

# VLIV KONSTITUČNÍHO MODELU NA PREDIKCE DEFORMACÍ OKOLO TUNELU V JEMNOZRNNÝCH ZEMNÁCH

**Mgr. David Mašín, MPhil.**

Karlova Universita, Praha

**Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Ivo Herle**

Technische Universität, Dresden

## **The influence of a constitutive assumption on the predictions of deformations around a tunnel in fine-grained soils**

The paper presents results of FE simulations of a tunnel in stiff fine-grained soils. Constitutive models of different complexity, namely Mohr-Coulomb model, Cam clay model and a hypoplastic model for clays, were calibrated only on the basis of standard laboratory experiments on London clay. Mohr-Coulomb and Cam clay models yield unrealistic results, whereas the hypoplastic model predicts deformations in a good agreement with measurements, due to its ability to predict non-linear pre-failure soil behaviour.

## **1. ÚVOD**

Podzemní konstrukce často zůstávají jedinou možností pro další výstavbu v hustě zastavěných městských oblastech. Přesné předpovědi deformací způsobených ražbou tunelů se tak v současné době stávají jedním z nejvýznamnějších úkolů v geotechnickém inženýrství. Přestože významným, často zanedbávaným problémem zůstává interakce mezi podzemními díly a pozemní zástavbou, predikce deformací způsobených podzemním dílem v „greenfield“ situaci zůstává základním klíčem k řešení celého problému.

Článek shrnuje výsledky MKP analýz zkušebního tunelu pro Heathrow Express. Při výstavbě Heathrow Expressu bylo zvažováno do té doby první využití „metody stříkaného betonu“ (v podstatě se jedná o modifikaci Nové rakouské tunelovací metody) v londýnském jílu. Z toho důvodu bylo přistoupeno k nákladné výstavbě zkušebního tunelu, při němž byly testovány různé způsoby členění výrubu. Bohatá instrumentace a dostupnost dat (Deane a Basset, 1995), spolu s rozsáhlou databází laboratorních experimentů na londýnském jílu (Mašín, 2004), činí zkušební tunel pro Heathrow Express ideálním problémem pro verifikaci numerických metod.

Předkládaný příspěvek si klade za cíl demonstrovat vliv zvoleného konstitučního modelu na MKP predikce. Z toho důvodu řada konstitučních modelů (viz kap. 2) byla kalibrována *pouze* na základě laboratorních triaxiálních zkoušek na Londýnském jílu (nebylo tedy přistoupeno k zpětné analýze, kdy jsou parametry konstitučního modelu dodatečně vyladovány v závislosti na rozdílu mezi předpovědí a měřením). Vzhledem k tomu, že materiál použitý pro laboratorní zkoušky nepocházel přímo z místa ražby tunelu, a vzhledem k přirozené geografické variabilitě londýnského jílu, je nutno na předkládané výsledky pohlížet z kvalitativního, spíše než kvantitativního hlediska.

## **2. KONSTITUČNÍ MODELY**

Pro analýzy byly využity dva „tradiční“ konstituční modely - Mohr-Coulombův model a Modifikovaný Cam clay model, jejichž předpovědi jsou porovnávány s pokročilejším hypoplastickým modelem.

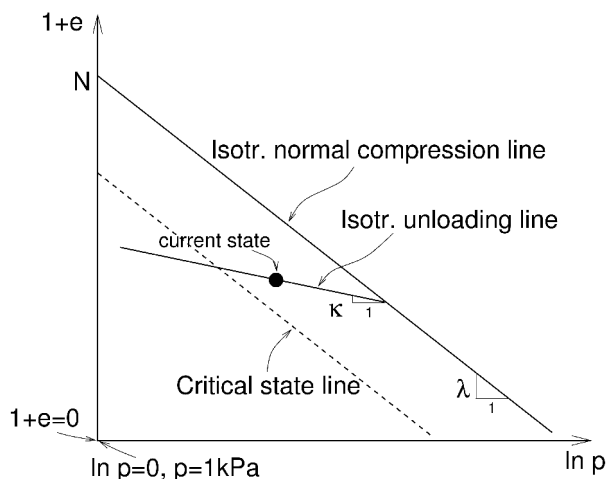
Mohr-Coulombův model (MC) je dozajista nejpoblárnějším konstitučním vztahem v geomechanice. Jeho základní parametry, jako Youngův modul  $E$  a úhel vnitřního tření  $\varphi$ , jsou často uvažovány jako fyzikálně podložené konstanty charakterizující zeminu. Laboratorní experimenty nicméně ukazují, že jejich hodnoty nejsou konstantní, ale závisí i na dalších stavových proměnných, jako je napětí, pórovitost a další. Takovéto závislosti mohou být vystiženy pouze pomocí pokročilejších konstitučních modelů.

Modifikovaný Cam clay model (CC) (Roscoe and Burland, 1968) znamená významný kvalitativní posun vůči MC modelu, vzhledem k tomu že pórovitost (nebo, ekvivalentně, stupeň překonsolidace) je uvažována jako další stavová proměnná. Model umožňuje predikovat kritické stavy a změnu vrcholového úhlu vnitřního tření pro různě hutnou zeminu. Jeho nejmarkantnějším nedostatkem je fakt, že neumožňuje modelovat pozvolný pokles tuhosti s přetvořením (nelinearitu) pro překonsolidovanou zeminu.

Hypoplastický model pro jíly (Mašín, 2005) obohacený o koncept intergranulárních přetvoření (Niemunis a Herle, 1997) (HC) má v sobě jako model CC zahrnut koncept kritických stavů (závislost vrcholového úhlu vnitřního tření a dráhy napětí na ulehlosti). Umožňuje však simulovat také nelinearitu tuhosti zemin s různými stupni překonsolidace. Jeho předpovědi jsou tedy v oboru malých přetvoření podstatně realističtější než předpovědi modelů MC a CC, a to i přes to, že hypoplastický model vyžaduje stejný počet materiálových parametrů (kap. 3).

### 3. KALIBRACE KONSTITUČNÍCH MODELŮ

Jak již bylo zdůrazněno v úvodu, kalibrace všech tří konstitučních modelů proběhla na základě stejných laboratorních experimentů na londýnském jílu. Protože kalibrace modelu MC vychází ze standardních postupů, budeme se v této kapitole věnovat pouze kalibraci pokročilejších modelů CC a HC. Zejména se budeme snažit demonstrovat, že přestože je HC podstatně pokročilejší materiálový model, jeho složitost z pohledu uživatele (kalibrace parametrů a specifikace počátečních podmínek) je ekvivalentní modelu CC.



Obr. 1. Význam parametrů  $N$ ,  $\lambda$  a  $\kappa$  Modifikovaného Cam clay modelu

kde  $e$  je číslo pórovitosti a  $p$  efektivní střední napětí (všechna napětí v článku jsou uvažována jako efektivní). Parametr  $M$  vyznačuje směrnicí čáry kritických stavů v zobrazení  $p:q$  (kde  $q$  je deviatorové napětí) a lze jej vypočítat z kritického úhlu vnitřního tření  $\varphi_c$  pomocí

$$M = \frac{6 \sin \varphi_c}{3 - \sin \varphi_c}$$

#### 3.1 Modifikovaný Cam clay model

Model CC vyžaduje pět materiálových parametrů. Tři z nich ( $N$ ,  $\lambda$  a  $\kappa$ ) je možno kalibrovat na základě standardní zkoušky isotroprního přitížení a odlehčení, další dva ( $G$  a  $M$ ) na základě smykové zkoušky v triaxiálním přístroji. Pro kalibraci modelu tedy dostačují dva vhodně zvolené standardní laboratorní experimenty (větší počet experimentů samozřejmě umožňuje přesnější kalibraci parametrů).

Význam parametrů  $N$ ,  $\lambda$  a  $\kappa$  vyplývá z obr. 1.  $N$  definuje pozici a  $\lambda$  směrnicí čáry prvotního přitížení v zobrazení  $1+e:\ln p$ ,

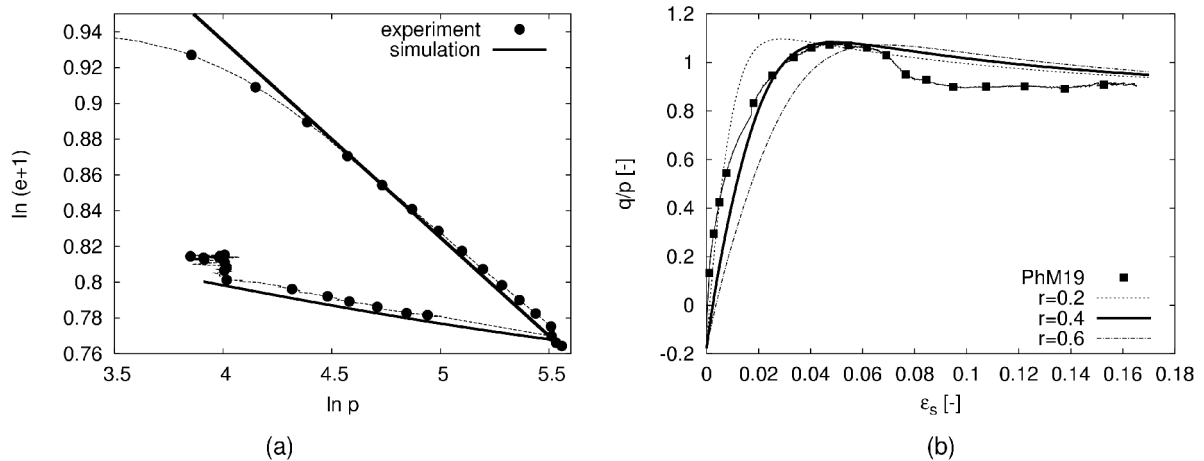
Parametr  $G$  značí smykový modul. Protože model CC uvažuje uvnitř plochy plasticity konstantní smykový modul je kalibrace parametru  $G$  do jisté míry subjektivní. Hodnoty parametrů modelu CC pro londýnský jíł jsou uvedeny v Tab. 1.

Tab. 1. Parametry Modifikovaného Cam clay modelu pro londýnský jíł

$N$	$\lambda$	$\kappa$	$M$	$G$
3,549	0,253	0,066	0,88	5 MPa

### 3.2 Hypoplastický model pro jíly

Stejně jako model CC, hypoplastický model pro jíly vyžaduje v základní verzi pět parametrů. Parametry  $N$ ,  $\lambda^*$  a  $\kappa^*$  vyjadřují pozici a sklon čáry prvotního isotroprního přitížení a odelhčení, v tomto případě v zobrazení  $\ln(1+e):\ln p$ . Kalibrace těchto parametrů pro londýnský jíł je demonstrována v obr. 2a.



Obr. 2. (a) Kalibrace parametrů  $N$ ,  $\lambda^*$  a  $\kappa^*$  a (b) parametru  $r$  hypoplastického modelu (podle Mašina, 2005)

Čtvrtým parametrem hypoplastického modelu je úhel vnitřního tření v kritickém stavu,  $\varphi_c$  a poslední parametr  $r$  kontroluje smykovou tuhost materiálu. Vzhledem k tomu, že model predikuje pozvolný pokles tuhosti s přetvořením, je pro kalibraci parametru  $r$  vhodné použít parametrickou studii jako na obr. 2b. Parametry hypoplastického modelu pro londýnský jíł jsou v Tab. 2. Stejně jako v případě modelu CC, pro kalibraci hypoplastického modelu plně dostačují dva vhodně zvolené standardní laboratorní experimenty.

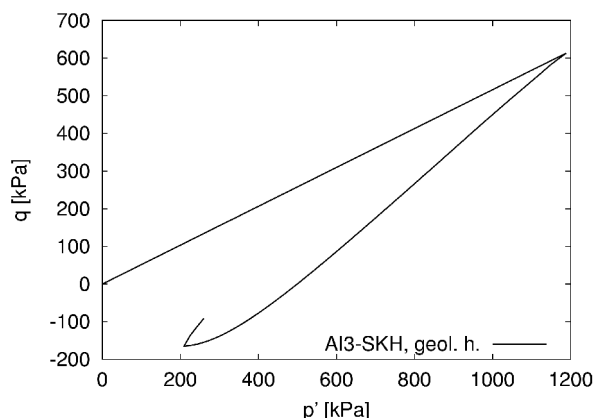
Tab. 2. Parametry hypoplastického modelu pro londýnský jíł (Mašín, 2005)

$N$	$\lambda^*$	$\kappa^*$	$\varphi_c$	$r$
1,375	0,11	0,016	22,6°	0,4

Pro predikci chování v oboru velmi malých přetvoření je nutno hypoplastický model obohatit o koncept intergranulárních přetvoření (Niemunis a Herle, 1997). Kalibrace parametrů pak vyžaduje méně standardní experimenty, při nichž je měřena tuhost při velmi malých přetvoření, např. zkouška s tzv. bender elementy. V případě nedostatku takovýchto experimentů však lze použít standardní hodnoty parametrů (viz Mašín, 2005).

Parametry MC modelu pro londýnský jíł, stejně jako kalibraci dalších pokročilých konstitučních modelů, najde zájemce v článku Mašina a Herleho (2005).

#### 4. POČÁTEČNÍ PODMÍNKY



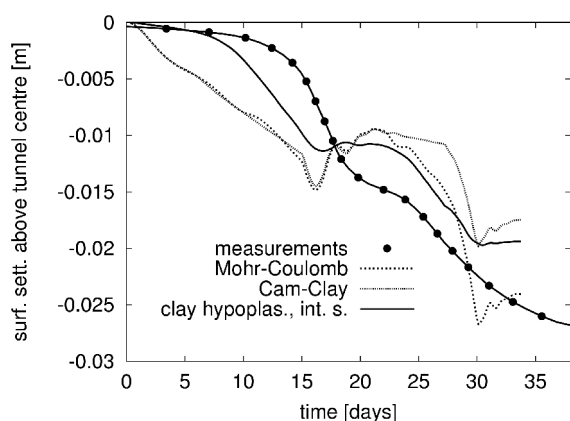
Obr. 3. Dráha napětí při simulované geologické historii londýnského jílu v hloubce středu tunelu.

kPa), a následné sedimentaci kvartérních štěrků (jež způsobují zpětné přitížení londýnského jílu do 100 kPa). K simulaci geologické historie byl využit tzv. AI3-SKH model (Mašín, 2003), který je mimo jiné vhodný pro přesnou předpověď  $K_0$  podmínek. Jedná se o elasto-plastický model s kinematickým zpevněním, založený na teorii kritických stavů.

Dráha napětí během simulované geologické historie je na obr. 3. Vypočtený  $K_0$  stav 1,45 a stupeň překonsolidace  $OCR=4,25$  dobře odpovídají hodnotám udávaným pro londýnský jíl.

#### 5. SIMULACE POMOCÍ METODY KONEČNÝCH PRVKŮ

MKP výpočty byly provedeny v 2D pomocí programu *Tochnog* ([www.feat.nl](http://www.feat.nl)). Tento program umožňuje implementaci pokročilých konstitučních modelů pomocí uživatelských subrutin. Analýzy byly provedeny jako tzv. „konsolidační“ (sdružující deformaci zeminy a proudění podzemní vody). Při předběžných výpočtech bylo prokázáno, že MKP diskretizace (výpočty s hustotou sítě 352 až 1408 elementů) nemá významný vliv na výsledky výpočtu. Ražba tunelu pomocí Nové rakouské tunelovací metody byla v 2D simulována aktivací elementů ostění až po částečné (50%) redukci uzlových sil po obvodu tunelu. Jedná se o standardní metodu, pomocí níž je v 2D zohledněn vliv postupu ražby tunelu.



Obr. 4. Vertikální deformace povrchu v ose tunelu v závislosti na postupu ražby

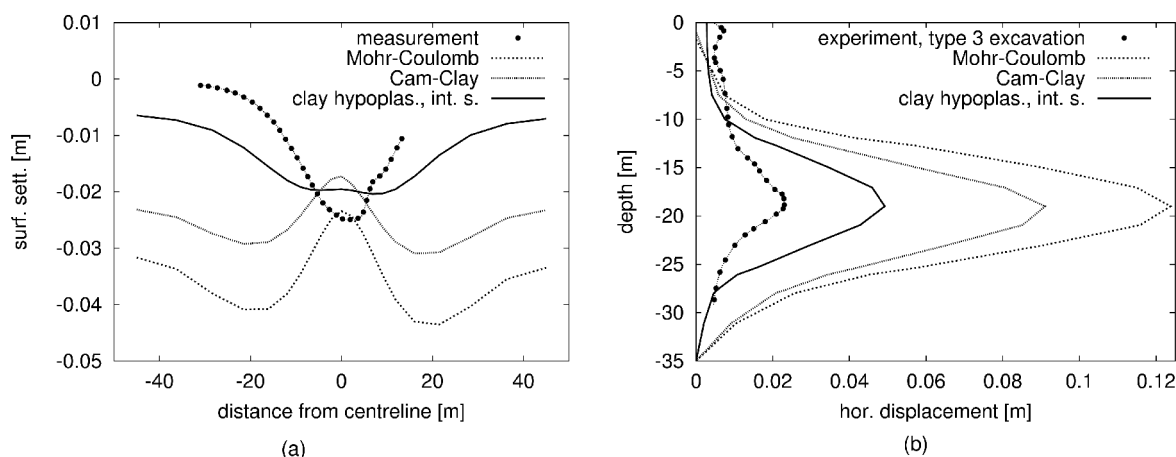
Správné stanovení počátečních podmínek, které významně ovlivňují výsledky výpočtu, představuje důležitou a často zanedbávanou část řešené úlohy. V případě studovaných konstitučních modelů je nutno stanovit počáteční poměr horizontálního a vertikálního napětí ( $K_0$ ) a číslo pórovitosti. Vzhledem k obtížnému měření těchto veličin *in situ* byly počáteční podmínky zjištěny simulováním geologické historie londýnského jílu vhodným pokročilým konstitučním modelem.

Geologická historie londýnského jílu spočívá v jeho sedimentaci (simulované pomocí  $K_0$  konsolidace do vertikálního efektivního napětí 1500 kPa), denudaci (simulované  $K_0$  odlehčením povrchu do 0

Časový průběh deformací povrchu v ose tunelu je zobrazen na obr. 4. Je zřejmé, že vypočtené vertikální deformace nad osou tunelu dobře odpovídají naměřeným datům a jsou přibližně stejné pro všechny tři konstituční modely. Hypoplastický model pouze přesněji predikuje malé deformace v počátečních fázích ražby, což je způsobeno jeho schopností simulovat vysokou tuhost materiálu při velmi malých převořeních.

Závislost výsledku na konstitučním modelu se plně projeví až při studiu profilu vertikálních deformací povrchu v různých vzdálenostech od osy tunelu (obr. 5a) a

profilu horizontálních deformací v různých hloubkách v horizontální vzdálenosti 6,3 m od osy tunelu (obr. 5b).



Obr. 5. (a) Vertikální deformace povrchu vzhledem ke vzdálenosti od osy tunelu, (b) horizontální deformace ve vzdálenosti 6,3 m od osy tunelu v závislosti na hloubce.

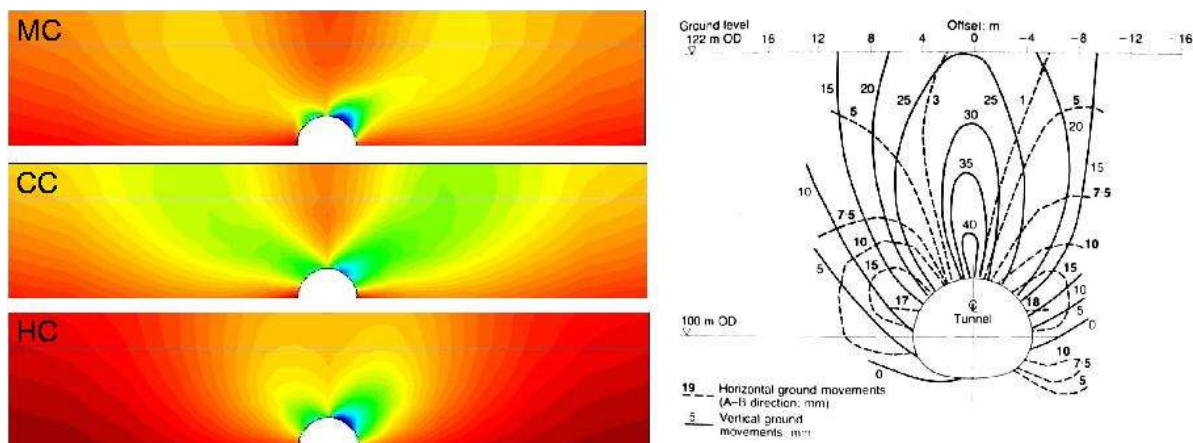
Mohr-Coulombův model vede ke zcela nerealistickým předpovědím vertikálních deformací povrchu (obr. 5a), s většími deformacemi v určité vzdálenosti od osy tunelu, než přímo nad ním. Model Cam clay dává jen minimálně lepší výsledky vzhledem k Mohr-Coulombovu modelu, z čehož je zřejmé, že predikce kritických stavů a povrchového poklesu úhlu vnitřního tření (výhoda modelu CC vůči MC) není pro daný geotechnický problém významná. Na druhou stranu, hypoplastický model predikuje realistický tvar křivky povrchových deformací. I přes to, že HC model predikuje širší oblast zasaženou vertikálními deformacemi než odpovídá měřením, je zřejmé, že predikce vysoké počáteční tuhosti a jejího nelineárního poklesu (výhoda modelu HC oproti CC) je zásadní pro simulování deformačního pole kolem tunelového výrubu. Celkové rozložení vertikálních deformací okolo tunelového výrubu je na obr. 6, z něhož je opět zřejmé, že hypoplastický model vede k nejrealističtějším předpovědím. Obr. 5b znázorňující horizontální deformace v závislosti na hloubce potvrzuje tyto výsledky<sup>1</sup>.

## 6. ZÁVĚR

Výsledky MKP výpočtů prezentované v příspěvku poukazují na významné faktory chování zemín, jež musí být model schopný reprodukovat pro realistické predikce deformačního pole v okolí výrubu. Je ukázáno, že pro chování tunelu v tuhých jílech není významná predikce kritických stavů a povrchového poklesu pevnosti, CC model vede k obdobným výsledkům jako MC model. Zásadní je simulace vysoké počáteční tuhosti zeminy a jejího nelineárního poklesu, kterou ze studovaných modelů umožňuje model hypoplastický. K obdobným závěrům vlivu nelinearity na předpověď chování tunelového výrubu dospěli např. Addenbrooke et al. (1997).

Příspěvek demonstruje, že pokročilé konstituční modely, přestože vedou k významnému vylepšení výsledků výpočtu, nemusí být nutně komplikované z pohledu uživatele. HC model vyžaduje pět materiálových parametrů, tedy stejné množství jako Mohr-Coulombův model. Tyto parametry mohou být kalibrovány na základě dvou standardních laboratorních experimentů. I přesto vede hypoplastický model k výsledkům, jež jsou z kvalitativního i

<sup>1</sup> Na tomto místě je třeba poznamenat, že nerealistické výsledky výpočtu pomocí MC a CC modelu jsou do jisté míry způsobeny vysokou hodnotou  $K_0$  londýnského jílu (viz např. Francius et al., 2005). Při  $K_0 < 1$  by oba modely dávaly realističtější rozsah povrchových deformací, celkové deformační pole by ovšem bylo opět nejlépe simulováno nelineárním hypoplastickým modelem.



Obr. 6. Vlevo pole vertikálních deformací okolo tunelu vypočtené pomocí jednotlivých konstitučních modelů, vpravo měření Deana a Basseta (1994)

kvantitativního hlediska v dobrém souladu s naměřenými hodnotami. Přitom se nepřistoupilo k zpětné analýze, kdy jsou parametry konstitučního modelu dodatečně vyladovány v závislosti na rozdílu mezi předpovědí a měřením.

## 7. PODĚKOVÁNÍ

První autor děkuje za finanční podporu projektu grantu GAUK 331/2004/B-GEO/PřF.

## 8. LITERATURA

- Addenbrooke, T. I., Potts, D. M. a Puzrin, A. M. (1997) The influence of pre-failure soil stiffness on the numerical analysis of tunnel construction. *Géotech.* 47, No. 3, 693-712.
- Deane, A. P. a Basset, R. H. (1995) The Heathrow Express trial tunnel. *Proc. Instn. Civil Engineers* 113. 144-156.
- Francius, J. N., Potts, D. M. a Burland, J. B. (2005) The influence of soil anisotropy and  $K_0$  on ground surface movements resulting from tunnel excavation. *Géotechnique* 55, No. 3, 189-199.
- Mašín, D. (2003) A kinematic hardening critical state model for anisotropic clays. In *Proc. Constitutive Modelling and Analysis of B.V.P. in Geotechnical Engineering*, Napoli, Italy. 253-263.
- Mašín, D. (2004) Laboratory and numerical modelling of natural clays. MPhil Thesis, City University, London.
- Mašín, D. (2005) A hypoplastic constitutive model for clays. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 29, No. 4, 311-336.
- Mašín, D. a Herle, I. (2005) Numerical analyses of a tunnel in London clay using different constitutive models. In *Proc. 5<sup>th</sup> Int. Symposium TC28 Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, Amsterdam, The Netherlands.
- Niemunis, A. a Herle, I. (1997) Hypoplastic model for cohesionless soils with elastic strain range. *Mechanics of Cohesive-Frictional materials* 2, 279-299.
- Roscoe, K. H. a Burland, J. B. (1968) On the generalised stress-strain behaviour of wet clay. In *Engineering plasticity*, Heyman J. & Leckie, A. F. (eds.) Cambridge: CUP, 535-609.

David Mašín, Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užití geofyziky, Karlova Univerzita, Albertov 6, 128 43 Praha 2, Česká republika. Tel: +420-2-2195 1552, Fax: +420-2-2195 1556, email: [masin@natur.cuni.cz](mailto:masin@natur.cuni.cz), [www.natur.cuni.cz/~masin](http://www.natur.cuni.cz/~masin)