

# PREDIKCE VZNIKU A VÝVOJE PORUCH BUDOV VYVOLANÝCH POKLESOVOU KOTLINOU V DŮSLEDKU PODZEMNÍ ČINNOSTI

## PREDICTION OF DAMAGE IN BUILDINGS CAUSED BY SETTLEMENTS DUE TO UNDERGROUND EXCAVATIONS

Vladimír Červenka, Tomáš Ebermann,  
Lukáš Kadlec, Vladimír Krístek,  
Lukáš Vráblík

Při výstavbě mělkých tunelů ve městech dochází k jejich střetům se stávající nadzemní zástavbou a inženýrskými sítěmi. Ražba tunelu, tak aby vždy byla úplně dodržena deformační kritéria platná pro nové budovy i inženýrské sítě, které se nad nimi nacházejí, by si však vyžádala zcela mimořádné náklady. Ekonomičtější je připustit určité deformace těchto objektů během jejich podcházení podzemní stavbou a poté provést jejich sanování, přičemž ekonomické náklady na sanaci poškození způsobených ražbou tunelu musí být podstatně nižší, než náklady na preventivní zajištění náročných deformačních kritérií platných pro nové stavby. Pro predikci míry očekávaných poškození se úspěšně uplatňují pokročilé nelineární výpočtové metody. ■ *Near-surface tunnels in cities can interfere with existing buildings and utility facilities. Inevitably, a tunnel excavation which satisfies strict deformation criteria for buildings and the utility facilities would require extraordinary expenses. It is more effective to accept certain limited deformations due to tunnel excavation and subsequent repair provided that the cost of repairs of surrounding structures is lower than the cost of preventative provisions for complying with criteria valid for new structures. Assessment of the expected damage can be performed by advanced numerical simulations as shown in the paper.*

Při výstavbě mělkých tunelů ve městech dochází k jejich střetům se stávající nadzemní zástavbou a inženýrskými sítěmi. Ražba tunelu tak, aby vždy byla úplně dodržena deformační kritéria platná pro nové budovy i inženýrské sítě, které se pod nimi nacházejí, by si však vyžádala zcela mimořádné náklady. Při tom je ovšem třeba zamezit nevratné ztrátě statické únosnosti a ekonomické náklady na sanaci částečného poškození staveb způsobené ražbou tunelu musí být podstatně nižší, než náklady na preventivní zajištění náročných deformačních kritérií platných pro nové stavby.

Spolehlivost objektu je možné charakterizovat vlastnostmi, které splňují na něm požadované funkce při současném zachování provozních ukaza-

telů v daných mezích v daném časovém úseku. Jednotlivé složky spolehlivosti jsou zejména jeho bezpečnost, použitelnost, tj. schopnost provozu, a trvanlivost. Podmínkou spolehlivosti se rozumí matematické vyjádření vztahu mezi účinkem zatížení na konstrukci a přípustnou hodnotou tohoto účinku, jež je definována příslušnými pravidly pro projektování.

Problematika trhlin je jednou z rozhodujících otázek stavu poškození konstrukce. Tento stav je nutné posuzovat jak z hlediska mezního stavu použitelnosti – provozuschopnosti, tak i z hlediska statické bezpečnosti s ohledem na únosnost a kolaps konstrukce.

Pro mez poškození vyžadujeme omezené použití s definovanou minimální bezpečností. Tato mez potom hraničí s jistou mezí „možného nebo přijatelného poškození“ objektu, což se obvykle posuzuje různými dodatečnými statickými nebo jinými rozbory. Jako typické varovné charakteristiky jsou velikost trhlin, velké nebo zvětšující se průhyby nebo tendence ke kolapsu v důsledku napjatostních účinků, přemáhání konstrukce apod. Zvláštní pozornost zasluhují rozbory druhu, velikosti a hlavně příčin vzniku trhlin. Je třeba zajistit:

- definování požadavků na provozuschopnost objektu a určení kritérií na jejich posouzení,
- charakteristiky komponentů nebo materiálů,
- identifikace provozních charakteristik a vlastností, které mohou sloužit jako indikátory poškození,
- identifikace očekávaného a možného rozsahu škod v souvislosti s určitými faktory,
- identifikace možných mechanismů poškození,
- zvážení, jak je možné při používání konstrukce vyvolat jednotlivé faktory,
- definování požadavků na údržbu s ohledem na předpokládanou, resp. požadovanou životnost objektu,
- ověření předpokladů jednotlivých faktorů poškození,
- ověřování a měření k získání podkladů pro předpověď životnosti s ohledem na dané podmínky prostředí, v kterém se objekt nachází,

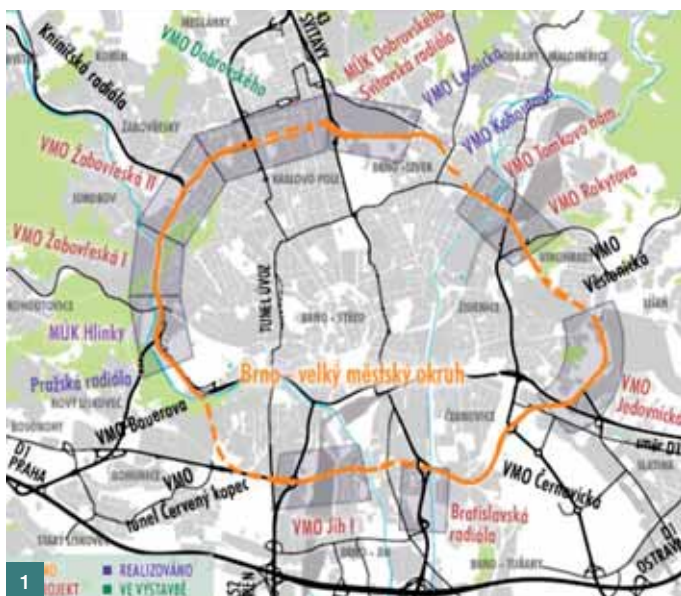
- dlouhodobé pozorování podobných objektů při podobných podmínkách používání,
- vytvoření matematického modelu analýzy a předpokladů poškození a porovnání rychlostí změn jevů na zjištění životnosti a při sledování v daných podmínkách.

Trhliny je z hlediska trvanlivosti konstrukce třeba posoudit podle příčin jejich vzniku. Rozeznáváme trhliny povrchové – většinou vyvolané smršťováním a trhliny statické vznikající vlivem přetížení nebo vynucených deformací. Při posuzování závažnosti trhlin je nutné zvážit charakteristické vlastnosti konstrukce, zejména citlivost konstrukce v určitých místech na zatěžující a deformační účinky.

### ANALÝZA DEFORMAČNÍCH STAVŮ

Deformační stav konstrukce je důležitým ukazatelem její životnosti a provozuschopnosti, ať už z hlediska funkce, nebo i z hlediska meze porušení konstrukce. Pro hodnocení je možno rozdělit přetvoření na:

- předvídaná, se kterými se počítalo ve statickém výpočtu, a proto se mohla udělat opatření proti jejich nepříznivým důsledkům; patří sem účinky předpokládaného zatížení a deformace podloží – poklesů podpor.
  - nepředvídaná, která nebyla uvažována ve statickém výpočtu, a proto mohou vést k znehodnocení konstrukce (např. nadměrné zatížení konstrukce s dynamickými účinky, neočekávaný pokles podpor nebo vynucená přetvoření, velké snížení pevnosti materiálů).
- Předvídaná přetvoření mohou být dvojího druhu, a to:
- teoretická, která vyplývají ze statického řešení a při jejich určení se vychází z požadavků norem a předpisů nebo z odborných posudků (např. o sedání základů),
  - skutečná, aktualizovaná, která opět vyplývají ze statického řešení, při němž se však už použily podklady získané měřením (např. pevnosti a moduly přetvárnosti, sedání podpor aj.).



## VÝPOČTOVÁ ANALÝZA VZNIKU A VÝVOJE PORUCH BUDOVY VYVOLANÝCH POKLESOVOU KOTLINOU V DŮSLEDKU PODZEMNÍ ČINNOSTI

Jako příklad je uvedena analýza predikce vývoje poruch budovy vyvolaných poklesovou kotlinou v důsledku ražeb Královopolských tunelů v Brně.

Královopolské tunely jsou jednou z hlavních součástí Velkého městského okruhu (VMO) města Brna. Jedná se o dva paralelní dvoupruhé ražené tunely Královopolský tunel I a Královopolský tunel II.

Tunel I má celkovou délku 1239 m a je situován v ose ulic Žabovřeské – Dobrovského. Ražená část má délku 1053 m a hloubené části jsou budovány v zapážených stavebních jámách délky 134 m v Žabovřeskách a 52 m v Králově Poli.

Tunel II má celkovou délku 1258 m a je situován asi 60 m jižně od tunelu I v prodloužené ose ulice Pešinovy tak, aby docházelo k co nejmenšímu ovlivnění stávající nadzemní zástavby. Ražená část má délku 1060 m a hloubené části, budované stejně jako u tunelu I v zapážených stavebních jámách, délky 149 m v Žabovřeskách a 49 m v Králově Poli (obr. 1). Ražby obou tunelů probíhaly v letech 2008 až 2010, v současnosti jsou tunely v provozu.

Analýza predikce vývoje poruch vyvolaných poklesovou kotlinou v důsledku ražeb byla provedena na středním traktu budovy Zdravotnického zařízení Ministerstva obrany ČR v ulici Dobrovského 25A. Objekt je složen z tří vzájemně propojených stavebních traktů, má čtyři až pět nadzemních podlažní, jedno podzemní podlaží a je

ukončen šikmou sedlovou střechou o malém spádu. Budova není zařazena mezi památkově chráněné objekty.

Svislé nosné svislé konstrukce nadzemních podlaží tvoří zdivo z plných pálených cihel tloušťky do 600 mm a v podzemním podlaží železobetonové stěny. Vodorovné nosné konstrukce jsou tvořeny železobetonovými prefabrikáty. Budova byla postavena v roce 1961. Na obr. 2 je ukázán pohled na její západní fasádu, která byla analyzována.

Je zcela zřejmé, že pro objektivní posouzení skutečného chování objektu nestačí běžný pružný výpočet založený na krajně zjednodušených materiálových modelech. Řešení, pokud má uspokojivě respektovat reálné chování betonu, nelze limitovat předpoklady pružnosti a linearity.

Pro výpočty skutečného působení konstrukcí řešeného typu lze použít program ATENA (Červenka Consulting) s nelineárním materiálovým modelem vystihujícím skutečné chování konstrukcí v širokém rozsahu jejich působení. Materiálové modely jsou založeny na isotropním způsobu poškozování materiálu v tlaku bez trhlin a na ortotropním poškozování materiálu po vzniku trhlin; tahovou houževnatost materiálu využívá metoda prostřednictvím poznatků založených na nelineární lomové mechanice. Programem lze řešit i pokritické chování konstrukce po dosažení únosnosti na sestupné větvi diagramu zatížení-průhyb. Řešení je formulováno v oboru velkých deformací a zahrnuje tedy i geometricky nelineární chování.

Řešená konstrukce a tvar poklesové kotliny jsou znázorněny obr. 3a; tento

Obr. 1 Situace ■ Fig. 1 Location of tunnels

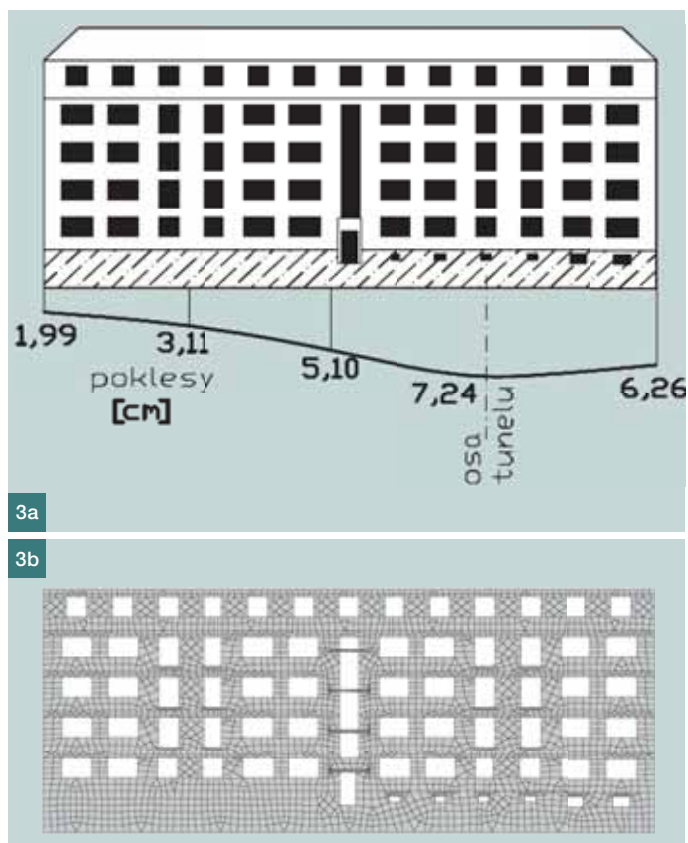
Obr. 2 Pohled na západní fasádu řešené konstrukce ■ Fig. 2 View on the western facade of the investigated building

systém byl pro použití programu idealizován konečnými prvky podle obr. 3b.

Výsledky nelineárního výpočtu zahrnujícího reálné zatížení konstrukce a vynucené posuny podpor odpovídající tvaru poklesové kotliny jsou uvedeny na obr. 4a. Patrně je porušení trhlinami v místech extrémních namáhání, které lze porovnat se skutečným stavem – charakterem porušení objektu a způsobem vzniku a rozložení trhlin (obr. 4b). Porovnání ukazuje uspokojivou shodu prokazující použitelnost prezentovaného analytického přístupu, volby materiálových modelů a nelineárního výpočtového programu pro predikci míry poškození konstrukce podzemní činností.

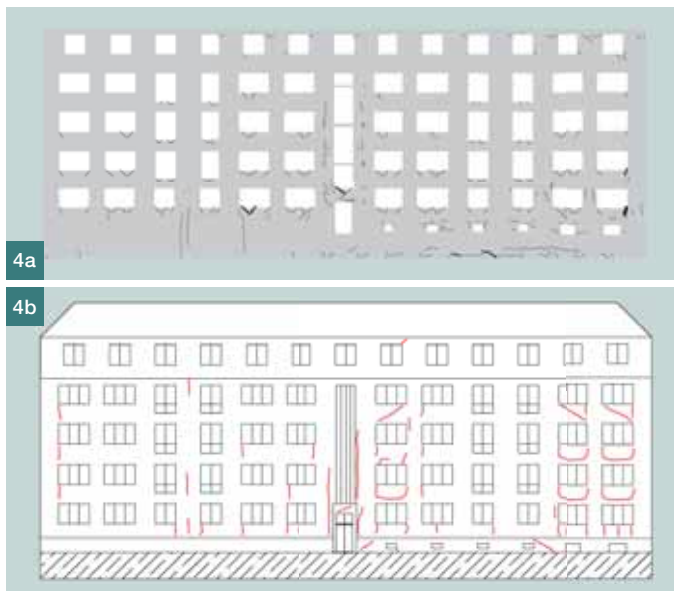
## ZÁVĚR

Ukázaný příklad analýzy reálné konstrukce zasažené projevy podzemní činnosti prokázal, že v současné době jsou k dispozici výstižné výpočtové metody a nástroje pro predikci charakteru a stupně poškození stavebních konstrukcí v důsledku této činnosti. To umožňuje pro konkrétní předpoklady o způsobu, míře a časovém vývoji deformací podloží predikovat a zhodnotit odezvu konkrétní posuzované konstrukce a na základě toho zvolit taková opatření, která zaručí účinný a současně ekonomicky optimální přístup jak k realizaci podzemního díla, tak i k metodám sanace vzniklých poruch. Tak-



Obr. 3 a) Řešená konstrukce a tvar poklesové kotliny, b) numerický model konstrukce ■ Fig. 3 a) Analyzed building and the settlement shape, b) numerical model of the structure

Obr. 4 Trhliny na objektu, a) vypočtené rozložení trhlin (největší šířka otevřených trhlin 3 mm), b) skutečný stav rozložení trhlin (trhliny jsou rozevřené na šířku 2 až 3 mm) ■ Fig. 4 Crack pattern in the building walls, a) distribution of cracks (maximum crack width is 3 mm), b) observed crack pattern (crack widths 2 – 3 mm)



to lze prokázat možnost připustit určité deformace stávající nadzemní zástavby během jejich podcházení podzemní stavbou a následně vzniklé poruchy sanovat namísto toho, aby vždy byla úplně dodržena deformační kritéria platná pro nové stavby, které jsou podzemní výstavbou dotčeny, což by si mohlo vyžádat zcela mimořádné náklady.

Tyto moderní postupy též umožní rozlišit a charakterizovat konstrukční typy z hlediska odezvy na projevy podzemní činnosti – z hlediska statického systému, statické neurčitosti, použitého materiálu a též z hlediska nároků na funkci konstrukce, na bezporuchovost, životnost, udržovatelnost a možnost opravy.

Uvedené výsledky byly získány v rámci řešení grantových projektů č. 103/09/2016 a č. P104/11/1311 (udělených Grantovou agenturou České republiky) a TA01031920 (uděleného Technologickou agenturou České republiky).

Text článku byl posouzen odborným lektorem.



Ing. Vladimír Červenka, Ph.D., FEng.  
Červenka Consulting, s. r. o.  
Na Hřebenkách 55, 155 00 Praha 5



Ing. Lukáš Kadlec



Prof. Ing. Vladimír Krístek, DrSc.

Doc. Ing. Lukáš Vráblík, Ph.D., FEng.

všichni: Katedra betonových konstrukcí  
Fakulta stavební ČVUT v Praze  
Thakurova 7, 166 00 Praha 6

Ing. Tomáš Ebermann  
Arcadis Geotechnika, a. s.  
Geologická 988/4, 152 00 Praha 5  
www.arcadisgt.cz



#### Literatura:

- [1] ATENA (2011), „ATENA Program documentation“, Červenka Consulting, Praha, 2011
- [2] Červenka V., Sístek M., Červenka J.: Verification of global safety assisted by numerical simulation, fib symposium Prague 2011, ISBN 978-80-87158-29-6, pp. 62
- [3] Červenka V., Červenka J.: Numerical Simulation as a Design Tool for Reinforced Concrete Structures, 6th CCC Congress Mariánské Lázně, 2010
- [4] Červenka V., Pukl R. (1992): „Computer Models of Concrete Structures“, SEI, Vol. 2, No. 2, May 1992, IABSE Zürich, Switzerland, ISSN 1016-8664, pp. 103–107
- [5] Červenka V. & Pukl R., Ozbolt J., Eligehausen R. (1995): Mesh Sensitivity Effects in Smearred Finite Element Analysis of Concrete Structures, In: Proc. of the Second Inter. Conf. on Fracture Mechanics of Concrete Structures (FRAMCOS 2): 1387–1396, Ed. F. H. Wittmann, AEDIFICATIO, ETH Zürich, Switzerland
- [6] Červenka J., Červenka V., Eligehausen R. (1998a): „Fracture-plastic material model for concrete, application to analysis of powder actuated anchors“, Third Int. Conf. on Fracture Mechanics of Concrete Structures, Proc. FRAMCOS 3, AEDIFICATIO, 1998, Gifu, Japan
- [7] Červenka V. (1998b): „Simulation of shear failure modes of r.c. structures“, Proc. of EURO-C 1998 – Computational Modeling of Concrete Structures, April 1998, Badgastein, Austria, pp. 833–838
- [8] Krístek V., Vráblík L.: Relaxace namáhání stavebních konstrukcí při vynucených deformacích vyvolaných podzemní činností, Sb. mezinár. konf. Betonářské dny 2009, Hradec Králové, listopad 2009
- [9] Krístek V., Ebermann T.: Problematika predikce vývoje namáhání a přetvoření betonových konstrukcí ovlivněných ražbou podzemních děl, knižní publikace: in Stavební ročenka 2010, nakl. JAGA Group, Bratislava 2009, ISBN 978-80-8076-079-3