



Ústav hydrogeologie, inženýrské
geologie a užitá geofyziky
Karlova Univerzita, Praha

Numerické modelování tunelu raženého Novou rakouskou tunelovací metodou

Přednáška pro předmět Základy matematického
modelování v geomechanice I

David Mašín

Obsah

- Úvod
- Stručná charakteristika řešeného problému
- Nová rakouská tunelovací metoda a její modelování v 2D MKP
- Zjednodušená geometrie, okrajové a počáteční podmínky
- Konstituční modely a jejich kalibrace
- Modelování ražby tunelu s vertikálním členěním
- Výsledky
- Závěry

Úvod

Tato část přednášky si klade za cíl demonstrovat základní kroky nutné pro vypracování důkladné analýzy skutečné geotechnické konstrukce. Zejména je kladen důraz na:

- Modelování 3D efektů ve 2D.
- Správné stanovení počátečních podmínek.
- Výběr a kalibrace vhodného konstitučního modelu, jeho vliv na vypočtené výsledky.

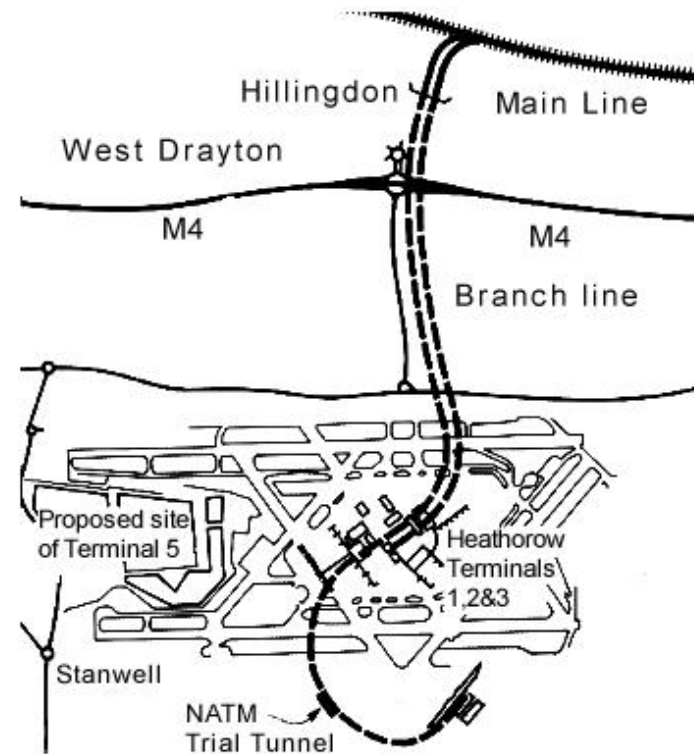
Literatura:

Mašín, D. and Herle, I. (2005). Numerical analyses of a tunnel in London clay using different constitutive models. In Proc. 5th Int. Symposium TC28 Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, Amsterdam, The Netherlands; 595-600.

Mašín, D. and Herle, I. (2005). The influence of a constitutive assumption on the predictions of deformations around a tunnel in fine-grained soils (in Czech). In Proc. 33rd Conf. Zakládání Staveb, Brno, CZ; 207-212.

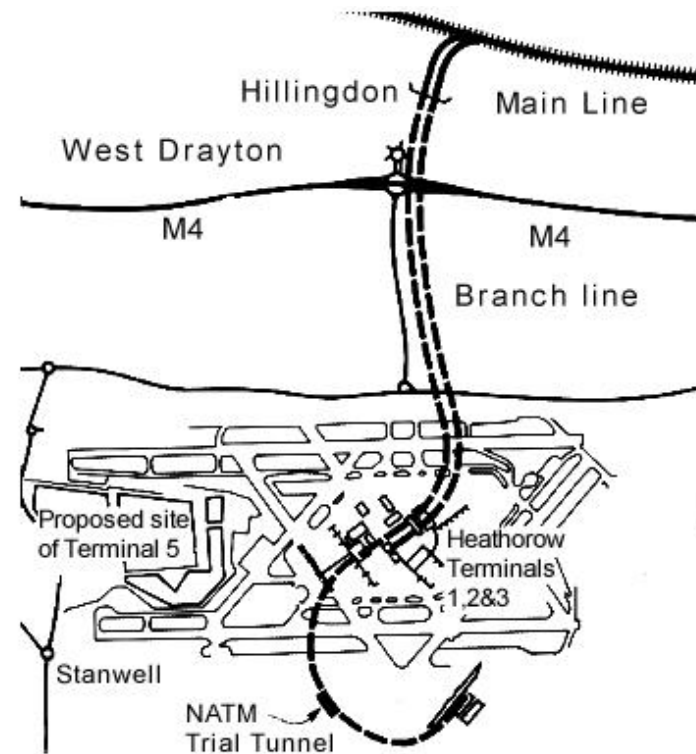
Řešený problém – Heathrow express trial tunnel

- Zkušební tunel pro Heathrow express, který zajišťuje rychlostní vlakové spojení mezi letištěm Heathrow a centrálním Londýnem.



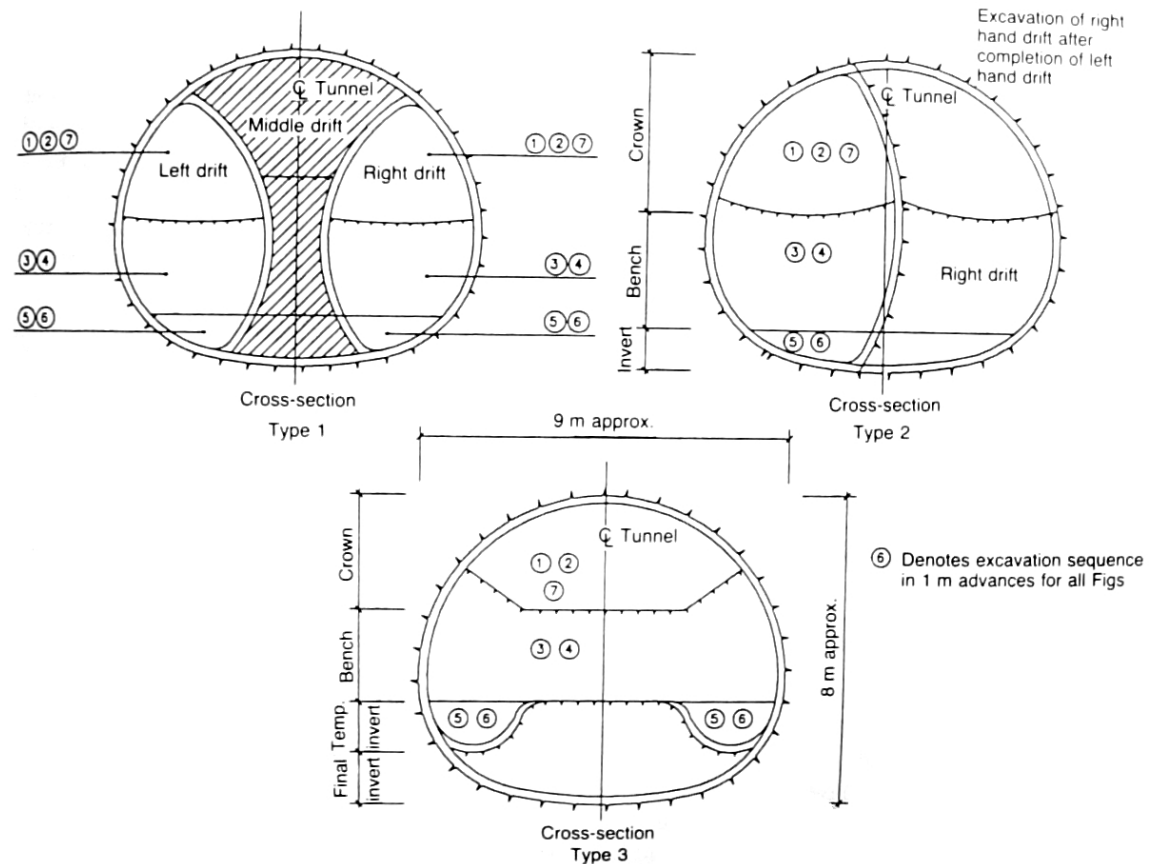
Řešený problém – Heathrow express trial tunnel

- Zkušební tunel pro Heathrow express, který zajišťuje rychlostní vlakové spojení mezi letištěm Heathrow a centrálním Londýnem.
- První využití Nové rakouské tunelovací metody v Londýnském jílu \Rightarrow *zkušební tunel*.
- Detailně instrumentovaný zkušební tunel byl 100 m dlouhý, průměr tunelu 5.6 m.



Členění výrubu

- Hlavní důvod výstavby zkušebního tunelu bylo zvolení vhodného typu členění výrubu. Testovaly se tři typy členění (tj. délka každého byla 33 m).



Členění výrubu

Fotografie z ražby tunelu, vertikální členění výrubu



Aplikace primárního ostění



Těžba levé části

Členění výrubu

Fotografie z ražby tunelu



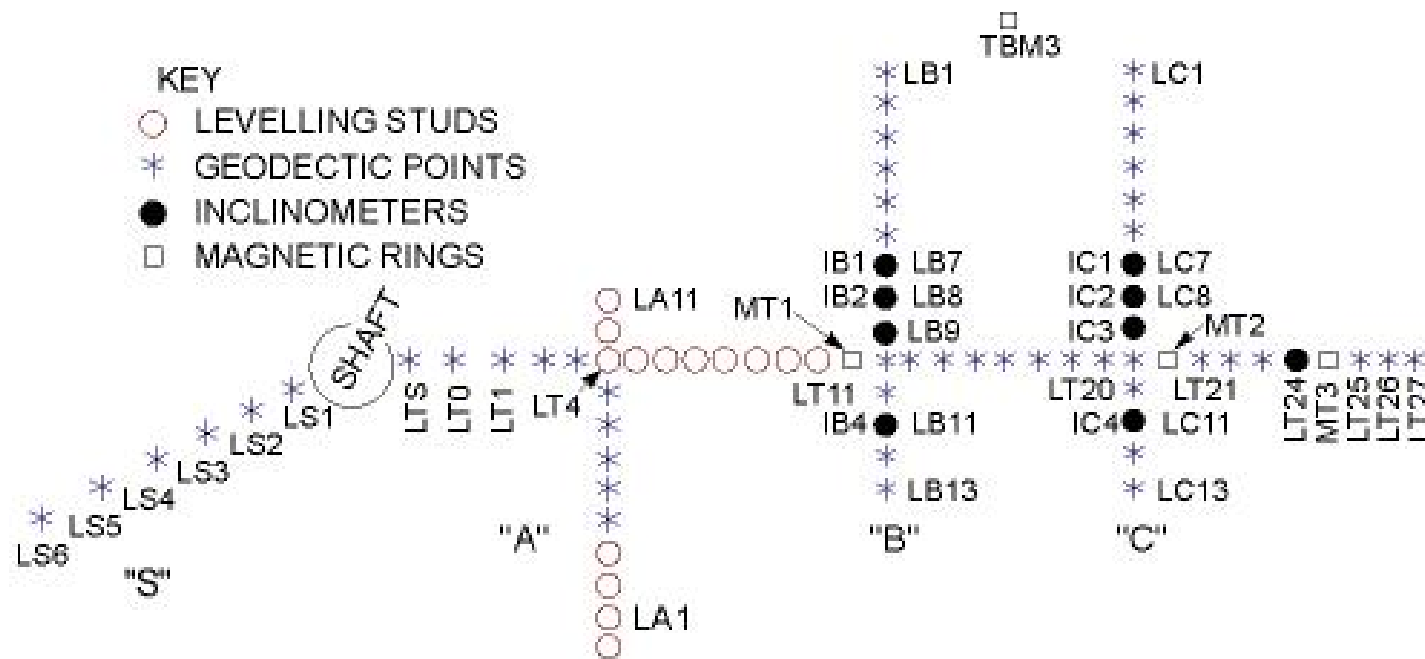
Těžba střední příčky



Hotový zkušební tunel

Instrumentace

Bohatá instrumentace, data z monitoringu publikována (*Deane a Basset, 1995*), bohatá databáze experimentálních dat na Londýnském jílu \Rightarrow ideální objekt pro testování konstitučních a numerických modelů.



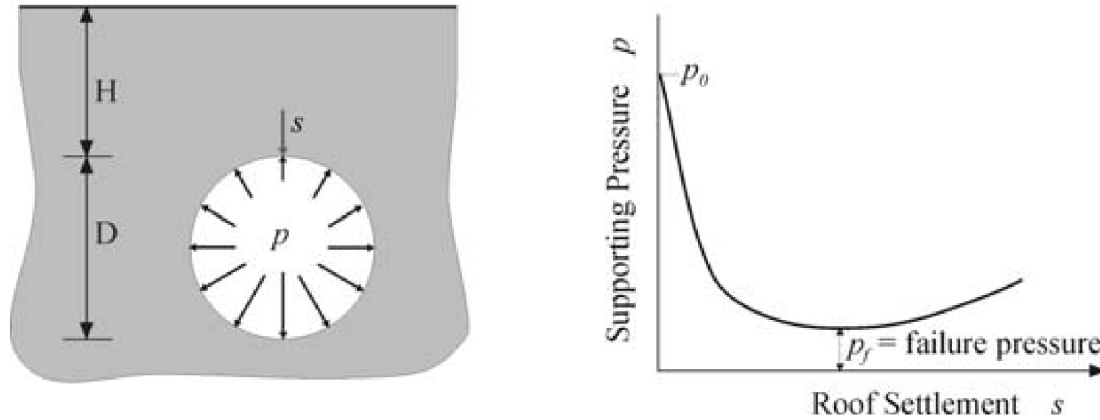
Geologické podmínky

- Osa tunelu se nachází *19 m* pod povrchem terénu.
- Geologická sekvence sestává z:
 - (a) Navážky, přibližně 2m mocné.
 - (b) Štěrky – terasové uloženiny Temže. Mocnost 2 – 4 m.
 - (c) Vrstva Londýnského jílu minimálně 45 m mocná.
- Hladina podzemní vody je přibližně 5 m pod povrchem terénu.

Nová rakouská tunelovací metoda

- Někdy nazývaná *metoda stříkaného betonu*. Vyvíjená mezi lety 1957 a 1965 v Rakousku.
- Zložená na *mobilizaci smykové pevnosti* horninového masivu. Pevnost horninového masivu je využita jako podpora výrubu.
- Pro *mobilizaci smykové pevnosti* je nutná deformace tunelového výrubu. Deformace musí být kontrolovaná. Závislost deformace výrubu na síle namáhající ostění se nazývá *Fenner-Pacherova křivka*.

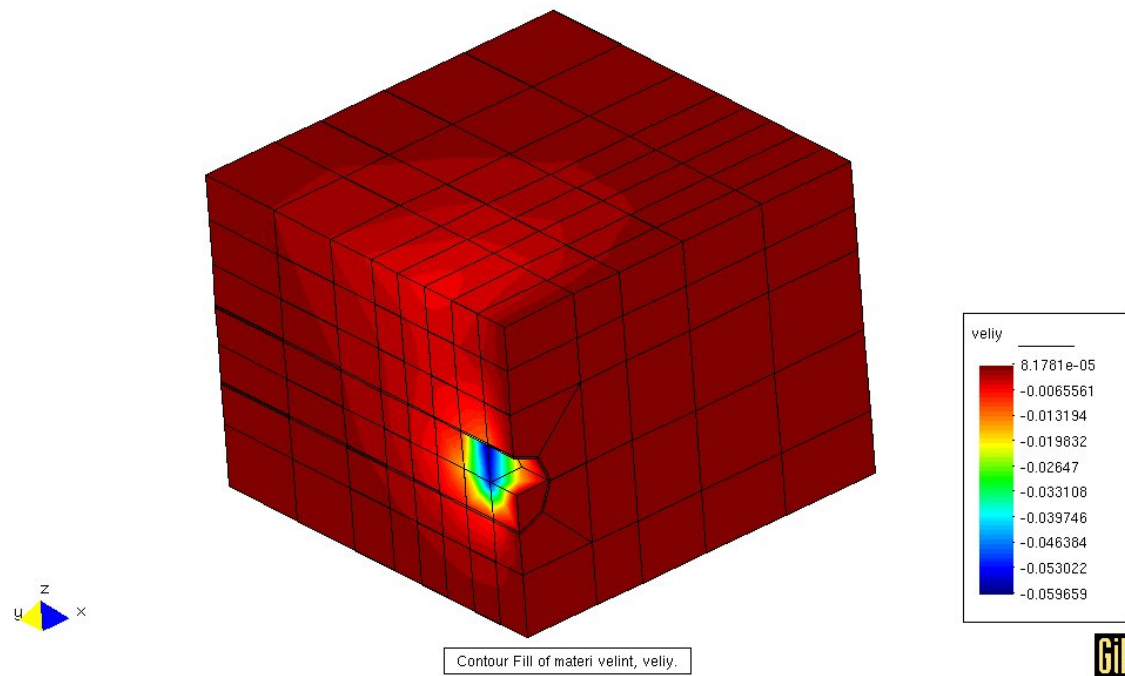
Fenner-Pacherova křivka



- Při NRTM jsou aplikovány dva typy ostění: tzv. *primární ostění* a *sekundární ostění*.
- *Primární ostění* (většinou tvořené stříkaným betonem) je flexibilní, jeho účelem je dočasná podpora výrubu která umožní deformace podle Fenner-Pacherovy křivky tak, aby došlo k *mobilizaci smykové pevnosti* masivu a zatížení finálního (*sekundárního*) ostění bylo pokud možno minimální.

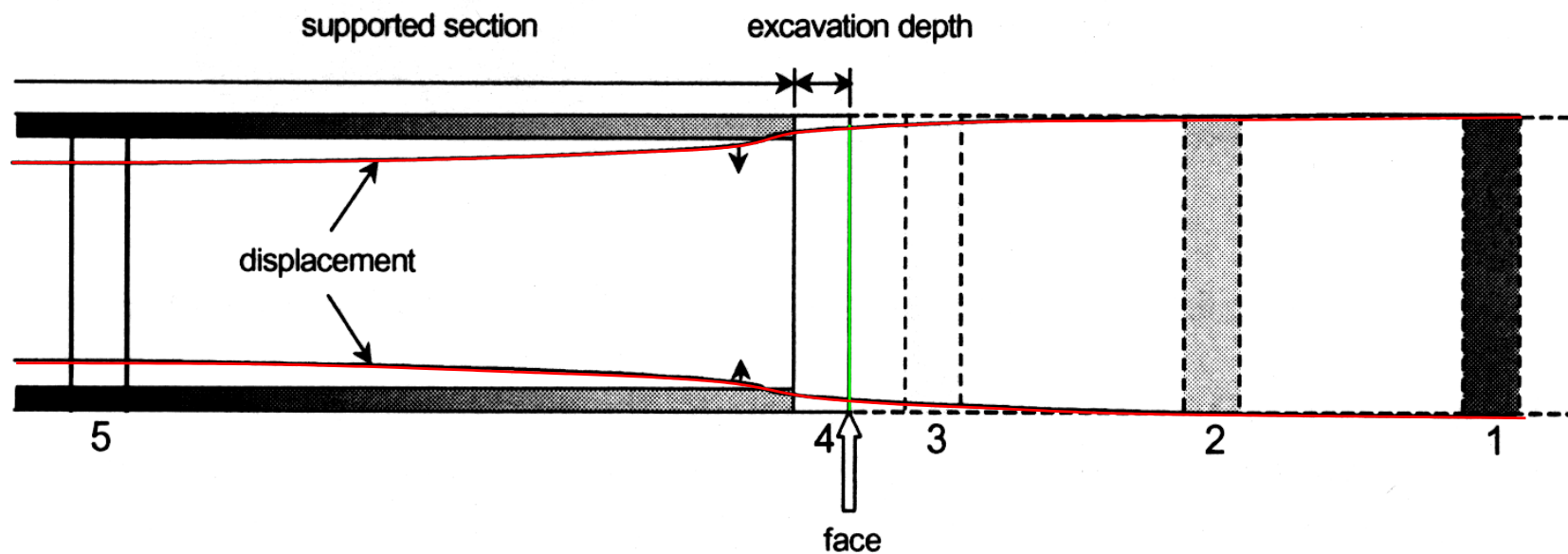
Modelování NRTM v 2D MKP

Při ražbě pomocí NRTM dochází k významným *trojrozměrným efektům*, jež jsou obtížně vystihnutečné v 2D.



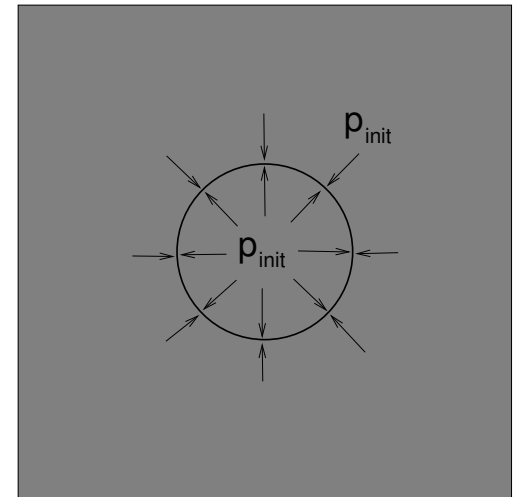
Modelování NRTM v 2D MKP

Metoda modelování NRTM v 2D je založena na faktu, že k deformacím v okolí budoucího výrubu dojde ještě *před aplikací primárního ostění*.



Průběh deformací v okolí výrubu lze vystihnout pomocí tzv. "*stress release method*". Postup je následující:

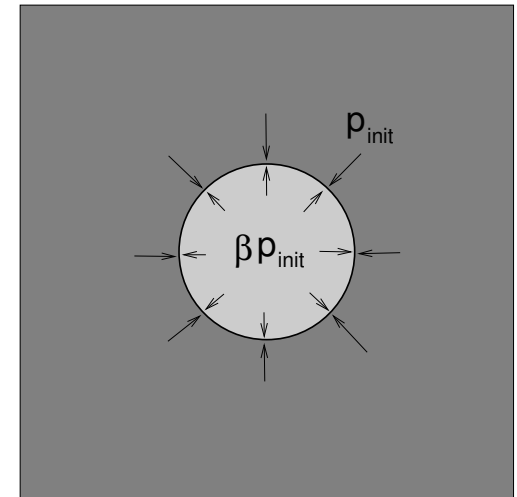
1. Počáteční fáze: *uzlové síly* v okolí tunelového výrubu jsou v rovnováze



Průběh deformací v okolí výrubu lze vystihnout pomocí tzv. "*stress release method*". Postup je následující:

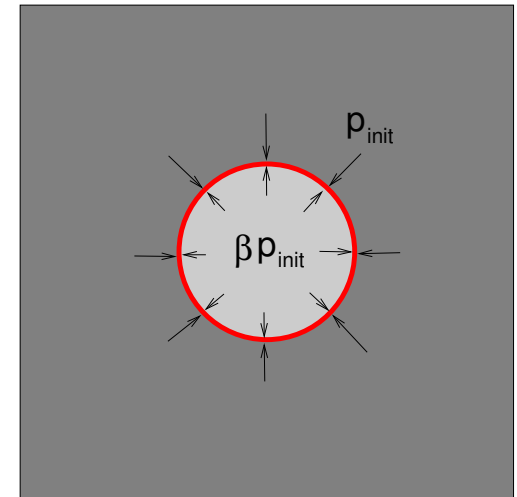
1. Počáteční fáze: *uzlové síly* v okolí tunelového výrubu jsou v rovnováze

2. Redukce uzlových sil v okolí výrubu o faktor β ($p_{(2phase)} = \beta p_{(init)}$). Vypočtené deformace reprezentují deformace ke kterým dojde dříve než je aplikováno primární ostění.



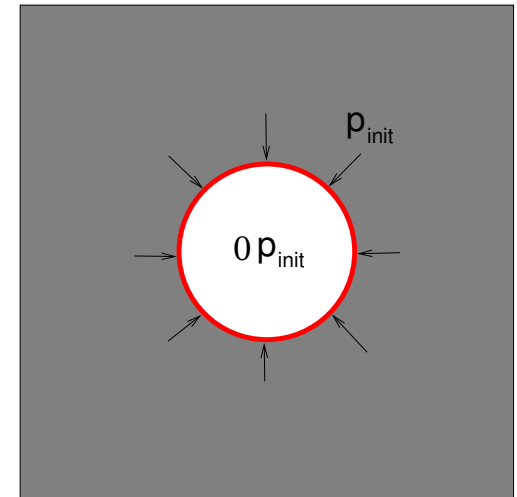
Průběh deformací v okolí výrubu lze vystihnout pomocí tzv. "*stress release method*". Postup je následující:

1. Počáteční fáze: *uzlové síly* v okolí tunelového výrubu jsou v rovnováze
2. Redukce uzlových sil v okolí výrubu o faktor β ($p_{(2phase)} = \beta p_{(init)}$). Vypočtené deformace reprezentují deformace ke kterým dojde dříve než je aplikováno primární ostění.
3. Vygenerování *primárního ostění*



Průběh deformací v okolí výrubu lze vystihnout pomocí tzv. "*stress release method*". Postup je následující:

1. Počáteční fáze: *uzlové síly* v okolí tunelového výrubu jsou v rovnováze
2. Redukce uzlových sil v okolí výrubu o faktor β ($p_{(2phase)} = \beta p_{(init)}$). Vypočtené deformace reprezentují deformace ke kterým dojde dříve než je aplikováno primární ostění.
3. Vygenerování *primárního ostění*
4. Redukce uzlových sil v okolí výrubu na 0. Reprezentuje rovnovážné deformace po dokončení výrubu.



Určení faktoru β

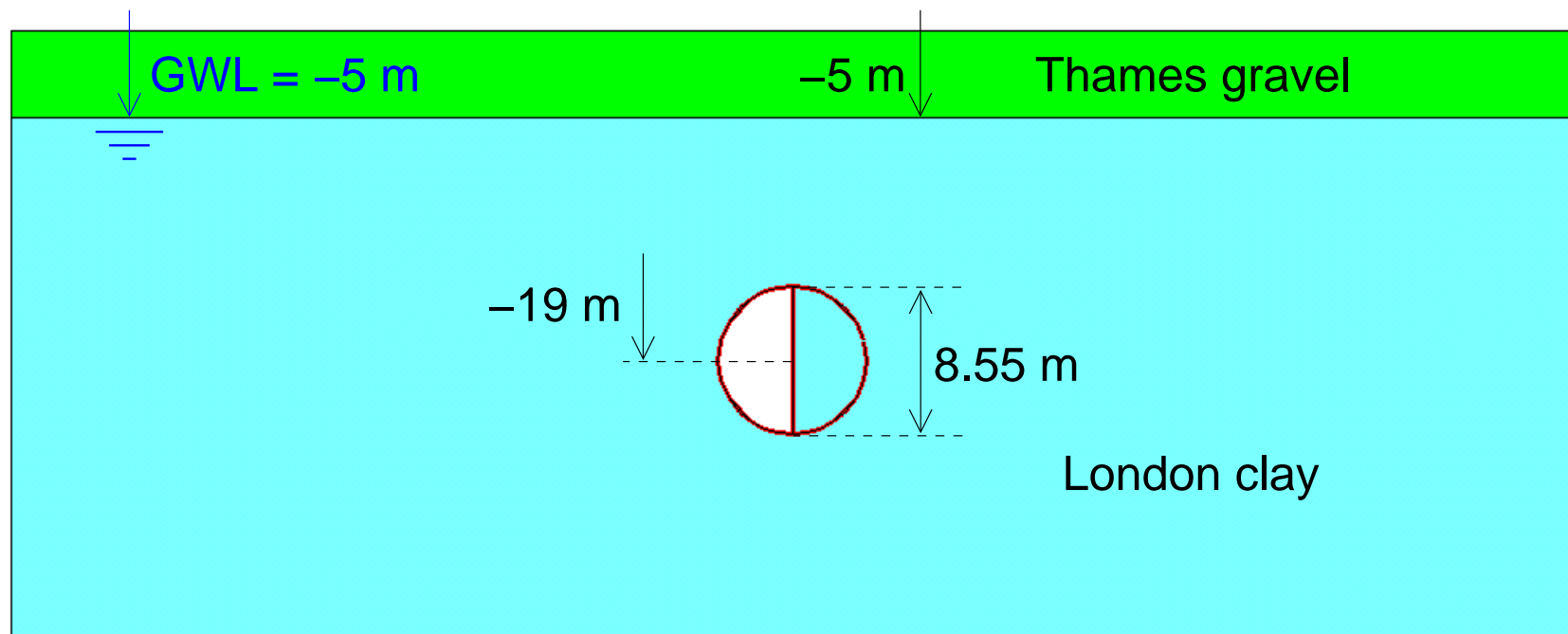
Faktor β ovlivňuje významně výsledky výpočtu, jeho určení přitom není jednoduché. Je závislý na řadě faktorů, jako *vlastnosti zeminy*, *délka výrubu*, *hloubka a průměr* tunelu, *typ členění výrubu* atd.

- Jediná správná metoda určení faktoru β je porovnání 2D výpočtů s ekvivalentními výpočty ve 3D.
- Často používanou metodou je porovnání 2D výpočtů se skutečným měřením. V tom případě jsou ale ignorovány nepřesnosti vzniklé volením špatného konstitučního modelu či parametrů zeminy.

Ukazuje se, že faktor β významně ovlivňuje výsledky *kvantitativně* (velikost deformací). Jeho *kvalitativní* vliv na výsledky (rozložení deformací v okolí výrubu) je méně významný.

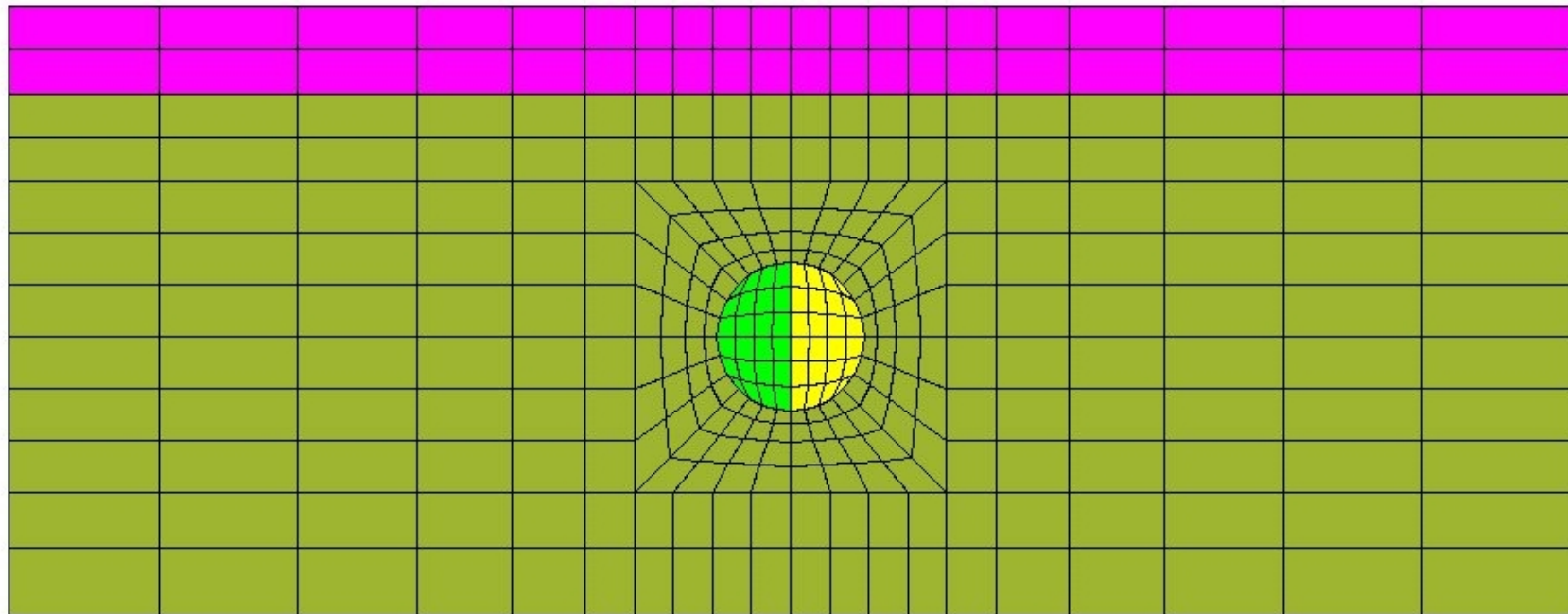
Zjednodušení geometrie a geologických podmínek

2 m navážek modelovány jako štěrk terasy Temže. Tvar vertikálního členění výrubu (nejprve levá, pak pravá část) aproximován pomocí dvou půlkruhů.



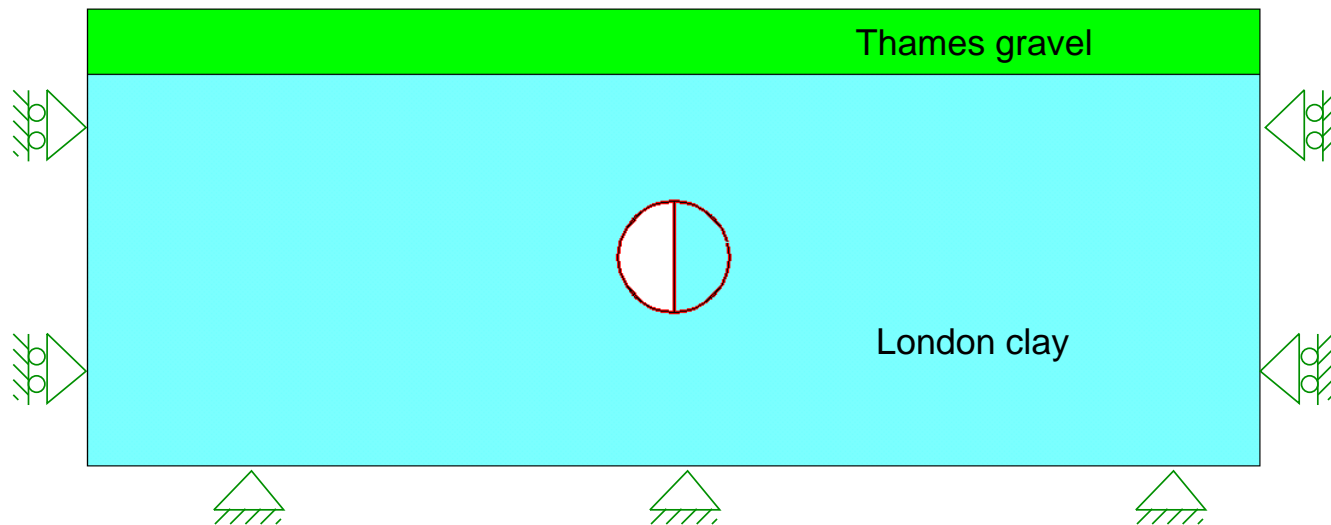
MKP síť

Oblast byla rozdělena na 352 obdélníkových elementů s konstantním přetvořením, 1408 gaussových integračních bodů a 385 uzlů.

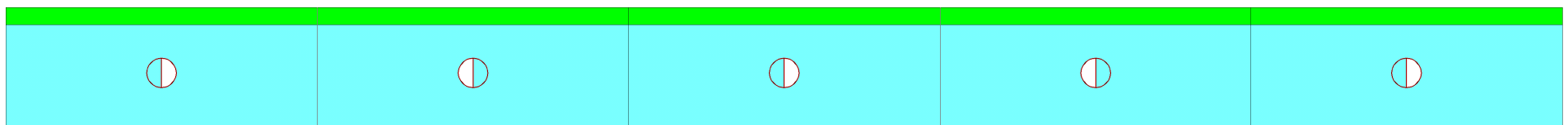


Okrajové podmínky

Využity " *standardní geotechnické okrajové podmínky* "



⇒ Ve skutečnosti řešený problém:



Počáteční podmínky

Je nutno určit počáteční rozdělení *Cauchyho napětí* σ a *číslo pórovitosti* e .

Obě veličiny je možno měřit při geotechnickém průzkumu, nicméně tato měření jsou často opomíjena. Data pro Heathrow nejsou k dispozici.

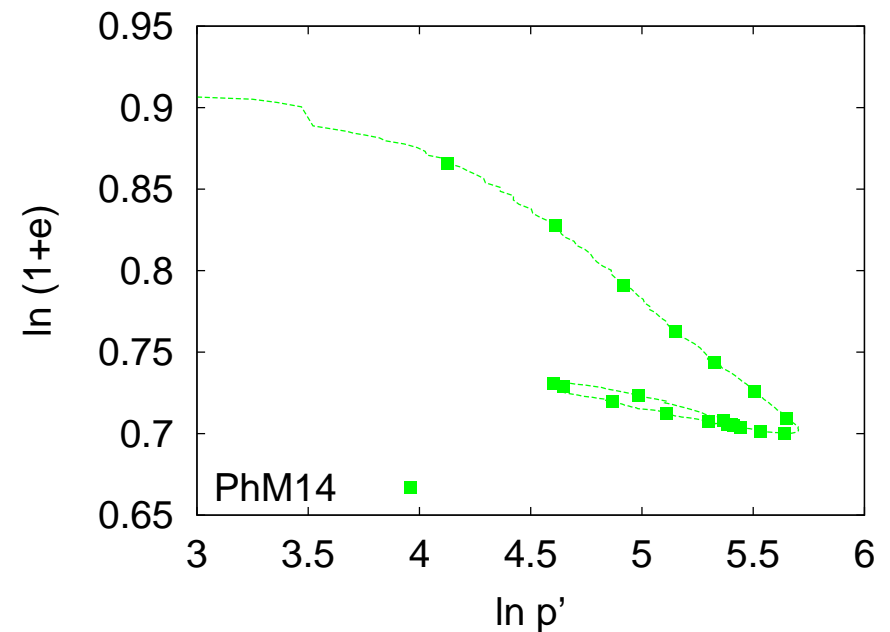
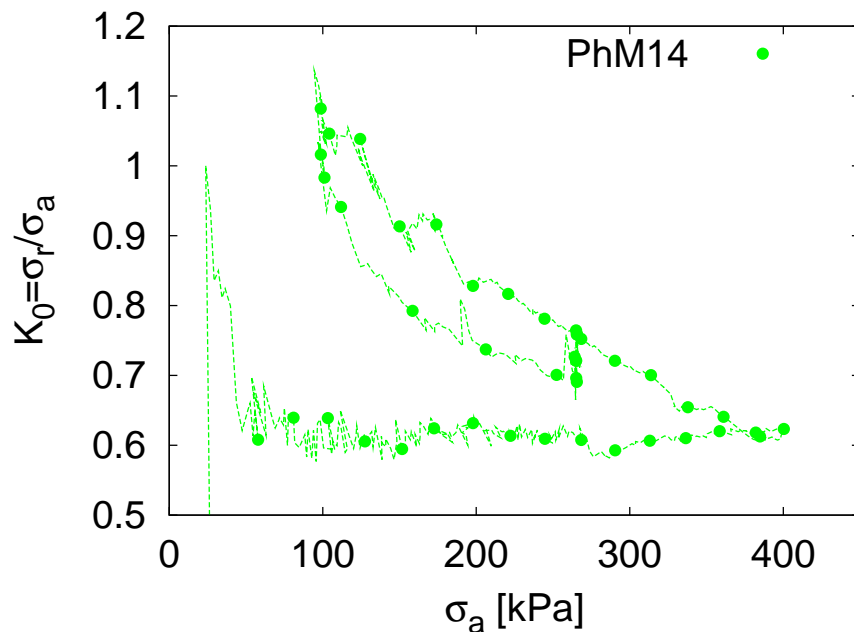
⇒ Simulace *geologické historie* pomocí *vhodného konstitučního modelu*.

Geologická historie na Heathrow sestává ze *sedimentace* Londýnského jílu v mořském prostředí, jež vedla k zatížení současného povrchu vertikálním napětím 1500 kPa. Dále následovala *eroze* nadložních vrstev a *sedimentace* 5 m vrstvy terasových štěrků.

Konstituční model pro K_0 podmínky

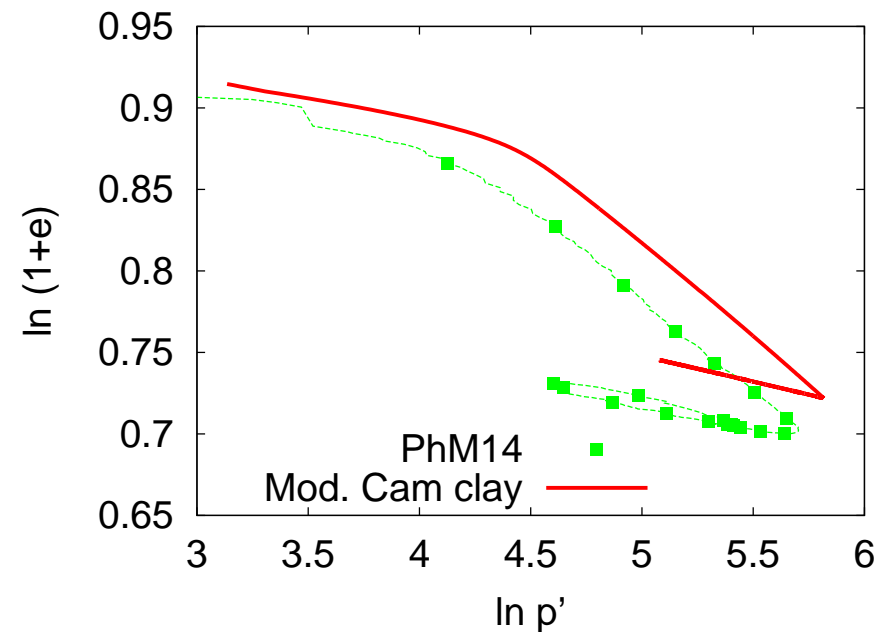
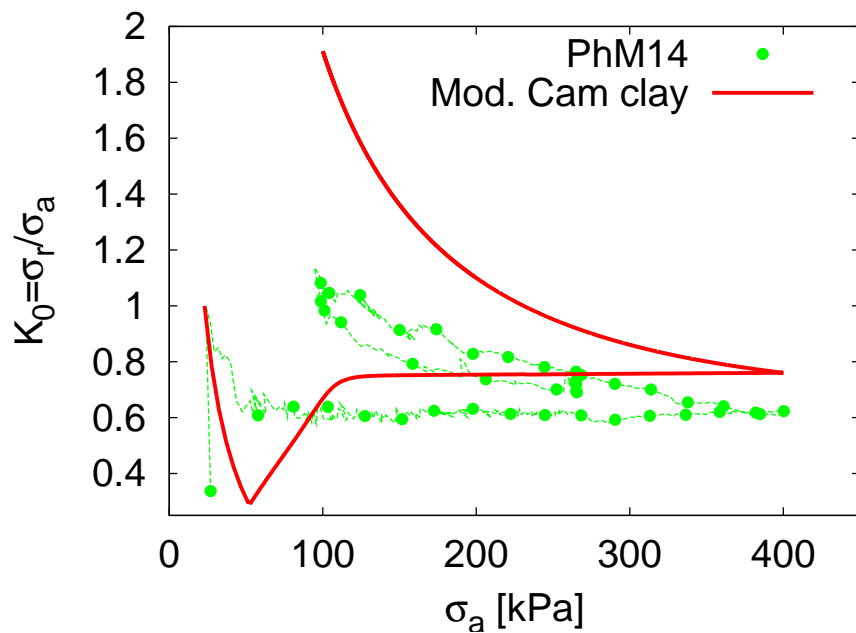
⇒ Vzhledem ke geografickému rozsahu Londýnského jílu je možno geologickou historii simulovat pomocí *edometrického* (K_0) stlačení (sedimentace), odlehčení (eroze) a přetížení (sedimentace štěrků).

K_0 experiment na Londýnském jílu (proveden v triaxiálním přístroji s lokálními snímači radiálního přetvoření)



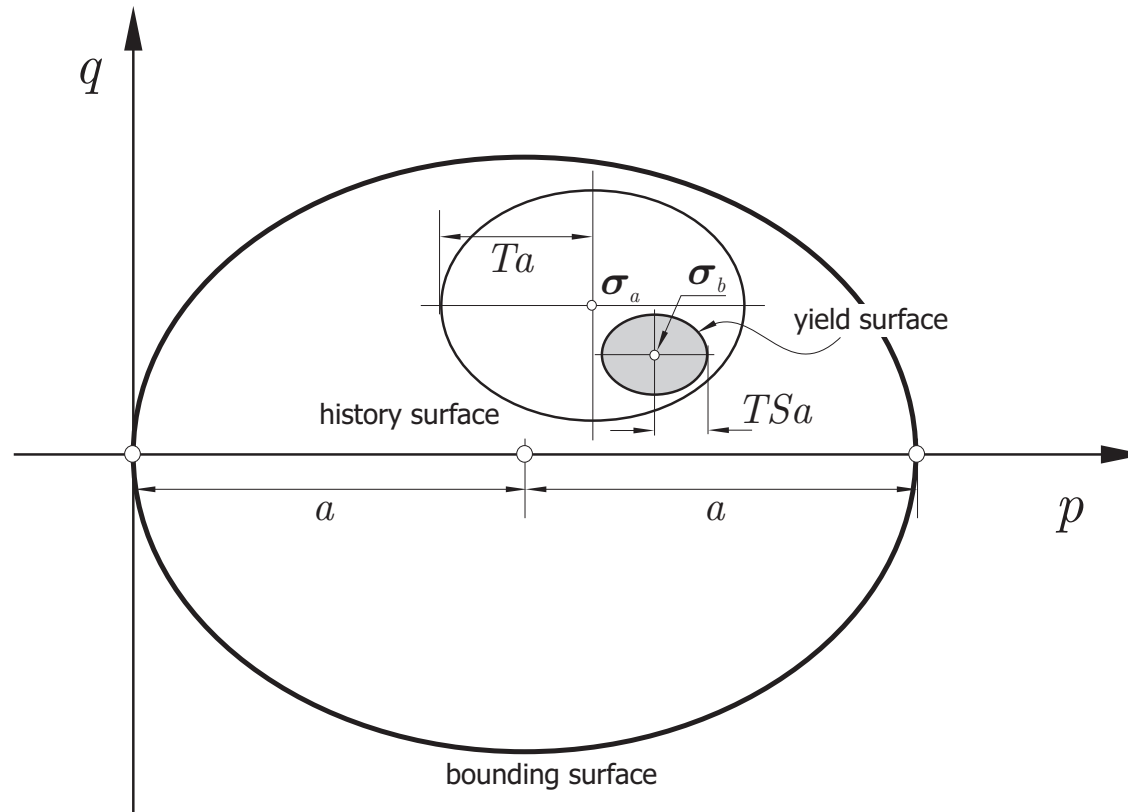
Konstituční model pro K_0 podmínky

Správná volba konstitučního modelu je zásadní pro generování *realistických počátečních podmínek*. Pro ilustraci předpověď laboratorní K_0 zkoušky pomocí modelu *Cam jílu*:



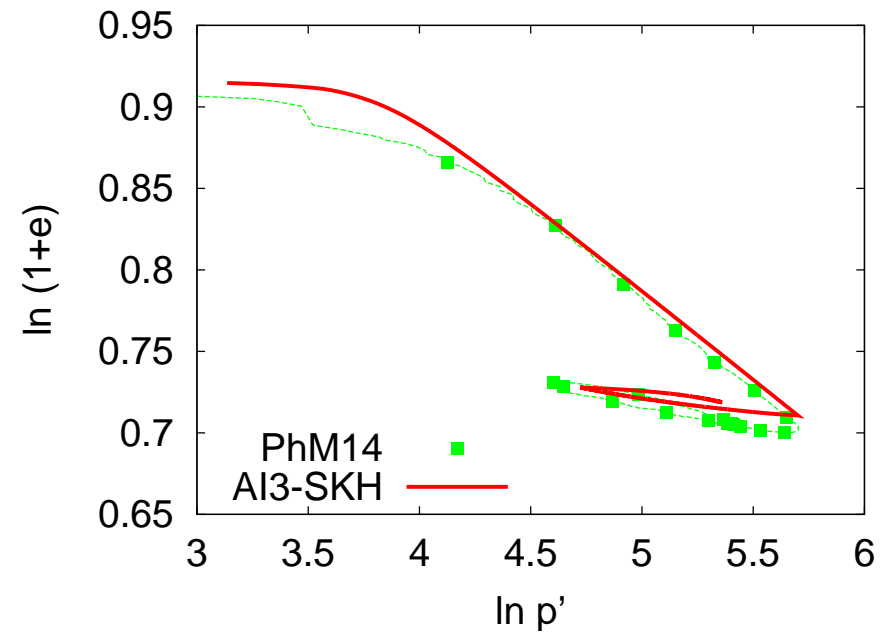
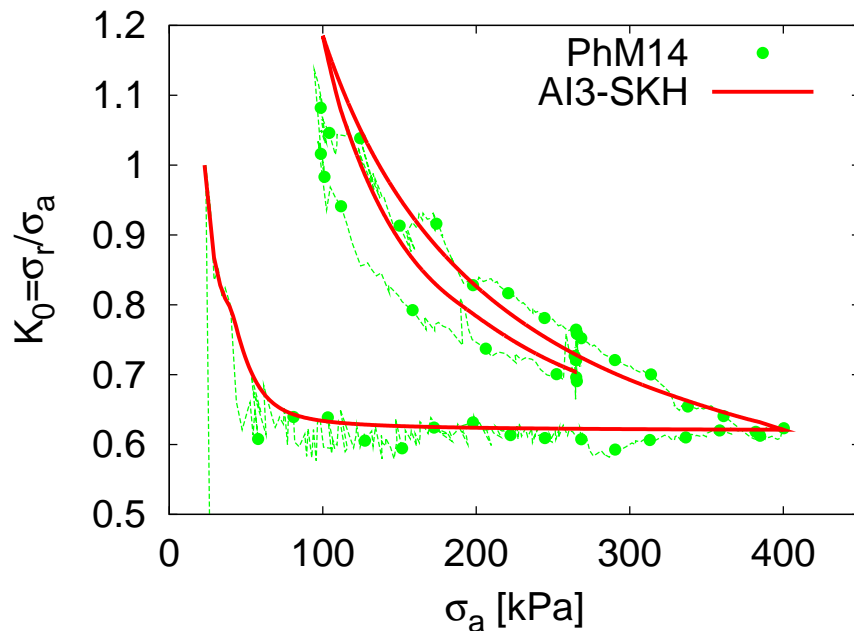
Konstituční model pro K_0 podmínky

Pro simulaci využít tzv. *AI3-SKH model* (AnIsotropic three Surface Kinematic Hardening). Jedná se o kinematický model s plastickým potenciálem odlišným od plochy plasticity (non-associated plasticity).



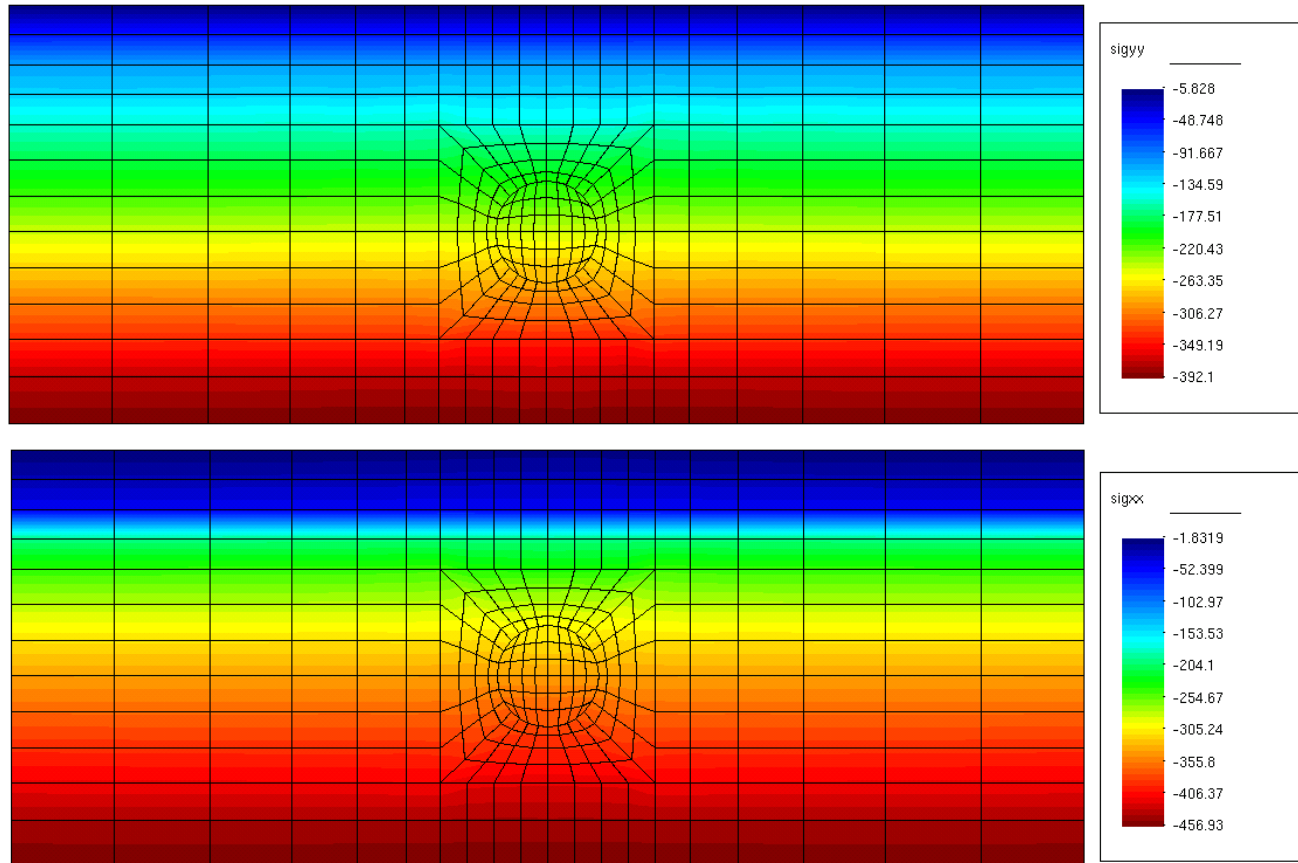
Konstituční model pro K_0 podmínky

Předpověď K_0 zkoušky pomocí modelu *AI3-SKH*.



Modelované počáteční podmínky

Výpočet pomocí *AI3-SKH* modelu vedl v hloubce osy tunelu k $K_0 = 1.45$ a $OCR = 4.25$, což odpovídá hodnotám udávaným pro Londýnský jíl.



Konstituční modely

Simulace zkušebního tunelu pro Heathrow express probíhala mimo jiné z důvodu vyhodnocení *vlivu konstitučního modelu* na MKP predikce. Využity modely různé pokročilosti: *Mohr-Coulombův model*, model *Cam jílu* a *hypoplastický model* pro jíly.

- *Mohr-Coulombův model (MC)*: Nejpoužívanější model v geomechanice. Jeho parametry (jako E , φ) jsou často mylně považovány za základní konstanty charakterizující zeminu.
- *Cam clay (CC)*: Kvalitativní posun vůči MC, pórovitost jako stavová proměnná, koncept kritických stavů. Nemodeluje nelinearitu pro překonsolidovanou zeminu.
- *Hypoplastický model pro jíly (HC)*: Parametry odpovídají CC modelu, modeluje nelineární chování zeminy.

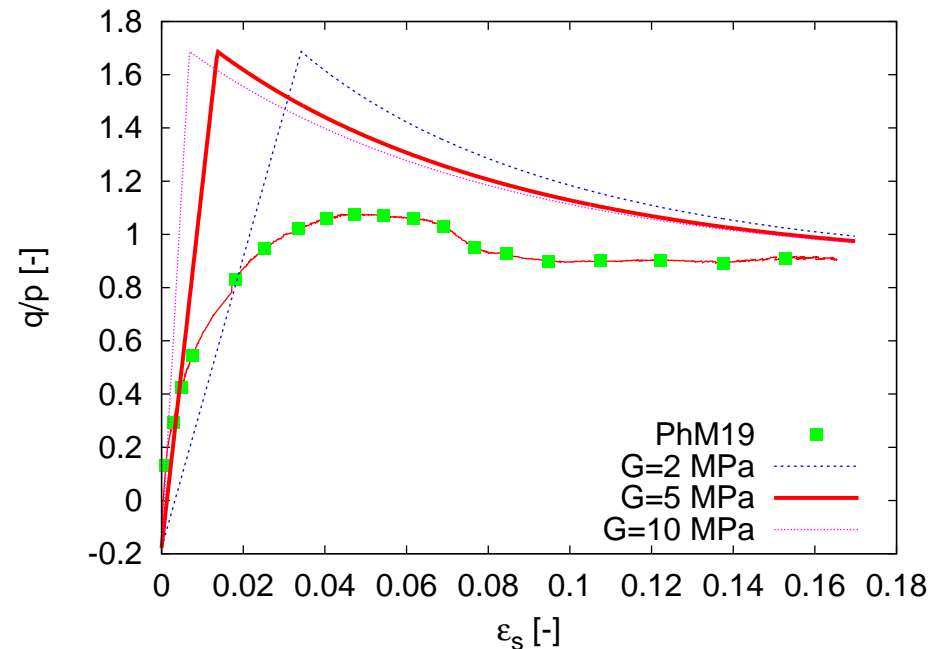
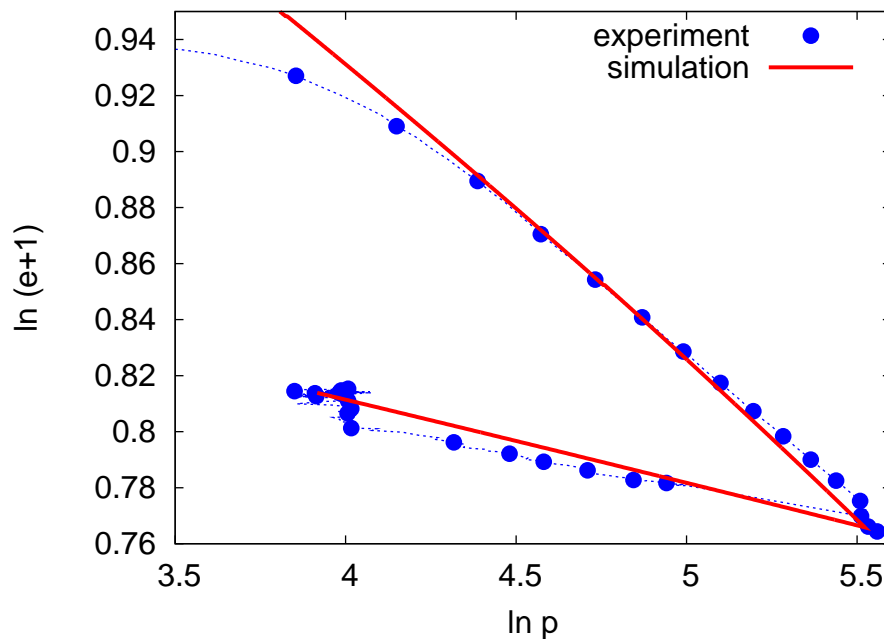
Kalibrace konstitučních modelů

Všechny zvolené konstituční modely byly kalibrovány na základě *shodných* laboratorních experimentů na Londýnském jílu. Všechny také vyžadují stejný počet materiálových parametrů (5)

⇒ KVALITNĚJŠÍ KONSTITUČNÍ MODEL NEMUSÍ NUTNĚ VYŽADOVAT SLOŽITĚJŠÍ KALIBRACI!

Model Cam jílu

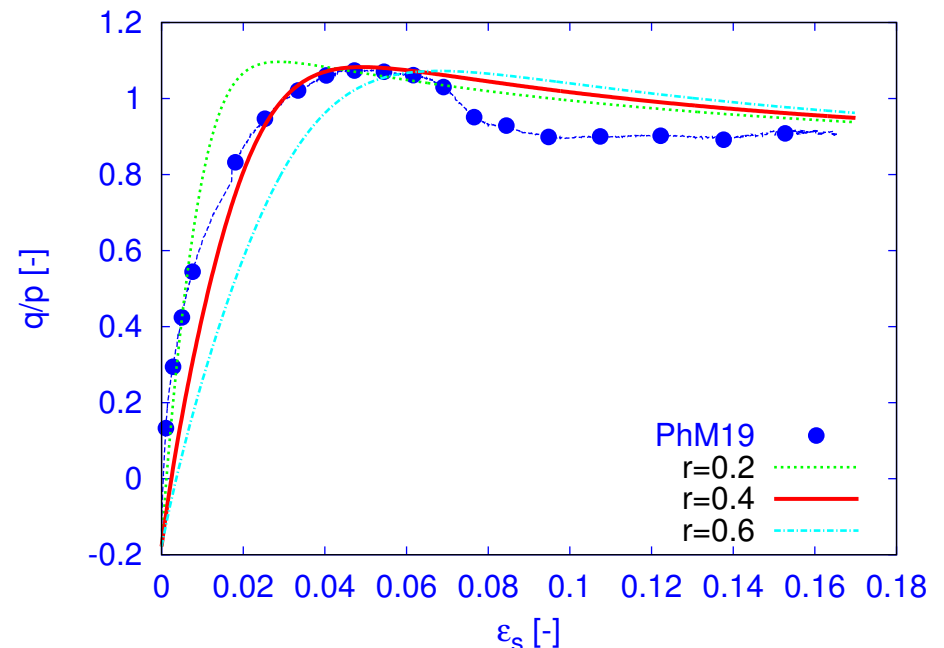
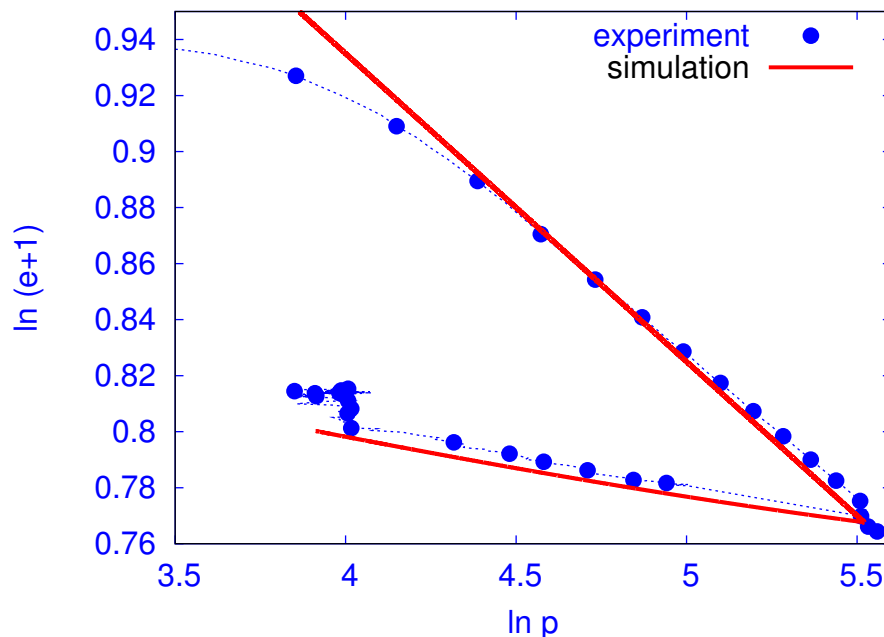
Tři (N , λ a κ) definují pozici a sklon čáry normální konsolidace a odlehčení (\Rightarrow **JEDINÁ TRIAXIÁLNÍ (ČI EDOMETRICKÁ) ZKOUŠKA**)



M odpovídá kritickému úhlu vnitřního tření, smykový modul G kontroluje smykovou tuhost materiálu (viz ↗) (\Rightarrow **JEDINÁ TRIAXIÁLNÍ SMYKOVÁ ZKOUŠKA**)

Hypoplastický model

Tři (N , λ^* a κ^*) definují pozici a sklon čáry normální konsolidace a odlehčení (\Rightarrow **JEDINÁ TRIAXIÁLNÍ (ČI EDOMETRICKÁ) ZKOUŠKA**)



φ_c je kritický úhel vnitřního tření, parametr r kontroluje smykovou tuhost materiálu (viz ↗) (\Rightarrow **JEDINÁ TRIAXIÁLNÍ SMYKOVÁ ZKOUŠKA**)

Kalibrace konstitučních modelů

Hypoplastický model byl dále obohacen o tzv. *koncept intergranulárních přetvoření*, jež umožňuje korektně simulovat pokles tuhosti v oblasti velmi malých přetvoření.

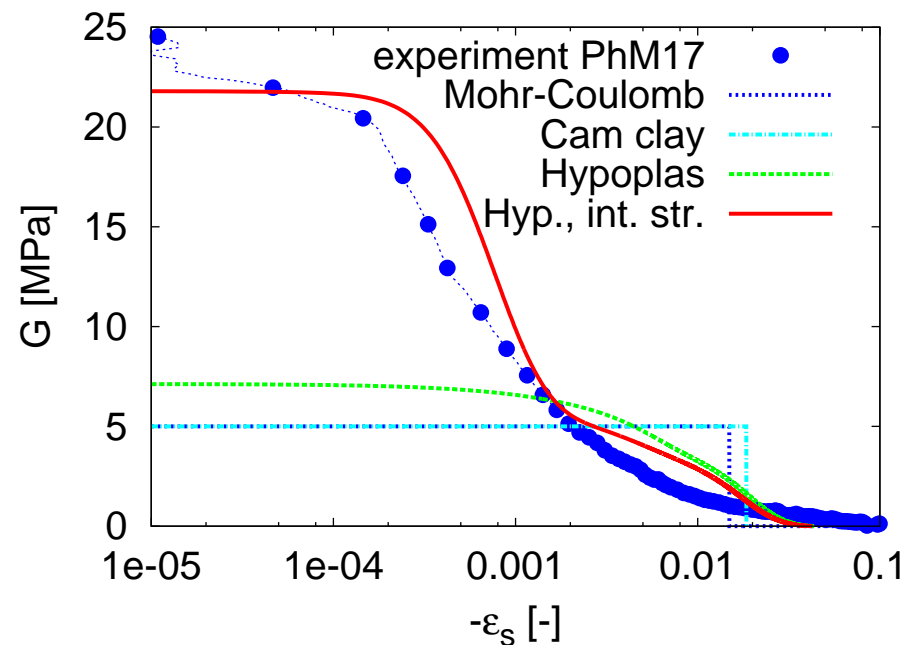
Mohr-Coulombův model

Kalibrace Mohr-Coulombova modelu proběhla tak, aby v hloubce osy tunelu předpovídal *stejnou tuhost* jako model Cam jílu. Úhel vnitřního tření odpovídá kritickému úhlu vnitřního tření.

Nelinearita tuhosti

Jak se ukáže později, správné simulování *vysoké počáteční tuhosti* a jejího poklesu s přetvořením je pro daný problém velmi důležité.

Ze studovaných modelů ji predikuje *pouze hypoplastický model*:

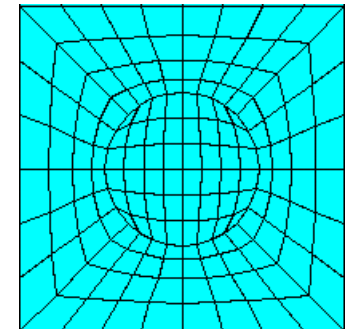


Modelování ražby tunelu

- Skutečná ražba probíhala ve *dvou fázích*, pravá polovina tunelu byla ražena až poté, co byla ražba levé poloviny dokončena (délka 30 m). Ražba levé části trvala 21 dní, pravé části 12 dní. Monitorovaný profil byl přibližně ve 2/3 raženého úseku.
 - Byl využit faktor $\beta = 50\%$.
 - Byla provedena tzv. *sdružená (konsolidační)* analýza. Při ní je uvažována propustnost zeminy, která ovlivňuje disipaci pórových tlaků, ty způsobují změnu efektivního napětí jež vede k deformacím zeminy.
- ⇒ Přestože jsou využité konstituční modely *časově nezávislé* (reologie není uvažována), v analýze musí být uvažován skutečný čas.

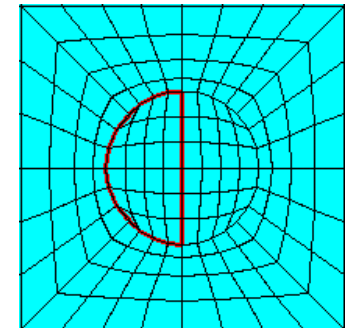
Modelování ražby tunelu

1. Redukce uzlových sil podél levé části na $\beta = 50\%$ během 15 dnů.



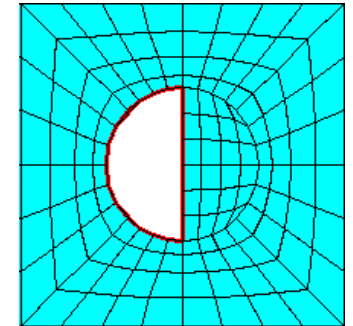
Modelování ražby tunelu

1. Redukce uzlových sil podél levé části na $\beta = 50\%$ během 15 dnů.
2. Generování ostění kolem levé části.



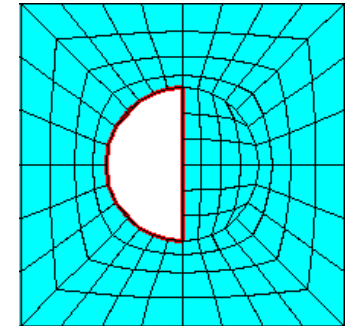
Modelování ražby tunelu

1. Redukce uzlových sil podél levé části na $\beta = 50\%$ během 15 dnů.
2. Generování ostění kolem levé části.
3. Redukce uzlových sil podél levé části na $\beta = 0\%$ během 6 dnů.



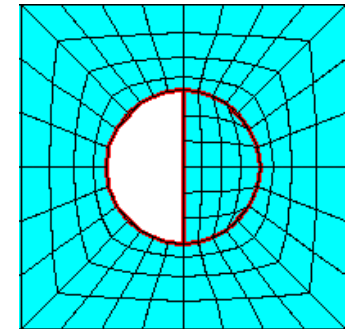
Modelování ražby tunelu

1. Redukce uzlových sil podél levé části na $\beta = 50\%$ během 15 dnů.
2. Generování ostění kolem levé části.
3. Redukce uzlových sil podél levé části na $\beta = 0\%$ během 6 dnů.
4. Redukce uzlových sil podél pravé části na $\beta = 50\%$ během 6 dnů.



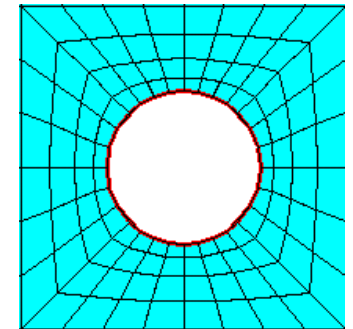
Modelování ražby tunelu

1. Redukce uzlových sil podél levé části na $\beta = 50\%$ během 15 dnů.
2. Generování ostění kolem levé části.
3. Redukce uzlových sil podél levé části na $\beta = 0\%$ během 6 dnů.
4. Redukce uzlových sil podél pravé části na $\beta = 50\%$ během 6 dnů.
5. Generování ostění kolem pravé části.



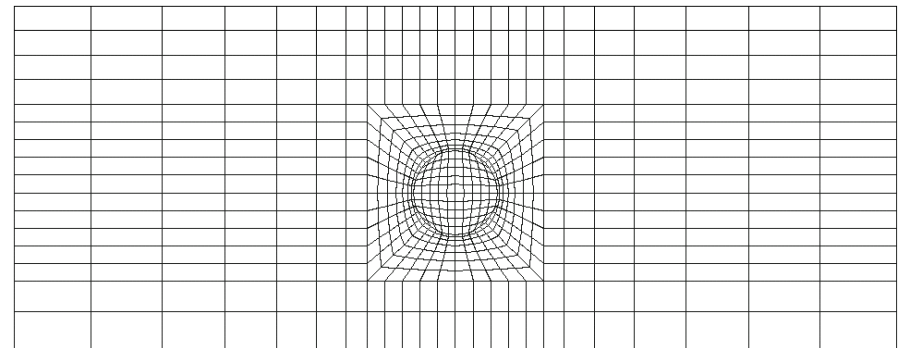
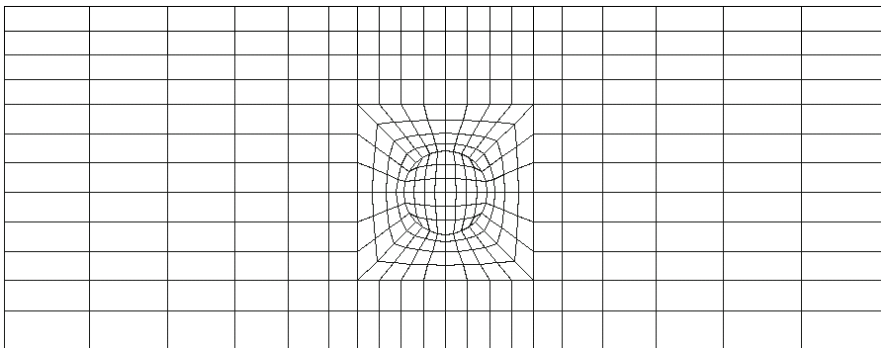
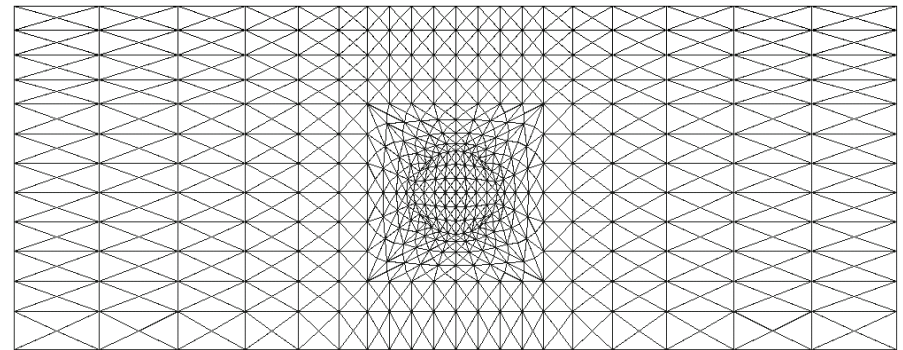
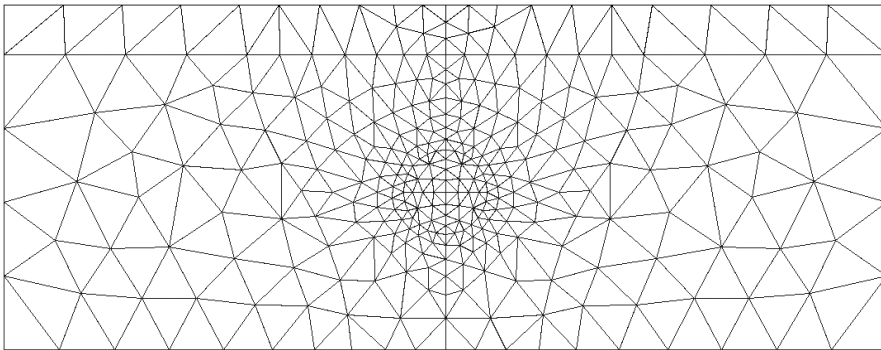
Modelování ražby tunelu

1. Redukce uzlových sil podél levé části na $\beta = 50\%$ během 15 dnů.
2. Generování ostění kolem levé části.
3. Redukce uzlových sil podél levé části na $\beta = 0\%$ během 6 dnů.
4. Redukce uzlových sil podél pravé části na $\beta = 50\%$ během 6 dnů.
5. Generování ostění kolem pravé části.
6. Odtěžení středního ostění během 3 dnů.
7. Redukce uzlových sil podél pravé části na $\beta = 0\%$ během 3 dnů.



Výsledky výpočtů – vliv diskretizace

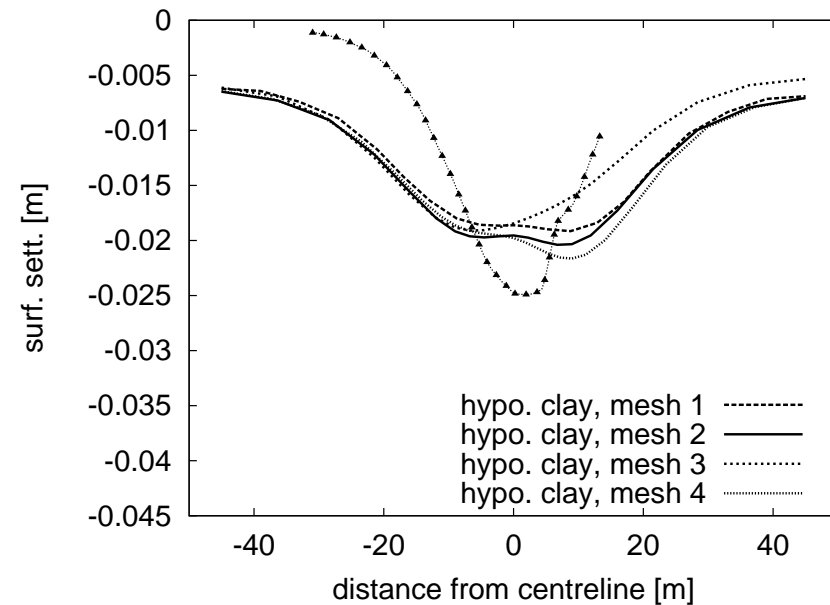
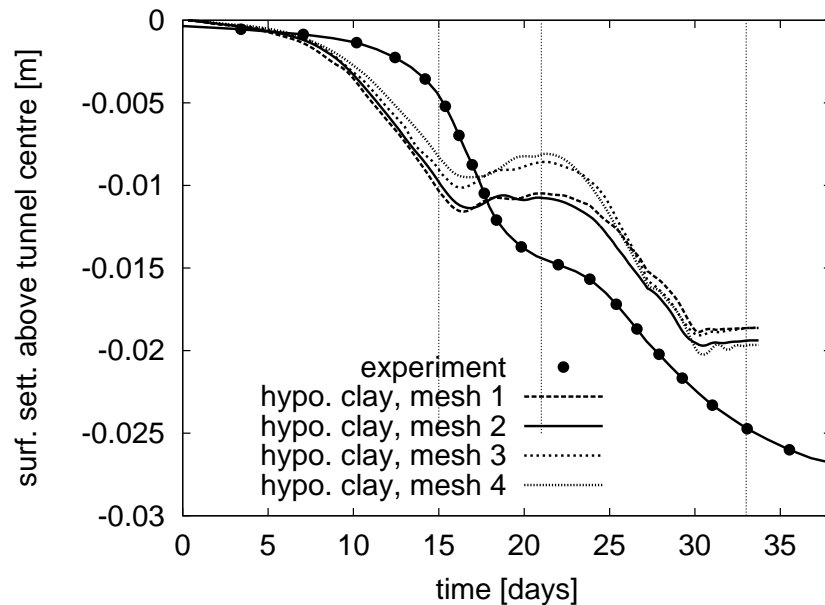
V ideálním případě je zvolená síť natolik jemná, že její hustota neovlivňuje vypočtené výsledky. V praxi je ale tato podmínka jen málokdy splněna. V následujícím jsou porovnány výsledky výpočtů s hypoplastickým modelem a *čtyřmi různými sítěmi*:



Výsledky výpočtů – vliv diskretizace

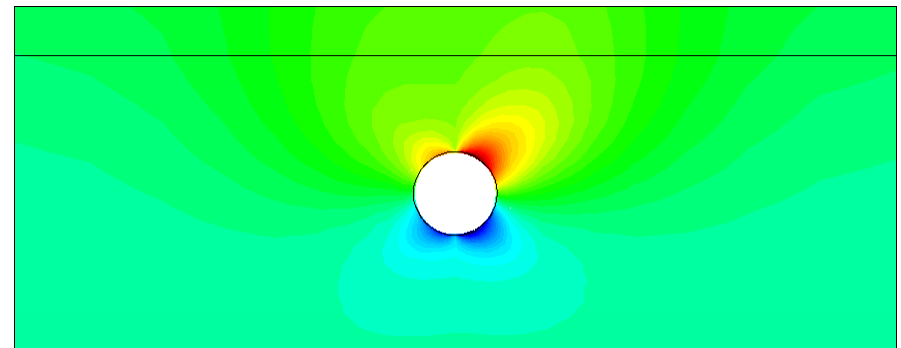
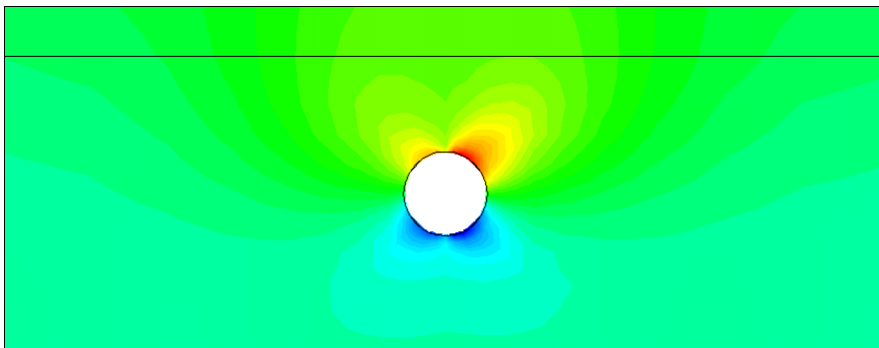
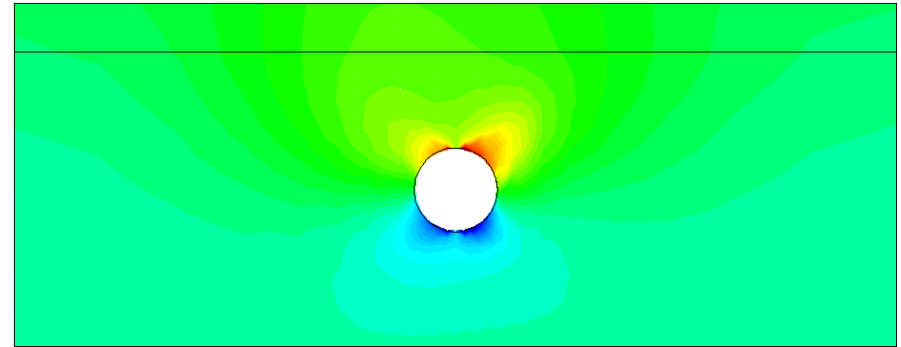
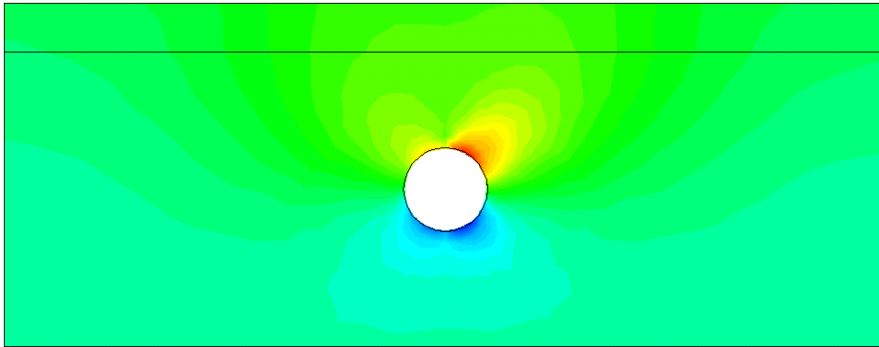
Obr. vlevo představuje rozvoj *vertikálních deformací nad osou tunelu v čase*.

Obr. vpravo představuje *vertikální deformace v různých vzdálenostech od osy tunelu* na konci ražby.



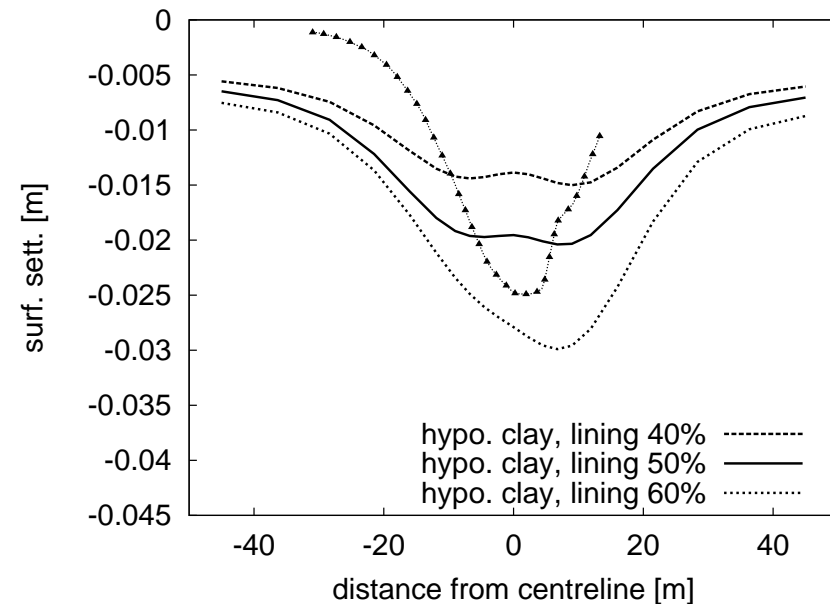
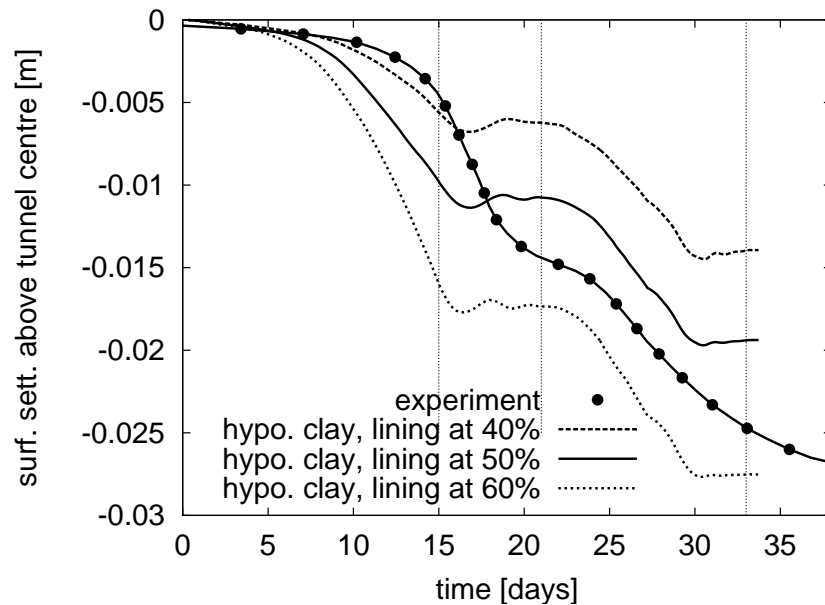
Výsledky výpočtů – vliv diskretizace

Vertikální deformace v okolí tunelu pro čtyři různé sítě:



Výsledky výpočtů – vliv faktoru β

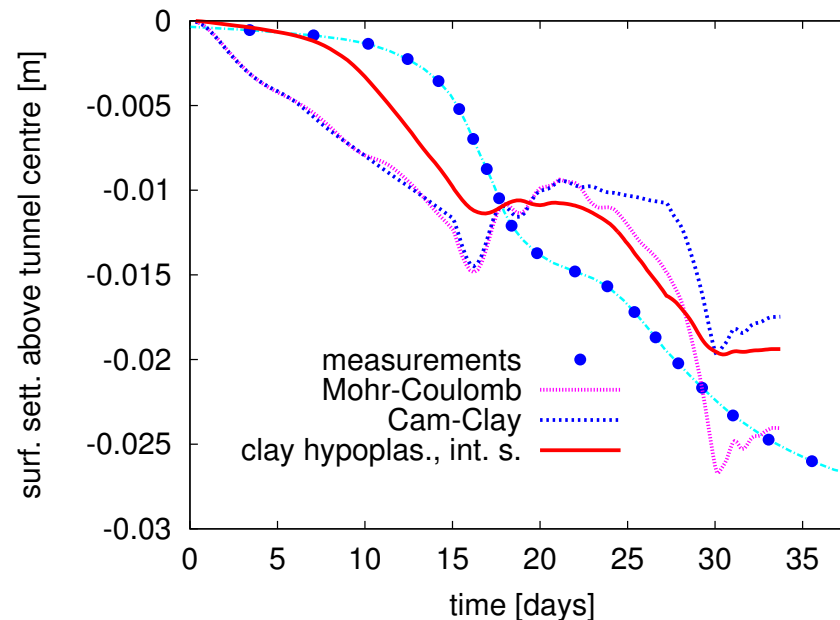
Vliv faktoru β (umožňujícího modelování 3D efektů ve 2D):



Je zřejmé, že faktor β má významný *kvantitativní vliv*, ale mnohem menší *kvalitativní vliv* na vypočtené výsledky.

Vliv konstitučního modelu

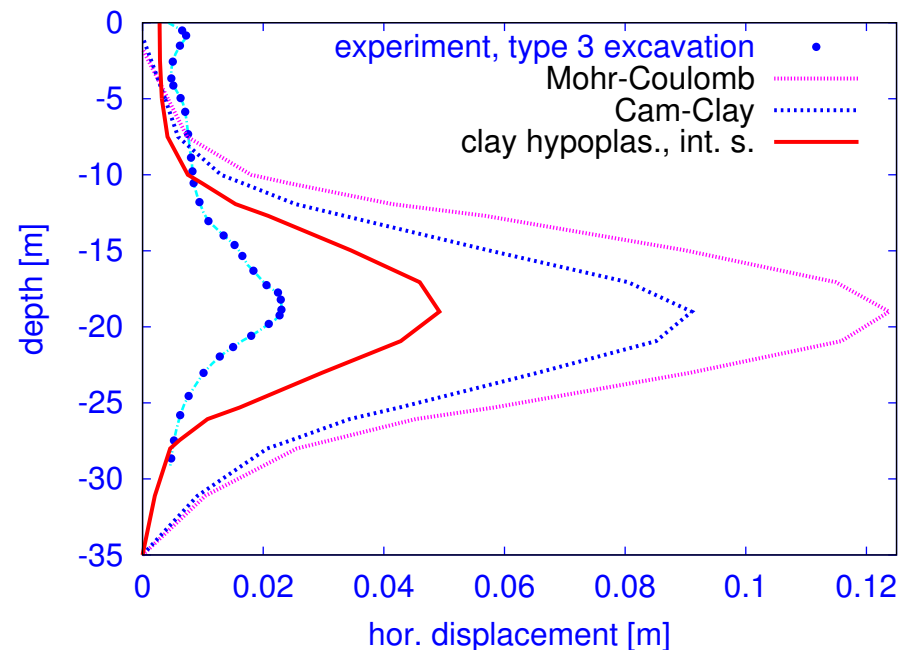
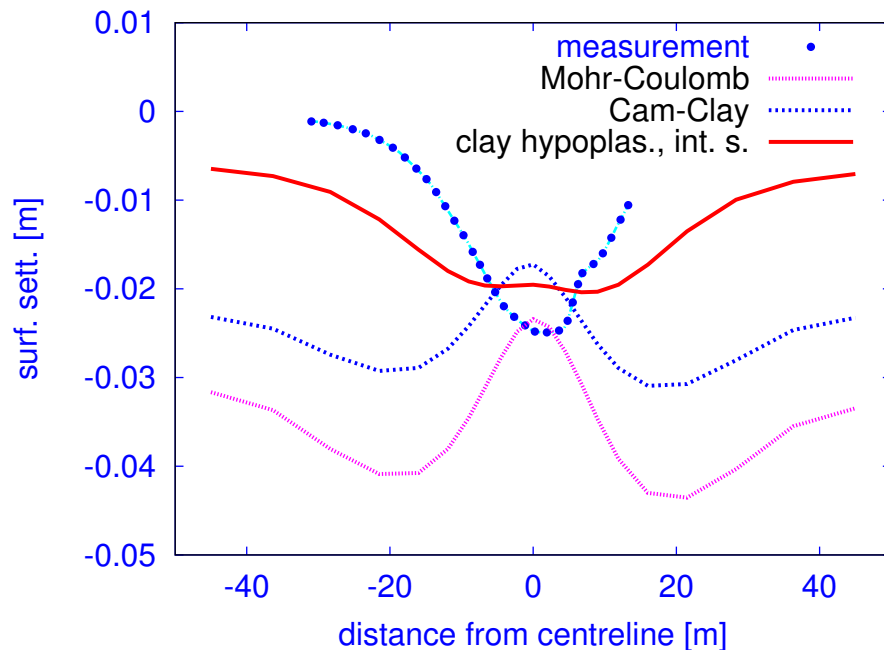
Vertikální deformace povrchu nad osou tunelu proti času:



Velikost deforací vypočtená třemi konstitučními modely přibližně stejná. Hypoplastický model realističtější predikce v *počátečních fázích ražby*.

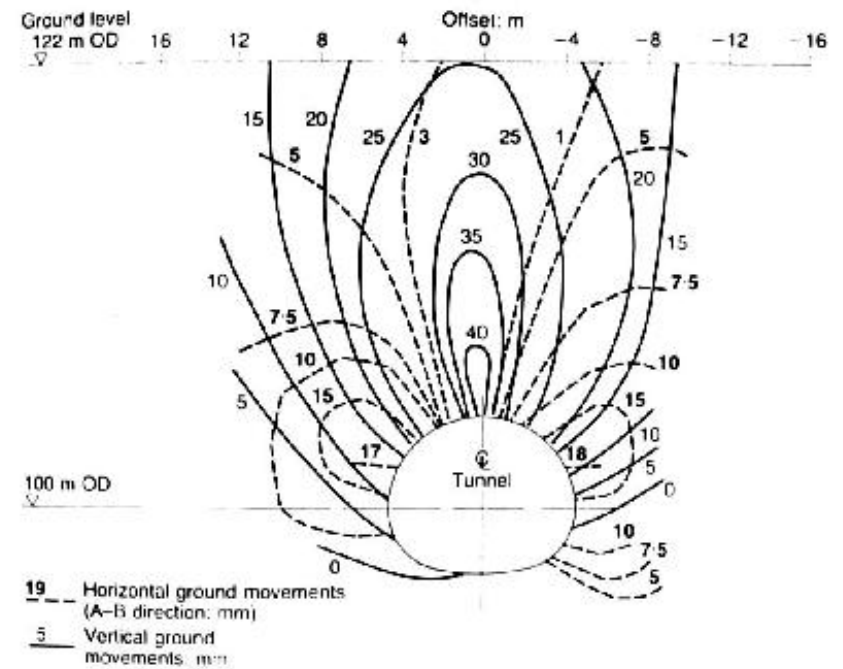
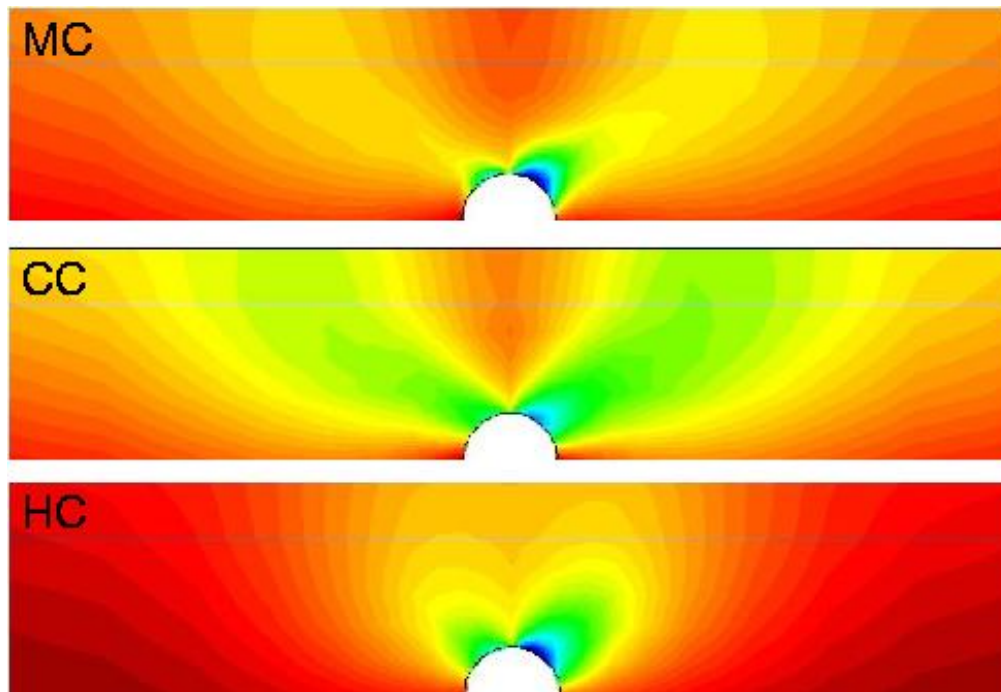
Vliv konstitučního modelu

Vertikální deformace povrchu v různé vzdálenosti od osy tunelu: *Horizontální deformací ve vzdál. 6m od osy tunelu*



Vliv konstitučního modelu

Rozložení vertikálních deformací v okolí výrubu



Závěry

- Vždy je nutno věnovat dostatečnou pozornost správnému stanovení *počátečních podmínek*
- Vždy bychom měli prokázat, že vliv *diskretizace (sítě)* není významný
- Faktor β , umožňující modelování 3D efektů ve 2D, má významný *kvantitativní vliv*, ale mnohem menší *kvalitativní vliv* na vypočtené výsledky.

Závěry – konstituční modely

- Je zřejmé, že pro simulaci deformačního pole okolo tunelu v tuhých jílech *není důležité* aby model simuloval kritické stavy a povrchový pokles pevnosti (Výhoda *CC* oproti *MC*).
- *Zásadní* je modelování nelinearity v oboru malých přetvoření (Výhoda *HC* oproti *CC*).
- Pokročilé konstituční modely nemusí být nutně komplikované z pohledu uživatele (Pro kalibraci *HC* modelu postačily *DVĚ* laboratorní zkoušky).