



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

---

## Mechanika zemin a numerické modelování v geomechanice

Přednáška pro studenty 2. ročníku geologie na  
PřFUK

---

David Mašín

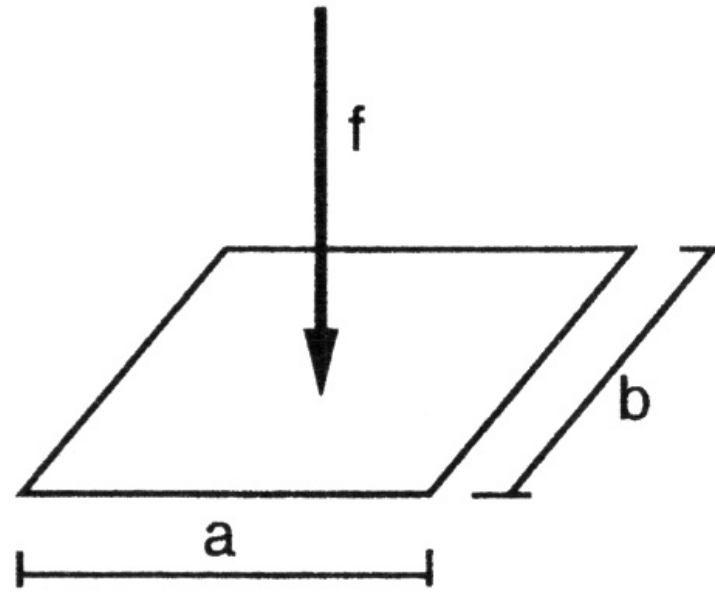
# Obsah

- Úvod do mechaniky zemin, napětí a přetvoření, tuhost a pevnost, mechanika kritických stavů.
- Laboratorní zjišťování mechanického chování zemin.
- Nicoll Highway – příklad geotechnické katastrofy způsobené základní neznalostí mechaniky zemin a numerického modelování.
- Konstituční modelování.
- Úvod do numerického modelování.

# Napětí

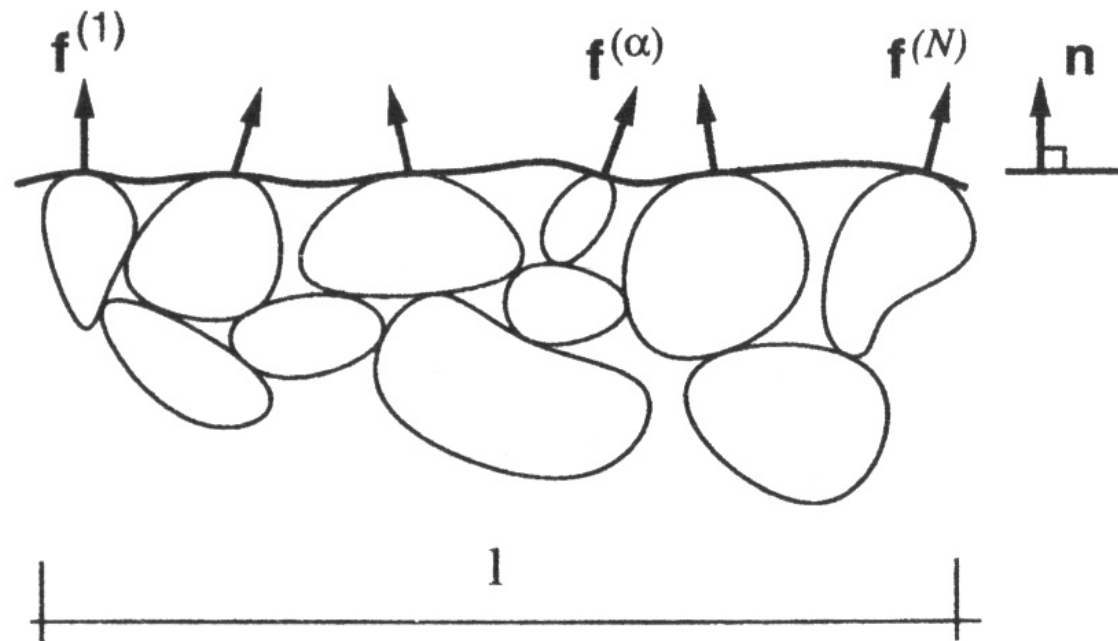
Pojem napětí zavedl Cauchy v roce 1893. Definoval jej jako sílu působící na danou plochu:

$$\sigma = \frac{f}{ab}$$



# Napětí v zemině

Představme si řez zeminou dostatečně veliký na to, aby se blížil rovině a jeho plocha byla dostatečně velká na to, aby se výsledek dal interpretovat v rámci kontinua.



Výsledný *vektor* síly působící v rovině řezu o ploše  $A$  získáme sečtením všech vektorů síly na kontaktech mezi zrny

$$\mathbf{f}^* = \sum_i \mathbf{f}^{(i)}$$

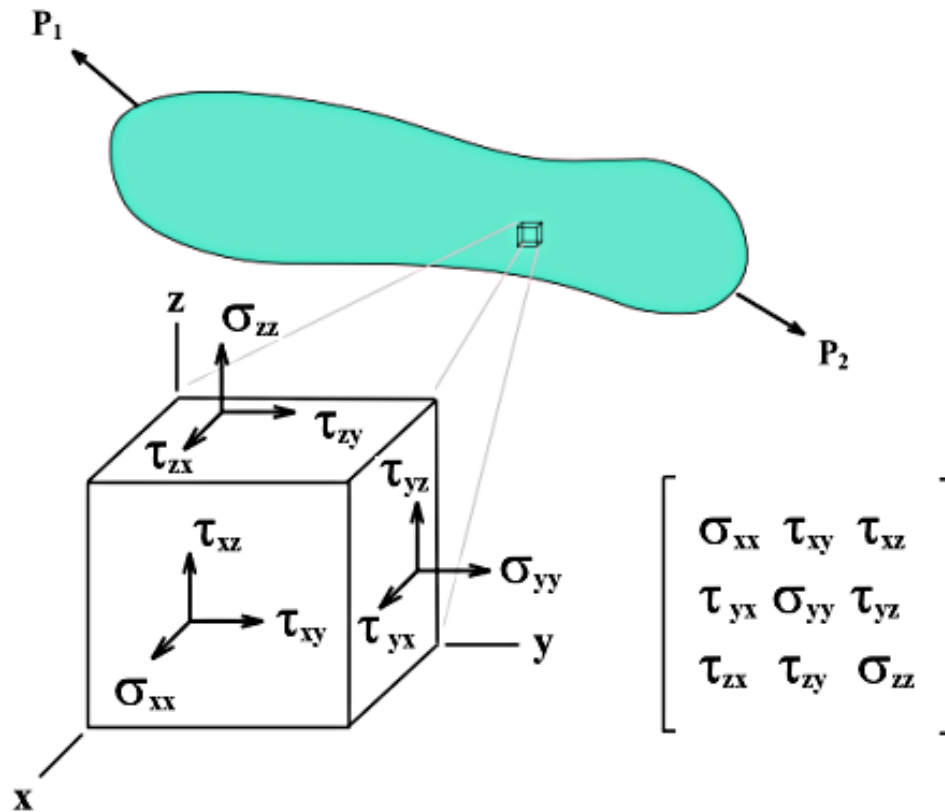
Celkový vektor síly má komponenty

$$\mathbf{f}^* = [f_1^*, f_2^*, f_3^*]$$

Vektor napětí v rovině řezu vypočteme jako  $\mathbf{t} = \mathbf{f}^*/A$ .

Napětí v řezech kolmých na kartézskou soustavu souřadnic charakterisujeme pomocí tzv. *tenzoru napětí*. Tenzor napětí je *matice* jejíž jednotlivé komponenty charakterizují složky napětí v jednotlivých na sebe kolmých řezech.

## Význam tenzoru napětí pro infinitezimální krychli kontinua

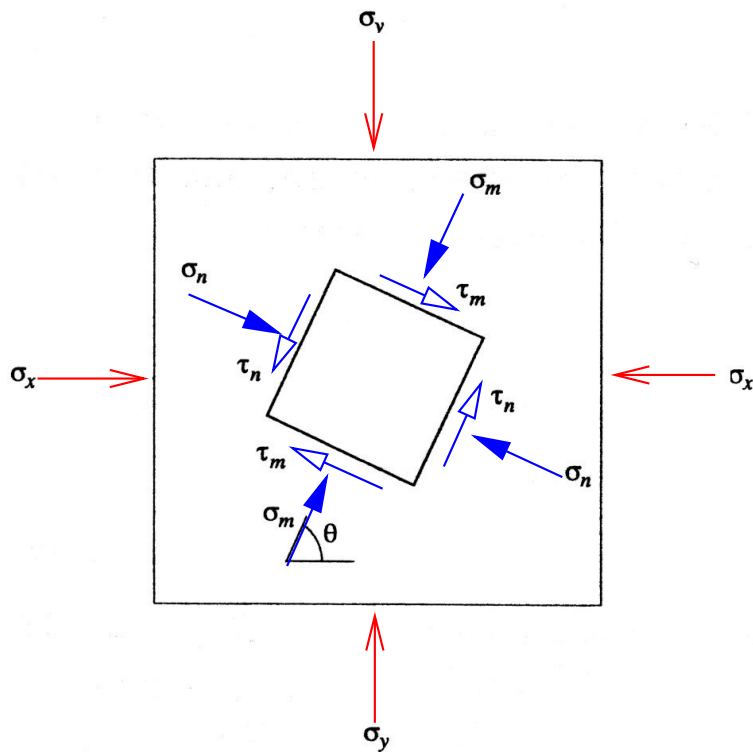


Je zřejmé, že diagonální složky tenzoru napětí ( $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$ ,  $\sigma_{zz}$ ) jsou kolmé na infinitezimální krychli kontinua, nazýváme je proto napětí *normálová* (někdy značíme  $\sigma$ ). Ostatní složky se nazývají napětí *smyková* (někdy značíme  $\tau$ ).

# Rotace tenzoru napětí – Mohrova kružnice

Významné pro výklad laboratorního zjišťování parametrů zemin.

*Numerická hodnota* jednotlivých složek tenzoru napětí závisí pootoční zvolené soustavy souřadnic. Pro případ *rovinné (2D) napjatosti*:

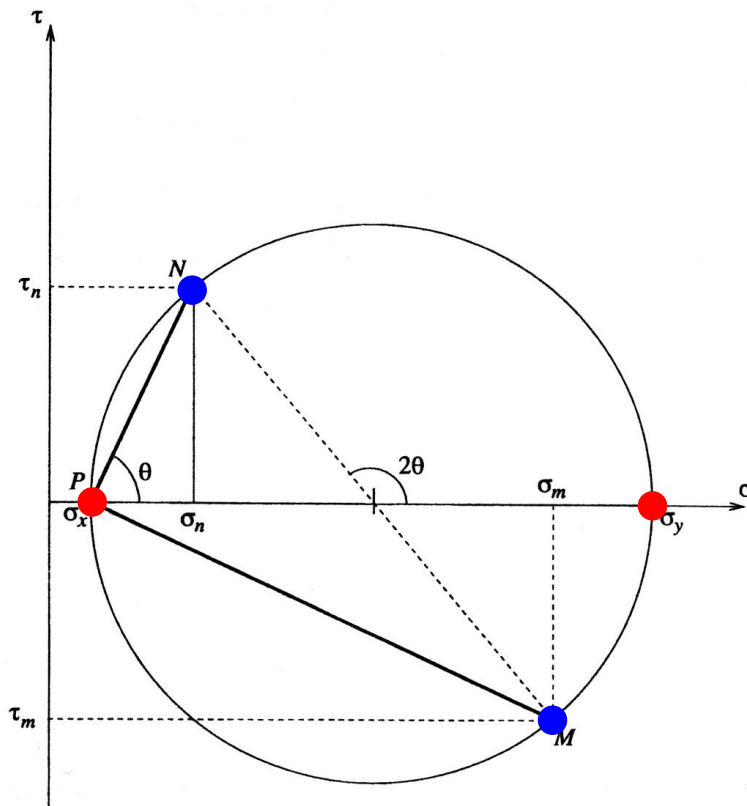


$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x & 0 \\ 0 & \sigma_y \end{bmatrix}$$

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_m & \tau_m \\ \tau_n & \sigma_n \end{bmatrix}$$

# Rotace tenzoru napětí – Mohrova kružnice

Rotaci tenzoru napětí lze graficky znázornit pomocí tzv. *Mohrovy kružnice*.



$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x & 0 \\ 0 & \sigma_y \end{bmatrix}$$

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_m & \tau_m \\ \tau_n & \sigma_n \end{bmatrix}$$



# Napětí v zemině

Zemina je *porézní prostředí*, tvořené zrny a pórovou kapalinou. Díky pórové kapalině se napětí vyvozené vnějšími silami a napětí působící na skelet zeminy může lišit.

*Totálním napětím* (značíme  $\sigma$ ) nazýváme celkové napětí, jež vyvozují vnější síly na zeminu jako celek.

*Pórovým tlakem* (značíme  $u$ ) nazýváme tlak v pórové kapalině.

*Efektivním napětím* (značíme  $\sigma' = \sigma - u$ ) nazýváme napětí působící na skelet zeminy.

# Terzaghiho princip efektivních napětí

Formulací *principu efektivních napětí* položil Karl Terzaghi v roce 1923 základ mechanice zemin.

Všechny měřitelné projevy změny napětí jsou dány výlučně změnou efektivního napětí  $\sigma' = \sigma - u$ .

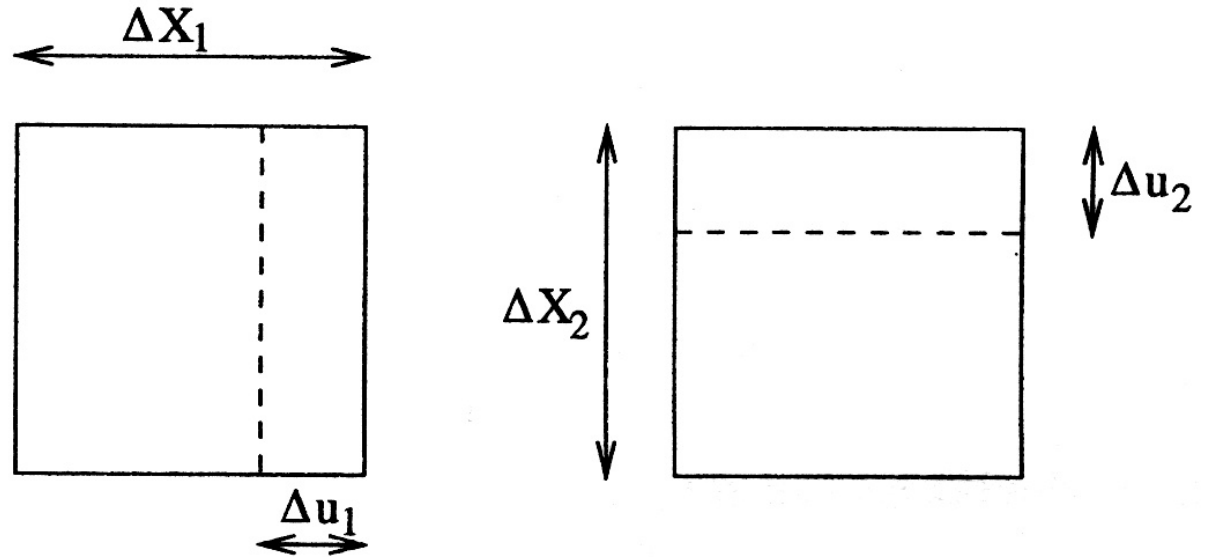
# Přetvoření

Přetvořením se označuje změna délky vztažená k původní délce.

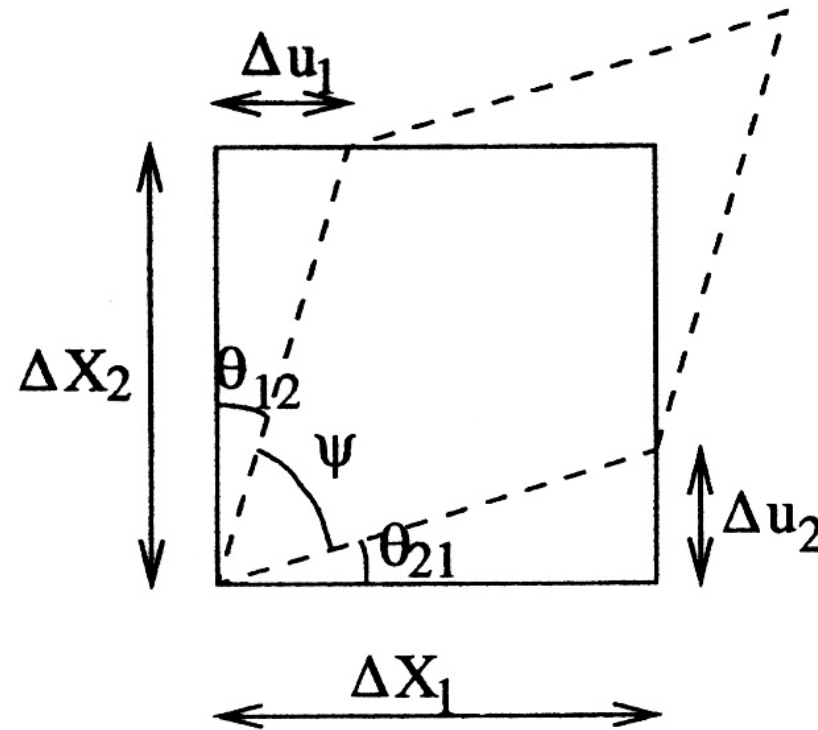
Jednoosé přetvoření:

$$\epsilon_{11} \approx \frac{\Delta u_1}{\Delta X_1}$$

$$\epsilon_{22} \approx \frac{\Delta u_2}{\Delta X_2}$$



Pro čistý smyk jenž můžeme znázornit:



definujeme úhlové přetvoření  $\gamma_{12}$  jako

$$\gamma_{12} = 90^\circ - \psi = \theta_{12} + \theta_{21} \approx \tan \theta_{12} + \tan \theta_{21} = \frac{\Delta u_1}{\Delta X_2} + \frac{\Delta u_2}{\Delta X_1}$$

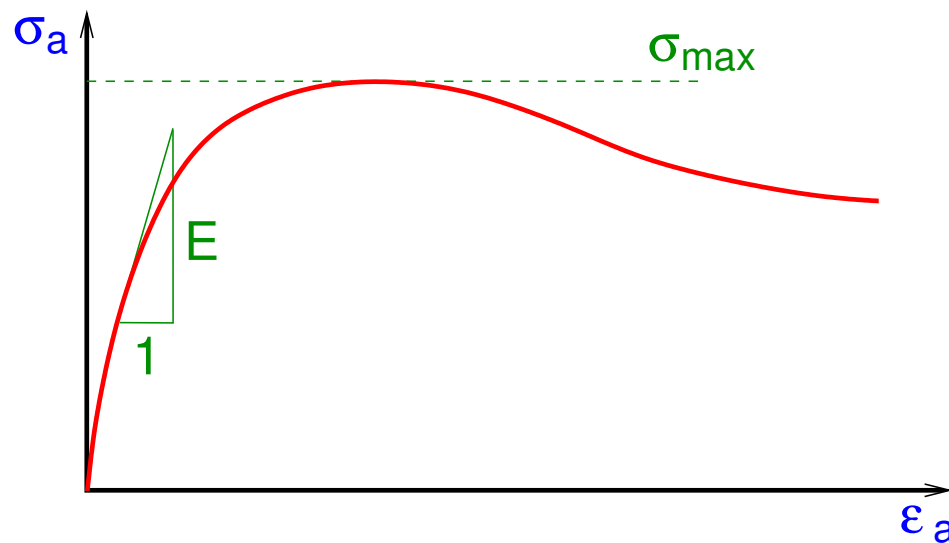
# Přetvoření

Obdobně jako v případě napětí popisujeme obecný stav přetvoření pomocí tzv. *tenzoru přetvoření*.

$$\epsilon = \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} & \epsilon_{xz} \\ \epsilon_{yx} & \epsilon_{yy} & \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} & \epsilon_{zy} & \epsilon_{zz} \end{bmatrix}$$

# Tuhost a pevnost

Pokud zeminu smykově namáháme (*např.* pokud zvyšujeme vertikální (*axiální*) napětí  $\sigma_a$  při konstantním horizontálním (*radiálním*) napětí  $\sigma_r$  na válcovém vzorku zeminy), získáme následující závislost mezi axiálním napětím  $\sigma_a$  a axiálním přetvořením  $\epsilon_a$ :



Maximální napětí  $\sigma_{max}$  vyjadřuje *pevnost* zeminy.

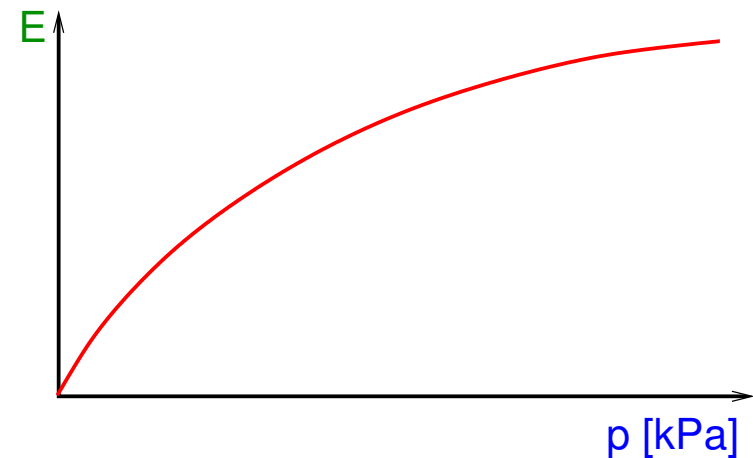
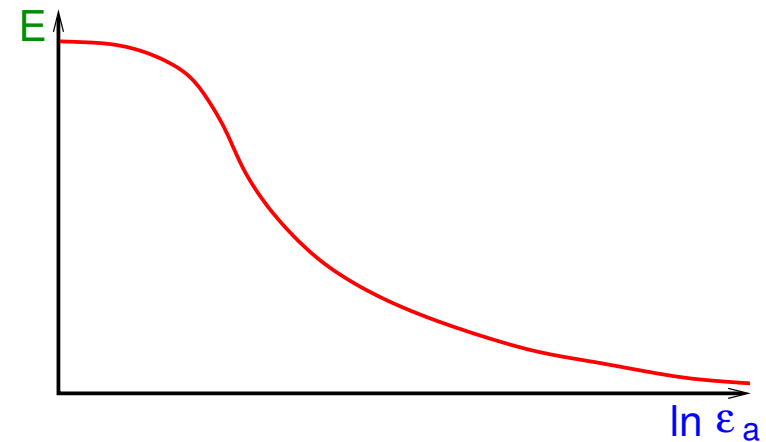
Směrnice  $E$  (Youngův modul) vyjadřuje *tuhost* zeminy.

# Tuhost zeminy

Z předchozího obrázku vyplývá, že *tuhost zeminy*  $E$  je závislá na přetvoření  $\epsilon_a$ .

*Tuhost zeminy*  $E$  je dále závislá na tzv. *středním napětí*

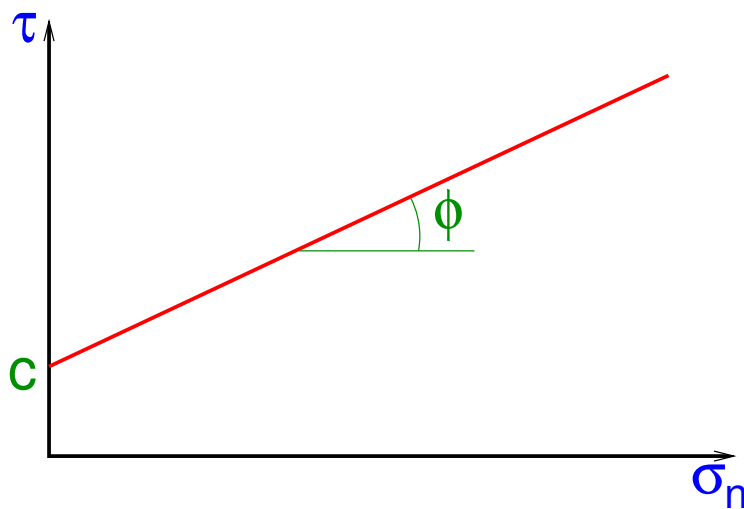
$$p = \frac{\sigma_a + 2\sigma_r}{3}$$



# Pevnost zeminy

*Pevnost zeminy* vyjadřuje maximální smykové napětí  $\tau$  jež je možno dosáhnout pro dané normálové napětí  $\sigma_n$ . Při dosažení maximálního smykového napětí dojde k *porušení zeminy*.

Spojnice všech stavů porušení se nazývá *obálka pevnosti*. Její sklon se nazývá **úhel vnitřního tření  $\varphi$** . Smykové napětí při nulovém normálovém napětí se nazývá **soudržnost  $c$** .



*Obálka pevnosti* vymezuje všechny fyzikálně přípustné stavy zeminy. Stav napětí *vně* obálky pevnosti je *fyzikálně nepřípustný*.



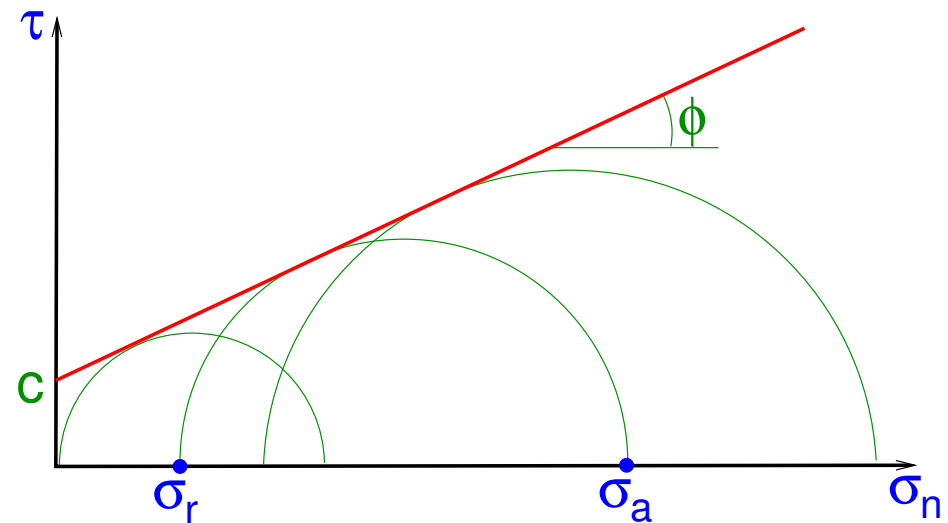
# Pevnost zeminy

Při některých laboratorních experimentech není možno přímo určit smykové  $\tau$  a normálové  $\sigma_n$  napětí ve smykové zóně.

Z definice *obálky pevnosti* ovšem vyplývá, že je zároveň obálkou všech *Mohrových kružnic* (Viz.  $\Leftarrow$ ).

Např. vyhodnocení *pevnosti* pro zkoušku kde aplikujeme *pouze* normálová napětí je následující:

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_a & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_r & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_r \end{bmatrix}$$



# Mechanika kritických stavů

Vlastnoti zeminy (tuhost a pevnost) jsou závislé na *čísle pórovitosti*  $e$ .

$$e = \frac{V_p}{V_s}$$

kde  $V_p$  je objem pórů a  $V_s$  je objem pevných částic (zrn).

Stupeň zhutnění zeminy charakterisujeme pomocí tzv. *indexu ulehlosti*  $I_d$ .

$$I_d = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}}$$

$0 < I_d < \frac{1}{3}$  . . . zemina kyprá

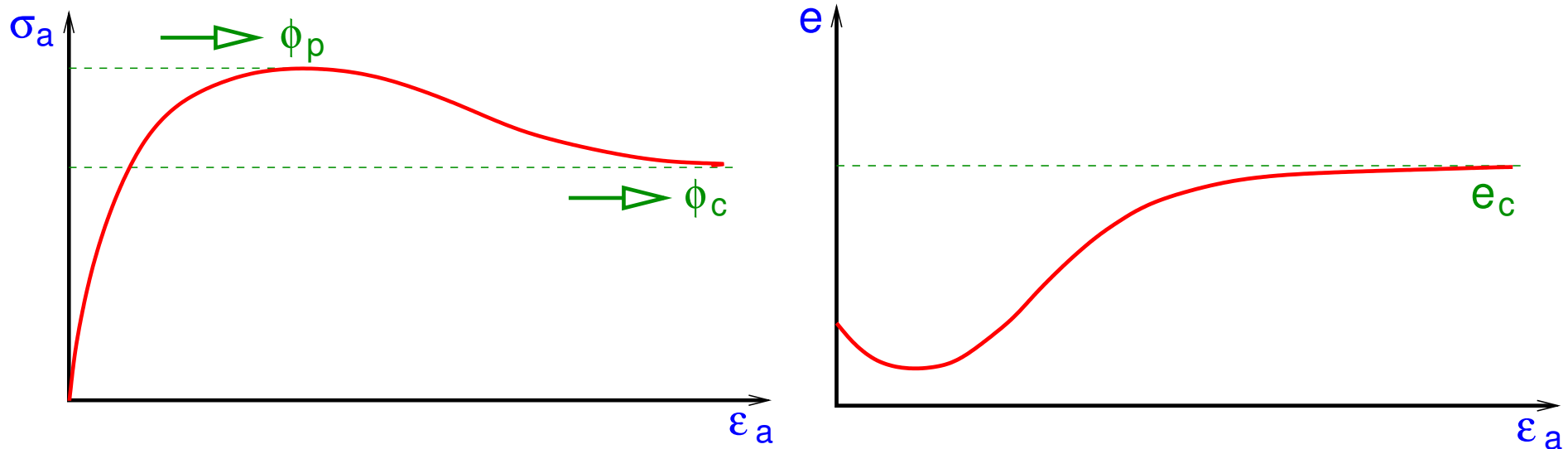
$\frac{1}{3} < I_d < \frac{2}{3}$  . . . zemina středně ulehlá

$\frac{2}{3} < I_d < 1$  . . . zemina ulehlá

# Chování ulehlé zeminy

Po dosažení maximálního napětí (jemuž odpovídá *vrcholový úhel vnitřního tření  $\varphi_p$* ), napětí poklesá až na tzv. kritickou hodnotu (jíž odpovídá tzv. *kritický úhel vnitřního tření  $\varphi_c$* ).

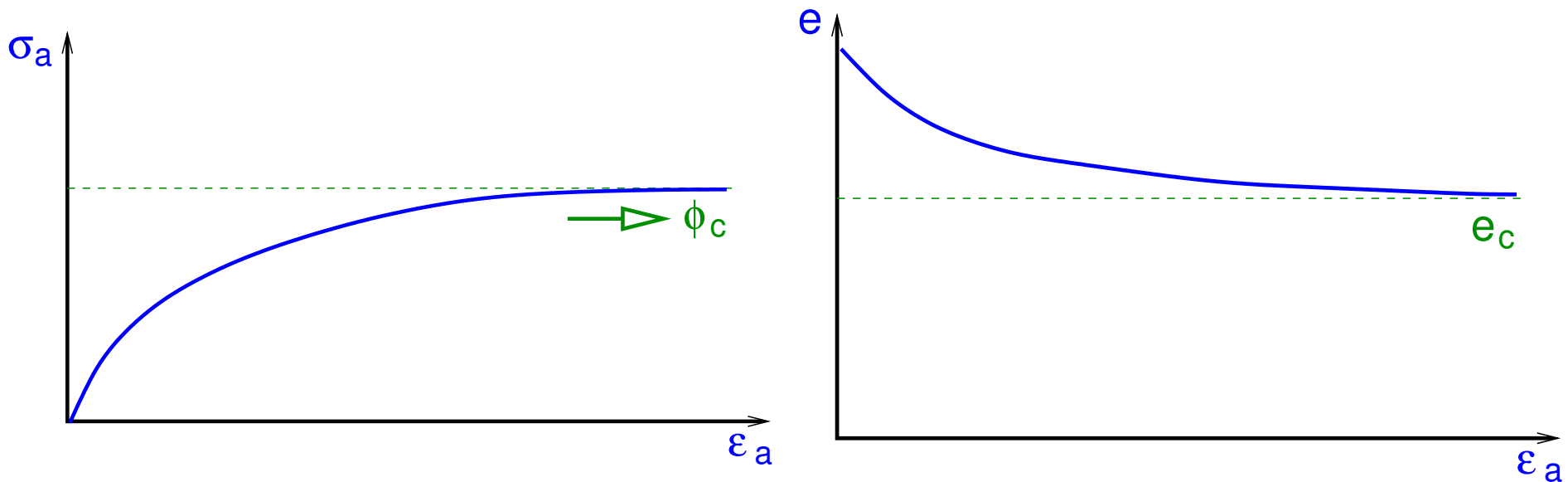
Po počátečním poklesu čísla pórovitosti  $e$  dochází k tzv. *dilatanci*. Zemina zvyšuje svůj objem až číslo pórovitosti dosáhne *kritické hodnoty  $e_c$* .



# Chování kypré zeminy

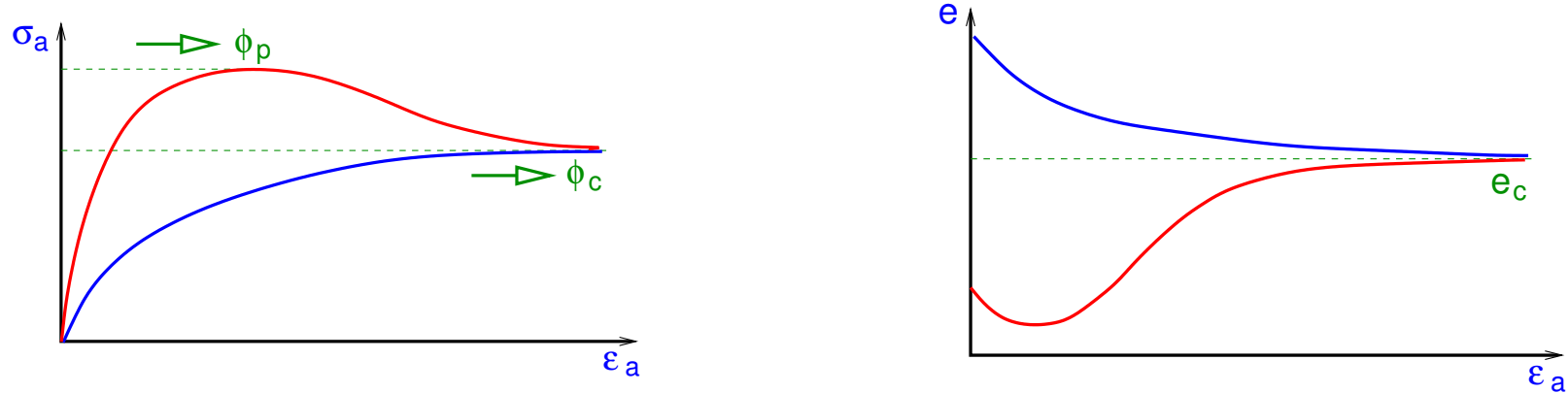
Napětí postupně vzrůstá až na tzv. kritickou hodnotu (jíž odpovídá tzv. *kritický úhel vnitřního tření  $\phi_c$* ).

Číslo pórovitosti  $e$  se postupně snižuje (dochází k tzv. *kontraktanci*). Zemina snižuje svůj objem až číslo pórovitosti dosáhne *kritické hodnoty  $e_c$* .



## Kritický stav

Zkoušky na kypré a hutné zemině v jednom grafu:



Při dostatečně dlouhém smykovém namáhání dosáhne zemina tzv. "kritického stavu", který je nezávislý na počátečním stavu zeminy.

Je zřejmé, že *kritický úhel vnitřního tření*  $\varphi_c$  je skutečnou charakteristikou zeminy o daném minerálním složení, kdežto *vrcholový úhel vnitřního tření*  $\varphi_p$  charakterizuje pouze danou zeminu o daném stupni ulehlosti.

# Laboratorní měření parametrů zemin

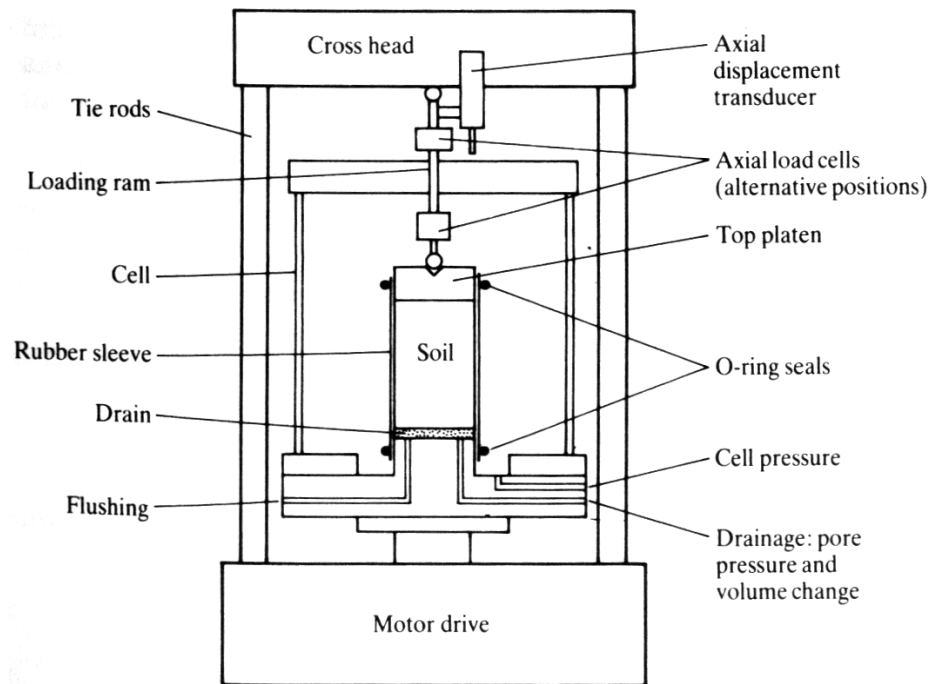
Veličiny charakterizující *tuhost* zeminy (jako např. Youngův modul  $E$ ) a *pevnost* zeminy (jako např. kritický úhel vnitřního tření  $\varphi_c$ ) nazýváme *parametry* zeminy.

*Parametry* charakterizují mechanické chování dané zeminy, vstupují do tzv. *materiálových (konstitučních) vztahů* (viz. dále) a jsou vstupními hodnotami pro *numerické modelování* skutečných geotechnických problémů (základ, tunel, stavební jáma . . . ).

Z toho důvodu je zásadně důležitá možnost jejich přesného měření. Parametry zjišťujeme v *laboratoři mechaniky zemin* pomocí speciálního přístrojového vybavení.

# Triaxiální přístroj

Nejdůležitější přístroj pro zjišťování mechanického chování zemin.



- Válcový vzorek umístěný v latexové membráně.
- Kapalina v "komoře" vyvozuje radiální napětí.
- Pístem se zemina *zatěžuje*, vyvozuje se axiální napětí vyšší než radiální napětí.
- Nezávisle je možno měřit *pórový tlak*.

⇒ Je možno sestrojít *Mohrovy kružnice* a vyhodnotit *pevnost zemin*.

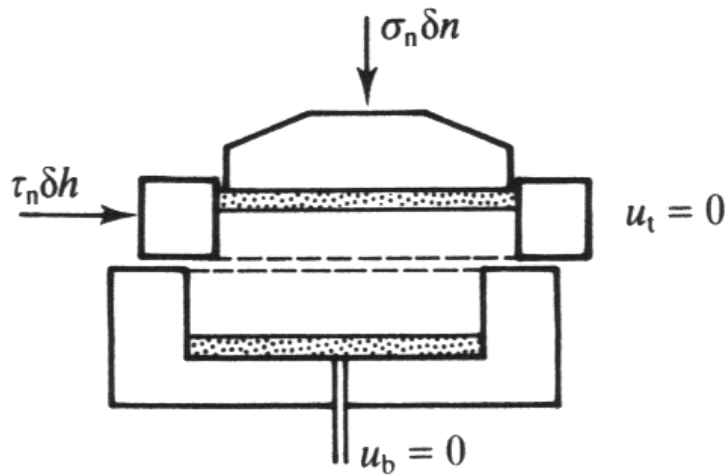
⇒ Ze závislosti axiálního přetvoření a napětí vyhodnotíme *tuhost zeminy* (*Youngův modul  $E$* ).

# Triaxiální přístroj





## Krabicový smykový přístroj



- Předurčená smyková zóna, přímé měření normálového  $\sigma_n$  a smykového  $\tau$  napětí.
- Není možné nezávislé měření pórového tlaku

⇒ Není možno sestavit *Mohrovy kružnice*, nicméně *pevnost* zemin lze vyhodnotit proložením obálky pevnosti přímo v grafu  $\sigma_n$  vs.  $\tau$ .

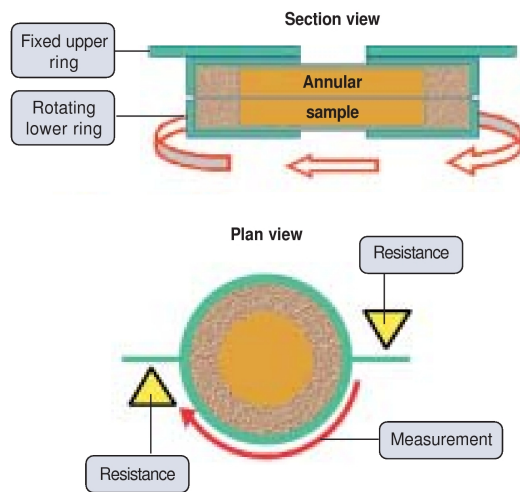
⇒ V případě rychlého smyku/málo propustné zeminy vznikají ve smykové zóně *pórové tlaky*  $u$ , které **není možno měřit**. Potom nelze vypočítat efektivní normálové napětí  $\sigma'_n = \sigma_n - u$  a nelze vyhodnotit *efektivní úhel vnitřního tření*.

- Přístroj není vhodný pro měření tuhosti zemin.

# Krabicový smykový přístroj



# Torzni smykový přístroj



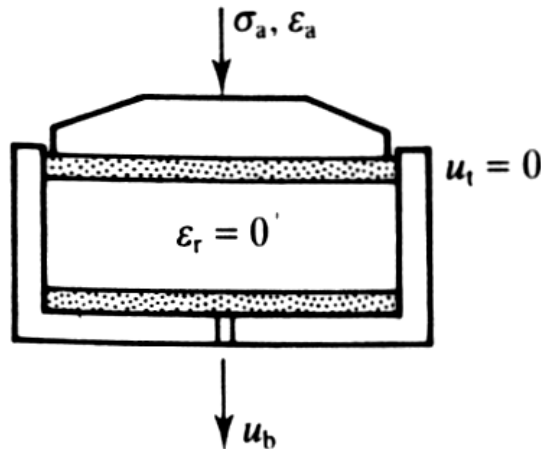
- Ekvivalentní *krabicovému smykovému přístroji*, ovšem vzorek má tvar prstence a přístroj tak umožňuje prakticky *neomezený posun* na smykové ploše.

⇒ Příklad sdílí výhody a nevýhody *krabicového smykového přístroje*. Umožňuje však měřit tzv. **reziduální pevnost** – pevnost po velmi dlouhém posunu na smykové ploše.

# Torzni smykový přístroj



# Edometrický přístroj



- Vyvozujeme axiální napětí  $\sigma_a$  a měříme axiální přetvoření  $\epsilon_a$  při nulové deformaci v radiálním směru  $\epsilon_r = 0$

⇒ Měříme *tuhost zeminy*, konkrétně tzv. *Edometrický modul*

$$E_{oed} = \Delta\sigma_a / \Delta\epsilon_a.$$

- Není možno měřit pevnost zeminy (dráha napětí v edometrickém přístroji nesměřuje k obálce pevnosti).

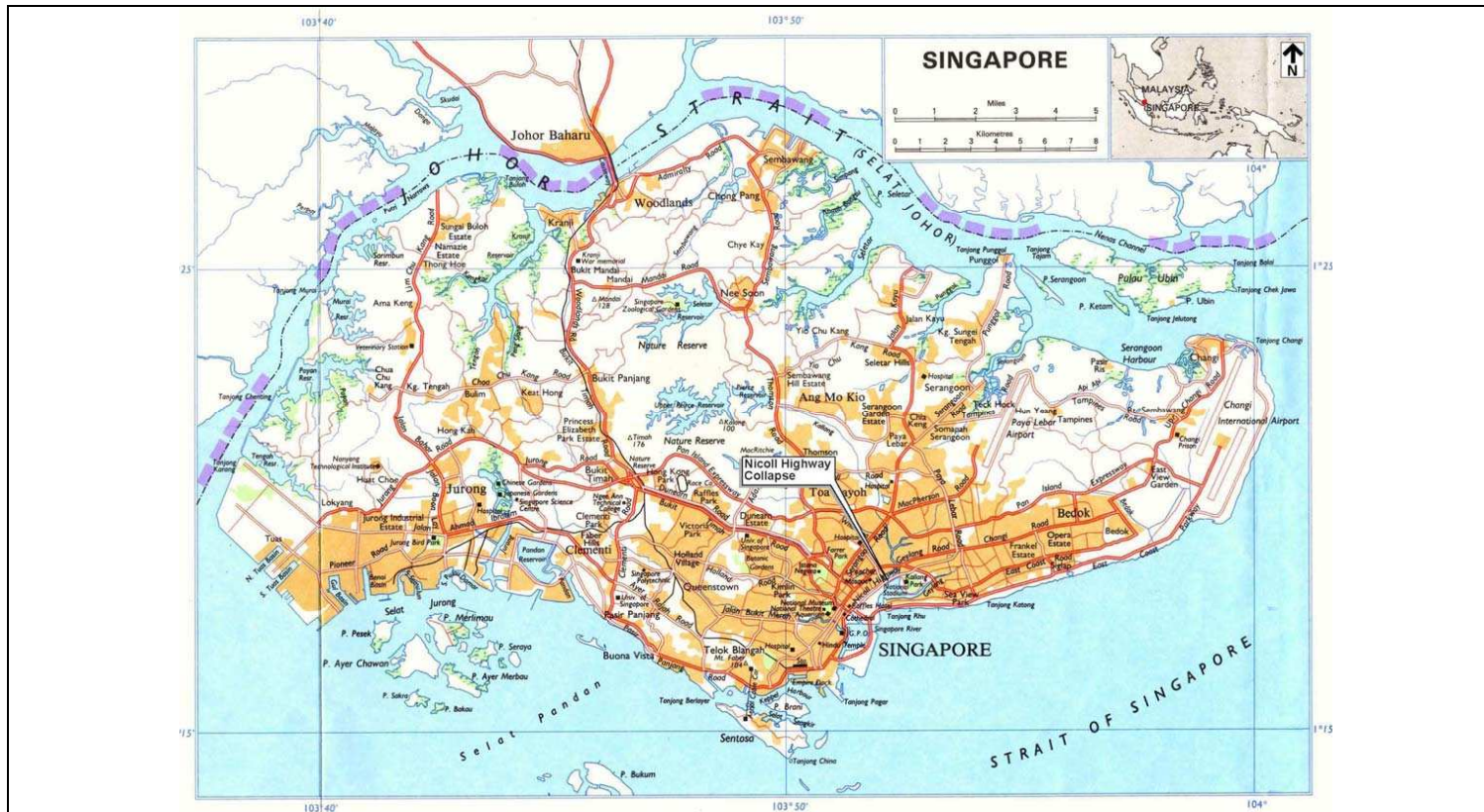
# Edometrický přístroj



# Nicoll Highway – Úvod

- Jedna z nejvýznamnějších geotechnických katastrof posledních let. Způsobená banální chybou v numerickém modelování.
- Výstavba nové trasy metra v Singapore.
- Geologie tvořená navážkami (0–15 m), mořskými jíly formace "Kallang" (15–42 m) a starými aluviálními sedimenty (42 m a hlouběji)
- Dva způsoby výstavby: "cut and cover" tunel a ražený tunel.  
Kolaps 30 m hluboké pažené stavební jámy

# Nicoll Highway – Úvod



Source : Fig 1 of Aviva Supplementary Expert Report

**Figure 1.1**

A map of Singapore showing location of the collapse.



# Nicoll Highway – Úvod

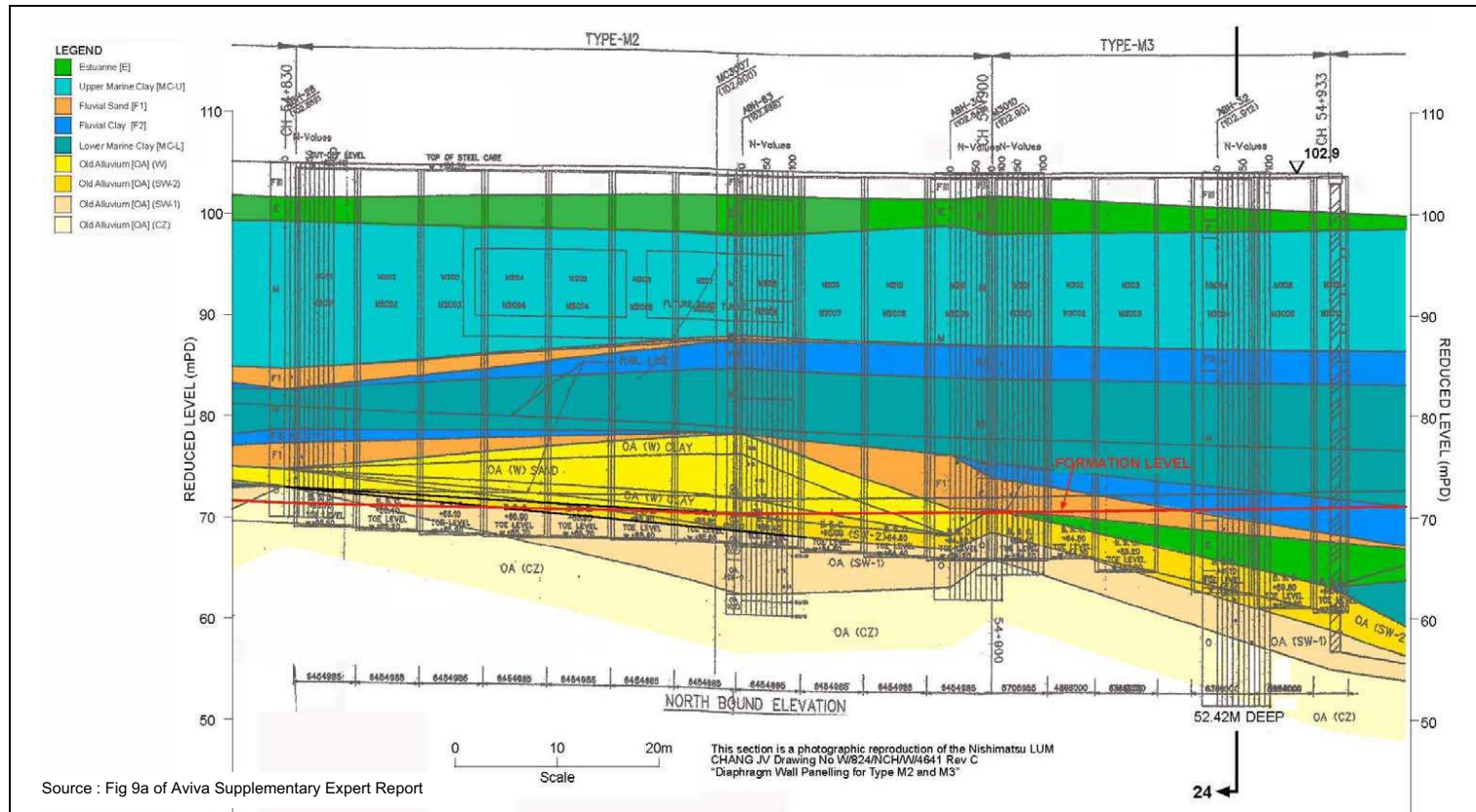
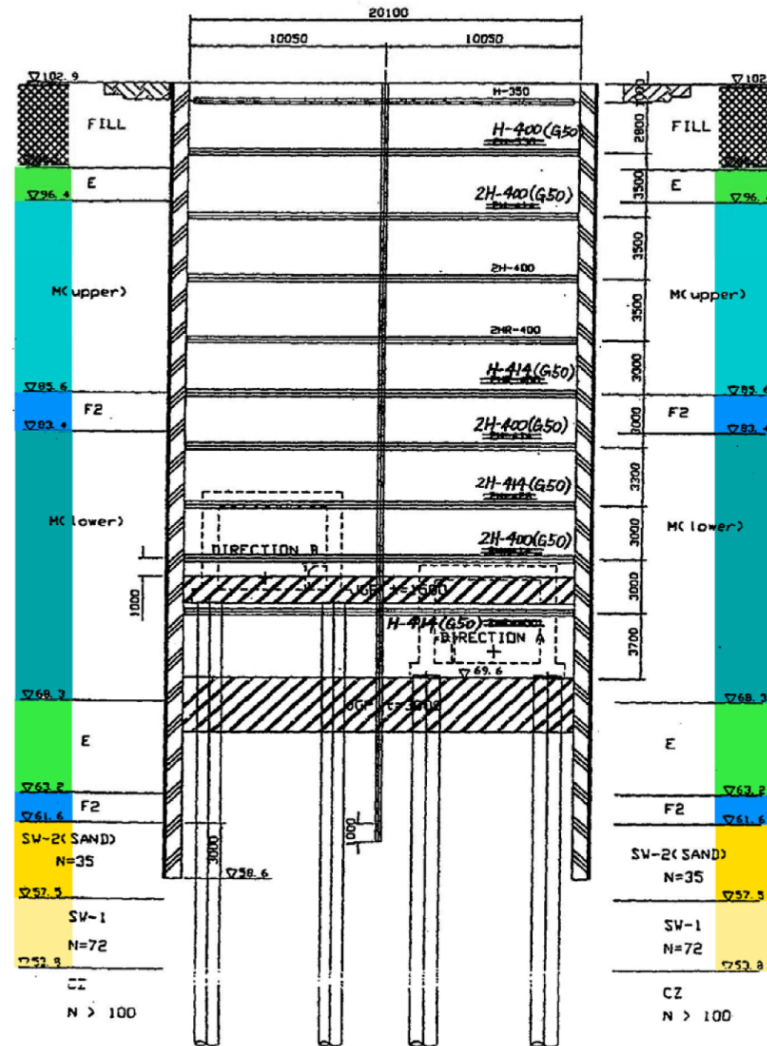


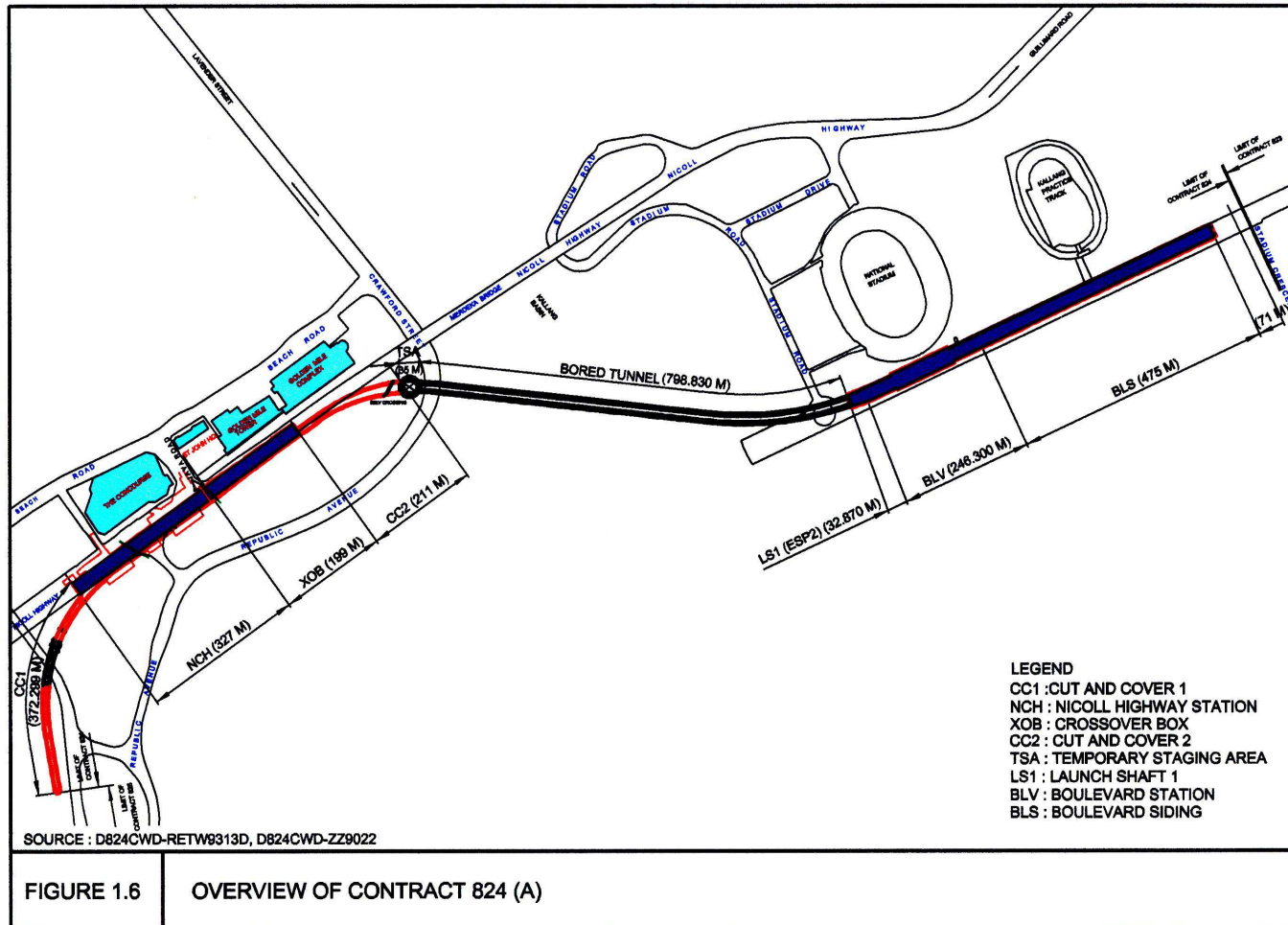
Figure 2.2

NLCJV's long section showing geology along the line of the North diaphragm wall.

# Nicoll Highway – Úvod



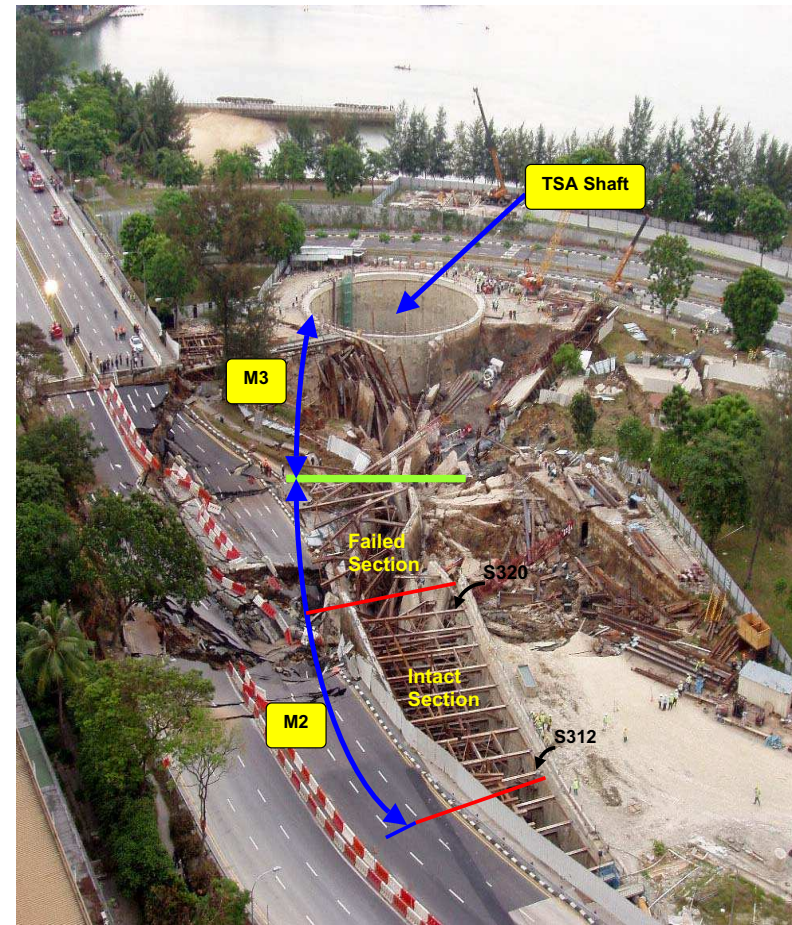
# Nicoll Highway – Úvod



# Nicoll Highway – Úvod



Overview of Affected Project Site Prior to Accident



Overview of Affected Project Site After the Accident

## Nicoll Highway – Kolaps

- Ke kolapsu došlo 20. 4. 2004. v 15:30
- Čtyři lidé zabiti. Pouze náhodou nebylo na stavbě více dělníků a po dálnici nejela auta.
- Během několika hodin před kolapsem pozorovány nadměrné deformace příčného pažení. Kolaps samotný trval méně než minutu.
- Kolaps zaznamenán na kameru náhodným kolemjdoucím.

# Nicoll Highway – Kolaps



**Figure 4.4**

The initial moments immediately after the collapse showing the collapsed section of Nicoll Highway and fire caused by damages to gas service lines.

# Nicoll Highway – Kolaps



**Figure 4.5**

The initial moments immediately after the collapse showing the collapsed section of Nicoll Highway and the M3 area of the Temporary Retaining Wall System.

# Nicoll Highway – Kolaps



**Figure 4.6**

The initial moments immediately after the collapse showing the collapsed section of M3 area and the cranes and machinery sited on the surface of the excavation.



# Nicoll Highway – Kolaps



**Figure 4.7**

The initial moments immediately after the collapse showing the collapsed section of M3 area and the cranes and machinery sited on the surface of the excavation.

# Nicoll Highway – Kolaps



**Figure 4.8**

The initial moments immediately after the collapse showing the collapsed section of the M3 area and the sinking of one of the cranes into the excavation.

# Nicoll Highway – Kolaps



**Figure 4.9**

The initial moments immediately after the collapse showing the collapsed section of the M3 area and the sinking crane falling deeper into the excavation.

# Nicoll Highway – Kolaps



**Figure 4.10**

A general view of the collapsed area of the Temporary Retaining Wall System

# Nicoll Highway – Kolaps



**Figure 4.11**

A general view of the collapsed area of the Temporary Retaining Wall System

# Nicoll Highway – Kolaps



**Figure 4.12**

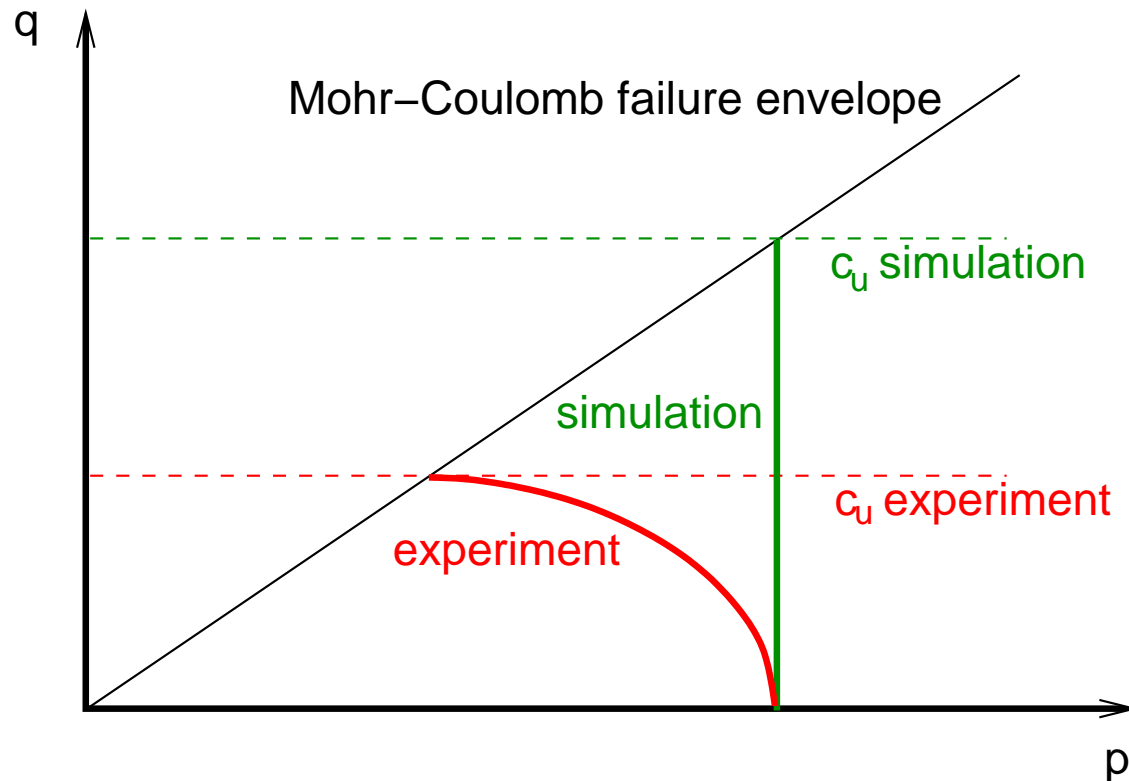
A close up view of the collapsed section of Nicoll Highway adjacent to the M3 area

## Nicoll Highway – Vysvětlení

- Návrh konstrukce založen na numerickém modelování pomocí standartního geotechnického software "Plaxis".
- Jemnozrnné mořské jíly byly vzhledem k nízké propustnosti modelovány jako nedrénovaný materiál.
- Byl využit nejjednodušší *materiálový model* (Mohr-Coulombův model)

# Nicoll Highway – Vysvětlení

Díky nedokonalosti *Mohr-Coulombova modelu* (špatná predikce dráhy napětí při nedrénované zkoušce) je při využití efektivních parametrů výrazně nadhodnocena nedrénovaná pevnost materiálu.





# Nicoll Highway – Vysvětlení

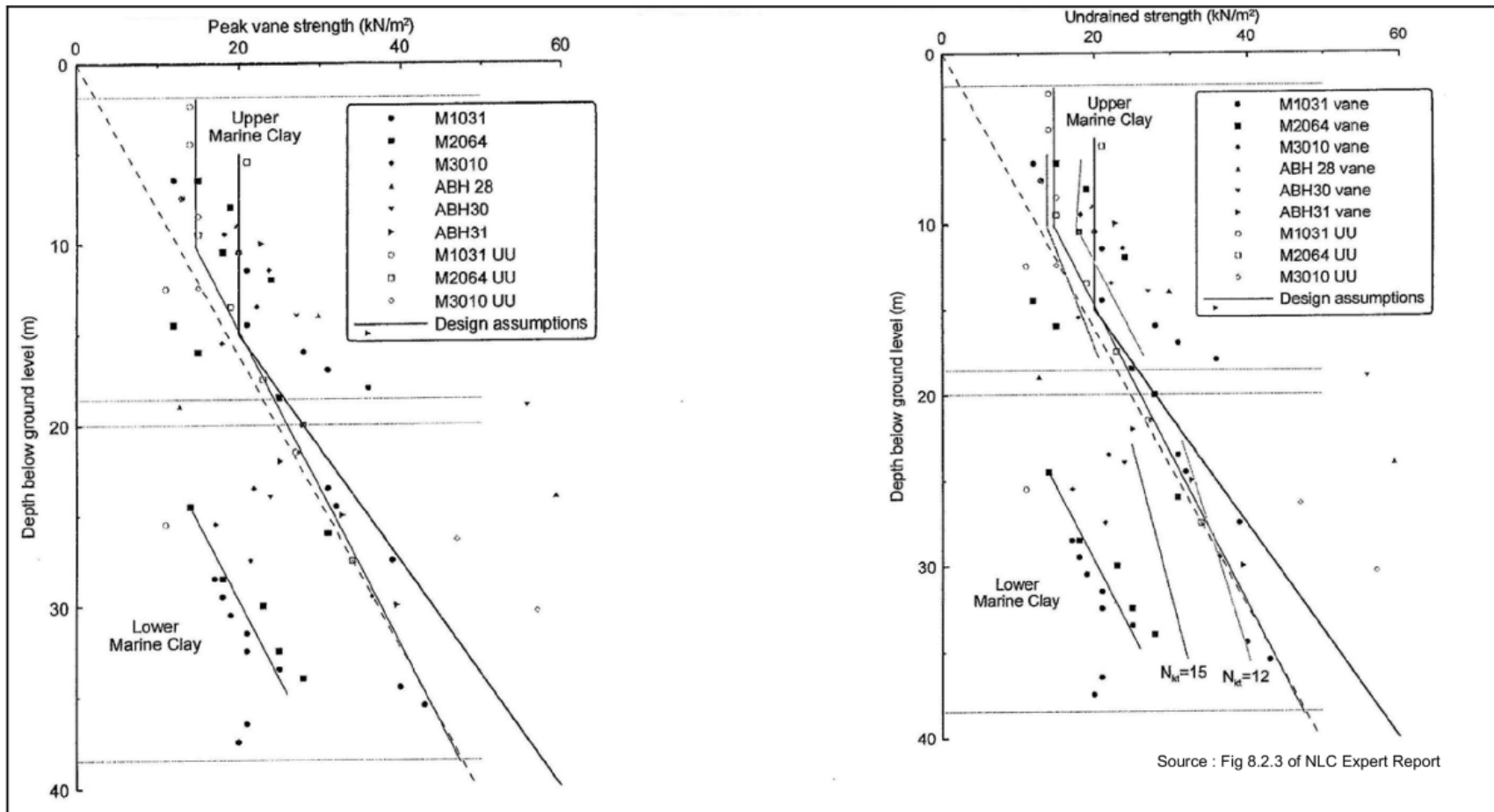
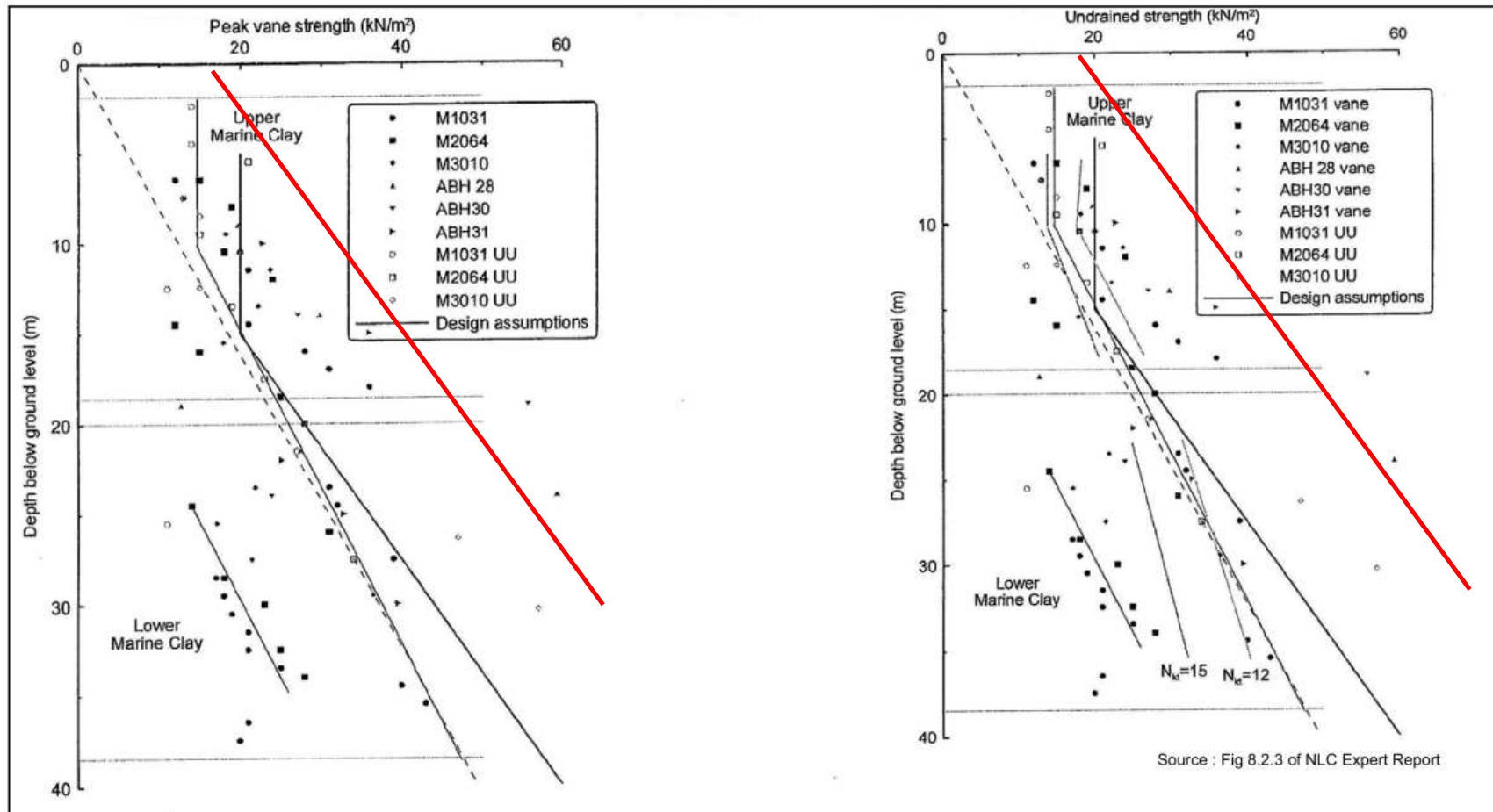


Figure 2.10

Profiles of undrained shear strength from vane tests, UU triaxial compression tests and CPTUs in C824 project.

# Nicoll Highway – Vysvětlení



**Figure 2.10**

Profiles of undrained shear strength from vane tests, UU triaxial compression tests and CPTUs in C824 project.

# Konstituční (materiálové) modely

*Konstitučním (materiálovým) vztahem* rozumíme matematickou závislost mezi deformací materiálu a jeho stavovými veličinami.

*Je nedílnou součástí každé numerické analýzy.* V geotechnice je díky komplexitě chování zemin vhodná volba konstitučního modelu zásadní pro správné řešení úlohy (jak je zřejmé z i příkladu kolapsu Nicoll Highway).

- Míra deformace materiálu, jež vstupuje do konstitučních vztahů, je vyjádřena tenzorem přetvoření  $\epsilon$ .

# Stavové veličiny

- Stavové veličiny charakterizují stav materiálu. Patří mezi ně v první řadě Cauchyho napětí  $\sigma$ , dále číslo pórovitosti ( $e$ ), ale také např. teplota, stupeň nasycení, či jiné tenzorové stavové veličiny.

Konstituční model definuje přírůstky stavových veličin v závislosti na jejich aktuálních hodnotách a na přírůstku  $\epsilon$ .

Kromě nejjednodušších elastických modelů budeme u konstitučních modelů pro geomateriály *vždy* uvažovat jako stavovou proměnnou *Cauchyho napětí*  $\sigma$ . Konstituční model v nejjednodušší formě bude tedy rovnice typu

$$\Delta\sigma = h(\sigma, \Delta\epsilon)$$

Pokročilejší konstituční modely berou v potaz vliv stupně zhutnění (*indexu ulehlosti*  $I_d$ ). *Číslo pórovitosti*  $e$  je pak uvažováno jako stavová proměnná.

$$\Delta\sigma = h(\sigma, e, \Delta\epsilon)$$

# Stavové veličiny vs. parametry

Vždy musíme striktně rozlišovat mezi *stavovými veličinami* a *parametry* modelu.

- *Stavové veličiny* jsou *proměnné* definující stav materiálu. Měly by být (alespoň teoreticky) měřitelné v každém časovém okamžiku. Např. napětí, pórovitost, sání, teplota. . . Pro výpočet je nutno znát počáteční hodnoty stavových veličin
- *Parametry* jsou *konstanty* charakterizující mechanické chování materiálu. Např. úhel vnitřního tření, Youngův modul. . .

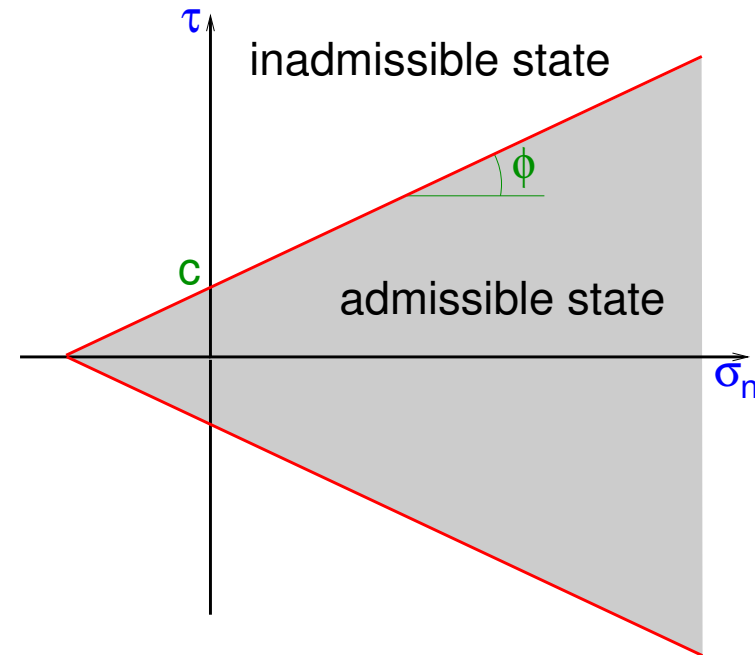
# Ideálně plastické modely

Nejpoužívanější modely v geomechanice, jako stavovou proměnnou uvažují pouze *Cauchyho napětí*  $\sigma$ .

Nejvýznamnějším zástupcem ideálně plastických modelů je tzv. *Mohr-Coulombův model*.

# Mohr-Coulombův model

Charakterizován *plochou plasticity*, jež tvoří obálku všech fyzikálně přípustných stavů zeminy.



Uvnitř obálky pevnosti je chování *lineárně elastické*, s konstantním *Youngovým modulem  $E$*  a *Poissonovým číslem  $\nu$*

$$\nu = \frac{\epsilon_r}{\epsilon_a}$$



# Parametry Mohr-Coulombova modelu

Mohr-Coulombův model vyžaduje *pět* materiálových parametrů, čtyři již známe. *Parametry chování v elastické oblasti:*

$E$ . . . Youngův modul

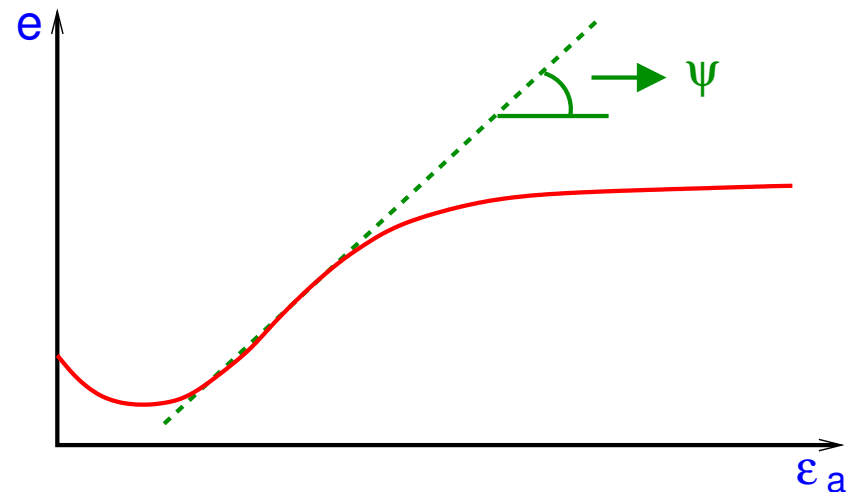
$\nu$ . . . Poissonovo číslo

*Parametry obálky pevnosti:*

$\varphi$ . . . úhel vnitřního tření

$c$ . . . soudržnost

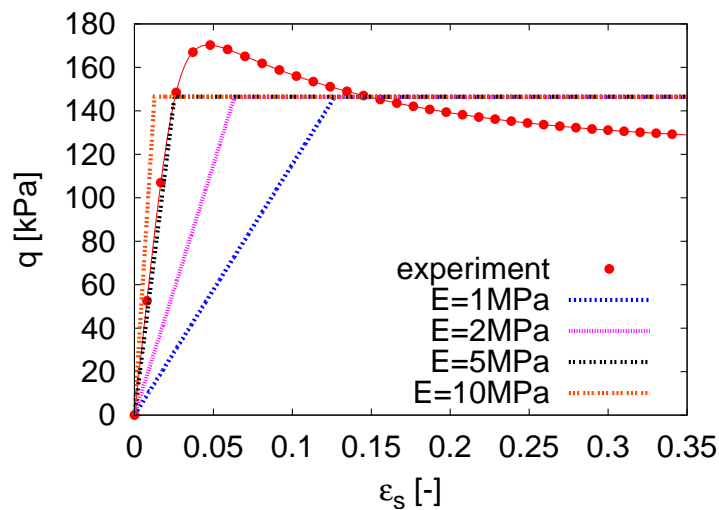
$\psi$ . . . úhel dilatance  $\Rightarrow$



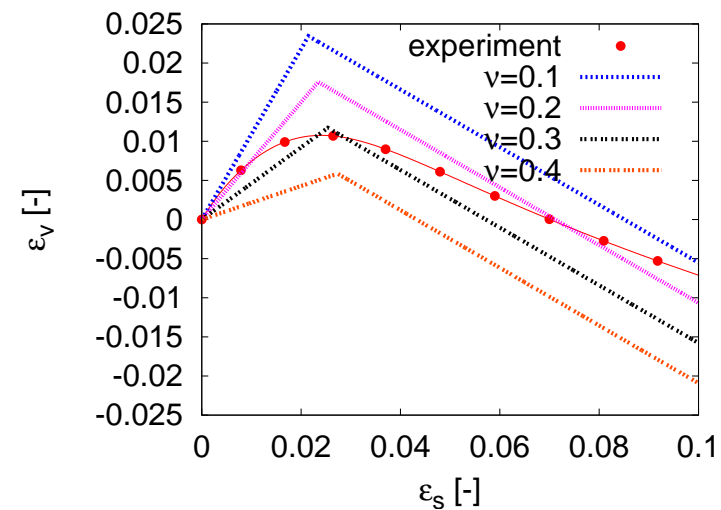
# Kalibrace Mohr-Coulombova modelu

*Kalibrací* konstitučního modelu rozumíme *nalezení materiálových parametrů* vyhovující daným *experimentálním datům*.

Mohr-Coulombův model není pokročilý materiálový model, proto je kalibrace vždy do značné míry subjektivní:

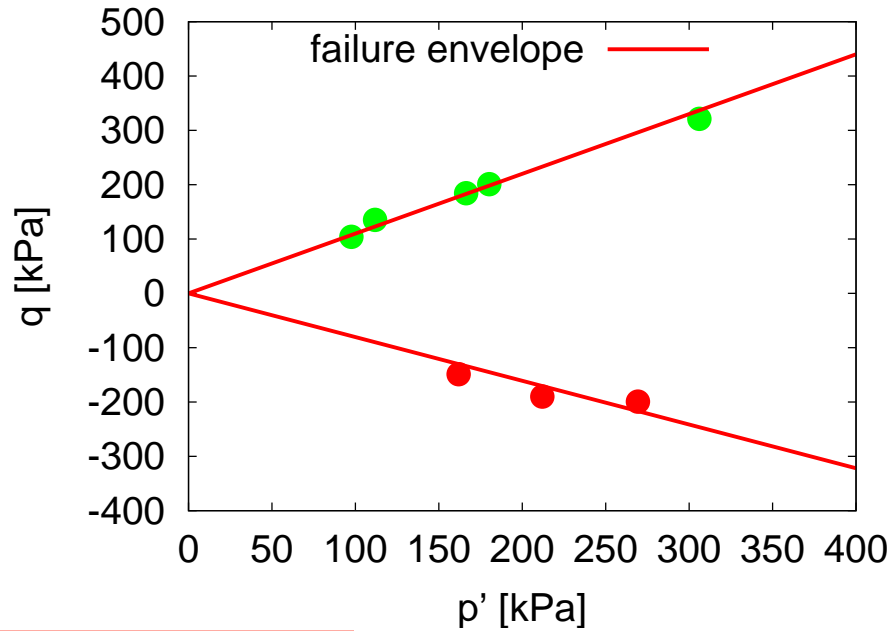


$$\Rightarrow E \simeq 5 \text{ MPa}$$

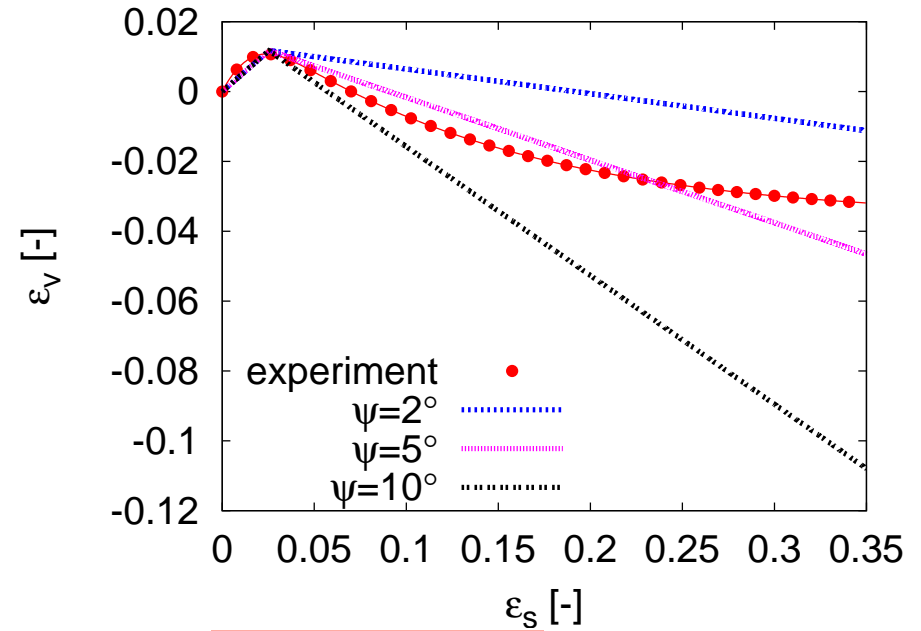


$$\Rightarrow \nu \simeq 0.3$$

# Kalibrace Mohr-Coulombova modelu



$$\Rightarrow \varphi \simeq 25^\circ$$



$$\Rightarrow \psi \simeq 5^\circ$$

# Nevýhody Mohr-Coulombova modelu

Nezákladnější konstituční model, jeho hlavní nevýhoda tkví v tom, že jako *parametry (konstanty)* jsou uvažovány charakteristiky zeminy jež ve skutečnosti nejsou konstantní. Např:

- Již víme, že *Youngův modul  $E$*  je závislý na přetvoření a na napětí. Mohr-Coulombův model uvažuje Youngův modul konstantní.

# Nevýhody Mohr-Coulombova modelu

Nezákladnější konstituční model, jeho hlavní nevýhoda tkví v tom, že jako *parametry (konstanty)* jsou uvažovány charakteristiky zeminy jež ve skutečnosti nejsou konstantní. Např:

- Již víme, že *Youngův modul  $E$*  je závislý na přetvoření a na napětí. Mohr-Coulombův model uvažuje Youngův modul konstantní.
- Dále víme, že *úhel vnitřního tření  $\varphi$*  u ulehlé zeminy postupně poklesá z vrcholové hodnoty  $\varphi_p$  na kritickou hodnotu  $\varphi_c$ . Mohr-Coulombův model uvažuje úhel vnitřního tření konstantní.

# Nevýhody Mohr-Coulombova modelu

Nezákladnější konstituční model, jeho hlavní nevýhoda tkví v tom, že jako *parametry (konstanty)* jsou uvažovány charakteristiky zeminy jež ve skutečnosti nejsou konstantní. Např:

- Již víme, že *Youngův modul  $E$*  je závislý na přetvoření a na napětí. Mohr-Coulombův model uvažuje Youngův modul konstantní.
- Dále víme, že *úhel vnitřního tření  $\varphi$*  u ulehlé zeminy postupně poklesá z vrcholové hodnoty  $\varphi_p$  na kritickou hodnotu  $\varphi_c$ . Mohr-Coulombův model uvažuje úhel vnitřního tření konstantní.

Tyto nevýhody jsou eliminovány u pokročilejších konstitučních modelů, které uvažují *číslo pórovitosti  $e$*  jako stavovou proměnnou.

# Úvod do matematického modelování

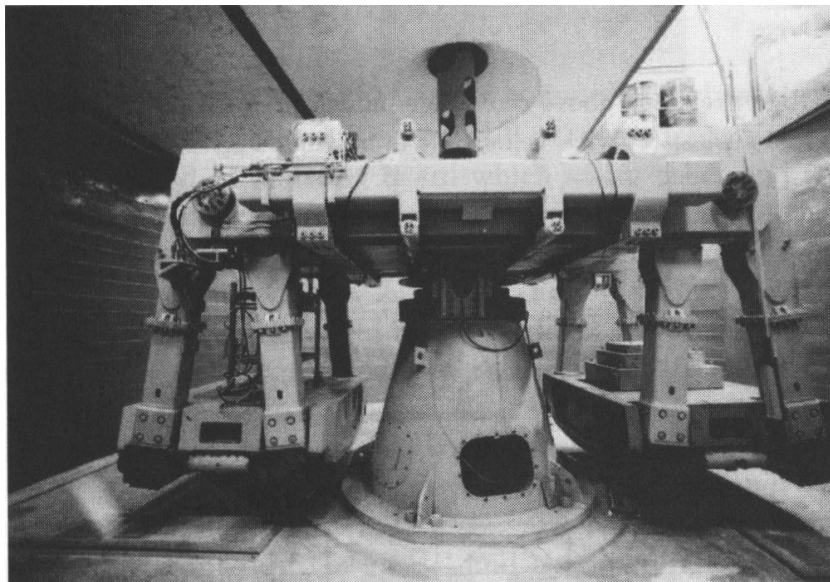
Způsoby řešení geomechanických úloh můžeme rozdělit na:

- *Observační*: Spolehnutí na pozorování, analogii a zkušenost
- *Semianalytické*: Kombinace observačních a matematických přístupů. Statistika, extrapolace, bez porozumění fyzikální podstaty jevů
- *Analytické a numerické*: Idealizace geologického prostředí matematickým modelem. Uzavřená (analytická) a numerická řešení.

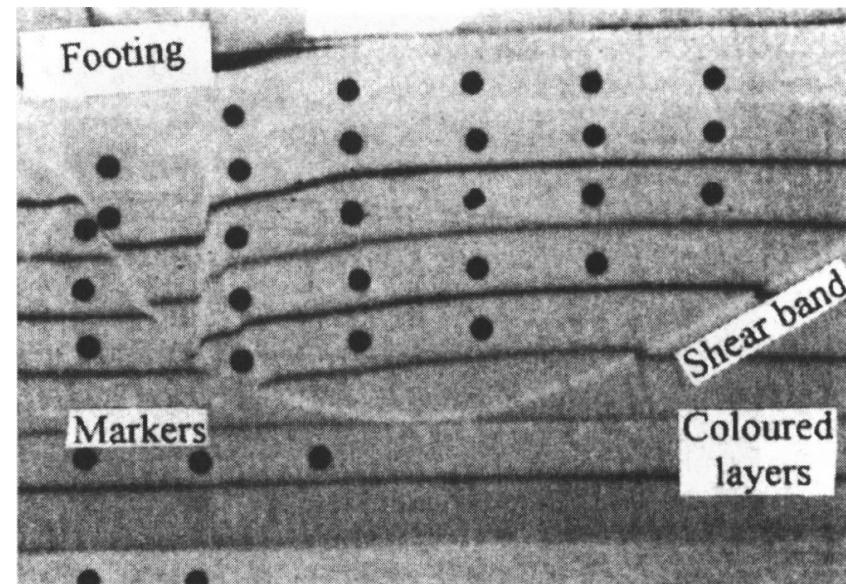
# Úvod do matematického modelování

Přednáška se bude zabývat pouze posledním bodem.

V minulosti převládal zájem o analytické metody a fyzikální modelování (modelové zkoušky ve zmenšeném měřítku).



Muir Wood (2004)



Bakir et al. (1994)



# Úvod do matematického modelování

Dnes, s rozvojem výpočetní techniky, začínají numerické metody nabývat výsadní postavení ve využití pro geotechnický design.

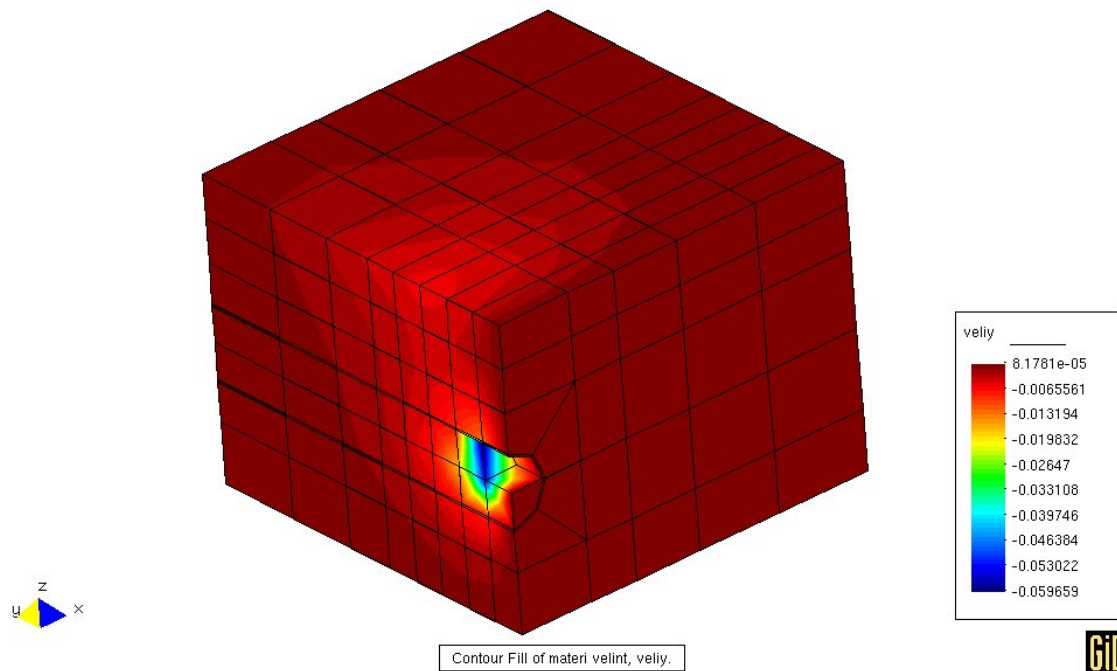
Matematický model *je nástroj* pro pochopení problému, nikdy však ne *přesným řešením*. Pro jeho účelné využití je nutné znát jeho možnosti a omezení. Model vždy zjednodušuje velmi komplexní realitu. Je nutno dbát na to, aby byly vystihnuty nejdůležitější aspekty řešeného problému.

# Postup při matematickém modelování

1. Zodpovězení otázky *PROČ* potřebuji matematický model. Co s jeho pomocí potřebuji vyřešit.
2. S tvorbou modelu je nutno začít *co nejdříve*. I předběžné výsledky mohou být využity pro plánování polních zkoušek a monitoringu.
3. Je nutno si rozmyslet kvalitativní očekávané výsledky. První model sestavený s pomocí kteréhokoliv programu nebude bezchybný! Chyby je možno odhalit jen pokud co nejjednodušší model postupně zesložitujeme.
4. Vždy použijeme *co nejjednodušší* model, který stále vystihuje nejdůležitější aspekty řešeného problému.

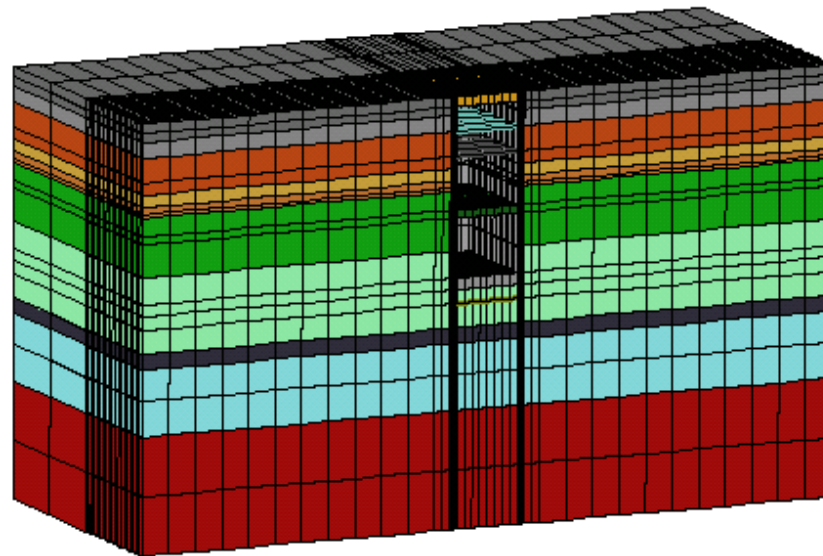
# Postup při matematickém modelování

5. V případě, že není možno sestavit model jenž vystihne základní charakteristiky řešeného problému (např. 2D výpočet pro případ s výraznými trojrozměrnými efekty), je možno provést sérii simulací pro získání výsledků v mezních případech. Z rozmezí získaných hodnot je možno odhadnout správné výsledky.



# Oblasti aplikace počítačových modelů v geomechanice

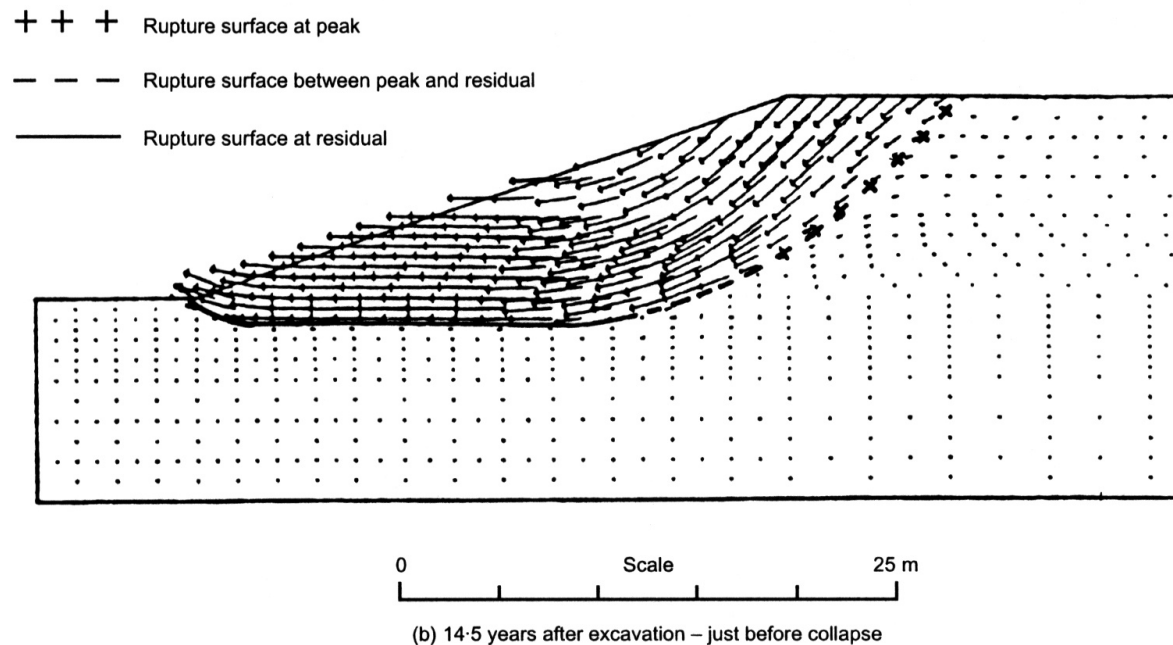
1. Řešení komplexních geotechnických úloh, kde neexistuje uzavřené (analytické) řešení (interakce několika vlivů, komplikované geologické podmínky . . . ).



feat.nl (2005)

# Oblasti aplikace počítačových modelů v geomechanice

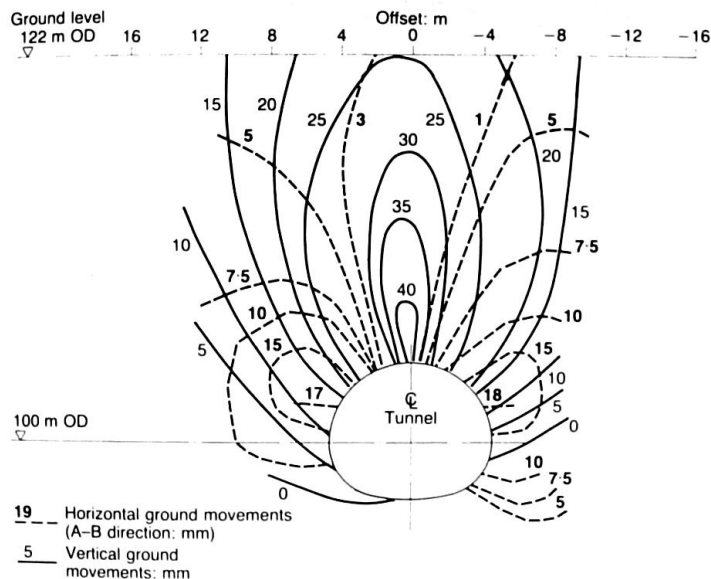
2. Pochopení i rozvoj tradičních metod (progresivní porušování, hledání kritické smykové plochy)



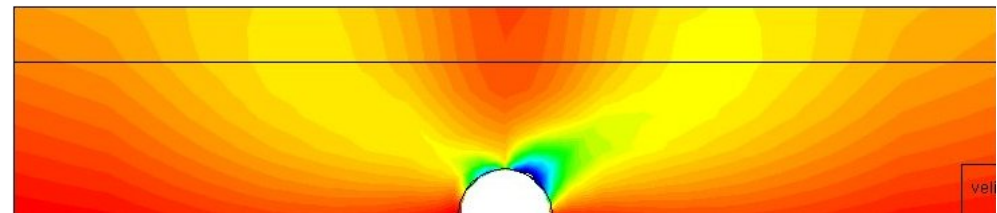
Potts et al. (1997)

# Oblasti aplikace počítačových modelů v geomechanice

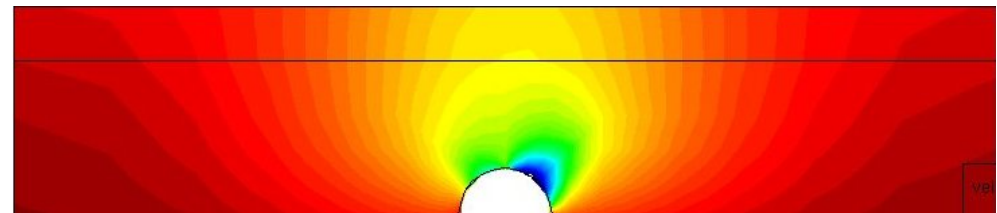
3. Studie a zohlednění vlivu nelinearity (analytická řešení jsou pro lineárně pružný poloprostor, případně pro ideálně plastický materiál)



Deane and Basset (1995)



Ideální plasticita

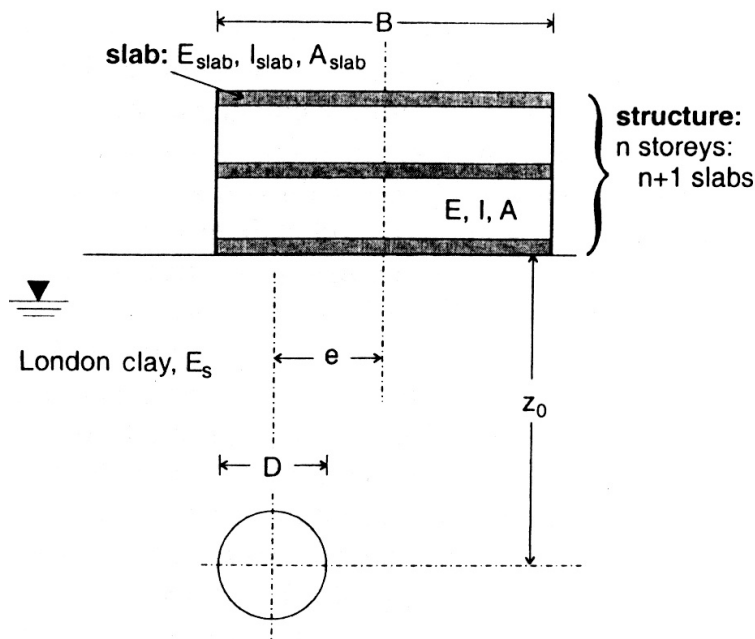


Nelineární model

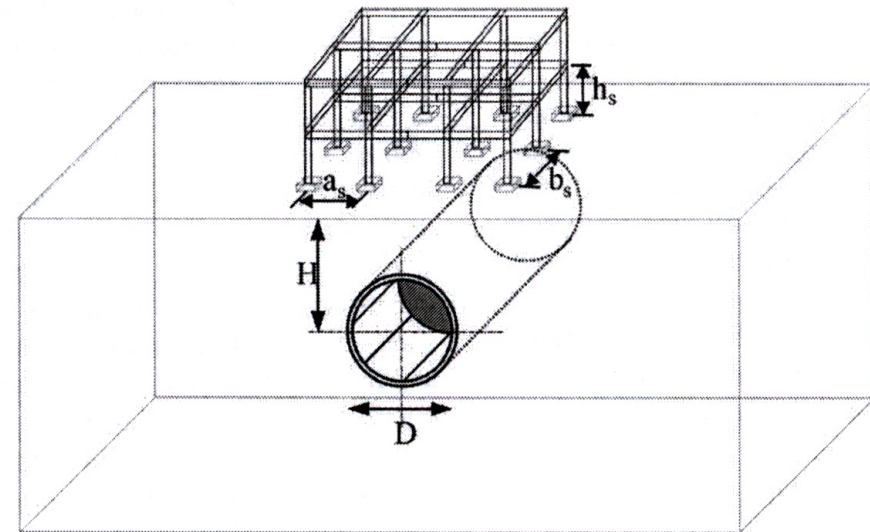
Mašín a Herle (2005)

# Oblasti aplikace počítačových modelů v geomechanice

4. Vývoj jednoduchých empirických návrhových vztahů z numerických studií (např. deformace budovy nad výrubem tunelu)



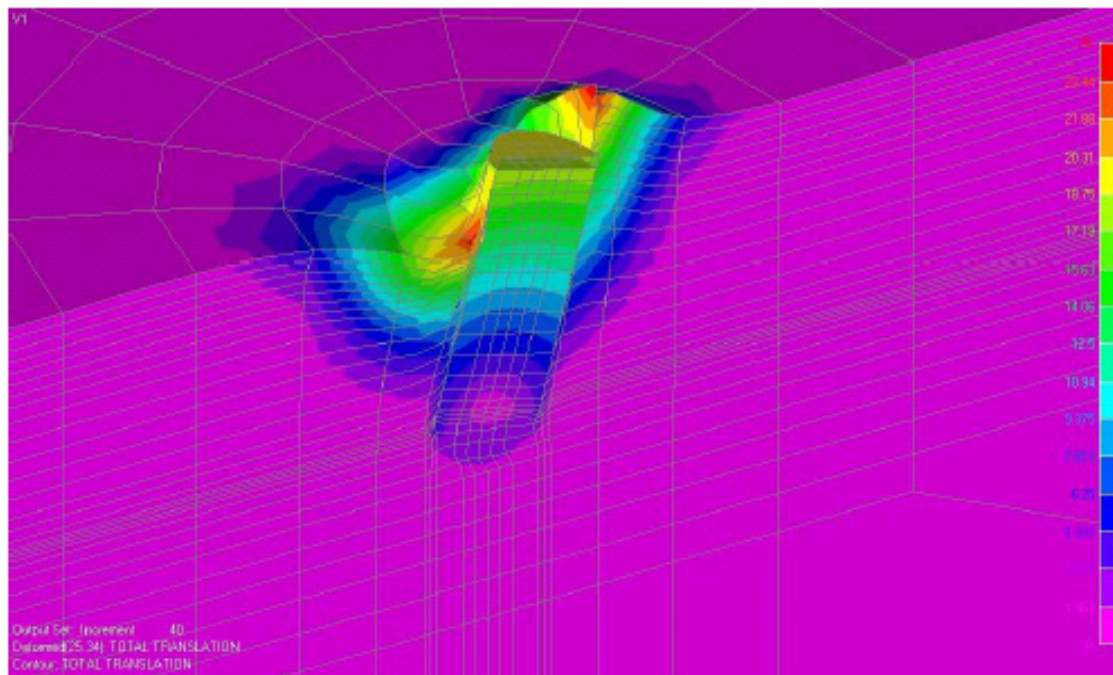
Francius et al. (2004)



Mroueh and Shahour (2003)

# Oblasti aplikace počítačových modelů v geomechanice

5. Interpretace údajů z monitoringu, využití pro plánování nejvhodnějších monitorovacích bodů.

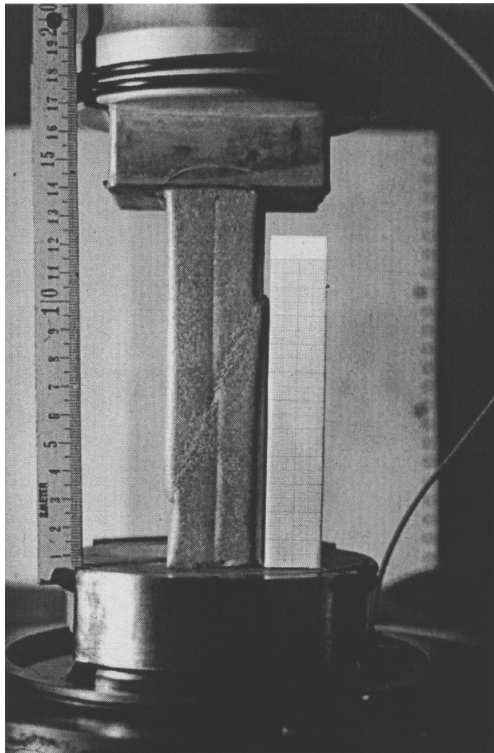


Rahim (2002)

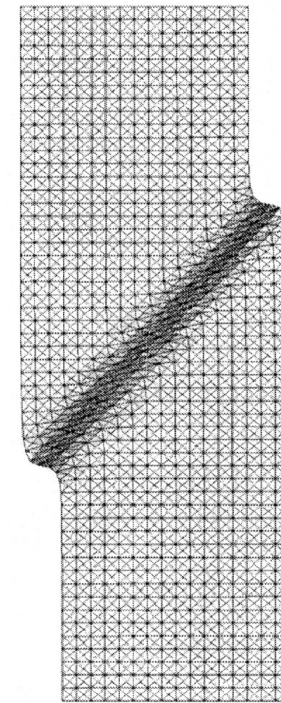


# Oblasti aplikace počítačových modelů v geomechanice

6. Interpretace laboratorních zkoušek (nerovnoměrné rozdělení napětí, lokalizace deformace)



Vardoulakis (1977)



Tejchman (2004)

# Oblasti aplikace počítačových modelů v geomechanice

7. Řízení laboratorního programu (nestandardní dráhy napětí v okolí geotechnické konstrukce)

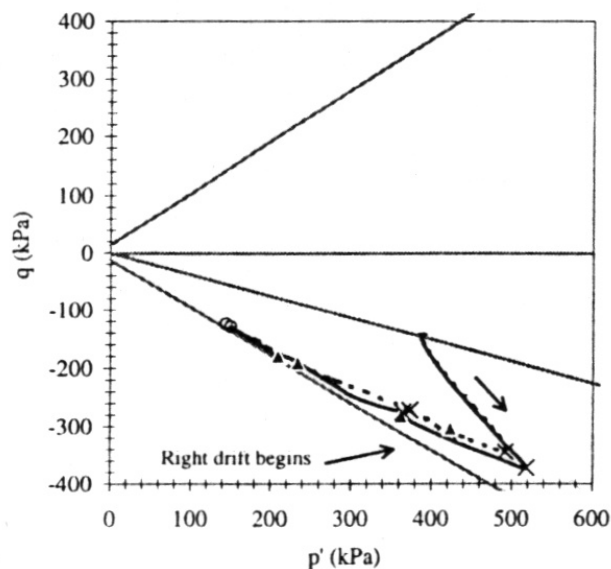


Figure 7(b). Stress path at the invert

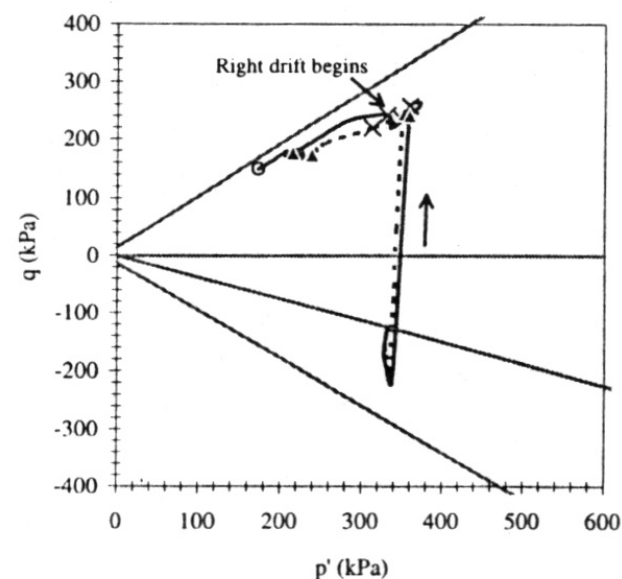


Figure 7(d). Stress path at the right springline

Tang et al. (2000)

## Výzkum na oddělení IG

V případě dostatku času bude nyní prezentován výzkum chování zemin a numerického modelování probíhající aktuálně na oddělení IG.