

Odhad rizika mimořádných událostí při tunelové ražbě

Olga Špačková

Abstrakt

Omezená znalost geotechnického prostředí při výstavbě tunelů je častou příčinou nehod, jako jsou závaly, poškození konstrukcí nad tunelem nebo ovlivnění hladiny podzemní vody. Odhad rizik spojených s takovými událostmi je velmi cennou informací při predikci nákladů a doby výstavby projektu, volbě vhodné technologie nebo trasy budoucího tunelu apod. Jedná se sice o události s poměrně nízkou pravděpodobností realizace, jejich uskutečnění však může mít dalekosáhlé ekonomické, ale i společenské důsledky. Nástroje pro kvantifikaci rizik mimořádných událostí, které jsou popsány v tomto příspěvku, umožňují využít vedle informací o konkrétním tunelu a expertních odhadů také zkušenosti získané během dříve realizovaných projektů. Při odhadu škod způsobených takovými událostmi jsou vedle nákladů na sanaci zohledněny také potenciální vlivy na zdraví a životy osob, životní prostředí, veřejné mínění atd. Vzhledem k rychlému rozvoji výstavby dopravní infrastruktury a zvyšujícím se nárokům na její kvalitu je téma výstavby tunelů v ČR stále aktuálnější. S rostoucím množstvím tunelových projektů vzrůstá i počet závažných selhání při jejich ražbě, predikce a minimalizace těchto rizik se stává nutnou podmínkou úspěchu takových projektů.

Analýza rizik jako podklad pro rozhodování

Základním úkolem při přípravě tunelového projektu je volba optimálního řešení daného tunelu (popř. alternativní konstrukce) od jeho geometrických parametrů, technologie ražby, požárně bezpečnostního řešení až po technologické vybavení. Rozhodování o dílčích problémech probíhá v průběhu celé přípravy a výstavby projektu. Optimální řešení by mělo být vždy zvoleno na základě vyhodnocení mnoha aspektů, jako jsou např.:

- stavební a provozní náklady,
- časový plán výstavby, oprav a údržby,
- zvýšení kvality a rychlosti dopravy,
- vliv na životní prostředí,
- bezpečnost osob při výstavbě i provozu.

Zohlednění většího množství aspektů při rozhodování není triviální záležitostí. V současnosti je pro porovnání variant standardně využívána cost-benefit analýza (CBA), která má však vážné limity při zohlednění nefinančních aspektů důležitých pro rozhodování a neumožňuje zahrnout preference rozhodovatele popř. dalších subjektů s ohledem na nejistoty a rizika spojená s jednotlivými predikcemi.

Moderní přístupy využívané při rozhodování za nejistoty v inženýrské praxi jsou často založeny na maximalizaci užitku, tj. veličiny, do které transformujeme veškeré aspekty, které mají vliv na rozhodnutí (náklady, čas, kvalita, ohrožení životů a ŽP apod.), a která navíc umožní zohlednit priority toho, kdo rozhoduje (tj. zpravidla fakt, že malé ztráty jsou poměrně

dobře akceptovány, zatímco nepřípustnost velkých neúspěchů roste podstatně rychleji než lineárně) – více viz např. [1].

Současná praxe, kdy jsou odhady základních proměnných (především nákladů a časového plánu) prováděny deterministicky, tedy pomocí jediné hodnoty, je velmi zkreslující a neodpovídá skutečnosti. Predikce vždy obsahuje jistou míru nejistoty a ta by měla být při rozhodování rovněž známa a zohledněna.

Přesnost predikce stavebních nákladů infrastrukturních projektů byla hodnocena např. ve studii [2]. Na poměrně velkém množství hodnocených projektů zde bylo prokázáno, že dochází k systematickému podhodnocení nákladů (u mostních a tunelových projektů v průměru o 34%). Zarážející ale především je, že v průběhu sledovaných sedmdesáti let nedošlo k žádnému zlepšení. Možné důvody tohoto stavu jsou podrobně rozebrány v uvedeném článku. Bez ohledu na ně však výsledek dokazuje, že deterministické odhady (nejen u stavebních nákladů) jsou nedostatečné a měly by být nahrazeny pravděpodobnostními přístupy.

Pravděpodobnostní odhady je dnes možné efektivně využít jednak díky dostupnosti výkonné výpočetní techniky, ale především díky rozsáhlým zkušenostem s dříve realizovanými projekty. Data z těchto projektů však nejsou v naprosté většině vhodně zpracovávána (skladována, statisticky a jinak analyzována) a využívána pro zlepšení predikcí týkajících se budoucích projektů. V tomto ohledu stavebnictví výrazně zaostává za ostatními obory, kde je zpracování výrobních dat a sdílení know-how zcela běžnou záležitostí.

V případě tunelových staveb (resp. dopravních staveb obecně) lze rozdělit rizika, která musí být při plánování projektu uvažována, do následujících skupin:

- rizika spojená s přípravnou fází projektu (výkup pozemků, posouzení vlivu na ŽP apod.)
- rizika výstavby, které mohou mít formu:
 - nejistoty v odhadech nákladů, rychlosti výstavby apod.
 - výjimečných událostí jako je zával, nepřípustné deformace, narušení vodního režimu v okolí tunelu atd.
- rizika týkající se provozní fáze tunelu a to:
 - nejistoty v odhadech intenzity dopravy a z toho plynoucích výnosů/užitku, nejistoty v odhadu nákladů na údržbu apod.
 - výjimečné události jako je požár, selhání nosné konstrukce, živelní pohromy nebo úmyslné útoky atd.

V současné době existuje řada modelů pro pravděpodobnostní predikci stavebních nákladů a časového plánu tunelových projektů (viz např. [3,4,5,6]). Tyto modely umožňují zohlednit běžnou variabilitu jednotkových nákladů a rychlosti ražby, zpravidla však neuvažují riziko výjimečných událostí, jejichž vliv na úspěšnost projektu je nezanedbatelný.

Vedle nezohlednění rizika výjimečných událostí při plánování projektu je častým nedostatkem současných modelů fakt, že jednotkové náklady a rychlosti výstavby jsou modelovány jako nezávislé náhodné veličiny (v případě výše zmíněných modelů pro predikci tunelové ražby jsou jednotkové náklady i rychlosti podmíněny pouze náhodným geotechnickým prostředím). Ve skutečnosti přitom platí, že pokud jsou reálné náklady a rychlost ražby po započítání výstavby horší než hodnoty původně odhadované, jsou vyšší jednotkové ceny a horší výkony pravděpodobně také ve zbývajících částech tunelu, např. v důsledku horší kvality projektu nebo provádění nebo vyšší ceny klíčového stavebního materiálu. Zanedbání korelací proto vede ke zkreslení predikcí, obecně k podhodnocení nejistot. To bylo prokázáno na příkladech různých typů projektů. Korelacemi mezi jednotkovými cenami jednotlivých položek při obnově dálničních mostů se zabývá např.

článek [7]. Model zohledňující vliv rizikových faktorů (počasí, podmínky pro zakládání, produktivita subdodavatelů atd.) na trvání jednotlivých činností je prezentován na příkladu pozemní stavby v článku [8].

Kvantifikace rizika výjimečných událostí

Tento příspěvek se zaměřuje na kvantifikaci rizika mimořádných událostí při procesu ražby tunelu (zával, nepříznivý vývoj poklesové kotliny, zaplavení tunelu, uvíznutí razícího stroje apod.). Tento typ rizik je velmi těžké predikovat a tím spíše kvantifikovat. Zpravidla jsou proto pro jejich odhad používány různé semi-quantitativní metody, ratingové systémy (viz např. [9,10]), které umožní identifikovat kritické části tunelu, neumožní však kvantifikovat riziko v peněžních jednotkách (tj. jako pravděpodobnou škodu).

O kvantifikaci rizika mimořádných událostí se snaží např. modely prezentované v článku [11] nebo disertační práci [12]. V obou modelech je odhad pravděpodobnosti výjimečných událostí při tunelové ražbě založen na expertním odhadu popř. na výpočtu spolehlivosti konstrukce. Expertní odhad však nemusí být zcela objektivní a klasický výpočet spolehlivosti konstrukce neumožňuje zahrnout kompletní spektrum možných příčin selhání (viz [13]), což je obzvláště významné právě při procesu tunelové ražby. Vzhledem k dlouholeté tradici výstavby tunelů v řadě států je tedy logickým krokem využít získané zkušenosti, tj. analyzovat četnosti těchto událostí v závislosti na různých parametrech (technologie ražby, plocha průřezu tunelu, geotechnické podmínky, podrobnost a kvalita projektu apod.) a využít tato data pro přesnější predikce. Metodologie pro odhad pravděpodobnosti mimořádné události s využitím historických dat je popsána v článku [14].

Znalost pravděpodobnosti výjimečných událostí je pouze dílčí informací pro výpočet rizika. Dalším krokem je odhad souvisejících škod a to nejen ve formě zvýšených nákladů, ale také jako zdržení prací, ohrožení bezpečnosti osob, ztráty reputace popř. dalších nehmotných škod.

Riziko související s havárií typu j (např. zával) pak může být vyjádřeno jako

$$R_j = \sum_{k=1}^{\infty} P(N_j = k) \times E[D_j | N_j = k], \quad (1)$$

kde $P(N_j = k)$ je pravděpodobnost, že dojde právě ke k haváriím typu j a $E[D_j | N_j = k]$ je střední (očekávaná) výše škody způsobené právě k událostmi typu j . Škoda přitom nemusí být vyjádřena pouze v peněžních jednotkách, ale také jako předpokládané zdržení apod. Předpokládáme-li, že škoda $E[D_j | N_j = k]$ způsobená k událostmi je k -násobkem škody $E[D_j | N_j = 1] = E[D_j]$ způsobené jednou událostí, může být riziko vyjádřeno jako součin středního počtu havárií $E[N_j]$ a škody způsobené jedním selháním a tedy

$$R_j = E[N_j] \times E[D_j]. \quad (2)$$

Předpokládejme, že bylo identifikováno J různých typů mimořádných událostí (zával, požár, zaplavení tunelu atd.). Tyto události jsou definovány jako výlučné jevy, tj. platí, že každá událost je jednoznačně zařazena pod jedinou kategorii. Např. zával, kterému předcházely vysoké přítoky vody a zaplavení tunelu nebo nadměrné deformace tunelové trouby, je kvalifikován pouze jako zával a není uvažován v kategorii zaplavení nebo nadměrných deformací. Za předpokladu výlučnosti jevů můžeme celkové riziko mimořádných událostí při ražbě tunelu vyjádřit jako prostý součet rizik dílčích, tedy

$$R = \sum_{j=1}^{j=J} R_j . \quad (3)$$

Škody jsou v naprosté většině případů náhodné, jsou ovlivněny velikostí havárie, časem a místem, kde se uskuteční a dalšími faktory. Je tedy nutné uvažovat různé scénáře, ke kterým může v důsledku havárie dojít. Vedle hmotných škod a délky zdržení stavby je přitom nutné zohlednit i případné ohrožení lidských životů a zdraví, ohrožení životního prostředí apod. Škodu způsobenou událostí typu j můžeme odhadnout jako

$$E[D_j] = \sum_{i=1}^{i=I} P[S_j = i] \times E[D_j | S_j = i], \quad (4)$$

kde $P[S_j=i]$ je pravděpodobnost i -tého scénáře, $E[D_j|S_j=i]$ je očekávaná škoda spojená s tímto scénářem a I je počet možných scénářů. Pro provedení analýzy scénářů lze použít graficky názornou metodu ETA (Event Tree Analysis) – viz článek [15]. Alternativní přístup pro odhad škod a kvantifikaci rizika poškození konstrukcí v důsledku vzniku poklesové kotliny nebo závalu je popsán v článku [16].

Vyjádření rizika jako pravděpodobnostního rozdělení škod

Vyšší vypovídací hodnotu než vyjádření rizika jedinou hodnotou dle rov. 1 - 3 může mít vyjádření rizika jako pravděpodobnostního rozdělení možných škod. To je obzvláště vhodné v případech, kdy jsou i stavební náklady (časový plán výstavby) popsány pravděpodobnostně.

Tento přístup navíc lépe odpovídá skutečnosti. Protože škody spojené s jednotlivými scénáři jsou nejisté, jejich vyjádření střední hodnotou může být zavádějící. Vhodnější je plný popis této náhodné proměnné pomocí hustoty pravděpodobnosti $f_{D_j|S_j,N_j}(d, s, n)$. Tu je možné určit expertně nebo na základě dřívějších zkušeností, doporučit lze např. normální rozdělení, beta rozdělení nebo trojúhelníkové rozdělení. $D_j|S_j,N_j$ zde značí náhodnou škodu způsobenou výjimečnou událostí j při realizaci scénáře S_j a počtu událostí N_j . S_j a N_j jsou diskrétní náhodné proměnné. S_j může nabývat hodnot 1 až I , kde I je celkový počet možných scénářů, a pravděpodobnosti jednotlivých scénářů a tedy pravděpodobnostní rozdělení této veličiny $f_{S_j}(s)$ lze stanovit stejně jako v předchozím odstavci např. pomocí ETA. N_j může nabývat hodnot od 0 do nekonečna a má Poissonovo rozdělení (viz v článku [14]), v tomto textu je hustota pravděpodobnosti této proměnné označena jako $f_{N_j}(n)$.

Hustotu pravděpodobnosti škod pro počet událostí n lze vyjádřit jako (srovnej s rov. 4)

$$f_{D_j|N_j}(d, n) = \sum_{s=1}^{s=I} f_{D_j,S_j|N_j}(d, s, n), \quad (5)$$

tedy jako marginální hustotu pravděpodobnosti sdružené hustoty pravděpodobnosti škod a možných scénářů, pro kterou platí

$$f_{D_j,S_j|N_j}(d, s, n) = f_{D_j|S_j,N_j}(d, s, n) \cdot f_{S_j}(s). \quad (6)$$

Hledanou hustotu pravděpodobnosti celkové škody pro mimořádnou událost typu j pak spočítáme jako (srovnej s rov. 1)

$$f_{D_j}(d) = \sum_{n=1}^{n=\infty} f_{D_j,N_j}(d, n), \quad (7)$$

kde sdružená hustota pravděpodobnosti škod a počtu událostí může být vyjádřena jako

$$f_{D_j, N_j}(d, n) = f_{D_j|N_j}(d, n) \cdot f_{N_j}(n). \quad (8)$$

Celková očekávaná škoda se za předpokladu, že události jsou definovány jako výlučné jevy (obdobně jako v předchozí části), rovná součtu náhodných škod očekávaných od jednotlivých typů událostí (srovnej s rov. 3)

$$D = \sum_{j=1}^{j=J} D_j. \quad (9)$$

Celkové náklady (resp. celková doba výstavby) je potom rovna

$$C_{Tot} = C_{Ex} + \sum_{j=1}^{j=J} D_j, \quad (10)$$

kde C_{Ex} jsou náklady (doba výstavby) zohledňující pouze běžné nejistoty v geologickém prostředí, cenách vstupů apod. bez uvažování rizika mimořádných událostí.

D , D_j , C_{Tot} i C_{Ex} jsou přitom náhodné veličiny popsané svým pravděpodobnostním rozdělením. Pomocí hustoty pravděpodobnosti C_{Tot} jsou popsány nejistoty spojené s predikcí nákladů (doby výstavby atd.). S touto znalostí je možné objektivněji porovnat různé varianty projektového řešení (např. s využitím teorie užítku) nebo navrhnout opatření pro redukcii těchto nejistot např. provedením dodatečných geotechnických průzkumů, využitím speciálních opatření při ražbě eliminujících riziko závalu a nadměrných deformací.

Závěr

Racionální rozhodování v jakékoli oblasti lidského života musí být založeno na vyhodnocení dostupných informací a vyhodnocení rizik, která jsou s daným rozhodnutím spojena. Čím komplexnější je problém, o kterém rozhodujeme, tím složitější je zpravidla i ohodnocení souvisejících rizik a jejich následný management. Tunelová díla se bezpochyby řadí mezi komplexní inženýrské systémy. Při jejichž přípravě, výstavbě i provozu je nutné provádět celou řadu závažných rozhodnutí, která ovlivní nejen výši investovaných prostředků, ale i kvalitu života obyvatel. Jedná se navíc o rozhodování na základě značně nejistých předpokladů (od geotechnického prostředí přes odhad cen až např. po intenzitu dopravy).

Úkolem inženýrské komunity je poskytovat kvalitní podklady a analýzy pro rozhodování o volbě trasy, technologie ražby, vybavení tunelu nebo způsobu jeho údržby. Zhotovitel provádí kritické rozhodnutí při stanovení výše nabídkové ceny. Samotná výstavba je potom v podstatě sérií rozhodnutí pod značným časovým tlakem. Všechny zmíněné procesy jsou přitom v současné době v podstatě zcela závislé na zkušenostech a schopnostech konkrétních expertů. Jejich role je samozřejmě nezastupitelná, přesto by jejich závěry a doporučení měly být podloženy objektivním modelem skutečnosti. Formalizace a objektivizace rozhodovacího procesu při přípravě, realizaci i provozu tunelů by tedy měly být společným cílem investorů, dodavatelů, projektantů a konzultantů, ale i dalších subjektů (např. pojišťoven).

Tento příspěvek stručně přibližuje state-of the art problematiku rozhodování za nejistoty. Dále se podrobněji věnuje problematice kvantifikace rizika výjimečných událostí při ražbě tunelu a popisuje pravděpodobnostní model pro odhad souvisejících škod. Analýza tohoto typu rizik by se měla stát běžnou součástí plánování a přípravy tunelových projektů. Aplikace pravděpodobnostních výpočtů v praxi je samozřejmě podmíněna dostupností uživatelsky přívětivého softwaru.

Literatura:

- [1] Nikolaidis, E. - Ghiocel, D.M. - Singhal, S. (2005): *Engineering design reliability handbook*. CRC Press, Boca Raton, Florida.
- [2] Flyvbjerg, B. - Holm, M.K.S. - Buhl, S.L. (2004): What causes cost overrun in transport infrastructure projects? *Transport Reviews*, 24, pp. 3-18.
- [3] Chung, T. H. - Mohamed, Y. - AbouRizk, S. (2006): Bayesian updating application into simulation in the north Edmonton sanitary trunk project. *J. of Construction Engineering and Management* 8, pp. 882-894.
- [4] Ruwanpura, J.Y. - Ariaratnam, S.T. (2007): Simulation modeling techniques for underground infrastructure construction processes. *Tunnelling and Underground Space Technology* 22 (2007), pp. 553-567.
- [5] Zhou, F. - AbouRizk, S. - Fernando, S. (2008): A simulation template for modeling tunnel shaft construction. *Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference*, pp. 2455-2461.
- [6] Min, S.Y. - Kim, T.K. - Lee, J.S. - Einstein, H.H. (2008): Design and construction of a road tunnel in Korea including application of the Decision Aids for Tunneling - A case study. *Tunnelling and Underground Space Technology* 23, pp. 91-102.
- [7] Chou, J.-S. – Yang, I.-T. – Chong, W.K. (2009): Probabilistic simulation for developing likelihood distribution of engineering project cost. *Automation in Construction* 18, pp. 570-577.
- [8] Ökmen, Ö. – Öztas, A. (2008): Construction project network evaluation with correlated schedule risk analysis model. *J. of construction engineering and management* 1 (134), pp. 49-63.
- [9] Sturk, R., Olsson, L., Johansson, J. (1996): Risk and decision analysis for large underground projects, as applied to the Stockholm ring road tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology* 11, pp. 157-164.
- [10] Shahriar, K., Sharifzadeh, M., Hamidi, J. K. (2008): Geotechnical risk assessment based approach for rock TBM selection in difficult ground conditions. *Tunnelling and Underground Space Technology* 23, pp. 318-325.
- [11] Isaksson, T. - Stille, H. (2005): Model for estimation of time and cost for tunnel projects based on risk evaluation. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 38 (2005), pp. 373-398.
- [12] Sousa, R.L. (2010): *Risk analysis for tunneling projects*. Dissertation, MIT, 2010.
- [13] Blockley, D. (1999): Risk based structural safety methods in context“. *Structural Safety* 21, pp. 335-348.
- [14] Špačková, O. et. al. (2010): Expertní odhad pravděpodobnosti selhání při ražbě tunelu. V tisku: časopis Tunel.
- [15] Šejnoha, J. - Jarušková, D. - Špačková, O. - Novotná, E. (2009): Risk quantification for tunnel excavation process. *Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology* (58): 101- 109.
- [16] Šejnoha, J. - Novotná, E. - Špačková, O. - Jarušková, D. Pragmatic probabilistic models for quantification of tunnel excavation risk. V tisku: Acta geodynamica et geomaterialia.