



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

Konstituční modelování nestandardních materiálů

Přednáška pro předmět Základy matematického
modelování v geomechanice I

David Mašín

Úvod

Účel této části přednášky je seznámení s pokročilejšími metodami *konstitučního modelování v geomechanice*.

Budou probírány pokročilejší konstituční modely (jako *hypoplasticita*), dále budou shrnuty významné aspekty mechanického chování méně standardních materiálů (*cementované zeminy, zeminy s dvojitou pórovitostí, nenasycené zeminy*) a popsán přístup k jejich konstitučnímu modelování.

Obsah

- Úvod
- Chování strukturovaných zemin, koncept sensitivity
- Model Cam jílu pro zeminy s nestabilní strukturou
- Modelování materiálů s dvojitou pórovitostí
- Hypoplasticita, včlenění struktury do hypoplastických modelů
- Nenasycené zeminy

Vztah mezi mechanickým chováním rekonstituovaných a neporušených jemnozrnných zemin

- Rozdíl mezi neporušenou a rekonstituovanou zemínou – *struktura*

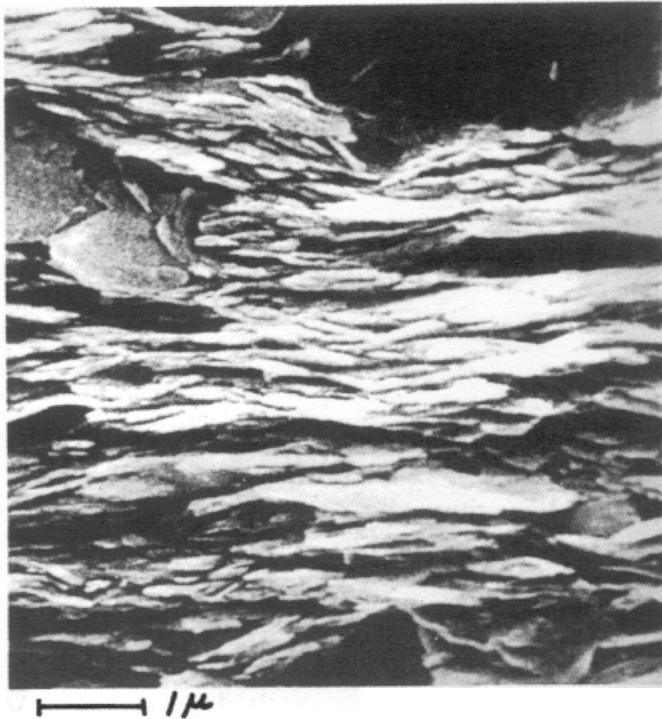
Rozlišujeme 2 typy *struktury*:

- Uspořádání částic (*fabric*)
- Vazby mezi částicemi (*bonding*)

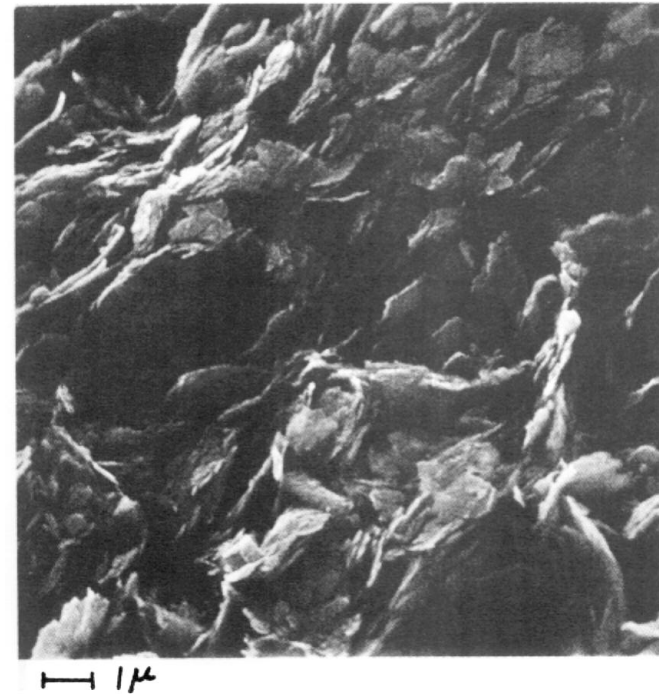
První typ struktury vzniká při sedimentaci zeminy ze suspenze, druhý typ při následných diagenetických pochodech (cementace atd.)

Rozdíl mezi neporušenou a rekonstituovanou zemínou – struktura

- Uspořádání částic (*fabric*):



Rekonstituovaná zemina



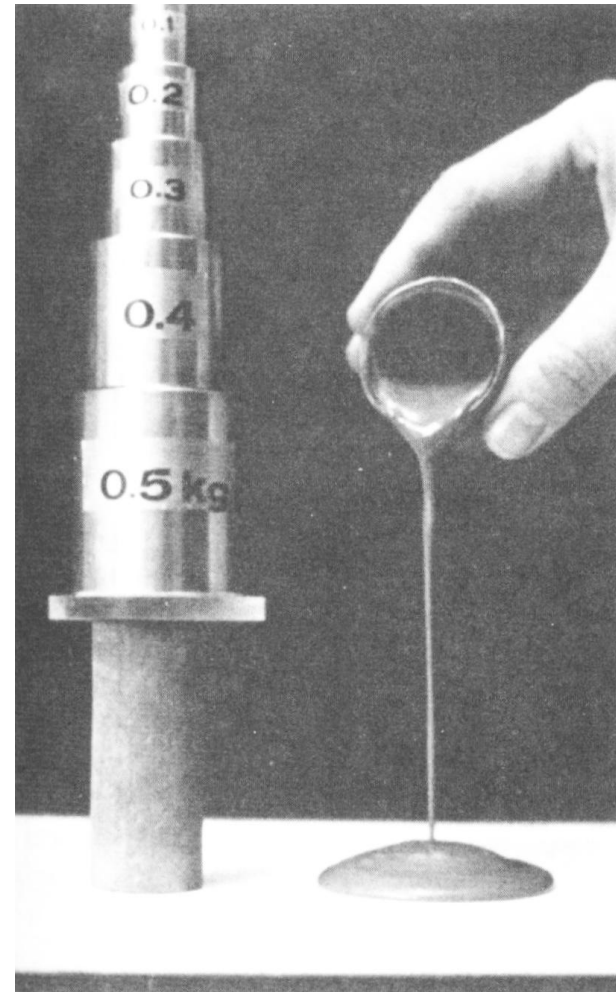
Neporušená zemina
Sides and Barden, 1970

Vliv struktury na chování zemin

- *Nedrénovaná pevnost:*

Neporušená zemina má větší nedrénovanou pevnost (c_u) než zemina rekonstituovaná při stejné pórovitosti. Jejich poměr – *Sensitivity pevnosti (strength sensitivity)*

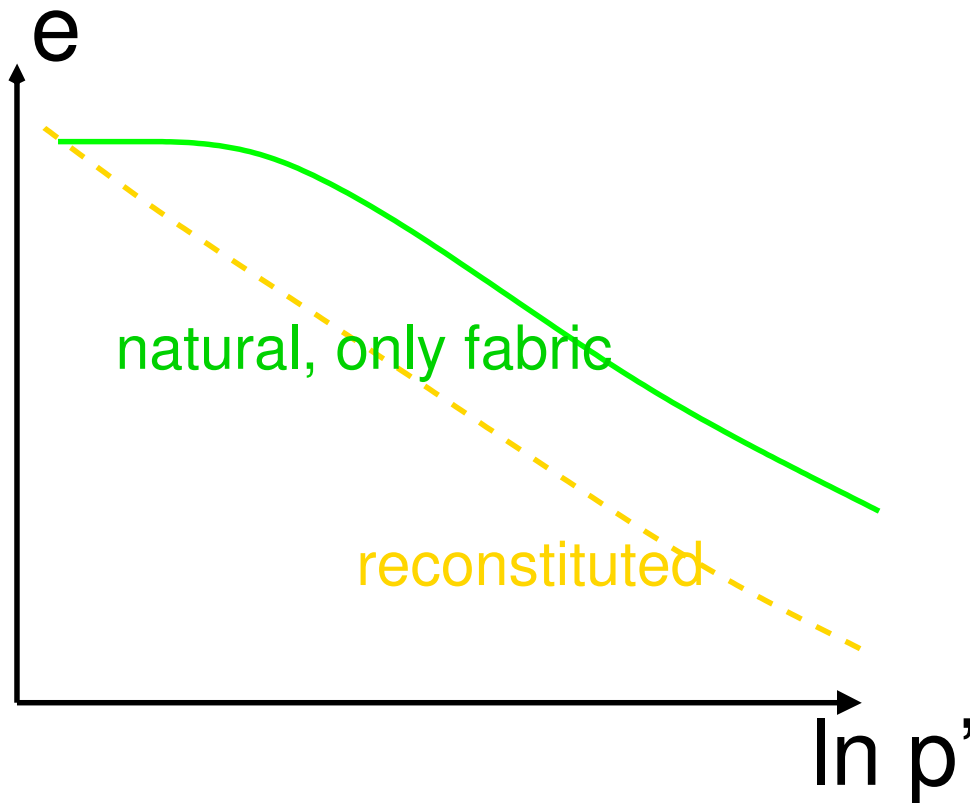
$$S_u = \frac{c_{unat}}{c_{urec}}$$



Mitchell, 1993

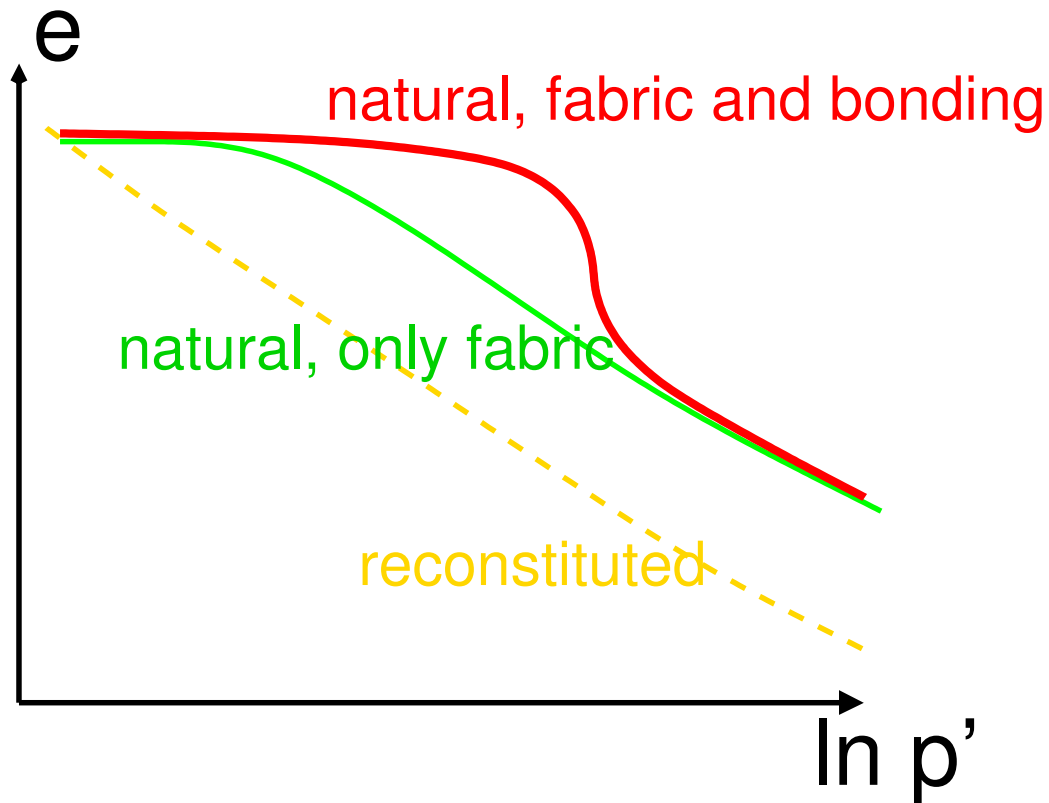
Vliv struktury na chování zemin

- Pozice čáry isotropní konsolidace:



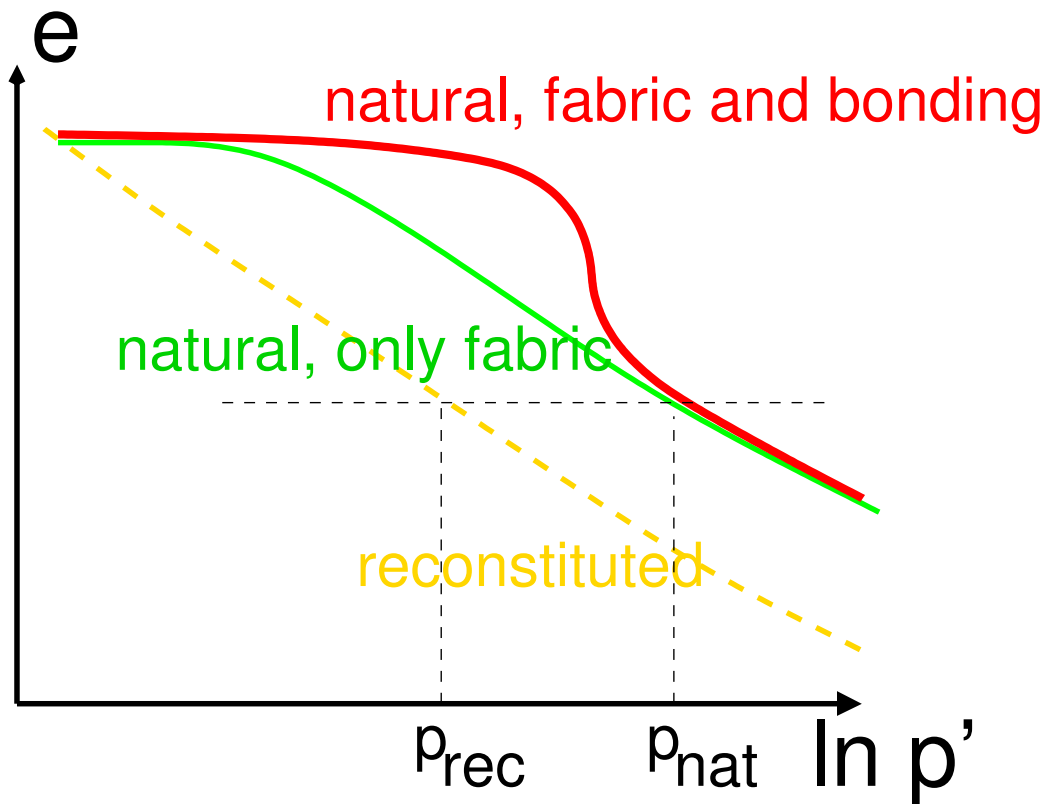
Vliv struktury na chování zemin

- Pozice čáry isotropní konsolidace:



Vliv struktury na chování zemin

- Pozice čáry isotropní konsolidace:

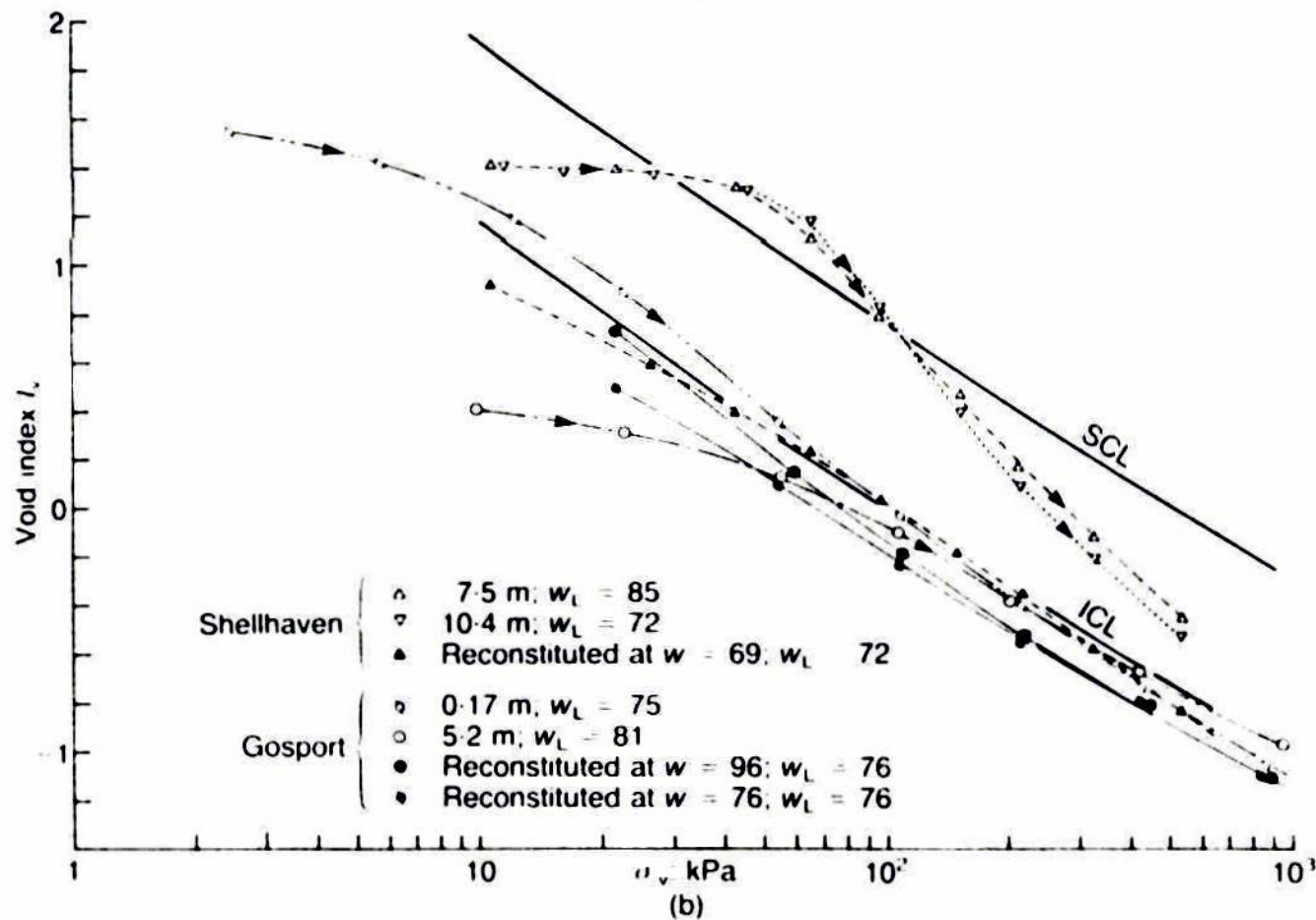


*Sensitivita napětí
(stress sensitivity):*

$$S_{\sigma} = \frac{p_{nat}}{p_{rec}}$$

Vliv struktury na chování zemin

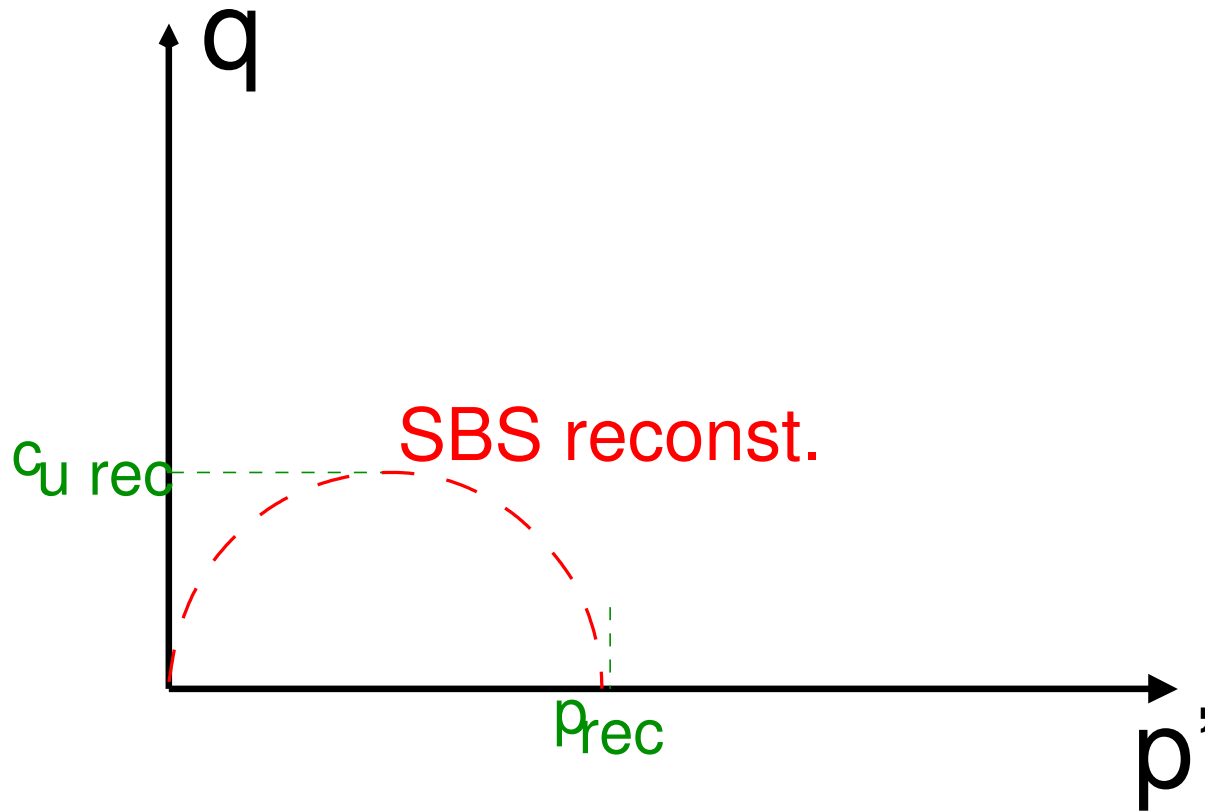
- Pozice čáry isotropní konsolidace:



Burland, 1990

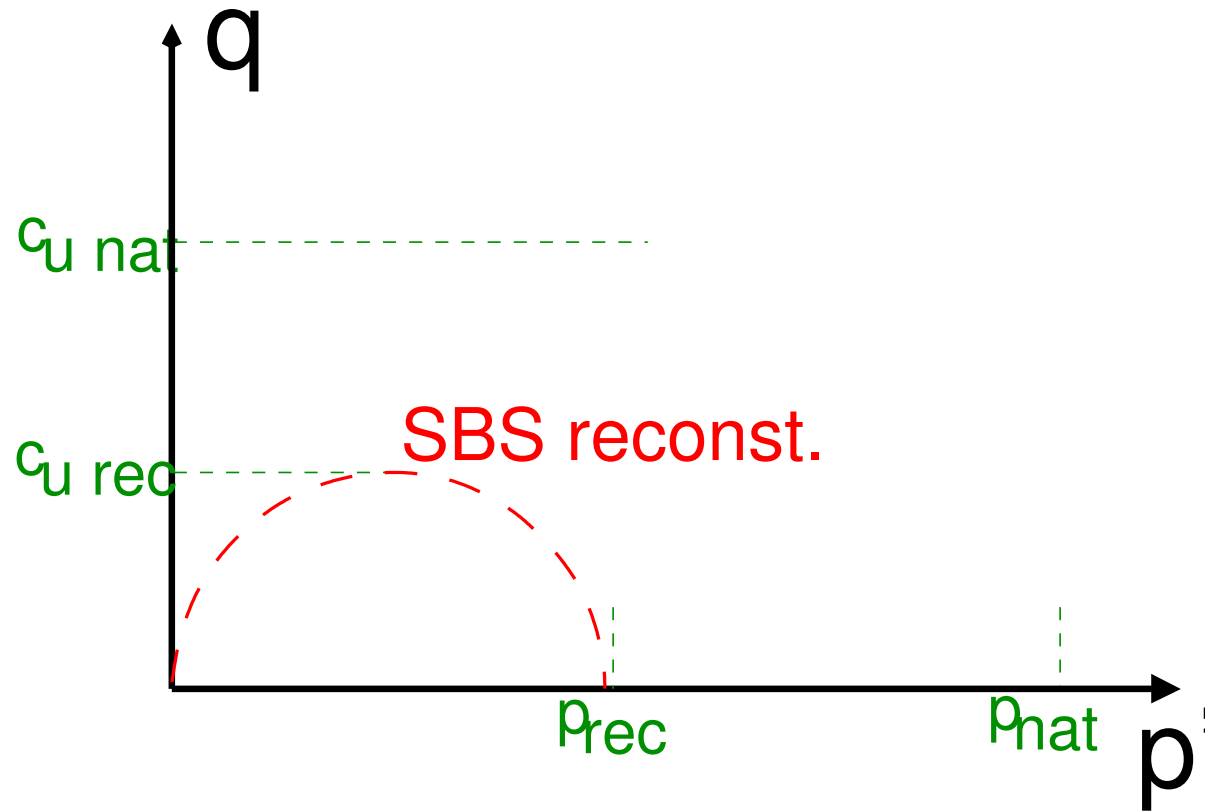
Koncept sensitivity (*Sensitivity framework*)

- Cotecchia and Chandler, 2000
- Sensitivita napětí je rovna sensitivitě pevnosti ($S_\sigma = S_u$).



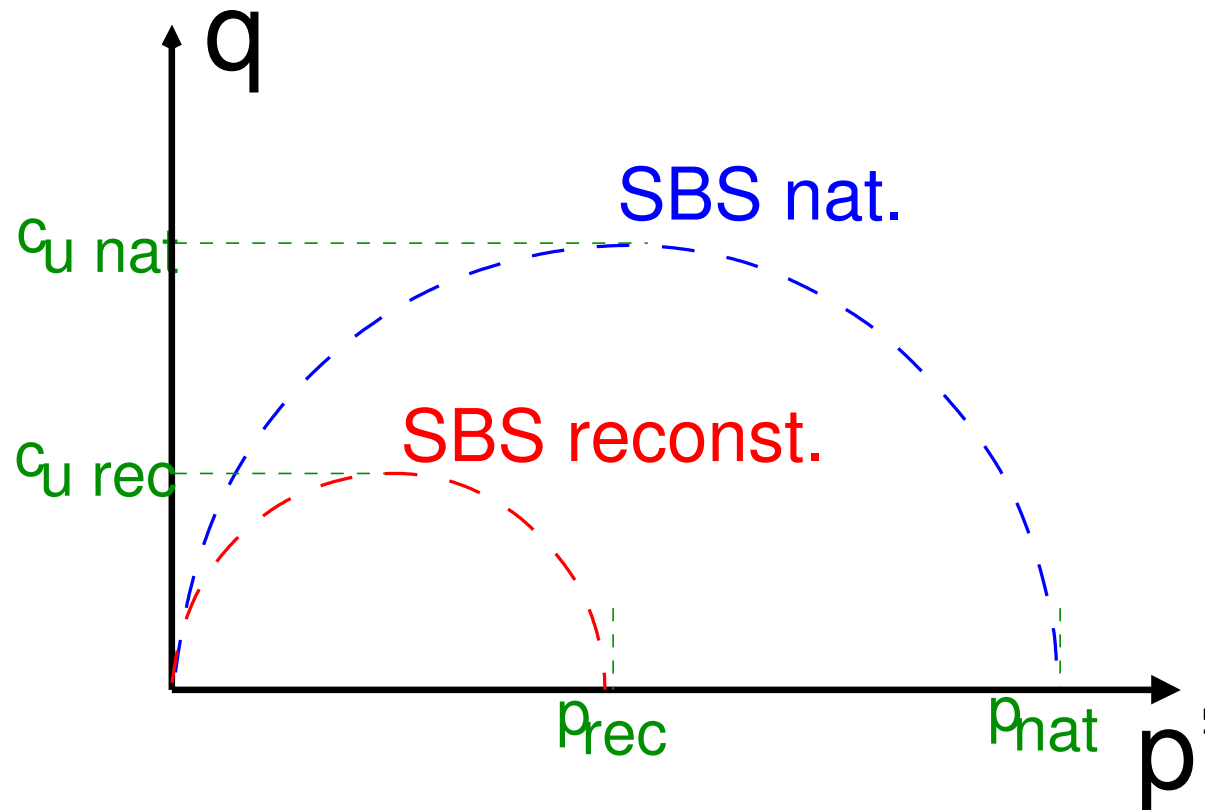
Koncept sensitivity (*Sensitivity framework*)

- Cotecchia and Chandler, 2000
- Sensitivita napětí je rovna sensitivitě pevnosti ($S_\sigma = S_u$).

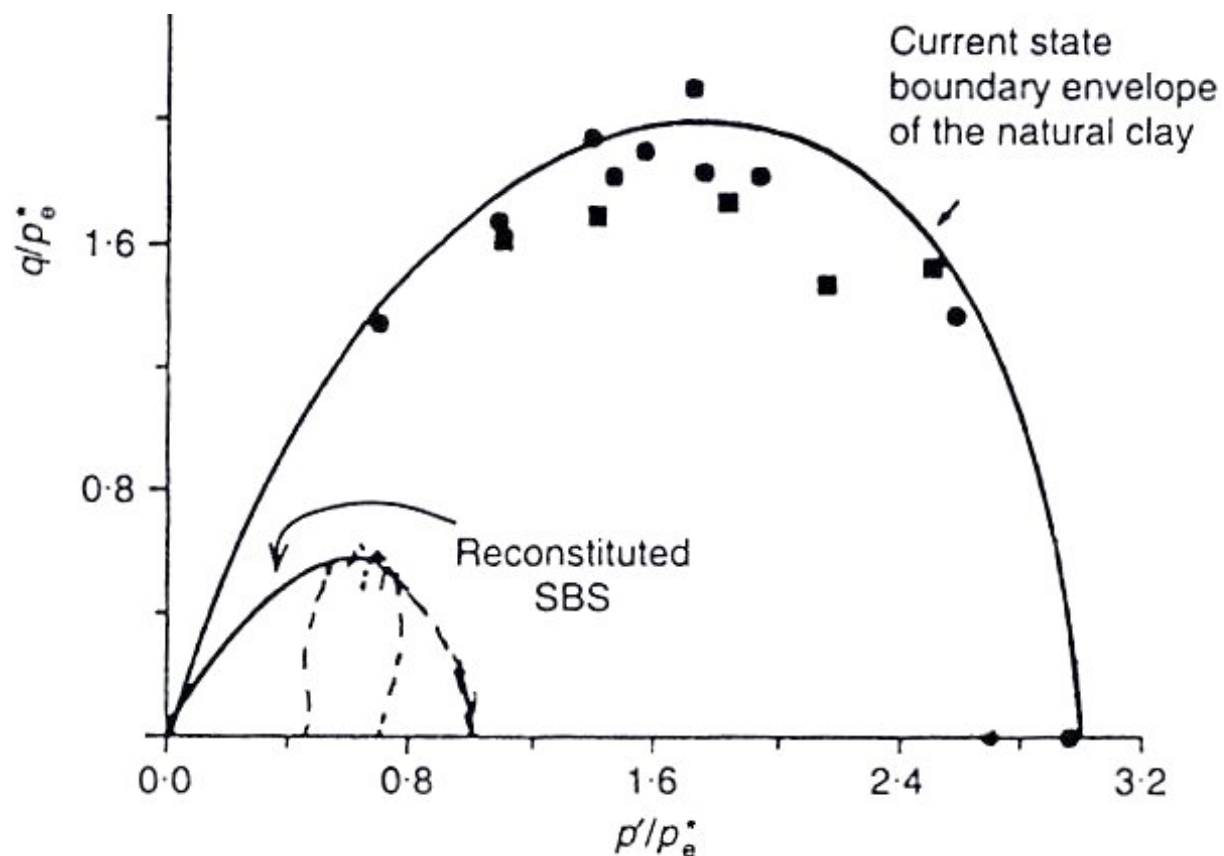


Koncept sensitivity (*Sensitivity framework*)

- Cotecchia and Chandler, 2000
- Sensitivita napětí je rovna sensitivitě pevnosti ($S_\sigma = S_u$).

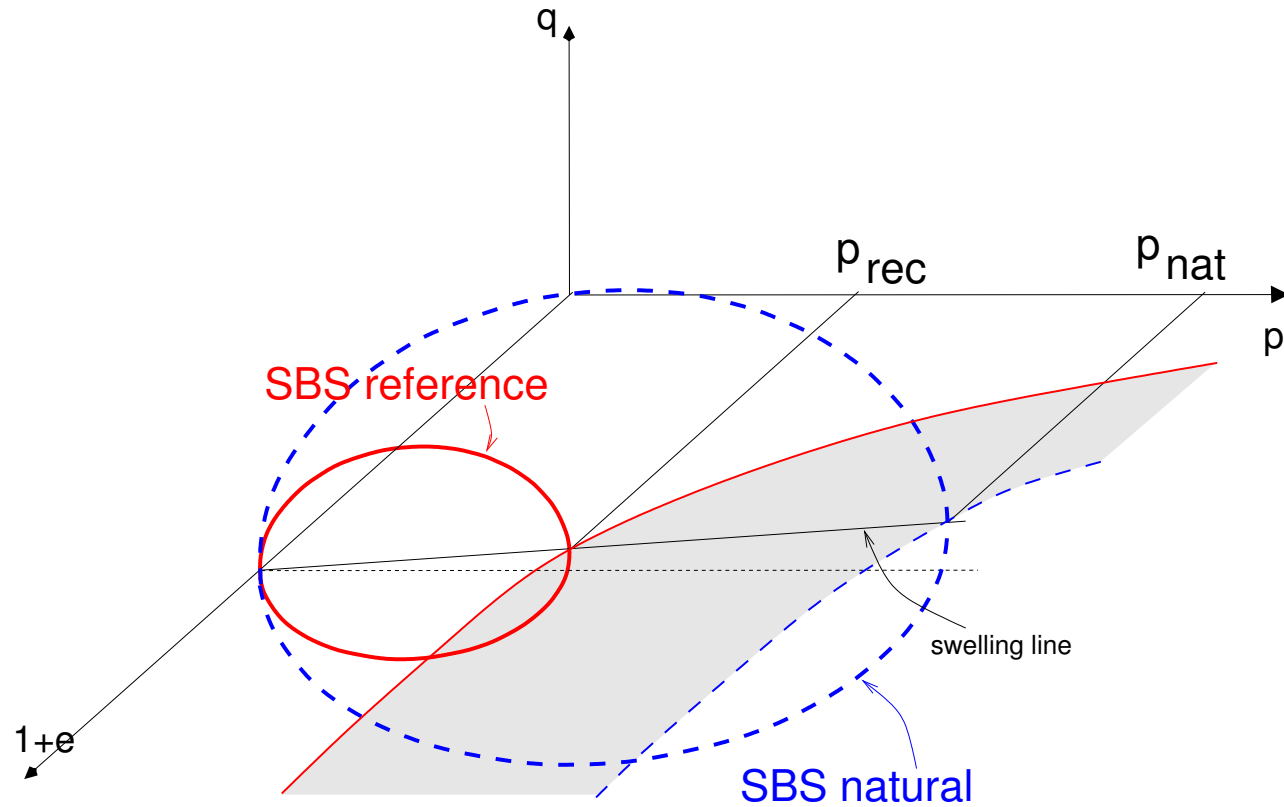


Koncept sensitivity (*Sensitivity framework*)



Cotecchia and Chandler, 2000

Koncept sensitivity (*Sensitivity framework*)



Konstituční modelování strukturovaných zemin

Koncept sensitivity je důležitým nástrojem pro konstituční modelování strukturovaných zemin, neboť umožňuje relativně přímočarou modifikaci konstitučních modelů pro *rekonstituované zeminy* pro modelování strukturovaných zemin.

Evidentně, *referenční konstituční model* musí předpovídat *Mezní plochu*, musí tedy uvažovat číslo pórovitosti jako stavovou proměnnou.

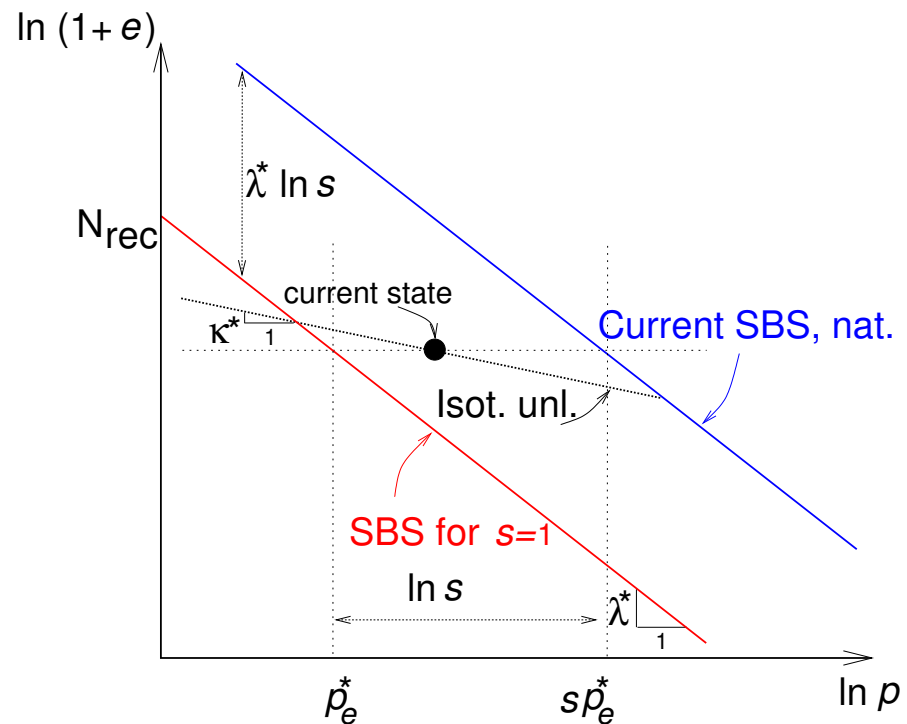
⇒ Nejzákladnější model na nějž můžeme aplikovat koncept senzitivity je *model Cam jílu*.

Model Cam jílu pro zeminy se stabilní strukturou

Zeminy kde struktura je tvořena pouze uspořádáním částic (*fabric*) lze charakterizovat konstantní velikostí senzitivity S_t .

V tom případě lze senzitivitu s považovat za šestý *parametr* modelu, který kontroluje pozici čáry *isotropní normální konsolidace* a velikost *mezní plochy*.

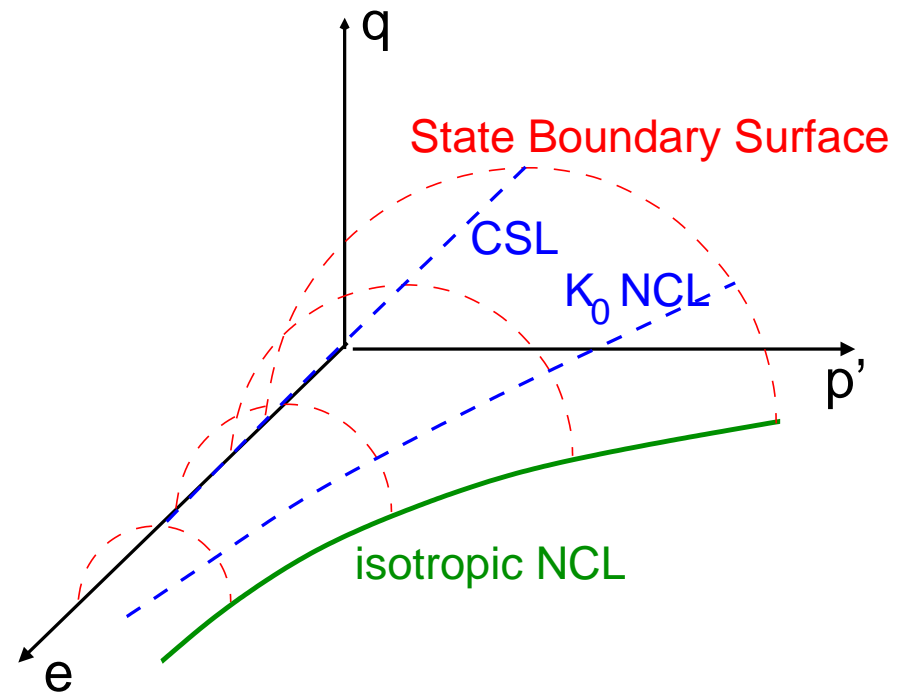
$$N_{nat} = N_{rec} + \lambda^* \ln s$$



Hvorslevovo ekvivalentní napětí p_e^*

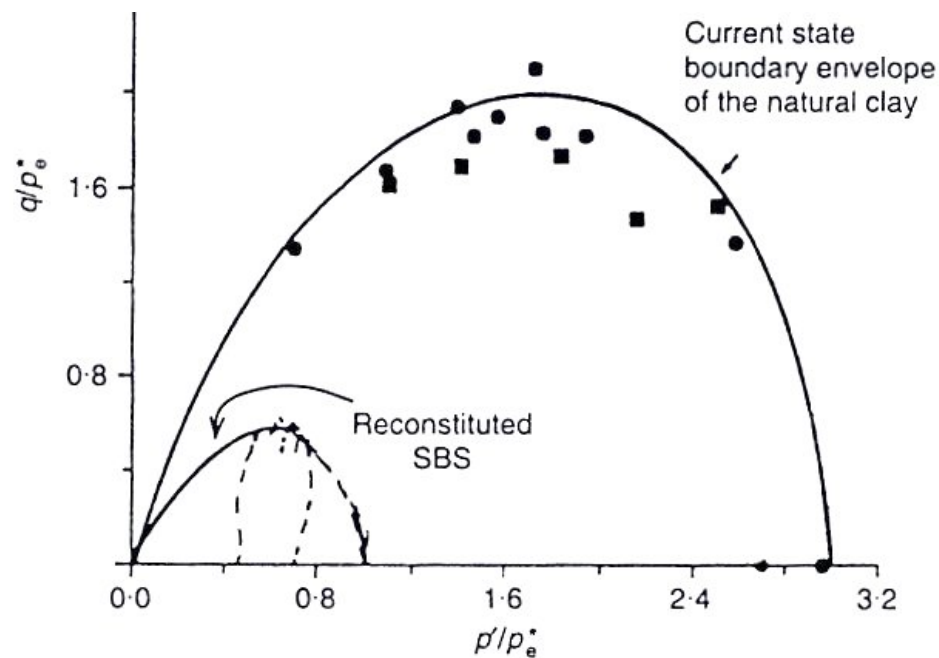
p_e^* na předchozím obrázku je nazýváno *Hvorslevovo ekvivalentní napětí*.

p_e^* je důležité pro studium *tvaru* a *velikosti* mezní plochy. Vychází z faktu, že řezy mezní plochou o různém e mají stejný tvar, ale odlišnou velikost \Rightarrow



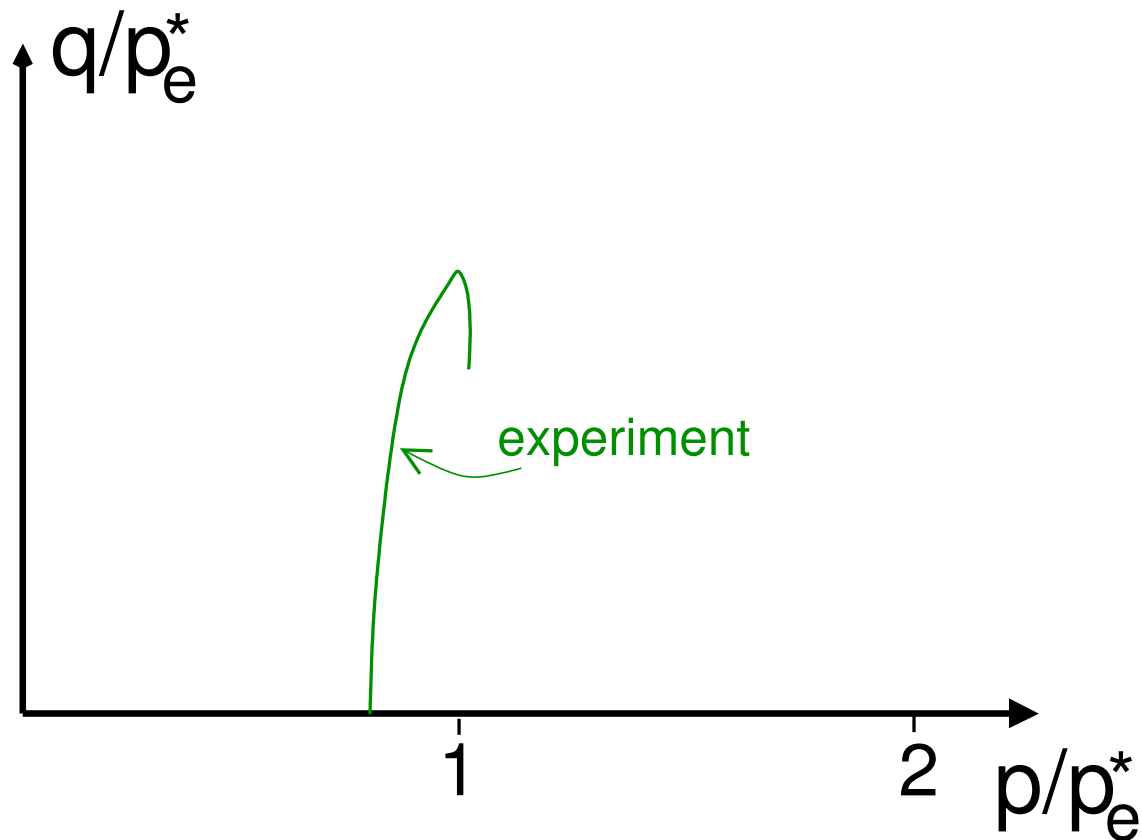
Hvorslevovo ekvivalentní napětí p_e^*

Obálka drah napětí laboratorních zkoušek vykreslená v normalizovaném grafu q/p_e^* vs. p/p_e^* tedy udává *tvar* a *velikost* mezní plochy:



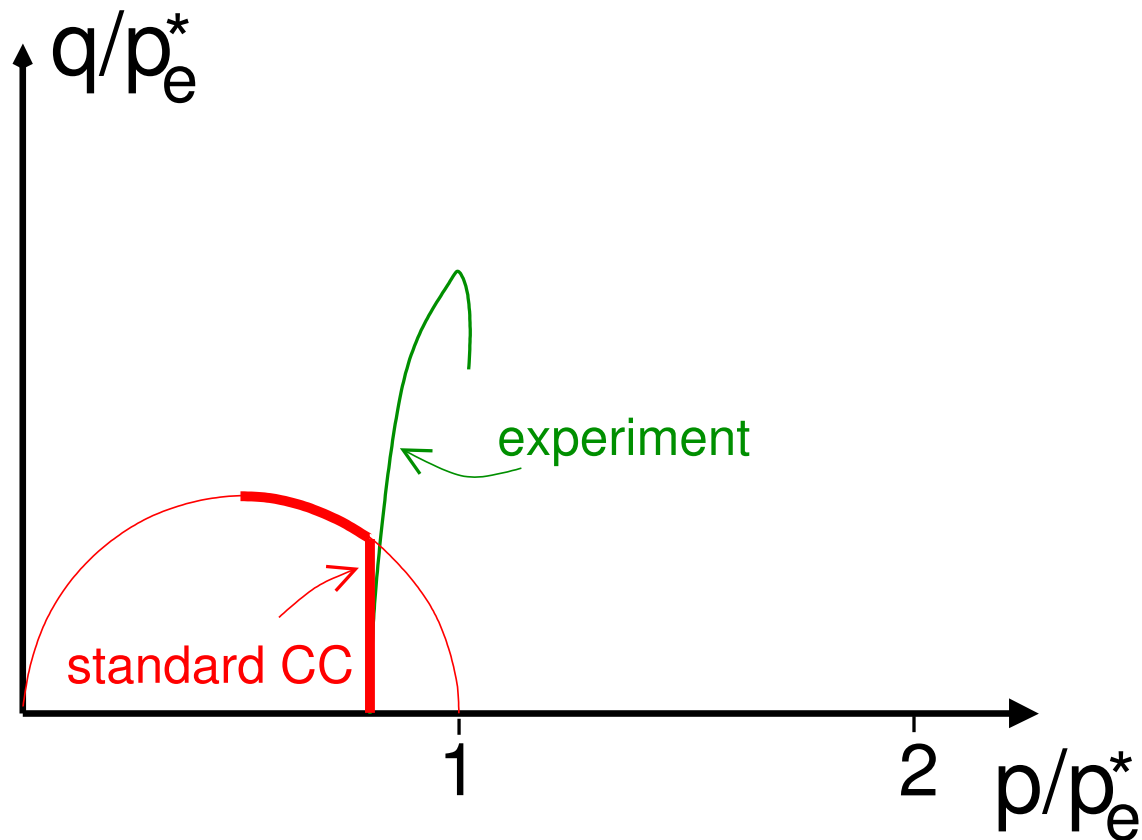
Model Cam jílu pro zeminy se stabilní strukturou

Předpověď normalizované dráhy napětí nedrénované zkoušky pomocí standardního modelu Cam jílu a modelu obohaceného o stabilní strukturu:



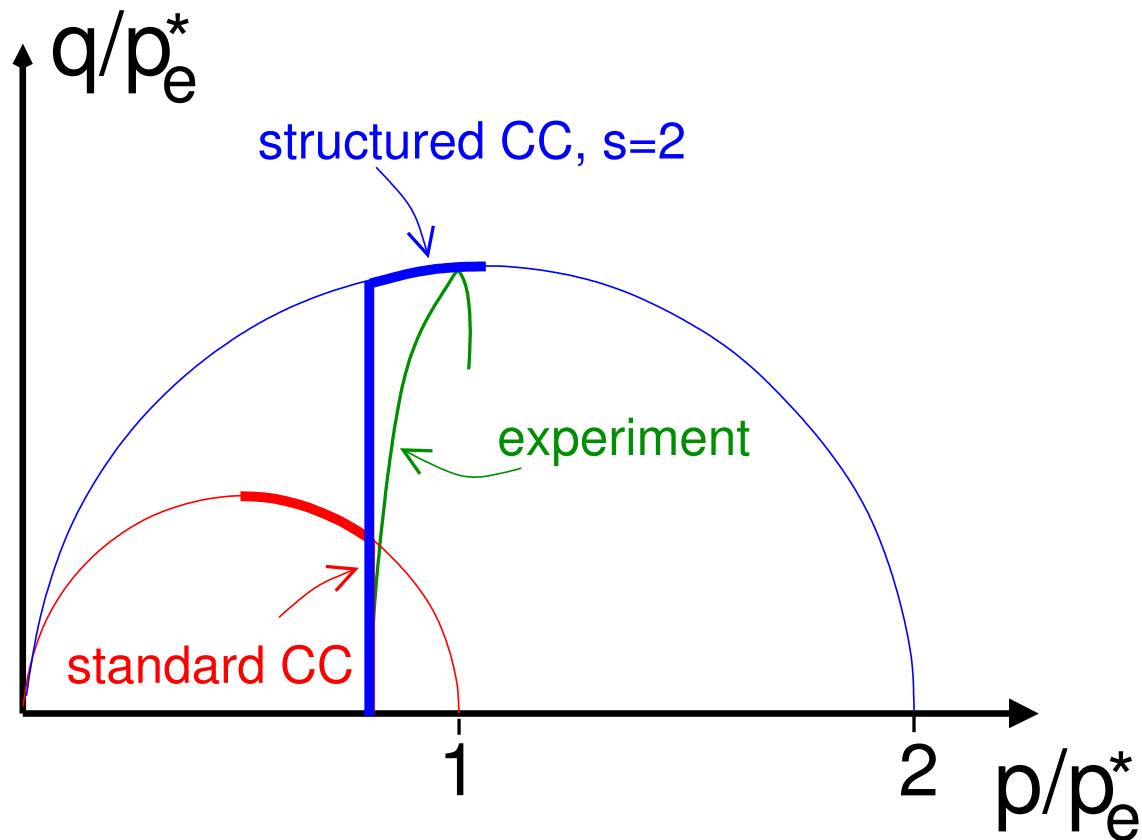
Model Cam jílu pro zeminy se stabilní strukturou

Předpověď normalizované dráhy napětí nedrénované zkoušky pomocí standardního modelu Cam jílu a modelu obohaceného o stabilní strukturu:



Model Cam jílu pro zeminy se stabilní strukturou

Předpověď normalizované dráhy napětí nedrénované zkoušky pomocí standardního modelu Cam jílu a modelu obohaceného o stabilní strukturu:



Model Cam jílu pro zeminy s nestabilní strukturou

V případě materiálů s *nestabilní strukturou* není sensitivity s konstantní, ale její hodnota při namáhání zeminy klesá (což odpovídá *porušování cementačních vazeb*).

Model Cam jílu pro zeminy s nestabilní strukturou

V případě materiálů s *nestabilní strukturou* není sensitivity s konstantní, ale její hodnota při namáhání zeminy klesá (což odpovídá *porušování cementačních vazeb*).

Sensitivity je v tomto případě nutno považovat za *stavovou proměnnou* a definovat funkci popisující rychlost její změny.

Model Cam jílu pro zeminy s nestabilní strukturou

Evoluční rovnice pro sensitivity s se většinou uvažuje ve formě:

$$\dot{s} = -\frac{k}{\lambda^*}(s - s_f)\dot{\epsilon}^d$$

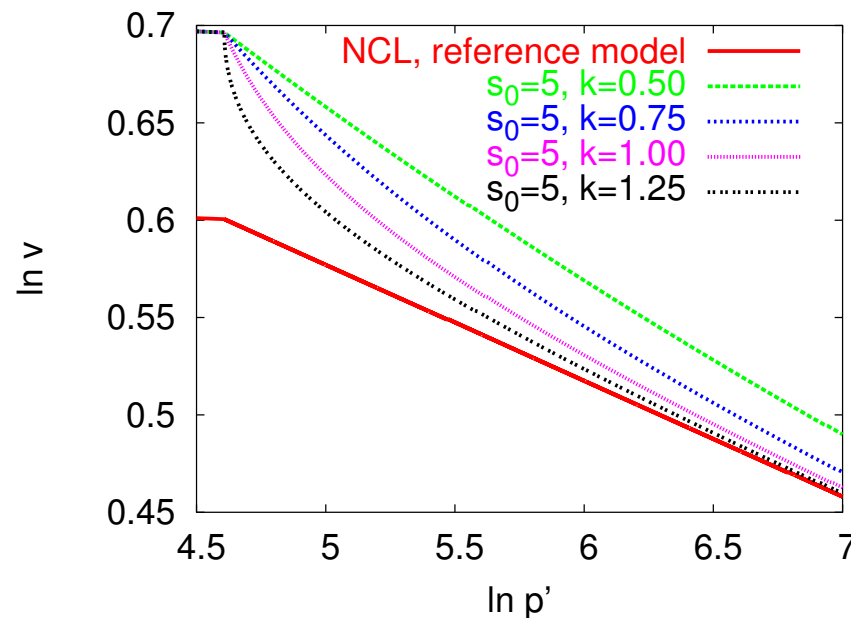
kde $\dot{\epsilon}^d$ je tzv. *damage strain*

$$\dot{\epsilon}^d = \sqrt{(\dot{\epsilon}_v^p)^2 + (\dot{\epsilon}_s^p)^2}$$

k a s_f jsou parametry modelu. s_f je finální hodnota sensitivity (odpovídající stabilní struktuře, *fabric*), k vyjadřuje rychlost degradace sensitivity.

Model Cam jílu pro zeminy s nestabilní strukturou

Vliv parametru k na rychlost degradace sensitivity při počáteční hodnotě sensitivity $s_0 = 5$ a finální hodnotě $s_f = 1$ je následující:



Model Cam jílu pro zeminy s nestabilní strukturou

Příkladem jemnozrnné zeminy s nestabilní strukturou je tzv. *Pisa clay*, jíl nacházející se v podloží *Šikmé věže v Pise*. Jedná se o holocénní jezerní sedimenty.



Model Cam jílu pro zeminy s nestabilní strukturou

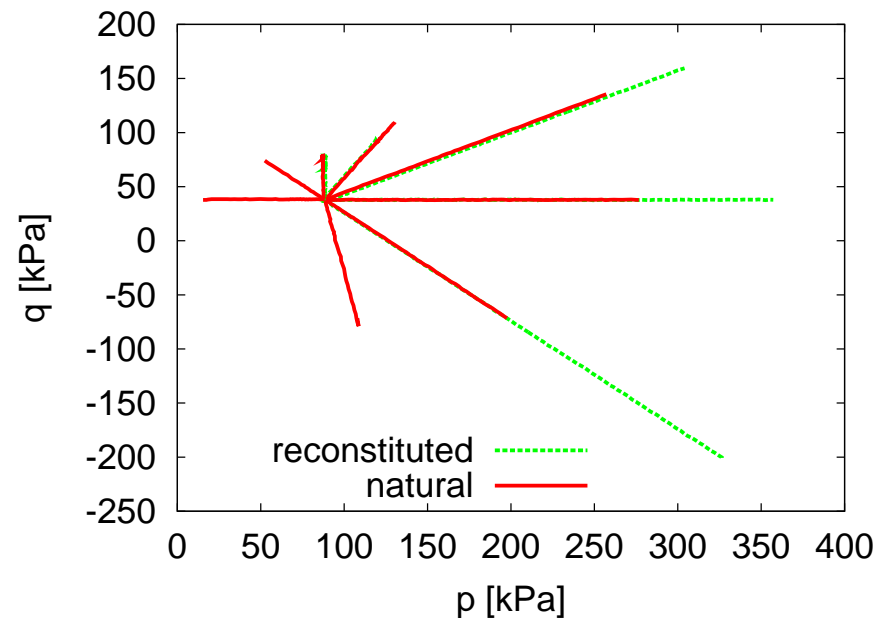
Příkladem jemnozrnné zeminy s nestabilní strukturou je tzv. *Pisa clay*, jíl nacházející se v podloží *Šikmé věže v Pise*. Jedná se o holocénní jezerní sedimenty.

Při přípravě narovnění věže v devadesátých letech vznikla bohatá databáze experimentálních dat.



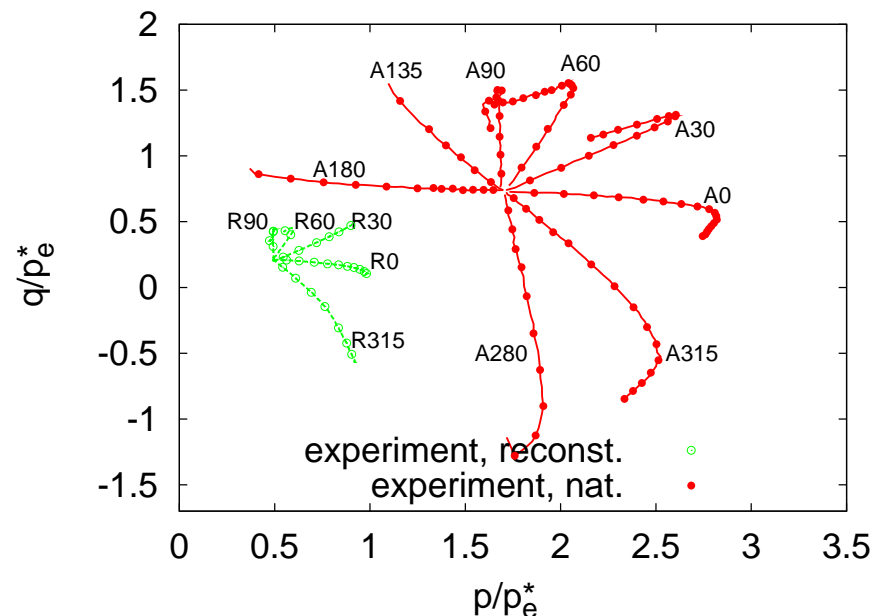
Model Cam jílu pro zeminy s nestabilní strukturou

Laboratorní zkoušky na jílu z *Pisy* vykreslené v grafu p vs. q .



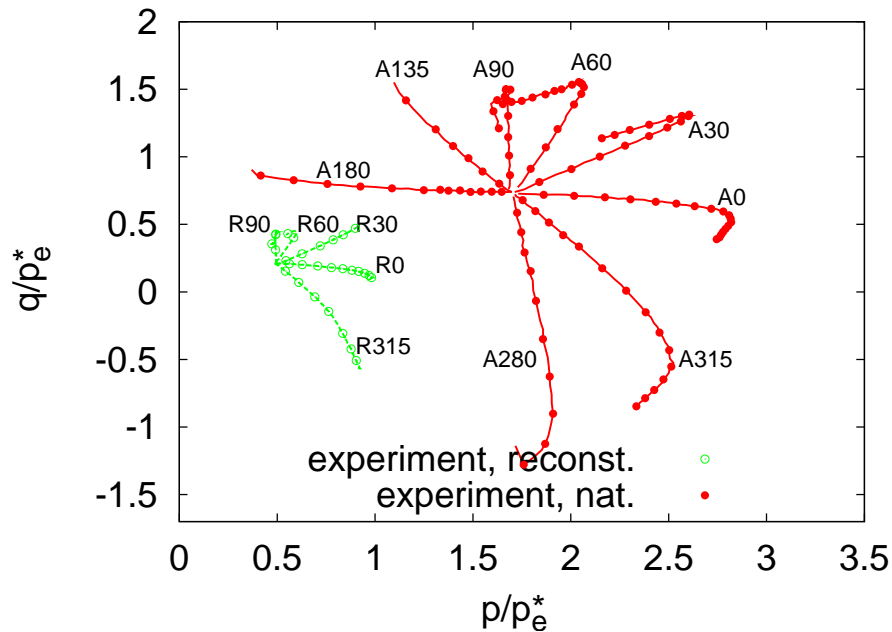
Model Cam jílu pro zeminy s nestabilní strukturou

Nestabilní struktura neporušených vzorků je zřejmá, když experimentální data vykreslíme v prostoru napětí normalizovaném *Hvorslevovým ekvivalentním napětím* p_e^* :

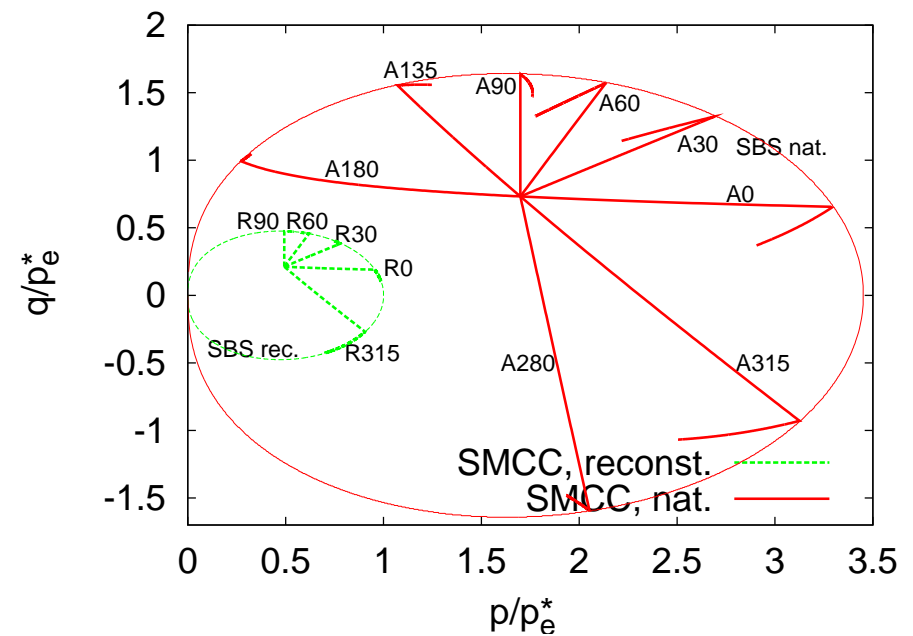


Model Cam jílu pro zeminy s nestabilní strukturou

Předpověď experimentů na jílu z *Pisy* pomocí modelu Cam jílu s nestabilní strukturou:



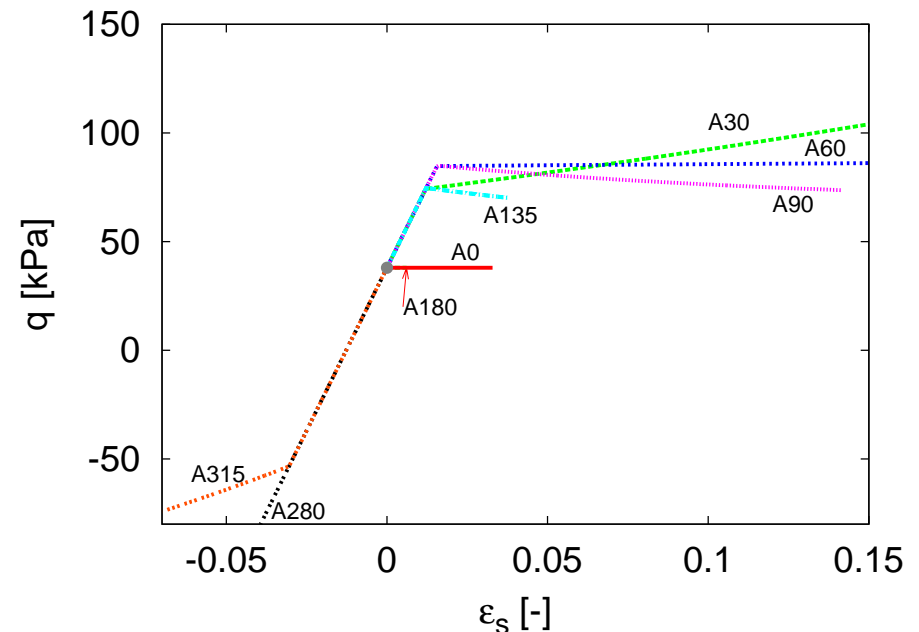
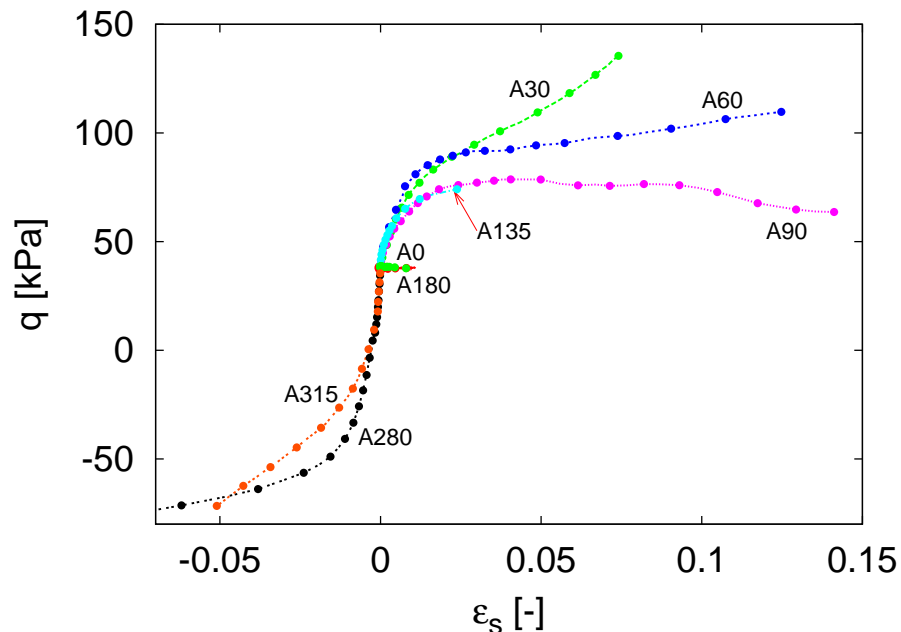
experiment



simulation

Model Cam jílu pro zeminy s nestabilní strukturou

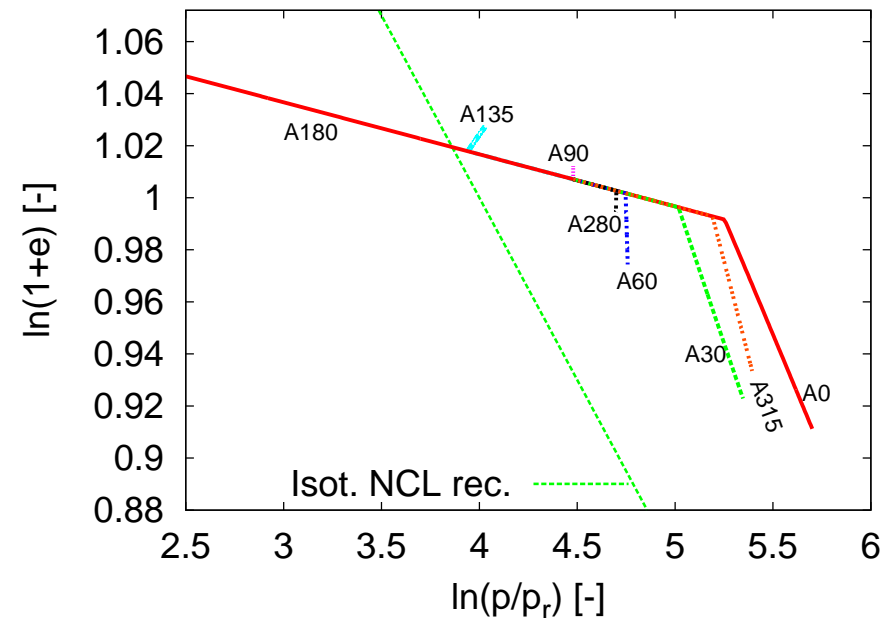
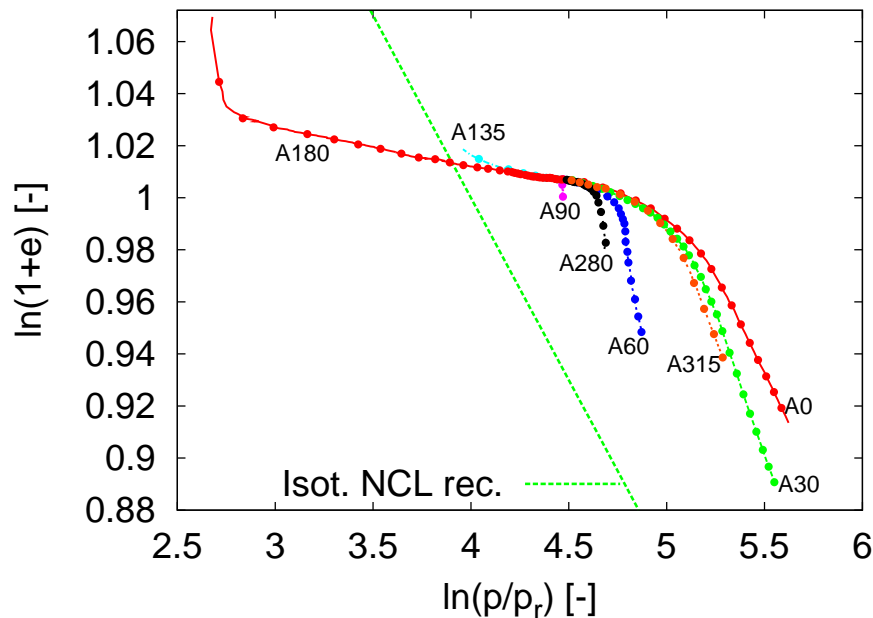
Předpověď experimentů na jílu z *Pisy* pomocí modelu Cam jílu s nestabilní strukturou:



Z těchto grafů je zřejmá zásadní nevýhoda referenčního modelu:
lineární chování uvnitř mezní plochy.

Model Cam jílu pro zeminy s nestabilní strukturou

Předpověď experimentů na jílu z *Pisy* pomocí modelu Cam jílu s nestabilní strukturou:



Z těchto grafů je zřejmá zásadní nevýhoda referenčního modelu:
lineární chování uvnitř mezní plochy.

Model Cam jílu pro zeminy s nestabilní strukturou

⇒ Model Cam jílu pro zeminy s nestabilní strukturou predikuje správně *degradaci struktury* a zmenšování velikosti mezní plochy. Nicméně u něj zůstávají zachovány hlavní nevýhody referenčního modelu:

- Chování uvnitř mezní plochy je pružné.
- Nevhodnost pro simulaci cyklického zatěžování a pro případy, kdy je důležité simulovat pokles tuhosti s přetvořením.
- Nadhodnocení vrcholového úhlu vnitřního tření

Pro odstranění těchto problémů je nutno využít kvalitnější konstituční model – elastoplastický model s *kinematickým zpevněním* a nebo **hypoplasticitu** ⇒

Modelování materiálů s dvojí pórovitostí

- Zeminy s dvojí pórovitostí: K pórovitosti mezi zrny zeminy (*intergranulární* pórovitost) se přidává pórovitost samotných zrn (*intragranulární* pórovitost)

- Typická zemina s dvojí pórovitostí: materiál výsypek hnědouhelných dolů. Složitý mechanický popis pomocí konstitučních modelů na bázi kontinua



Modelování materiálů s dvojitou pórovitostí

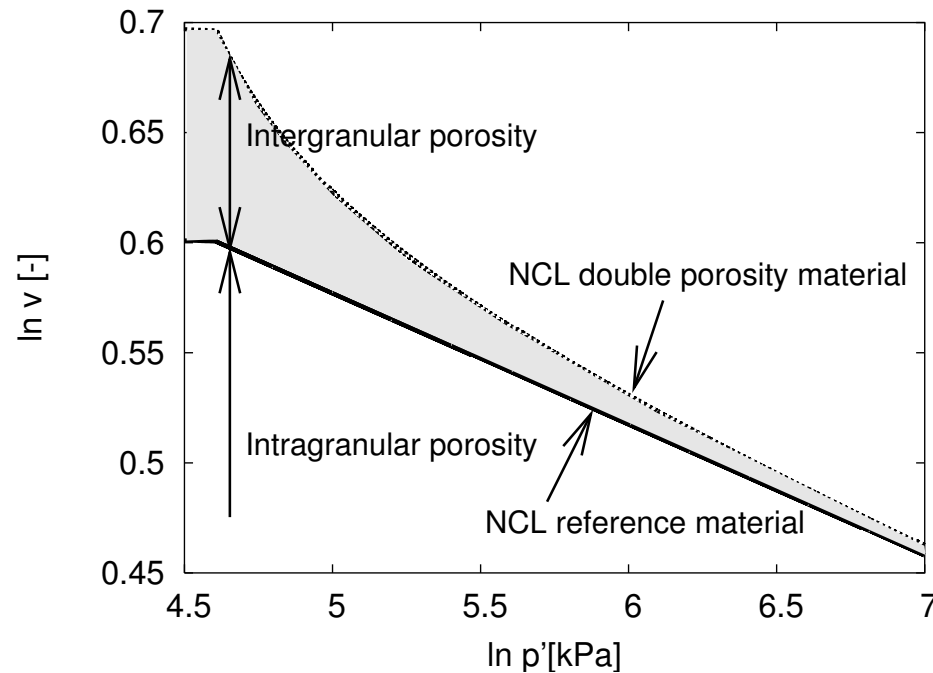
Na materiál s dvojitou pórovitostí lze pohlížet jako na *zemínu s nestabilní strukturou*. Nestabilní struktura je tvořena mezerovitostí (*intergranulární pórovitostí*).

Vlivem zvětrávání a přetížení dochází k *degradaci intergranulární pórovitosti*, chování začíná být kontrolováno *intragranulární pórovitostí*.



Modelování materiálů s dvojitou pórovitostí

- *Mezerovitost* kontroluje stabilitu struktury materiálu s dvojitou pórovitostí



- Referenční materiál – materiál hrud sypaniny

Modelování materiálů s dvojitou pórovitostí

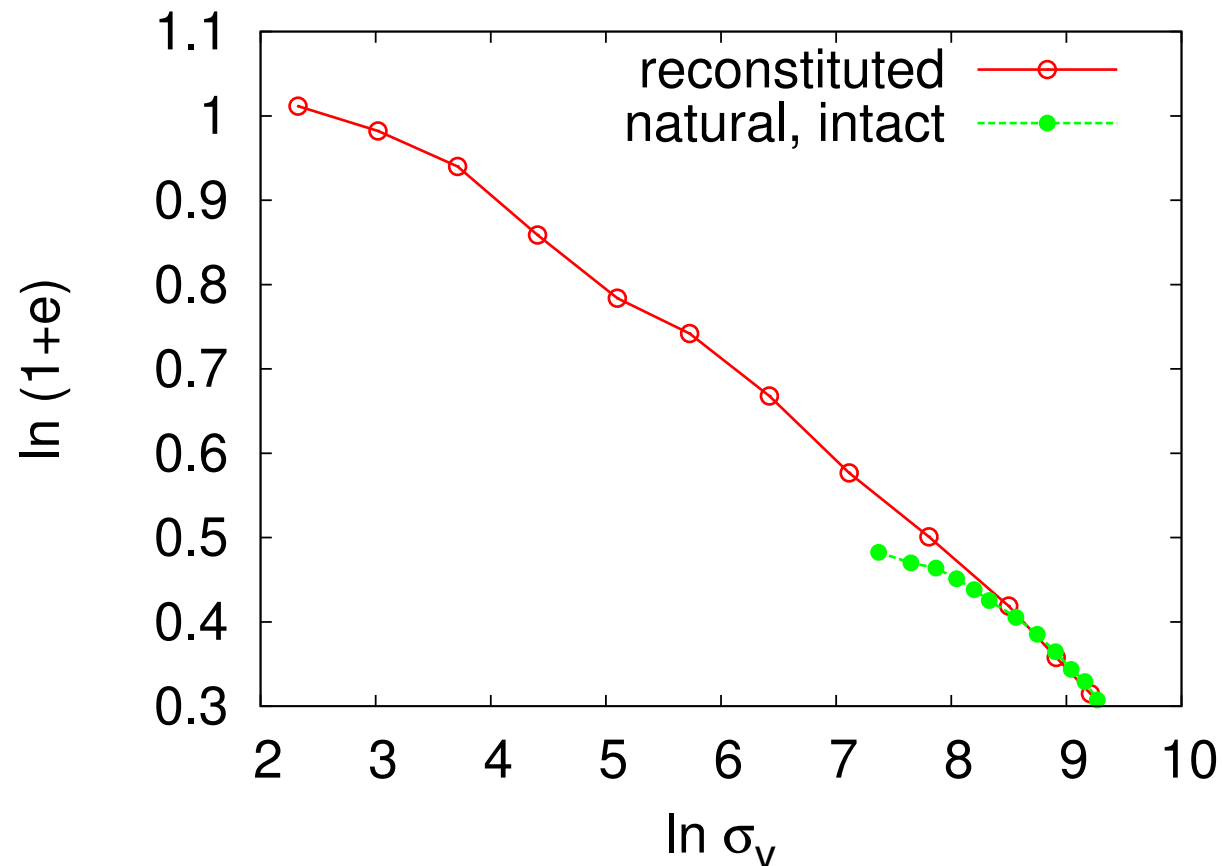
⇒ Materiál s dvojitou pórovitostí může být modelován *modelem Cam jílů obohaceným o vliv struktury*. Sensitivita s má pouze jiný fyzikální význam (intergranulární pórovitost), matematická formulace se nemění.

- Laboratorní experimenty na granulovaném materiálu s *redukovanou křivkou zrnitosti* (menší maximální velikost zrn ⇒ standardní edometrický přístroj) (*Henrique Enriquez, 2005*)

Porovnání chování

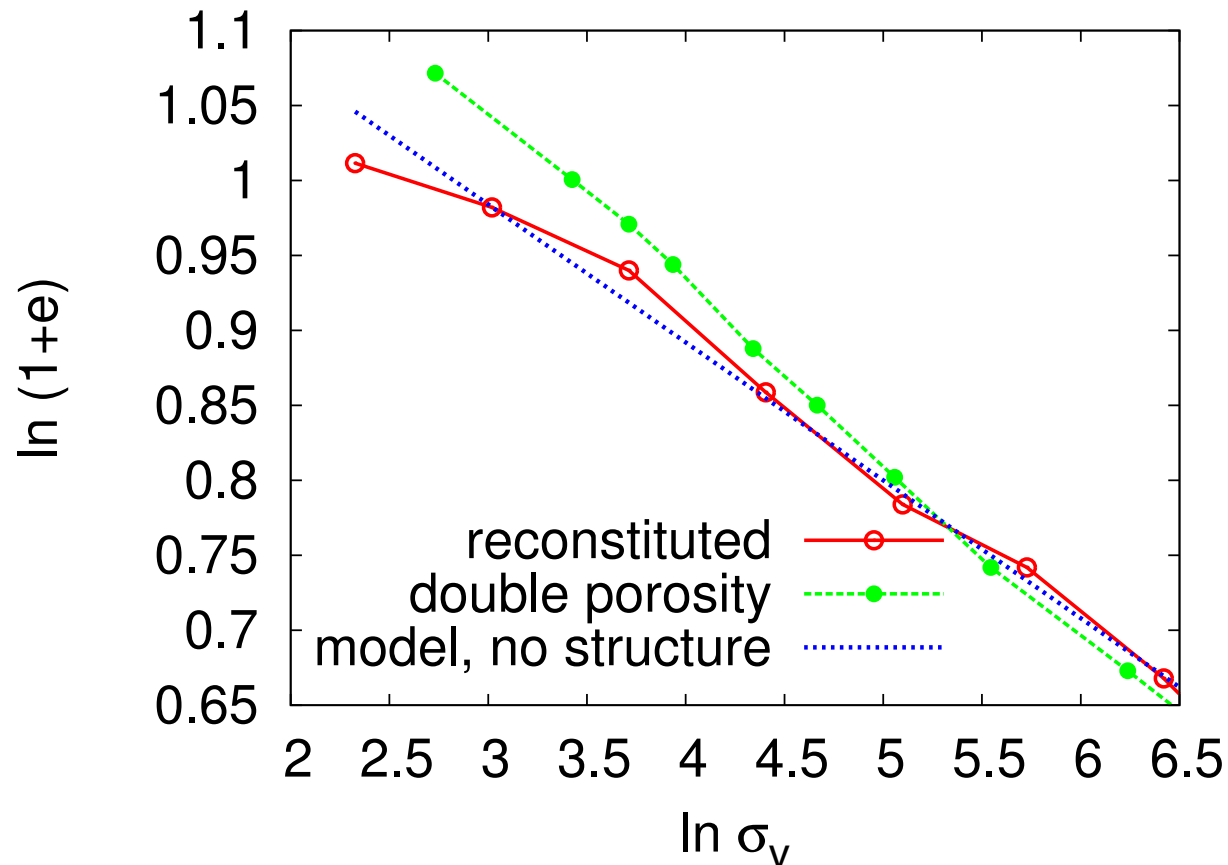
- neporušeného materiálu hrud
- rekonstituovaného materiálu
- materiálu s dvojitou pórovitostí

Neporušený a rekonstituovaný materiál



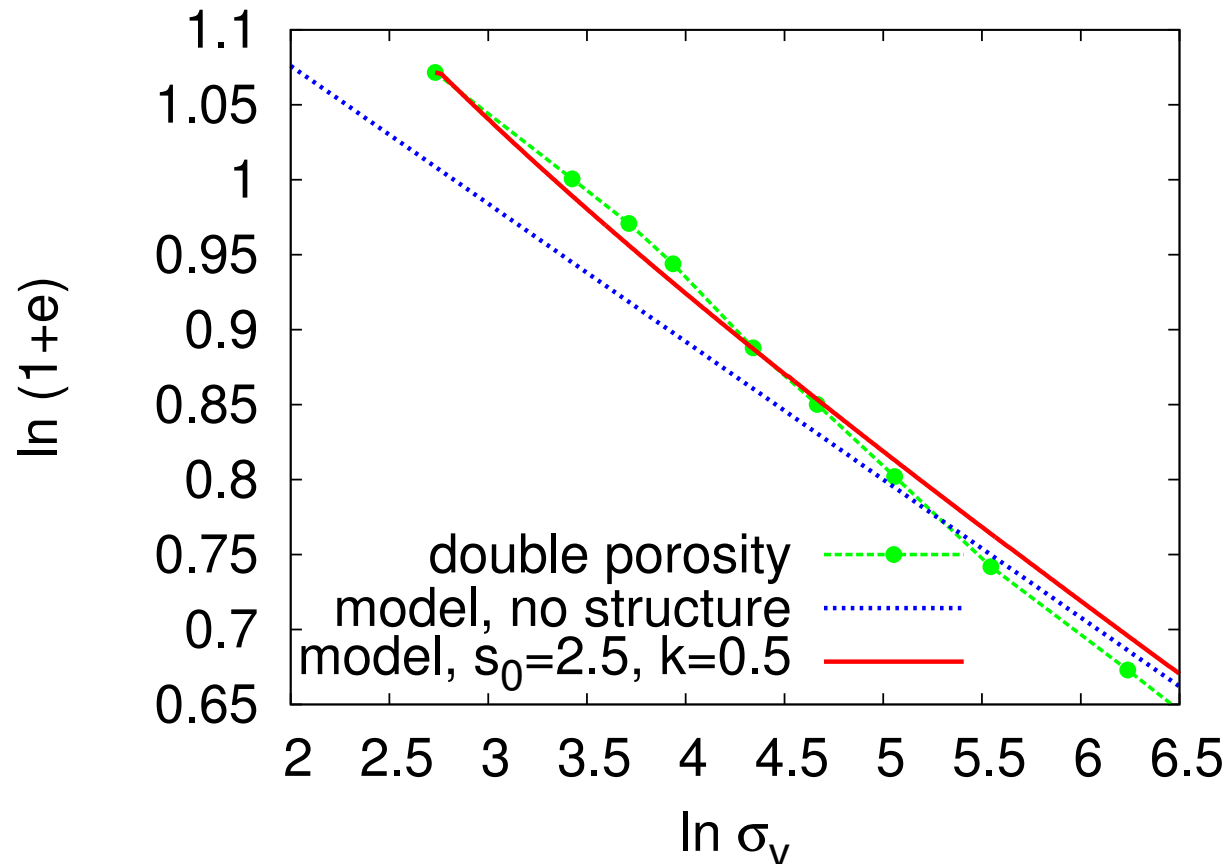
\Rightarrow *Není* vliv struktury (např. cementace) v samotném materiálu hrud!!! \Rightarrow struktura tvořena *pouze* dvojí pórovitostí

Materiál s dvojí pórovitostí



Čára normální konsolidace rekonstituovaného materiálu: $N = 1.248$,
 $\lambda^* = 0.092$

Modelování materiálu s dvojí pórovitostí



$k = 0.5$, počáteční sensitivity $s_0 = 2.5 \Rightarrow$ nezanedbatelná hodnota (čerstvá sypanina má 2.5 krát vyšší nedrénovanou pevnost, přitom je náchylná ke kolapsu).

Hypoplasticita

Relativně moderní přístup ke konstitučnímu modelování geomateriálů, *od základů* odlišný od elasto-plastických modelů.

U hypoplastických modelů nedělíme přetvoření na *pružná a plastická*, nerozlišujeme dva typy deformace (elastická a elasto-plastická). Nelineární chování geomateriálů je reprodukováno přírůstkově nelineárním charakterem celkové konstituční rovnice (viz. dále ↓).

Podstatu hypoplastického modelu lze vysvětlit na základě jednorozměrného příkladu. Hypoplastický vztah lze pak zapsat:

$$\dot{\sigma} = L\dot{\epsilon} + N|\dot{\epsilon}|$$

Pro moduly L a N platí $L > N > 0$.

Je zřejmé, že pro případ přitížení ($\dot{\epsilon} < 0$) je tuhost materiálu dána

$$\dot{\sigma} = (L - N)\dot{\epsilon}$$

kdežto pro odlehčení

$$\dot{\sigma} = (L + N)\dot{\epsilon}$$

Hypoplastický model predikuje vyšší tuhost materiálu pro odlehčení než pro přitížení, aniž by musel využívat dvou různých rovnic!

Hypoplasticita

V obecném zápisu jsou moduly L a N *tenzory* čtvrtého a druhého řádu

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

Od *hypoplastického modelu* požadujeme, aby stejně jako elasto-plastické modely predikoval charakteristické rysy chování zemin, z nichž nejzákladnější je modelování *porušení* materiálu.

Co teď? Máme k dispozici dvě tenzorové funkce, a žádný z nástrojů elasto-plasticity, jako je podmínka porušení, plastický potenciál atd.

Hypoplasticita

Základní rovnici

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

můžeme upravit. Analogicky s elasto-plastickými modely, při *porušení* materiálu $\dot{\sigma} = \mathbf{0}$, tedy

$$\mathbf{0} = \mathcal{L} : \dot{\epsilon} + \mathbf{N} \|\dot{\epsilon}\|$$

což je ekvivalentní zápisu (viz. základy tenzorového počtu \Leftrightarrow)

$$\mathbf{0} = \mathcal{L} : [\dot{\epsilon} + (\mathcal{L}^{-1} : \mathbf{N}) \|\dot{\epsilon}\|]$$

a tedy

$$\mathbf{0} = \dot{\epsilon} + (\mathcal{L}^{-1} : \mathbf{N}) \|\dot{\epsilon}\|$$

Hypoplasticita

$$\mathbf{0} = \dot{\boldsymbol{\epsilon}} + (\mathcal{L}^{-1} : \mathbf{N}) \|\dot{\boldsymbol{\epsilon}}\|$$

tudíž

$$-\vec{\boldsymbol{\epsilon}} = \mathcal{L}^{-1} : \mathbf{N}$$

a protože $\|-\vec{\boldsymbol{\epsilon}}\| = 1$, *podmínka porušení* u hypoplastického modelu

$$Y = \|\mathcal{L}^{-1} : \mathbf{N}\| = 1$$

A co víc . . . $\vec{\boldsymbol{\epsilon}}$ představuje směr přírůstku přetvoření při porušení, tedy *hypoplastický ekvivalent zákona tečení* (plastického potenciálu)

$$\vec{\mathbf{m}} = \vec{\boldsymbol{\epsilon}} = -(\mathcal{L}^{-1} : \mathbf{N})$$

Hypoplasticita

To je pěkné, nyní umíme vypočítat *podmínku porušení* a *plastický potenciál* z tenzorů \mathcal{L} a \mathbf{N} .

Tímto způsobem vznikaly první hypoplastické modely $\rightarrow \mathcal{L}$ a \mathbf{N} byly náhodně hledány tak, aby model predikoval realistickou podmínku porušení a zákon tečení.

Opačný postup se ale ukazuje jako mnohem výhodnější. \rightarrow Hledáme formulaci hypoplastického modelu tak, abychom stejně jako u elasto-plasticity předepsali Y , \vec{m} a \mathcal{L} podle experimentálních dat, ne \mathbf{N} , jež nemá zřejmý fyzikální význam.

Hypoplasticita

Zpět k formulaci hypoplastického modelu:

$$\dot{\sigma} = \mathcal{L} : [\dot{\epsilon} + (\mathcal{L}^{-1} : \mathbf{N}) \|\dot{\epsilon}\|]$$

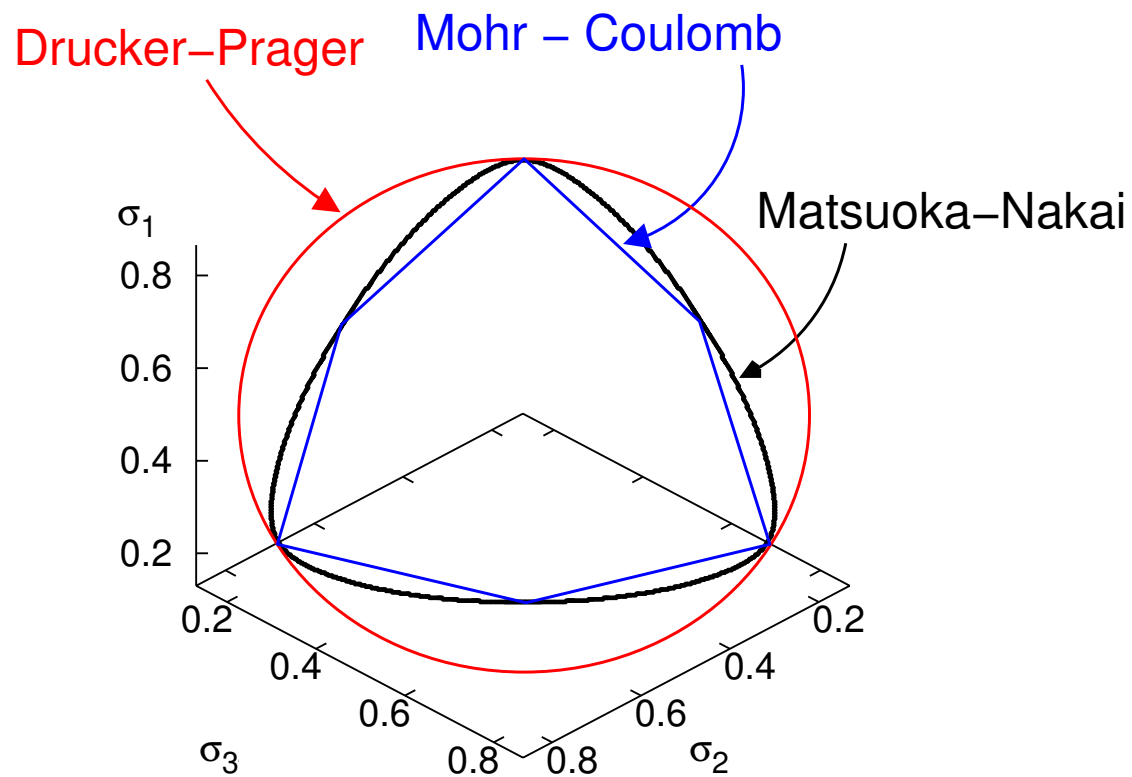
Protože $\mathbf{A} = \|\mathbf{A}\| \vec{\mathbf{A}}$ (viz. základy tenzorového počtu \Leftrightarrow), hypoplastický model snadno přeformulujeme na

$$\dot{\sigma} = \mathcal{L} : (\dot{\epsilon} - Y \vec{\mathbf{m}} \|\dot{\epsilon}\|)$$

Ekvivalentně s elasto-plastickými modely, $\vec{\mathbf{m}}$ předepíšeme tak, aby v kritickém stavu $\dot{\epsilon}_v = \text{tr}(\vec{\mathbf{m}}) = 0$.

Hypoplasticita

Za Y můžeme dosadit podmínku porušení *Matsuoka-Nakai*

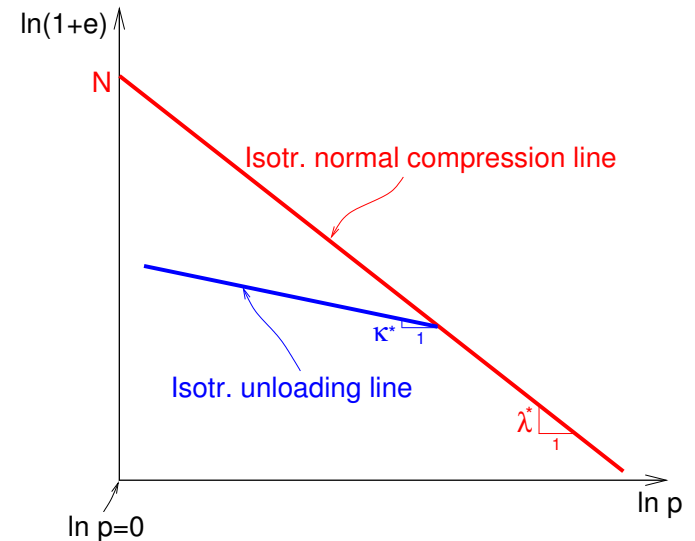


Hypoplasticita

Hypoplastický model je ještě modifikován *skalárními faktory* f_s a f_d tak, aby správně predikoval vliv středního napětí a aby uvažoval pórovitost jako stavovou proměnnou.

Výledný model vyžaduje *pět* materiálových parametrů, jež odpovídají parametrům modelu *Cam jílů*:

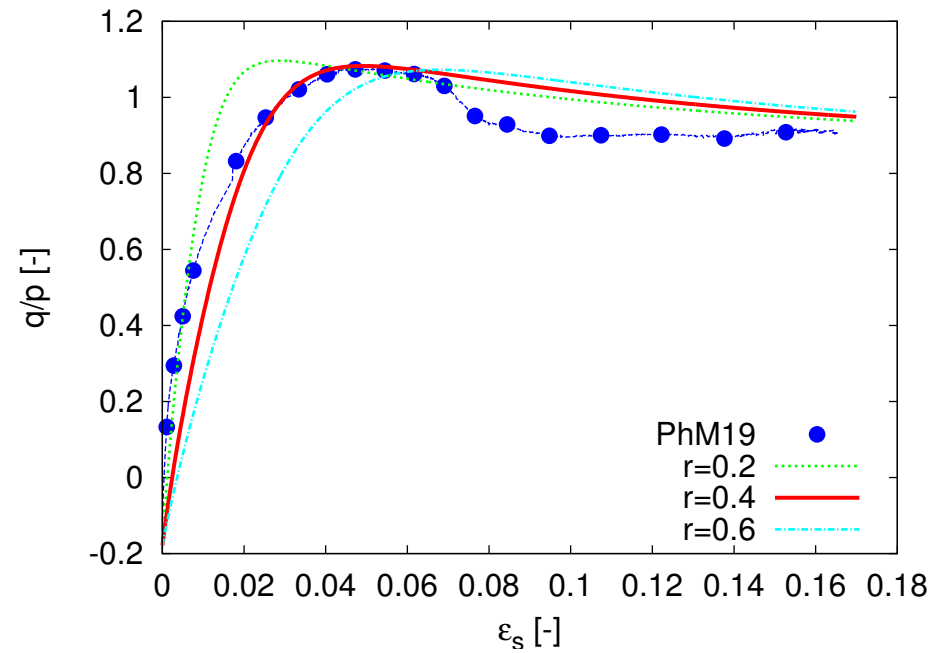
N , λ^* a κ^* \Rightarrow



φ_c je kritický úhel vnitřního tření, r kontroluje smykovou tuhost materiálu (ekvivalent parametru G u modelu *Cam jílů*).

Hypoplasticita

Vliv parametru r na předpovědi hypoplastického modelu:

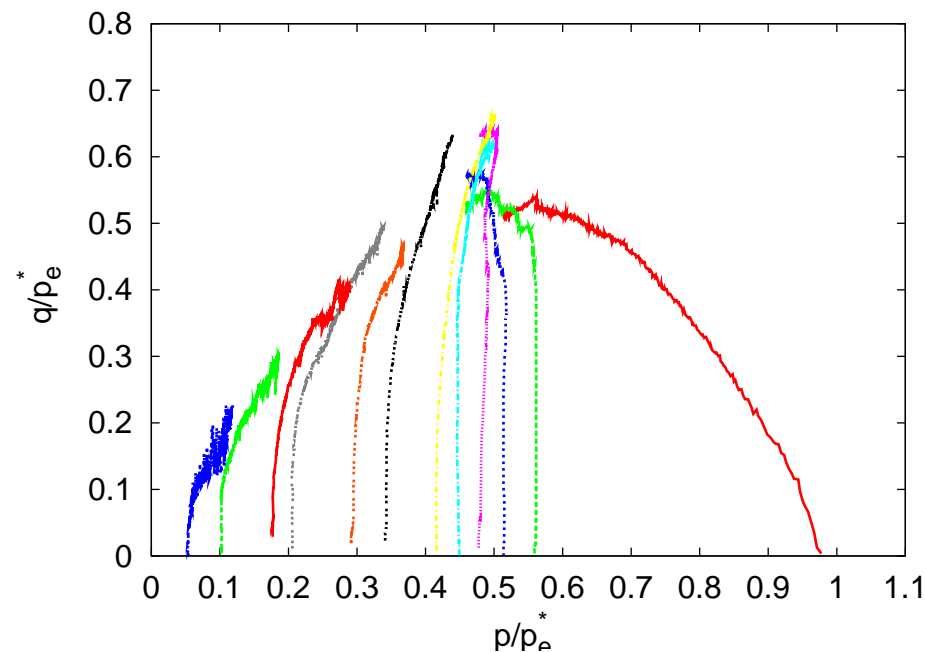


Porovnání hypoplasticity a Cam jílu

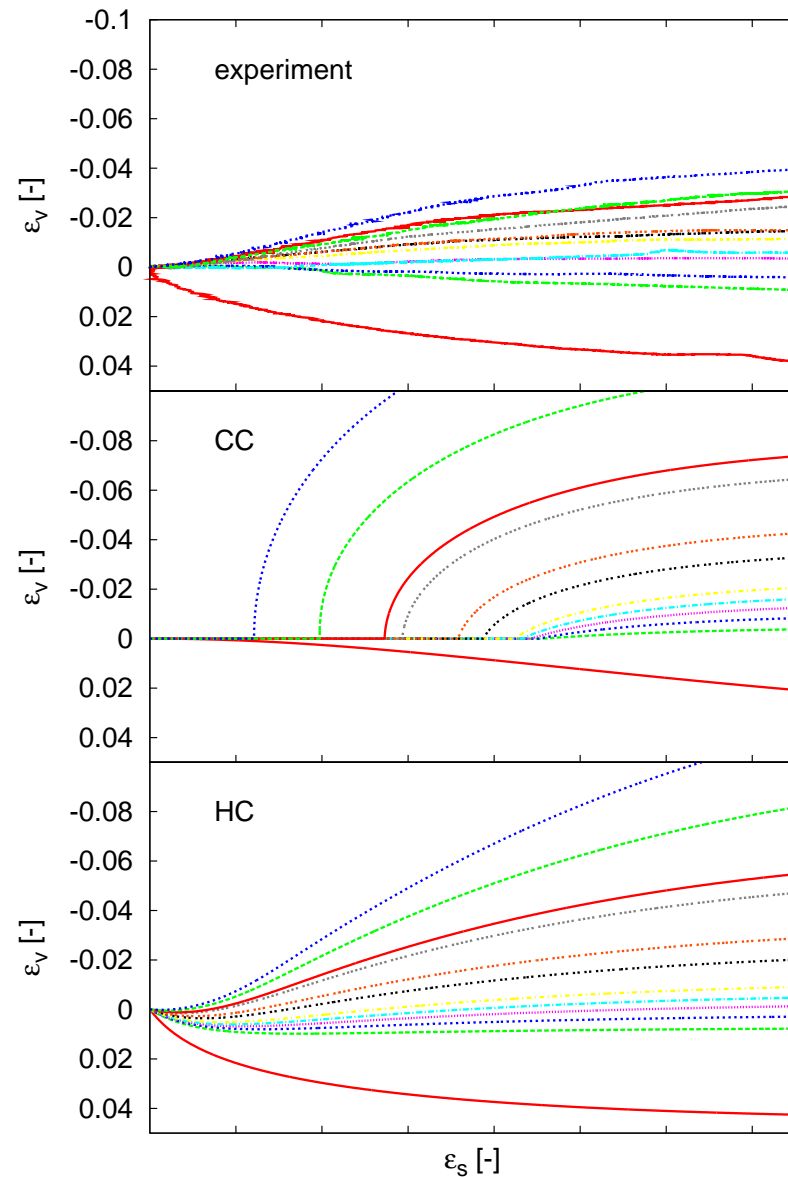
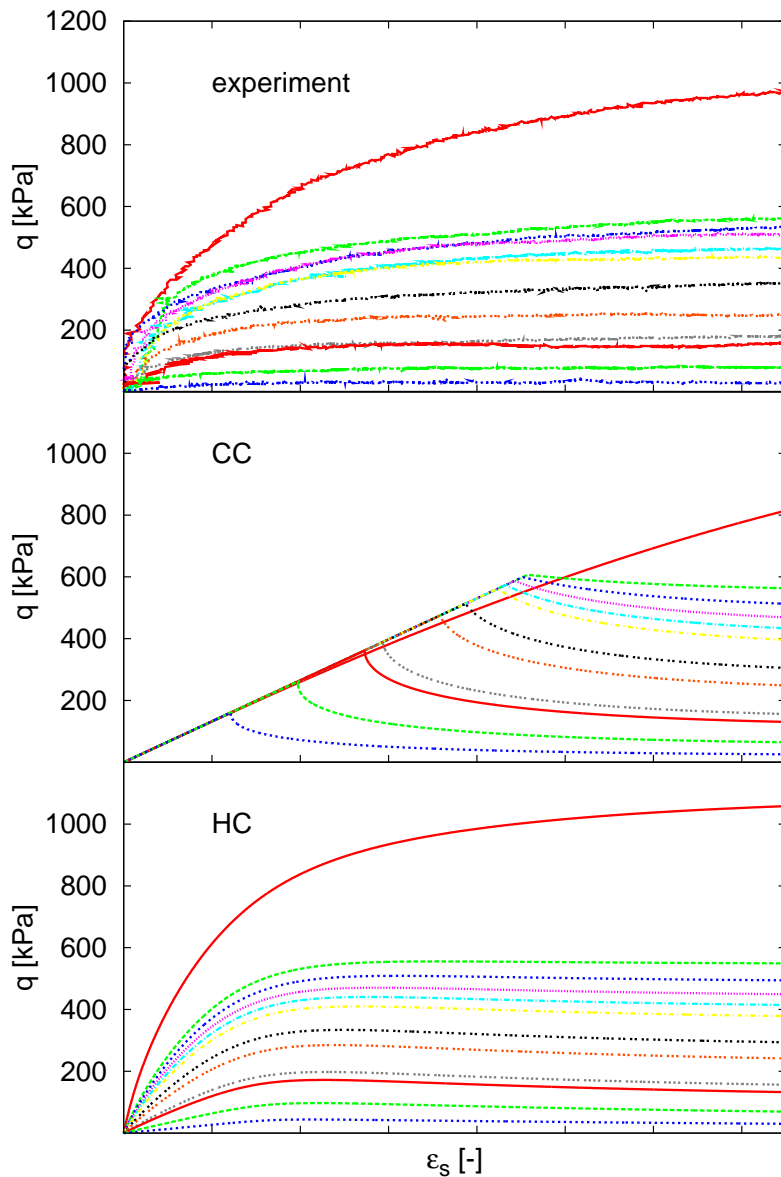
Hypoplastický model a model *Cam jílu* mají ekvivalentní parametry i stavové proměnné, tudíž z pohledu *uživatele* jsou stejně komplexní.

Jaký je rozdíl mezi jejich předpovědmi?

Vyhodnocení na základě experimentů na *kaolinu* o různých stupních překonsolidace. Normalizované dráhy napětí:

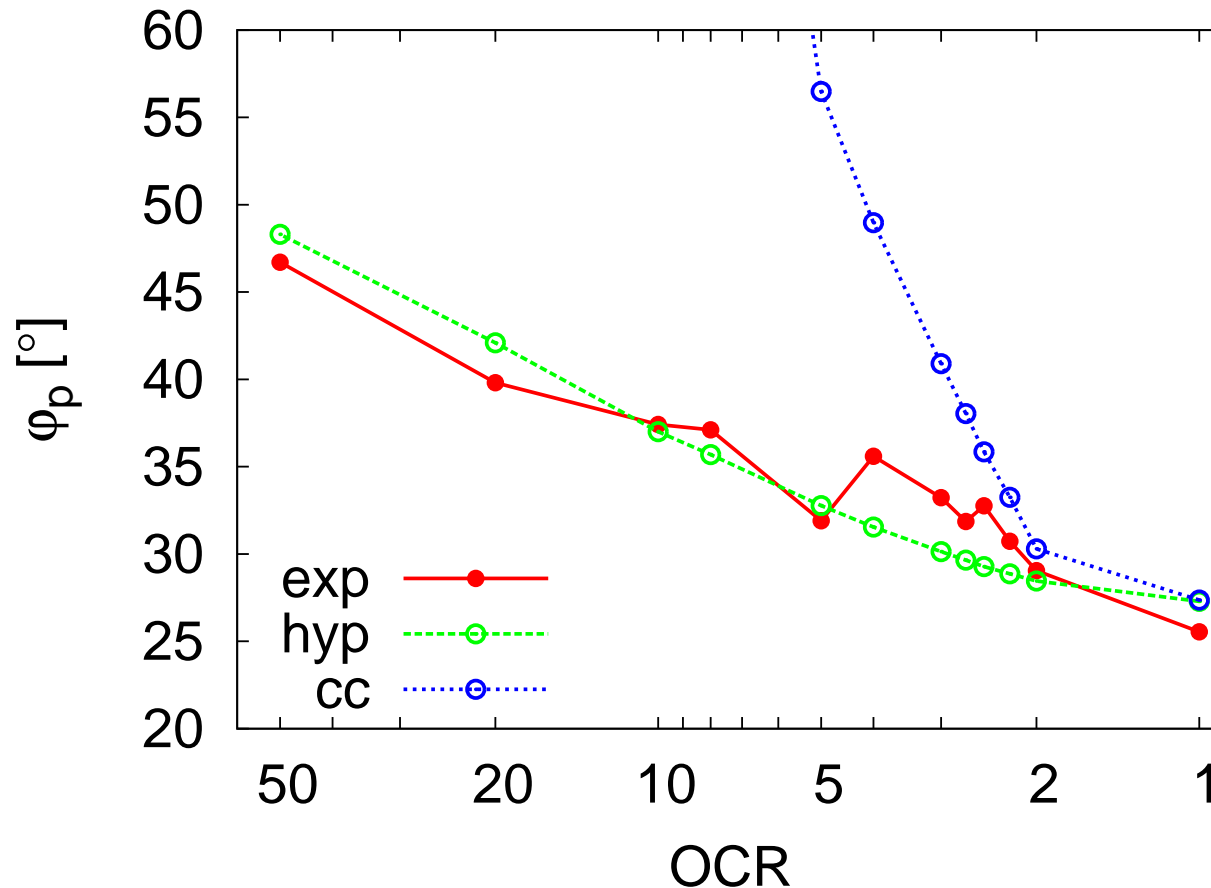


Porovnání hypoplasticity a Cam jílu



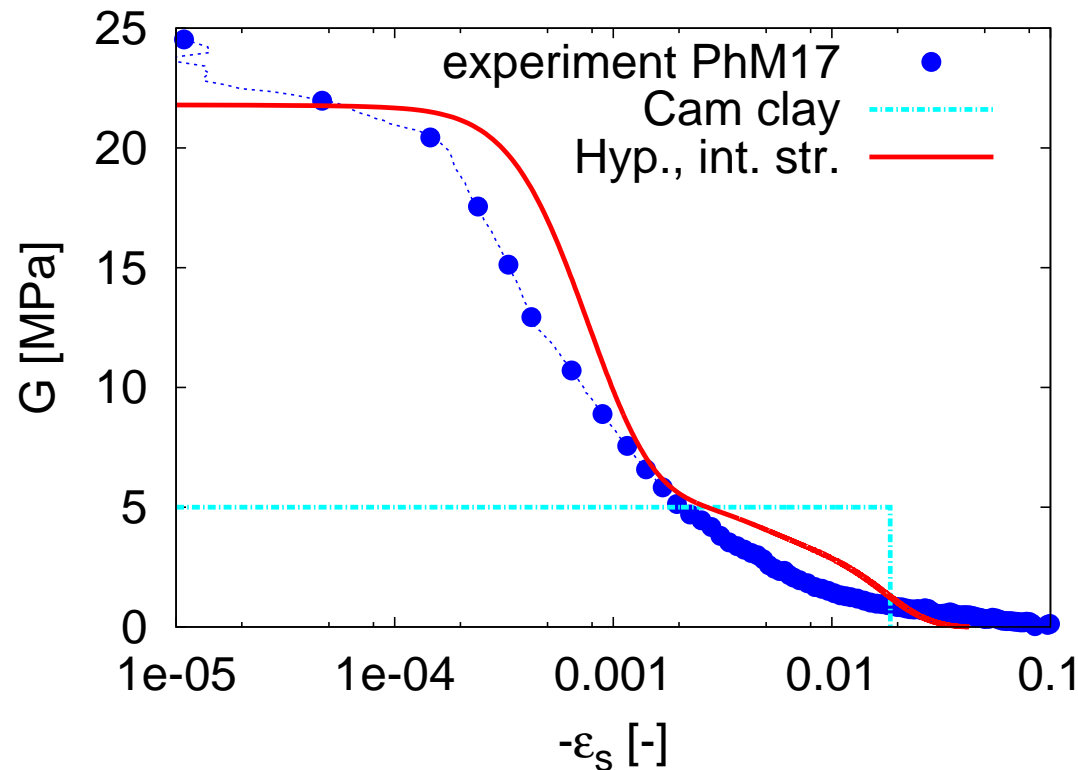
Porovnání hypoplasticity a Cam jílu

Další z významných nevýhod modelu *Cam jílu*, jež známe: významné přehodnocení vrcholového úhlu vnitřního tření pro překonsolidovanou zeminu.



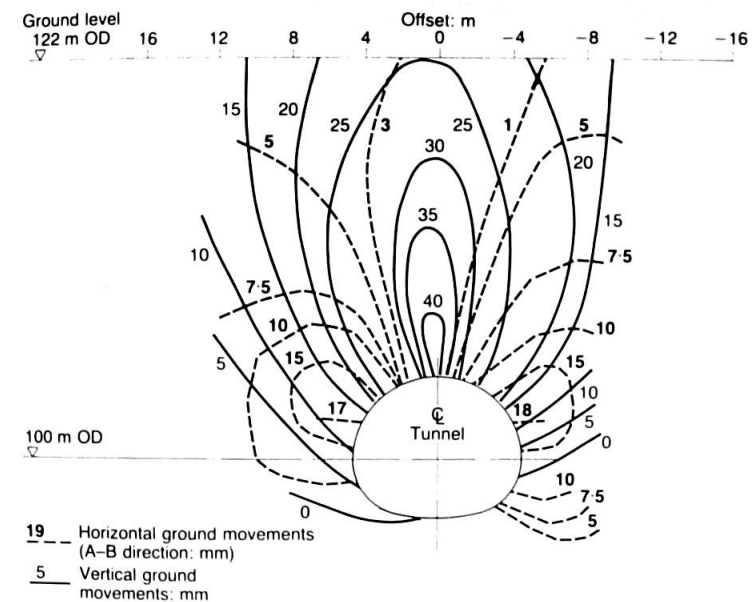
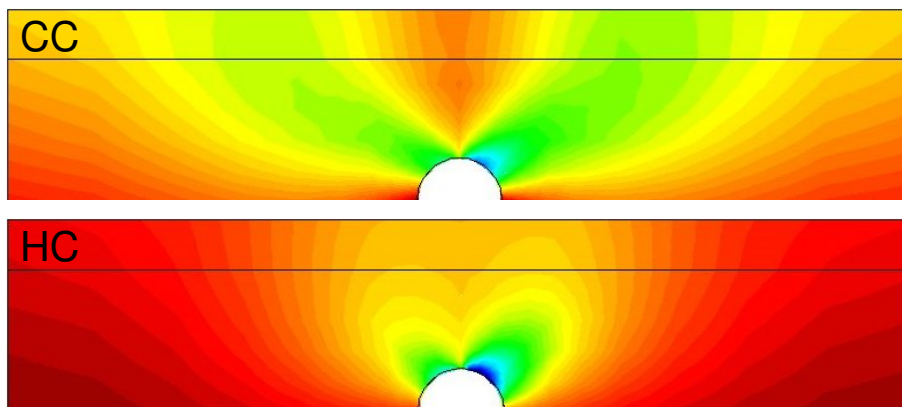
Porovnání hypoplasticity a Cam jílu

Model *Cam jílu* dále není schopný modelovat vysokou počáteční tuhost materiálu a její pokles s přetvořením. Co *hypoplasticita*?



Porovnání hypoplasticity a Cam jílu

Výhody *hypoplastického modelu* jsou zřejmé i z MKP simulace skutečných geotechnických problémů, viz. *Heathrow express trial tunnel*:



Čili, podařilo se nám najít kvalitnější referenční konstituční model, viz. [⇐](#). Jak je to s modelováním *nestandardních materiálů* pomocí hypoplasticity?

Hypoplasticita pro zeminy s nestabilní strukturou

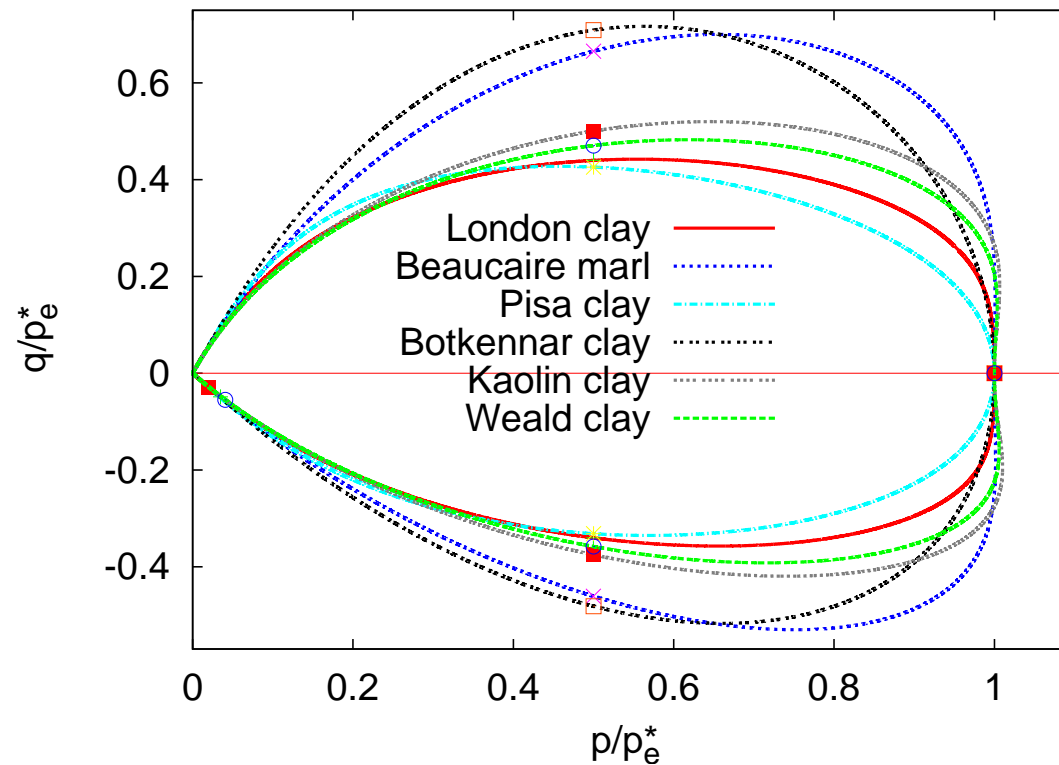
Jak vyplývá z předchozího výkladu, aby bylo možno konstituční model obohatit o *koncept sensitivity* musí předpovídat *mezní plochu* v prostoru napětí – pórovitosti.

Dostáváme se do stejného problému jako u definice plochy plasticity a plastického potenciálu – koncept *mezní plochy* není do hypoplastických modelů explicitně včleněn jako do elasto-plastických modelů.

Nezbývá než studovat tenzorovou formulaci hypoplasticity a zjišťovat, zda model predikuje *mezní plochu* jako "vedlejší produkt" jeho formulace.

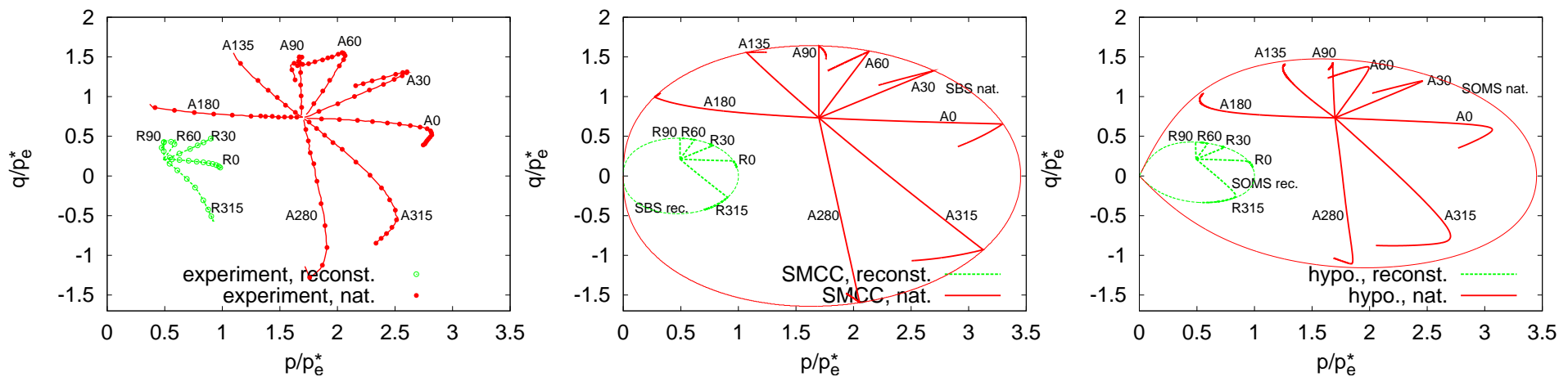
Hypoplasticita pro zeminy s nestabilní strukturou

Lze ukázat, že hypoplastický model *mezní plochu* předpovídá. Její tvar je obdobný mezní ploše modelu *Cam jílu*.



Hypoplasticita s nestabilní strukturou

Podobně jako model *Cam jílu*, hypoplastický model může být nyní obohacen o novou stavovou proměnnou *sensitivity* s . Předpověď experimentů na *jílu z Pisy*:



Čili nyní umíme využít hypoplasticitu pro modelování vlivů struktury. Obdobně jako model *Cam jílu* lze hypoplastický model využít pro modelování *zemin s dvojí pórovitostí* apod.

Nyní se budeme věnovat jinému typu "nestandardního materiálu" \Rightarrow
nenасыeným zeminám

Nenasycené zeminy

Popis mechanické chování nenasycených zemin je komplikovaný. Je to zejména z toho důvodu, že se i přes 50 let usilovného výzkumu ukazuje, že není možno nalézt formulaci pro *efektivní napětí* v nenasycených zeminách.

Zde je vhodné připomenout definici efektivního napětí vycházející z *Terzaghiho principu*

Všechny měřitelné projevy změny napětí jsou dány výlučně změnou efektivního napětí.

Napětí v nenasycených zeminách

První pokus o definici *efektivního napětí v nenasycených zeminách* provedl již Bishop (1959).

$$\sigma' = \sigma_t - \mathbf{1} [\chi u_w + (1 - \chi) u_a]$$

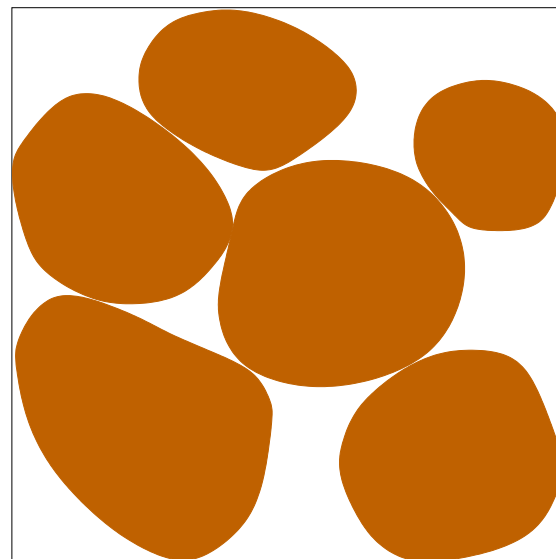
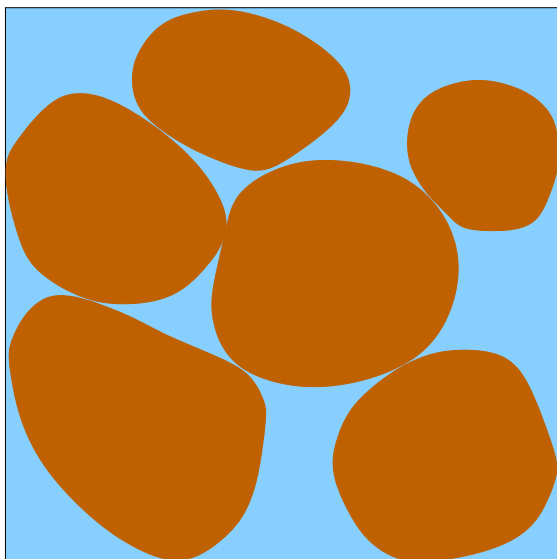
kde u_w a u_a představují pórový tlak vody a vzduchu a σ_t bude v oddílu zabývající se nenasycenými zeminami značit *totální napětí*.

Rovnice na první pohled dává smysl: celkový pórový tlak je dán jako *vážený průměr* pórového tlaku vody a vzduchu.

Proč tedy nemůže fungovat?

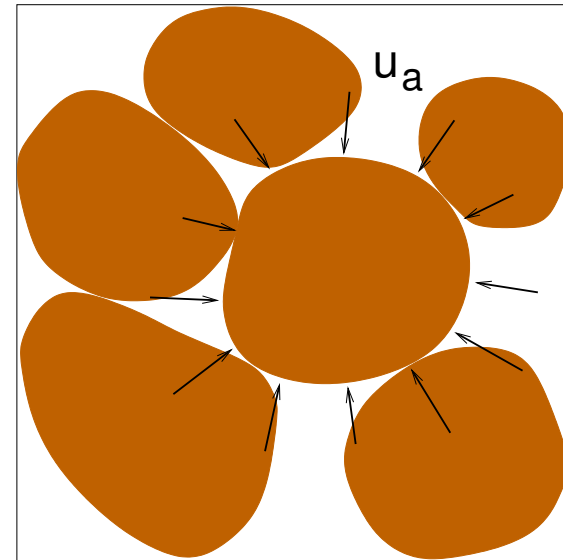
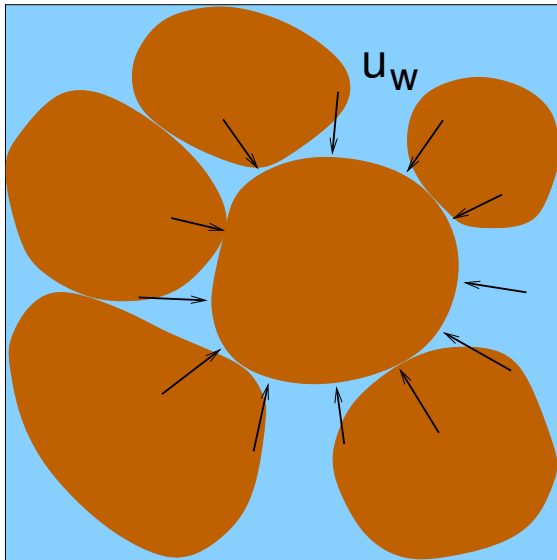
Napětí v nenasycených zeminách

Představme si zeminu kde jsou póry *plně nasyceny* buď vodou, nebo vzduchem:



Napětí v nenasycených zeminách

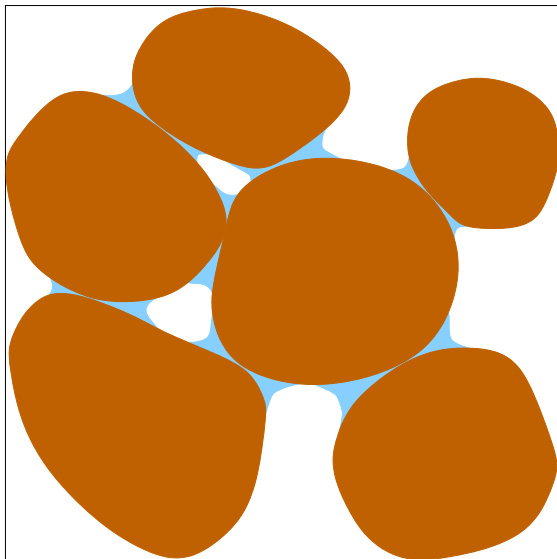
Představme si zeminu kde jsou póry *plně nasyceny* buď vodou, nebo vzduchem:



Jak voda, tak vzduch vyvozují na skelet zeminy *izotropní (všesměrné) napětí*. Pokud totální napětí není izotropní ($\tau \neq 0$), může zvýšení pórového tlaku (paradoxně) vyvolat vyšší smykové namáhání kontaktů (neboť $\tau' = \tau$ a $\sigma'_n = \sigma_n - u$)

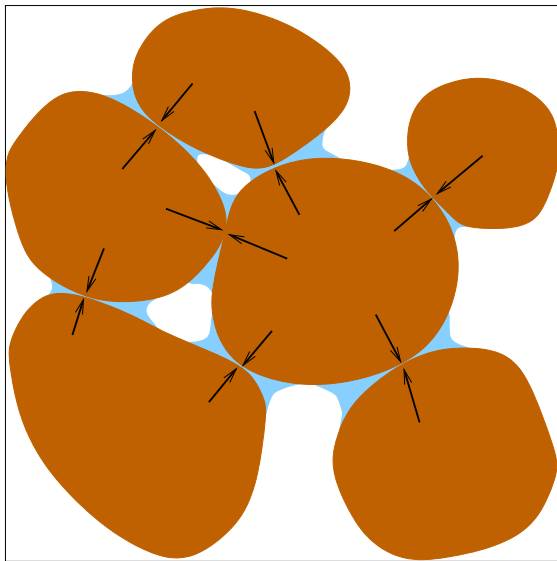
Napětí v nenasycených zeminách

Oproti tomu v nenasycené zemině se kolem kontaktů zrn tvoří *kapilární menisky*:



Napětí v nenasycených zeminách

Oproti tomu v nenasycené zemině se kolem kontaktů zrn tvoří *kapilární menisky*:



Kapilární menisky vyvozují *pouze* normálové síly na kontaktech. Snižují tedy smykové namáhání kontaktů a *zpevňují* tak skelet zemin.

Evidentně se tedy jedná o zcela jiný mechanismus než v případě plně nasycených pórů. *Bishopova rovnice* sama o sobě, uvažující pouze vážený průměr u_w a u_a tedy nemůže fungovat.

Napětí v nenasycených zeminách

Ještě jeden příklad pro ilustraci. Představme si *isotropně* zatížený vzorek nenasycené zeminy, u nějž dojde ke *zvýšení kapilárních sil*. Toto zvýšení má za následek:

1. Celkovou elastickou kompresi skeletu: v případě nasycené zeminy by to odpovídalo **zvýšení efektivního napětí**.
2. Snížení pravděpodobnosti že dojde k plastickým přetvořením, což v případě nasycené zeminy odpovídá **snížení efektivního napětí**.

⇒ Ukazuje se, že v nenasycených zeminách potřebujeme *dvě proměnné* charakterizující napjatost. Jednu *tenzorovou*, charakterizující celkovou napjatost v materiálu (tato je někdy, nesprávně, nazývána efektivní napětí), a druhou *skalární*, jež definuje zpevnující účinek kapilárních menisků.

Napětí v nenasycených zeminách

I v případě, že se smíříme s tím, že nenalezneme formulaci pro *jediné efektivní napětí*, nemáme vyhráno.

Existuje totiž množství kombinací σ_t , u_w a u_a , jež vedou k *jedné tenzorové* a *jedné skalární* proměnné. Každá z kombinací má své výhody a nevýhody, všechny mohou vést k obdobnému výslednému mechanickému popisu chování, čímž je myšleno:

- Jedna formulace může vést na *komplikovanou definici tenzoru napětí*, což vede k obtížnému vyhodnocování a kontrole laboratorních experimentů. Výsledkem jsou ale *jednodušší konstituční modely*.
- Jiná formulace vede přesně k opačnému výsledku

Napětí v nenasyčených zeminách

My pro jednoduchost budeme uvažovat jedinou kombinaci, asi nejčastěji používanou v mechanice nenasyčených zemin (odpovídá druhé možnosti z předchozí fólie):

Tenzorovou proměnnou bude *net stress* σ (v oddílu nenasyčených zemin bude σ bez čárky značit *net stress*, σ_t značí totální napětí)

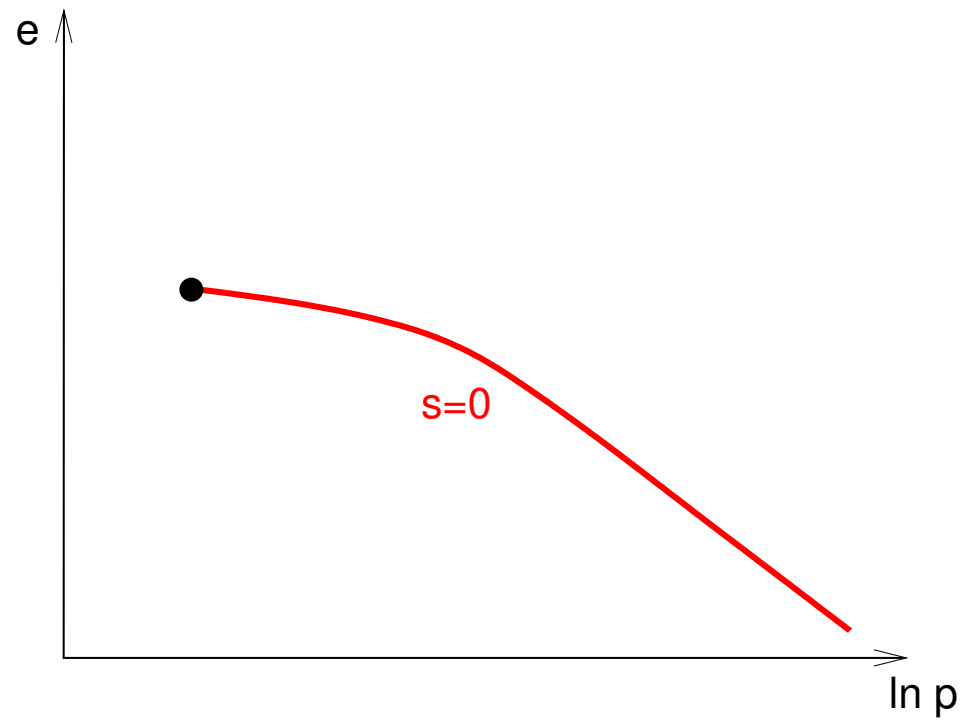
$$\sigma = \sigma_t - \mathbf{1}u_a$$

a skalární proměnnou bude *sání (suction)* s (pozor, neplést se senzitivitou z popisu strukturovaných zemin)

$$s = u_a - u_w$$

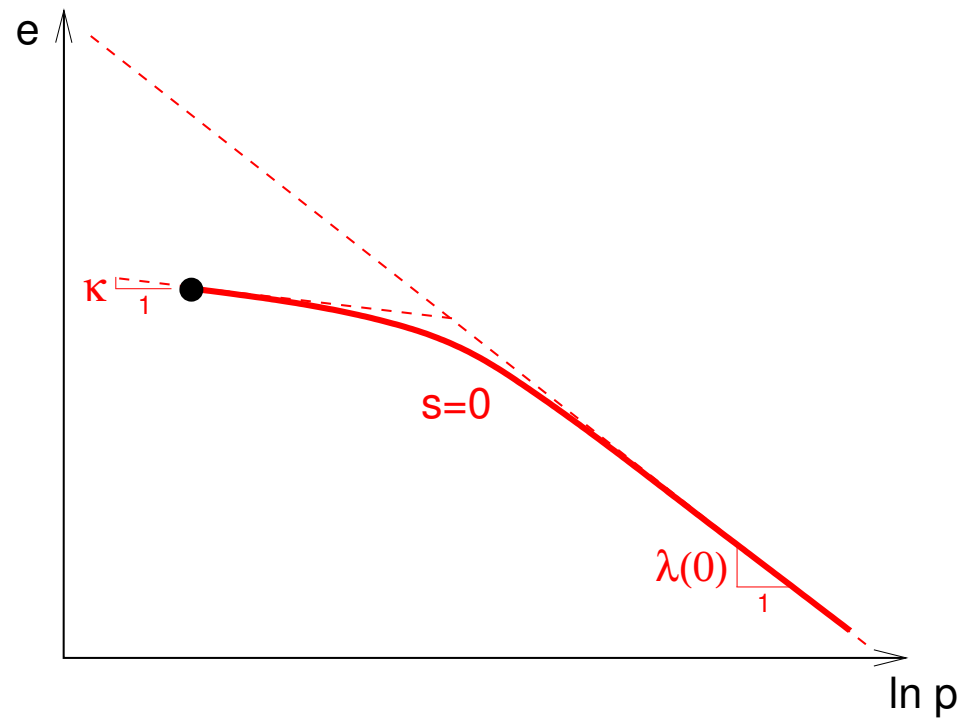
Mechanické chování nenasycených zemin

Vliv *konstantního* sání s na stlačitelnost zeminy (např. v oedometrickém přístroji) je následující:



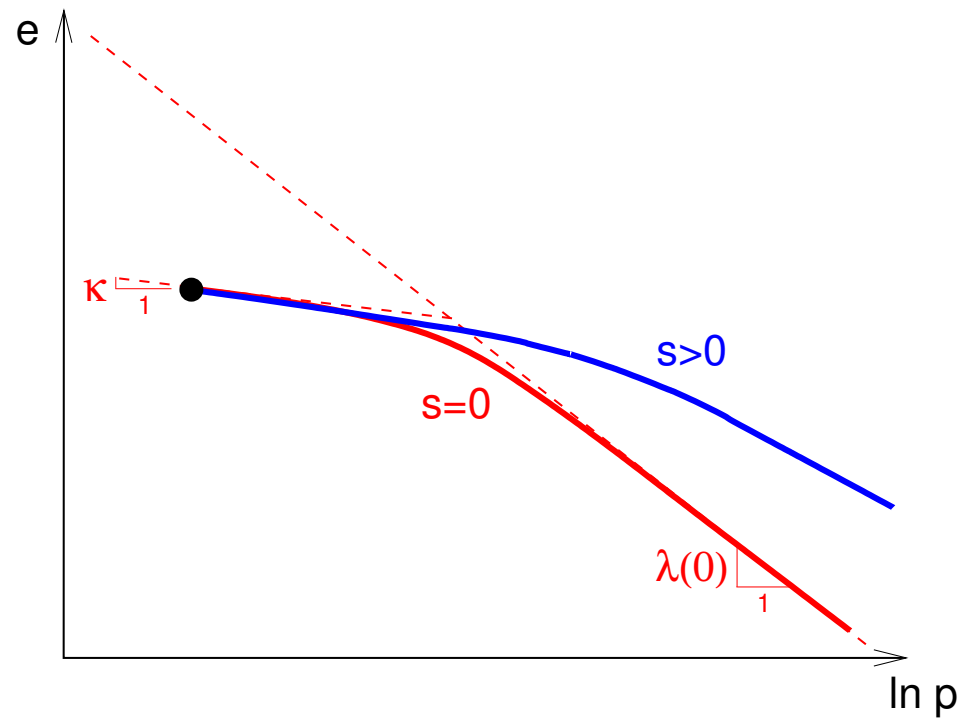
Mechanické chování nenasycených zemin

Vliv *konstantního* sání s na stlačitelnost zeminy (např. v oedometrickém přístroji) je následující:



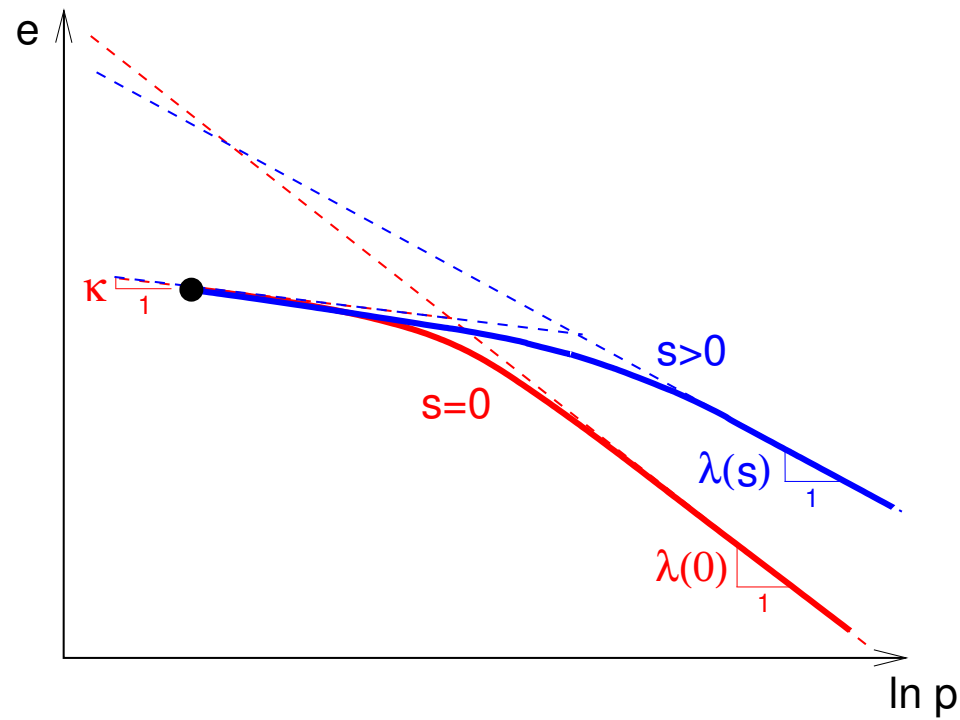
Mechanické chování nenasycených zemin

Vliv *konstantního* sání s na stlačitelnost zeminy (např. v oedometrickém přístroji) je následující:



Mechanické chování nenasycených zemin

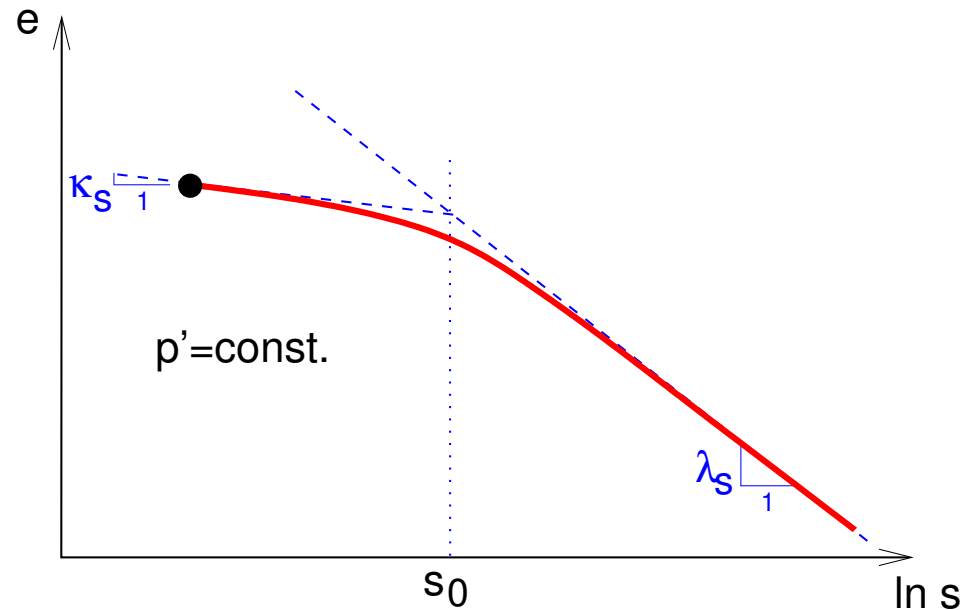
Vliv *konstantního* sání s na stlačitelnost zeminy (např. v oedometrickém přístroji) je následující:



Vyšší sání s má za následek *zvýšení tuhosti* (snížení λ) a zvýšení zdánlivého *překonsolidačního napětí*

Mechanické chování nenasycených zemin

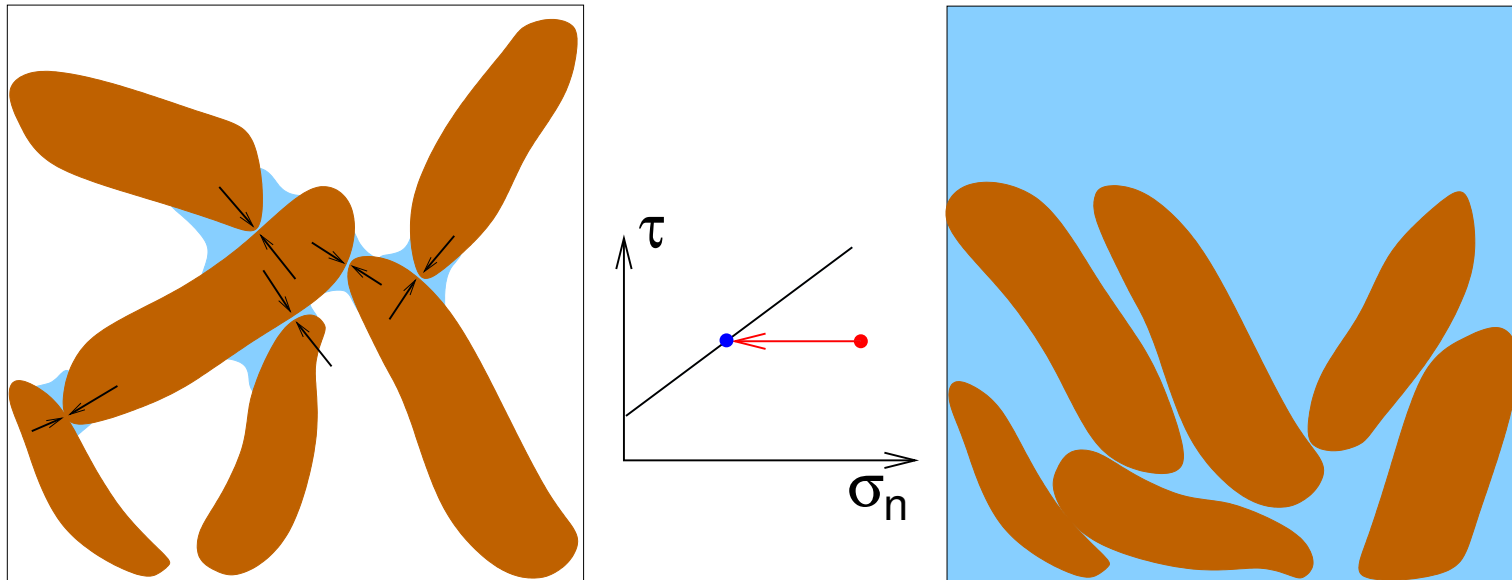
Obdobný vliv jako změna p při konstantním sání má změna sání s při *konstantním* p :



Můžeme tedy definovat *”překonsolidační”* sání s_0 a směrnice λ_s a κ_s .

Mechanické chování nenasycených zemin

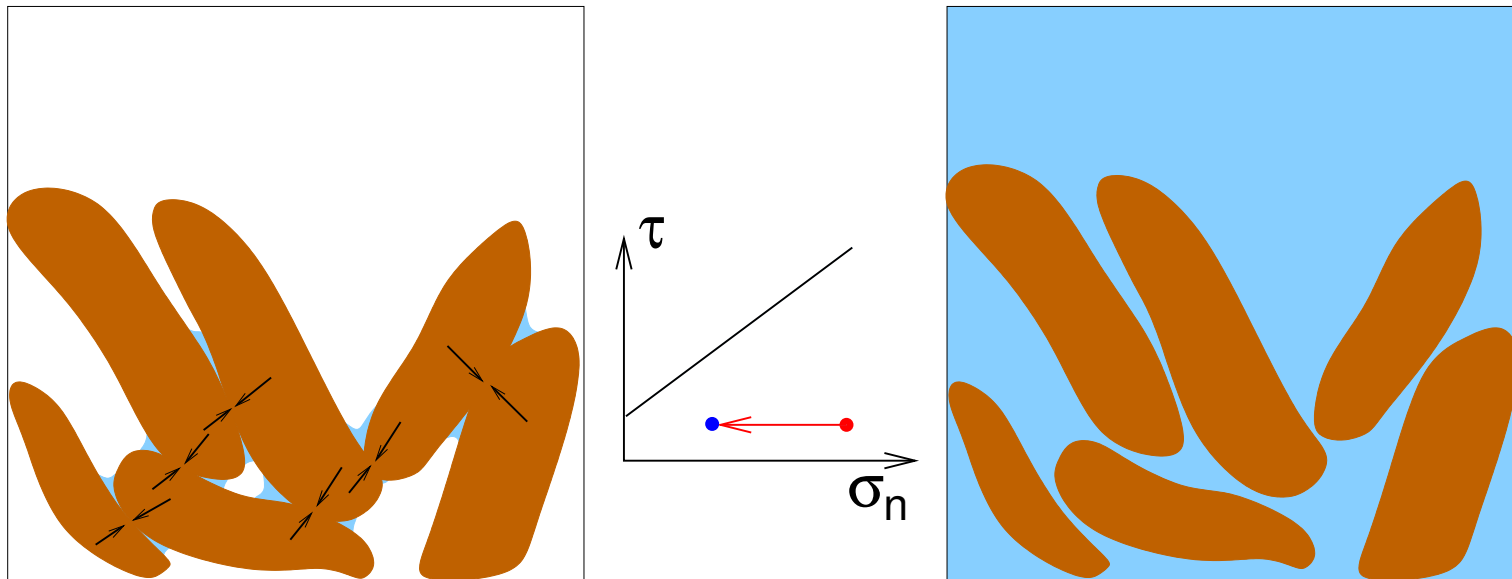
Pokud nenasycenou zeminu, která má *otevřenou* strukturu, saturujeme (tj. snížíme sání s), dojde ke **kolapsu struktury** (náhlému snížení čísla pórovitosti).



Zrušení kapilárních menisků a normálových sil na kontaktech má za následek "usmyknutí kontaktů" a kolaps struktury.

Mechanické chování nenasycených zemin

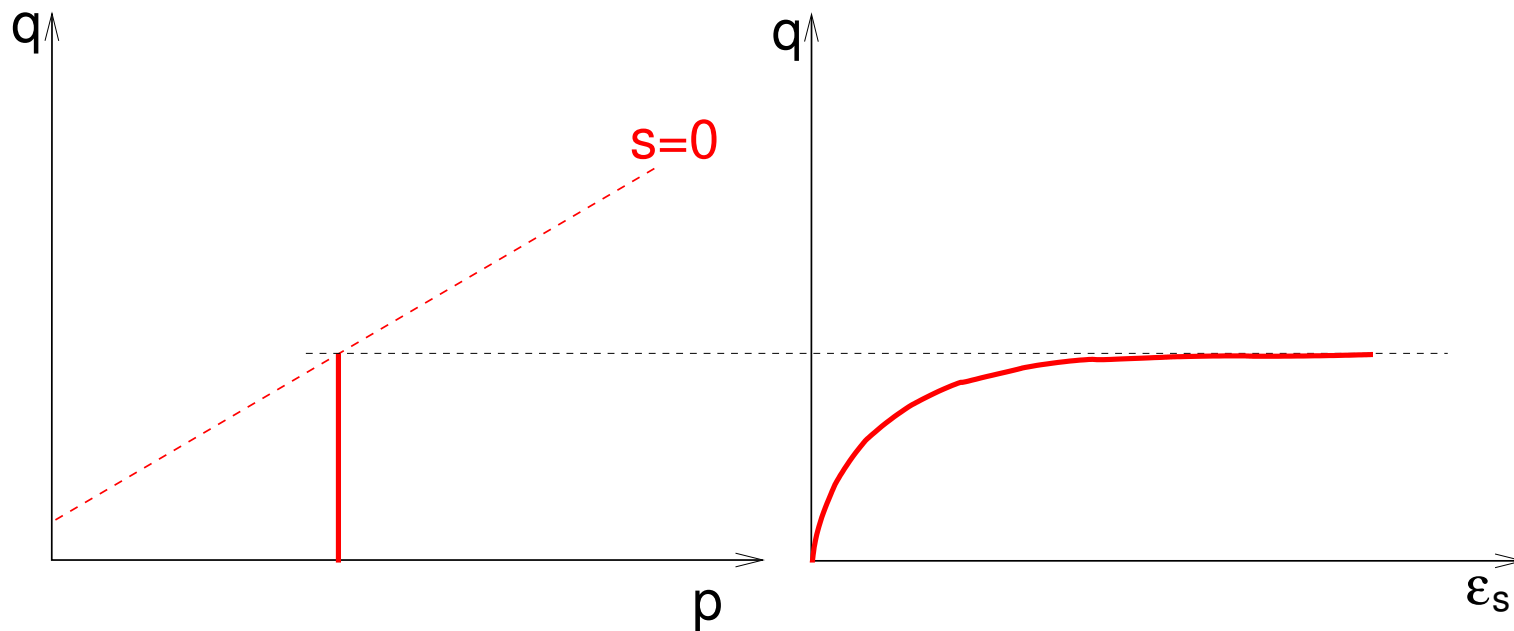
Na druhou stranu pokud saturujeme nenasycenou zeminu s *uzavřenou* strukturou, dojde ke **bobtnání** (zvýšení čísla pórovitosti).



Snížení normálových sil na kontaktech totiž nevede k jejich "usmyknutí" (díky nízkému τ), ale k *elastickému odlehčení* vrstvy na kontaktu zrn.

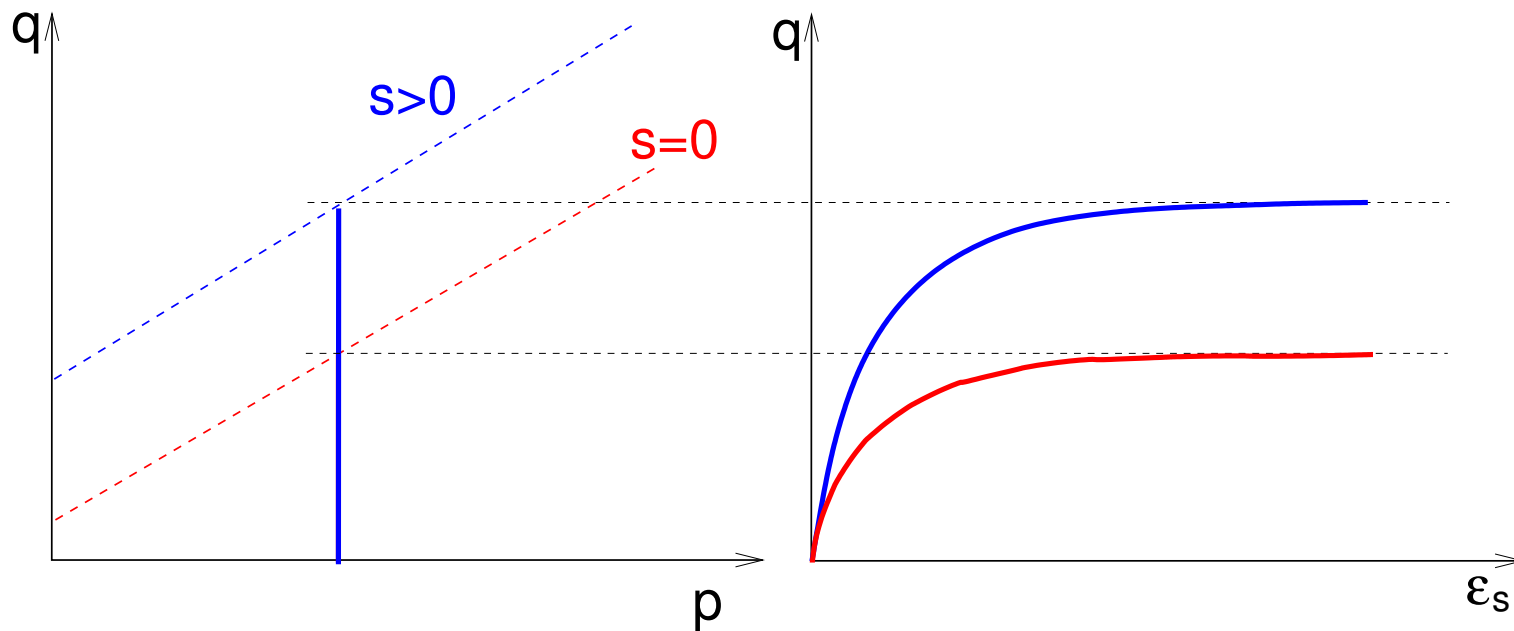
Mechanické chování nenasycených zemin

Vyšší sání vede ke zvýšení smykové pevnosti materiálu, jež lze interpretovat zvýšením soudržnosti c při konstantním úhlu vnitřního tření φ_c



Mechanické chování nenasycených zemin

Vyšší sání vede ke zvýšení smykové pevnosti materiálu, jež lze interpretovat zvýšením soudržnosti c při konstantním úhlu vnitřního tření φ_c



Konstituční modelování nenasycených zemin

Konstituční model pro nenasycené zeminy by měl predikovat všechny zmiňované aspekty chování nenasycených zemin.

První model, jež to umožnil, byl vyvinutý v *Barceloně* na konci osmdesátých let minulého století (*Alonso et al., 1990*). V dnešní době je znám pod označením *Barcelona basic model (BBM)*.

Tvoří mezník v modelování nenasycených zemin, stejně jako model *Cam jílů* byl mezníkem v modelování zemin nasycených.

Barcelona basic model

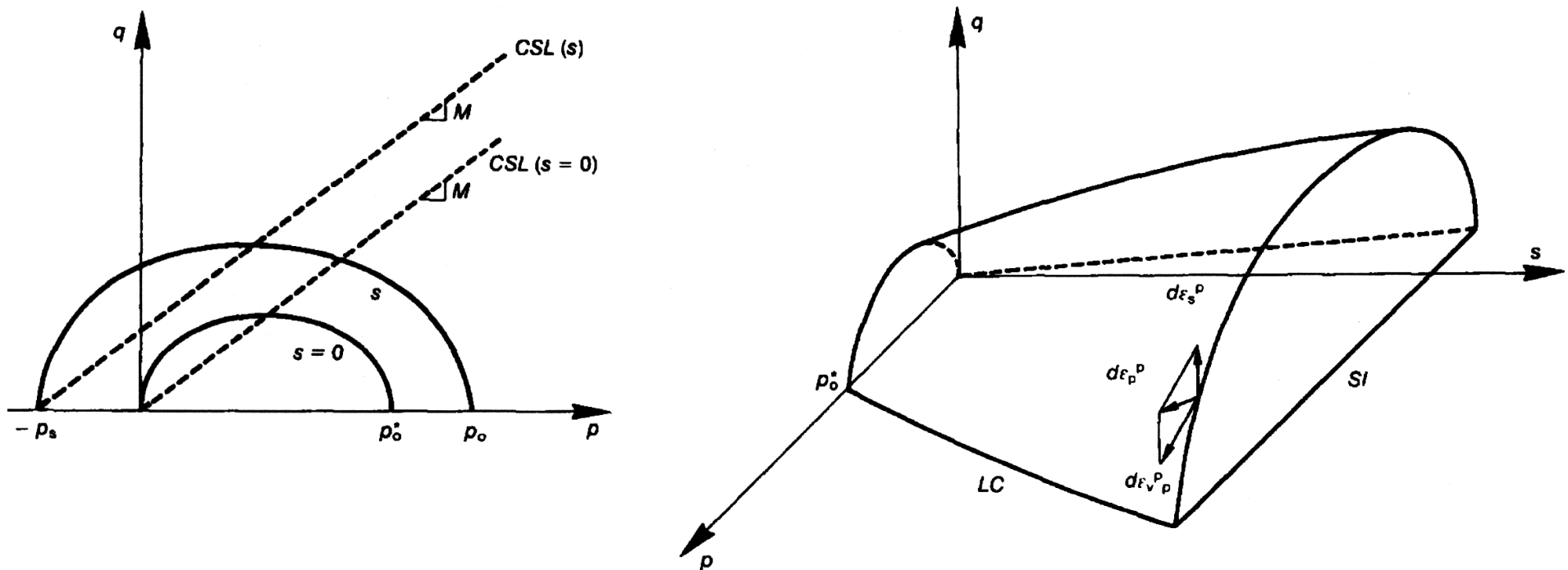
Pro popis napjatosti využívá *net stress* σ a *sání* s

Vychází z modelu *Cam jílu*, tj. pro nasycený stav (nulová sání $s = 0$) se jsou jeho předpovědi shodné s modelem *Cam jílu*.

Jedná se o model plasticity se zpevněním, je zde možno sledovat jistou podobnost s modely pro strukturované zeminy. *Sání* s je stavová proměnná, jako další stavovou proměnnou je nutné zavést "překonsolidační" sání s_0 .

Barcelona basic model

Plocha plasticity má pro *dané číslo pórovitosti* e následující tvar:



Z čehož je zřejmé, že pro vyšší sání model predikuje *vyšší pevnost* při konstantním φ_c a *vyšší překonsolidační napětí*. Také je zřejmé začlenění *”překonsolidačního” sání* s_0 .

Barcelona basic model

Zavedením závislosti λ na s modelujeme tužší odezvu zeminy pro vyšší sání.

Příslušná podmínka zpevnění pro *”překonsolidační”* sání s_0 a modifikace chování modelu v elastické oblasti umožní zavedení parametrů λ_s a κ_s a modelování objemových změn při změně s a konstantním p .

Z uvedených charakteristik mechanického chování nenasycených zemin nám zbývá vysvětlit jako model predikuje *kolaps* či *bobtnání* při snížení se sání.

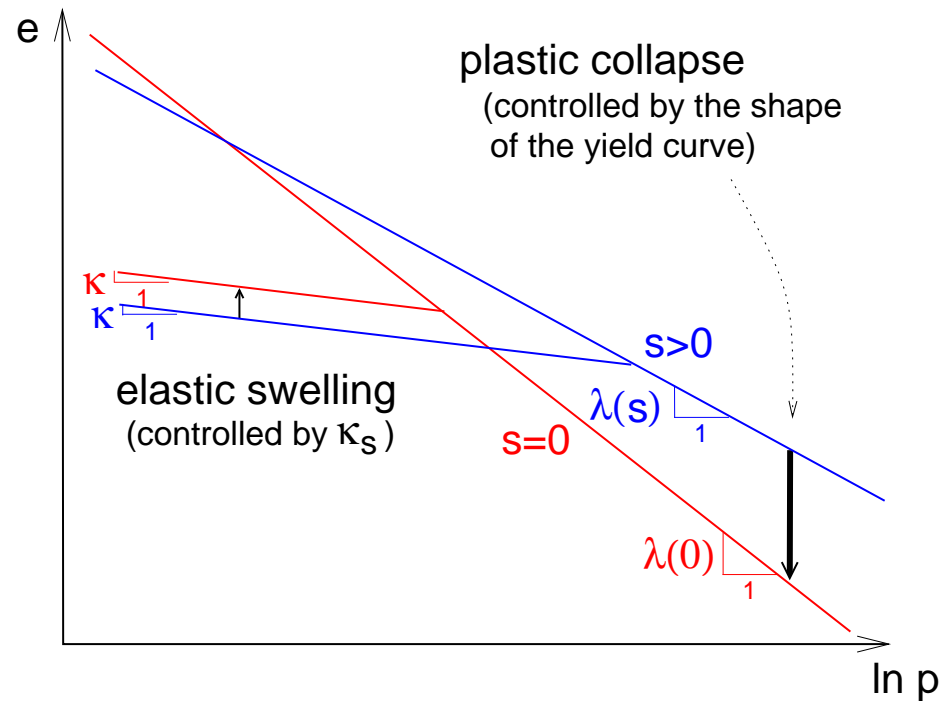
Barcelona basic model

Říkali jsme, že *kolaps* nastane, pokud má zemina *otevřenou strukturu*. Naopak k *bobtnání* dojde u *hutné* zeminy.

Jak vyplývá ze základů mechaniky zemin, *otevřenou strukturu* má zemina v normálně konsolidovaném stavu. Naopak *hutná* je zemina překonsolidovaná.

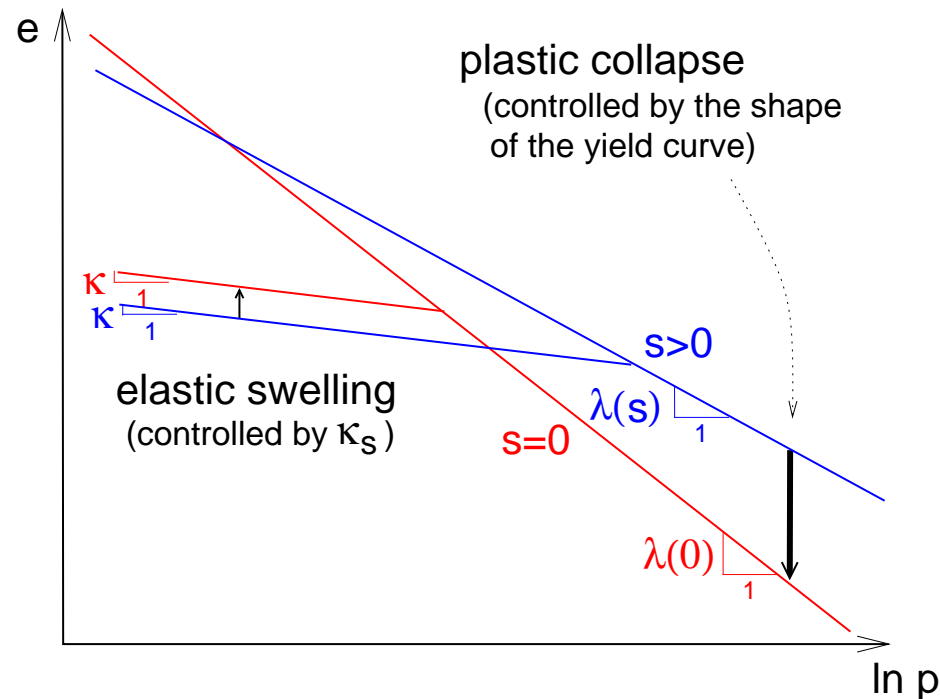
K vysvětlení předpovědi obou fenoménů pak postačuje jediný graf \Rightarrow

Barcelona basic model



- Stav překonsolidovaného (hutného) vzorku je uvnitř plochy plasticity, dojde tedy k elastickému odlehčení, viz. \leftarrow .

Barcelona basic model



- Stav překonsolidovaného (hutného) vzorku je uvnitř plochy plasticity, dojde tedy k elastickému odlehčení, viz. \leftarrow .
- Stav normálně konsolidovaného (kyprého) vzorku je na ploše plasticity. Díky tvaru plochy plasticity tedy musí dojít ke kolapsu, viz. \uparrow .