Konstituční modelování

Numerické modelování v aplikované geologii

David Mašín

Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užité geofyziky
Přírodovědecká fakulta
Karlova Univerzita v Praze

Přednášky pro obor Geotechnologie

Úvod

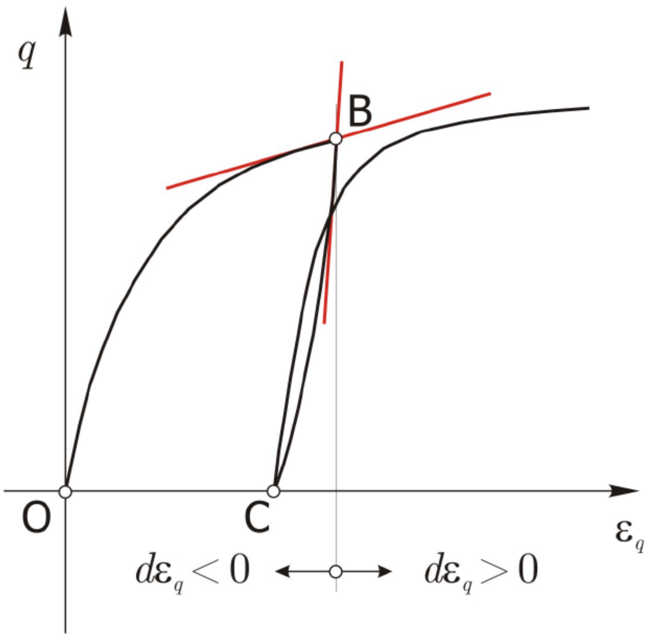
- V této části přednášky se seznámíme se základy matematického modelování mechanického chování geomateriálů - tzv. *konstituční modelování*.
- Nejprve si shrneme nejdůležitější aspekty chování zemin: jde o opakování látky z předmětu mechanika zemin, ovšem viděno z perspektivy matematického modelování.
- Poté si postupně probereme jednotlivé přístupy k modelování zemin a shrneme jejich výhody a nevýhody.

Obsah

Shrnutí chování zemin

Nevratnost chování zemin

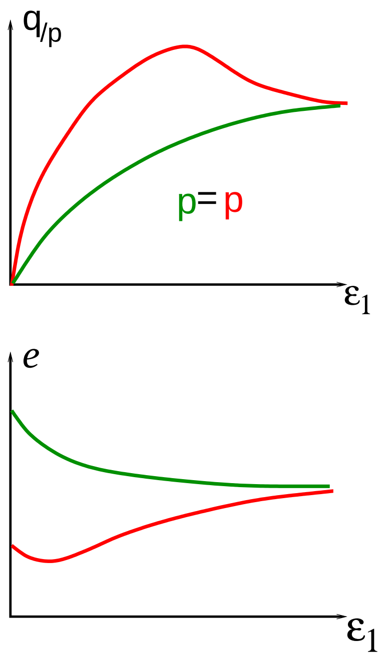
- Chování zemin je *nevratné* (neelastické).



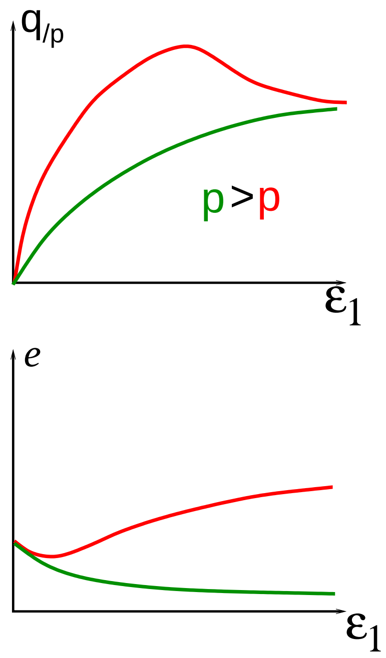
Shrnutí chování zemin

Vliv pórovitosti a napětí na výsledky drénované triaxiální zkoušky

- Vliv pórovitosti

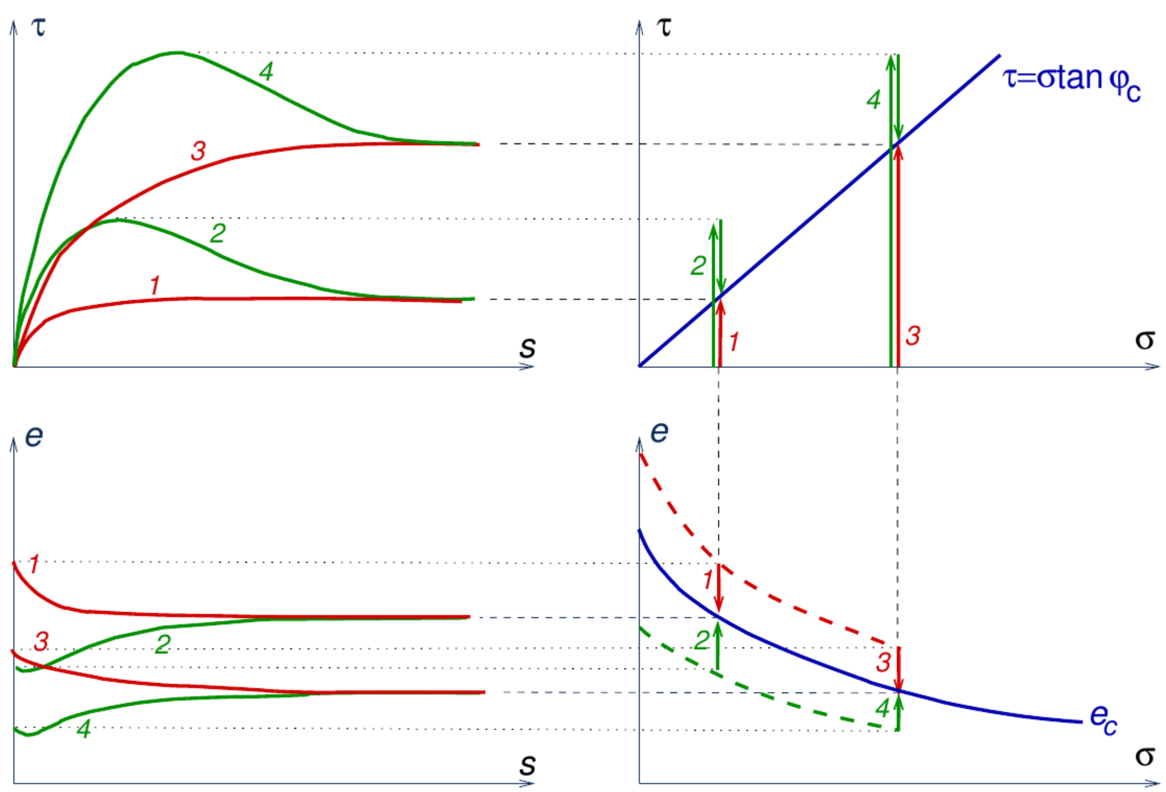


- Vliv napětí



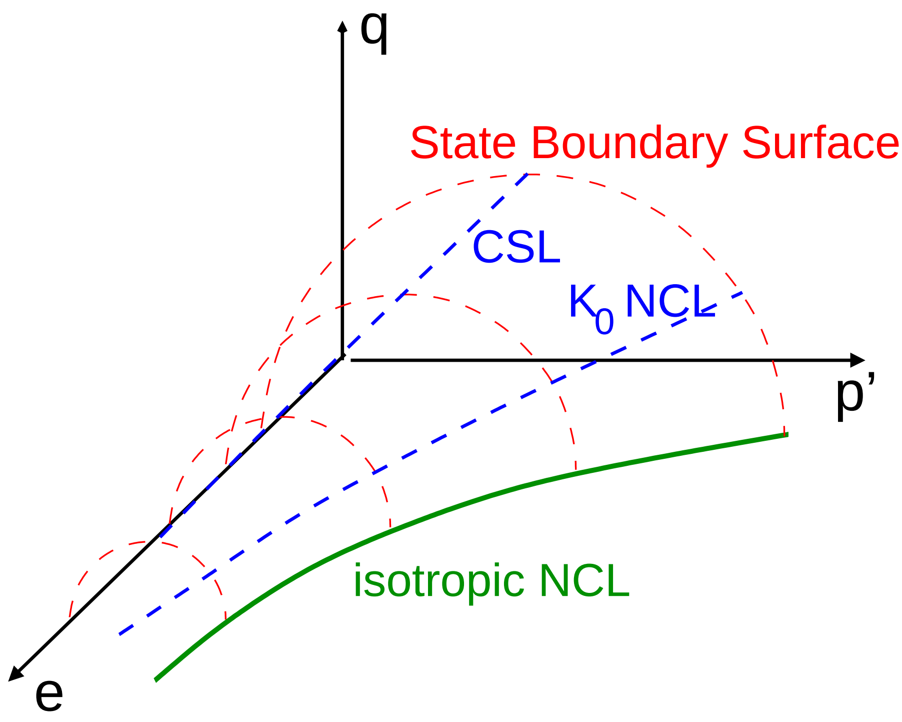
Shrnutí chování zemin

Vliv pórovitosti a napětí interpretované pomocí mechaniky kritických stavů



Shrnutí chování zemin

Mezní plocha stavů

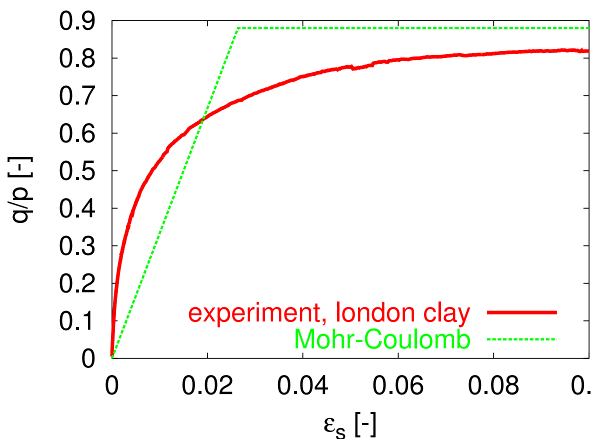


Shrnutí chování zemin

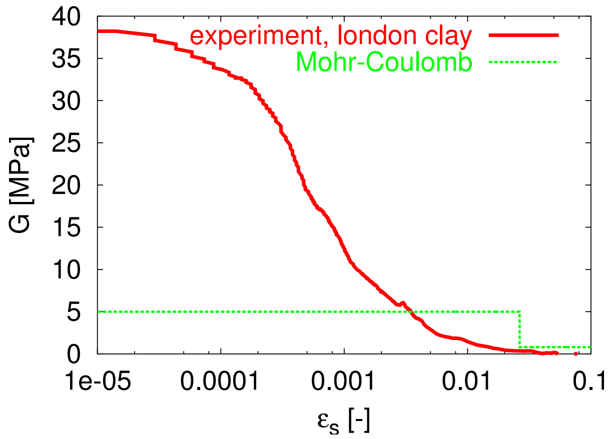
Shrnutí chování zemin

Nelinární chování zemin

- Nedrénovaná triaxiální zkouška na jílu, pracovní diagram



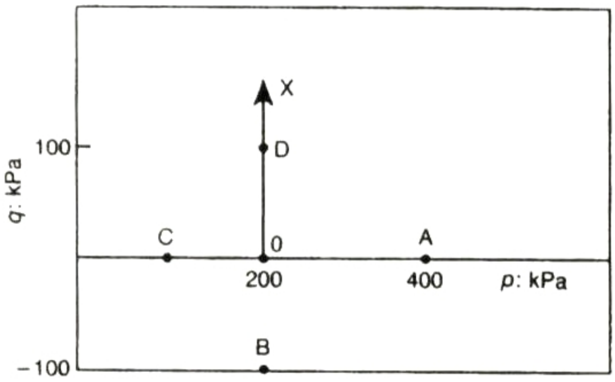
- Tuhost vs. smykové přetvoření v logaritmickém měřítku



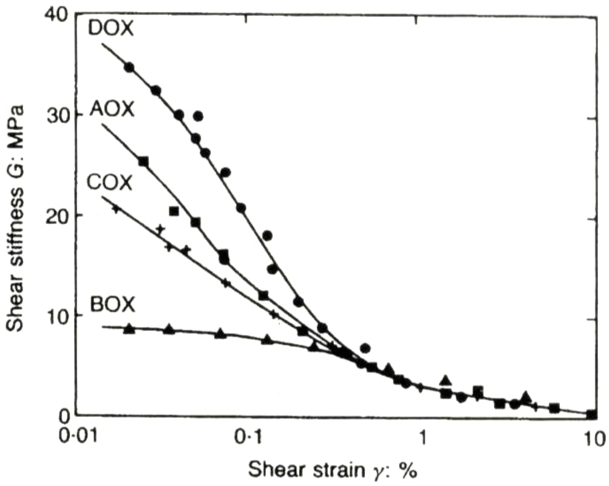
Shrnutí chování zemin

Závislost chování na směru zatěžování

- Stejná dráha napětí, ale rozdílná historie zatěžování



- Tuhost versus přetvoření

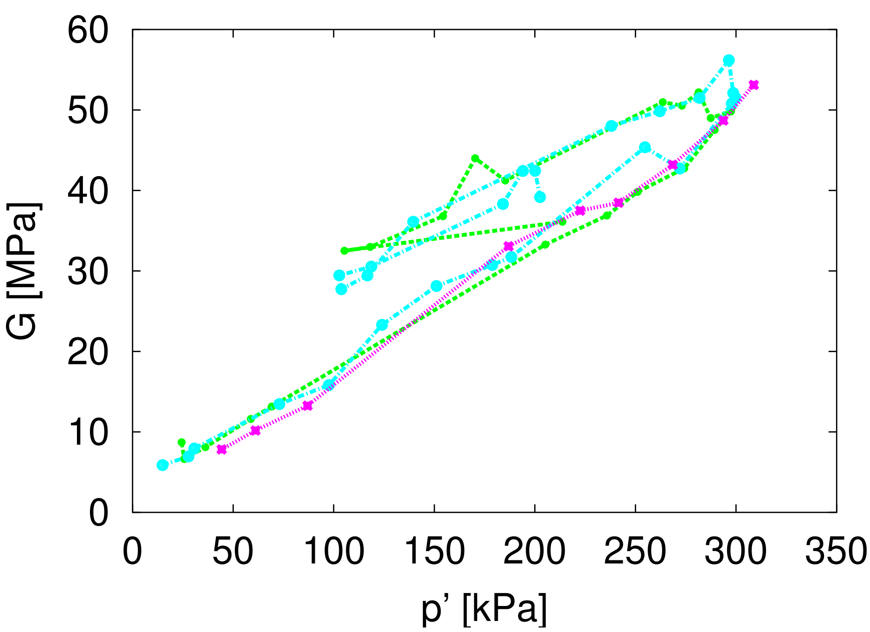


Atkinson et al. (1990)

Shrnutí chování zemin

Závislost tuhosti na úrovni napětí

- Tuhost při velmi malých přetvořeních G_0 na londýnském jílu



Shrnutí chování zemin

Základní aspekty chování zemin které lze modelovat pomocí materiálových modelů:

- Závislost chování na středním napětí a pórovitosti
- Mezní plocha stavů
- Nelinární chování zemin
- Závislost chování na historii zatěžování
- Závislost tuhosti na úrovni napětí

Outline

Parametry versus stavové proměnné

- Vždy musíme rozlišovat parametry a stavové proměnné.
- *Parametry*: materiálové *konstanty* závislé na typu zeminy, ale nezávislé na jejich stavu (např. úhel vnitřního tření v kritickém stavu).
- *Stavové proměnné*: proměnné charakterizující stav (napětí, číslo pórovitosti...).
- "Parametry" některých modelů závisí na stavu, což není správný přístup k modelování (například úhel vnitřního tření Mohr-Coulombova modelu).

Definice konstitučního modelu

- Konstitučním (materiálovým) vztahem rozumíme matematickou závislost mezi deformací materiálu a jeho stavovými veličinami.
- Obecná formulace konstitučního modelu může být zapsána jako:

$$\Delta\sigma = \mathcal{M}\Delta\epsilon$$

  kde $\mathcal{M}$ je tzv. *matice tuhosti*.
- Modely dělíme dle toho, jak matice $\mathcal{M}$ závisí/nezávisí na přírůstku deformace $\Delta\epsilon$ a na stavových proměnných.

Pružnost

- Pružnost: $\mathcal{M}$ nezávisí na $\Delta\epsilon$.
- $\mathcal{M}$ konstantní během zatěžování: *lineární pružnost*. Pokud $\mathcal{M}$ závisí na stavových proměnných: *nelineární pružnost*.
- Lineární pružnost: Youngův modul E a Poissonovo číslo ν jako parametry:

$$\mathcal{M} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & & & \\ \nu & 1-\nu & \nu & & & \\ \nu & \nu & 1-\nu & & & \\ & & & 1-2\nu & & \\ & & & & 1-2\nu & \\ & & & & & 1-2\nu \end{bmatrix}$$

- Zde tenzory napětí a přetvoření jsou uvažovány jako vektory:

$$\boldsymbol{\sigma} = [\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}, \sigma_{12}, \sigma_{13}, \sigma_{23}]$$
$$\boldsymbol{\epsilon} = [\epsilon_{11}, \epsilon_{22}, \epsilon_{33}, \epsilon_{12}, \epsilon_{13}, \epsilon_{23}]$$

Pružnost

- Fyzikální význam *Youngova modulu* E a *Poissonova čísla* ν je takový, že pro triaxiální axisymetrickou kompresi platí

$$\sigma_{11} = E\epsilon_{11} \qquad \nu = -\frac{\epsilon_{22}}{\epsilon_{11}}$$

- Izotropní lineární elasticita se někdy vyjadřuje pomocí *smykového modulu* G a *objemového modulu* K, jež mají následující význam:

$$q = 3G\epsilon_s \qquad p = K\epsilon_v$$

  což lze zapsat pomocí maticového zápisu

$$\begin{bmatrix} \Delta p \\ \Delta q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & 3G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\epsilon_v \\ \Delta\epsilon_s \end{bmatrix}$$

  Lze ukázat, že vztah mezi G, K, E a ν je následující:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \qquad K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$$

Pružnost

- Obecně platí, že pro lineární izotropní pružnost vždy potřebujeme pouze *dva* parametry. Ostatní můžeme dopočítat.
- Dalším případem je *oedometrický modul* E_{oed} jako poměr axiálního napětí a přetvoření při oedometrické zkoušce:

$$\sigma_{11} = E_{oed}\epsilon_{11}$$

- Dá se ukázat, že

$$E_{oed} = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}$$

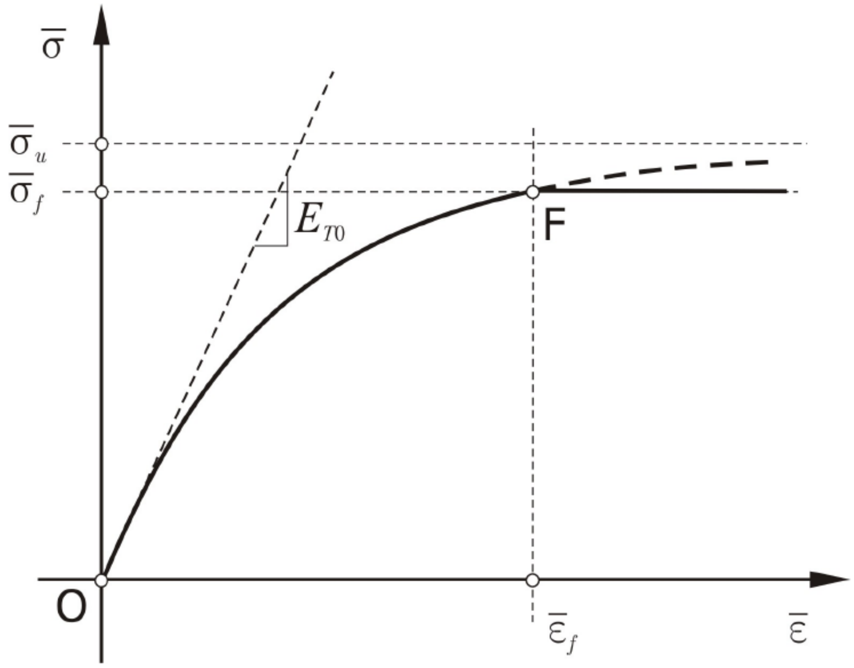
Shrnutí lineární pružnosti

Lineárně pružný model *předpovídá*/*nepředpovídá* následující aspekty chování zemin:

- *Závislost chování na středním napětí a pórovitosti*
- *Mezní plocha stavů*
- *Nelinární chování zemin*
- *Závislost chování na historii zatěžování*
- *Závislost tuhosti na úrovni napětí*

Nelineární pružnost

- *Duncan-Changův (1970) model*: Pracovní diagram triaxiální zkoušky charakterizovaný pomocí *hyperboly*



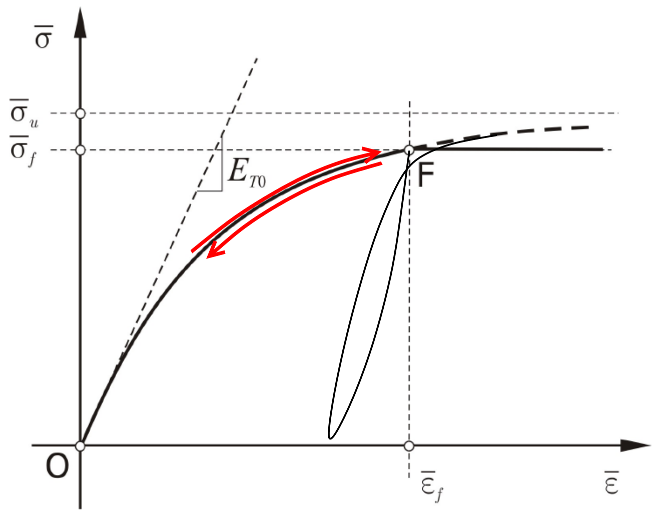
$$\sigma = \frac{\epsilon}{a + b\epsilon}$$

$$a = 1/E_{T0}$$

$$b = 1/\sigma_u$$

Nelinérní elasticita

- *Duncan-Changův (1970) model*, stejně jako ostatní nelinárně elastické modely, reprezentují pouze zatěžovací větev pracovního diagramu. *Nerealistické předpovědi odlehčení*.



Shrnutí nelineární pružnosti

Lineárně pružný model *předpovídá*/*nepředpovídá*/částečně následující aspekty chování zemin:

- *Závislost chování na středním napětí a pórovitosti*
- *Mezní plocha stavů*
- Nelinární chování zemin
- *Závislost chování na historii zatěžování*
- *Závislost tuhosti na úrovni napětí*

Elasto-plasticita

- Základní charakteristika *elasto-plastických modelů* je dekomposice přetvoření na vratné (pružné) a nevratné (plastické).

$$\Delta\boldsymbol{\epsilon} = \Delta\boldsymbol{\epsilon}^e + \Delta\boldsymbol{\epsilon}^p$$

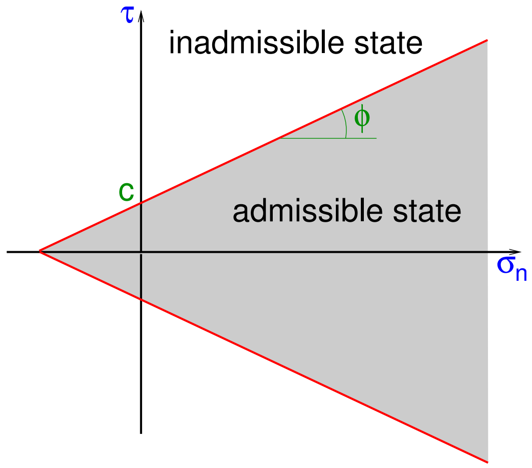
- Základní formulaci modelu lze zapsat jako:

$$\Delta\sigma = \boldsymbol{\mathcal{M}}^{ep}\Delta\epsilon = \boldsymbol{\mathcal{M}}^{e}\Delta\epsilon^e = \boldsymbol{\mathcal{M}}^{e}(\Delta\epsilon - \Delta\epsilon^p)$$

To znamená, že pro konstrukci elasto-plastického modelu stačí znát elastickou matici tuhosti a přírůstek plastického přetvoření.

Elasto-plasticita

- Elasto-plastické modely zavádí koncept *plochy plasticity*. Pouze stavy *uvnitř* nebo *na* ploše plasticity jsou přípustné.



- Uvnitř plochy plasticity, $\Delta\epsilon^p = 0$. Na ploše plasticity $\Delta\epsilon^p \neq 0$.
- Pokud mají elasto-plastické modely plochu plasticity fixovanou v prostoru napětí: *ideální plasticita*.

Elasto-plasticita

Podmínka plastického zatěžování

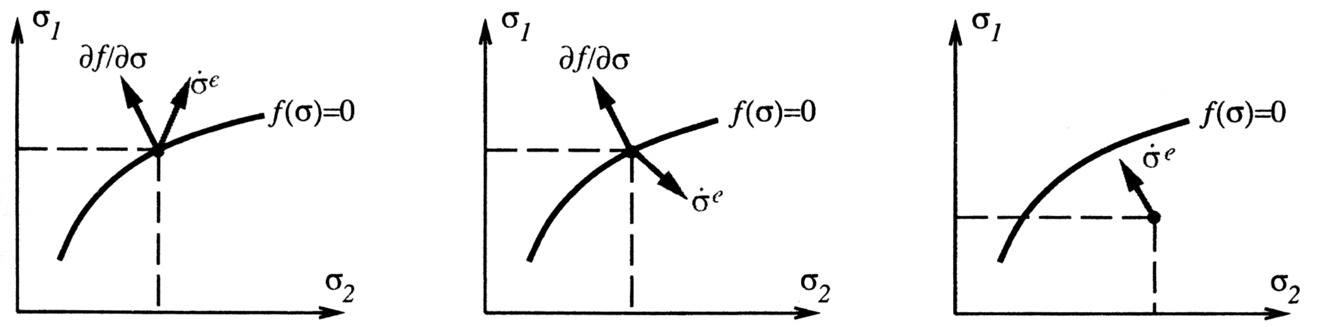
- O tom, zda bude deformace *elastická* nebo *elasto-plastická* rozhoduje *podmínka plastického zatěžování Deformace materiálu*

  je elasto-plastická, pokud je stav na ploše plasticity a současně přírůstek přetvoření směřuje k "přitěžování"
- Pro vyhodnocení podmínky plastického zatěžování je třeba definovat *zkušební přírůstek napětí* $\Delta\sigma^e$

$$\Delta\sigma^e = \boldsymbol{\mathcal{M}}^e \Delta\epsilon$$

Elasto-plasticita

Podmínka plastického zatěžování



(a) (b) (c)

- (a) Stav napětí je na ploše plasticity a zkušební přírůstek $\Delta\sigma^e$ směřuje vně plochu plasticity $\Rightarrow$ Dochází k elasto-plastickému přitěžování.
- (b) Stav napětí je na ploše plasticity a zkušební přírůstek $\Delta\sigma^e$ směřuje dovnitř či podél plochy plasticity $\Rightarrow$ Odezva je elastická.
- (c) Stav napětí je uvnitř plochy plasticity $\Rightarrow$ Odezva je elastická.

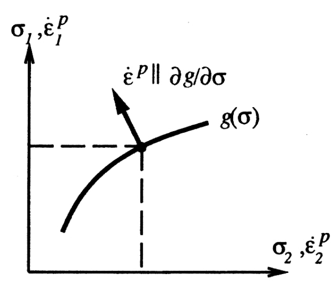
Elasto-plasticita

Směr přírůstku plastického přetvoření

- Směr $\Delta\epsilon^p$ je kolmý k *ploše plastického potenciálu* g. Tato plocha je funkcí napětí. Výpočet pomocí *gradientu*.

$$\Delta\vec{\epsilon}^p = \frac{\partial g}{\partial \sigma}$$

- U ideálně plastických modelů je plocha plastického pontenciálu většinou volena tak, aby model předpovídal *dilatanci* při zplastizování.



Elasto-plasticita

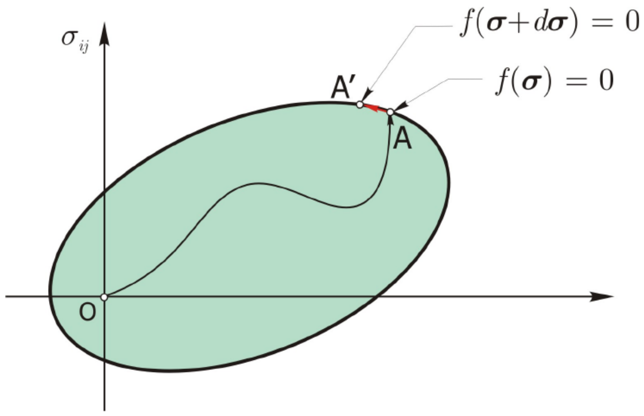
Sdružená a nesdružená plasticita

- Pokud je funkce plastického potenciálu $g(\boldsymbol{\sigma})$ shodná s podmínkou plasticity $f(\boldsymbol{\sigma})$, hovoříme o tzv. *sdružené plasticitě* (*associated plasticity*), v opačném případě o *nesdružené plasticitě* (*non-associated plasticity*).

Elasto-plasticita

Podmínka konzistence

- Velikost přírůstku plastických přetvoření počítaná z *podmínky konzistence* (po přírůstku přetvoření musí při elasto-plastickém zatěžování stav zůstat na ploše plasticity).

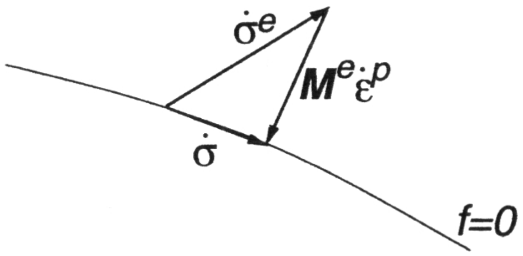


Elasto-plasticita

Podmínka konzistence

- Význam přírůstku plastického přetvoření $\Delta\epsilon$ v elasto-plastickém konstitučním vzathu lze demonstrovat následovně:

$$\Delta\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\mathcal{M}}^e : (\Delta\epsilon - \Delta\epsilon^p) = \boldsymbol{\mathcal{M}}^e : \Delta\epsilon - \boldsymbol{\mathcal{M}}^e : \Delta\epsilon^p = \Delta\boldsymbol{\sigma}^e - \boldsymbol{\mathcal{M}}^e : \Delta\epsilon^p$$

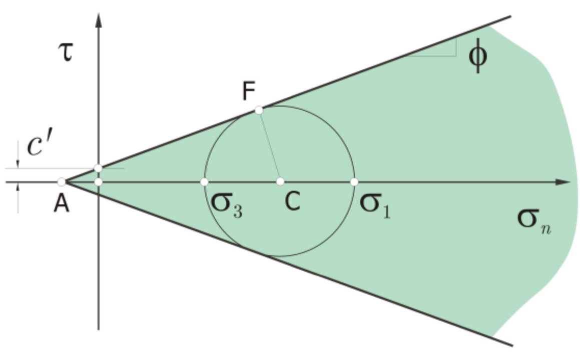


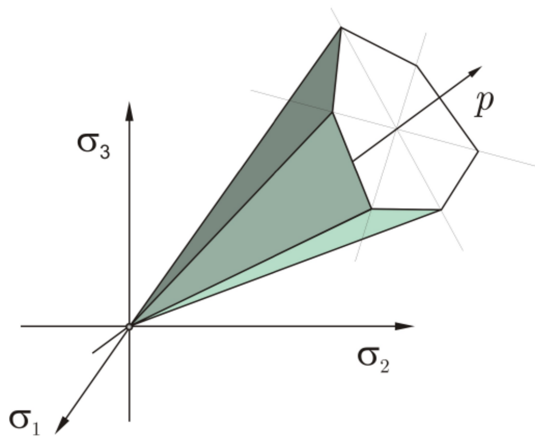
- $\Delta\boldsymbol{\sigma}^e$ nazýváme *pružný prediktor* přírůstku napětí a $\boldsymbol{\mathcal{M}}^e : \Delta\epsilon^p$ *plastický korektor*.
- Z obr je patrné, jakým způsobem je sestavena podmínka konzistence.

Elasto-plasticita

Příklad ideální plasticity - Mohr-Coulombův model

- Mohr-Coulombův model je nejrozšířenější model v geomechanických aplikacích.
- Jedná se o model ideální plasticity, má tedy fixní plochu plasticity. Definovaná pomocí parametrů *úhlu vnitřního tření* φ a *soudržnosti* c.

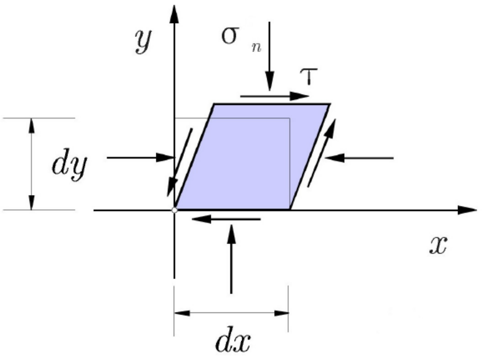


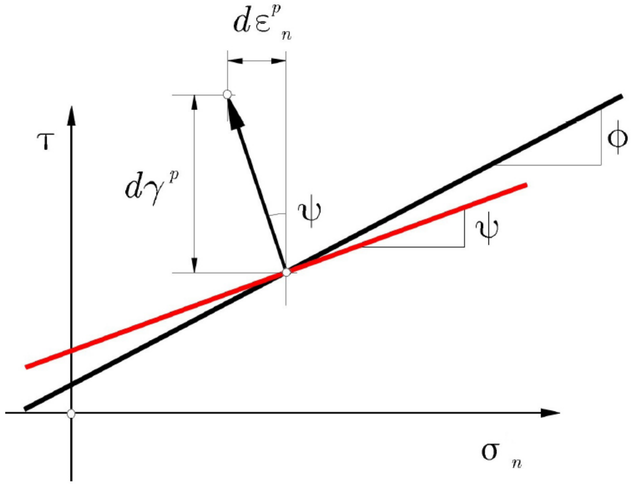


Elasto-plasticita

Příklad ideální plasticity - Mohr-Coulombův model

- Plastický potenciál definovaný s využitím parametru *úhel dilatance* ψ
- ψ definuje poměr normálových a smykových přetvoření v prostém smyku.

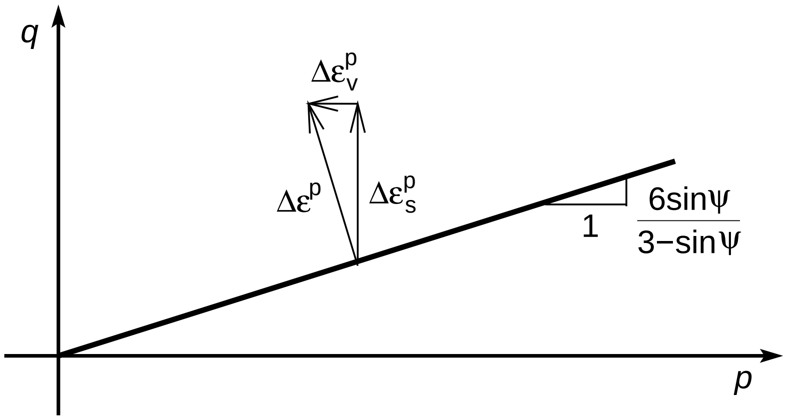




Elasto-plasticita

Příklad ideální plasticity - Mohr-Coulombův model

- Úhel dilatance také kontroluje poměr objemových a smykových přetvoření v triaxiální zkoušce.

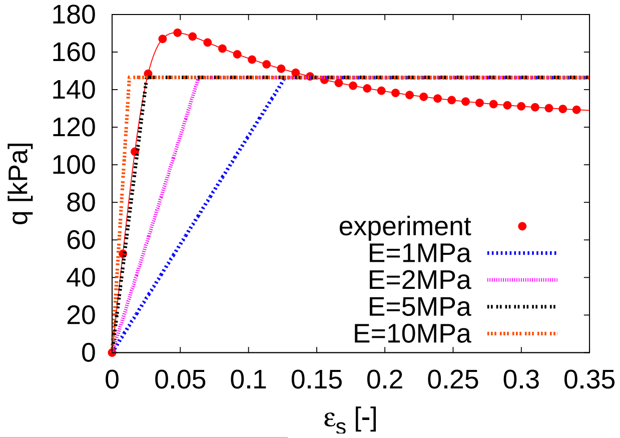


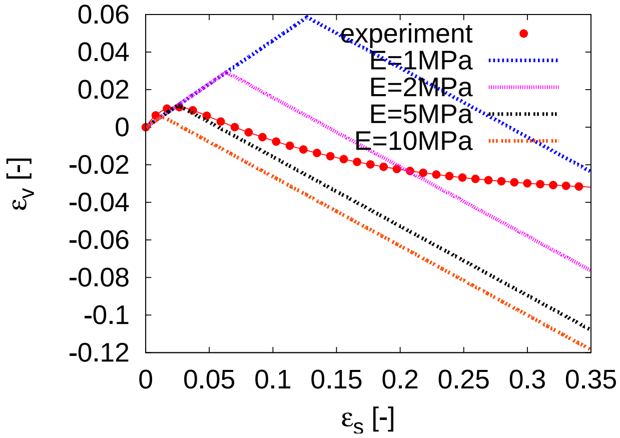
- Uvnitř plochy plasticity Mohr-Coulombův model předpovídá *lineárně isotropně elastické* chování: parametry E a ν.

Elasto-plasticita

Mohr-Coulombův model - kalibrace a význam parametrů

- Youngův modul E:



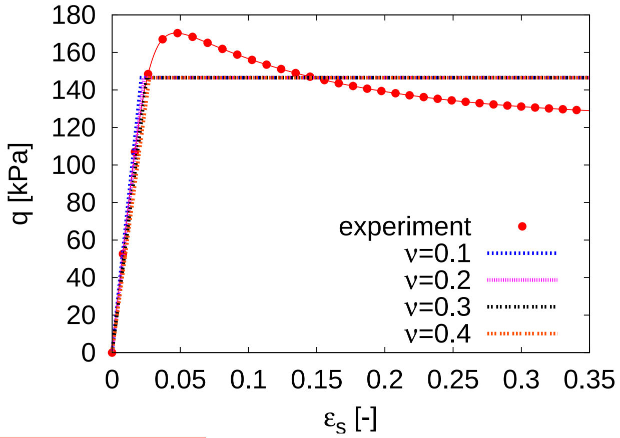


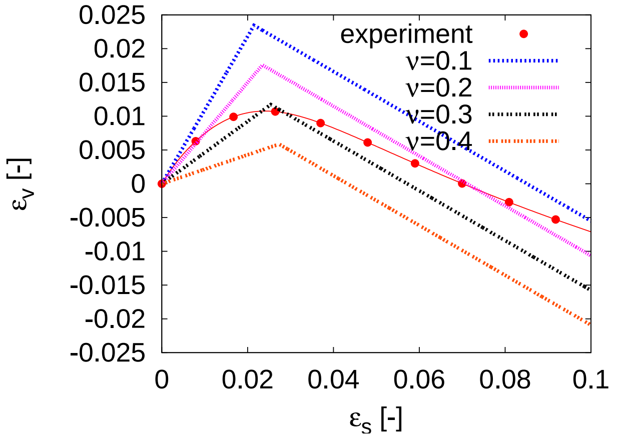
$\Rightarrow E \simeq 5$ MPa.

Elasto-plasticita

Mohr-Coulombův model - kalibrace a význam parametrů

- Poissonovo číslo ν:



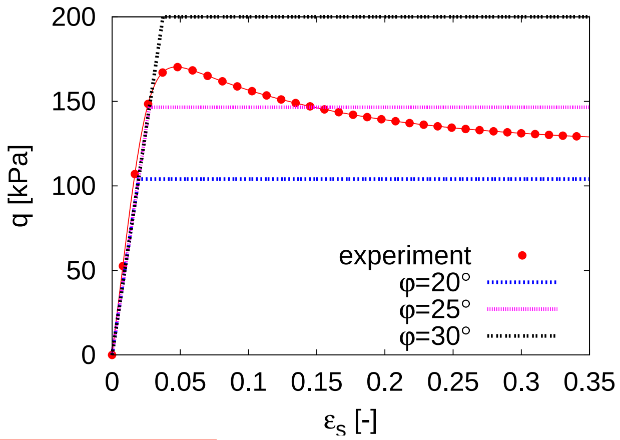


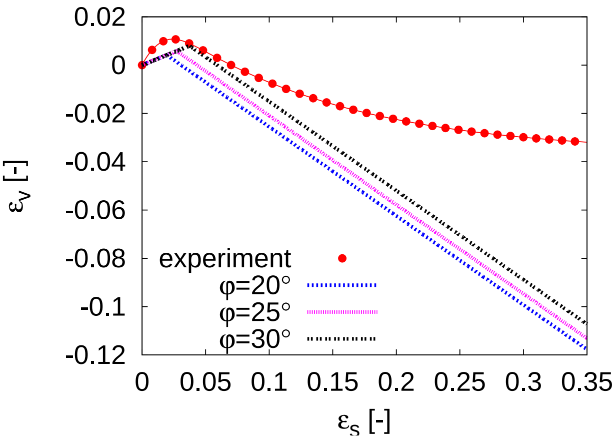
$\Rightarrow \nu \simeq 0.3$

Elasto-plasticita

Mohr-Coulombův model - kalibrace a význam parametrů

- Úhel vnitřního tření φ a efektivní soudržnost c – vliv parametrů na předpověď drénované triaxiální zkoušky (v grafech pouze vliv φ, v daném zobrazení pro jednu zkoušku je vliv c ekvivalentní).



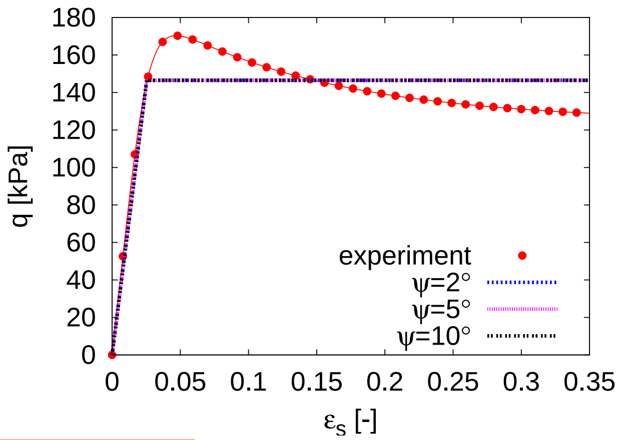


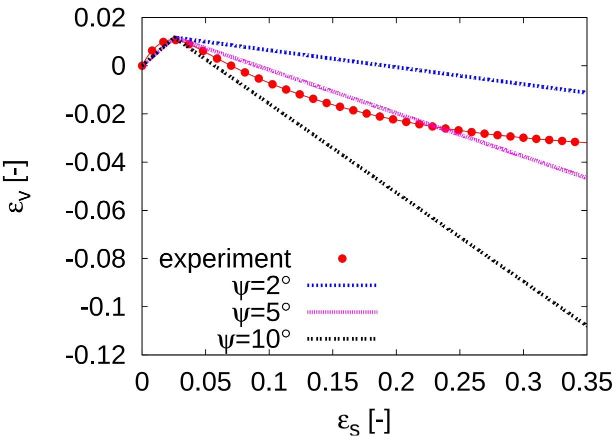
$\Rightarrow \varphi \simeq 25^\circ$

Elasto-plasticita

Mohr-Coulombův model - kalibrace a význam parametrů

- Úhel dilatance ψ:





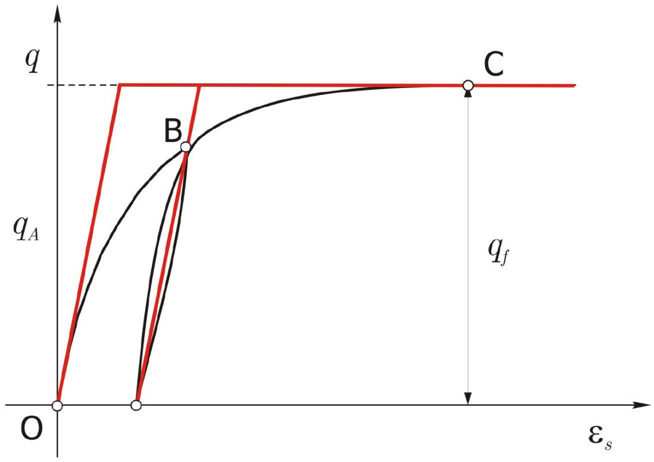
$\Rightarrow \psi \simeq 5^\circ$

Elasto-plasticita

Mohr-Coulombův model - omezení

- Mohr-Coulombův model má *dva základní nedostatky*:

1. Číslo pórovitosti (ulehlost) nejsou uvažovány jako stavové proměnní. Rozdílné parametry pro rozdílné relativní ulehlosti.
2. Lineárně elastické chování uvnitř plochy plasticity: nepředpovídá *nelinární chování zemin*.



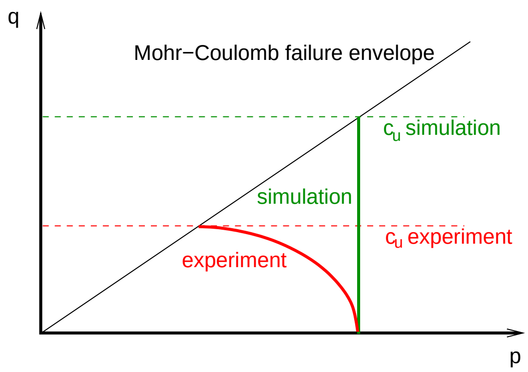
Elasto-plasticita

Mohr-Coulombův model - omezení

- Jiný problém: linárně elastická matice tuhosti implikuje *nezávislost objemových a smykových deformací*.

$$\begin{bmatrix} \Delta p \\ \Delta q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & 3G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \epsilon_v \\ \Delta \epsilon_s \end{bmatrix}$$

- To vede k *přehodnocení smykové pevnosti zemin*.



Elasto-plasticita

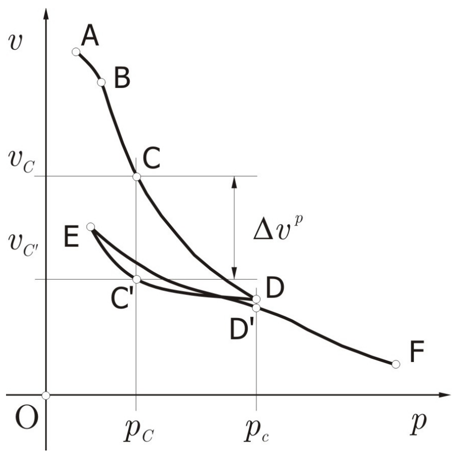
Mohr-Coulombův model - shrnutí

Základní aspekty chování zemin které lze modelovat pomocí materiálových modelů **vs.** *Mohr-Coulombův konstituční model*: (**Ano**/**Ne**)

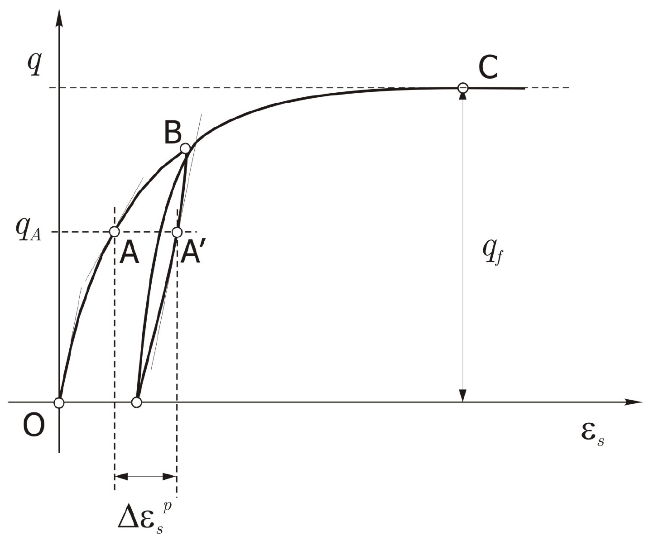
- Závislost chování na středním napětí a pórovitosti (MC: constantní úhel vnitřního tření a dilatance)
- Mezní plocha stavů (MC: pouze podmínka porušení)
- Nelinární chování zemin (MC: konstantní modul pružnosti)
- Závislost chování na historii zatěžování (MC: tuhost nezávislá na historii zatěžování)
- Závislost tuhosti na úrovni napětí (MC: konstantní tuhost)

Plasticita se zpevněním

- Zemina se chová nelinárně daleko předtím než je dosaženo *finálního stavu porušení*.



Isotropic loading-unloading

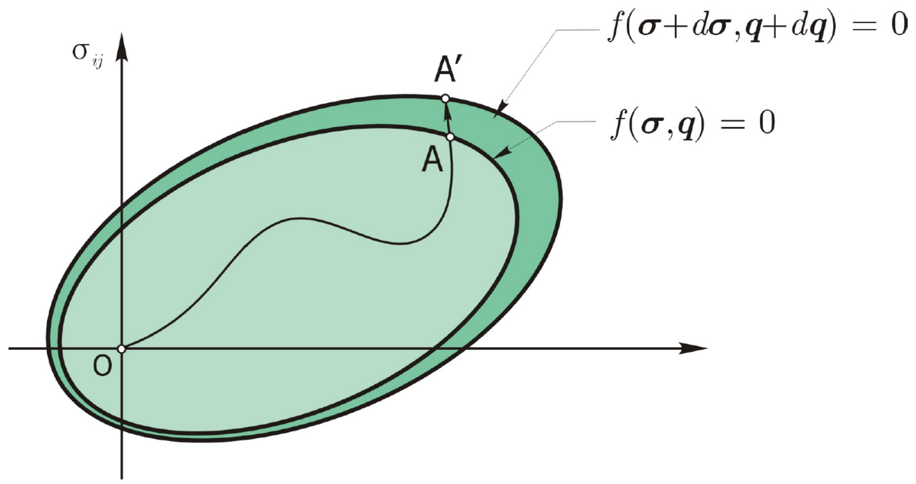


Drained triaxial test

- Zemina si "pamatuje" předchozí maximální zatížení.

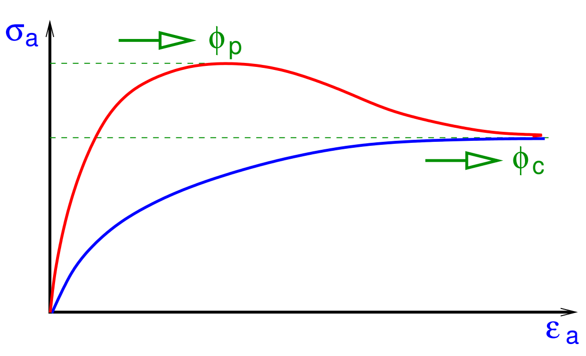
Plasticita se zpevněním

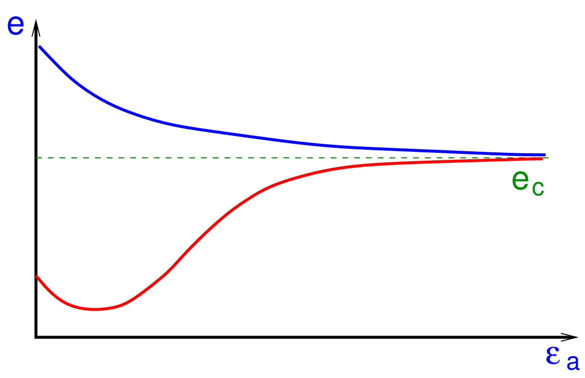
- K předpovídání tohoto fenoménu, plocha plasticity musí záviset na *dalších stavových proměnných* (jako překonsolidační napětí nebo číslo pórovitosti).
- Navíc k tomu, plocha plasticity je *uzavřená* v prostoru napětí (tímto způsobem jsou předpovídány nevratné deformace pro dráhy napětí které nevedou k porušení).



Model Cam jílu

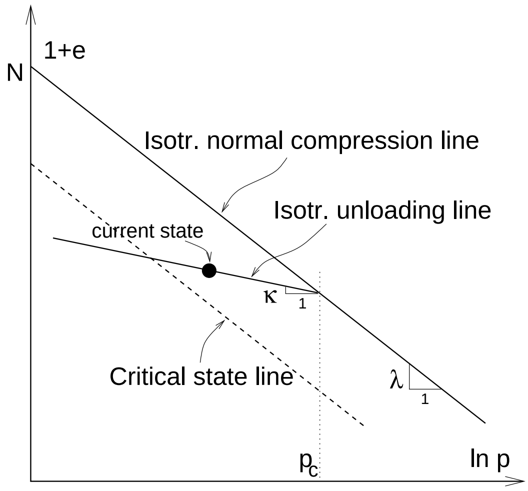
- Základní model plastcity se zpevněním: *Model Cam jílu* (Roscoe and Burland, 1968).
- Založen na *mechanice kritických stavů*. Připomeňme experimentální základ:





Model Cam jílu

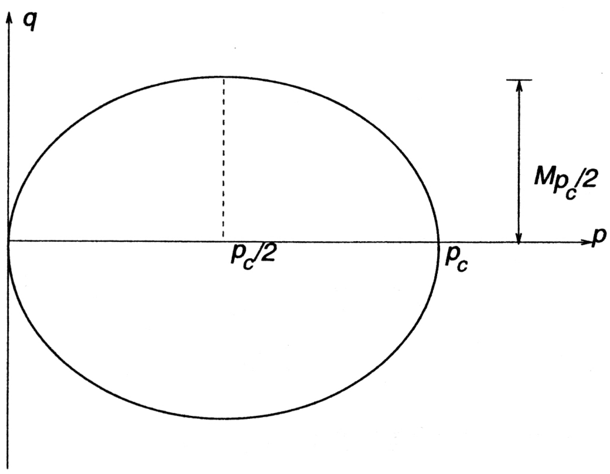
- Každý model plasticity se zpevněním je tvořen následujícími komponenty: elastická matice tuhosti, plocha plasticity, *zákon zpevnění* (nové oproti ideálně plastickým modelům), plastický potenciál.
- Elasticita: isotropní elasticita, s parametry *smykový modul* G a parameter κ, který kontroluje objemový modul $K = p(1+e)/\kappa$



Konstituční modelování zemin | Elasto-plasticita

Model Cam jílu

- Plocha plasticity modelu Cam jílu má eliptický tvar. Její velikost je kontrolována překonsolidačním napětím p_c.



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

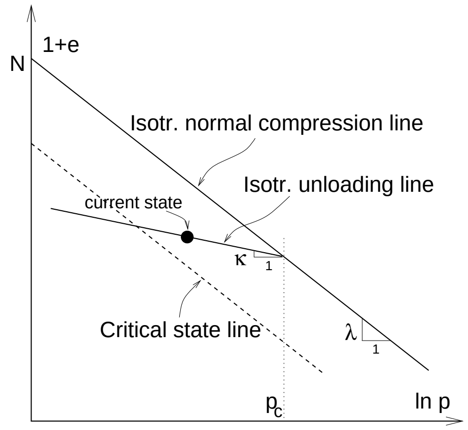
- Poměr poloos elipsy je kontrolován parametrem M, který je pro *triaxiální kompresi* vztažen ke kritickému úhlu vnitřního tření dle

Model Cam jílu

- *Zákon zpevnění* modelu Cam jílu specifikuje závislost plochy plastcity na plastických objemových přetvořeních

$$\Delta p_c = \frac{p_c(1+e)}{\lambda - \kappa} \Delta \epsilon_v^p$$

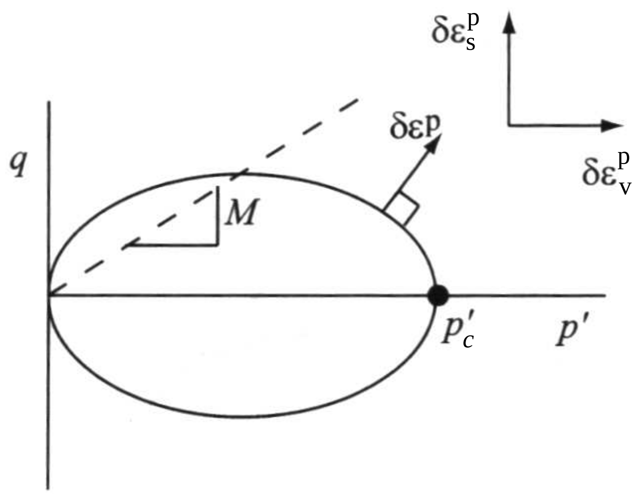
- Vývoj p_c je definován tak, aby směrnice čáry isotropní normální konsolidace byla definována parametrem λ



Konstituční modelování zemin | Elasto-plasticita

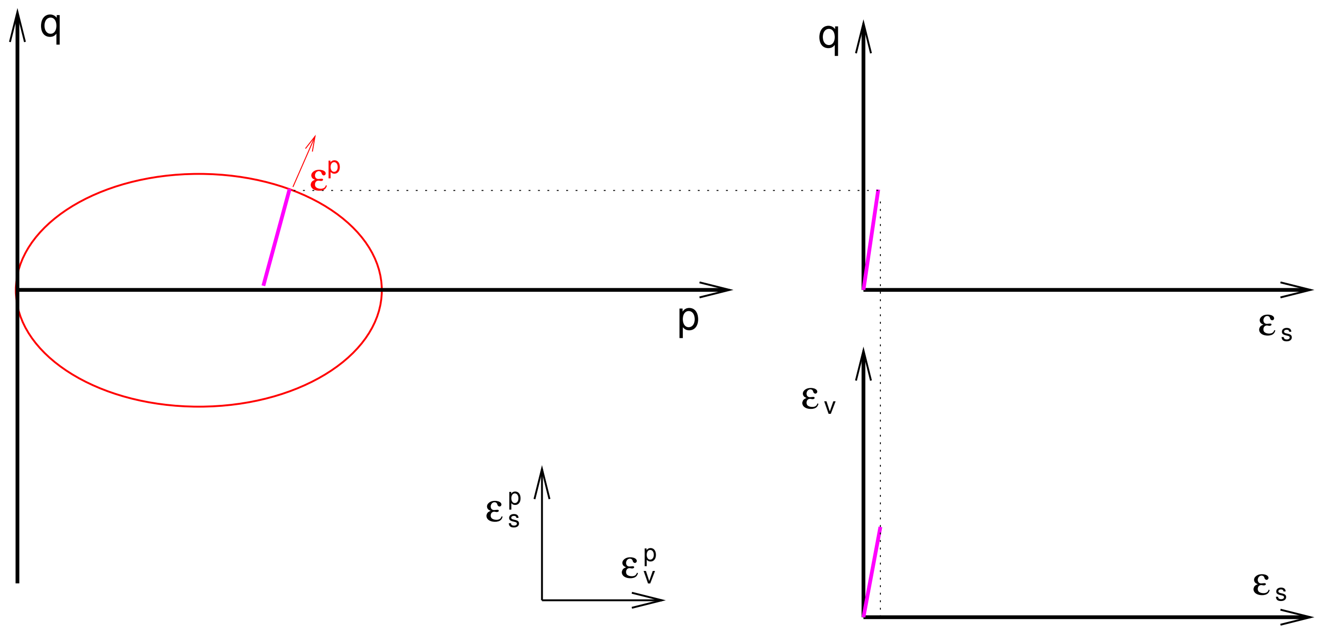
Model Cam jílu

- Plastický potenciál modelu Cam jílu je *asociován* s plochou plasticity (je shodný s plochou plasticity, $f = g$).



Model Cam jílu

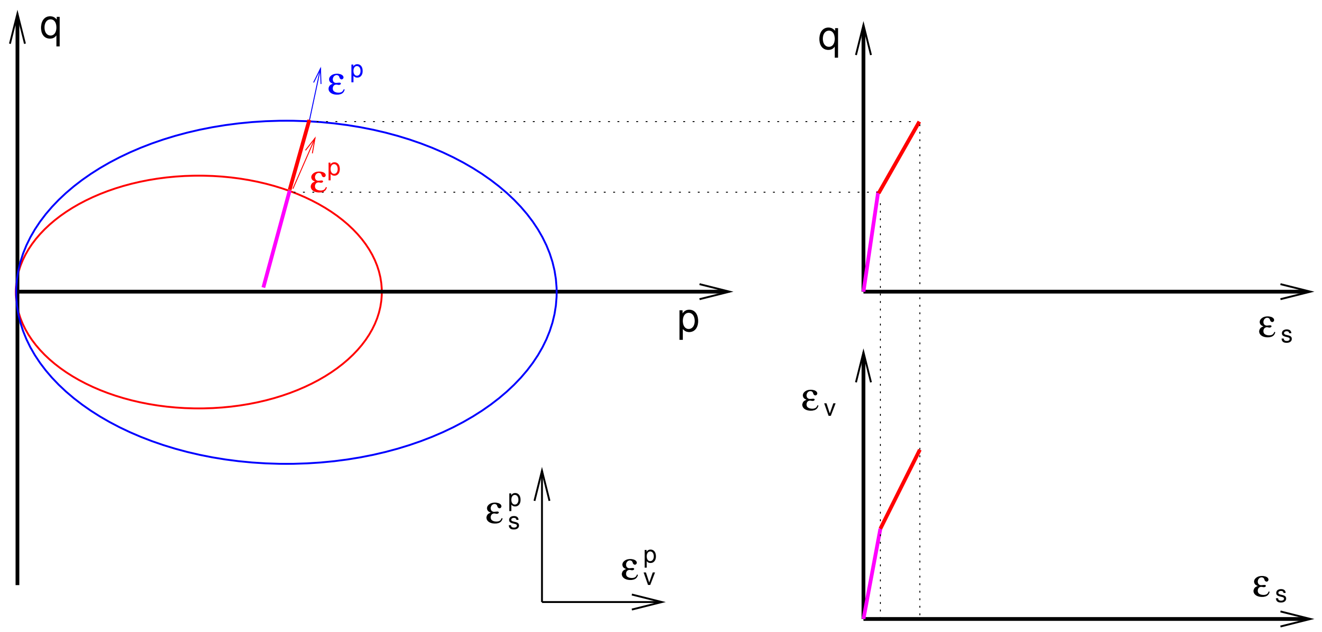
- Drénovaná triaxiální zkouška na *lehce překonsolidované zemině*



Konstituční modelování zemin | Elasto-plasticita

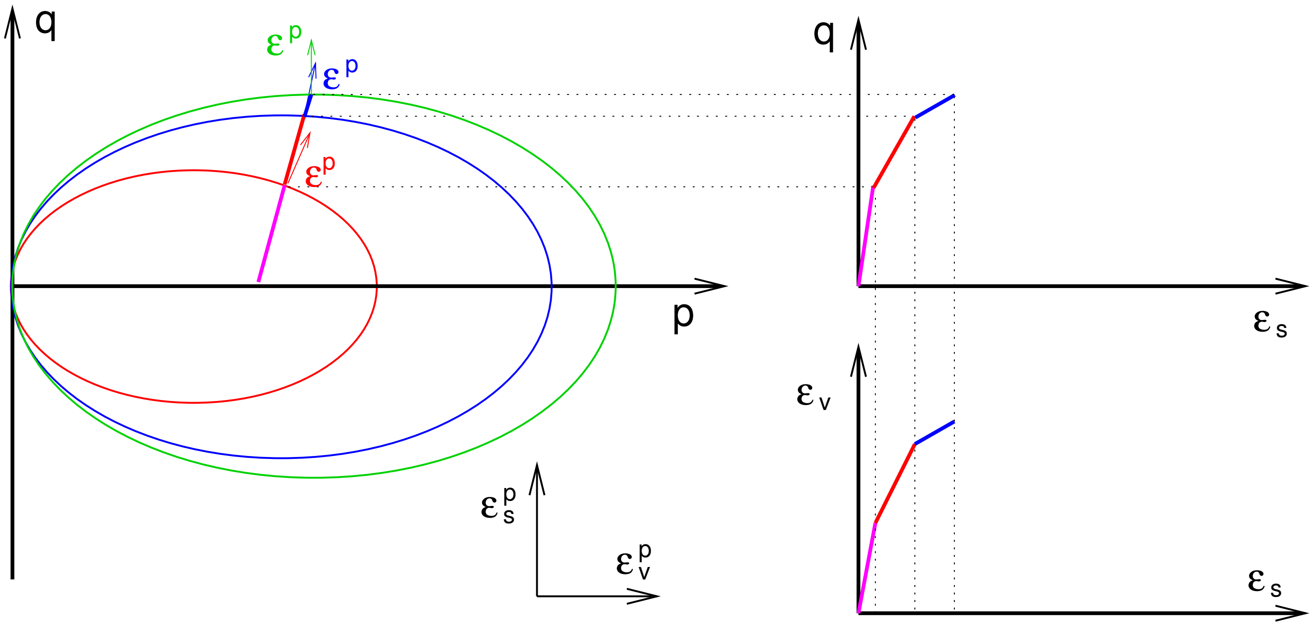
Model Cam jílu

- Drénovaná triaxiální zkouška na *lehce překonsolidované zemině*



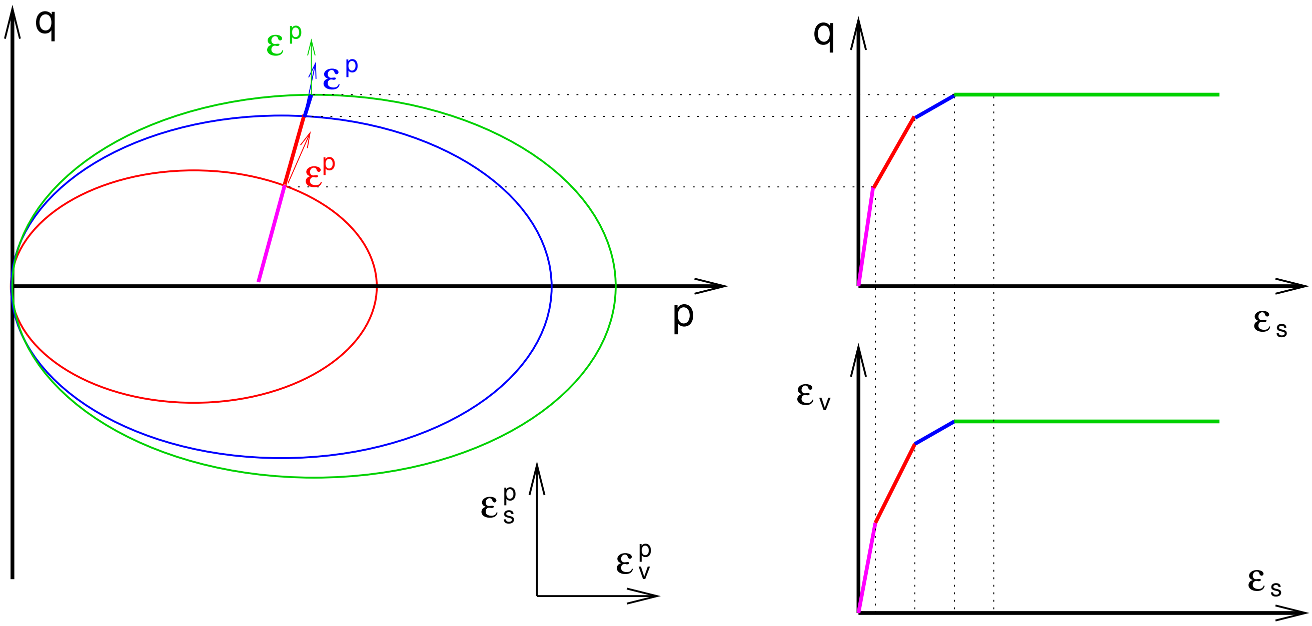
Model Cam jílu

- Drénovaná triaxiální zkouška na *lehce překonsolidované zemině*



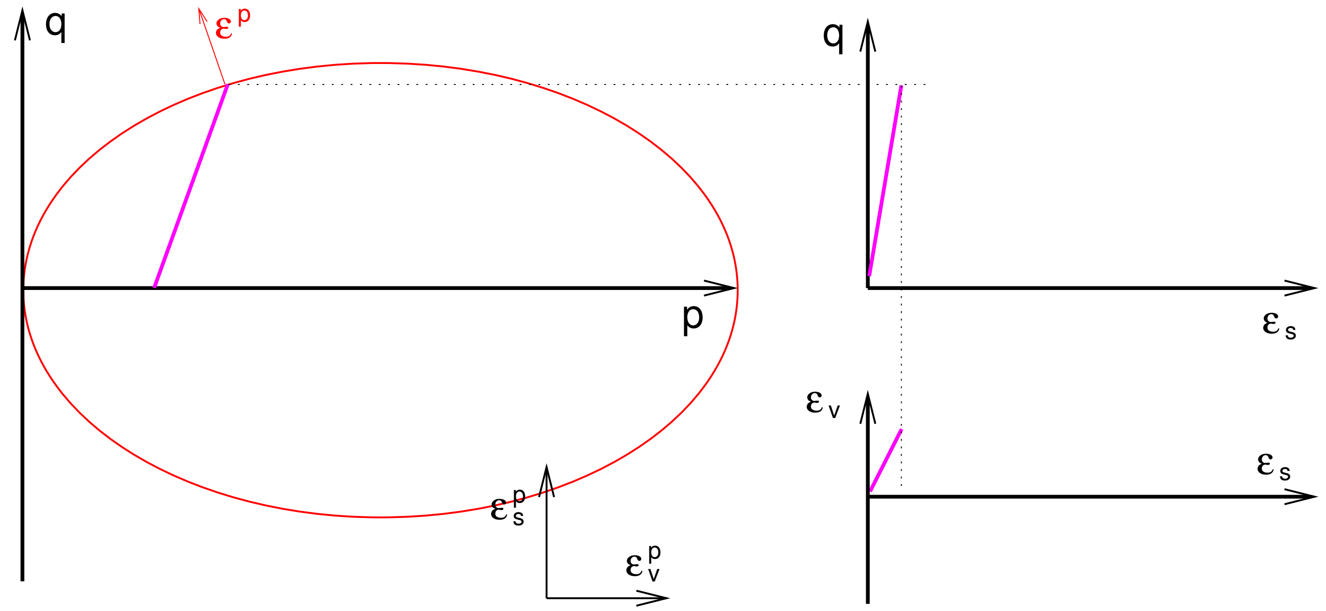
Model Cam jílu

- Drénovaná triaxiální zkouška na *lehce překonsolidované zemině*



Model Cam jílu

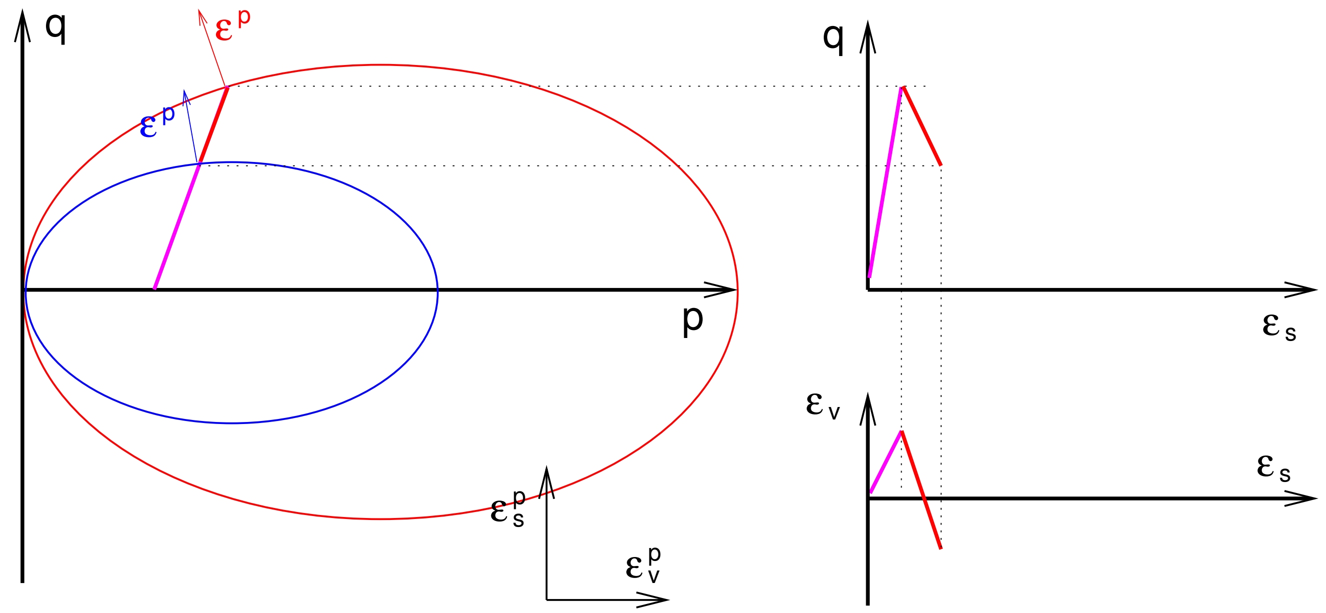
- Drénovaná triaxiální zkouška na *silně překonsolidované zemině*



Konstituční modelování zemin | Elasto-plasticita

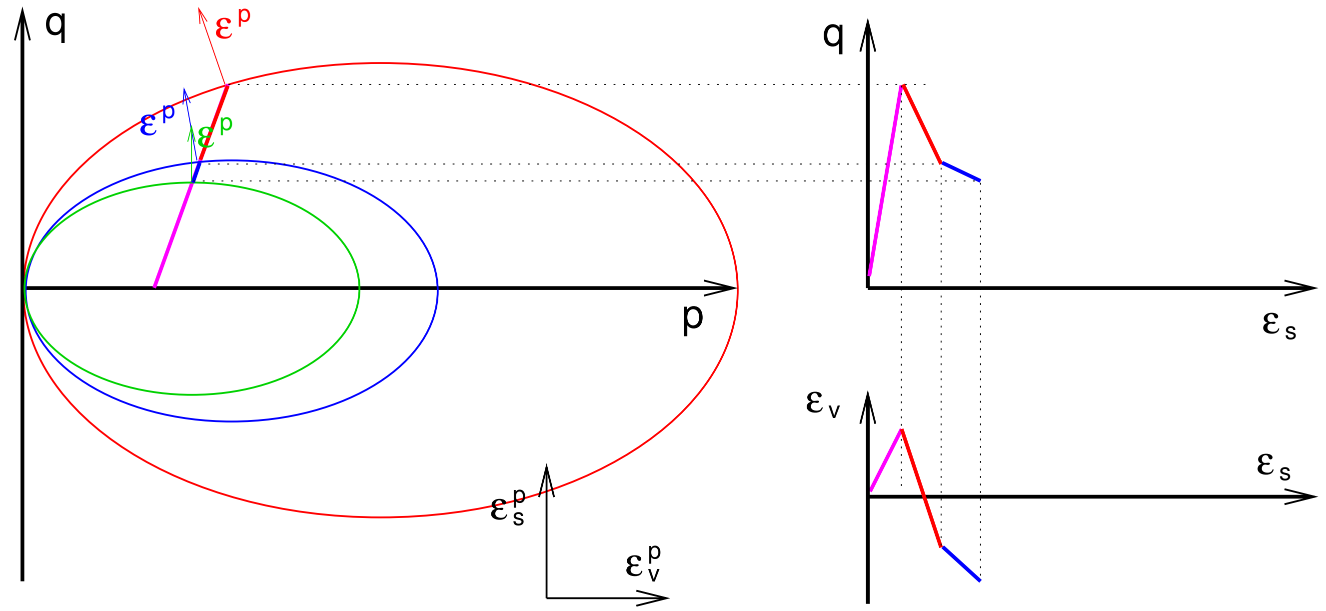
Model Cam jílu

- Drénovaná triaxiální zkouška na *silně překonsolidované zemině*



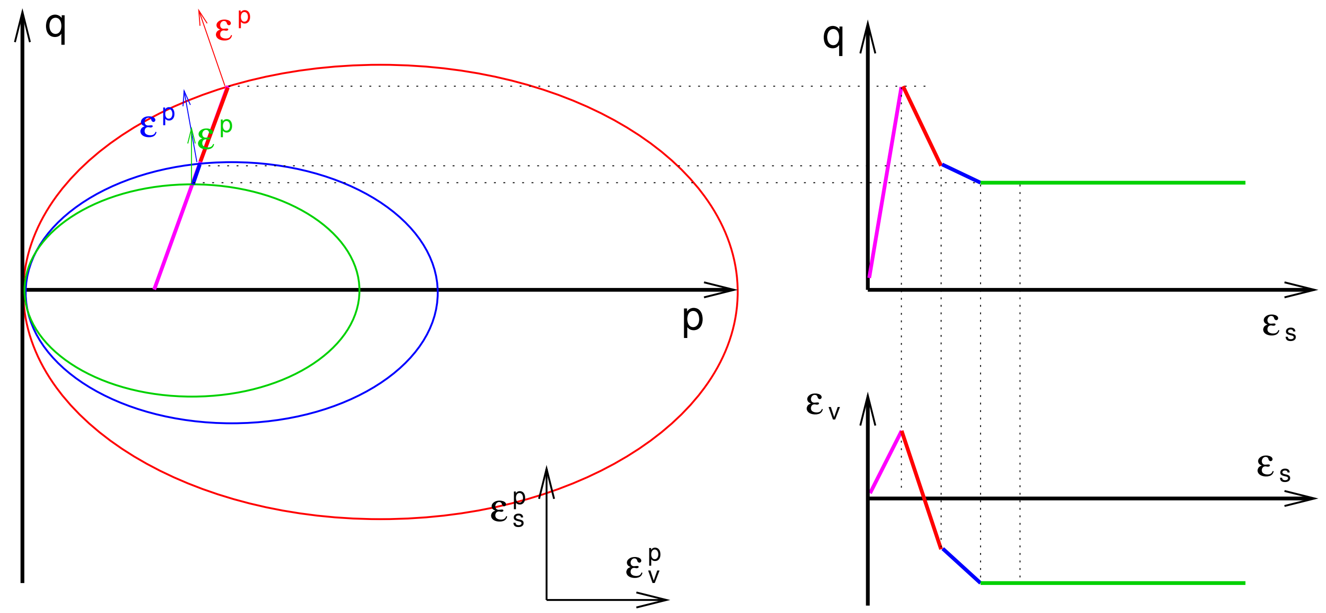
Model Cam jílu

- Drénovaná triaxiální zkouška na *silně překonsolidované zemině*



Model Cam jílu

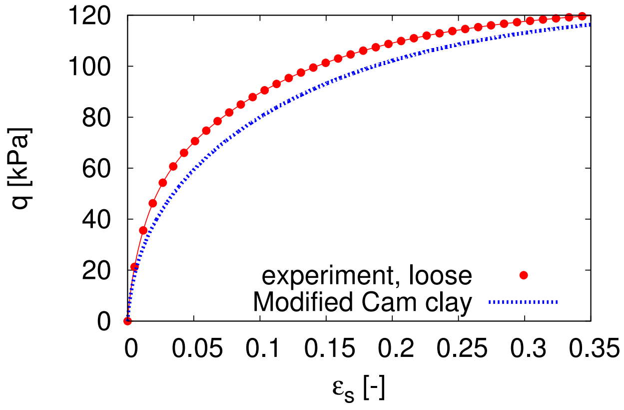
- Drénovaná triaxiální zkouška na *silně překonsolidované zemině*

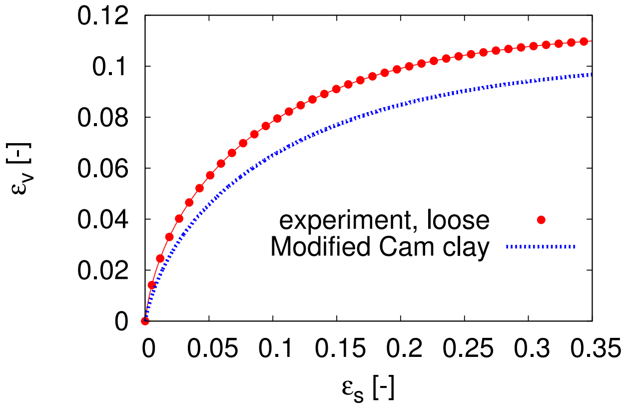


Model Cam jílu

Omezení

- Model Cam jílu předpovídá nelineární chování normálně konsolidovaných jílů

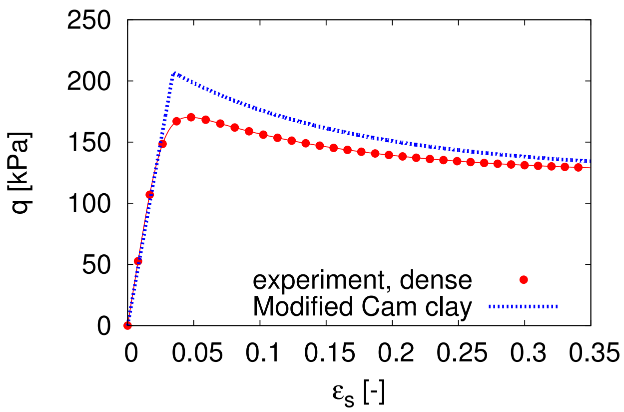


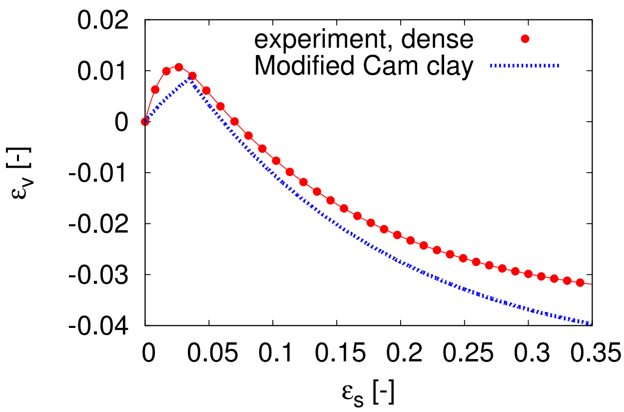


Model Cam jílu

Omezení

- Problematičtější je ovšem předpověď chování *překonsolidovaných zemin*.





1. Úhel vnitřního tření ve vrcholovém stavu přehodnocen. Často je méně přesné využít model Cam jílu než model Mohr-Coulombův!
2. Elastické chování uvnitř plochy plasticity – model nepředpovídá *nelinearitu tuhosti*.

Model Cam jílu

Shrnutí

Základní aspekty chování zemin, předpověď pomocí **vs.** *Modelu Cam jílu*:
(**Ano**/**Ne**/**Částečně**)

- Závislost chování na středním napětí a pórovitosti (MCC: nicméně vrcholová pevnost přehodnocena)
- Mezní plocha stavů
- Nelinární chování zemin (MCC: Nelinearita pouze u normálně konsolidovaných zemin, není tuhost při velmi malých přetvořeních)
- Závislost chování na historii zatěžování (MCC: V elastické oblasti není tuhost závislá na historii zatěžování)
- Závislost tuhosti na úrovni napětí (MCC: Pouze objemová tuhost je závislá).

Model Cam jílu

Alternativy

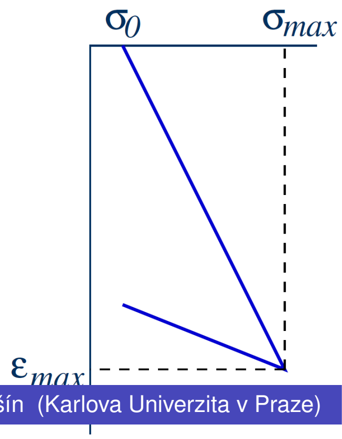
- Bez diskuse, modely ideální plasticity a plasticity se zpevněním založené na jedné ploše plasticity nejsou schopné předpovídat některé zásadní aspekty mechanického chování zemin.
- Alternativou jsou pokročilé elasto-plastické modely založené na *kinematickém zpevnění*. Ty jsou ovšem často komplikované pro implementaci a využití.
- Druhou alterantivou jsou *hypoplastické modely*. Základy hypoplasticity budou nyní probrány.

Základy hypoplasticity

- *Hypoplasticita* se odlišuje od *elasto-plasticity* tím, že nedělí přetvoření na vratnou a nevratnou část.
- I přesto předpovídá základní aspekty chování zemin, jako je nelinearita, nevratnost chování a porušení.
- *Podmínka plastického zatěžování* je nahrazena rovnicí nelineární v $\Delta\epsilon$

$$\Delta\sigma = E_1\Delta\epsilon - E_2|\Delta\epsilon|$$

s moduly $E_1 > E_2 > 0$ (1D verze).

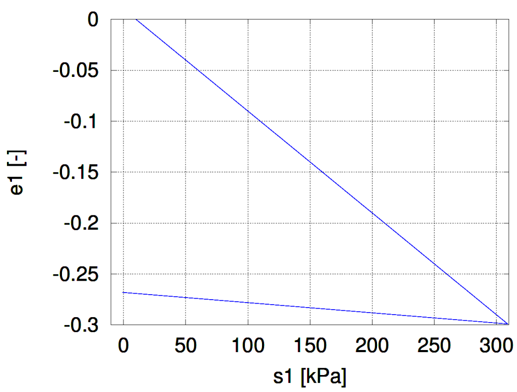


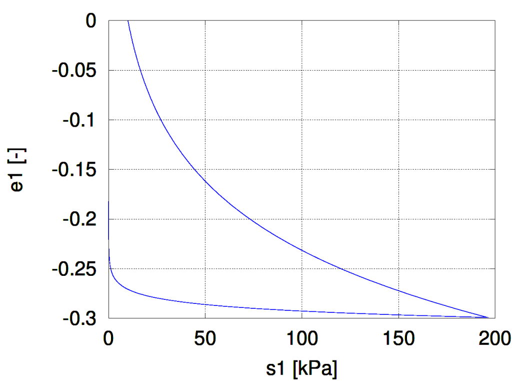
- Při přitížení ($\Delta\epsilon > 0$), tuhost $E = E_1 - E_2$
- Při odlehčení, tuhost $E = E_1 + E_2$
- Vyšší tuhost při odlehčení než při přitížení, bez nutnosti plastického přetvoření.

Základy hypoplasticity

Modelování nelinearity

- *Nelineární chování* je modelováno uvažováním E_1 a E_2 jako funkcí *stavových proměnných*.
- První krok je zohlednění závislosti tuhosti na napětí



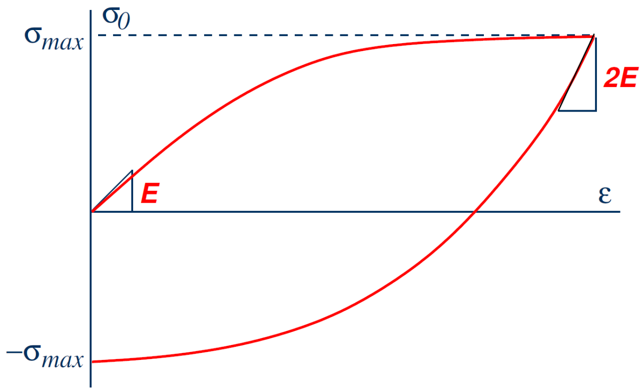


$$\Delta\sigma = E_1\Delta\epsilon - E_2|\Delta\epsilon|$$

$$\Delta\sigma = C_1\sigma\Delta\epsilon - C_2\sigma|\Delta\epsilon|$$

Základy hypoplasticity

1D hypoplasticita pro smyk



- Jednoduchý 1D hypoplastický model pro smyk:

$$\Delta\tau = E\left[\Delta\gamma - \left(\frac{\tau}{\tau_{max}}\right)|\Delta\gamma|\right]$$

- Když $\tau = 0$ a přitížení ($\Delta\gamma > 0$), pak je tuhost E.
- Když $\tau = \tau_{max}$ a přitížení, pak je tuhost 0 (předpověď porušení).
- Když $\tau = \tau_{max}$ a odlehčení, pak je tuhost $2E$.

Základy hypoplasticity

2D hypoplastický model pro stlačení a smyk

- V předchozím jsme definovali dva oddělené modely, jeden pro kompresi a druhý pro smyk. Jejich kombinace pro 2D model může být například:

$$\begin{bmatrix} \Delta\sigma \\ \Delta\tau \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_\sigma & 0 \\ 0 & L_\tau \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\epsilon \\ \Delta\gamma \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} N_\sigma & 0 \\ 0 & N_\tau \end{bmatrix} \begin{bmatrix} |\Delta\epsilon| \\ |\Delta\gamma| \end{bmatrix}$$

- Tato formulace *není sdružená*, což znamená že smykové napětí nevede k objemovým deformacím a naopak.
- Nakonec zohledníme *sdružení* smykových-objemových změn tímto způsobem:

$$\begin{bmatrix} \Delta\sigma \\ \Delta\tau \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_\sigma & 0 \\ 0 & L_\tau \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\epsilon \\ \Delta\gamma \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} N_\sigma \\ N_\tau \end{bmatrix} \sqrt{\Delta\epsilon^2 + \Delta\gamma^2}$$

kde $\sqrt{\Delta\epsilon^2 + \Delta\gamma^2}$ je *norma* (velikost) přírůstku přetvoření.

Základy hypoplasticity

- Skutečné hypoplastické modely samozřejmě musí být definovány v 3D prostoru. Obecná formulace modelu je pak následující:

$$\Delta\sigma = \mathcal{L}\Delta\epsilon + \mathbf{N}\|\Delta\epsilon\|$$

- Nejobtížnější část ve vývoji hypoplastických modelů je samozřejmě volba modulů $\mathcal{L}$ *a* **N**.
- Princip volby $\mathcal{L}$ a **N** vychází z 1D postupu demonstrovaného výše.

Hypoplasticita jako model nelineárního chování zemin

Shrnutí

Pokročilé hypoplastické modely pak mohou předpovídat všechny důležité aspekty mechanického chování zemin:

- Závislost chování na středním napětí a pórovitosti.
- Mezní plocha stavů.
- Nelinární chování zemin.
- Závislost chování na historii zatěžování.
- Závislost tuhosti na úrovni napětí.

Shrnutí

- Chování zemin je komplikované a jednoduché modely jako model Mohr-Coulombův nevystihují jeho chování dostatečně přesně.
- Mohr-Colombův model v podstatě předpovídá správně pouze tvar plochy plasticity. To je v pořádku pro výpočty stability. Model je nicméně nevhodný pro předpovědi *deformací*.
- Elasto-plasticita se zpevněním a jednou plochou plasticity (Cam clay) je výborný *koncept*, ale není ve výsledku lepší než Mohr-Coulomb pro *kvantitativní předpovědi*.
- Pro správné předpovědi deformací geotechnických konstrukcí musíme zohlednit *nelineární chování zemin*. Příkladem těchto modelů jsou *pokročilé elasto-plastické modely* a *hypoplasticita*.