

Metodika pro predikci rizika při ražbě tunelu

Autorský kolektiv:

Prof. Ing. Michal Šejnoha, Ph.D., DSc., Ing. Olga Špačková, Ph.D., prof. Ing. Jiří Šejnoha, Dr.Sc.,
Feng., Ing. Tomáš Janda, Ph.D., Ing. Eva Novotná, Ph.D.

I) CÍL METODIKY

Metodika pojímá riziko jako pravděpodobnou škodu. Ta může nastat jako důsledek nejistot, doprovázejících jak návrh, tak realizaci díla. Riziko je pak definováno jako součin škody, vyjádřené v peněžních jednotkách, a pravděpodobnosti, s níž ke škodě může dojít. Prostředkem k ocenění rizika je *riziková analýza*. Na ni navazuje *rizikový management*, jehož úkolem je minimalizace škody.

Cílem metodiky je předložit prakticky využitelné postupy, umožňující efektivní predikci rizika se zaměřením na návrh a realizaci tunelových staveb. Soustředíme se na hodnocení situací vedoucích ke značným finančním ztrátám, či ohrožujícím lidské životy. Půjde zejména o mimořádné události typu zával, či o výrazné deformace okolí tunelu projevující se škodami na nadložních stavbách, ať již se jedná o nepřijatelné náklony nebo poruchy těchto staveb. Metodika sleduje i finanční ztráty způsobené nedodržením plánované doby výstavby a navrhuje postupy, jak škody věrohodně kvantifikovat. Poskytuje i prostředky pro objektivní rozhodování.

Obecné postupy jsou převážně známé, viz [1], a pro pohodlí uživatele jsou zaříděny do základních kategorií v Obr. 1. Je třeba poznamenat, že některé z nich (expertní a některé empirické) nepojímají riziko jako pravděpodobnou škodu, nýbrž jako *nebezpečí (hazard)*, kterému je třeba čelit přijetím vhodných opatření. Tím dostává pojem riziko dvojitý a samozřejmě poněkud odlišný význam. Aby nedošlo k nedorozumění, v této metodice budou pojmy riziko a nebezpečí důsledně odlišovány.

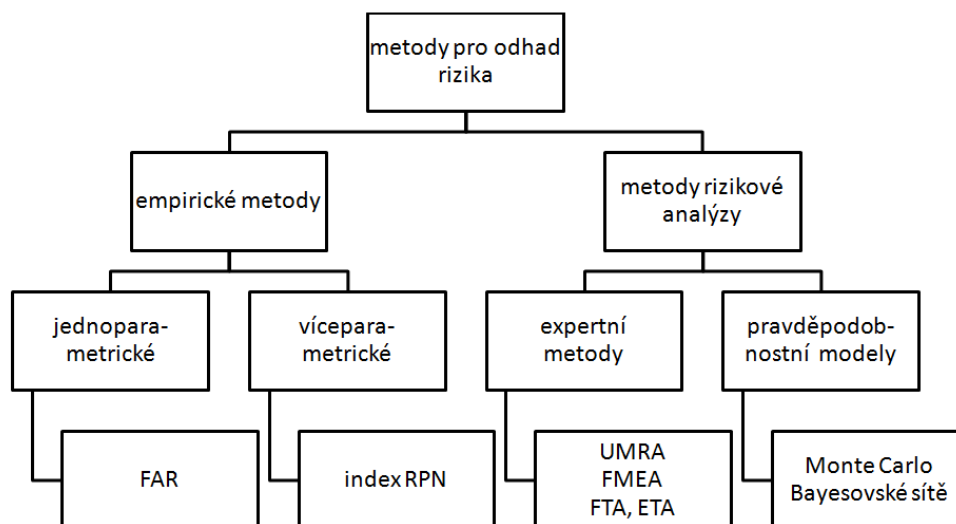
Metodika neusiluje o náhradu osvědčených přístupů pro analýzu rizika, které převážně využívají hlubokých znalostí a zkušeností expertů z oboru navrhování a realizace tunelů. Jejím cílem je tyto metody doplnit a navrhnout kvantitativní přístupy, umožňující odhady v expertních analýzách dále zpřesňovat.

II) VLASTNÍ POPIS METODIKY

1. Úvod

Pro snadnější pochopení problému nejprve podáme stručný komentář k metodám standardně používaným v rizikové analýze a rizikovém managementu (viz Obr. 1). Ponecháme stranou empirické postupy s odkazem na [1] a soustředíme se na ty, jež metodika bezprostředně využívá.

Expertní metody, zejména UMRA a FMEA, jsou v současnosti velmi populární, osvědčené praxí a dobře popsané. Proto připomeneme jen jejich principy. Spočívají ve dvou krocích: První krok označovaný za verbální analýzu slouží k identifikaci problému, definuje typy a zdroje nebezpečí a segmenty vystavené riziku. Druhý krok – numerická analýza – poskytuje expertní odhady jedné nebo více veličin, charakterizujících riziko. Běžně používaný index RPN hodnotí riziko s ohledem na jeho mohutnost (S_v –Severity), věrohodnost (L_k -Likelihood) a schopnost experta riziko detekovat (D_t - Detection). Ilustrativní příklad podrobné rizikové analýzy metodou UMRA lze nalézt v [2].



Obr. 1 Základní přístupy k oceňování rizika

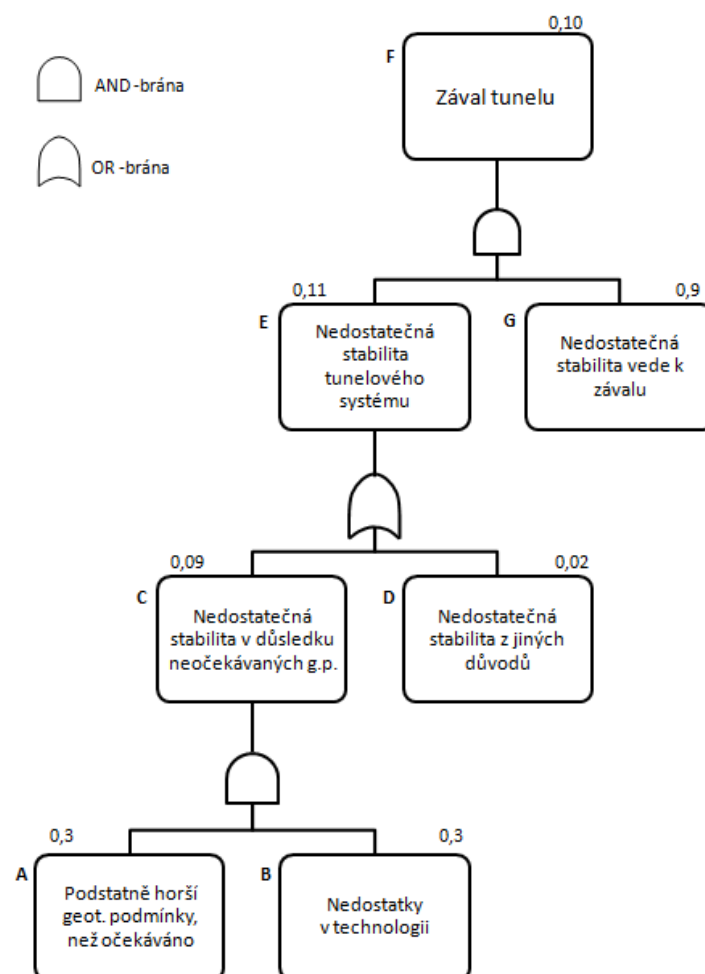
Nejprve ukážeme metodické postupy při aplikaci *stromu poruch FTA* jako nástroje k odhadu pravděpodobnosti nežádoucího jevu (zával) a následně *stromu událostí ETA* jako nástroje k posouzení důsledků tohoto jevu. Názorné aplikace související nejen s problematikou výstavby tunelů, ale i jiných geotechnických staveb uvádí [2].

1.1 Analýza stromu poruch FTA

Analýza stromu poruch FTA (Fault Tree Analysis) je grafickým znázorněním všech možných dílčích událostí, jejich sekvencí a kombinací, které mohou vést k tzv. vrcholové události[1], [2], [3]. Typickým příkladem je mimořádná událost typu *zával*. Výsledkem je odhad pravděpodobnosti vrcholové události (Obr. 2).

Zásadním předpokladem FTA je statistická nezávislost dílčích případů. Omezená možnost analýzy závislých systémů touto metodou je jejím hlavním nedostatkem. Závislost případů (náhodných proměnných) lze vystihnout opakováním větví stromů nebo jinými pokročilými technikami, ale takové přístupy vedou k exponenciálnímu nárůstu náročnosti modifikované FTA [4]. Další podrobnosti lze najít v [5], [6]. Schéma na Obr. 2 je názornou ukázkou aplikace FTA při odhadu pravděpodobnosti selhání závalem. K selhání, které je označeno jako jev F , dojde při nedostatečné stabilitě tunelového systému (jev E). Ta se očekává s pravděpodobností 0,11. Je-li tato podmínka splněna, je dále odhadnuto, že k závalu skutečně dojde (jev G) s pravděpodobností 0,9. Existence jevu F je tak podmíněna jevem E , takže (brána AND)

$$P(F) = P(E) P(F|E) = P(E) P(G) = 0,9 \cdot 0,11 \cong 0,10$$



Obr. 2 Příklad stromu poruch (FT) k odhadu pravděpodobnosti selhání závalem tunelu

Nechť nedostatečná stabilita systému je důsledkem neočekávaných geotechnických podmínek (jev C) nebo je způsobena jinými příčinami (jev D). Jevy C a D jsou tak svázaný

branou OR. Tyto dva jevy nejsou ve skutečnosti ani nezávislé, ani vylučné, ale pravděpodobnost jejich průniku se považuje za zanedbatelnou. Proto přibližně

$$P(E) \approx P(C) + P(D) = 0,09 + 0,02 = 0,11.$$

Konečně nedostatečná stabilita v důsledku neočekávaných geotechnických podmínek (jev C) může nastat, jestliže geotechnické podmínky budou podstatně odlišné od předpokládaných (jev A) a současně projektant náležitě nereaguje na tuto změnu (jev B). Při výpočtu pravděpodobnosti jevu C se použije obdobný postup jako při předchozím uplatnění brány AND, tedy součin výchozích pravděpodobností.

Výsledek FTA, pravděpodobnost selhání vrcholového jevu, slouží jako vstupní hodnota pro ETA.

1.2 Analýza stromu událostí ETA

ETA je grafickým vyjádřením všech možných scénářů v systému. Základem je výchozí událost - zde sledujeme možné dopady závalu tunelu, k němuž dojde s pravděpodobností $P(F) = 0.1$, viz odst. 1.1. Analýza zkoumá důsledky výchozí události podél různých drah, až dojde ke konečnému výsledku. V ETA se předpokládá, že sledovaná komponenta systému buď dokonale funguje nebo nefunguje. ETA neumožňuje sledovat dopady částečně degradované komponenty, což je hlavní nevýhodou této metody.

Metodika podle ETA je patrná z Obr. 3. Její aplikací můžeme odhadnout dopad závalu na dobu výstavby tunelu, tj. pravděpodobné zpoždění výstavby. Vyjádření škody způsobené závalem v peněžních jednotkách je obdobné. Pro ilustraci budou brány v úvahu dopady závalu na¹

- Poranění, popř. úmrtí osob
- Následné škody na životním prostředí
- Škody na budovách a infrastruktuře.

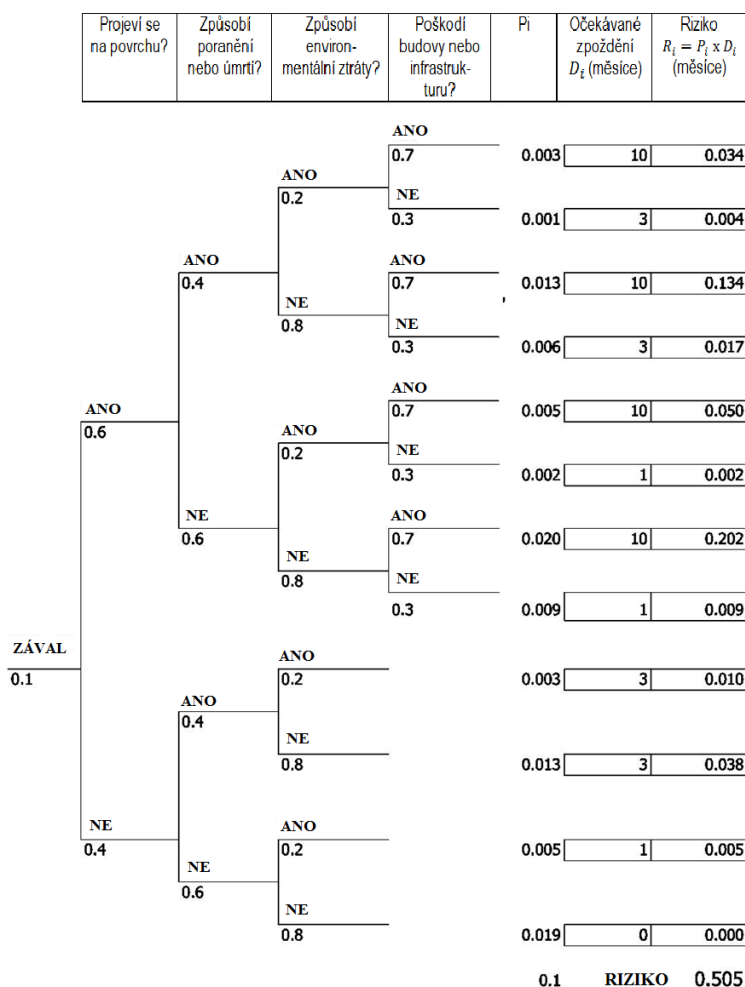
Mohutnost důsledků závisí na mnoha faktorech, jako jsou rozsah, místo a čas závalu. V ilustrativním schématu se uvažuje mělký tunel s vysokou pravděpodobností (0.6) vytvoření kráteru na povrchu. Předpokládá se stavba tunelu uvnitř města, takže lze očekávat značné škody na budovách i infrastruktuře. Pravděpodobnost škody vyvolané kráterem na povrchu je odhadnuta na 0.7. Tomu odpovídá zpoždění výstavby o 10 měsíců. Zpoždění zahrnuje dobu na sanaci tunelu, vyšetřování ale i další možné obstrukce. Na základě statistických dat

¹ Bylo by možné uvažovat i další dopady, jako jsou

- pokles cen pozemků a nemovitostí v místě a v okolí závalu
- zvýšení pojistného pro další ražbu apod.

S ohledem na jednoduchost a názornost ilustrativního příkladu je do Obr. 3 nezahrnujeme.

z předchozích událostí je pravděpodobnost poranění osob odhadována na 0.4. Tomu odpovídá odhadované zpoždění výstavby o 3 měsíce².



Obr. 3 ETA pro analýzu důsledků závalu tunelu

V rámci environmentálních škod se připouští narušení hladiny podzemní vod, a to s pravděpodobností 0,2, s čímž souvisí doba nezbytná na čisticí práce a obnovu, odhadem 1 měsíc.

Průměrné riziko, zde vyjádřené pravděpodobnou časovou prodlevou D , se vypočítá jako

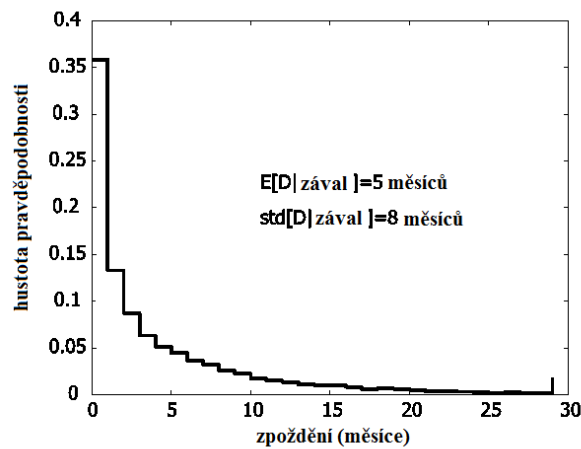
² V tomto diagramu jsou přijata i některá další zjednodušení. Pravděpodobnosti ANO/NE u každého větvení opakují. To ale obecně neplatí, neboť pravděpodobnosti u větvení i závisí na situaci u větvení $i-1$... Jedná se o podmíněné pravděpodobnosti, které nelze prostě sčítat. Příklad lze nalézt v [1]. Proto jsou dále navrženy pravděpodobnostní modely, které berou tyto faktory důsledně v potaz. Diskutabilní může být i otázka dopadu poranění či úmrtí na prodloužení doby výstavby.

$$RISK = E[D] = \sum_{i=1}^n p_i D_i,$$

kde p_i jsou pravděpodobnosti jednotlivých scénářů, D_i jsou dílčí zpoždění způsobená těmito scénáři, n je počet scénářů (zde $n = 12$). Riziko, přesněji řečeno jeho střední hodnota $E[D]$, je tímto způsobem odhadnuta na 0.505 měsíců.

Užitečnou informací je očekávané zpoždění výstavby za podmínky, že dojde k závalu, tj. $E[D|zával]$. K této hodnotě dojdeme, položíme-li v ETA pravděpodobnost závalu rovnou jedné, takže vyjde

$$E[D|zával] = E[D]/0,1 = 5,05 \text{ měsíců}^3.$$



Obr. 4 Diskrétní rozdělení pravděpodobnosti za podmínky, že nastane zával

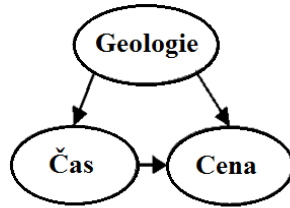
Obdobné stromy mohou být použity i pro analýzu jiných typů důsledků, jako je zaplavení tunelu nebo požár ad.

1.3 Bayesovské sítě

Vhodným nástrojem rizikové analýzy jsou bayesovské sítě (BNs), které znázorňují graficky závislosti mezi náhodnými proměnnými. Uzly sítě představují náhodné proměnné, spojení

³ Abychom získali představu o věrohodnosti odhadu rizika, měli bychom odhad jeho střední hodnoty doplnit alespoň směrodatnou odchylkou veličiny $D|zával$. Aniž bychom zabíhali do podrobností, poznamenejme, že toho lze nejnázáze dosáhnout simulací ET metodou Monte Carlo, v níž považujeme doby zdržení D_i za náhodné proměnné s lognormálním, zde pro nedostatek podrobnějších informací dvouparametrickým, rozdělením. Pro porovnání s předchozí deterministickou variantou ETA uvažujeme střední hodnoty časových prodlev postupně 10, 3 a 1 měsíc (viz předposlední sloupec v Obr. 3). Při zavedení směrodatných odchylek časových prodlev 10.1, 3.3 a 0.7 měsíce., obdržíme diskrétní rozdělení pravděpodobnosti veličiny $D|zával$ znázorněné na Obr. 4. Jak bylo možné očekávat, střední hodnota $E[D] = 5$ měsíců zůstává zhruba stejná jako v deterministickém výpočtu, směrodatná odchylka $std[D|zával] = 8$ měsíců však ukazuje na značnou nejistotu odhadu s deterministickými dílčími prodlevami.

mezi uzly ukazují příslušné závislosti. Ilustrativní schéma je na Obr. 5. Ukazuje vazbu mezi náhodnými geologickými podmínkami (G), dobou výstavby (T) a cenou stavby (C)⁴.



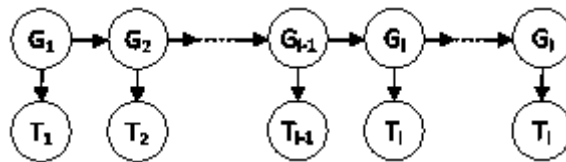
Obr. 5 Schéma jednoduché bayesovské sítě

Pro každý uzel je definováno rozdělení pravděpodobnosti podmíněné nadřazenou (rodičovskou) proměnnou (G je rodičem k T a C , T je rodičem k C). Sdružené rozdělení pravděpodobnosti všech tří proměnných se vyhodnotí podle pravidla

$$p(g, t, c) = p(g)p(t|g)p(c|t, g).$$

Podle obdobného schématu se vyhodnocují i složitější sítě. Sdružené rozdělení pravděpodobností všech proměnných je tak rozloženo (faktorizováno) do součinu podmíněných pravděpodobností.

Dynamické bayesovské sítě (DBNs) jsou zvláštním případem BN. Jsou vhodné pro modelování náhodných (stochastických) procesů, jako je výstavba liniových staveb obecně a tunelů zvláště. Názorný příklad je na Obr. 6.



Obr. 6 Schéma jednoduché dynamické bayesovské sítě (DBN)

Svislý sloupec i představuje stav systému v čase nebo místě i . Názorným příkladem polohy je tunelová čelba. V tomto jednoduchém schématu každý sloupec zachycuje dvě proměnné – „geologii“ G_i a průběžný čas T_i . Sdružené rozdělení těchto dvou proměnných se vypočte jako

$$p(g_i, t_i) = \sum_{g_{i-1}} p(g_{i-1})p(g_i|g_{i-1})p(t_i|g_i).$$

Zde $p(g_{i-1})$ je marginální rozdělení pravděpodobnosti náhodné proměnné G_{i-1} , odpovídající „geologii“ v $(i - 1)$, $p(g_i|g_{i-1})$ vystihuje formou podmíněné pravděpodobnosti postupné změny v „geologii“ a $p(t_i|g_i)$ rozdělení času podmíněné aktuální „geologií“.

⁴ Důsledně vzato, cena stavby není náhodná veličina; je dohodnutá ve smlouvě. Náhodné mohou být náklady, které nese dodavatel, či odchylka od předpokládaného trvání díla.

Z uvedeného je zřejmé, že aktuální stav (i) je podmíněn nanejvýš stavem předchozím ($i - 1$), což je charakteristickým rysem *Markovova procesu*. Zavedením markovovských předpokladů se sledování vývoje předmětných náhodných proměnných, jako je pravděpodobnost selhání, doba výstavby či cena, značně zjednoduší.

Cenné podrobnosti o BNS lze najít např. v [7], [8].

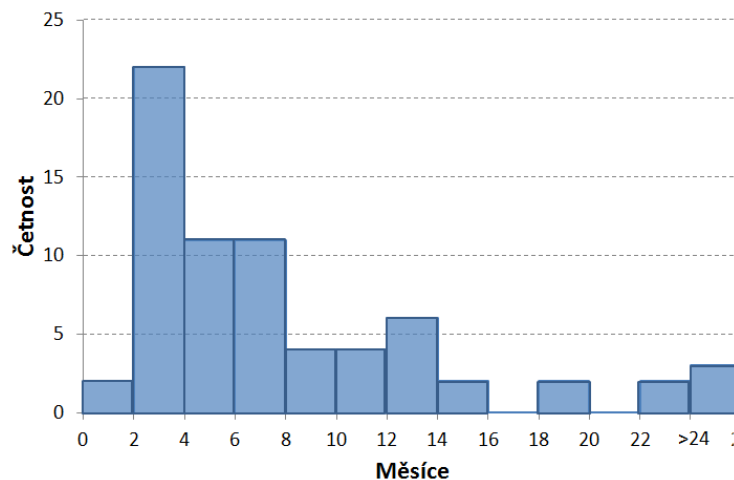
2. Typy poruch, databáze a modely pro odhad četnosti jejich výskytu

2.1 Typy poruch, databáze a z nich plynoucí poznatky

Nebezpečí, že dojde k závalu tunelu, jeho zaplavení či k jinému typu nehody, je neoddiskutovatelnou součástí výstavby zejména ražených tunelů. Tyto události lze minimalizovat, ale nelze je však zcela vyloučit. Vážné ztráty vyvolané neočekávanými událostmi v souvislosti s ražbou uvedly do pohybu řadu iniciativ. Díky nim byla navržena řada doporučení a metodologií za účelem zvládnutí rizika při výstavbě tunelů, viz např. [9], [10]. Lze využít i systémů rizikového managementu navržených v [11], [12], [13], byť nejsou prvotně zaměřeny na výstavbu tunelů.

Snaha poučit se z předchozích chyb vedla k rozvoji četných databází nehod spojených s výstavbou tunelů. Nejčastěji jsou zdokumentovány závaly s doplňujícími informacemi, kde k nehodě došlo. O neméně důležitých případech, jako je zaplavení tunelu, nestability portálu, nadměrné deformace tunelové trouby či nadloží, tyto databáze neposkytují zdaleka tak zevrubné a četné informace.

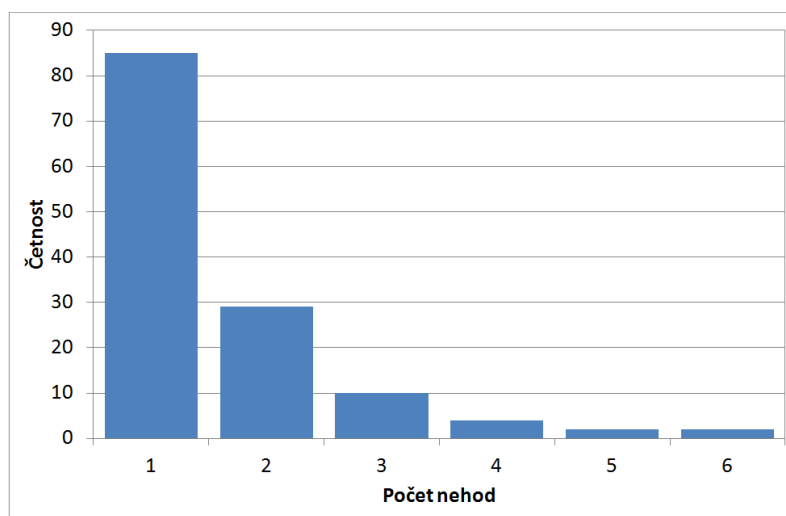
Britská studie [14] poskytuje databázi více než sta selhání; jedná se o rozšíření dat z předchozí publikace [15]. Studie analyzuje nejčastější případy a důsledky selhání tunelů ražených v městských oblastech v zeminách a horninách horší kvality. Studii příčin a mechanismů selhání, vycházející z více než 110 případů, poskytuje práce [16]. V současnosti zřejmě nejrozsáhlejší databázi podloženou zhruba 200 případy selhání je disertace [17]. Četnosti prodloužení doby výstavby, podložené touto databází, jsou uvedeny na Obr. 7. Na Obr. 8 jsou zachyceny četnosti počtu nehod vztažené na jeden tunel (bezproblémové tunely nejsou databází zachyceny a nejsou tudíž zahrnuty ani v Obr. 8).



Obr. 7 Četnosti prodloužení doby výstavby v důsledku nehod (zdroj [17])

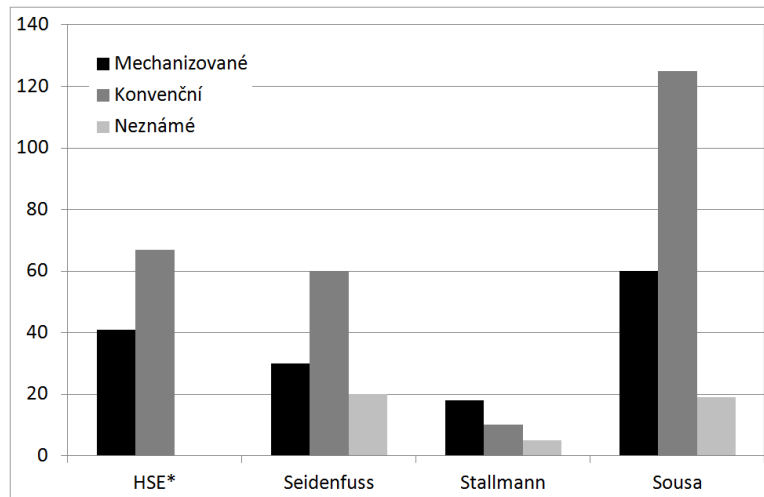
Hlavní závěry plynoucí z analyzovaných dat jsou podle pramene [17] tyto:

- . 56% nehod nastalo poblíž tunelové čelby. V případě závalu to je dokonce více než 75%.
- . Selhání a nadměrné deformace byly častější v tunelech realizovaných konvenčními metodami než aplikací mechanizované exkavace. Naopak při použití tohoto postupu docházelo častěji k zaplavení tunelu.
- . 45% nadměrných deformací se objevilo v řádu hodin až měsíců (zhruba 1 rok) po té, co tunelová čelba prošla rizikovou oblastí (přesné číselné údaje nebyly uvedeny v 30% záznamů).



Obr. 8 Četnost nehod vztažených na jeden projekt (zdroj [17])

Obr. 9 shrnuje počty nehod zaznamenaných v dílčích databázích v závislosti na technologii exkavace. Uvedené grafy je však třeba interpretovat obezřetně. Jde o to, že soubory nehod nejsou kompletní, jelikož méně významné nehody s méně vážnými důsledky byly nepochybně opomenuty. Krom toho při objektivním odhadu rizikové úrovně jednotlivých metod by bylo třeba vzít v úvahu podíl těchto metod na celkové délce dokončených tunelů.



Obr. 9 Počty nehod sestavené ze speciálních databází a uspořádané do oddílů podle použité technologie (jako mechanizované jsou zahrnuty všechny případy s označením „non NATM (NRTM) bez dalšího podrobného popisu)

Ve zmíněných databázích není zaznamenáno žádné selhání tunelů realizovaných v České republice. Důvodem může být jazyková bariéra, ale i fakt, že český stavební trh je do jisté míry uzavřený s minimálním počtem zahraničních subjektů zapojených do výstavby tunelů.

Pravděpodobnostní modely pro predikci počtu selhání při ražbě tunelů

Za obvyklého předpokladu, že vzdálenosti mezi lokálními selháními (vyvolanými např. závaly) sledovaných částí tunelu lze popsat exponenciálním rozdělením, náhodný počet poruch, N_F , v konkrétním čase t , popř. vzdálenosti od portálu x , je popsán Poissonovým rozdělením. Pravděpodobnost, že na délce x dojde ke k selháním je vyjádřena takto:

$$P(N_F = k) = \frac{(\lambda x)^k}{k!} \exp(-\lambda x), \quad (1)$$

kde intenzita poruch Poissonova procesu $\lambda = 1/L_{mean}$ a L_{mean} je průměrná vzdálenost mezi poruchami

Pravděpodobnost, že na úseku x dojde nanejvýš k n selháním (tj. k n nebo méně selháním), je vyjádřena vztahem

$$P(N_F = k) = \sum_{i=1}^k P(N_F = i). \quad (2)$$

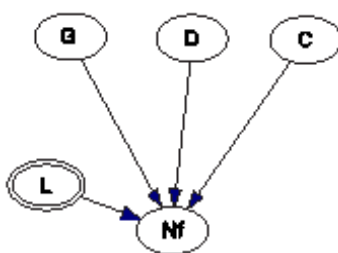
Konečně pro pravděpodobnost, že na úseku x dojde alespoň k jednomu selhání (tj. k jednomu nebo více selháním), platí:

$$P(N_F \geq 1) = 1 - \exp(-\lambda x). \quad (3)$$

Při sledování reálného procesu je situace komplikovanější a model bude zahrnovat větší počet intenzit v závislosti na mechanismech, jež vedou k selhání. Pravděpodobnost selhání bude ovlivněna geotechnickými podmínkami, jakostí návrhu a realizace tunelu. Proto musí být předem klasifikovány podmínky ražby a pro ně pak stanoveny intenzity poruch.

a) *Klasifikace podmínek pro ražbu tunel*

Nechť G představuje nepříznivé geotechnické podmínky (g. p.), D nevhodný návrh a C nevyhovující jakost realizace. Za nevhodné g. p. lze považovat nedostatečnou tloušťku únosné nadložní vrstvy, tektonické dislokace, kaverny apod. Nevhodný návrh zahrnuje např. výběr nevhodné technologie, chybné dimenze nosných konstrukcí, popř. chybný návrh opatření ke zkvalitnění okolní horniny (zeminy). Nevyhovující jakost realizace je obecně důsledkem nekvalitního managementu (selhání stavební společnosti – dodavatele, selhání inženýrských postupů a monitoringu, selhání projektantů a konsultantů ad.) a selhání v provádění (selhání strojů, materiálů, lidského činitele apod.). Model a vztahy mezi proměnnými jsou znázorněny jednoduchou bayesovskou sítí na Obr. 10. Bublina L zdůrazňuje závislost počtu poruch na délce tunelu.



Obr. 10 Rámcové schéma modelu pro predikci počtu poruch.

Pravděpodobnosti nepříznivých realizací jevů označíme $P(G)$, $P(D)$ a $P(C)$. Pro konkrétní tunel musí být stanoveny expertním odhadem. Pravděpodobnosti doplňkových jevů, tj. příznivých g. p. \bar{G} , vhodného návrhu \bar{D} a vyhovující jakosti realizace \bar{C} budou

$$P(\bar{G}) = 1 - P(G), P(\bar{D}) = 1 - P(D), P(\bar{C}) = 1 - P(C).$$

Jelikož g. p. se mění po délce tunelu, a mohou se tudíž náhodně měnit z nepříznivých na příznivé a naopak, pravděpodobnosti $P(G)$ a $P(\bar{G})$ odpovídají jejich podílu na celkové délce tunelu. V případě proměnných D a C rozdělíme tunel po jeho délce na kvazihomogenní úseky (s konstantními intenzitami poruch) a budeme přepokládat, že sledovaná jakost je buď zajištěna, nebo nikoliv. Na každém úseku tak mohou nastat čtyři možné úrovně jakosti vztahované ke kombinacím proměnných, reprezentujících návrh a realizaci tunelu:

$$Q_1 = \bar{D} \cap \bar{C}, Q_2 = \bar{D} \cap C, Q_3 = D \cap \bar{C}, Q_4 = D \cap C.$$

b) *Přiřazení intenzit poruch úrovní jakosti*

Čtyři definované stavy Q_1 až Q_4 se mohou vyskytovat v kombinaci s příznivými a nepříznivými g. p. Vzniká tak osm stavů a každému z nich je třeba přiřadit expertně odhadnutou intenzitu poruch:

Nepříznivé g. p.

$$\lambda_1 \dots G \cap Q_1, \lambda_2 \dots G \cap Q_2, \lambda_3 \dots G \cap Q_3, \lambda_4 \dots G \cap Q_4$$

Příznivé g. p.

$$\lambda_5 \dots \bar{G} \cap Q_1, \lambda_6 \dots \bar{G} \cap Q_2, \lambda_7 \dots \bar{G} \cap Q_3, \lambda_8 \dots \bar{G} \cap Q_4.$$

Pro určitost uvedme, že například intenzita λ_8 přísluší kombinaci příznivých g. p. \bar{G} s nevhodným návrhem D a nevyhovující jakostí realizace C (dílní kombinace Q_4).

c) *Odhad pravděpodobnosti počtu poruch s uvážením úrovní jakosti Q_1 až Q_4*

Na základě podrobných informací z odst. b) lze rámcové schéma z Obr. 10 pro výpočet pravděpodobnosti počtu poruch dále rozvinout. Jak je patrné z Obr. 11., průměrný počet poruch je součtem průměrného počtu poruch, které se vyskytují na úseku L_G s nepříznivými g. p., a průměrného počtu poruch na úseku L_notG s příznivými g. p. Očekávané délky úseků tunelu za příznivých, resp. nepříznivých g. p. plynou ze vzorců $L_G = L \times P(G)$ resp. $L_notG = L \times P(\bar{G})$.

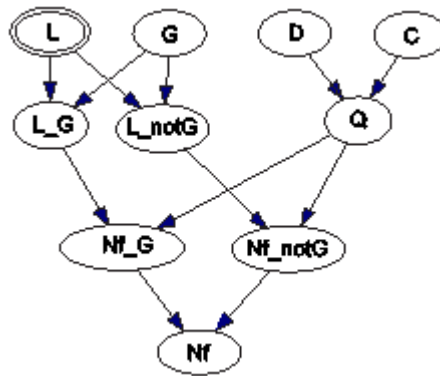
Pravděpodobnost počtu poruch se vypočte v souladu s Obr. 11 takto:

$$\sum_{i=1}^{i=4} P(Q_i) \frac{P(N_F = k|L) = [\lambda_i LP(G) + \lambda_{i+4} LP(\bar{G})]^k}{k!} \exp(-\lambda_i LP(G) - \lambda_{i+4} LP(\bar{G})). \quad (4)$$

Tento vztah je kombinací a zobecněním vztahů (1) a (2).

Průměrný počet selhání se vypočte jako

$$\bar{N}_F = \sum_{k=1}^{\infty} k \times P(N_F = k|L) \quad (5)$$



Obr. 11 Podrobné schéma modelu s konkrétními úrovněmi jakosti

Aby bylo možno porovnávat úrovně rizika tunelů různé délky, je užitečné definovat střední rychlost výskytů poruch⁵

$$R_F = \frac{\bar{N}_F}{L}. \quad (6)$$

d) *Metodický postup pro stanovení pravděpodobnosti počtu selhání*

Chceme-li odhadovat pravděpodobnost počtu selhání, měli bychom vycházet z dostupných informací. Ukážeme, jak lze využít dat o poruchách (zde závalech) zjištěných na pěti tunelech ražených stejným postupem, avšak v různých g. p. (viz Tab. 1).

Tab. 1 Data získaná z podkladů o pěti tunelech

tunel/úsek tunelu	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅
délka –L (km)	2,9	0,9	0,564	1,05	1
P(G)	0,45	0,35	1	0,17	0,05
Počet závalů v nepříznivých g. p. (Nf_G)	2	0	2	0	0
Počet závalů v příznivých g. p. (Nf_notG)	0	1	0	0	0

V prvním kroku byly získány apriorní odhady pravděpodobností $P(G)$, $P(D)$ a $P(C)$, a to třemi experty v oboru tunelového inženýrství. Každý ze dvou expertů vyhodnocoval dva tunele, třetí jen jeden tunel. Z dostupných informací jsou známé délky tunelů a ví se, kolik poruch vzniklo v nepříznivých a kolik v příznivých geotechnických podmínkách. Za účelem odhadu modelových parametrů $\Lambda_G = \{\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4\}$ a $\Lambda_{\bar{G}} = \{\lambda_5, \lambda_6, \lambda_7, \lambda_8\}$ experti

⁵ Alternativou je střední vzdálenost výskytů poruch.

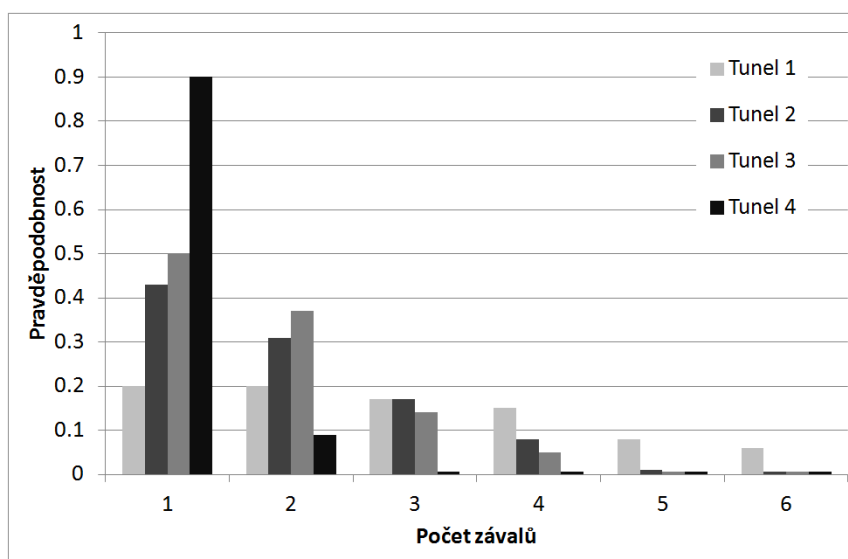
odhadovali pravděpodobnost alespoň jedné škody v tunelu o referenční délce $L_{ref} = 1\text{km}$ za určitých podmínek. Podkladem pro odhad intenzit poruch pak byl inverzní vztah k (3), z něhož pro případ nepříznivých geotechnických podmínek vychází

$$\lambda_i = -\ln [1 - P(N_F \geq 1 | G, Q_i, L_{ref} = 1\text{km})], \text{ pro } i = 1 - 4. \quad (7)$$

Pro případ příznivých geotechnických podmínek dostaneme analogicky

$$\lambda_i = -\ln [1 - P(N_F \geq 1 | \bar{G}, Q_{i-4}, L_{ref} = 1\text{km})], \text{ pro } i = 5 - 8. \quad (8)$$

Na Obr. 12 jsou ukázány pravděpodobnosti počtu závalů pro první 4 sledované tunely. Údaje o $P(Q_i)$ uvádí následně Tab. 2.



Obr. 12 Odhad pravděpodobnosti počtu selhání v jednotlivých tunelech (nepříznivé g. p.)

Z Obr. 12 je vidět, že tunel 1 je nejrizikovější, zatímco tunel 4 vykazuje více než devadesátiprocentní pravděpodobnost, že se neobjeví žádná závažná porucha.

e) Kalibrace modelu na základě Bayesovy statistické metody

Pravděpodobnosti příznivých a nepříznivých geotechnických podmínek jsou poměrně dobře měřitelné, neboť pramení z náhodné povahy jevu. Jsou dány přírodními podmínkami a nelze je jakýmkoliv způsobem redukovat. Naopak epistemické nejistoty obsažené v modelových parametrech redukovat lze, a lze tak dosáhnout zkvalitnění modelu. Jsou totiž silně podmíněny znalostmi a úsudkem experta, a proto jsou označovány za nejistoty typu „state-of-knowledge“. Tento typ nejistot se efektivně redukuje pomocí Bayesovy statistické metody. Obdobně tomu je s nejistotami souvisejícími s výběrem modelu $M = \{M_1, M_2, \dots, M_5\}$, respektive s jeho složkami $M_k = \{P(Q_1), P(Q_2), P(Q_3), P(Q_4)\}$. Jejich apriorní odhady jsou silně ovlivněny osobností experta (viz Tab. 2). M. Valjentová upozorňuje

ve své disertační práci „Vlastnosti expertů v expertních analýzách“, ČVUT FSV v Praze (1. XII. 2010) na obtíže s odhadováním pravděpodobností.⁶

Bayesovskou aktualizací lze získat objektivní a kvalitnější odhady modelových parametrů. Je na ně kladen důraz i proto, že tyto parametry vystupují ve všech modelech, které jsou podkladem rizikové analýzy obecně a tunelových staveb jmenovitě.

Aniž bychom zabíhali do podrobností, uvedeme jen výsledný vzorec pro bayesovskou aktualizaci rozdělení intenzit $\lambda_1 - \lambda_4$ pro případ nepříznivých g. p. a modelové proměnné M . V případě příznivých g. p. je postup obdobný. Pro sdružené aposteriorní rozdělení těchto parametrů, včetně aposteriorního rozdělení modelové proměnné M , platí:

$$P(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, M | \text{obs}) \propto P(\lambda_1)P(\lambda_2)P(\lambda_3)P(\lambda_4)P(M) \prod_{j=1}^5 P(N_F = \text{obs}_j | \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, M, G, L_G), \quad (9)$$

kde j je číslo tunelu použitého ke kalibraci. Symbol \propto vyjadřuje úměrnost mezi oběma stranami vztahu (9).

Pravděpodobnost pozorovaného počtu selhání při daných parametrech (viz produkt ve vztahu (9)) je tzv. funkce věrohodnosti, která je jakousi vazbou mezi pravděpodobnostním modelem a skutečností. Pro každý tunel j platí

$$P(N_F = \text{obs}_j | \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, M, G, L_{G,j}) = \sum_{i=1}^4 P(N_F = \text{obs}_j | \lambda_i, G, L_{G,j}) P(Q_i | M). \quad (10)$$

Marginální funkce věrohodnosti nabývá tvaru (srov. (4))

$$P(N_F = \text{obs}_j | \lambda_i, G, L_{G,j}) = \frac{[\lambda_i L_j P(G)]^{\text{obs}_j}}{\text{obs}_j!} \exp(-\lambda_i L_j P(G)). \quad (11)$$

Tab. 2 Expertní odhady pravděpodobností úrovní jakosti Q1 – Q5

⁶ Obdobný postup lze použít i k pravděpodobnostnímu hodnocení vlivu lidského činitele na průběh výstavby tunelu (tento faktor zahrnuje i chyby v organizaci práce apod.). Zavede se lidský faktor H jako diskrétní náhodná proměnná o třech možných stavech, - příznivý, neutrální a nepříznivý. Pravděpodobnost ve vztahu (4) je pak považována za podmíněnou tímto lidským činitelem. Po znásobení (4) pravděpodobností stavu lidského činitele, p_H , a sečtení přes všechny možné stavy obdržíme nepodmíněnou pravděpodobnost selhání, ovšem nyní již beroucí v potaz vliv lidského činitele. Není-li předem k dispozici dost informací o této proměnné, pro lidský faktor se zvolí rovnoměrné diskrétní rozdělení. S postupem výstavby pak lze epistemické nejistoty v odhadu p_H redukovat bayesovskou aktualizací. Další podrobnosti jsou uvedeny v [24].

Model	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5
Tunel	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5
Expert	A	A	B	B	C
$P(Q_1)$	0.3584	0.4488	0.8272	0.8624	0.8372
$P(Q_2)$	0.2816	0.2312	0.1128	0.1176	0.0828
$P(Q_3)$	0.2016	0.2112	0.0528	0.0176	0.0728
$P(Q_4)$	0.1584	0.1088	0.0072	0.0024	0.0072

Metodiku aktualizace modelových parametrů λ_i a M , jejímž smyslem je redukce epistemických nejistot, budeme ilustrovat příkladem. Případy příznivých a nepříznivých g. p. se řeší samostatně.

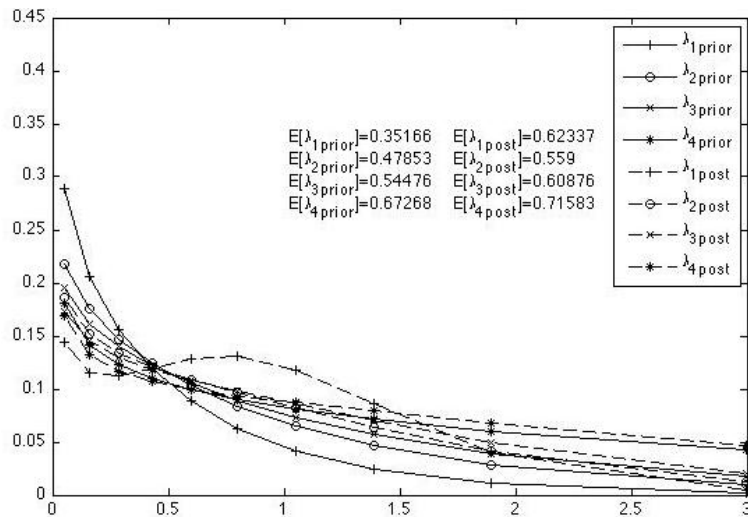
Pro intenzity poruch bylo jako apriorní zvoleno rozdělení Gamma⁷, diskretizované do náhodných vektorů, každý o deseti složkách. Modelová proměnná M je vektorem o pěti složkách s rovnoměrným apriorním rozdělením ($p_i = 0.2, i = 1 - 5$). Ze vztahu (9) napřed získáme sdružené rozdělení aktualizovaných proměnných a následně marginální hustoty rozdělení jednotlivých parametrů $\lambda_i, i = 1 - 4$, a M (s ohledem na použitou diskretizaci proběhnou postupně sumace přes všechny zbývající dimenze v matici sdruženého rozdělení).

Výsledná aposteriorní rozdělení jsou vykreslena na Obr. 13 až 15. Na Obr. 13 jsou uvedeny jak expertně odhadnuté, tak upřesněné (aposteriorní) střední hodnoty intenzit poruch pro případ nepříznivých g. p. a na Obr. 15 obdobné výsledky pro zbývající intenzity, příslušející příznivým g. p. Při porovnání obou obrázků je patrný logický pokles středních hodnot směrem k příznivým g. p. Za zmínku rovněž stojí poměrně výrazný rozdíl mezi apriorním a aposteriorním odhadem intenzity λ_1 (nepříznivé g. p., vhodný návrh a vyhovující jakost realizace). Aposteriorní odhady při volbě Beta apriorního rozdělení pro intenzity poruch se od předchozích výsledků zásadně neliší, a proto je ani neuvádíme. Pro modelovou proměnnou M byl použit dvouúrovňový postup. Aposteriorní rozdělení z případu s nepříznivými g. p. bylo pro aktualizaci parametrů s příznivými g. p. přijato jako apriorní a znovu aktualizováno. Výsledek je na Obr. 15.

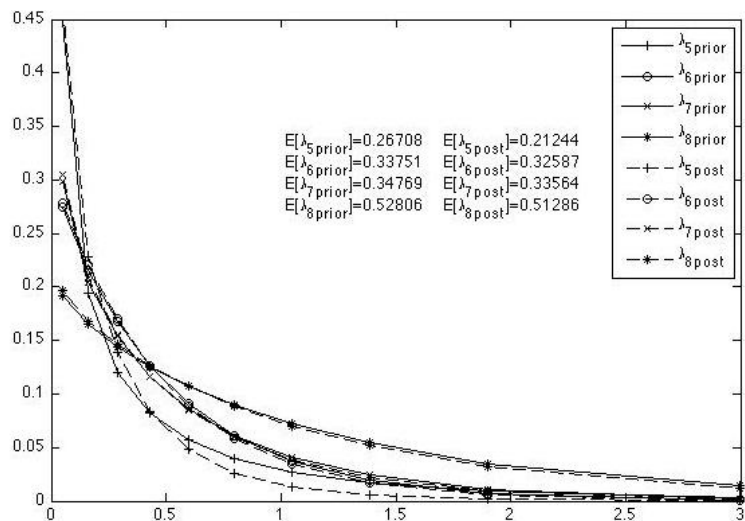
Postup aktualizace parametrů lze modifikovat různými způsoby. Místo hledání optimálního modelu M lze např. aktualizovat pravděpodobnosti nevhodného návrhu $P(D)$ a neuspokojivé jakosti realizace $P(C)$. Tím se získají další cenné informace jak pro projektanty, tak pro realizátory díla⁸.

⁷ Gamma rozdělení je sdružené s Poissonovým rozdělením. To znamená, že aposteriorní rozdělení je opět typu Gamma. Jelikož Poissonovo rozdělení je aproximací binomického rozdělení, s nímž je sdružené rozdělení Beta, je možné i toto rozdělení použít při diskretizaci jako možnou variantu pro apriorní odhad. V daném případě se však nevyhneme numerickému postupu, neboť apriorní rozdělení zahrnuje též rovnoměrné rozdělení proměnné M .

⁸ V posledním desetiletí byl zaznamenán velký pokrok v oblasti bayesovské aktualizace modelových parametrů. Díky metodě MCMC (Markovovův řetězec ve spojení s metodou Monte Carlo) je možné simulování přímo z podmíněných rozdělení aleatorních modelových parametrů a uplatnění víceúrovňového hierarchického

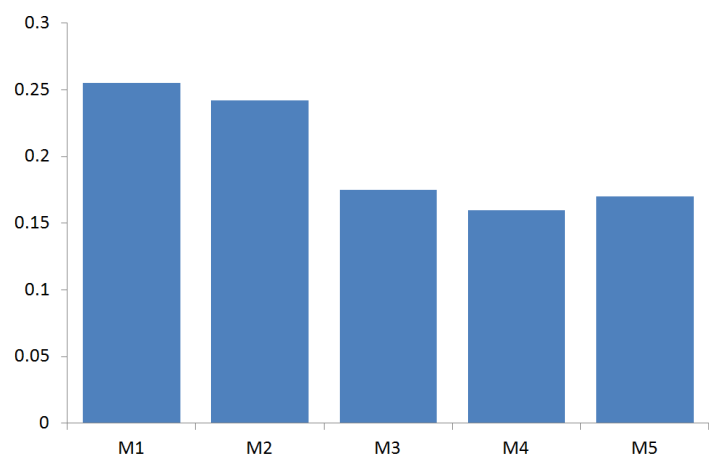


Obr. 13 Aktualizace parametrů $\lambda_1 - \lambda_4$, s porovnáním apriorního a aposteriorního odhadu středních hodnot (nepříznivé g. p.)



Obr. 14 Aktualizace parametrů $\lambda_5 - \lambda_8$, s porovnáním apriorního a aposteriorního odhadu středních hodnot (příznivé g. p.)

Bayesova přístupu k problémům, jejich řešení by ještě nedávno bylo nedosažitelné. Významným pomocníkem je SW produkt Open BUGS, který nejen že umožňuje provést všechny potřebné výpočty, ale vede k výsledkům v rozumném časovém rozpětí [18]. Umožňuje též zvážit choulostivé zvláštnosti ovlivňující zpracování dat z různých zdrojů (např. z různých, ne vždy zcela souměřitelných tunelů).



Obr. 15 Aktualizace optimálního modelu jakosti (dvouúrovňová aktualizace).

3. Speciální problémy tunelové ražby související s vlastnostmi nadloží

Nebezpečí vzniku mimořádné události typu zával souvisí s nedostatečnou tloušťkou kompaktní horniny v nadloží tunelu. Z tohoto pohledu jsou významné dva případy:

a) *Do požadované kompaktní vrstvy tloušťky $h - a$ zasahuje rozpukaná hornina*

Základní informaci o míře rizika poskytuje pravděpodobnost, že puklina naruší kompaktnost bezprostředního nadloží tunelu (Obr. 16). Nechť N_f je počet puklin narušujících bariéru ke kompaktní vrstvě, jejíž poloha je dána tloušťkou vrstvy $h - a$, s pravděpodobností $p_f = P[V > a]$. Jestliže se pukliny ve sledovaném úseku vyskytují s intenzitou λ , potom pravděpodobnost počtu překročení bariéry bude za předpokladu, že $p_f = \text{const.}$,

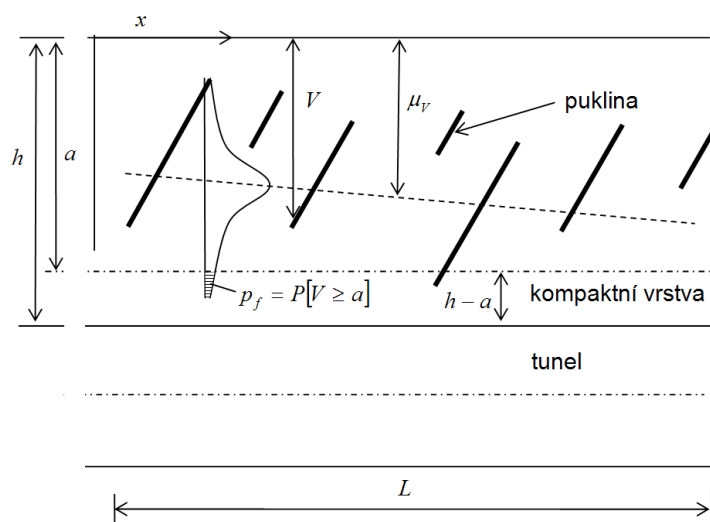
$$P[N_f = j] = \frac{(\lambda L p_f)^j e^{-\lambda L p_f}}{j!}. \quad (12)$$

Pokud střední hodnota polohy spodního konce pukliny V nebude konstantní, tj. $p_f = p_f(x)$, vzorec (12) je třeba upravit takto:

$$P[N_f = j] = \frac{(\Lambda_f)^j e^{-\Lambda_f}}{j!}, \quad (13)$$

kde kumulativní intenzita je průměrnou hodnotou intenzity nehomogenního Poissonova procesu:

$$\Lambda_f = \int_0^L \lambda(x) p_f(x) dx. \quad (14)$$



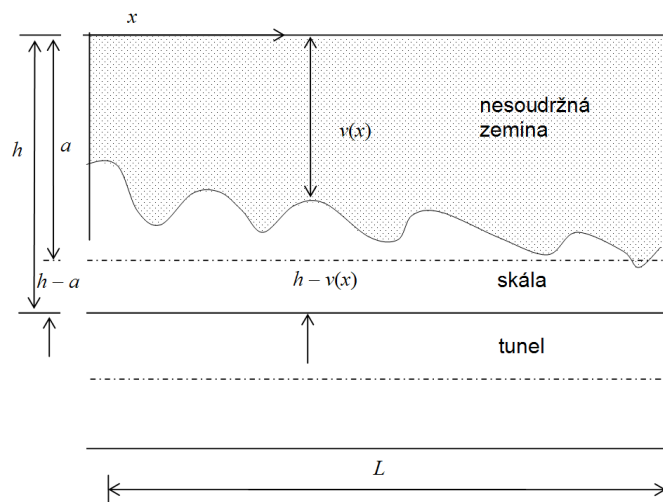
Obr. 16 Překročení bariéry puklinou

Konečně pravděpodobnost, že alespoň jedna puklina pronikne do kompaktní vrstvy, bude

$$P[N_f > 1] = \sum_{j=1}^{\infty} \frac{(\Lambda_f)^j e^{-\Lambda_f}}{j!} = 1 - e^{-\Lambda_f}. \quad (15)$$

b) Do požadované kompaktní vrstvy tloušťky $h - a$ náhodně zasahuje neúnosný materiál

Uvažujme situaci, kdy na kompaktní nadloží požadované tloušťky $h - a$ navazuje neúnosný materiál oddělený náhodně tvarovanou hranicí, která se ve směru tunelu snižuje (viz Obr. 17). Spolehlivá exkavace vyžaduje, aby tloušťka únosného nadloží neklesla pod požadovanou mez $h - a$. Z množství teoretických modelů pro predikci počtu překročení stanovené meze (bariéry) a s ohledem na matematickou zvládnutelnost řešení vybíráme nejužívanější model stacionárního normálního procesu $V = V(x)$ s proměnnou střední hodnotou $\mu_V(x)$ a konstantní směrodatnou odchylkou σ_V ; tj. střední hodnota fluktuační $E[V(x) - \mu_V(x)] = 0$.



Obr. 17 Snižující se tloušťka únosného nadloží

Rychlost překročení hranice a je vyjádřena Riceovou formulí (viz např. [20])

$$v_a^+ = \int_0^\infty \dot{v} f_{V\dot{V}}(a, \dot{v}) d\dot{v}, \quad (16)$$

kde $f_{V\dot{V}}(v, \dot{v})$ je hustota sdruženého rozdělení náhodné polohy V a její derivace podle x , označené tečkou. Za uvedených předpokladů je rychlost překročení přípustné meze (bariéry) procesem V vyjádřena vztahem (viz [20])

$$v_a^+(x) = \frac{1}{2\pi} \frac{\sigma_{\dot{V}}}{\sigma_V} \exp\left[-\frac{(a - \mu_V(x))^2}{2\sigma_V^2}\right]. \quad (17)$$

Směrodatné odchylky polohy, σ_V , a její rychlosti, $\sigma_{\dot{V}}$, lze spočítat pomocí výkonové spektrální hustoty procesu V . Zde se spokojíme s předpokladem úzkopásmového procesu s jednou dominantní frekvencí, pro niž je $\frac{\sigma_{\dot{V}}}{\sigma_V} \cong \omega_0$.

Veličinu v_a^+ by bylo možno interpretovat jako intenzitu Poissonova procesu a odhadnout pravděpodobnost prvního překročení ze vztahu

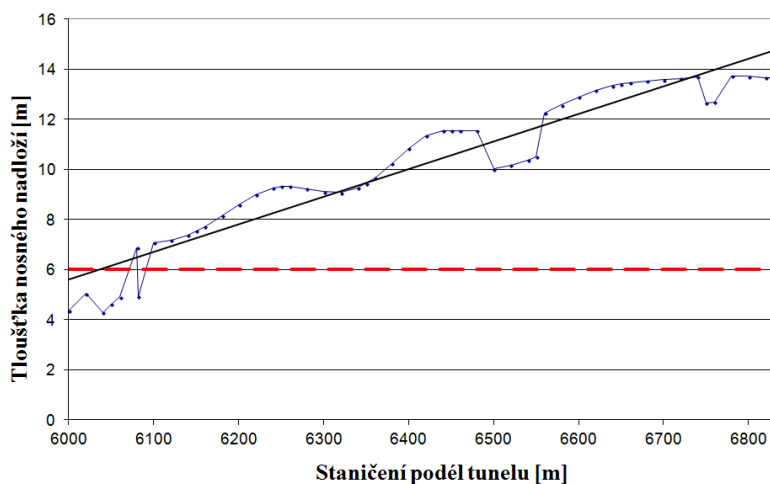
$$P[N_f > 1] = 1 - \exp[-\tilde{v}_a^+ L], \quad (18)$$

v němž $\tilde{v}_a^+ = \frac{1}{L} \int_0^L v_a^+(x) dx$.

Počet selhání na sledované délce tunelu, který je třeba znát např. při aplikaci metody *FTA*, vyplývá ze vzorce

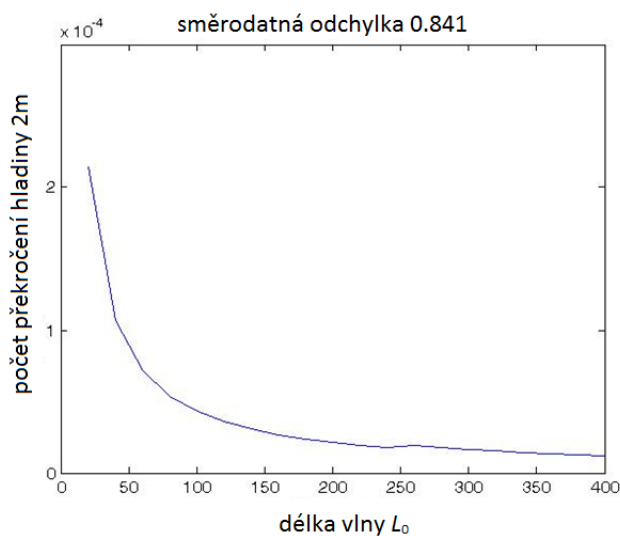
$$N_f(v_a^+(x), L) = \int_0^L v_a^+(x) dx. \quad (19)$$

Při řešení tohoto problému lze využít výsledků měření *in situ*. Průběh hranice detekované mezi únosným a neúnosným nadložím je patrný z Obr. 18 (měření pro tunel Blanka v Praze). Přímka, znázorňující průběh střední hodnoty Gaussova procesu, byla získána lineární regresí. Standardní odchylka spočtená numericky za předpokladu ergodicity procesu (tj. průměrováním čtverců rozdílů mezi procesem a odhadnutou střední funkcí po délce hranice a následným odmocněním) $\sigma = 0,841\text{m}$. Tloušťka kompaktní nosné vrstvy $h - a = 6\text{m}$.



Obr. 18 Náhodná sestupující hranice mezi horninovým nadložím a neúnosnou zeminou, která byla získána měřením in situ v rámci výstavby tunelu Blanka

Z Obr. 18 nelze jednoznačně určit vlnovou délku L_0 odpovídající frekvenci ω_0 . V takovém případě lze doporučit sledování průběhu počtu překročení hranice (počtu selhání) v závislosti na proměnné L_0 . Výsledek analýzy je zřejmý z Obr. 19.



Obr. 19 Počet selhání v závislosti na délce charakteristické vlny L_0 .

4. Dopady interakce tunelové ražby se stavbami na povrchu

4.1 Základní modely pro popis odezvy okolí na ražbu tunel

Základem spolehlivé předpovědi dopadu tunelové ražby je vhodný model využívající zákonů mechaniky, zkušeností expertů a počítačové simulace. Nabízejí se dva krajní případy:

- Metoda opěrných napětí (convergence confinement method), která využívá 2D analýz MKP k popisu příčného chování tunelu a jeho okolí. K vystižení podélných silových účinků v obklopující hornině se využívá expertních zkušeností. Ty umožňují

odhadnout část zatížení, které je přenášeno klenbovým účinkem horniny, a zbytek zatížení, které zbývá na tunelové ostění. Metoda je jednoduchá a prakticky hojně využívaná.

- 3D modelování MKP je velice podrobné, může vystihnout i anomálie v okolí tunelové čelby a je dobře podchycené různými SW balíky (např. PLAXIS). Nelze však přehlednou jak časovou náročnost, tak i náročnější vyhodnocení a interpretaci rozsáhlého souboru výsledků. Nezbytné jsou i hlubší zkušenosti s počítačovým modelováním.
- 2D/3D model je kompromisem mezi oběma přístupy. Pro příčný směr využívá 2D diskretizace MKP, v podélném směru zavádí polo-nekonečné exponenciální bázové funkce, které jsou aproximací výsledků konvergenčních měření in situ, zejména extenzometrických. Model lze označit za trojrozměrný, neboť pracuje s trojrozměrným popisem energie deformace⁹.

Zde se zaměříme na 2D/3D model, neboť umožňuje (i) přímo modelovat s přiměřenými časovými nároky interakci tunelové ražby se stavbami na povrchu a (ii) připouští jednoduché a efektivní zjednodušení redukující model na systém jen s několika stupni volnosti (neznámými veličinami). Při modelování interakce se pro vrchní stavbu doporučuje prostorový systém vytvořený z jednoduchých 1D prvků (pilíře, průvlaky/napraží), které jsou propojeny poddajnými spoji. Jejich přetváření vystihuje model mechaniky izotropního poškození. Prvky umožňují vytvářet i prostorové stěnové systémy, jako jsou zděné budovy či monolitické nebo panelové domy, ale i mosty. Podrobnosti o modelu lze najít v publikacích [25], [26].

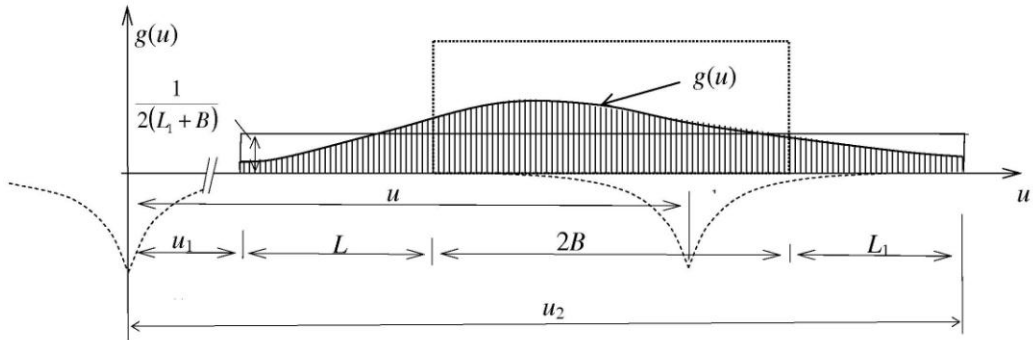
4.2 Pravděpodobnost selhání staveb na povrchu

Výstavba tunelu může ohrozit stavby na povrchu dvojitým způsobem – vznikem poklesové kotliny nebo závalem. Nepříznivým důsledkem jsou nadměrné posuny, naklonění, trhliny, dílčí sesuvy apod.

- **Poklesová kotlina na povrchu** se může projevit celkovým poklesem stavby nebo jejím nakloněním s dopadem na infrastrukturu, ale zejména nerovnoměrným sedáním stavby, jehož důsledkem jsou její poruchy. V tomto specifickém případě je třeba vzít v úvahu interakci tunelu a stavby, ať už se jedná o budovu, věž či silnici nebo železnici, kdy poklesy ovlivní nebo zcela znemožní provoz. Model popsany v předchozím odstavci umožňuje sledovat nejen vzájemné působení tunelu a nadzemních konstrukcí, ale poskytuje i obraz o poškození nadzemní stavby. Při aplikaci redukovaného 2D/3D modelu lze vzít v úvahu i nejistoty spojené s materiálovými parametry obecně nepružného podloží (modul pružnosti, Poissonovo číslo, soudržnost a úhel vnitřního tření). Redukovaný model je do té míry úsporný, že

⁹ Parametry modelu odhadnuté z databází, lze v průběhu ražby konkrétního tunelu aktualizovat s využitím dat, např. měřených poklesů na povrchu. Využívá se opět Bayesova statistická metoda (podrobnosti viz [20]).

Její možný tvar je na Obr. 21.



Obr. 21. Expertní identifikace závalu

Druhým faktorem jsou poruchy jednotlivých segmentů stavby na povrchu. Pravděpodobnost poruchy závisí nejen na vlastnostech konstrukce samotné (geometrické uspořádání, materiálové vlastnosti apod.), ale i na poloze závalu vzhledem ke sledovanému segmentu. Je označena v souladu s Obr. 20 jako x .

S ohledem na polohu závalu je třeba rozlišovat dva scénáře:

- Zával je dostatečně daleko od segmentu. Pravděpodobnost poruchy stavby na povrchu za podmínky, že poloha závalu je u , lze odhadnout postupem navrženým pro poklesovou kotlinu jako $p_f(x|u) \leq 1$.
- Bude-li zával pod sledovaným segmentem nebo v jeho blízkosti, tj. ($|x| < L_0$), podmíněnou pravděpodobnost lze jednoduše odhadnout jako $p_f(x|u) \approx 1$.

S uvážením vztahů (20) nebo (21) vylpne nepodmíněná pravděpodobnost selhání segmentu $\xi = u - x$

$$p_f(\xi) = \int_{u_1}^{u_2} p_f(\xi|u) f_U(u) du + 2L_0 f_U(\xi). \quad (23)$$

Celkové riziko závisí na počtu poruch zaznamenaných v jednotlivých segmentech. Porucha je chápána tradičním způsobem jako překročení odolnosti segmentu účinkem zatížení (v důsledku poklesu). I když jsou poruchy vzájemně propojeny, k odhadu rozsahu celkové škody lze přibližně aplikovat Poissonův model i na vrchní stavbu. Intenzita poruch stavby λ^* je funkcí dvou proměnných, polohy závalu u a pozice segmentu ξ . Platí $p_f(\xi|u) = \lambda^*(\xi|u)\Delta\xi$.

Průměrný počet poruch ve stavbě na povrchu je

$$\Lambda^*(u) = \int_0^{2B} \lambda^*(\xi|u) d\xi, \quad (24)$$

a to za podmínky, že zával je lokalizován v místě u . Nakonec odhadneme nepodmíněnou pravděpodobnost počtu poruch ve stavbě na povrchu:

$$P(N = n) = \int_{u_1}^{u_2} \frac{[\Lambda^*(u)]^n e^{-\Lambda^*(u)}}{n!} f_U(u) du. \quad (25)$$

Vytvořili jsme spojitý model stavby, který je aproximací skutečné konstrukce a v inženýrské praxi bývá označován jako rozetřený. Pro tento model můžeme expertně stanovit funkci $D(\xi)$, kterou oceníme finančně očekávanou škodu vztaženou na jednotku délky stavby.

Pomocí ní nejprve odhadneme střední hodnotu podmíněného rizika při fixované poloze závalu

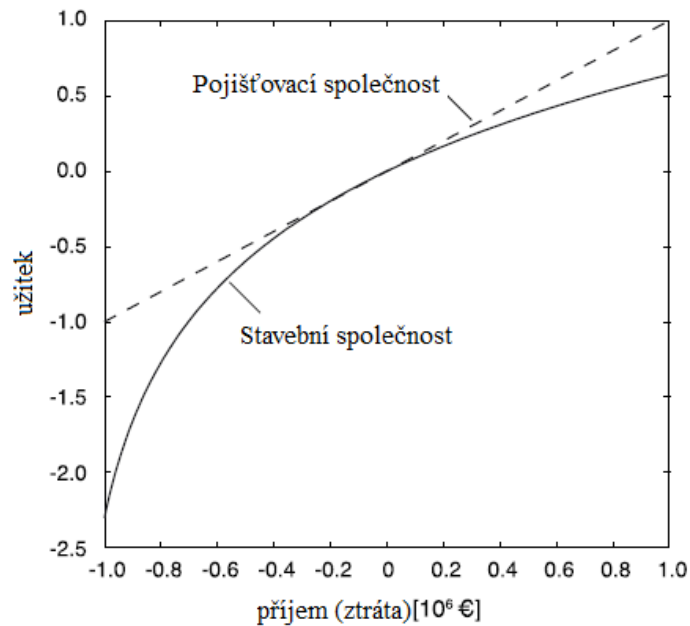
$$E[RISK(u)] = \int_0^{2B} D(\xi) \lambda^*(\xi|u) d\xi. \quad (26)$$

Nakonec dojdeme k odhadu střední hodnoty celkového rizika spojeného se stavbou na povrchu:

$$E[RISK] = \int_{u_1}^{u_2} E[RISK(u)] f_U(u) du. \quad (27)$$

5. Uplatnění teorie užitku při rozhodování

Metody popsané v předchozích článcích slouží k odhadu pravděpodobnosti a kvantifikaci možné škody. Škodu D lze ocenit buď přímo v peněžních jednotkách, nebo nepřímo, prostřednictvím prodloužení doby výstavby. Ztráty na lidských životech lze popř. převést na měnové jednotky a naopak (Švýcarsko). V rámci rizikového managementu jde o to, jak poznatky získané v rámci rizikové analýzy uplatnit při rozhodování o nezbytných opatřeních. Vhodným vodítkem je funkce užitku, která umožňuje kvantifikovat postoje osoby s rozhodovacími pravomocemi k nejistým parametrům, např. vnímání velkých ztrát nebo nejistých zisků. Navíc funkce užitku dovoluje začlenit různá kritéria (atributy) do analýzy rozhodování, např. cenu, čas, environmentální dopady, zdraví lidí a ztráty na životech apod. Ty mohou být vyjádřeny jako bezrozměrné užitky, jež vyjadřují relativní význam každého kritéria. Podle této koncepce preference s maximálním užitekem je považována za optimální [19]. Koncepce je ilustrována ve vztahu k zisku/ztrátě z pohledu stavební společnosti a pojistitele, viz [24], kde je uveden i odkaz na zdroj (Straub, Lecture notes in Engineering Risk Analysis, 2011).



Obr. 22. Funkce užitku stavební firmy a velkého pojistitele

Pro stavební společnost, která je výrazně menší než pojistitel, je ztráta v řádu 10^6 € likvidační¹⁰. Tomu odpovídá prudký pokles funkce užitku na záporné ose (příjem/ztráta). Naopak s kapacitou podnikatele či pojišťovny se výhody plynoucí z dodatečných příjmů zmenšují. Funkce užitku je tudíž pro stavební společnosti konkávní. Pro velkou pojišťovací společnost je vztah příjem vs. zisk v zobrazeném rozsahu každodenní realitou, proto je její funkce užitku zhruba lineární. Stanovení funkce užitku je základní úlohou, kterou lze řešit na základě předchozích zkušeností společnosti, či užitím speciálních postupů, viz např. [24]¹¹.

Postup při aplikaci funkce užitku bude ilustrován jednoduchými příklady.

- 1) Riziko při výstavbě tunelu bude sledováno z pohledu (i) investora či provozovatele (investor nemusí být provozovatelem), (ii) dodavatele a (iii) dodavatele s averzí vůči velkým ztrátám. Riziko je modelováno jako funkce zpoždění výstavby. Zpoždění v důsledku selhání při výstavbě je chápáno jako nárůst deterministického odhadu doby bezproblémové výstavby trávající 200 dní. Tento odhad byl akceptován dodavatelem a odsouhlasen ve smlouvě. Veškeré číselné údaje zde uvedené slouží pouze pro ilustraci postupu řešení.

(i) Riziko z pohledu investora R_1

Většina finančních ztrát vlivem selhání při výstavbě (rekonstrukce tunelu a nadloží, škody vůči třetím stranám, kompenzace obyvatelům) je přenesena na dodavatele. Navzdory tomu zpoždění v zahájení provozu přináší investorovi dodatečné měsíční náklady $C_1 = 100\,000$ €.

¹⁰ Vzhledem k tomu, že řada stavebních firem pracuje v rámci EU v zahraničí, jsou finanční údaje uvedeny v €. Pro přepočítání na tuzemskou měnu lze orientačně uvažovat ekvivalent $€=27-28$ Kč.

¹¹ Zahrnutí dalších atributů do koncepce užitku je předmětem tzv. MAUT (Multi-attribute utility theory).

Je-li znám odhad střední doby zpoždění výstavby v důsledku selhání $E[D_{TOT}] = 0.128$ měsíce,¹² potom

$$R_1 = E[B_1] = E[D_{TOT}] \times C_1 = 12\,800 \text{ €},$$

kde $E[B_1]$ je střední hodnota finanční ztráty B_1 .

(ii) Riziko z pohledu dodavatele R_2

Dodavatel je pojištěn vůči přímým finančním ztrátám způsobeným selháním při výstavbě. Odpočitatelná položka je $\epsilon = 10\,000 \text{ €}$ za každé selhání. Prodloužení výstavby však přináší dodatečné měsíční náklady $C_2 = 150\,000 \text{ €}$, které však nejsou pokryty pojištěním (práce, stroje, penále investorovi za zpoždění). Riziko dodavatele tak bude

$$R_2 = E[B_2] = E[D_{TOT}] \times C_2 + \sum_{k=1}^{\infty} \Pr[N_f = k] \times k \times \epsilon = 19\,440 \text{ €},$$

kde $\Pr[N_f = k]$ je pravděpodobnost výskytu k selhání a $E[B_2]$ je střední hodnota finanční ztráty dodavatele.

(iii) Riziko dodavatele zahrnující averzi vůči ztrátě

Funkce užitku může vzít v potaz skutečnost, že velké ztráty ohrožují operabilitu společnosti, její dobré jméno likviditu. Nebezpečí plynoucí ze ztráty obecně vede k vyjádření funkce užitku jako nelineárně závislé na ztrátě¹³:

$$U = -B_3^w,$$

kde B_3 je finanční ztráta dodavatele a $w = 1.1$.

Jelikož odpočitatelná položka ϵ je podstatně menší než C_2 , lze zanedbat závislost finanční ztráty na počtu selhání vyjádřit vztah jako funkci zpoždění:

$$B_3 = C_2 \times D_{TOT}.$$

Užitek je rovněž funkcí zpoždění, tj.

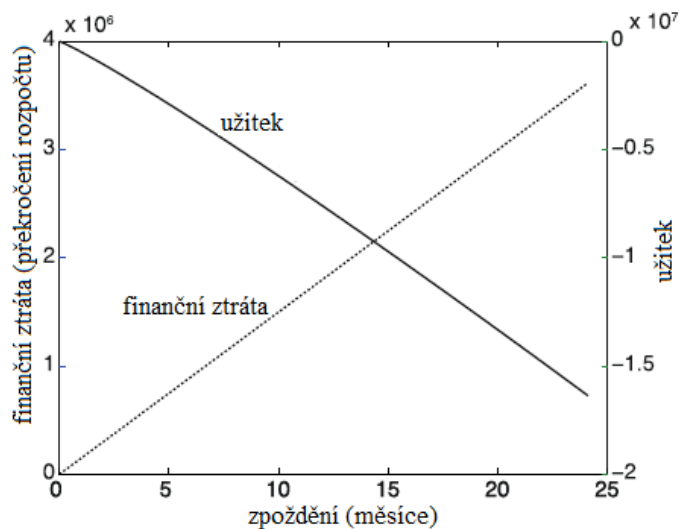
$$U = g(D_{TOT}) = -(C_2 \times D_{TOT})^w.$$

Závislost B_3 a U je na Obr. 23.

Připomeňme, že doba D_{TOT} a U jsou náhodné proměnné a C_2 a w jsou konstanty.

¹² Podrobný způsob výpočtu této hodnoty je uveden v [24]. Prvním krokem je výpočet hustoty rozdělení pravděpodobnosti zpoždění D_{TOT} , pomocí níž se ve druhém kroku vypočítá standardním způsobem střední hodnota.

¹³ Implicitně se předpokládá se, že užitek odpovídá záporné hodnotě finanční ztráty.



Obr. 23 Závislost užitku U a ztráty B_3 na zpoždění D_{TOT} .

Střední hodnota užitku se vypočte v souladu s [19]:

$$E[U]E[g(D_{TOT})] = \int_{-\infty}^{\infty} g(\xi) f_{D_{TOT}}(\xi) d\xi,$$

kde $f_{D_{TOT}}(\xi)$ je hustota rozdělení pravděpodobnosti náhodného zpoždění D_{TOT} , viz poznámka 7.

Riziko se vypočte jako záporná hodnota užitku:

$$R_3 = -E[U] = 81\,590 \text{ €}.$$

- 2) Necht' **B** je alternativní technologií pro výstavbu tunelu, která je levnější, avšak s dvojnásobnou intenzitou selhání než původní technologie **A**. Úspora při volbě technologie **B** je 100 000 €. Bude-li přijata alternativní technologie, cena projektu se sníží o 40 000 €. Investor ušetří za těchto podmínek $S_V = 40\,000$ € a dodavatel $S_C = 60\,000$ €.

Užití teorie užitku vede k informacím o obou technologiích zachycených v Tab. 3.

Rozhodnutí o výběr technologie se může opřít o porovnání rozdílů mezi rizikem a úsporami, které jsou vyčísleny v posledním řádku tabulky.

Tab. 3 Porovnání technologií pro stavbu tunelu

Technologie výstavby	A			B		
Očekávané zpoždění	0.125			0.25		
Riziko s ohledem na	Investora	Dodavatele	Dodavatele s averzí vůči riziku	Investora	Dodavatele	Dodavatele s averzí vůči riziku
	R_1	R_2	$R_3(\text{užitek})$	R_1	R_2	$R_3(\text{užitek})$
	[t, €]	[t, €]	[–]	[t, €]	[t, €]	[–]
Riziko	12.8	19.4	81.6	25.6	38.8	163.4
Úspora oproti variantě A	0	0	0	40	60	60*
Zvýšené riziko oproti variantě A	0	0	0	12.8	19.4	81.8
Úspora – zvýšené riziko	0	0	0	27.2	40.6	-21.8

*Funkce užitku vůči potenciaálním ztrátám se uvažuje jako lineární, tj. $U = S_c$

Z uvedených výsledků je vidět, že rozhodování je diskutabilní. Je-li užitek uvažován lineárně vůči potenciaálním ztrátám, jak tomu bylo v případech R_1 a R_2 , volba **B** se jeví jako výhodnější, a to jak pro investora, tak pro dodavatele. Avšak při uvážení dodavatelovy averze vůči riziku (ztrátě), viz případ R_3 , varianta **B** je pro dodavatele příliš riziková. V tomto případě jdou zájmy investora a dodavatele proti sobě a dodavatel nejspíš technologii **B** odmítne¹⁴.

Shrnutí

Metodika předkládá systematický přístup k hodnocení rizika při stavbě tunelu jako pravděpodobné škody. Klade důraz nejen na zdroje nebezpečí a jejich dopady na proces výstavby, ale věnuje se i pravděpodobnostní stránce problému. Opírá se o základní principy teorie pravděpodobnosti, které jsou v současnosti blízké inženýrům, zabývajícím se spolehlivostí konstrukcí. V žádném případě není zamýšlena jako náhrada za expertní metody typu UMRA či FMEA. Ty se v praxi osvědčily, jsou srozumitelné a umožňují využít zkušenosti inženýrů jak při navrhování, tak realizaci výstavby tunelů. Cílem metodiky je expertní metody doplnit a vytvořit nástroje i ke zpřesnění odhadů přijímaných v expertních metodách.

Přínosem metodiky je i příspěvek k procesu rozhodování o variantních řešeních. Využívá se funkce užitku, v níž důležitou roli hraje pravděpodobná finanční ztráta, tedy riziko, která je implicitně pojmána jako záporný užitek.

Navržené modely lze uplatnit i při hodnocení škody způsobené při provozu. Typickým příkladem je požár v tunelu. I když při něm dominují ztráty na lidských životech, nelze přehlédnout při teplotách nad 1000 °C ani škody na konstrukci tunelu (např. ostění), což má

¹⁴ Je pravdou, že takový dodavatel může odejít z trhu a zakázku vezme někdo jiný. Zahrnutí rizika do nabídkové ceny je rozumné, nicméně zvýšením nabídkové ceny se snižuje konkurenceschopnost dodavatele.

přímý dopad na sanační práce a nepřímo ovlivní i návrh konstrukce tunelu. Tato problematika však přesahuje cíl metodiky a není do ní tudíž zahrnuta.

Poděkování: Metodika byla vypracována za finanční podpory TAČR v rámci projektu TA01030245 „Nástroje pro spolehlivé navrhování a realizaci tunelů v městské zástavbě s důrazem na bezpečnost a životnost“

III) POROVNÁNÍ NOVOSTI POSTUPŮ

Obecné postupy vedoucí k predikci rizika jsou převážně známé [1], viz Obr. 1. Názornou ukázkou stávajících přístupů k analýze rizika geotechnických staveb a východiskem pro předloženou metodiku je publikace „Inženýrské stavby-Řízení rizik“ [2]. Jsou v ní podrobně analyzována různá nebezpečí ohrožující inženýrské konstrukce, jejich zdroje a důsledky realizace nebezpečí, ale i navrženy metody, ukazující, jak těmto nebezpečím čelit a zejména jak minimalizovat možné škody. Standardní přístupy hodnotí riziko zejména s využitím empirických a zejména pak expertních metod typu UMRA, či FMEA.

Předkládaná metodika si neklade za cíl nahradit osvědčené přístupy, jde spíše o jejich doplnění a rozšíření. Její novost spočívá v důrazu na pravděpodobnostní hledisko při predikci rizika, což je oblast, která není dosud v inženýrské praxi běžně využívána a není ani v tuzemské odborné literatuře systematicky popsána. Při tom současná generace inženýrů nebo alespoň její nezanedbatelná část (řekněme 10%) je vzdělávána v oboru spolehlivosti konstrukcí a pravděpodobnostní pojetí jí začíná být blízké. Nepřehlédnutelným přínosem metodiky je systematické uplatnění funkce užítka v rozhodovacím procesu směřujícím k výběru optimálního řešení (např. Technologie ražby apod.). Metodika tak přesahuje rámec rizikové analýzy a stává se podpůrným nástrojem pro rizikový management.

Veškeré postupy navržené v metodice jsou podloženy publikacemi členů autorského kolektivu, zejména monografií [20], a několika časopiseckými příspěvky (včetně IF) v zahraničních a tuzemských časopisech a ve sbornících ze zahraničních a tuzemských konferencí.

IV) POPIS UPLATNĚNÍ CERTIFIKOVANÉ METODIKY

Metodika je určena expertům v oboru rizikové analýzy a rizikového managementu, projektantům tunelových staveb, ale může být využita i jako podklad ve výuce studentů na vysokých školách.

Pro její širší uplatnění v praxi se počítá s její diseminací v odborné veřejnosti formou specializovaných školení.

Součástí metodiky je i efektivní počítačový model založený na MKP, který umožňuje sledovat dopad výstavby tunelu i na stavby na povrchu, a to v rámci interakce obou celků, a

předpovídat jejich poruchy. Redukovaný 2D/3D model tunelu s obklopujícím podložím připouští modelování nejistot opakovanou simulací metou LHS. Model je využitelný jak při návrhu, tak průběžně při realizaci tunelu a řešení neočekávaných situací.

V) EKONOMICKÉ PŘÍNOSY

V čl. 5 metodika předkládá postupy pro objektivní hodnocení přínosů při správném způsobu rozhodování o variantních řešeních, a to z pohledu dvou subjektů – investora a dodavatele. Nástrojem je teorie užítu respektující nejen nejistoty s výstavbou tunelu spojené, ale i přístup těchto subjektů k riziku (např. averze vůči možné ztrátě). Z toho je zřejmé, že jakýkoliv odhad přínosu metodiky může být jen orientační. Uvážíme-li, že např. že cena většího projektu, např. tunelu Blanka v Praze, se pohybuje řádově v desítkách miliard, pak velice střízlivý odhad, že by správná aplikace metodiky přinesla úsporu 5%, přesahuje úsporu vyjádřenou v tis. Kč o několik řádů.

VI) SEZNAM POUŽITÉ SOUVISEJÍCÍ LITERATURY

- [1] Tichý, M.: Ovládání rizika - Analýza a management, C. H. Beck, Praha 2006
- [2] Rozsypal, A.: Inženýrské stavby; Řízení rizik, JAGA, Bratislava 2008
- [3] Špačková, O.: Odhad rizika mimořádné událostí při ražbě tunelu, Sborník konference Management a ekonomika ve stavebnictví, Praha 2010
- [4] Modeling Safety Critical Components in Railway Systems. ESREL 2011. Troyes, France: European Safety and Reliability Association, 2011
- [5] NASA. Fault Tree Handbook with Aerospace Applications. NASA Office of Safety and Mission Assurance, Washington DC 2002
- [6] Sturk, R., Olsson, L., Johansson, J.: Risk and decision analysis for large underground projects, as applied to the Stockholm ring road tunnels. Tunneling and Underground Space Technology 11, 1996
- [7] Weber, P., Medina-Oliva, G., Simon, C. & lung, B.: Overview on Bayesian networks applications for dependability, risk analysis and maintenance areas. Engineering Applications of Artificial Intelligence (in press), 2010
- [8] Jensen, F.V., Nielsen, T.D.: Bayesian Networks and Decision graphs, 2nd edition. Springer, USA, New York, 2007
- [9] Eskesen, S. D., Tengborg, P., Kampman, J., Veicherts, T.: Guidelines for tunnelling risk management: International Tunneling Association, Working Group No. 2. Tunneling and Underground Space Technology, 2004, 19, pp. 217-237
- [10] International Tunneling Insurance Group (ITIG). A code of practice for risk management of tunnel works, 2006
- [11] Institution of Civil Engineers and the Faculty and Institute of Actuaries RAMP-Risk analysis and management for projects, Thomas Telford Ltd, London 1998
- [12] Staveren, M. Th. van.: Uncertainty and Ground Conditions A Risk Management Approach. Butterworth-Heinemann, Oxford 2006

- [13] <http://www.risman.nl/>
- [14] Health & Safety Executive. The risk to third parties from bored tunnelling in soft ground – research report 453. HSE Books, 2006
- [15] Health & Safety Executive. Safety of New Austrian Tunneling Method (NATM) tunnels: a review of sprayed concrete lined tunnels with particular reference to London clay. HSE Books, 1996
- [16] Seidenfuß, T.: Collapses in Tunneling. Master Thesis, Fachhochschule Stuttgart – Hochschule für Technik, 2006
- [17] Sousa, R. L.: Risk analysis for tunneling projects. Dissertaton, MIT USA 2010
- [18] Kelly, D. L., Smith, C. L.: Bayesian inference in probabilistic risk assessment- The current state of the art, Reliability Engineering and System Safety, 94, 2009
- [19] Benjamin, J.R., Cornell, C.A.: Probability, statistics, and decision for civil engineers. McGraw-Hill, 1970

VII) SEZNAM PUBLIKACÍ, KTERÉ PŘEDCHÁZELY METODICE

Metodika je podložena jednou monografií, třemi zahraničními příspěvky v časopisech s IF a několika příspěvky v tuzemských časopisech, dále příspěvky z tuzemských a zahraničních konferencí a jednou disertací Ph.D. Z nich vybíráme:

- [20] Špačková, O., Janda, T. Novotná, E. Šejnoha, M., Jarušková, D., Šejnoha, J.: Computational models for tunnel risk assessment, CIDEAS, CTU Publishing – Production, Prague 2011 (106 pp.)
- [21] Špačková, O., Ebermann, T., Kostohryz, O., Veselý, V., Šejnoha, J.: Expertní odhad pravděpodobnosti selhání při ražbě tunelu, Tunel 2010;19, pp. 15-23
- [22] Špačková, O., Šejnoha, J. Straub, D.: Probabilistic assessment of tunnel construction performance based on data. Tunn Underg Space Technol, 2013, 37, pp. 62-78
- [23] Špačková, O., Straub, D.: DBN for probabilistic modeling of tunnel excavation process. Comp-Aided Civil Infrastr Eng, 2013, 28, pp. 1-21.
- [24] Špačková, O., Novotná, E., Šejnoha, M., Šejnoha, J.: Probabilistic models for tunnel risk assessment, Advances in Engineering Software, 2013, 62-63, pp. 61-67
- [25] Janda, T., Šejnoha, M., Šejnoha, J.: Modeling of soil structure interaction during excavation: An engineering approach, Advances in Engineering Software, 2013, 62-63, pp. 51-60
- [26] Janda, T., Šejnoha, J., Srnec, V. and Šejnoha, M.: Modeling of soil structure interaction during tunnel excavation considering uncertainties, ECT2014, Italy, Naples 2014
- [27] Špačková, O.: Risk management of tunnel construction projects, Ph.D. disertace, ČVUT, Praha 2012