 rizikových faktorů a to pro každou variantu, tedy 5 variant. Důvodem hodnocení dle segmentů a ne pouze dle rizikových faktorů je získání větší přehlednosti výsledků.

Závěr

Metoda **kontrolního seznamu** je tedy první fází prováděného hodnocení rizik, která identifikuje nesoulad s legislativními a technickými předpisy České republiky a EU. Dotazník, kterým se posuzuje shoda s dokumentací by měl být zpracován v elektronické formě. Touto analýzou, kterou nemusí provádět vysoký specialista na analýzu rizik se získá konkrétní názor na projektovou dokumentaci z hlediska zaměřeného na bezpečnostní aspekty této dopravní stavby.

Metoda **SAFMEA** patří do kategorie kvalitativních metod, jejím výstupem jsou však relativní numerické hodnoty umožňující konkrétně kvantifikovat rizika pro každý z rizikových faktorů. Princip metody je standardizován a metoda byla opakovaně úspěšně použita. Její aplikaci již musí zajišťovat specialista – analytik rizik spolupracující se skupinou expertů.

KVANTITATIVNÍ ANALÝZA- METODA STROMKOVÝCH DIAGRAMŮ

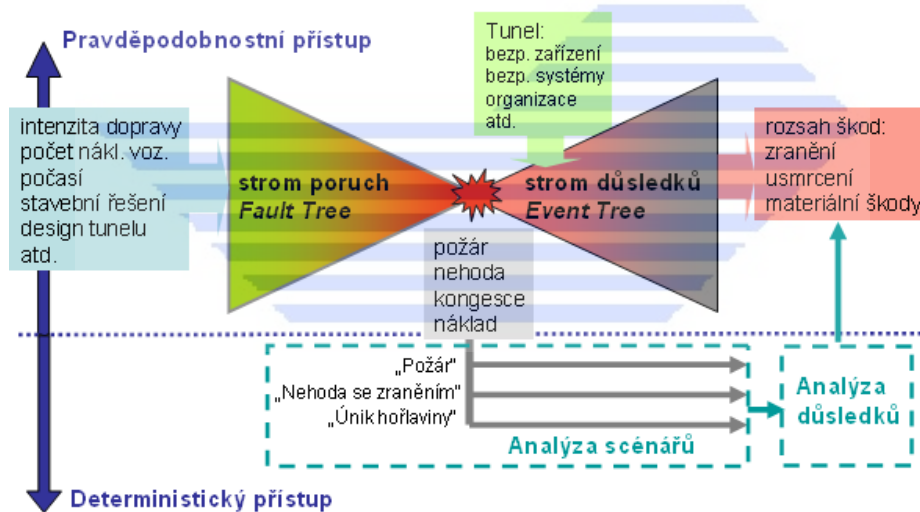
Metody kvantitativní analýzy jsou obecně vzato neobjektivnější, neboť jsou poměrně dobře kontrolovatelné a to pouze v případě, že vycházejí z reprezentativních souborů reálných statistických hodnot. Tento typ analýz je obvykle zpracován nejvíce v detailu, a proto vyžaduje i nejvíce času, je relativně drahý⁶ a hlavně musí být k dispozici dostatek vstupních informací, což v případě statistik nehod a požárů pro různé druhy tunelů nemusí platit.

Po teoretickém úvodu je v této kapitole popsána metoda stromkových diagramů neboli pravděpodobnostních stromů. Jsou však uvedena i její, dosti podstatná, omezení. V závěru kapitoly je popis prakticky aplikovatelné metody QRA, která je používána pro analýzu rizik při přepravě nebezpečných nákladů, ale lze ji použít i pro hodnocení rizik při požáru.

Úvod

Klíčovým faktorem moderního hodnocení rizika je uvědomění si, že nežádoucí události nevznikají samy od sebe, ale začínají (často nepatrným) narušením normálního provozu, které se může rozvinout několika směry v závislosti od reakce na nehodu. Uvedená koncepce je známá jako motýlový model (*bow tie model*) a znázorněná na Obr. 32.

Levá strana schématu řeší vznik poruchy, což je v tomto případě vznik mimořádné dopravní události typu požár, nehoda, tvorba kongescí nebo ztráta nákladu. Vznik, resp. odhad pravděpodobnosti či četnosti mimořádné události se obvykle řeší stromem poruchových stavů, do něhož vstupuje řada parametrů: intenzita dopravy, skladba vozového parku, stavební řešení tunelu a jeho barevný návrh, počasí apod. Tato část, hledající četnosti vzniku různých událostí při různých okrajových podmínkách se nazývá FTA (Fault Tree Analysis).



Obr. 32: Motýlkový model

Pravé křídlo motýlkového modelu potom udává následky inicializační události a to v závislosti na dalších faktorech, které povětšinou souvisí s vybavením tunelu. V úvahu je brána možnost samo-evakuace, schopnost rychle identifikovat událost, činnost ventilace atd. Výsledkem je četnost scénáře pro danou konfiguraci okrajových podmínek.

Vlastní následky události, jejichž výstupem je počet raněných či usmrcených osob se stanovují různými odhady spočívajícími převážně na expozici osob či skupiny osob jedovatými zplodinami kouře, viz dále.

⁶ Na zasedání PIARC v říjnu 2005 v Dubrovniku francouzská delegace informovala o kvantitativní analýze provedené pro řadu tunelů s tím, že pro krátké tunely je tato analýza neefektivní a drahá.

V dolní části obrázku je naznačena i deterministická metoda tzv. Analýzy scénářů, která zkoumá následky konkrétní události (požár 5 MW u únikového východu) na základě evakuačních modelů osob, fyzikálních modelů vlivu požáru a modelu činnosti tunelových systémů.

Metoda FTA

Metoda FTA tedy pracuje s pravděpodobnostními stromy pro výpočet četnosti události. Příklad části stromu je na Obr. 33. Jak je patrné z tohoto obrázku, je jako vstupní hodnota brána intenzita provozu. Ta může být členěna na 3 stupně – malá, střední a velká (v obrázku je pouze část grafu pro „malá“). Dále graf tvoří pět uzlů, které mají vliv na vznik a četnost událostí:

- Délka tunelu.
- Druh provozu.
- Podélný sklon tunelu.
- Připojovací/odbočovací pruhy.
- Intenzita vozidel.
- Podíl nákladních vozidel.

Délka tunelu – je základním údajem mající vliv na chování účastníku v tunelu. Je zjištěno, že řidič se v tunelu chová jinak než na volné komunikaci. Pro účely hodnocení je vhodné rozlišovat mezi krátkým a dlouhým tunelem. Krátký tunel může být uvažován do 1000 m, dlouhý pak nad 1000 m.

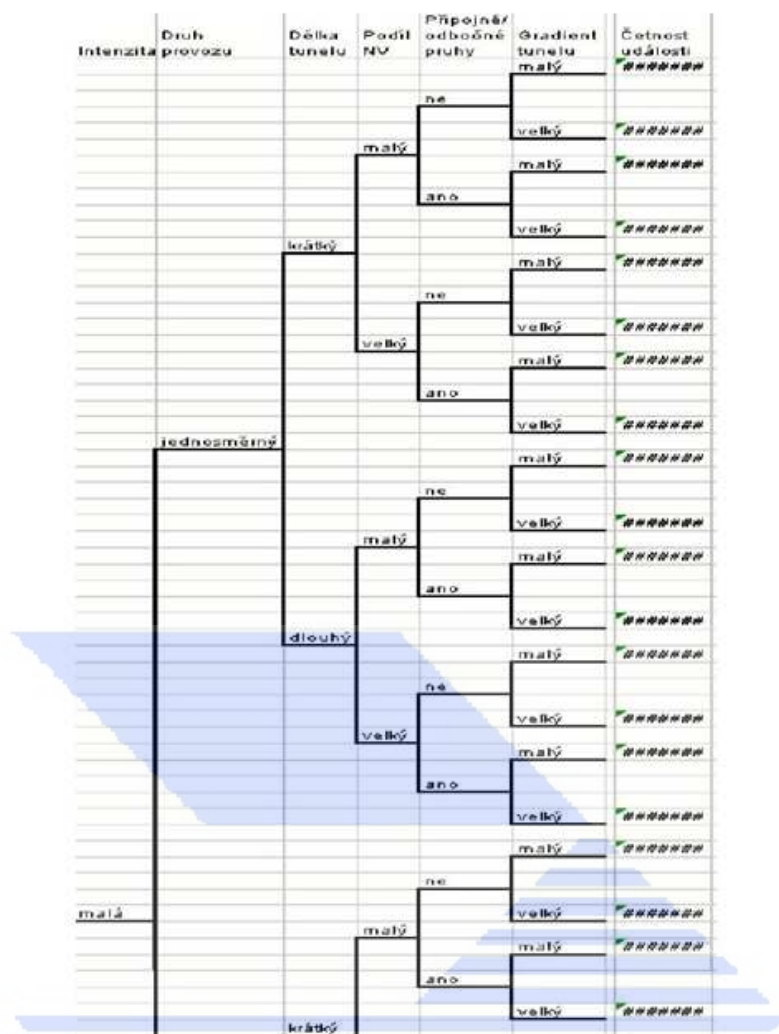
Druh provozu – má vliv na vznik události. Rozlišuje se obousměrný a jednosměrný provoz.

Podélný sklon tunelu – má vliv na nákladní vozidla. Pokud je vysoký podíl NV, a velký podélný sklon tunelu, zvyšuje se riziko vzniku události. Podélný sklon tunelu stačí rozlišit na malý nebo velký. Jako malý podélný sklon tunelu lze chápat podélný sklon do 2,5 %, velký pak nad tuto hodnotu.

Připojovací/odbočovací pruhy – mají vliv na četnost události. Rozlišuje se, zda v tunelu jsou nebo ne.

Intenzita vozidel – má vliv na četnost události. Intenzitu je vhodné rozdělit na malou, střední nebo velkou. Jako malou intenzitu lze brát hodnotu intenzity nepřevyšující 800 voz.h^{-1} v jednom jízdním pruhu, střední hodnota intenzity je v rozmezí $800 - 1200 \text{ voz.h}^{-1}$ v jednom jízdním pruhu a vysoká hodnota intenzity je nad 1200 voz.h^{-1} v jednom jízdním pruhu.

Podíl nákladních vozidel – má vliv na závažnost vzniklé události. NV mohou přepravovat více PHM a více nebezpečného materiálu. Případný požár má větší účinnost. Podíl NV je malý (do 10 %) a velký (nad 10 %).



Obr. 33: Stromkový diagram pro hodnocení četnosti události (příklad)

Každému uzlu v diagramu odpovídá číslo značící pravděpodobnost, což je kardinální problém celé metody.

Dílčí závěr k metodě FTA

Pravděpodobnostní stromkové diagramy jsou velmi názorné a dobře kontrolovatelné a jsou základním teoretickým nástrojem kvantitativní analýzy. Jejich praktickou aplikaci lze najít v rakouské směrnici „Austrian Risk Analysis TuRisMo, lit. [20]. I zde však řada hodnot pravděpodobností chybí nebo jsou nahrazeny odhadem, přestože byly hodnoceny události ze čtyř set rakouských tunelů.

Z toho je patrné, že metodu nelze zatím věrohodně použít v národních podmínkách, neboť chybí dostatečně reprezentativní statistická data. Pro určování četnosti událostí je nutné používat statistické hodnoty dosud získané z tunelů v České republice, viz kapitolu o porovnání nehod (str. 28).

Četnost následků ETA

Vstupem do pravé části motýlkového diagramu je konkrétní událost (požár osobního vozidla, nehoda, ...). Jednotlivé uzly diagramu vyjadřují sekvenci podmíněných pravděpodobností výskytu toho kterého scénáře a výstupem diagramu je četnost scénářů, které mohou v tunelu nastat. Příklad možných uzlů, které ovlivňují možnost záchrany osob (a majetku):

Schopnost identifikace zastavení vozidla: tento uzel hodnotí pravděpodobnost (včasně) identifikace zastavení vozidla.

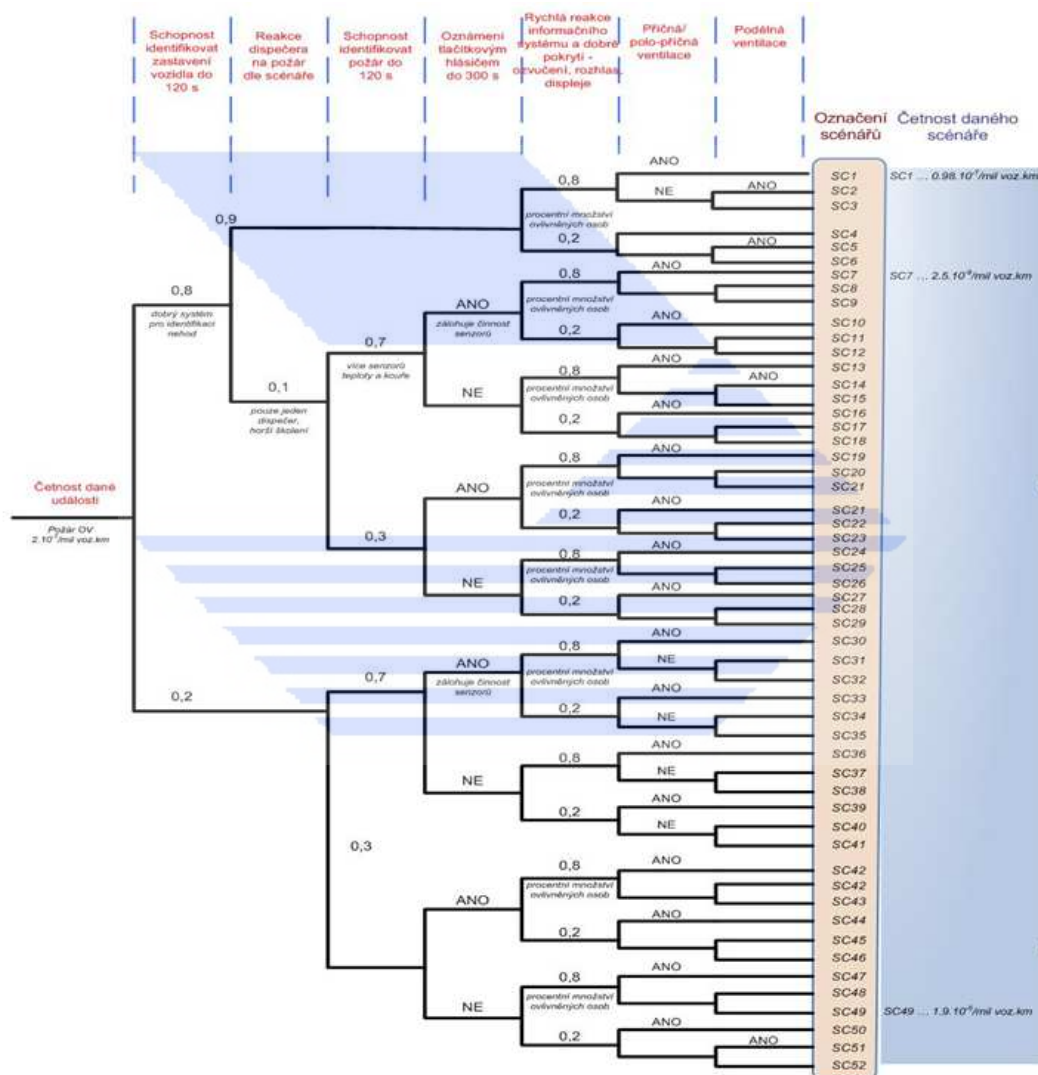
Identifikace požáru: tento uzel hodnotí pravděpodobnost identifikace požáru pro všechny druhy senzorů použitých v tunelu.

Reakce dispečera: uzel hodnotí pravděpodobnost správné reakce dispečera.

Informační systém: hodnotí se pravděpodobnost, že se k osobám uvízlým v tunelu dostane informace o tom, že mají co nejrychleji unikat.

Druh ventilace: hodnotí se pravděpodobnost správné činnosti ventilace.

V Obr. 34 je uveden příklad stromkového diagramu, který udává četnosti pro různé kombinace okrajových podmínek. Zásadní nevýhodou těchto diagramů je, že lze velmi obtížně hodnotit pravděpodobnost funkčnosti systému. Jako příklad lze uvést uzel identifikace požáru, když se na této funkčnosti podílí různá heterogenní zařízení: liniový hlásič, videodetekce kouře, senzory škodlivin atd. Navíc pravděpodobnostní stromy neobsahují časovou dimenzi, takže se nerozliší, zda je požár identifikován za minutu či za pět minut. Pro hodnocení takovýchto heterogenních systémů se s výhodou využívá fuzzy lingvistický expertní systém popsany dále.



Obr. 34: Diagram četnosti různých scénářů událostí

Výstupem stromu ETA jsou četnosti různých scénářů (SC1 – SC52) z nichž každý vyjadřuje jinou sekvenci událostí a tím i jiné podmínky záchrany osob. Pro kvalitní sekvenci - velmi rychlou identifikaci, výborný informační systém, transversální ventilaci atd. je vysoká pravděpodobnost záchrany potenciálně ohrožených osob. Pro jiný scénář, s nevyhovujícími parametry (pouze liniový hlásič, není ozvučení, ...) je pravděpodobné, že se zachrání podstatně méně osob.

Dílčí závěr k metodě ETA

Pravděpodobnostní stromkové diagramy jsou velmi názorné a dobře kontrolovatelné. Dobře lze definovat jednotlivé uzly ovlivňující výsledné četnosti daného scénáře událostí vycházející z jediné inicializační události.

Jejich nevýhodou je, že prakticky nelze stanovovat pravděpodobnost dané funkčnosti uzlu. Příkladem může být uzel „Schopnost identifikovat požár (do 120 s)“, kdy neexistují statistická data, která by dala odpověď na tuto otázku. Proto je nutné pracovat v prvních krocích hodnocení s odhady, které jsou expertně upřesňovány. Cestou k jisté objektivizaci řešení je využití fuzzy metody, pro hodnocení prvků systému. Podrobný výklad je např. v lit. [16].

Model QRA

Softwarový produkt QRAM je navržen pro kvantifikaci rizik spojených s přepravou nebezpečných nákladů v silničních tunelech. Program QRAM byl napsán společnostmi INERIS (Francie) a W.S.Atkins (Velká Británie), lit. [33]. Veškeré vývojové práce byly sledovány komisí složené ze členů Organizace pro ekonomickou spolupráci a rozvoj (OECD) a Světové silniční asociace WRA (PIARC). PIARC pořádá pravidelná školení orientovaná na práci s programem.

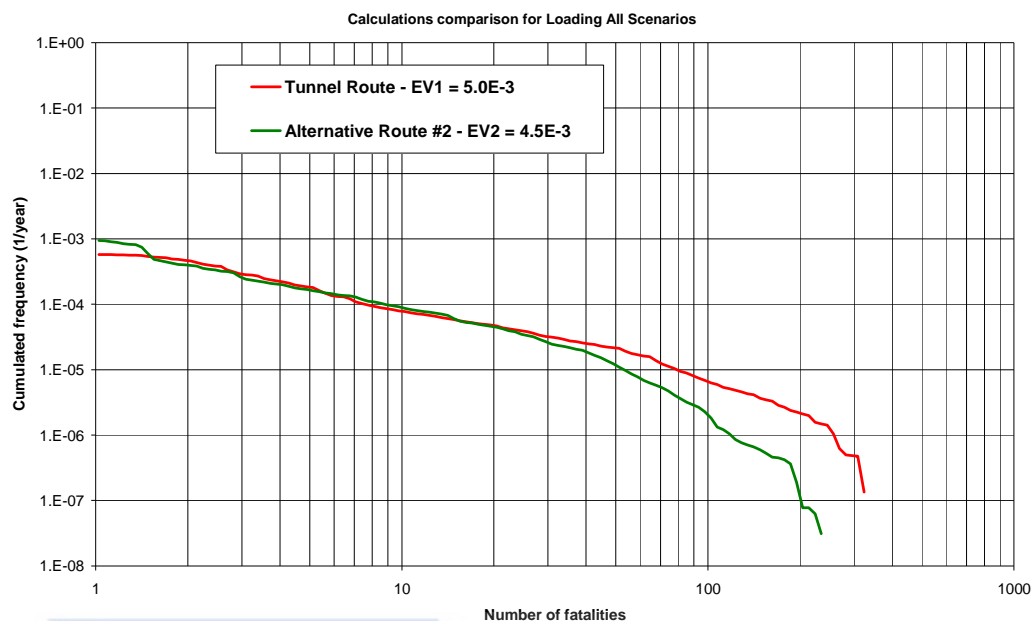
Hlavním výstupem QRA-modelu je podpora rozhodnutí o povolení či zakázání provozu vozidel s nebezpečným nákladem v tunelu. Program se k tomuto účelu úspěšně používá ve Velké Británii, Francii, Německu, Rakousku, Švýcarsku a dalších zemích v Evropě. Program je používán i v České republice, lit. [28]. Výhodou metody je, že je „standardizovaná“, navíc neobsahuje jen scénáře vznikající vlivem nebezpečných nákladů, ale scénář č. 1 a 2 hodnotí požár 20 resp. 100 MW bez nebezpečného nákladu.

Program QRAM (Quantitative Risk Assessment Model) zahrnuje 11 realistických scénářů nehod těžkých nákladních vozidel s nebezpečným nákladem, přičemž každý ze scénářů má simulovat určitou specifickou skupinu nebezpečných nákladů. Dále model obsahuje dva, výše zmíněné, scénáře požáru těžkého nákladního vozidla bez nebezpečného nákladu.

Pro každý ze scénářů jsou sestaveny matematické rovnice, které vycházejí ze studií konkrétních nehod a ze studií zabývajících se chováním nebezpečných materiálů. Tyto rovnice vypočítávají, na základě zadaných parametrů tunelu (geometrie tunelu, větrání, vzdálenost únikových východů, intenzity dopravy, složení dopravního proudu, atd.), následky způsobené nebezpečným nákladem (nebo samotným požárem), ale nevyhodnocují následky nehody jako takové.

Výsledky simulace pomocí modelu QRA se vyjadřují ve formě sociálního nebo očekávaného rizika. Formou F/N křivek se v grafu zobrazuje sociální riziko, přičemž F je kumulativní pravděpodobnost (vztažená buď na 1000 m tunelu, nebo na délku trasy za jeden rok) a N znázorňuje počet ztrát na životech. Výsledná F/N křivka tedy zobrazuje pravděpodobnost překročení počtu ztracených životů.

Na Obr. 35 je uveden jeden z příkladů možného využití, kdy se pro určitý scénář hodnotí rizika přepravy tunelem a riziko, které je na objízdné trase, více v lit. [17]. Z grafů je patrné, že kumulativní četnost je prakticky stejná, až do hodnoty 30 usmrcených osob. Pro vysoké počty osob vychází přeprava tunelem hůře.



Obr. 35: Porovnání rizik přepravy nebezpečných nákladů tunelem a objízdou trasou

Dílčí závěr k metodě QRA

Metodu lze doporučit i pro hodnocení rizik bez vlivu nebezpečných nákladů v České republice, protože má zapracovány modely pro požáry 20 a 100 MW. Díky jednotnému software, může být metoda považována za referenční.

Její nevýhodou je, že má velmi malé vazby, s výjimkou ventilace, na vybavení tunelu. Prakticky nelze posuzovat vliv vybavení tunelu (senzory, aktory) na bezpečnost osob.

Pro podrobnější zkoumání, resp. pro posuzování konkrétního vybavení tunelu na mortalitu osob je vhodné pokračovat dalším krokem analýzy, kterou je analýza scénářů. Metoda navržená tímto předpisem umožňuje zkoumat i citlivost na vybavení.

METODA ANALÝZY SCÉNÁŘŮ

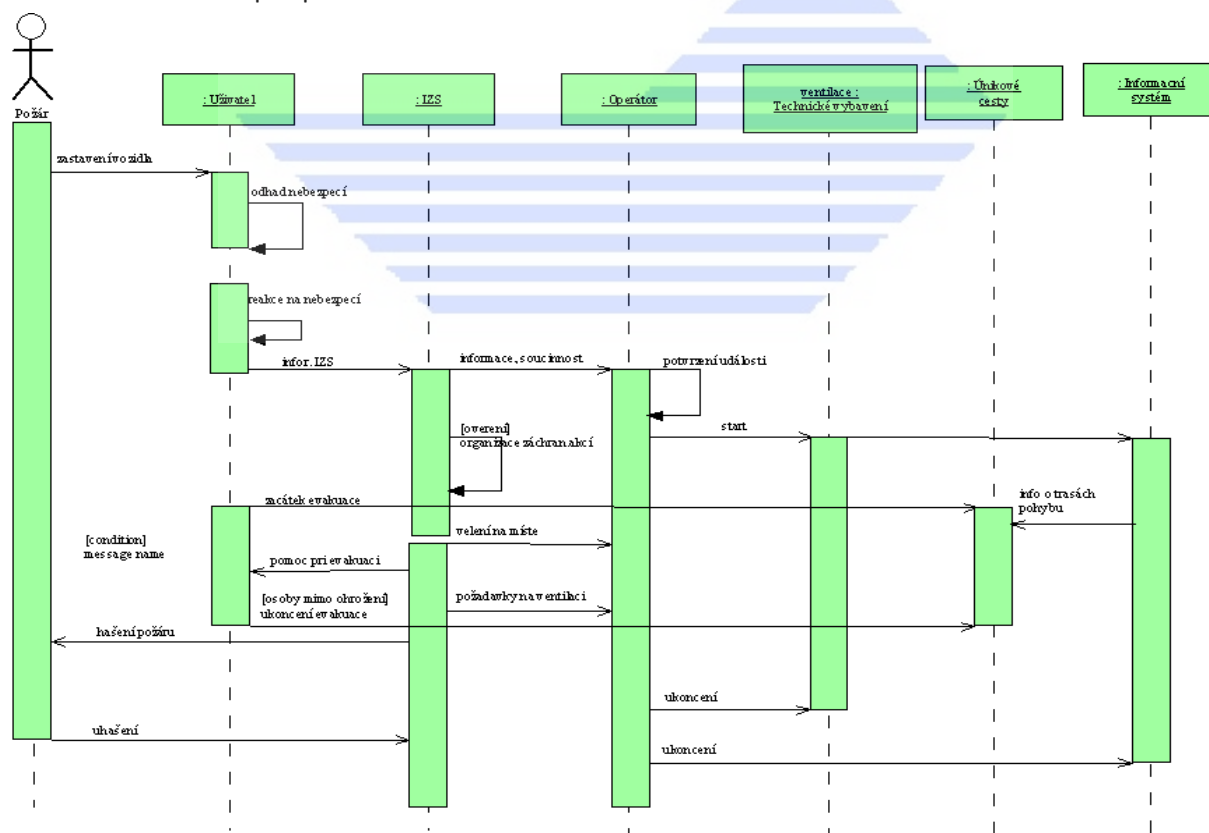
Metoda analýzy scénářů CAPITA je originální národní metodou. Jako jediná z publikovaných národních metod ostatních zemí v dokumentu PIARC, lit. [17], umožňuje hodnotit i ne-mandatorní vybavení tunelu, tedy systémy související s bezpečností, které v tunelu být mohou a nemusí.

Princip hodnocení rizika usmrcení osob vychází z toho, že rozhodují první minuty po požáru a rychlost nastartování procesu samozáchrany. Popis procesu, který se odehrává po vzniku požáru je v následující kapitole.

Sekvenční diagram záchrany osob

Kapitola popisuje rozbor aktivít spočívajících v zastavení vozidla před požárem, až po únik osob únikovými cestami. V Obr. 36 zcela vlevo je znázorněno trvání požáru od jeho iniciace, až po uhašení. V dalších sloupcích časového vývoje je znázorněna činnost osob postižených událostí (*Uživatel*), činnost *IZS*, *Operátora*, *Technického vybavení*, časové schéma využití *Únikových cest* a aktivace *Informačního systému*.

Před místem požáru zastavují vozidla, časová smyčka „odhad nebezpečí“ znázorňuje dobu, po které si uživatel uvědomí, co se děje (tzv. doba zjištění události t_z). Doba závisí na tom, zda je požár již viditelný, jak daleko stojí vozidlo od požářiště, na osvětlení apod. Další časová smyčka „reakce na nebezpečí“ zobrazuje chování osob: někdo ihned volá IZS, druhý nechce opustit vozidlo. Tato doba „váhání“ se nazývá doba reakce t_r . V každém případě tento graf zobrazuje situaci, kdy je požár identifikován uživateli tunelu, kteří informují dispečink IZS a ten následně vyrozumí dispečera. Ten po ověření vzniku události startuje požární sekvence ventilace, automaticky se pomocí dopravních zařízení tunel zavírá pro provoz.



Obr. 35: Sekvenční diagram samožachrany osob-požár identifikován uživateli tunelu

Poznámka k diagramu: Při automatické a velmi rychlé identifikaci požáru může informační systém tunelu zkrátit časovou smyčku „odhad nebezpečí“. Účastníci události jsou bezprostředně informováni o nebezpečí a dostávají instrukce co dělat. Právě zkoumání vlivnosti zařízení tunelu na doby t_z a t_r je podstatou metody CAPITA.

Informační systém tvořený například provozními soubory ozvučení a informačními displeji uvědomuje účastníky o nebezpečí, urychluje a organizuje jejich záchranu. Tyto první minuty po vypuknutí požáru jsou nejdůležitější pro záchranu osob. Účastníci události se počínají evakuovat únikovými cestami, doba chůze k únikovým východům se označuje t_e .

Mezitím dorazily na místo složky IZS, které se ujímají velení a s nejvyšší prioritou organizují záchranu osob, následně potom likvidují požár. Požadavky na změny režimů ventilace či jiných technologií realizují prostřednictvím dispečera tunelu, pouze výjimečně sami.

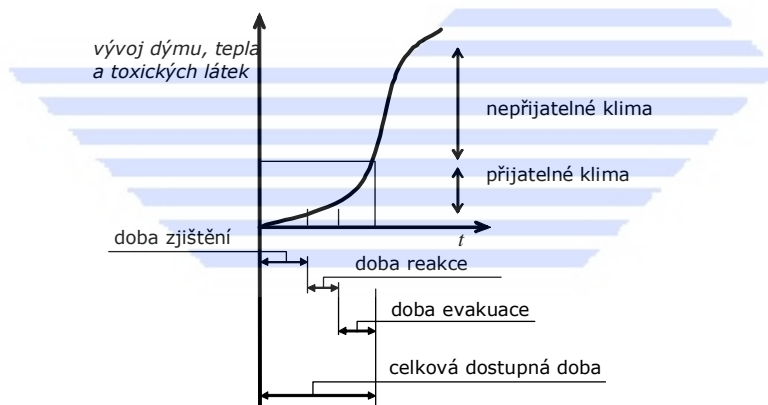
Akce je ukončena záchranou osob a uhašením požáru. Následují rutinní záležitosti uvedení tunelu do opětovného provozu.

Procedura evakuace

Proceduru evakuace lze definovat jako čas, který uplyne od doby, kdy lidé událost identifikují do doby, kdy se dostanou na bezpečné místo. V Obr. 36 znamená „příjemné klima“ takové prostředí v tunelu, které ještě umožní únik osob. V případě požáru je to do doby, kdy kouř zůstává stratifikován pod stropem tunelu a kdy se ještě neprojevuje přímé působení tepelného výkonu požáru.

Evakuační proces lze rozdělit na několik časových úseků, které mohou být analyzovány zvlášť, protože jsou specifické z hlediska chování lidí i akcí, které by měly být konány:

- Dobu zjištění události.
- Dobu reakce.
- Dobu pro únik.



Obr. 36: Vývoj požáru a celková doba na záchranu

Doba zjištění události

Lze ji charakterizovat jako čas, kdy si jedinec uvědomí, že se něco konkrétního stalo. Tento čas samozřejmě souvisí s charakterem události. Lidé, kteří jsou konfrontováni s kouřem nebo plameny, si tuto situaci uvědomí téměř okamžitě. Platí zde, že čím jsou větší vizuální následky události, tím je doba zjištění menší.

Doba se může podstatně vylepšit, pokud je tunel vybaven vhodnými zařízeními či systémy pro automatizovanou identifikaci požáru spojenými s účinným informačním systémem. V neposlední řadě je důležitá i výchova řidičů, neboť uživatelé tunelu by měli být informováni o tom, jak se mají chovat v případě mimořádné události.

Z uvedených úvah je patrné, že doba zjištění události je velice individuální, závisí na druhu události a jejích projevech, vzdálenosti od místa události či dokonce na obecné informovanosti. Vhodný identifikační systém ve spojení s informačním systémem tuto dobu zkracuje a „unifikuje“ pro všechny lidi v tunelu.

Doba reakce

Doba reakce je čas, který se počítá od doby zjištění události do doby začátku evakuace. Znamená to, že si je jedinec vědom události a hledá vhodné řešení. Obvykle jedinec následuje chování ostatních lidí, kteří se rozhodují rychleji.

Přestože je tato doba také silně individuální, jsou zde jisté faktory, které ji ovlivňují. Jedná se o chování jedinců v okolí, prostředí v tunelu, viditelnost únikových východů apod. Všechny tyto faktory ovlivní čas, který je potřebný pro rozhodnutí jakou evakuační cestu zvolit.

Opět zde platí, že vhodný identifikační systém ve spojení s informačním systémem tuto dobu zkracuje a „unifikuje“ pro všechny lidi v tunelu.

Doba pro únik

To je časový úsek, kde při rozborech pomáhá evakuační model. Vhodné jsou modely simulující chůzi osob a to i v případě překážek na cestě a umožňující i věrné napodobení manévrů při chůzi. Při výpočtech se bere v úvahu rychlost pohybu osob, která je ovlivněna hustotou unikajících osob (počet osob/m²), viditelnost (např. snížená kouřem), odstavená vozidla, šíře únikových cest a vzdálenost únikových východů a také vliv starších a hendikepovaných osob.

V první fázi evakuace se jedná o opuštění vozidla, kdy opuštění osobního vozidla je jenom zlomkem času pro opuštění plně obsazeného patrového autobusu, kde ještě rozhoduje, zda lidé nespí, jak jsou unaveni apod.

V další fázi unikající osoby směřují k únikovým východům a to různou rychlostí. Střední hodnotu rychlosti unikajících osob stanovuje americký standard NFPA 130 na 0,7 m.s⁻¹, přičemž se míní rychlost osob, které se pohybují volně a nejsou ovlivněné zástupem či frontou. Toto koresponduje s doporučením PIARC z roku 1999, kdy je doporučena hodnota 0,5-1,5 m.s⁻¹.

Dobu úniku je nutné také zahrnout do výpočtů schopnosti záchrany osob a tato doba je různá, v závislosti na stavebním uspořádání tunelu a jeho vybavení (značení únikových východů, osvětlení apod.).

Model evakuačního procesu

Po vzniku události je nutné začít v nejkratší možné době evakuaci. V následujícím přehledu jsou uvedeny parametry, které mají vliv na to, kolik lidí se zachrání:

Parametr	Komentář	Výpočtové hodnoty
Množství osob	Po vzniku události se před ní vytváří kolona vozidel, jejíž složení je dáno charakterem tunelu-ve městě osobní vozidla+bus; na dálnici: OV, 15% NV + bus	Pro výpočty se bere vždy stejná konfigurace vozidel v rozlišení město a dálnice
	<i>Nepředpokládají se katastrofické scénáře-srážka dvou busů, zablokované dveře apod.</i>	
Velikost požáru	Velikost požáru (tepelný výkon a vývin kouře) ovlivňuje mortalitu jednak přímým působením záření (neuvažuje se-působení několik desítek metrů) a hlavně vývinem kouře	Vždy se uvažuje tepelný výkon 5 MW a 30 MW
Šíření kouře	Pro normální fyzikální okrajové podmínky a daný profil tunelu se namodeluje časo-prostorová závislost hladiny kouře ve výšce 2 m	Ve zjednodušení a pro požár 5 MW se uvažuje dosažení hladiny kouře ve výšce 2m po 6 minutách
	<i>Horký kouř se drží pod stropem tunelu a s časem a vzdáleností klesá. Po dosažení hladiny 2 m</i>	

Doba úniku osob	<i>nad povrchem vozovky se stává nebezpečný pro prchající osoby. Tuto vzdálenost je nutné dát do souvztáhnosti se vzdáleností, kam až dorazily prchající osoby pro stanovení mortality.</i>	
	Udává čistý čas od počátku chůze až po dosažení únikového východu. Závisí na kvalitě únikových cest, vzdálenosti od únikových východů a rychlosti $0,7 \text{ m.s}^{-1}$. Vzdálenost 150 m se při této rychlosti překoná za 214 s, tj. 3,6 minut.	Modelování chůze pro standardizovaný řez tunelu a maximální vzdálenost mezi úniky se provádí v prostředí SIMULEX
Doba zjištění nebezpečí	<i>Složení cestujících se bere 50% muži, 40% ženy a 10% děti. Do expertního hodnocení vstupují i další parametry, jako je kvalita značení, osvětlení</i>	
	Udává čas pro zjištění, že se děje něco mimořádného. Tato doba závisí na vzdálenosti od požáru, čím je větší, tím je tato doba delší.	Výzkumy ukázaly, že průměrná doba uvědomění si nebezpečí je cca 120 s
Doba reakce	<i>Dobré vybavení tunelu identifikačními a informačními systémy tuto dobu zkracuje – pokud se zkrátí o 60s, odpovídá to vzdálenosti 42 metrů, kterou může osoba v nouzi ujít navíc</i>	
	Je dobou, po kterou se, po zjištění nebezpečí, rozhoduje člověk co a jak dělat	Výzkumy ukázaly, že průměrná doba reakce je 90 s
	<i>Pokud se tato doba eliminuje dostatečně rychlou informací, získá osoba v nebezpečí cca 63 metrů pro únik</i>	

Tab. 19: Faktory vstupující do výpočtu evakuace osob

Vlastní model celého procesu je na následujícím Obr. 37. Výsledkem a cílovou funkcí je ohodnocení procesu samo-evakuace, které se bude lišit v závislosti na zařízeních a subsystémech tunelu. Těmi je komplexní systém identifikace události, obvykle tvořený několika zařízeními. Pokud je událost rychle identifikována, je nutné spolehlivě předat výzvu a případně pokyny k okamžité evakuaci postiženým lidem pomocí informačního systému, který může opět tvořit několik různých zařízení.

Včasná informace také bezprostředně zastavuje proud vozidel do tunelu (není naznačeno v obrázku) a spouští připravené sekvence ventilace.

Po zjištění problému a rozhodnutí o opuštění nebezpečného prostoru se lidé ubírají k nejbližšímu nouzovému východu. Tato doba je v principu dána vzdáleností východu, zvolenou průměrnou rychlostí a dalšími parametry ovlivňujícími pohyb osob. Tuto dobu nelze dodatečně upravovat nějakými bezpečnostními opatřeními, neboť je dána základním stavebním návrhem.

Hodnocení subsystémů

Kvalitu výsledné cílové funkce, která má časový rozměr, u všech tří zkoumaných subsystémů: identifikace, informace a evakuace určuje více komponent. Na identifikaci se například podílí liniový hlásič teploty, senzory opacity nebo videodetekce kouře. Každý z těchto senzorů využívá jiný princip a reaguje na různé fyzikální veličiny. Účinnost senzorů ovlivňuje i jejich umístění v tunelu, zapojení do systému a řada dalších okrajových podmínek. Podobně je tomu u systému pro šíření informace pro osoby v tunelu a u systému usnadňujícím jejich evakuaci. Jedná se tedy o klasifikaci více-komponentních systémů s různými okrajovými podmínkami, tedy o hodnocení či klasifikaci heterogenního systému tvořeného v případě subsystému „Identifikace požáru“ komponentami pro automatické hlášení požáru.

Pro hodnocení takovýchto systémů se s úspěchem používají expertní metody. Kontrolovatelnou a přehlednou metodou je fuzzy lingvistický systém.

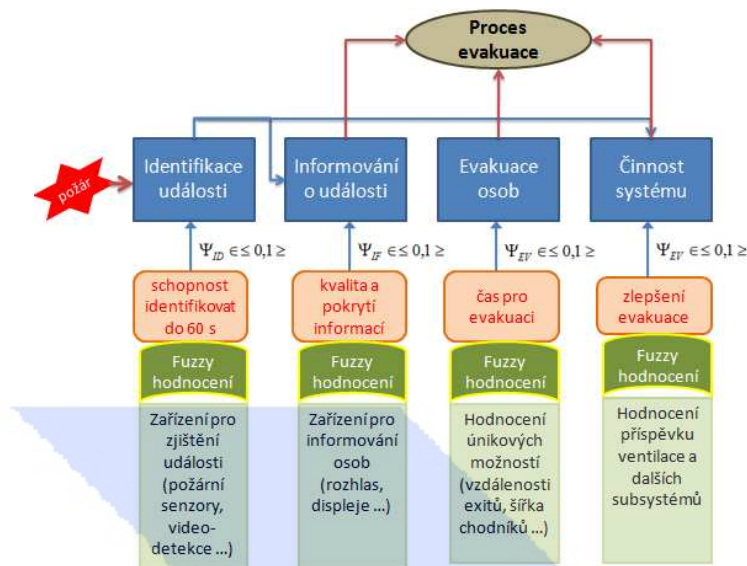
Koncepce tzv. jazykově orientované fuzzy systému má velmi široké použití, např. pro regulaci nelineárních systémů, pro klasifikaci dat apod. Základním principem je inference na základě jazykového popisu, což je množina podmíněných výroků ve tvaru

JESTLIŽE X_1 je A_1 a ... a X_n je A_n PAK Y je B

kde A_1, \dots, A_n, B označují jazykové výrazy, jako např. *malý, velmi velký, spíše střední, dosti zhruba, velký* apod.

X_1, \dots, X_n, Y jsou **fuzzy proměnné**, tj. proměnné, které mohou nabývat fuzzy hodnot reprezentujících jazykové výrazy.

Vstupní a výstupní veličiny vstupující do rovnic pro každý ze tří subsystémů jsou uvedeny v lit. [35], kde je i detailnější popis metody.



Obr. 37: Model procesu evakuace

Postup řešení

Dosavadní postup řešení byl založen na předpokladech:

1. Následné riziko ztráty života pro osoby v tunelu představuje požár.
2. Pro záchranu jsou zásadně **důležité první minuty** po vypuknutí požáru.
3. Proto je nutné tyto minuty využít pro samo-záchranu cestou únikových východů.
4. Samo-záchrana je proces, sestávající se ze tří fází: fáze zjištění nebezpečí, fáze reakce a fáze vlastního úniku.
5. Vzhledem k nepřítomnosti složek, v prvních minutách, organizujících záchranu je nutné, aby tunelový systém pomohl zkrátit doby jednotlivých fází.
6. Délku doby úniku ovlivní hlavně vzdálenost únikových východů a kvalita únikových cest a nelze ji ve větší míře dodatečně upravovat.
7. Zkrácení evakuační doby je možné na úkor **zkrácení doby zjištění a doby reakce**.

Proto, aby bylo možné porovnávat kvalitu tunelového vybavení, jsou do výpočtů zavedeny další předpoklady:

- jedná se o jednosměrný tunel se dvěma jízdními pruhy, typu ... dle ČSN73 7507;
- tunel je zaplněn vozidly ve stejné konfiguraci s tím, že městský tunel obsahuje OV+BUS a dálniční tunel navíc i NV;
- požár č. 1 má hodnotu tepelného výkonu 5 MW, požár č. 2 má hodnotu 30 MW;
- šíření kouře ve směru unikajících osob je dáno fyzikálním 2D modelem.

Hodnocení expertním systémem

Navržené řešení využívá fuzzy lingvistický systém, který hodnotí:

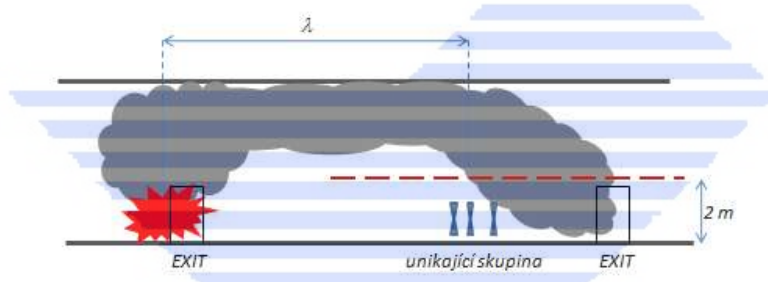
Systém	Fuzzy hodnocení	λ^i	Poznámka	Ψ_K
Identifikace události	Liniový hlásič	$\langle 0,1 \rangle$	dílí relativní hodnocení každé komponenty systému pro identifikaci	$\Psi_{IN} \langle 30,180 \rangle$
	Videodetekce kouře	$\langle 0,1 \rangle$		
	Detekce škodlivin	$\langle 0,1 \rangle$		
Informační systém v tunelu	Ozvučení Displeje Rozhlas	$\langle 0,1 \rangle$	komponenty hodnoceny dohromady	$\Psi_{IF} \langle 0,1 \rangle$
Evakuace	Vzdálenost Šířka cest Kvalita cest Nouzový pruh	$\langle 0,1 \rangle$	komponenty hodnoceny dohromady	$\Psi_{EV} \langle 60,360 \rangle$

Tab. 20: Přehled postupu řešení

Výsledné řešení tedy relativně objektivně, díky expertně formulovaným rovnicím fuzzy systému, hodnotí subsystémy tunelu z hlediska jejich cílových funkcí – rychlosti identifikace požáru (od 30 s do 3 min), schopnosti informovat (pokrytí informacemi 0 až 100%) a délky úniku od 1 do 6 min.

Rychlost identifikace je ve fuzzy pravidlech vztažena na čas – pokud bude do 60 s, jedná se o výbornou kvalitu (*Vk*), do 90 s bude hodnocení *spíše střední* (*SpSt*), pro 120 s *střední* (*St*) a dále se zhoršuje. Stejný princip platí pro evakuační možnosti – do 2 min je to výborné (*Vk*) ... 5 min je špatných (*Ma*). Doba evakuace se počítá programem Simulex a kromě jiného jí ovlivňují i parametry uvedené v Tab. 20.

Počet smrtelně ohrožených osob je dán dobou úniku na jedné straně a fyzikou šíření kouře. Ten se zpočátku jako horký drží pod stropem tunelu po jistém čase a ve vzdálenosti λ , naznačené v Obr. 38, ochlazený kouř začíná klesat a stává se životu nebezpečným. Tři osoby naznačené v obrázku, které nedosáhly včas únikového východu, zahynou.



Obr. 38: Postup vrstvení kouře

Pro popis vývoje kouře v závislosti na čase a vzdálenosti je nutné využít vhodný fyzikální model. Ten je zpracován pro stejné rozměry tunelu, jaké jsou použity pro simulaci úniku a pro velikosti požáru 5 a 30 MW.

Dílčí závěr k metodě CAPITA

Navržený deterministický přístup umožňuje analyzovat různé scénáře. Vychází z toho, že se hlavně v prvních minutách po vypuknutí požáru rozhoduje o životě postižených lidí. Těm musí být poskytnuta šance na samozáchranu. Kromě vzdálenosti k dosažení únikových východů rozhoduje o zkrácení času pro únik včasné a relevantní informování o nutnosti neprodleného úniku.

Navržená metoda, pomocí metod umělé inteligence, hodnotí kvalitu vybavení tunelu ve formě (případného) zkrácení doby na uvědomění si problému a započetí reakce, která je udávána v odborné literatuře na 3,5 min. Při kvalitním a rychlém informování se tato doba získává navíc pro únik.

ODHAD MORTALITY

Modely pro simulaci dopravního proudu, evakuační modely a výpočty poskytují poměrně spolehlivý odhad, kolik osob se ocitlo v nebezpečí a jakým způsobem probíhá evakuace. Pokud by se současně nevyvíjel kouř a nepůsobilo by teplo, každý by se dříve či později zachránil.

Ve skutečnosti však kouř zhoršuje viditelnost a tím zpomaluje únik a jeho toxické zplodiny způsobují otravu. Proto je nutné kombinovat evakuační proces s procesem, který evakuaci ohrožuje a za jistých podmínek může způsobit úmrtí jistého podílu unikajících osob. Pro osoby, které jsou blízko požáru vstupuje do hry i vysoká teplota.

Odhady tohoto působení jsou velmi složité. Základní možností je aplikace sofistikovaných modelů šíření a působení kouře, což není vůbec jednoduché, neboť na šíření kouře má kromě ventilace vliv řada okrajových podmínek, jako třeba přirozený pohyb vzdušiny daný rozdílem tlaků mezi portály. Proto je vždy nutné počítat se značným zjednodušením, což na druhé straně degraduje přesné výpočetní algoritmy modelů.

Z výše uvedených důvodů se ve většině vyspělých „tunelových“ zemích pracuje se značným zjednodušením, které je vždy stejné, a tudíž i výsledky jsou opakovatelné.

Odhad mortality dle německé směrnice

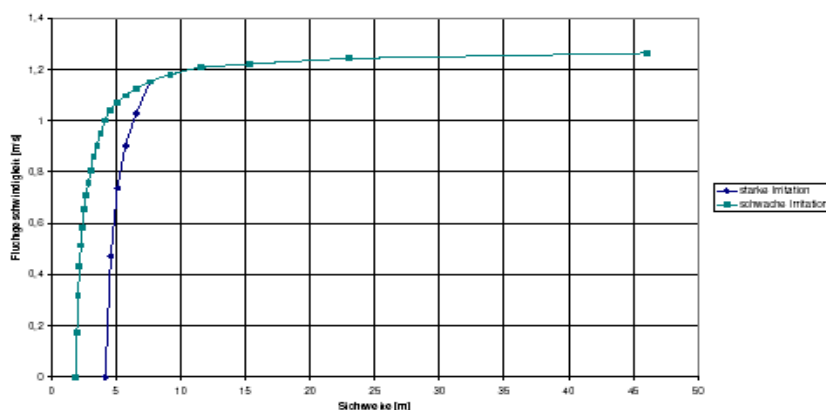
První možností, jak dospět k číselným hodnotám počtu usmrcených osob pro různé scénáře nehod, představuje nová německá směrnice „Evaluation of the safety of road tunnels“, lit. [27] .

Pro scénáře typu „nehoda“ je definováno s jakou pravděpodobností se vyskytnou úmrtí osob, v tomto případě pouze vlivem nehody. Výsledné hodnoty pro událost č. 1 „Nehoda s infrastrukturou tunelu“:

Nehoda č. 1		Nehoda č. 2
99,25000%	žádné úmrtí	99,50000%
0,590000%	1 úmrtí	0,420000%
0,150000%	2-3 úmrtí	0,070000%
0,010000%	4-9 úmrtí	0,010000%
0,000100%	10-30 úmrtí	0,000100%
0,000010%	> 30 úmrtí	0,000010%

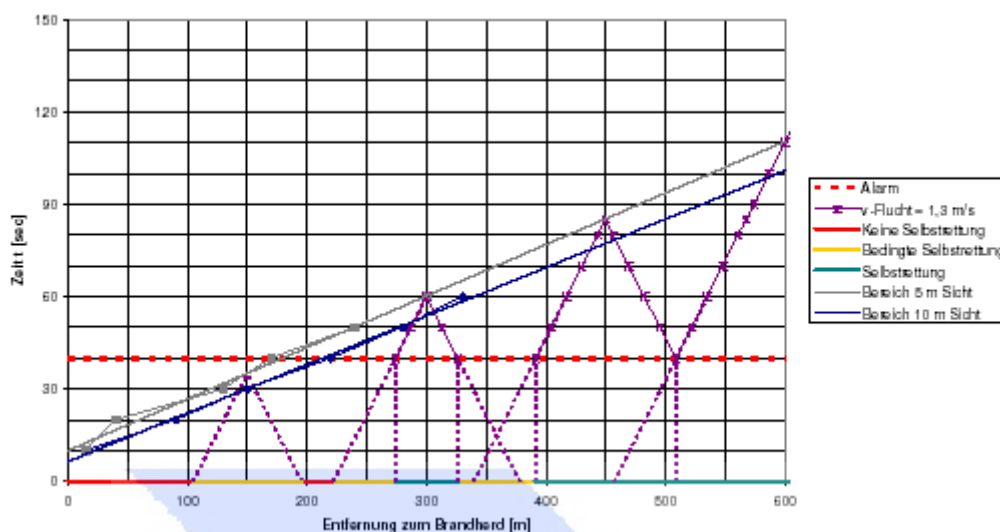
Procentní poměry se zlepší, pokud se jedná o kolizi na výjezdu nebo vjezdu (Nehoda č. 2).

Pro vyšetření ztrát na životech je použita simulace kouře metodou FDS (Fire Dynamic Simulator) a na základě šíření kouře jsou stanoveny zóny, kde není možná záchrana, kde je nejistá záchrana a kde je záchrana jistá. Rychlost úniku podstatně ovlivňuje hustota kouře, viz obrázek.



Obr. 39: Závislost rychlosti chůze na viditelnosti, lit. [27]

Přitom se vychází z hustoty kouře, kdy pro viditelnost 5 m jsou osoby již bezprostředně ohroženy. Na dalším obrázku jsou barevně vyznačeny bezpečné, nebezpečné a podmíněně bezpečné zóny vypočítané z rychlosti chůze $1,3 \text{ m.s}^{-1}$ a viditelnosti 5 a 10 m. Rychlost podélného proudění je uvažována 6 m.s^{-1} .



Obr. 40: Evakuační zóny pro vzdálenost únikových východů 150 m, dle [27]

Problémem je, (1) jak dospět k obecně platným odhadům, které jsou „nezávislé“ na parametrech tunelu a (2) jak je ovlivní například odlišné vybavení tunelu.

Odhad mortality dle rakouské směrnice

Rakouská směrnice se vyrovnává s následky nehod poměrně zjednodušujícím přístupem, neboť řeší pouze případ, že tunel nemá únikové východy nebo jsou navzájem vzdálené 500, resp. 250 m. Na rozsahu škod může podílet až pět ovlivňujících faktorů:

Mechanické činitele

- Vliv požáru za průměrné dopravní situace.
- Vliv požáru při dopravní kongesci.
- Vliv nebezpečného nákladu.
- Vliv nebezpečného nákladu při dopravní kongesci.

Analýza rizik předpokládá, že v případě dopravní kongesce se v tunelu nachází kolona vozidel o délce 500 m, a tím se zvyšuje počet zasažených osob. Od toho se odvíjí větší rozsah škod.

SP1 – SP4: Porucha s následným požárem

Rozsah škody zjistíme, sečteme-li rozsah škod způsobených požárem za průměrné dopravní situace a rozsah škod způsobených požárem při dopravní kongesci, (vynásobený procentuální četností kongescí), viz lit. [20], příloha 2.

$$SA = SA_{\text{požár}} + SA_{\text{požár, kongesce}} \cdot P_{\text{kongesce}}$$

SU1, SU3, SU7: Nehoda jednoho motorového vozidla

Týká-li se nehoda pouze jednoho účastníka provozu, stanoví se rozsah škod pouze na základě mechanických činitelů. Viz lit. [20], tab.7.

SU2, SU5, SU8: Nehoda jednoho vozidla s následným požárem

Rozsah škody zjistíme, sečteme-li mechanický dopad nehody, vliv požáru za normální dopravní situace a vliv požáru při dopravní kongesci (vynásobený procentuální četností kongescí), viz lit. [20], příloha 2.

$$SA = SA_{\text{mech}} + SA_{\text{požár}} + SA_{\text{požár, kongesce}} * P_{\text{kongesce}}$$

SU4: Nehoda nákladního vozidla a únik nebezpečného nákladu

Rozsah škody zjistíme, sečteme-li mechanický dopad nehody, vliv nebezpečného nákladu za normální dopravní situace a vliv nebezpečného nákladu při dopravní kongesci (vynásobený procentuální četností kongescí), viz lit. [20], příloha 2.

$$SA = SA_{\text{mech}} + SA_{\text{náklad}} + SA_{\text{náklad, kongesce}} * P_{\text{kongesce}}$$

SU6: Nehoda nákladního vozidla s požárem a nebezpečným nákladem

Rozsah škody zjistíme, sečteme-li mechanický dopad nehody, vliv požáru (včetně působení nebezpečného nákladu) za normální dopravní situace a vliv požáru (včetně nebezpečného nákladu) při dopravní kongesci (vynásobený procentuální četností kongescí), viz lit. [20], příloha 2.

$$SA = SA_{\text{mech}} + SA_{\text{požár}} + SA_{\text{požár, kongesce}} * P_{\text{kongesce}} + SA_{\text{náklad}} + SA_{\text{náklad, kongesce}} * P_{\text{kongesce}}$$

SU9, SU11, SU15: Nehoda v jednosměrném provozu

V případě nehody v jednosměrném tunelu se rozsah škod stanoví pouze na základě mechanických činitelů. Viz lit. [20], tab.7.

SU10, SU13, SU16 : Nehody v jednosměrném provozu s požárem

Rozsah škody zjistíme, sečteme-li rozsah škod způsobených mechanickými činiteli, požárem za normální dopravní situace a rozsah škod způsobených požárem při dopravní kongesci, (vynásobený procentuální četností kongescí), viz lit. [20], příloha 2.

$$SA = SA_{\text{mech}} + SA_{\text{požár}} + SA_{\text{požár, kongesce}} * P_{\text{kongesce}}$$

SU12: Nehoda nákladního vozidla v jednosměrném provozu s nebezpečným nákladem

Rozsah škody zjistíme, sečteme-li mechanické činitele, vliv nebezpečného nákladu za normální dopravní situace a vliv nebezpečného nákladu při dopravní kongesci (vynásobený procentuální četností kongescí), viz lit. [20], příloha 2.

$$SA = SA_{\text{mech}} + SA_{\text{náklad}} + SA_{\text{náklad, kongesce}} * P_{\text{kongesce}}$$

SU6: Nehoda nákladního vozidla v jednosměrném provozu s požárem a nebezpečným nákladem

Rozsah škody zjistíme, sečteme-li mechanický dopad nehody, vliv požáru (včetně působení nebezpečného nákladu) za normální dopravní situace a vliv požáru (včetně nebezpečného nákladu) při dopravní kongesci (vynásobený procentuální četností kongescí), viz lit. [20], příloha 2.

$$SA = SA_{\text{mech}} + SA_{\text{požár}} + SA_{\text{požár, kongesce}} * P_{\text{kongesce}} + SA_{\text{náklad}} + SA_{\text{náklad, kongesce}} * P_{\text{kongesce}}$$

SU17, SU19, SU23: Nehody v obousměrném provozu

V případě nehody v obousměrném provozu se rozsah škod stanoví pouze na základě mechanických činitelů. Viz lit. [20], tab.7.

SU18, SU21, SU24 : Nehody v obousměrném provozu s následným požárem

Rozsah škody zjistíme, sečteme-li rozsah škod způsobených mechanickými činiteli, požárem za normální dopravní situace a rozsah škod způsobených požárem při dopravní kongesci, (vynásobený procentuální četností kongescí), viz lit. [20], příloha 2.

$$SA = SA_{\text{mech}} + SA_{\text{požár}} + SA_{\text{požár, kongesce}} * P_{\text{kongesce}}$$

SU20: Nehoda nákladního vozidla v obousměrném provozu s únikem nebezpečného nákladu

Rozsah škody zjistíme, sečteme-li mechanické činitele, vliv nebezpečného nákladu za normální dopravní situace a vliv nebezpečného nákladu při dopravní kongesci (vynásobený procentuální četností kongescí), viz lit. [20], příloha 2.

$$SA = SA_{\text{mech}} + SA_{\text{náklad}} + SA_{\text{náklad, kongesce}} * P_{\text{kongesce}}$$

SU22: Nehoda nákladního vozidla v obousměrném provozu s požárem a nebezpečným nákladem

Rozsah škody zjistíme, sečteme-li mechanický dopad nehody, vliv požáru (včetně působení nebezpečného nákladu) za normální dopravní situace a vliv požáru (včetně nebezpečného nákladu) při dopravní kongesci (vynásobený procentuální četností kongescí), viz lit. [20], příloha 2.

$$SA = SA_{\text{mech}} + SA_{\text{požár}} + SA_{\text{požár, kongesce}} * P_{\text{kongesce}} + SA_{\text{náklad}} + SA_{\text{náklad, kongesce}} * P_{\text{kongesce}}$$

Příklad

Příklad dokladuje poměrně hrubý odhad škod. Ten je vypočítán z tabulek v příloze 2 podle modelu nehodových situací.

Například pro poruchu osobního vozidla s následným požárem pro intenzitu dopravy $I = 5000$ voz.den⁻¹ vychází mortalita:

$$\text{SP1: } SA = SA_{\text{požár}} + SA_{\text{požár, kongesce}} * P_{\text{kongesce}} = 0,83 + 0,92 * (1,14 / 100) = 0,840488^7$$

Rozsah škod při daných modelech nehodových situacích:

	I = 5000 voz/den	I = 15000 voz/den	
SP1	0,840488	1,860488	Porucha osobního vozidla s následným požárem
SP2	4,569426	5,819426	Porucha nákladního vozidla s následným požárem
SP3	10,698300	10,858300	Porucha nákladního vozidla s následným požárem + nebezpečný náklad
SP4	13,173252	12,593252	Porucha autobusu s následným požárem
SP5

Stupeň rizikovosti (statisticky předpokládaný počet obětí na 1 milion ujetých km se získá pro jednotlivé situace vynásobením jejich četností a následků. Například pro SP1: Porucha osobního vozidla s následným požárem pro $I=5000$ [voz/den] se stupeň rizikovosti vypočte: četnost F2 * následky SP1; tedy $0,001058 * 0,840488$

Znásobí-li se specifická rizikovost délkou tunelu [km], intenzitou dopravy [voz/den] a počtem provozních dnů [d] za rok (zpravidla 365), lze zjistit statistický odhad průměrného ročního rizika dané tunelové stavby [předpokládaný počet obětí/rok].

Dílčí závěr k odhadům mortality

Oba uvedené příklady poskytují jen velmi orientační hodnoty a jsou uvedeny pouze pro úplnost. Tento předpis doporučuje využívat kombinaci počítačové simulace evakuace v kombinaci s 2D modelem šíření kouře.

⁷

tj. počet úmrtí na jednu nehodu tohoto druhu

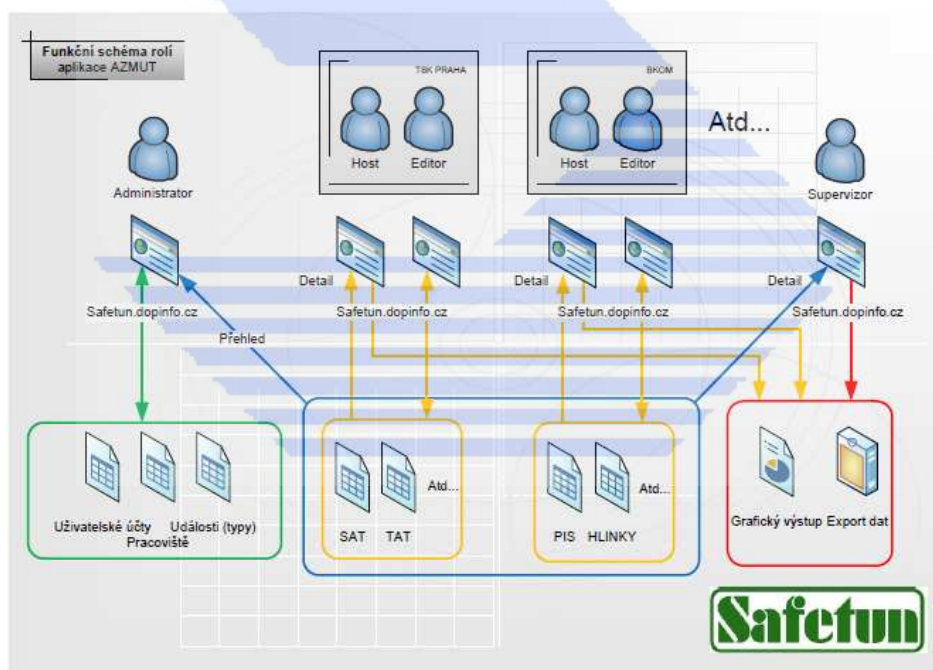
POŽADAVKY NA ZÁZNAM UDÁLOSTÍ

Sběr, zpracování a vyhodnocení vzniku, příčin a následků mimořádných událostí je dáno Směrnicí 2004/54/EC Evropského parlamentu a Rady o požadavcích na minimální bezpečnostní vybavení tunelů na Trans-Evropské silniční síti schválené ke dni 29.4.2004 a NV 264/2009 Sb., kde je v Příl. 2 uveden vzor zprávy o mimořádných událostech.

Sběr a vyhodnocení dopravních dat a mimořádných událostí vyplývá také z kap. 6 technických podmínek TP 154 „Provoz, správa a údržba tunelů pozemních komunikací“ odsouhlasených MD a MV a vydaných v roce 2009.

Technické řešení

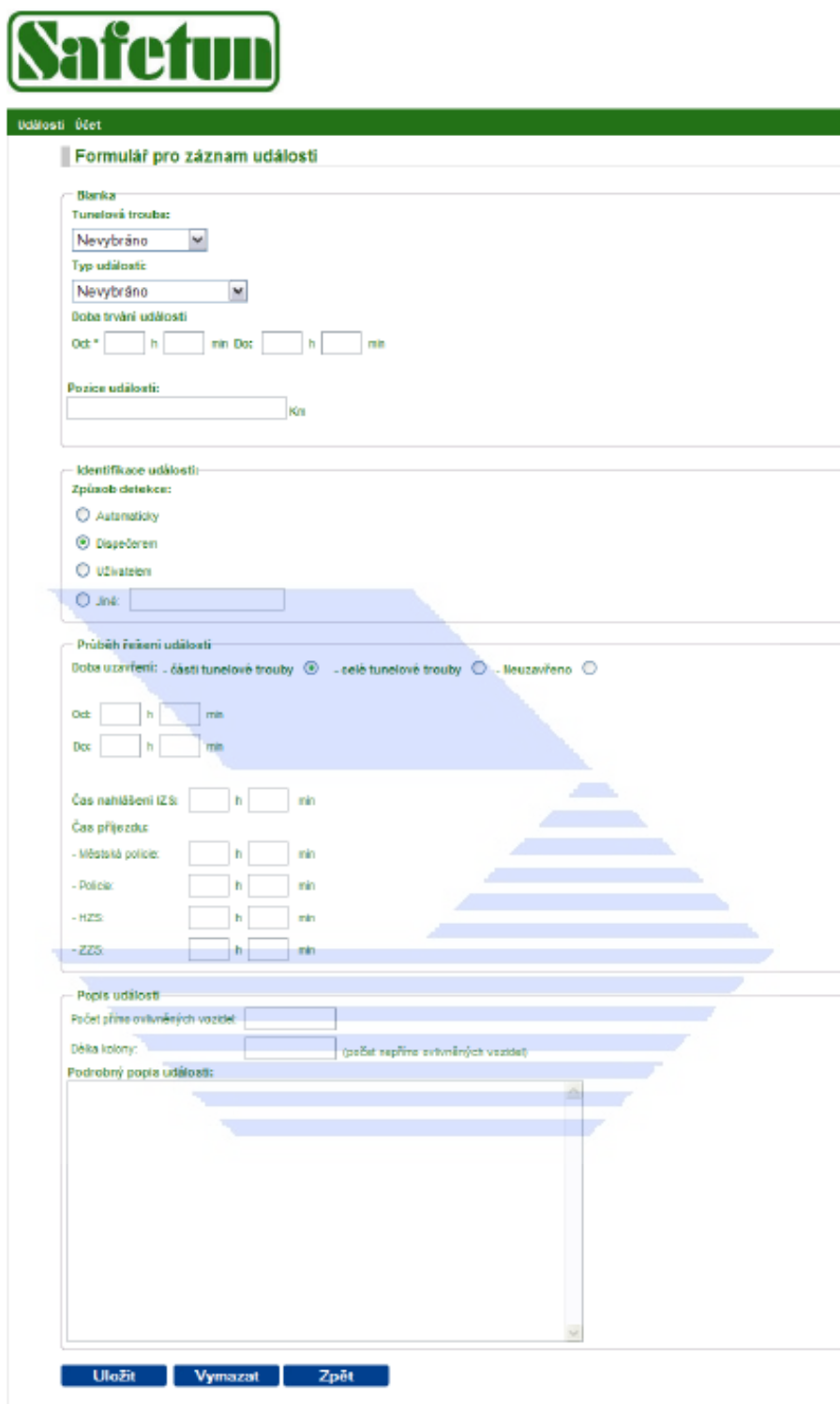
V rámci projektu OPTUN byla navržena a v rámci projektu SAFETUN byla uvedena do života metoda AZMUT (Automatizované Zpracování Mimořádných událostí v silničních Tunelech) pro záznam událostí spočívající v elektronickém dotazníku, který je umístěn na každém obsluhovaném dispečerském pracovišti tunelů v české republice. Řešení spočívá v instalaci softwarové aplikace na jednotlivých dispečerských pracovištích a v internetovém propojení na Národní dopravně informační centrum. Aplikace slouží k záznamu a uchovávání údajů o mimořádných událostech a také provádí předzpracování informací o mimořádných událostech sloužících pro správce tunelu. Údaje o mimořádných událostech se zapisují do databáze lokální sítě na dispečinku pomocí www formulářů. Principiální schéma celého fungujícího systému je v následujícím obrázku.



Obr. 41: Princip datového přenosu aplikace AZMUT

Záznam událostí

Každý dispečer je povinen se po převzetí směny přihlásit do systému a registrovat, na elektronickém formuláři. Vlastní formulář pro popis mimořádné události, je na Obr. 42. Povinností dispečera je, po vyřešení mimořádné situace, pečlivě vyplnit dotazník, případně napsat své názory a návrhy na zlepšení. Způsob vyplňování dotazníku se trénuje v rámci školení dispečerů.



Safetun

Události Účet

Formulář pro záznam události

Blanka

Tunelová trouba:

Typ události:

Doba trvání události

Od: h min Do: h min

Pozice události:

Identifikace události

Způsob detekce:

☐ Automaticky

☒ Dispečerem

☐ Uživatel

☐ Jiné:

Průběh řešení události

Doba uzavření: ☒ - částí tunelové trouby ☐ - celě tunelové trouby ☐ - Neuzavřeno

Od: h min

Do: h min

Čas nahlášení IZS: h min

Čas příjezdu:

- Městská policie: h min

- Policie: h min

- HZS: h min

- ZZS: h min

Popis události

Počet přímo ovlivněných vozidel:

Délka kolony: (počet nepřímě ovlivněných vozidel)

Podrobný popis události:

Obr. 42: Formulář pro zápis údajů o mimořádné události

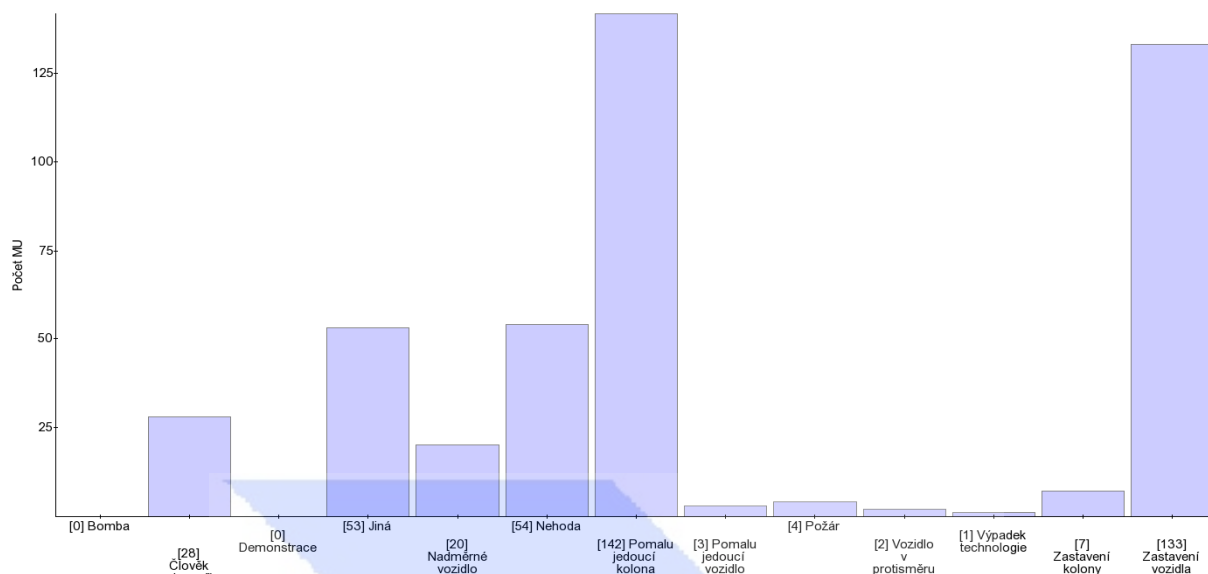
Organizace a plnění

Za pravidelné registrování událostí zodpovídá správce tunelu. Cestou silničního správního úřadu jsou zprávy o MU předávány na ministerstvo dopravy nebo na jím pověřený subjekt, který zpracuje sumární přehled za Českou republiku.

Pověřená osoba se účastní plánování, provádění a vyhodnocování činností v případě mimořádných událostí a dále se účastní hodnocení každé mimořádné události.

Příklad vyhodnocení mimořádných událostí je na obrázku:

02.2009 do 31.12.2009 v tunelech: tunel Mrázovka, tunel Hlinky, tunel Hřebeč, Husovický tunel, Jihlavský tunel, tunel Klimkovice, Letenský tunel, tunel Libouchec, tunel Panenská, Pisárecký tunel, Strahovský tunel, Těšnovský tunel, tunel Valík, Zlíchovský tunel



Obr. 43 Celkové počty MU za sledované období s přiřazením k jednotlivým typům událostí

Aplikace byla spuštěna v ostrém provozu 1. února 2009 pro následující tunely:

Tunel	Správce	MU	Poznámka
tunel Mrázovka	TSK Praha - 6200	35	
tunel Hlinky	BKOM - CTD	85	
tunel Hřebeč	ŘSD - SSÚD 23 Ostrava	2	
Husovický tunel	BKOM - CTD	145	
Jihlavský tunel	Služby města Jihlavy s.r.o.	0	Nebyla zadána do systému AZMUT žádná MU
tunel Klimkovice	ŘSD - SSÚD 23 Ostrava	29	
Letenský tunel	TSK Praha - 6200	10	
tunel Libouchec	ŘSD - SSÚD 12 Řehlovice	0	Nebyla zadána do systému AZMUT žádná MU
tunel Panenská	ŘSD - SSÚD 12 Řehlovice	0	Nebyla zadána do systému AZMUT žádná MU
Pisárecký tunel	BKOM - CTD	69	
Strahovský tunel	TSK Praha - 6200	51	
Těšnovský tunel	TSK Praha - 6200	10	
tunel Valík	ŘSD - SSÚD 09 Svojkovice	0	Prozatím nezahrnut v systému sledování MU
Zlíchovský tunel	TSK Praha - 6200	11	

Tab. 21: Počty mimořádných událostí MU v roce 2009

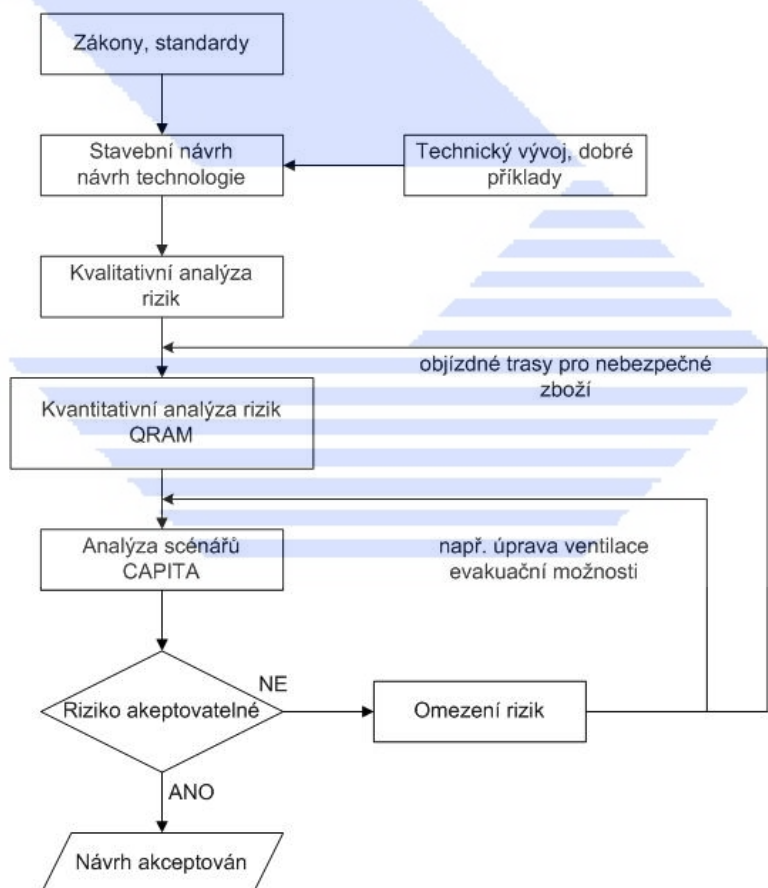
DOPORUČENÝ POSTUP – SHRUTÍ

Tyto technické podmínky popisují principiální přístup v hodnocení rizik v tunelech pozemních komunikací. V praxi je nutné postupovat dle schématu na Obr. 44

Prvním blokem je seznámení se se všemi dostupnými předpisy a normami. Na základě toho je tunel navrhován. Již při návrhu se bere v potaz možný vznik nehod, např. díky geometrii tunelu nebo jiným specifickým podmínkám. Dle řady dalších kritérií se tunel vybavuje povinnými subsystemy, jistá volnost je dána při návrhu ostatních subsystemů. Součástí návrhu je dokumentace tunelu, provozní a další řady, manuály pro dispečery atd.

Prvním stupněm kontroly, zda je tunel potenciálně bezpečný, je kvalitativní analýza typu „Kontrolní seznam“, či se aplikuje metoda SAFMEA. Výstupem je možné upozornění na potenciálně slabší místa. Závěry jsou, pokud je to nutné, zapracovány do dokumentace.

Kvantitativní analýza metodou QRA je prováděna pro požár 20 MW bez přítomnosti nebezpečných látek. Pokud mají tunelem jezdit vozidla s nebezpečným nákladem je nutné rozšířit výpočet i na tyto látky. Výstupem je FN křivka uvádějící počty usmrcených osob v závislosti na četnosti výskytu takové události.



Obr. 44: Schéma vyjadřující systémový přístup k analýze rizik

Detailní rozbor počtu ohrožených osob, nejenom na fyzikálních podmínkách v tunelu, ale i na jeho vybavení poskytuje analýza scénářů. V těchto TP je doporučena metoda CAPITA, která jako jediná umožňuje hodnotit evakuaci osob v závislosti na vybavení tunelu.

Výsledky obou deterministických metod jsou experty analyzovány. Pokud je riziko neakceptovatelné, jsou navržena opatření pro jeho snížení. Může jimi být zlepšení podmínek evakuace zkrácením únikových cest, informační systém, pokrývající informacemi celý tunel nebo výkonnější ventilace.

Příklad hodnocení některých provozních souborů z hlediska analýzy přínosů a nákladů je v příloze těchto technických podmínek.

Pokud nevyhovuje tunel z hlediska přepravy nebezpečných nákladů, je nutné vyhledat a analyzovat objízdnou trasu nebo přijmout opatření pro dodatečné úpravy.

ZÁVĚR

Tyto technické podmínky jsou první svého druhu v České republice, a proto jsou i ve větší míře popisné.

Technické podmínky reagují na nutnost vytvoření jednotného bezpečnostního prostředí pro uživatele tunelu.

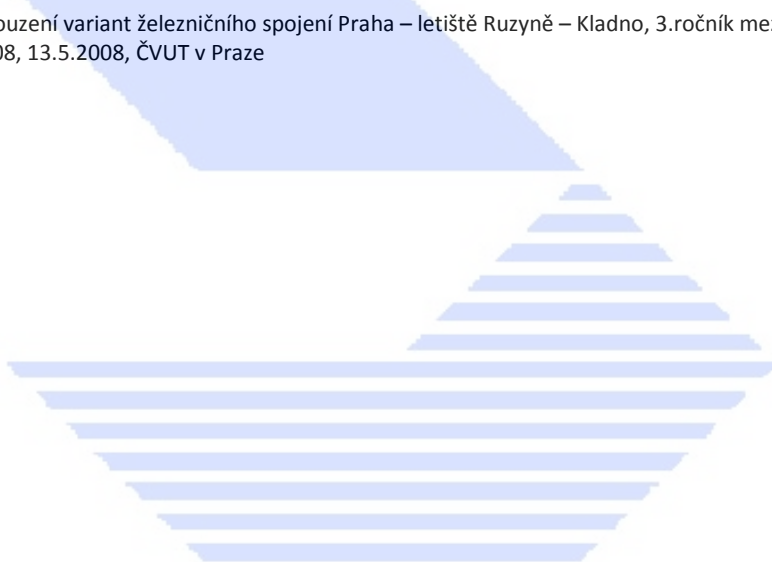
Jednodušší kvalitativní a složitější kvantitativní hodnocení umožní optimalizovat vybavení tunelu z hlediska provozních i investičních nákladů.

Pro co nejobjektivnější posuzování bezpečnosti na základě analýzy rizik je nutné trvale monitorovat a vyhodnocovat události v našich tunelech, aby byl získán soubor statisticky vypovídajících hodnot.

LITERATURA

- [1] Nařízení vlády 264/2009 Sb. o bezpečnostních požadavcích na tunely pozemních komunikací
- [2] Directive 54/2004/ES: Directive of the European parliament and of the council on minimum safety requirements for tunnels in the Trans – European road network
- [3] ČSN 73 7507 Projektování tunelů pozemních komunikací, ČNI, 2006
- [4] JNS 5814, Requirements for risk analysis. 1991
- [5] M.G.Steward and R.Ji.Melchers, Probabilistic risk assessment of engineering system. Chapman & Hall, London 1997
- [6] CAN/CSA-Q634-91 Risk analysis requirements and guidelines. 1991
- [7] EN 1990: Basis of structural design. CEN TC 250, 2002
- [8] ISO 2394 General principles on reliability for structures, 1998.
- [9] ISO/DIS 8930 General principles on reliability of structures - List of equivalent terms. 1999.
- [10] TNO report, 96-CON-R1J99 Proposal for a framework in behalf of developing terminology with regard to the process of the probabilistic design and/or assessment of building and civil engineering structures with reference to ISO 8930.1996.
- [11] Novák, M.: Bezpečnost a spolehlivost systémů. ČVUT Praha, 1999
- [12] TP 98 „Technologické vybavení tunelů pozemních komunikací“, Eltodo EG, Praha, 2004
- [13] Technické podmínky: „Technologické vybavování tunelů pozemních komunikací – změna 1“; TP98-Z1, Eltodo EG, Praha, leden 2010, str. 28
- [14] Technické podmínky: „Provoz, správa a údržba tunelů pozemních komunikací“, TP154, Eltodo EG, Praha, nové vydání prosinec 2009
- [15] Metodický pokyn: „Školení obsluh tunelů“, Eltodo EG, Praha, 2009, 62 str.
- [16] Příbyl P., Janota A. Spalek J.: Analýza a řízení rizik v dopravě – Tunely na pozemních komunikacích a železnici, BEN, Praha, 2008
- [17] TR „Risk Evaluation – Current practice for Risk Evaluation for Road Tunnels“, ver. 01/2010, PIARC, C.4, WG2, 2010
- [18] Stárek T: Cost benefit analýza, VZ pro projekt SAFETUN, Eltodo EG, Praha, 2009
- [19] TR „Risk Analysis“ PIARC, February 2007
- [20] Austrian Tunnel Risk Analysis TuRisMo, RVS09.03.11, FSV, Vídeň, xx.xx.2006
- [21] Bedford T., Cooke R., M.: Probabilistic risk analysis, Foundations and methods, Cambridge University Press, 2001
- [22] Carter, D.A., Hirst, I.L.: ‘Worst case’ methodology for the initial assessment of societal risk from proposed major accident installations. *Journal of Hazardous Materials* 71, 2000 (s. 117-128)
- [23] Vrijling, J.K., van Gelder, P.H.A.J.M: Societal risk and the concept of risk aversion. *Advances in Safety and Reliability*, Vol. 1, 1997 (s. 45-52)

- [24] Vrijling, J.K., Wessels, J.F.M., van Hengel, W., Houben, R.J.: *What is acceptable risk*. Delft, 1993
- [25] Slijkhuis, K. A. H., van Gelder, P.H.A.J.M., Vrijling, J. K.: Optimal dike height under statistical-, damage-, and construction uncertainty, *Structural Safety and Reliability*, Vol. 7, 1997, (s. 1137-1140)
- [26] Persson M.: Quantitative risk analysis procedure for the fire evacuation of road tunnel – An illustrative example, Lund, Sweden, 2002
- [27] Zulauf CH. at all: Evaluation of the safety of road tunnels, Final Report, November 2007, pp. 55
- [28] Studie bezpečnosti provozu tunelových staveb západní části městského okruhu v úseku Barrandovský most – Pelc Tyrolka. Satra spol. s.r.o., , červenec 2002
- [29] Štefaňák J.: Komparativní analýza určování vzniku početnosti nehod, Eltodo EG, Žilinská univerzita, leden 2010
- [30] Marsden A.: Escape from tunnels – Human Behaviour – Are evacuation exercises realistic; Tunnel Fires and Escape from Tunnels, International Conference, Lyon, France, 5-7 May 1999
- [31] Tichý M.: Ovládání rizika, , C.H. Beck, Praha, 2006, ISBN 80-7179-415-5
- [32] Krajčír D.: Tramvajový tunel – posouzení rizik, Eltodo EG, září 2008, str. 63
- [33] Transport of Dangerous goods through road tunnels, Quantitative Risk Assessment Model (v. 3.60 and v. 3.61), User's Guide, INERIS, 2005
- [34] Bezpečnostní dokumentace „Kvantitativní analýza rizik přepravy nebezpečných nákladů QRAM“, tunel Klimkovice, dálnice D1, SATRA, Praha, 2007
- [35] Přibyl P.: Analýza následků fuzzy metodou, VZ 259-III, Eltodo, Praha, 2010
- [36] Projekt „Analýza a řízení rizik v tunelech pozemních komunikací“, Závěrečná zpráva, Eltodo EG, Praha, 2003
- [37] Bína, L.: Posouzení variant železničního spojení Praha – letiště Ruzyně – Kladno, 3.ročník mezinárodní konference EMTECH 2008, 13.5.2008, ČVUT v Praze



Příloha



JEDNOTNÁ METODIKA PRO ANALÝZU NÁKLADŮ A PŘÍNOSŮ Z HLEDISKA BEZPEČNOSTNÍHO VYBAVENÍ TUNELŮ POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

Zpracováno v rámci projektu ministerstva dopravy č. CG711-020-910 „Harmonizace bezpečnosti tunelů pozemních komunikací s požadavky Direktivy 54/2004/ES a optimalizace tunelů z hlediska bezpečnosti“ (SAFETUN)

A. PRINCIPY METODY PRO HODNOCENÍ NÁKLADŮ A PŘÍNOSŮ

V této příloze je uveden metodický postup pro posuzování nákladové a přínosové stránky nepovinného či doporučeného vybavení tunelů z hlediska jeho přínosu pro bezpečnost, který vychází z výzkumné zprávy [1]. U některých souborů vybavení je zkoumána i možnost přínosů ve změně jeho parametrů, jako např. snížení vzdálenosti únikových východů. Metodika slouží jako obecný teoretický základ, ale v rámci projektu SAFETUN byla převedena i do praxe výpočetního aparátu CBA (Cost Benefit Analysis) v prostředí MatLab a MS Excel. Takto koncipovaný výpočetní aparát je možné využívat k posuzování projektových záměrů a k vyhodnocení jejich efektivnosti a prospěšnosti.

Vzhledem ke stále se zlepšujícímu vybavení tunelů a inovaci instalovaných zařízení a systémů jsou uvedeny pouze příklady vybraných systémů a přístup k jejich hodnocení. Jako příklad je uvedeno kvalitativní hodnocení přínosu vybavení, které přispívá k záchraně osob při vzniku požáru. Pak jsou hodnocena zařízení a systémy pro včasnou identifikaci požáru a ozvučovací zařízení, které má informovat účastníky události o nutnosti evakuace. Pokud je tunel vybaven i jiným vybavením, jako jsou např. informační displeje (zařízení pro provozní informace) je nutno hodnocení rozšířit i pro ně.

A.1 Struktura analýzy nákladů a přínosů

Základní struktura výpočtu nákladů a přínosů (C/B analýza) je dána následujícími body:

- Definice záměru.
- Vymezení struktury faktorů přínosů (kvantitativně či **kvalitativně** ocenitelných).
- Popis rozdílů mezi předpokládanou investiční a nulovou variantou.
- Určení a kvantifikace všech relevantních nákladů a přínosů i z hlediska životnosti zařízení.
- Určení a slovní popis neocenitelných přínosů řešení (kvalitativní hodnocení).
- Výpočet ocenitelných nákladů a přínosů, viz metodika navržená dále
- Stanovení diskontní sazby.
- Výpočet kritériálních ukazatelů efektivnosti navržených opatření.
- Citlivostní analýza na změny vybraných parametrů.
- Rozhodnutí o přijatelnosti navrhovaného řešení.

Naplnění této struktury analýzy nákladů a přínosů je rozděleno do dvou částí. První část představuje úvodní definici záměru zkoumání, popis variant apod., tedy část, která je představována slovními definicemi a vymezením rozsahu projektu jako takového. Metodické příručky zabývající se touto částí CBA byly v minulosti již mnohokrát publikovány a jsou univerzálního charakteru, např. lit. [6]. Druhá část souvisí s možnostmi a metodami vedoucími k vyčíslení klíčových ocenitelných přínosů a nákladů

A.2 Vyčíslení přínosů uvažovaných investic.

Vyčíslení přínosů vybraného vybavení bylo rozděleno v návaznosti na jejich podstatu do dvou oblastí. První oblast zahrnuje hodnocení přínosů technologického vybavení tunelu, které přispívá k záchraně osob, pokud již událost typu nehoda se zraněním, či požár, vznikne. Význam této skupiny zařízení je, že urychlují reakci systému po vzniku události a tím přispívají k záchraně osob.

Do druhé oblasti patří vybavení, které má funkci preventivní a díky jeho instalaci je pravděpodobné, že dojde ke snížení četnosti nehod i s jejich následky.

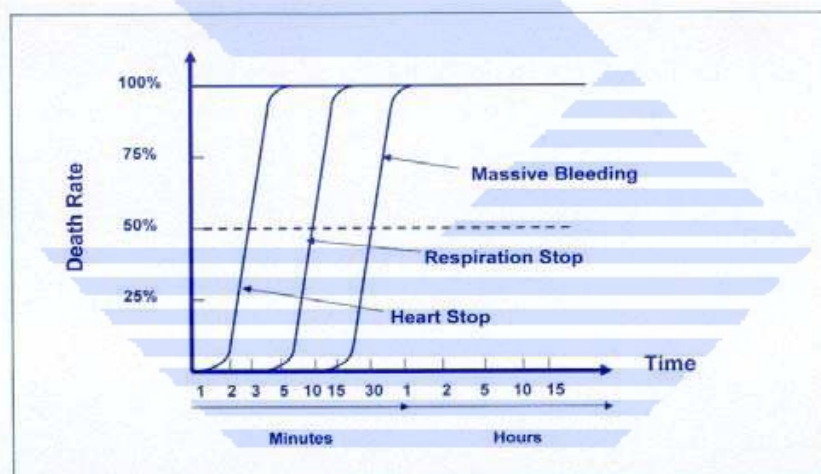
A.2.1 Hodnocení systémů včasné informovatelnosti

První z postupů hodnocení přínosů je aplikován na zařízení a systémy umožňující včasnou identifikaci události, jakou je nehoda s vážnými následky nebo požár. V případě nehody mohou k záchraně lidských životů, díky urychlení přivolání pomoci, přispět hlásky nouzového volání, poplachová tlačítka a hodnotí se i pokrytí tunelu signálem GSM. V případě požáru je rozhodující jeho včasná identifikace, kdy se hodnotí pokrytí tunelu systémem videodohledu identifikujícího kouř, umístění (výška instalace) liniového hlásiče požáru (LHP), schopnost LHP vyhodnocovat teplotní gradient, instalaci systému měření škodlivin a opacity, pokrytí tunelu technologií GSM a možnost informování postižených účastníků ozvučovacím zařízením.

Princip hodnocení je založen na skutečnosti, že všechny tyto technologie pouze snižují potenciální důsledky dopravních nehod, přičemž mohou a nemusí být aplikovány, resp. je možné měnit parametry jejich instalace. Kvantitativní proměnnou, která přímo souvisí s vyčíslením jejich přínosu je čas, představující možnost rychlejšího, či naopak pomalejšího, přivolání pomoci v případě požáru.

Instalací těchto zařízení a systémů nelze primárně přispět ke snížení hmotných škod, lehkých či těžkých zranění, ale lze omezit následky nehod zlepšením možnosti záchranu těžce raněného člověka, který by v případě pozdního příjezdu záchranné služby svým zraněním patrně podlehl.

Pro účel kvalitativního hodnocení je používán model tzv. Zlaté hodiny (R. G. Cunningham), vyjadřující závislost pravděpodobnosti úmrtí člověka na čase, ve kterém mu byla poskytnuta první pomoc. Tento model pokrývá tři majoritně zastoupené příčiny lidských úmrtí a jeho grafická podoba je uvedena na Obr. A-1.



Obr. A-1: Princip Zlaté hodiny

Vlastní vyčíslení snížení doby od vzniku dopravní nehody k jejímu nahlášení lze kalkulovat na základě rozdílu vzdáleností hlásek nouzového volání, resp. tlačítek předepsaných v TP98 a možného zkrácení předepsaných vzdáleností. Do výpočtu dále vstupuje statistické rozložení pravděpodobnosti vzniku dopravní nehody v tunelu, které představuje cca 70% dopravních nehod v tunelech v těsné blízkosti portálů a zbývajících 30% uvnitř tunelů.

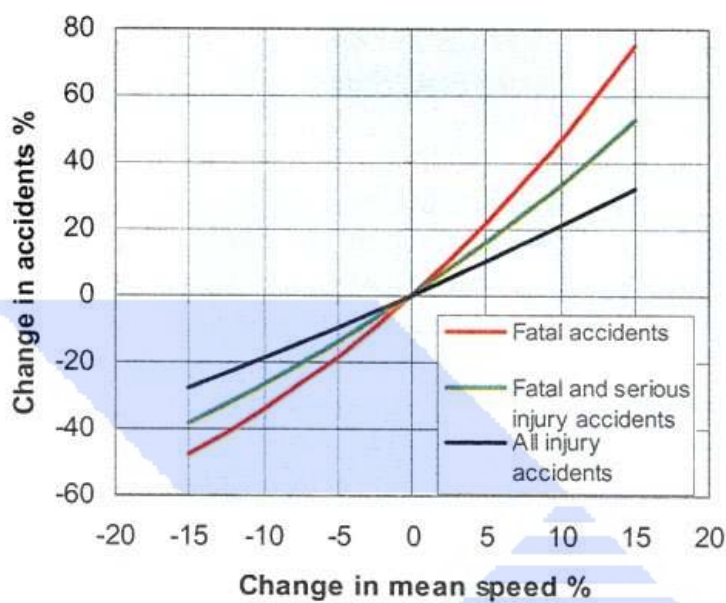
Získaná hodnota je pak přepočtena do podoby procentuální změny pravděpodobnosti úmrtí dle modelu Zlaté hodiny. Díky lineárnímu průběhu majoritní části uvedených křivek je možné stanovit směrnici této lineární závislosti, která odpovídá hodnotě 5,6. V praxi to znamená, že v případech, kdy dorazí pomoc na místo nehody o jednu minutu dříve, se snižuje pravděpodobnost úmrtí o 5,6 %.

Při hodnocení vlivu pokrytí tunelu signálem GSM je výpočetní algoritmus aplikován analogicky. Rozdílné je pouze stanovení časové úspory ve vztahu k přivolání pomoci, které je v tomto případě kalkulováno na základě eliminace času potřebného k nalezení hlásky nebo tlačítka.

A.2.2 Vyčíslení přínosů preventivních opatření

Vyčíslení přínosů u omezení rychlosti značkami B20a a měření úsekové rychlosti již vycházejí z pravděpodobnosti poklesu počtu dopravních nehod a jejich následků díky snížení rychlosti a homogenizaci dopravního proudu.

Logika vyčíslení těchto přínosů vychází výzkumů v oblasti závislosti rychlosti na dopravní nehodovosti. Za klíčový lze považovat model švédského výzkumníka G. Nilssona, který matematicky popsal závislost mezi bezpečností a rychlostí pomocí šesti rovnic. Výsledný matematický model je v grafické podobě uveden na Obr. A-2.



Obr. A-2: Nilssonův model

Kalkulace přínosu souvisejícího s pouhým omezením rychlosti i s omezením rychlosti doprovázeným úsekovým měřením rychlosti je provedena na základě procentuálního vyjádření počtu řidičů, kteří sníží svoji rychlost v souladu s rychlostním omezením.

A.3 Hodnocení kategorie bezpečnosti tunelu

Hodnotit bezpečnost tunelu pro účastníky provozu ve vztahu k instalovanému nebo projektovanému vybavení, postihující i variování parametrů zařízení je obecně velmi složitý problém, který nelze řešit běžnými matematickými postupy. Je to dáno tím, že nejsou k dispozici data, resp. statistická data, která by umožňovala posoudit na hladině významnosti, jak se bude lišit schopnost záchrany osob, když se mění parametry zařízení.

Jedinou možností, jak tento problém zvládnout je využití metod umělé inteligence, zde konkrétně fuzzy-lingvistický model celého systému. Na jeho tvorbě se podílí experti, čím více, tím je model přesnější. Značnou výhodou je, že je dobře kontrolovatelný a tím se snižuje stupeň neurčitosti.

Došlo k zavedení společného parametru pro hodnocení „Kategorie bezpečnosti tunelových staveb⁸“, které jsou vyhodnoceny za využití fuzzy-lingvistické aproximace. Na straně vstupních informací jsou uvažovány základní parametry související s technologiemi uvedenými výše, výstupem algoritmu je pak číselné vyjádření kategorie bezpečnosti, které nabývá hodnot ve škále <0; 5>. Tunelové stavby

⁸ Tento název není příliš šťastný, protože postihuje pouze část hodnocené problematiky, a proto je nutné ho vztahovat pouze k řešené problematice

s maximálním, technologickým vybavením, představujícím vysokou bezpečnost pro uživatele jsou hodnoceny v kategorii 4-5. Se snižujícím se vybavením pak číselná hodnota bezpečnosti klesá.

Výsledná hodnota tohoto typu posouzení je základním výstupem pro analýzu nákladů a přínosů a slouží jako podpůrný argument související s posouzením přínosů implementovaných technologií.

Popis fuzzy-lingvistického modelu, viz níže.

A.3.1 Volba typu fuzzy systému

Vzhledem k tomu, že pro potřeby posouzení kategorie bezpečnosti není v majoritě případů možné popsat konsekvent jednotlivých pravidel v podobě lineární či jiné kombinace vstupních parametrů, je pro tyto potřeby vhodné využít fuzzy systém typu Mamdani. V případě fuzzy systému typu Mamdani je výstupní proměnná y definována na univerzu Y a vstupní proměnné x_i na universech X_i .

Nechť universum Y je pokryto souborem fuzzy množin B^j a universa X_i soubory množin A_i^j . Potom lze nelineární funkci f aproximovat fuzzy systémem se souborem r pravidel následujícího typu.

$$\text{If } (x_1 = A_1^{jk}) \text{ and } \dots \text{ and } (x_n = A_n^{jk}) \text{ then } (y = B^{jk}) \quad k = 1, 2, \dots, r$$

Tento typ fuzzy systému je označován jako fuzzy systém s fuzzy závěry (v konsekventu každého pravidla je výrok).

Fuzzy systém typu Sugeno tedy nebude v dalším textu uvažován.

A.3.2 Nastavení lingvistických proměnných

V následujících odstavcích je popsán příklad nastavení jednotlivých lingvistických proměnných a to pro zařízení a systémy umožňující včasnou identifikaci požáru a předání této informace účastníkům.

Na straně vstupů se jedná o: „Pokrytí tunelu systémem videodohledu“, „Dostupnost ozvučovacího zařízení“, „Výšku implementace LHP“, „Možnost LHP vyhodnotit teplotní gradient“, „Dostupnost implementace systému měření škodlivin a opacity“, „Pokrytí tunelu technologií GSM“.

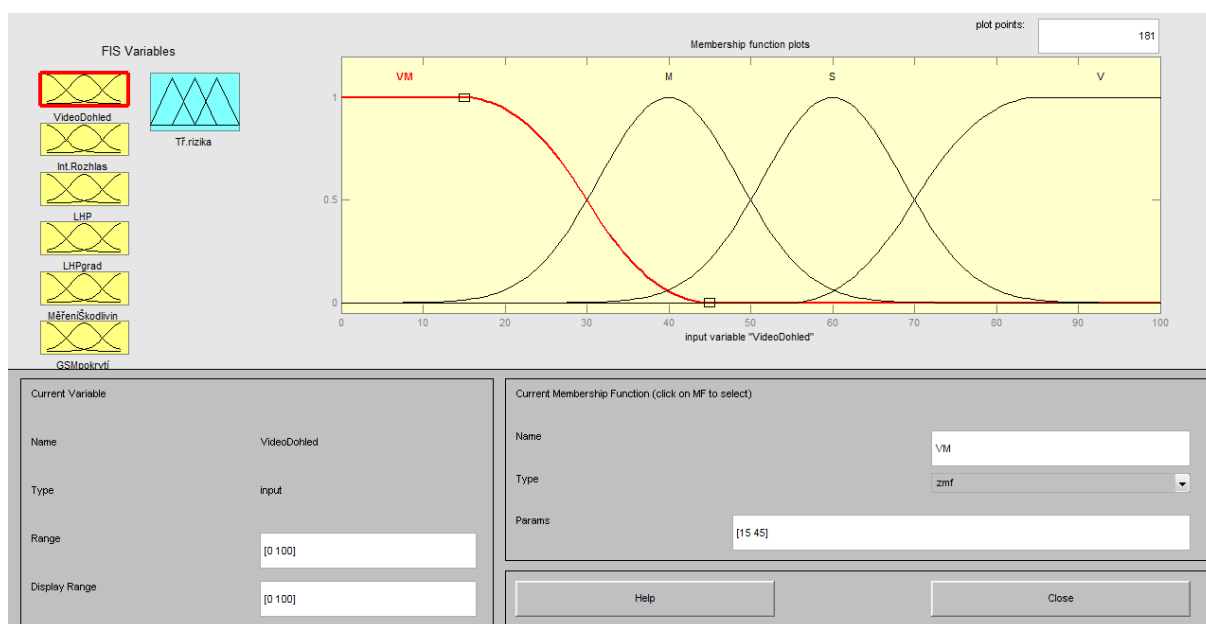
Na straně výstupů modelu se jedná o hledaný parametr „Kategorie bezpečnosti“.

Vstupní proměnná „Pokrytí tunelu systémem videodohledu“

Tato proměnná je procentuelním vyjádřením pokrytí tunelu systémem videodohledu. Definice lingvistické proměnné je tedy následující:

Množinou termů lingvistické proměnné je: {velmi malá, malá, střední, velká}. Termy jsou definovány na universu: $\langle 0\%; 100\% \rangle$

Průběh jednotlivých dílčích funkcí příslušnosti je zastoupen klasickými Gaussovskými distribučními křivkami s maximy v hodnotách 40% a 60%, Z-křivkou s intervalovým maximem 0 – 15% a S-křivkou s maximem v hodnotě 85%.



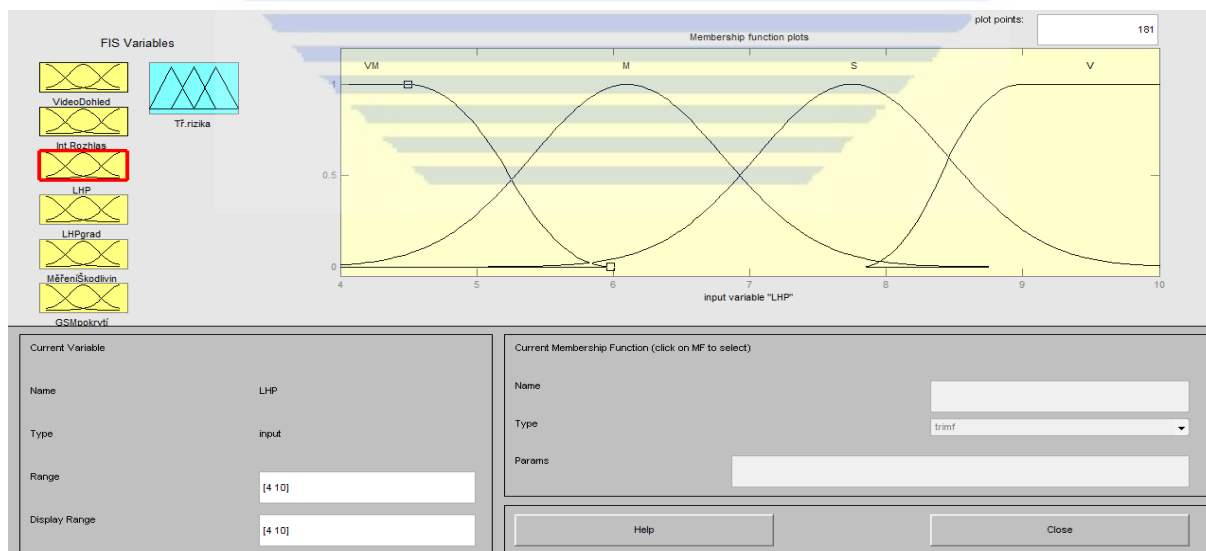
Obr. A-3: Pokrytí tunelu systémem videodohledu

Vstupní proměnná „Výška implementace LHP“

Tato proměnná udává výšku, ve které je implementován systém liniového hlásiče požáru (LHP). Definice lingvistické proměnné je tedy následující:

Množinou termů lingvistické proměnné je: {velmi malá, malá, střední, velká}. Termy jsou definovány na universu: <4 m; 10 m>.

Průběh jednotlivých dílčích funkcí příslušnosti je zastoupen klasickými Gaussovskými distribučními křivkami s maximy v hodnotách 6 m a 8 m, Z-křivkou s intervalovým maximem 4 – 4,5 m a S-křivkou s maximem v hodnotě 9 – 10 m.



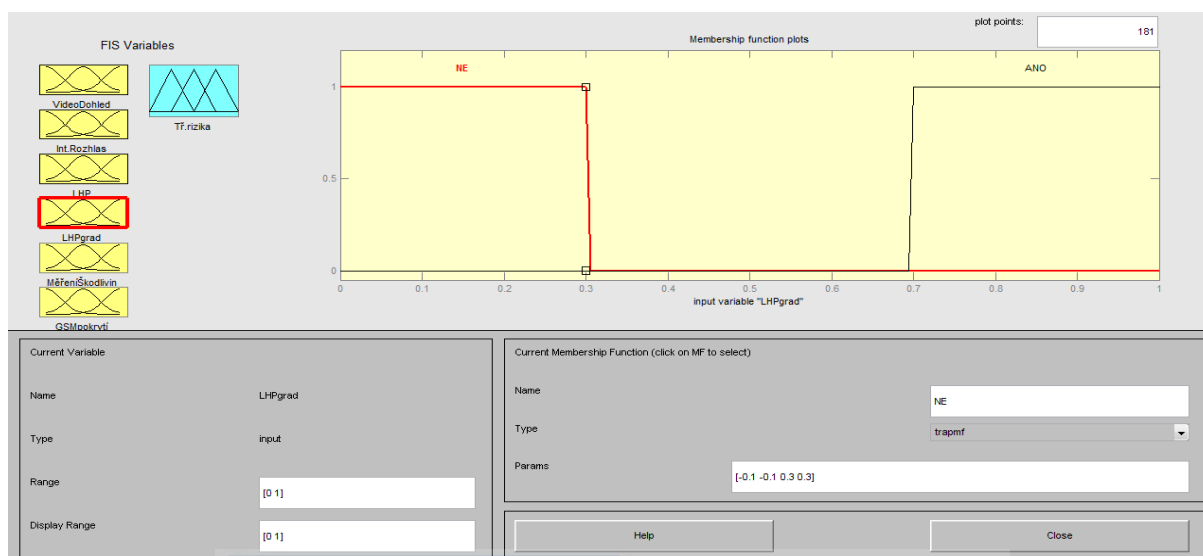
Obr. A-4: Výška implementace LHP

Vstupní proměnná „Možnost LHP hodnotit teplotní gradient“

Tato proměnná udává skutečnost, zda je systém liniového hlásiče požáru schopen vyhodnocena teplotní gradient. Definice lingvistické proměnné je tedy následující:

Množinou termů lingvistické proměnné je: {NE, ANO}. Termy jsou definovány na universu: <0; 1>

Průběh jednotlivých dílčích funkcí příslušnosti je zastoupen trapeziodálními distribucemi.



Obr. A-5: Možnost LHP vyhodnotit teplotní gradient

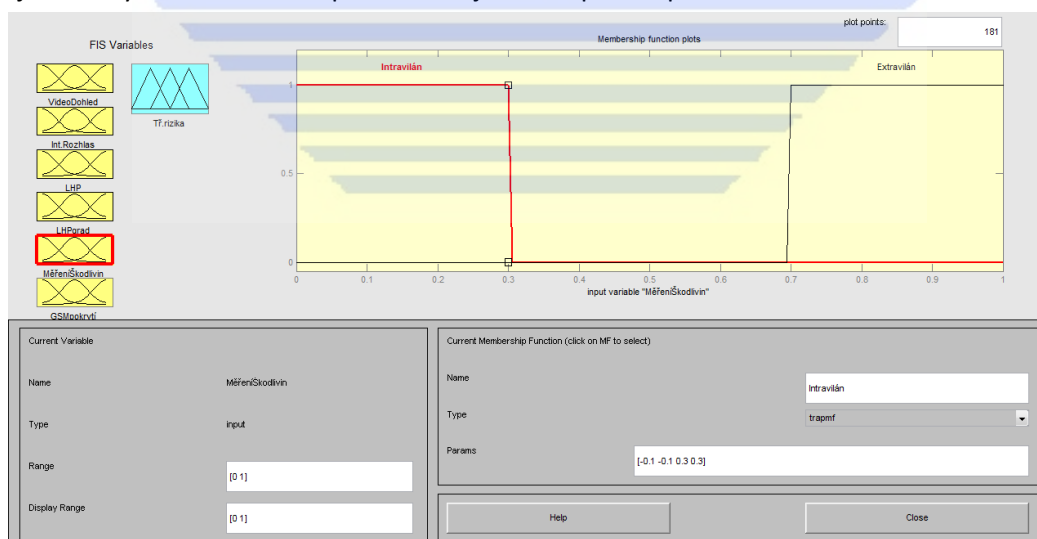
Vstupní proměnná „Dostupnost měření škodlivin a opacity“

Tato proměnná udává skutečnost, že je tunelová stavba vybavena systémem pro měření škodlivin a opacity. S ohledem na lokalitu tunelu určuje proměnná nastavení citlivosti systému s ohledem na intravilán a extravilán. Definice lingvistické proměnné je tedy následující:

Množinou termů lingvistické proměnné je: {Intravilán, Extravilán}.

Termy jsou definovány na universu: $<0; 1>$

Průběh jednotlivých dílčích funkcí příslušnosti je zastoupen trapeziodálními distribucemi.



Obr. A-6: Dostupnost implementace systému měření škodlivin a opacity

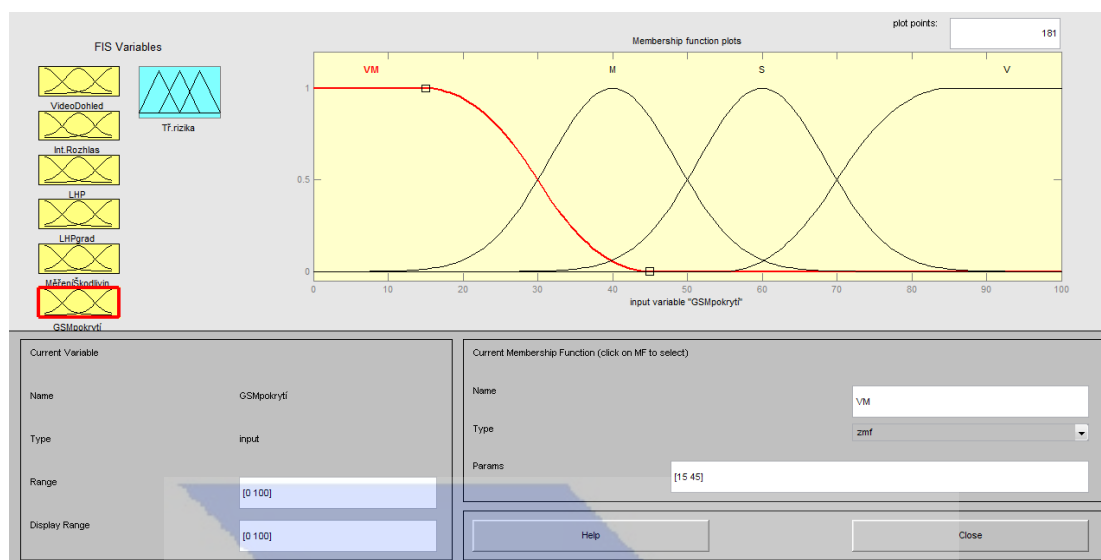
Vstupní proměnná „Pokrytí tunelu signálem GSM“

Tato proměnná udává procentuelní pokrytí tunelové stavby signálem technologie GSM. Definice lingvistické proměnné je tedy následující:

Množinou termů lingvistické proměnné je: {velmi malá, malá, střední, velká}.

Termy jsou definovány na universu: $\langle 0\%; 100\% \rangle$

Průběh jednotlivých dílčích funkcí příslušnosti je zastoupen klasickými Gaussovskými distribučními křivkami s maximy v hodnotách 40% a 60%, Z-křivkou s intervalovým maximem 0 – 15% a S-křivkou s maximem v hodnotě 85%.



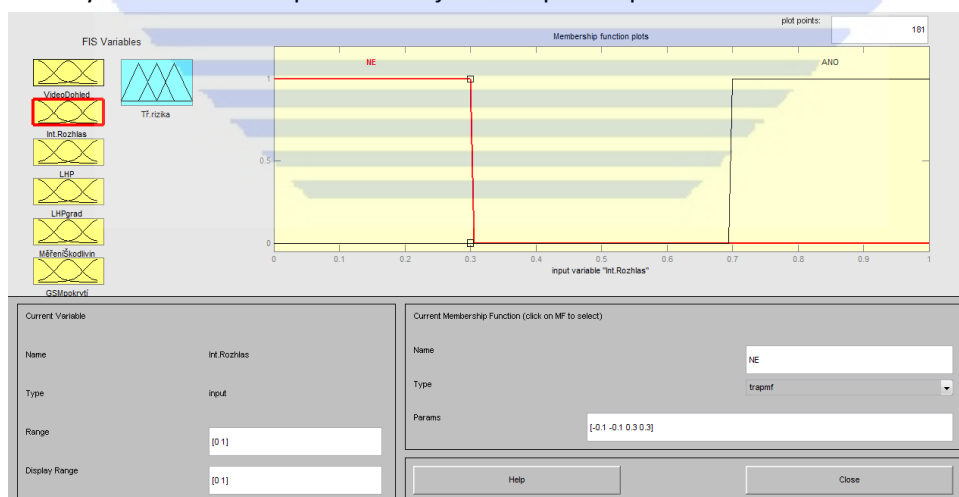
Obr. A-7: Pokrytí technologií GSM

Vstupní proměnná „Vybavenost ozvučovací systémem“

Tato proměnná zachycuje skutečnost, zda tunelová stavba je nebo není vybavena ozvučovací systém. Definice lingvistické proměnné je tedy následující:

Množinou termů lingvistické proměnné je: {NE, ANO}. Termy jsou definovány na universu: $\langle 0; 1 \rangle$

Průběh jednotlivých dílčích funkcí příslušnosti je zastoupen trapeziodálními distribucemi⁹.



Obr. A-8: Dostupnost ozvučovacího systému

Výstupní proměnná „Kategorie bezpečnosti tunelu“

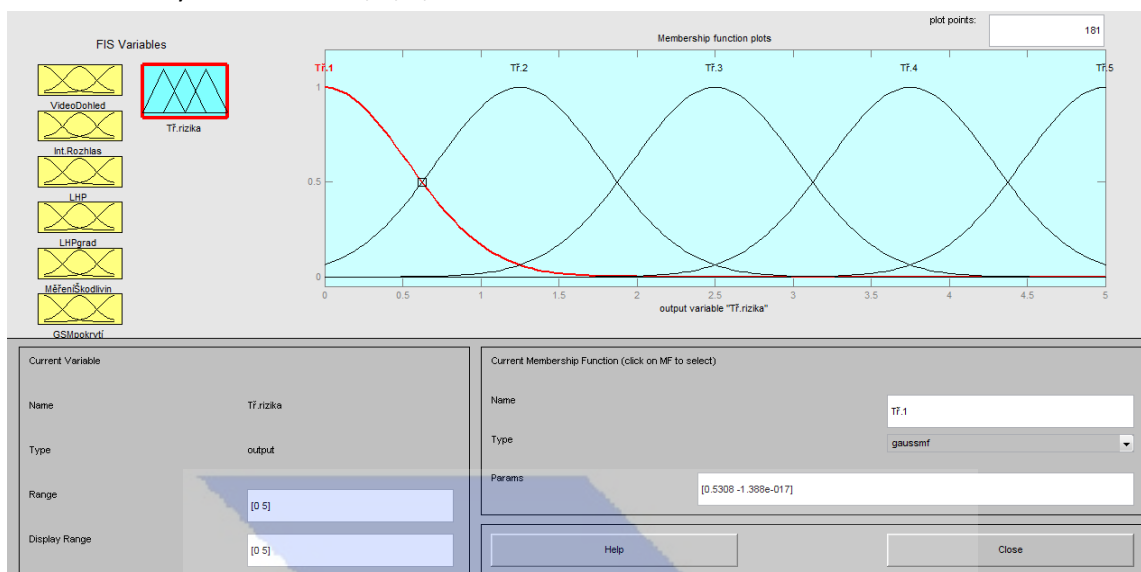
Výstupní lingvistická proměnná přímo udává hodnotu kategorie bezpečnosti. Definice lingvistické proměnné je tedy následující:

⁹ Pokud by tunel nebyl ozvučen dobře, je možné volit Gaussovské křivky a hodnotit v jemnější stupnici, než ANO/NE

Množinou termů lingvistické proměnné je: {1, 2, 3, 4, 5}.

Termy jsou definovány na universu: <0; 5>

Průběh jednotlivých dílčích funkcí příslušnosti je zastoupen klasickými Gaussovskými distribučními křivkami s vrcholy v hodnotách 1, 2, 3, 4 a 5.

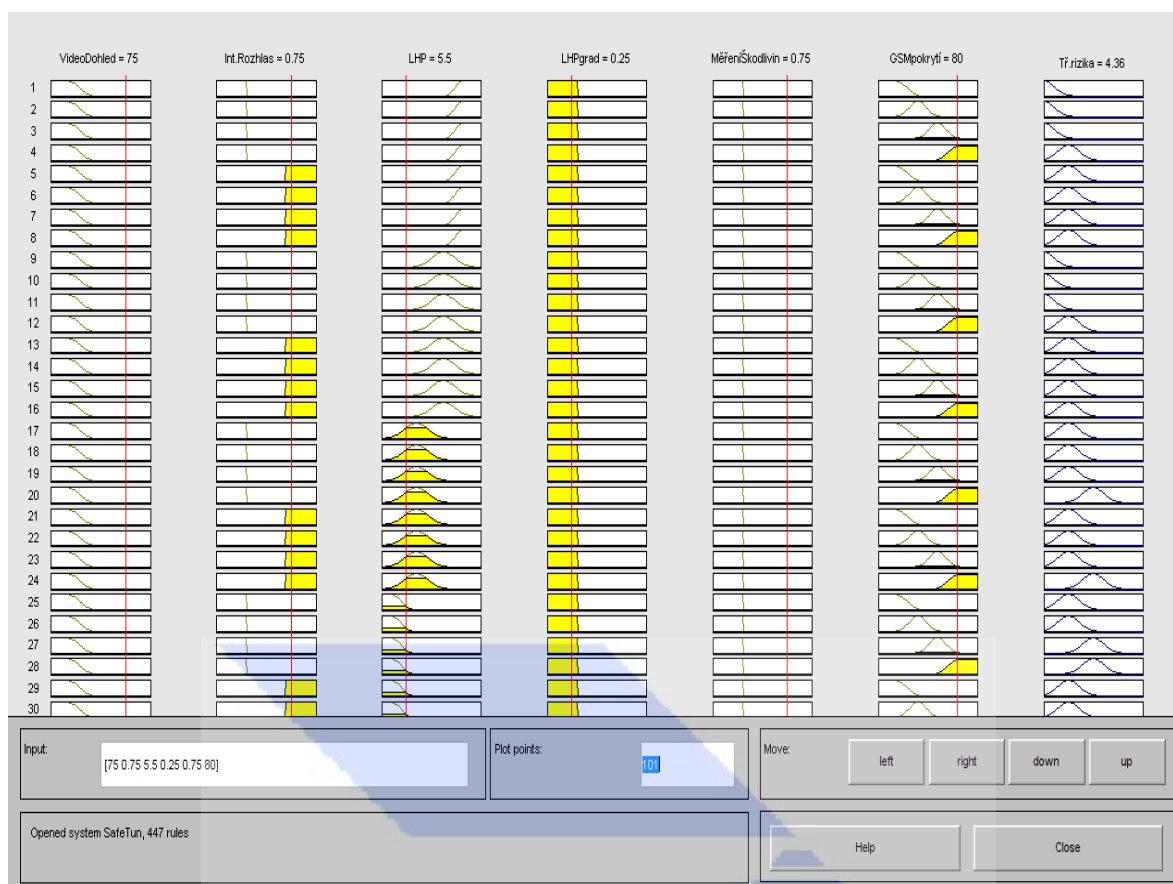


Obr. A-9: Kategorie bezpečnosti tunelu

A.3.3 Přístup k nastavování inferenčního mechanismu

Inferenční mechanismus byl nastaven typickým expertním způsobem. Jednotlivá pravidla jsou kombinací nastavení výše popsaných vstupních lingvistických proměnných. Pro jednotlivé kombinace pak byly expertním způsobem nastaveny hodnoty výstupní lingvistické proměnné. Celkem bylo definováno 447 inferenčních pravidel. S ohledem na praktickou využitelnost fuzzy modelu je obecně doporučeno provést nastavení pravidel ze strany více nezávislých expertů.

Úvodní nastavení modelu pro prvních 30 pravidel je zobrazeno na následujícím obrázku.



Obr. A-10: Nastavení inferenčního mechanismu

A.4 Hodnocení provozních a investičních nákladů

Vyčíslení nákladů navrhovaného vybavení je pro potřeby této metodiky vnímáno jako souhrn investičních a provozních nákladů. Nákladové položky jednotlivých let jsou koncipovány tak, že představují rozdílové hodnoty varianty nulové a varianty investiční. Tímto způsobem je eliminován požadavek na znalost kompletních rozpočtů.

Hodnoty jednotlivých investičních nákladových položek je možné získat od výrobců daných technologií, náklady provozní potom od správců tunelových staveb.

Součástí nákladové stránky hodnocení nákladů a přínosů bezpečnostního vybavení silničních tunelových staveb jsou také náklady na obnovu technologií.

B. PŘÍKLAD HODNOCENÍ

Tato kapitola představuje aplikaci v prostředí MS Excel, která umožňuje na základě výše uvedených algoritmů vyčíslit konkrétní náklady i přínosy jednotlivých technologií. Pole určená k editaci uživatelem jsou v uvedeném příkladu podbarvena bíle (popřípadě zeleně a červeně u přepínačů), automatické výpočty potom žlutě.

B.1 Zadání základních parametrů tunelu

Možnosti nastavení základních parametrů tunelu jsou uvedeny na následujícím obrázku. Bílá políčka jsou vyplněna uživatelem, hodnoty do žlutých políček jsou dopočítány.

Parametr	Hodnota
Kategorie tunelu	TA
Délka tunelu [m]	1 200
Intenzita dopravy / 24 hodin	30 000
Počet lehkých zranění dle kategorie / mil. vozokm	0,40
Počet těžkých zranění dle kategorie / mil. vozokm	0,26
Počet fatalit dle kategorie / mil. vozokm	0,05
Mil. vozokm / rok	9
Počet lehce zraněných / rok	3,6
Počet těžce zraněných / rok	2,34
Počet fatalit / rok	0,45

Obr. B-1: Základní parametry tunelu

B.2 Zadání parametrů pro C/B analýzu

Možnosti nastavení základních parametrů CBA jsou uvedeny na následujícím obrázku. Maximální počet let posouzení je možné nastavit na hodnotu 40. V tabulce všechny hodnoty volí uživatel.

Parametr	Hodnota
Diskontní sazba	1,06
Průměrný růst inflace	1,015
Počet let posouzení	30
Počáteční rok posouzení	2014
% nákladů v prvním roce investiční fáze	80%
% nákladů v druhém roce investiční fáze	20%
% nákladů ve třetím roce investiční fáze	0%

Obr. B-2: Základní parametry CBA

B.3 Volba provozních souborů vybavení tunelu

V uvedeném příkladu je možnost výběru a nastavení parametrů pro vybavení tunelu uvedené na následujícím obrázku. Uživatel volí vzdálenost hlásek a další parametry.

Technologie	Uvažována	Parametry technologie	Max. požadavek TP
Hlásky	Ne <input type="checkbox"/>	50	Vzdálenost hlásek [m]
SOS tlačítka	Ano <input type="checkbox"/>	100	Vzdálenost SOS tlačítek [m]
GSM pokrytí	Ne <input type="checkbox"/>	Dopustnost GSM pokrytí	N/A
Měření rychlosti	Ano <input type="checkbox"/>	Instalováno měření rychlosti	N/A

Obr. B-3: Volba a nastavení vybavení tunelu

B.4 Doplnující výpočtové parametry

Možnosti nastavení doplňujících výpočtových parametrů jsou uvedeny na následujícím obrázku.

Parametr	Hodnota	Poznámka
% úmrtí důsledkem silného krvácení a zástavy dechu	65%	Paul R.G.Cunningham
Směrnice lin. části křivky Golden Hour	5,6	Paul R.G.Cunningham
Rychlost chůze [m/s]	1,4	odb. literatura
Původní rychlost v tunelu [km/h]	80	
Snížení rychlosti na [km/h]	70	
Redukce rychlosti [%]	12,5%	
Akceptace požadavku na snížení rychlosti	65%	VMS, úsekové měření
Snížení počtu nehod s lehkým zraněním: delta_v = 5%	10%	Nilssonův model 2004
Snížení počtu nehod s těžkým zraněním: delta_v = 5%	10%	Nilssonův model 2004
Snížení počtu nehod s usmrcením: delta_v = 5%	20%	Nilssonův model 2004

Obr. B-4: Doplnující výpočtové parametry

B.5 Náklady na jednotlivé technologie

Možnosti nastavení jednotkových investičních a provozních nákladů vybraných technologií jsou uvedeny na následujícím obrázku.

Technologie	Investiční náklady [Kč]	Provozní náklady / rok [Kč]
Hlášky	6 500 000	20 000
SOS tlačítka	1 200 000	10 000
GSM pokrytí	15 000 000	80 000
Měření rychlosti	2 100 000	55 000

Obr. B-5: Jednotkové investiční a provozní náklady technologií

Možnosti nastavení nákladů na obnovu vybraných bezpečnostních technologií jsou uvedeny na Obr. B-6.

Technologie	Rok obnovy technologií	Náklady na obnovu zařízení [Kč]
Hlášky	2020	13 000
SOS tlačítka	2015	20 000
GSM pokrytí	2018	33 000
Měření rychlosti	2017	40 000

Obr. B-6: Náklady na obnovu technologií

B.6 Nastavení socio-ekonomických parametrů

Možnosti nastavení socio-ekonomických parametrů jsou uvedeny na následujícím obrázku.

Socio-ekonomické parametry	Typ nehody	[Kč] / nehodu	Poznámka
Ekonomická ztráta z dopravních nehod	se škodou na majetku	100 000	ŘSD - CSHS
	s lehkým zraněním	50 000	ŘSD - CSHS
	s těžkým zraněním	5 000 000	ŘSD - CSHS
	s úmrtím	10 000 000	ŘSD - CSHS

Obr. B-7: Socio-ekonomické parametry

B.7 Výstupní struktura CBA

V následujících tabulkách je uveden příklad/část výstupní sestavy provedeného hodnocení analýzy nákladů a přínosů. První tabulka představuje nediskontované hotovostní toky, druhá pak toky po diskontování.

Analýza nákladů a přínosů								
Nediskontováno	Investiční náklady (Kč)		Rok	1	2	3	4	5
			Celkem	2014	2015	2016	2017	2018
	Hlásky		0	---	---	---	---	---
	SOS tlačítka		-1 203 600	-960 000	-243 600	---	---	---
	GSM pokrytí		0	---	---	---	---	---
	Měření rychlosti		-2 148 127	-1 680 000	-426 300	---	-41 827	---
	Provozní náklady (Kč)							
	Hlásky		0	---	---	---	---	---
	SOS tlačítka		-355 237	---	---	-10 302	-10 457	-10 614
	GSM pokrytí		0	---	---	---	---	---
	Měření rychlosti		-1 953 802	---	---	-56 662	-57 512	-58 375
	Přínosy (redukce počtu nehod)							
	Hlásky - s úmrtím		0,000	---	---	---	---	---
	SOS tlačítka - s úmrtím		0,357	---	---	0,0128	0,0128	0,0128
	GSM pokrytí - s úmrtím		0,000	---	---	---	---	---
	Měření rychlosti - s lehkým zraněním		6,143	---	---	0,2194	0,2194	0,2194
	Měření rychlosti - s těžkým zraněním		4,095	---	---	0,1463	0,1463	0,1463
	Měření rychlosti - s úmrtím		4,095	---	---	0,1463	0,1463	0,1463
	Přínosy (Kč)							
	Hlásky		0	---	---	---	---	---
	SOS tlačítka		4 529 269	---	---	131 354	133 324	135 324
	GSM pokrytí		0	---	---	---	---	---
	Měření rychlosti - s lehkým zraněním		389 650	---	---	11 300	11 470	11 642
	Měření rychlosti - s těžkým zraněním		25 976 692	---	---	753 352	764 652	776 122
	Měření rychlosti - s úmrtím		51 953 384	---	---	1 506 704	1 529 305	1 552 244
	Koeficient růstu inflace		---	1,000	1,015	1,030	1,046	1,061
	Celkem		77 188 229	-2 640 000	-669 900	2 335 745	2 328 954	2 406 343

Obr. B-8: Sestava CBA - nediskontováno

Diskontováno	Investiční náklady (Kč)		Rok	1	2	3	4	5
			Celkem	2014	2015	2016	2017	2018
	Hlásky		0	---	---	---	---	---
	SOS tlačítka		-1 189 811	-960 000	-229 811	---	---	---
	GSM pokrytí		0	---	---	---	---	---
	Měření rychlosti		-2 117 289	-1 680 000	-402 170	---	-35 119	---
	Provozní náklady (Kč)							
	Hlásky		0	---	---	---	---	---
	SOS tlačítka		-151 874	---	---	-9 169	-8 780	-8 407
	GSM pokrytí		0	---	---	---	---	---
	Měření rychlosti		-835 307	---	---	-50 429	-48 288	-46 238
	Přínosy (redukce počtu fatalit)							
	Hlásky		0,000	---	---	---	---	---
	SOS tlačítka		0,357	---	---	0,0128	0,0128	0,0128
	GSM pokrytí		0,000	---	---	---	---	---
	Měření rychlosti - s lehkým zraněním		6,143	---	---	0,2194	0,2194	0,2194
	Měření rychlosti - s těžkým zraněním		4,095	---	---	0,1463	0,1463	0,1463
	Měření rychlosti - s úmrtím		4,095	---	---	0,1463	0,1463	0,1463
	Přínosy (Kč)							
	Hlásky		0	---	---	---	---	---
	SOS tlačítka		1 936 395	---	---	116 904	111 941	107 189
	GSM pokrytí		0	---	---	---	---	---
	Měření rychlosti - s lehkým zraněním		166 587	---	---	10 057	9 630	9 221
	Měření rychlosti - s těžkým zraněním		11 105 793	---	---	670 481	642 017	614 761
	Měření rychlosti - s úmrtím		22 211 585	---	---	1 340 961	1 284 034	1 229 523
	Koeficient diskotní sazby		---	1,000	0,943	0,890	0,840	0,792
	Celkem		31 126 078	-2 640 000	-631 981	2 078 805	1 955 435	1 906 049

Obr. B-9: Sestava CBA - diskontováno

B-8 Výsledek hodnocení analýzy nákladů a přínosů

Výsledkem provedené analýzy nákladů a přínosů je výstupní zpráva, které obsahuje všechny parametry uvažované v CBA a dále vlastní číselné vyjádření přijatelnosti investice, které je uvedeno v podobě současné čisté hodnoty investice (NPV) a vnitřního výnosového procenta (IRR).

NPV - Současná čistá hodnota investice	31 126 078 Kč
IRR - Vnitřní výnosové procento	43%

Obr. B-10: Výstupy CBA

REFERENCE

- [1] Stárek T: Cost benefit analýza, VZ pro projekt SAFETUN, Eltodo EG, Praha, 2009
- [2] Value of safety – Brunno Arends, TU Delft, 2008
- [3] Rakouská analýza rizik v tunelech na pozemních komunikacích – RVS09.03
- [4] TP98 – Technologické vybavení pozemních komunikací, Eltodo EG, Praha, 2004
- [5] TP154 - Provoz, správa a údržba tunelů pozemních komunikací, Eltodo EG, Praha, 2009
- [6] Sieber P. Analýza nákladů a přínosů: Metodická příručka. MMR ČR. 2004. 45 s.



Název	Technické podmínky: „Bezpečnost v tunelech pozemních komunikací“
Vydal	MD-OSI
Zpracovatel	prof. Příbyl (FD ČVUT); Příloha: Ing. L. Stárek, Ph.D.
Technická rada	Ing. A. Lebl (ŘSD); Ing. L. Tichý, CSc. (MD), Ing. J. Smolík (ČSS)
Náklad	neuveden
Počet stran	87
Distribuce	Eltodo EG, a.s., Novodvorská 1010/14, 142 01 Praha 4, tel.: 261343704, pitrovaz@eltodo.cz
©Copyright	Eltodo, a.s., 2010
ISBN	978-80-254-7953-7

