

# Druhá generace Eurokódu 7 a přístup k dílčím součinitelům při užití MKP

J. Pruška

ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Katedra geotechniky, Česká republika

**ABSTRAKT:** V říjnu 2027 bude zavedena do praxe druhá generace Eurokódu 7. Pro geotechniky není hlavní změnou jen organizování Eurokódu 7, ale také důraz na používání modelů základové půdy (Ground Model, GM) a geotechnického návrhového modelu (Geotechnical Design Model, GDM) v procesu geotechnického návrhu. GDM slouží mimo jiné jako podklad pro použití numerického modelování v geotechnickém návrhu. Přestože se pro návrh mezního stavu únosnosti (ULS) a posouzení mezního stavu použitelnosti (SLS) geotechnické konstrukce používá numerické modelování již dlouhou dobu, tak stávající Eurokód neposkytuje projektantovi žádné vodítko v řadě důležitých a praktických otázek týkajících se použití numerických metod pro ověření mezních stavů. Tento nedostatek druhá generace Eurokódu 7 odstraňuje. Článek stručně popisuje používání GM a GDM a představuje, jak jsou numerické modely implementovány v druhé generaci Eurokódu 7. Dále sumarizuje kroky při tvorbě numerického modelu řešené geotechnické úlohy ve vztahu k dostupným podkladům.

## 1. ÚVOD

Vývoj druhé generace Eurokódu 7 dosáhl své závěrečné fáze a od října 2027 bude zaveden do praxe. Pro geotechniky není hlavní změnou jen organizování Eurokódu 7 do tří částí, ale i skutečnost, že revidovaný Eurokód 1990 ed. 3 z roku 2024 (CSN EN 1997-0 ED.3 2024) převzal významnou část současné EN 1997-1. V nové generaci Eurokódu 7 (dále EC7) existují dva odlišné modely. Model základové půdy zahrnující geologii, prezentaci a vyhodnocení výsledků zkoušek a geotechnický návrhový model sloužící pro návrh konstrukce. Veškerá data a informace týkající se stavu základové půdy a podzemní vody pro oblast GM musí být podchycena a uvedena ve zprávě o průzkumu základové půdy (Ground Investigation Report, GIR). Výběr návrhových parametrů je však už součástí dalšího kroku, kterým je tvorba GDM. Na základě GDM je možné vytvořit numerický model, který je zjednodušené znázornění předpokládané skutečnosti vhodné pro konkrétní numerickou analýzu.

Při zavádění první generace Eurokódu 7 bylo používání numerických metod na začátku, a v praxi jednoznačně převládala 2D analýza, poskytující omezené informace pro geotechnický návrh. Tomuto stavu odpovídala i skutečnost, že do první generace Eurokódu nebyly numerické modely dostatečně implementovány. V EC7 jsou numerické modely definovány jako výpočtové modely zahrnující numerickou aproximaci pro získání řešení. Doporučené postupy použití numerického modelování pro návrh geotechnických konstrukcí obsahuje Článek 8.2 v části 1 EC7. A tak má inženýrská praxe dnes v ruce užitečná a použitelná doporučení k použití numerických metod pro návrh geotechnických konstrukcí na základě mezních stavů únosnosti (ULS) a použitelnosti (SLS).

## 2. MODEL ZÁKLADOVÉ PŮDY (GM)

Termín Ground model je v EC7 Části 1: 3.1.6.6 definován jako: nástin specifické dispozice a charakteru základové půdy a podzemní vody na základě výsledků průzkumů základové půdy a dalších dostupných údajů. V EC7 Části 2: 4.1 Průzkum a zkoušení základové půdy je dále uvedeno: Model základové půdy musí obsahovat geologické, hydrogeologické a geotechnické podmínky lokality založené na základě výsledků průzkumu základové půdy (ČSN EN 1997-1 ED.2 2025, ČSN EN 1997-2 ED.2 2025). Je tedy zcela patrné, že GM je svázán s konkrétní konstrukcí/konstrukcemi a fázemi její/jejich výstavby, a tedy

oblastmi ovlivnění (Zone of influence, ZOI). Pro úspěch jakéhokoli projektu je zásadní, aby rozsah GM byl vhodný pro daný projekt, podmínky základové půdy a podzemní vody.

Během procesu sestavování modelu základové půdy a určování odvozených hodnot se objevuje několik zdrojů nejistot (např. s geologickými poměry, znalostí historie dané lokality, prostorovou heterogenitou, určení ZOI apod.) a je třeba dbát na to, aby se tyto nejistoty minimalizovaly. Nejen z důvodu minimalizace chyb v GM vypracovala pracovní skupina komise CEN/TC250/SC7 směrnici popisující detailně tvorbu modelu základové půdy a získání odvozených hodnot vlastností základové půdy (Garin et al., 2024).

### 3. GEOTECHNICKÝ NÁVRHOVÝ MODEL (GDM)

Termín geotechnický návrhový model je v EC7 definován jako koncepční znázornění lokality odvozené z modelu základové půdy pro ověření každé přiměřené návrhové situace a mezního stavu. Pokyny k obsahu Geotechnického návrhového modelu jsou uvedeny v Kapitole 12 a Příloze B.4.2 EC7-1. Tento model má zahrnovat reprezentativní hodnoty vlastností základové půdy geotechnických typů (musí být uvedeny zdroje dat použité k určení reprezentativní hodnoty), upřesnění geometrie a podmínky podzemní vody. Příloha B.4.2 EC7-1 uvádí upřesnění požadavků na GDM. GDM je tak vlastně výstupem revize dostupné informace v GIR a GM, včetně terénní rekognoskace lokality a jejího okolí, průzkumu základové půdy, laboratorních zkoušek a průzkumu podzemních vod. Reprezentativní hodnoty zahrnuté v GDM jsou hodnoceny podle EC7 se zvážením přesnosti dosažené v průzkumu základové půdy, rozsahu průzkumu a úrovni rizika pro konkrétní geotechnickou konstrukci.

### 4. APLIKACE NUMERICKÉHO MODELOVÁNÍ V NOVÉ GENERACI EUROKÓDU 7

V souladu s aplikováním první generace Eurokódu do praxe začátkem 21. století se objevily různé přístupy k aplikaci metody konečných prvků pro ověření ULS v geotechnickém návrhu. Rozdíly v přístupu se týkaly hlavně vlivu počátečních napětí, volby materiálového modelu zeminy (jednoznačně převládal Mohr – Coulombův model), aplikace dílčích součinitelů, určení porušení konstrukčních prvků). Největší diskuse mezi odborníky se týkala aplikace dílčích součinitelů. Brinkgreve a Post (2015) popsali aplikaci dílčích součinitelů při návrhu pažicí konstrukce kotvené v jedné úrovni v PLAXISu. Bauduin a kol. (2003) diskutovali použití mezních stavů podle Eurokódu 7 při návrhu pažicí konstrukce. Katsigianis a kol. (2015) popsali použití Eurokódu 7 při aplikaci různých materiálových modelů. Simpson (2007,2013) se věnoval aplikaci Eurokódu 7 do numerických modelů. Schweiger popsal aplikaci Eurokódu 7 při numerické analýze tunelů (Schweiger 2010, Schweiger, Marcher, and Nasekhian 2010). Někteří autoři navrhli přístup DA2\* jako alternativu k DA2 pro numerické metody (EAB 2006, Frank et al. 2004, Barták and Pruška 2015). I přes nedostatečné pokyny v první generaci Eurokódu 7 byly po určitých počátečních nejistotách numerické metody pro návrh ULS široce používány. Z navrhovaných přístupů se nejvíce provádí analýza s charakteristickými parametry zemin a následné použití dílčího součinitele na účinky zatížení nebo konstrukční síly.

EC7 popisuje implementaci dílčích součinitelů v numerických metodách pro:

- (i) Ověření ULS s aplikací dílčích součinitelů na vstupu a výstupu. Oba přístupy jsou popsány jak po stránce jejich volby, tak po stránce implementace.
- (ii) Ověření SLS, kdy je důležitá volba materiálového modelu v souladu s GDM. Reprezentativní hodnoty vlastností základové půdy musí zohledňovat všechny situace na základě odvozených hodnot prezentovaných v modelu podloží.

#### 4.1 OVĚŘENÍ ULS

Eurokód 1990 ed. 3 z roku 2024 (CSN EN 1997-0 ED.3 2024) zavádí pro všechny typy konstrukcí čtyři ověřovací případy (VC1 až VC4), které používají dílčí součinitele pro zatížení  $\gamma_F$  a účinky zatížení  $\gamma_E$ . Podle článku 8.2 části 1 EC7 by ověření ULS geotechnických konstrukcí mělo být založeno na méně příznivých výsledcích daných:

- Aplikací dílčích součinitelů na vstupu (input faktoring – MFA materiálových vlastností) užitím:

- dílčích součinitelů pro zatížení  $\gamma_F$  z ověřovacího případu 3 (VC3) a;

- dílčích součinitelů na materiálové vlastnosti  $\gamma_M$  pro soubor M2;

Tento přístup je založen především na použití redukce smykové pevnosti, která je možná různými postupy v softwarech. Jsou zde možné dva způsoby aplikace dílčích součinitelů. Prvý způsob provádí výpočet s charakteristickými hodnotami parametrů a jen ve fázích ověřujících ULS aplikuje dílčí součinitele  $\gamma_M$  ze souboru M2. EC7 tento způsob doporučuje z možnosti provádět posouzení SLS a ULS pomocí jednoho numerického analytického modelu. Druhý způsob aplikuje dílčí součinitele  $\gamma_M$  ze souboru M2 na materiálové modely hned od začátku analýzy a výpočty se provádějí s využitím návrhových hodnot parametrů materiálů. Pokud redukce pevnostních parametrů nevede k významnému přerozdělení napětí, dodatečné plasticitě a nevyrovnaným silám, nebude ověřen kritický stav.

- Aplikací dílčích součinitelů na výstupu (output factoring – EFA účinků působení) užitím:

- dílčích součinitelů na účinky zatížení  $\gamma_E$  pro ověřovací případ 4 (VC4) a;

- dílčích součinitelů na materiálové vlastnosti  $\gamma_M$  pro soubor M1.

Jedná se o přímou kombinaci, kdy se výpočet provede s reprezentativními hodnotami vlastností zemin a dílčí součinitel  $\gamma_E$  ze souboru M1 aplikuje na výstup modelu (účinky zatížení). Tento přístup aplikace dílčích součinitelů na zatížení a únosnosti je ekvivalentní přístupu LRFD, který se používá např. v USA. Jeho aplikace je vhodná při použití nelineárních materiálových modelech, velkých posunech, analýze progresivního porušení, creepu, smršťování či interakci konstrukce a zeminy. Je dobré zmínit, že při využití přerozdělení zatížení v tomto přístupu se dílčí součinitelé pro účinky zatížení aplikují na stranu únosnosti, tj. na pevnostní vlastnosti konstrukce. Je logické, že pokud řešená úloha neobsahuje žádné konstrukční prvky (např. stabilita nezabezpečeného svahu, zářezu apod.), ověření aplikací dílčích součinitelů na výsledky úlohy nedává smysl

Výše uvedené postupy ověřování ULS podrobně popisuje tabulka 8.1 v EC7, Dílčí součinitele pro sady VC3 a VC4 uvádí (EN 1990: 2023) a dílčí součinitele pro sady M1 a M2 jsou v (EN 1997-1: 2024). Je důležité, že tyto parametry v těchto sadách jsou definovány jako národně stanovené parametry (NDP).

Nové Eurokódy umožňují též ověření obou mezních stavů pomocí numerického modelu obsahujícího více než jednu geotechnickou konstrukci (komplexní či kontinuální metody). Při modelování komplexních úloh však není často zřejmé, který z výše uvedených přístupů je kritický a je nutné provádět kontrolu oběma přístupy, jak uvádí např. Lees (2019).

## 4.2 OVĚŘENÍ SLS

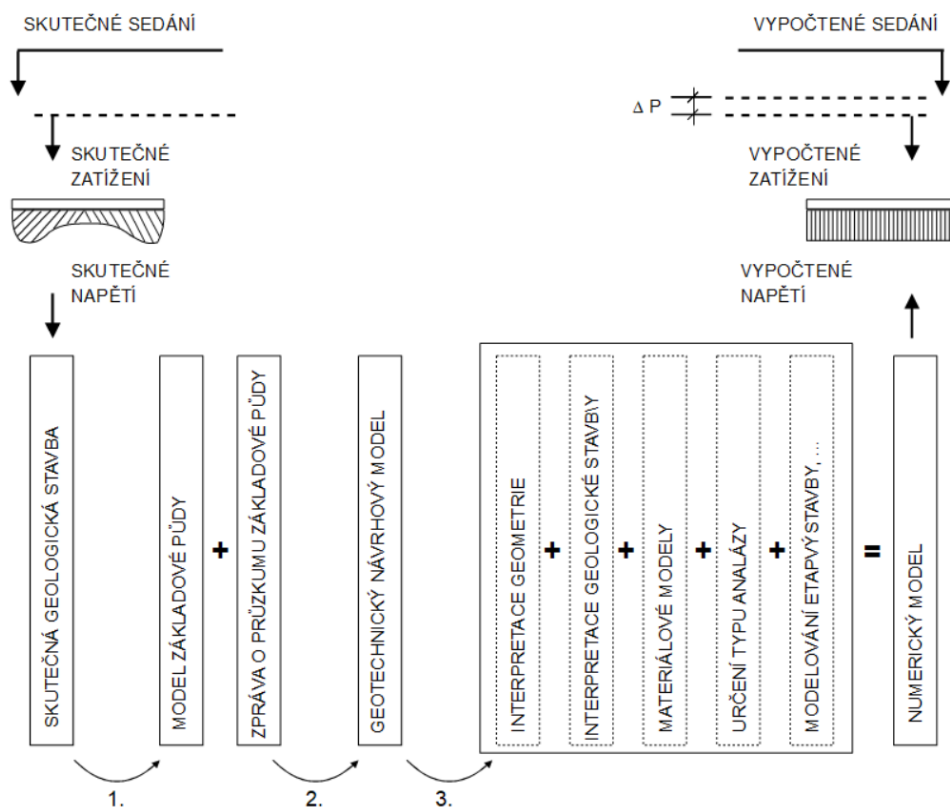
Ověření SLS umožňuje posouzení konstrukce s ohledem na její fungování za normálního užívání, komfortu osob a vzhledu stavby. Při ověření tohoto mezního stavu se tato posouzení nutně vyžadují volbu materiálového modelu v souladu s GDM a mechanismem porušení (s přihlédnutím k drahám napětí), zohlednění rozsahu a frekvenci zatížení. Složitost numerických modelů musí být v souladu s dostupnými daty a provedenými ověřeními, a to i pro spřažené numerické úlohy (konsolidace, termomechanická analýza atd.). Reprezentativní hodnoty vlastností zeminy musí zohledňovat všechny tyto situace na základě odvozených hodnot prezentovaných v GM. Hlavním problémem je tedy výběr parametrů základové půdy pro určení reprezentativních hodnot GDM. Určení některých parametrů a doporučení týkající se napětí i pevnosti poskytuje Eurokód 1997-2.

## 5. KROKY PŘI TVORBĚ NUMERICKÉHO MODELU

Níže je uveden přehled kroků pro tvorbu numerického modelu v souladu s novou generací Eurokódu 7:

- Definování geotechnického problému, konkrétních návrhových situací, fází výstavby, požadavků na posouzení (mezní stavy, mechanismus porušení apod.)
- Odvození výpočetního modelu FEM z GDM. Model FEM reprezentuje zjednodušené znázornění vrstev a geometrie při zachování vlastnosti ovlivňujících stabilitu a deformaci. Podmínky podzemní vody v modelu odrážejí rozhodující návrhové situace. Určení velikosti modelované oblasti a hraničních podmínek. Při 2D analýze výběr reprezentativního profilu.

- Výběr materiálového modelu a typu úlohy. Materiálový model má být vybrán v souladu s typem daného materiálu, napjatostním stavem a požadovanou přesností (např. Mohr-Coulombův model, HS model, Cam clay, Hoek Brown ...). Typ úlohy buď 2D či 3D a způsob řešení – osově symetrická úloha, deformační či napjatostní analýza.
- Určení reprezentativní hodnoty vlastností zemin se zohledněním jejich proměnlivosti, posuzovaného objemu, vlivu oblasti ovlivnění či způsobu porušení)
- Výběr způsobu aplikace dílčích součinitelů (input factoring, output factoring ...). Numerický model musí jasně ukazovat, které parametry jsou upraveny dílčími součiniteli a proč.
- Modelování fází výstavby a vlivu času. Má být modelován realistický postup výstavby zohledňující postupnou aktivaci/deaktivaci, konsolidace a creep (pokud jsou relevantní), změny podzemní vody.
- Provedení ověření ULS a SLS. Před provedením FEM analýzy musí být definovány mezní hodnoty.
- Provedení citlivostní analýzy a ověření spolehlivosti modelu. Výslovně doporučeno v EC7.
- Pokud je požadováno, pak numerický model může být použit jako základ prognózy pro monitoring
- Vypracování dokumentace pro zprávu o geotechnickém návrhu (Geotechnical design report, GDR). Zpráva by měla obsahovat: popis a předpoklady numerického modelu, odvození parametrů, způsob ověření modelu, výsledky a kontrolu jejich věrohodnosti, omezení modelu.



Obrázek 1: Kroky při tvorbě numerického modelu

## 6. ZÁVĚR

Druhá generace Eurokódu 7 poskytuje projektantům pravidla použití numerických metod pro ověřování ULS a SLS v geotechnickém návrhu založená na použití dílčích součinitelů, což je ohromný posun v porovnání s první generací. Tato pravidla vycházejí ze současných postupů, které používají projektanti v praxi a umožňují využití nelineárních materiálových modelů jak pro zeminu, tak i a podpůrné prvky. Umožňuje standardně provést analýzu na základě vlastností redukovanych od začátku (input factoring) s dílčími součiniteli ze sady VC3 (EN 1990: 2023) a sady M2 (EN 1997-1: 2024) či na základě aplikace dílčích součinitelů na účinky působení při následném zpracování výsledků (output factoring) s dílčími součiniteli ze sady VC4 (EN 1990: 2023) a sady M1 (EN 1997-1: 2024). Nové Eurokódy umožňují též ověření obou mezních stavů pomocí numerického modelu obsahujícího více než jednu geotechnickou

konstrukci (komplexní či kontinuální metody). Při modelování komplexních úloh však není často zřejmé, který z výše uvedených přístupů je kritický, je nutné provádět kontrolu oběma přístupy, jak uvádí např. Lees (2019).

I když se z výše uvedeného textu může zdát, že volba použití dílčích součinitelů je pro zaručení vypovídající hodnoty numerického modelu stěžejní, je zde řada dalších významných faktorů ovlivňujících bezpečnost (a i ekonomiku) návrhu pomocí numerických metod. Je důležité, aby projektant pochopil rozdíl mezi predikcí chování, analýzou mezního stavu použitelnosti (SLS) a ověřením mezního stavu únosnosti (ULS). Pro ověření konstrukčních prvků by měly být návrhové síly porovnány s návrhovými únosnostmi vypočítanými pomocí jiných Eurokódů. Dalším faktorem je použití pokročilých materiálových modelů (např. Hoek-Brown, Hardening soil) a aplikace dílčích součinitelů (EC7 neposkytuje žádné konkrétní pokyny). A v neposlední řadě i tvorba samotného numerického modelu na základě podkladů v GDM a GIR (zjednodušení vrstev zeminy a geometrie, úroveň konzervatismu v předpokladech reprezentativních parametrů apod.)

Vývoj druhé generace Eurokódů vedl k významným zlepšením oproti první generaci. Nicméně z hlediska tunelů a podzemních staveb je aplikovatelná pouze na díla budovaná hloubením. Proces standardizace tunelů stále probíhá a první závěry expertní skupiny Společného výzkumného střediska (JRC) Evropské komise jsou publikovány ve dvou zprávách (JRC 2019, 2022). Ve spolupráci s JRC vydali členové CEN TC250/SC7 též soubor pokynů a další rozpracování požadavků uvedených v EC7 (JRC 2024a, 2024b, 2024c). Výše uvedené publikace spolu s pokyny uvedenými k numerickému modelování v revidovaném EC7 poskytují projektantům možnost vytvářet pomocí numerických metod ekonomičtější a bezpečnější návrhy. Používání numerických metod však vyžaduje i zkušenosti, základní pochopení principů mechaniky zemin a zdravý inženýrský úsudek.

## LITERATURA

EAB (2006). Empfehlungen des Arbeitskreises "Baugruben" EAB. 4. Auflage. Berlin: Ernst, 2006.

BAUDUIN, C.; DE VOS, M. and FRANK, R. (2003). ULS and SLS design of embedded walls according to Eurocode 7. In: Proc XIII ECSMGE Vol. 2. Prague: ČGtS/GtS, pp. 41 - 46. ISBN 80-86769-00-3.

BRINGREVE, B.J. and POST, M. (2015). Geotechnical Ultimate Limit State Design using Finite Elements. In: Geotechnical Safety and Risk V. ISBN 978-1-61499-580-7 DOI 10.3233/978-1-61499-580-7-461.

BARTÁK, J. and PRUŠKA, J. (2015). Numerical Models of Tunnels and Eurocode7. In: ITA WTC 2015. Zagreb: HUBITG, ISBN 978-953-55728-5-5.

COLOMBET, G. (2007). Et al. Compatibilité des recommandations AFTES relatives aux revêtements des tunnels en béton avec les Eurocodes: Recommandations du Groupe de Travail n° 29. Tunnels et ouvrages souterrains. pp. 378 - 390. ISSN: 0399-0834.

CSN EN 1997-0 ED.3 (2024). Eurocode Basis of structural and geotechnical design, CAS, Prague

ČSN EN 1997-1 ED.2 (2025). Eurocode 7: Geotechnical design – Part 1: General rules, CAS, Prague

ČSN EN 1997-2 ED.2 (2025). Eurocode 7: Geotechnical design – Part 2: Ground properties, CAS, Prague,

FRANK, R.; BAUDUIN, C.; KAVVADAS, M.; KREBS, O.; ORR, T. (2004). Designers' guide to EN 1997-1: Eurocode 7: Geotechnical design – General rules. London: Thomas Telford.

GARIN, H; BALDWIN, M; REIFFSTECK, P; MADE, K. J. and WUDTKE, R. (2024). Assembling the ground model and the derived values – Guidelines for the application of the 2nd generation of Eurocode 7 – Geotechnical design. Online. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2760/6390378>. [cit. 2026-01-21].

JRC (2024a). Assembling the ground model and the derived values – Guidelines for the application of the 2nd generation of Eurocode 7 – Geotechnical design, Publications Office of the European Union, 2024, <https://data.europa.eu/doi/10.2760/6390378>

JRC (2024b). Implementation of design during execution and service life, Hard, D.(editor), Publications Office of the European Union, 2024, <https://data.europa.eu/doi/10.2760/8383117>

JRC (2024c). Reliability-based verification of limit states for geotechnical structures, Publications Office of the European Union, 2024, <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC139408>

JRC (2022). Prospects for designing tunnels and other underground structures in the context of the Eurocodes. Publications Office of the European Union, 2022 <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC130784>

JRC (2019). Standardisation needs for the design of underground structures. Publications Office of the European Union, 2019. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC115352>

KATSIGIANNIS, G.; SCHWEIGER, H.F.; SIMPSON, B.; FERREIRA, P. and FUENTES, R. (2025). Eurocode 7 and new design challenges using numerical methods with different soil models. In: XVI European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 13-17 Sep 2015. Edinburgh. ICE Publishing. pp. 4277-4282.

LEES, A.S. (2019). Tomorrow's geotechnical toolbox: EN 1997-1:202x Numerical methods. Online. In: Proc. 17th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering 2019. Reykjavik, Iceland. <https://www.issmge.org/publications/publication/tomorrows-geotechnical-toolbox-en-1997-1202x-numerical-methods>. [cit. 2026-01-21].

SIMPSON, B. (2007). Approaches to ULS design – The merits of Design Approach 1 in Eurocode 7. In: First International Symposium on Geotechnical Safety & Risk, Oct. 18–19 2007. Shanghai, Tongji University.

SIMPSON, B. and JUNAIDEEN, S.M. (2013). Use of numerical analysis with Eurocode 7. In: Int. Conf. Advances in Geotechnical Infrastructure. Geotechnical Society of Singapore (GeoSS).. Singapore: Geotechnical Society of Singapore (GeoSS). Research Publishing.

SCHWEIGER, H.F. (2010). Numerical analysis of deep excavations and tunnels in accordance with EC7 design approaches. In: Int. Conference Geotechnical Challenges in Megacities, 7.–10.6. 2010 Vol. 1. Moscow: Geotechnical Society of Singapore (GeoSS). Research Publishing, pp. 206–217.

SCHWEIGER, H.F.; MARCHER, T. and NASEKHIAN, A. (2010). Nonlinear FE-analysis of tunnel excavation - comparison of EC7 design approaches. Geomechanics and Tunnelling. 2010, Vol. 3(1). pp. 61 - 67. ISSN 1865-7362

***Doc. Dr. Ing. Jan Pruška***

***CTU in Prague, FCE, Department of Geotechnics, Prague, Czech Republic***

***Jan.Pruska@cvut.cz***