

Definice vstupních dat a indikátorů bezpečnostních funkcí EDZ

RB and coworkers

January 17, 2021

Contents

1	Úvod	1
2	Mechanické vlivy a poškození hornin	2
2.1	Modely pro výpočet mechanického porušení hornin	4
2.2	Mechanické chování a modelování poruch a trhlin	6
2.3	Úlohy pro výpočet porušení v okolí tunelu, segmentace EDZ	6
2.4	Kalibrace modelů a inverzní úlohy	7
3	Proudění	7
3.1	Modely proudění	7
3.2	Inverzní úlohy s apriori zadanými zónami různé vodivosti	8
4	Hydromechanika	8
4.1	Inverzní úlohy hydromechaniky	8
5	Stochastické přístupy, Bayesovská inverze	9
6	Shrnutí, poznámky, plány výzkumu a využití získaných poznatků	10

1 Úvod

Oblast porušení horninového masivu v okolí podzemních děl, známá jako Excavation damaged zone (EDZ)¹, je považována za důležitou součást návrhů hlubinného uložistě vyhořelého jaderného paliva. Důvodem je možnost vytvoření cesty, která má větší hydraulickou vodivost ve srovnání s okolním horninovým prostředím a může tak oslabit izolační schopnost horninové bariéry proti úniku škodlivých látek do biosféry. Důležitost EDZ je všeobecně akceptována [1], a existuje řada experimentálních i teoretických prací, které se snaží o charakterizaci EDZ z hlediska mechanického poškození a návazných hydraulických vlastností².

¹reference

²reference

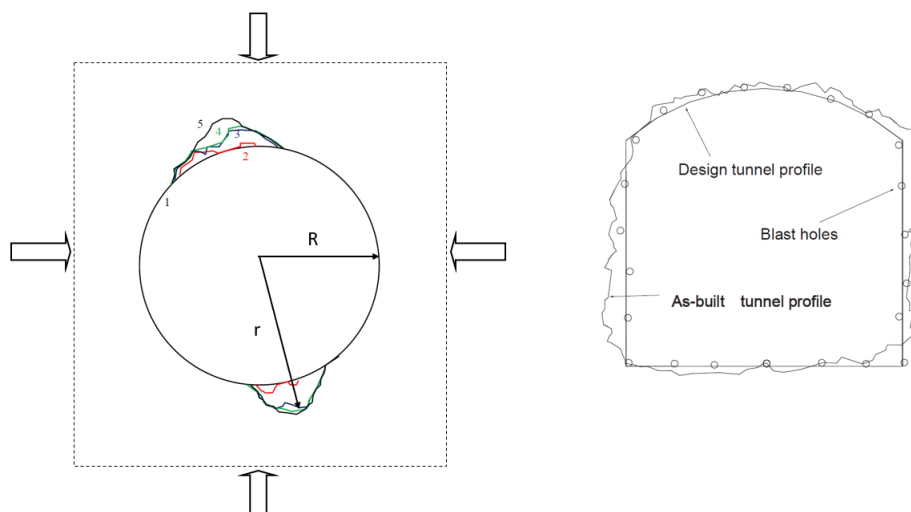


Figure 1: Řez kolmo na osu tunelu. Vlevo: tunel kruhového průřezu s poškozením. Vpravo: Tunel s průřezem tvaru U (ideální průřez a výsledek výrubu odstřelem).

Pro hlubší poznání EDZ se v projektu TAČR ENDORSE zaměříme na matematické modelování s využitím experimentálních měření pro získání vlastností EDZ a vstupních parametrů pro následné matematické modely. Matematické modely pak umožňují simulaci probíhajících procesů, posouzení scénářů šíření kontaminantů i odhad citlivosti simulací na různé parametry a následně tak i optimalizaci měření nebo monitoringu.

Tato zpráva je částečně rešeršní, ale především popisuje kroky, které lze použít pro specifikaci dalšího výzkumu v rámci projektu TAČR ENDORSE a vytvoření metodiky pro predikci indikátorů bezpečnosti EDZ na základě geofyzikálních měření a matematického modelování.

2 Mechanické vlivy a poškození hornin

Mechanické ovlivnění okolí podzemních děl je způsobeno:

- a) počátečním napětím v horninovém masívu,
- b) předpokládaným (ideálním) tvarem podzemního díla,
- c) materiálovými charakteristikami hornin a případných poruch horninového masívu,
- d) technikou ražby podzemního díla,

viz obr. 1. Lze také zahrnout vliv tlaku podzemní vody - hydromechanika, o které budeme uvažovat v další části zprávy. V analýze mechanického ovlivnění se především soustředíme na výše jmenované přirozené vlivy a), b), c), méně na techniku ražby tunelu (odstřelem nebo tunelovacím strojem), i když zcela bezprostřední okolí podzemního díla je jí významně ovlivněno. Tento vliv můžeme zahrnout při studiu hydraulické vodivosti, ale samotné ražbou způsobené ovlivnění hornin lze spíše postihnout pozorováním in-situ než modelováním.

Ad a)

V horninovém masívu s elastickým chováním a s Poissonovou konstantou ν , v hloubce h a s průměrnou

hustotou nadložních hornin ρ_{rock} a v případě, že na horniny nepůsobí jiné vlivy než váha hornin, je počáteční napětí σ_0 popsáno složkami $(\sigma_v, \sigma_h, \sigma_H)$ určenými vztahem

$$\sigma_v = h \rho_{rock} g, \quad \sigma_h = \sigma_H = \frac{\nu}{1 - \nu} \sigma_v, \quad (1)$$

přičemž g je gravitační konstanta, σ_v je vertikální napětí, σ_h a σ_H je minimální a maximální horizontální napětí. V daném případě jsou $(\sigma_v, \sigma_h, \sigma_H)$ hlavními napětími pro tenzor σ_0 . Pro hloubku 500 m a $\nu = 1/4$ uvedené vyjádření dává hodnoty

$$\sigma_v = 13.5, \sigma_h = \sigma_H = 4.05 [MPa].$$

Jak odlišná mohou být skutečná přirozená napětí ukazuje měření, viz např. napětí měřené v hloubce 420 m v Underground Research Laboratory (URL) blízko Lac du Bonnet, Manitoba, Kanada, které dosahuje hodnot

$$\sigma_v = 11, \sigma_h = 45, \sigma_H = 60 [MPa]$$

viz [19]. V tomto případě musíme počítat i se smykovými napětími. Počáteční napětí může být velmi proměnné i v rámci jedné lokality, zvláště pokud je navíc ovlivněna více podzemními díly, viz příklad laboratoře GRIMSEL ve Švýcarsku [2, 3, 6]. Pro studium EDZ je proto vhodné uvažovat výpočty pro různé hodnoty počátečního napětí.

Ad b)

Pro konstrukci hlubinného uložště vyhořelého jaderného paliva se uvažují různé geometrie (profily) přístupových a ukládacích tunelů, viz obr. 1. Oblasti poškození hornin pak závisí na profilu a také na orientaci tunelů vzhledem k působícímu počátečnímu napětí.

Ad c)

Pro výpočet poškození hornin je vhodné uvažovat hierarchii modelů [13], se zvětšující se složitostí a také různou potřebou vstupních parametrů:

- (i) elastický výpočet napětí a deformací a následně indikace, kde dochází k porušení materiálu podle vhodného pevnostního kritéria,
- (ii) výpočet napětí a deformací za předpokladu, že nemůže dojít ke stavům za mezí platnosti vhodného pevnostního kritéria (plastické modely). Lze uvažovat procesy s postupným zatěžováním a monotónní odezvou (deformační teorie plasticity) i modely se zatěžováním a odlehčováním a trvalými (plastickými) deformacemi,
- (iii) výpočet napětí a deformací za předpokladu, že nemůže dojít ke stavům za mezí platnosti vhodného pevnostního kritéria a zároveň dochází k oslabení (porušování, damage) materiálu (modely spojitě mechaniky porušení, continuum damage mechanics). V případě samotné damage mechanics se neuvažují nevratné deformace.

U modelů (i) a (ii) máme většinou řadu informací o existenci a jednoznačnosti řešení, o stabilitě, tedy spojitě závislosti řešení na vstupních datech, o chybě vznikající při diskretizaci úloh a pod. Složitější je porozumění modelům continuum damage mechanics (CDM), pro které existuje závislost diskretizovaných modelů na síti, nejednoznačnost řešení apod. Proto jsou navrženy CDM modely s regularizací nebo s nelokální definicí deformací a napětí.

- (iv) V praxi existuje řada kombinací výše uvedených modelů. Jednak lze uvažovat kombinaci plasticity a damage mechanics, která uvažuje jak oslabení, tak i trvalé deformace. Existuje však také mnoho ad-hoc přístupů, které uvažují postupné oslabování materiálových konstant, viz např. [18, 5].

Každý typ modelu vyžaduje specifické parametry a našim cílem bude jak popsat model, tak následně uvažovat citlivost na změny jednotlivých parametrů i možnost, jak parametry určit. Standardním způsobem určení parametrů jsou laboratorní zkoušky **se vzorky hornin. Ty jsou ale rozměrově odlišné a více intaktní narozdíl od horninového masívu.** Vítaná je tedy možnost získání parametrů pomocí inverzních úloh a in situ měření.

2.1 Modely pro výpočet mechanického porušení hornin

Základním modelem pro výpočet napětí a deformací je lineární elasticita s tenzorem malých deformací a Cauchyovým tenzorem napětí, která je popsána trojicí posunutí u , deformace ε a napětí σ a vzájemnými vztahy, které platí ve výpočetní oblasti Ω :

$$\begin{aligned} -\operatorname{div}(\sigma) &= f \quad \text{v } \Omega, \\ \sigma &= C : \varepsilon \quad \text{v } \Omega, \\ \varepsilon(u) &= (\nabla u + (\nabla u)^\top)/2 \quad \text{v } \Omega. \end{aligned}$$

Výše, f vyjadřuje objemové síly (hustotu) a C je elastický tenzor pružnosti. Dále na hranici $\partial\Omega$ musíme zadat vhodné okrajové podmínky. V uvedené formulaci jsou kompresní deformace a normálová napětí v tlaku záporná (**běžná mechanická znaménková konvence**). Pro popis pevnostních veličin se ale v geotechnice užívá opačná konvence, kdy normálová napětí v tlaku jsou kladná. Potom budeme uvažovat hlavní napětí $\sigma_3 \leq \sigma_2 \leq \sigma_1$, kde σ_1 je **největší hlavní napětí, které je obvykle kladné v tlaku**.

Poznamenejme ještě, že počáteční napětí σ_0 , které může být určeno měřením **nebo výpočtem pomocí inverzní analýzy (viz zaslaný článek od J. Malíka)**, může být zavedeno do konstitučního vztahu následovně: $\sigma = C : \varepsilon + \sigma_0$ v Ω . Obdobně může být do konstitučního vztahu zaveden pórový tlak podzemní vody.

Ad (i):

Pevnostní kritéria vychází z vypočteného napětí, případně deformace. Přípustné stavy je možné popsat nerovnostmi

$$F_s = F_s(\sigma, \varepsilon) \leq 0.$$

Kritérii často používanými v mechanice hornin jsou Mohrovo-Coulombovo a Hoekovo-Brownovo kritérium, viz např. [7, 8, 10] a Brady, Brown 2006 [4]. Tyto kritéria nyní popíšeme za předpokladu isotropní horniny.

- Mohrovo-Coulombovo kritérium

$$F(\sigma, x) = |\tau| - (c + \sigma_n \operatorname{tg}(\phi)),$$

kde τ a σ_n je smykové a normálové napětí působící na libovolnou plochu procházející bodem x , c je koheze a ϕ je úhel vnitřního tření.

- Mohrovo-Coulombovo kritérium lze také vyjádřit pomocí hlavních napětí. Kritické napětí se týká plochy, která je rovnoběžná se směrem prostředního hlavního napětí. Pokud její polohu vyjádříme úhlem β mezi normálou a směrem σ_1 , potom na ni budou působit napětí

$$\sigma_n = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\beta, \quad \tau = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\beta.$$

Kritický poměr pak nastane pro $\beta = \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}$. Pro tento úhel dostaneme

$$F(\sigma, x) = (\sigma_1 - \sigma_3) - \frac{2c \cos \phi}{1 - \sin \phi} - \frac{2 \sin \phi}{1 - \sin \phi} \sigma_3.$$

Kritérium lze také vyjádřit vztahem

$$F(\sigma, x) = (\sigma_1 - \sigma_3) - (q_{cmass} + A\sigma_3) \leq 0$$

kde q_{cmass} je jednoosá pevnost v tlaku (UCS) pro masiv, $q_{cmass} = 2c \cos \phi / (1 - \sin \phi)$ a $A = 2 \sin \phi / (1 - \sin \phi)$. UCS lze interpretovat jako Uniaxial Compressive Strength (značí se obvykle σ_c), nebo Unconfined Compressive Strength (q_c). Lze také využít pevnost v tahu (tensile strength σ_t),

$$q_{cmass} = \sigma_c = \frac{2c \cos \phi}{1 - \sin \phi}, \quad \sigma_t = \frac{2c \cos \phi}{1 + \sin \phi}.$$

Další možností je vyjádření kritéria ne pomocí hlavních napětí, ale pomocí invariantů napětí. Viz např. (Desai, Siriwardane [7]).

- Mohrovo-Coulombovo kritérium bývá také doplněno podmínkou žádného či částečného nepřípuštění tahových napětí, tension cut-off.
- Hoekovo-Brownovo kritérium je možno považovat za zobecnění Mohrova-Coulombova kritéria. Toto zobecnění bylo určeno empiricky a zohledňuje kvalitu hornin s uvažováním jednoosé pevnosti v tlaku (UCS) pro neporušenou horninu q_c na jedné straně, ale parametry charakterizující kvalitu (porušenost) hornin, na straně druhé. Kritérium má tvar

$$F(\sigma, x) = (\sigma_1 - \sigma_3) - q_c \left[m_b \frac{\sigma_3}{q_c} + s \right]^a,$$

kde q_c jednoosá pevnost v tlaku neporušených kusů horniny, m_b je nelineární parametr závisující na typu horniny, a je parametr rozpukání horniny.

Ad (ii):

Perfektně plastický model je ve tvaru

rozklad tenzoru deformace	$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p$
Cauchyho napětí	$\sigma = C : \varepsilon^e$
plastické kritérium	$f_p(\sigma) \leq 0$
plastický potenciál	g_p , pro asociovanou plasticitu platí $\partial g_p / \partial \sigma = \partial f_p / \partial \sigma$
plastické tečení	$\dot{\varepsilon}^p = \dot{\gamma}(\partial g_p / \partial \sigma), \dot{\gamma} \geq 0$,
podmínka duality	$\dot{\gamma} f_p = 0$

- V případě Mohrovy-Coulombovy plasticity máme

$$\begin{aligned} f_p(\sigma) &= \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) \sin \phi - c \cos \phi, \\ g_p(\sigma) &= \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) \sin \psi, \end{aligned}$$

kde ψ úhel dilatace (dilation angle), viz [9]. Poznamenejme, že pro $\phi = \psi$ platí $\partial g_p / \partial \sigma = \partial f_p / \partial \sigma$, a tedy se jedná o asociovaný model. Dále, plastické kritérium $f_p(\sigma) \leq 0$ je ekvivalentní s výše uvedeným kritériem, což odvodíme přenásobením funkce $F(\sigma, x) = (\sigma_1 - \sigma_3) - \frac{2c \cos \phi}{1 - \sin \phi} - \frac{2 \sin \phi}{1 - \sin \phi} \sigma_3$ výrazem $\frac{1}{2}(1 - \sin \phi)$.

- Místo Mohrovy-Coulombovy plasticity lze také použít Druckerův-Pragerův model, jehož popis i vztah k parametrům Mohrovy-Coulombovy plasticity lze najít v [9].
- Plasticita, vycházející z Hoekova-Brownova kritéria je málo obvyklá, ale možná. Viz např. [5].

Ad (iii), (iv) Samotné modely plasticity neuvažují oslabení materiálu při křehkém porušení. K tomu účelu můžeme zavést parametr oslabení (damage parametr) $\omega \in [0, 1]$, kde $\omega = 1$ odpovídá neporušenému materiálu a $\omega = 0$ znamená zcela porušený materiál. Nejjednodušší kombinace elasticity a porušení by potom využívala vztahy

zobecněný Hookeův zákon	$\sigma = (1 - \omega)C : \varepsilon$
vývoj porušení	$\omega = g(\kappa), \dot{\kappa} \geq 0, \kappa(0) = \bar{\varepsilon}_0$
funkce porušení	$f_d(\varepsilon, \kappa) = \bar{\varepsilon}(\varepsilon) - \kappa$
podmínka přípustnosti	$f_d(\varepsilon, \kappa) \leq 0$
podmínku duality	$\dot{\kappa} f_d = 0$

Výše $\bar{\varepsilon}(\varepsilon)$ představuje ekvivalentní tahovou deformaci (Mazars)

$$\bar{\varepsilon}(\varepsilon) = (\langle \varepsilon_1 \rangle^2 + \langle \varepsilon_2 \rangle^2 + \langle \varepsilon_3 \rangle^2)^{1/2},$$

kde $\langle \varepsilon_i \rangle$ značí absolutní hodnotu tahových hlavních deformací, deformace v tlaku se neuvažují. Všimněme si souvislosti s pevnostními kritérii využívajícími deformace, přehled lze nalézt v (Kwasniewski, Takahashi 2010). Parametr porušení se vyvíjí v závislosti na zavedené ekvivalentní tahové deformaci. Funkci g můžeme volit exponenciálně s adaptací na diskretizační parametr.

Modelování porušení (Continuum Damage Mechanics) je poměrně složité, viz např. (Lemaitre 1992), (Souza Neto, Peric, Owen 2008). Proto pouze zmíníme některé složitější podrobnosti:

- porušení nemusí být isotropní a může být také odlišné pro namáhání v tlaku a tahu,
- v reálných případech se při porušení objevují trvalé deformace, takže použijeme opět dělení deformací $\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p$, $\bar{\sigma} = C : \varepsilon^e$, $\sigma = (1 - \omega)\bar{\sigma} = C : \varepsilon^e$. Navíc propojíme růst poškození s přírůstkem plastické deformace, $\dot{\kappa} = \|\dot{\varepsilon}^p\|^2 = \dot{\varepsilon}^p : \dot{\varepsilon}^p$.
- modely poškození je nutné stabilizovat pro zamezení závislosti na diskretizaci.

2.2 Mechanické chování a modelování poruch a trhlin

2.3 Úlohy pro výpočet porušení v okolí tunelu, segmentace EDZ

Bez uvažování podstatné heterogenity nebo poruchy podél liniového podzemního díla, můžeme uvažovat nulovou deformaci ve směru osy díla (tunelu) a tudíž řešení 2D úlohy s geometrií odpovídající řezu kolmo na osu. Můžeme uvažovat kruhový nebo obecný profil (viz Obr. 1). Okrajové a počáteční podmínky

- počáteční napětí v dané oblasti,
- nulové (normálové) posuny na vnější hranici,
- nulové napětí na vnitřní hranici (obvodu tunelu).

V případě, že počáteční napětí v dané oblasti zjistíme výpočtem podle obr.2, můžeme počítat napětí a deformace řešením úloh podle obr.3.

Následně zjistíme zóny porušení jedním z výše uvedených postupů (i)-(iv). Tedy jako zóny s překročením pevnostního kritéria při postupu (i), zóny plastických deformací při postupu (ii) nebo zóny s porušením při postupu (iii) nebo (iv). Zóny porušení můžeme dále segmentovat na zóny různého stupně porušení.

Příklad uvedeného postupu lze nalézt v (Perras, Diedrichs [18]) nebo v (Blaheta a dal. [13]). V [18] jde o kval ... ???

Vstupní parametry úloh jsou určeny s určitým stupněm nejistoty a proto je potřeba vyjasnit citlivost řešení (výstupů) na jednotlivé parametry a provést zpřesnění důležitých parametrů pomocí měřených dat. Měřená data mohou být určeny stupně a hloubky porušení pomocí seismické a odporové tomografie, nebo pomocí video karotáže ve vrtech směřujících vně zkoumaného podzemního díla. Dalším typem měření mohou být konvergence, tedy změny vzájemných vzdáleností zvolených bodů.

Řešené úlohy mohou uvažovat časový faktor jako je reologie hornin a speciálně reakce při postupu ražby tunelů. V tomto případě 3D nebo 2D s ...³. ???

³Rešerše

2.4 Kalibrace modelů a inverzní úlohy

3 Proudění

Mechanické porušení hornin v okolí podzemních chodeb vede ke změně hydraulické vodivosti, a to v rozsahu až několika řádů. Změnu vodivosti můžeme lokálně měřit pomocí hydraulických testů, ale další informaci nám mohou poskytnout matematické modely. Proudění je určeno řadou vlivů:

- skutečnosti, zda uvažujeme plně saturované prostředí (situace před a po určitou dobu po vyražení podzemního díla a dlouhodobá situace po utěsnění a resaturaci) nebo zda uvažujeme jen částečně saturované prostředí,
- velikost počátečního pórového tlaku vody (kapaliny),
- hydraulická vodivost neporušené horniny a případně existujících trhlin,
- velikost zón určitého stupně porušení.

Počáteční pórový tlak lze odhadnout obdobně jako vertikální počáteční napětí vahou kapaliny, tedy $p_w = h\rho_w g$, kde ... Skutečný tlak se ale může od uvedeného odhadu lišit.

3.1 Modely proudění

V případě proudění v saturovaném horninovém prostředí (neporušený horninový masiv, masiv s otevřeným tunelem po určitou dobu od vytvoření tunelu, stav uzavřeného úložiště) použijeme k simulaci proudění Darcyho model, tedy

$$\operatorname{div}(v) = Q, \quad v = -K\nabla p_w \quad \text{v } \Omega, \quad (2)$$

případně

$$c_s \frac{\partial p}{\partial t} = \operatorname{div}(K\nabla p_w) + Q, \quad \text{v } \Omega \times (0, t_{\max}), \quad (3)$$

kde K je tenzor hydraulické vodivosti, v isotropním případě $K = \kappa I$, c_s je storativita, Q je zdrojový člen.

Pro ustálený stav (2) musíme zadat okrajové podmínky na hranici $\partial\Omega$, pro neustálený stav musíme navíc zadat počáteční podmínku $u(x, 0) = u_0(x)$ pro $x \in \Omega$.

V případě proudění v částečně saturovaném prostředí můžeme proudění popsat Richardsovou rovnicí, její tvar je obdobný, ale rovnice

$$c_m(p) \frac{\partial p}{\partial t} = \operatorname{div}(k_r(p)K\nabla p_w) + Q, \quad \text{v } \Omega \times (0, t_{\max}), \quad (4)$$

obsahuje dva nelineární členy, které závisí na tlaku p . Ten je v případě prostředí s částečnou saturací záporný a souvisí se saturací prostřednictvím empiricky dané retenční křivky. Člen $c_m(p)$ je odvozen z retenční křivky, člen $k_r(p)$ s hodnotami mezi 0 a 1 je relativní permeabilita, která je rovna 1 v případě plné saturace.

Uvedené modely popisují spojitě prostředí s možnou heterogenitou, kdy především koeficient vodivosti $k = k(x)$ je různý v různých částech oblasti Ω [SS: Asi spíš κ místo k]. Popsanými modely lze tedy popisovat proudění v prostředí se zónami porušení vzniklými ražbou nebo existujícími už v ražbou neovlivněném stavu. V případě prostředí s trhlínami lze použít modely kombinující proudění v oblastech různé dimenze, viz ...⁴.

⁴reference

3.2 Inverzní úlohy s apriori zadanými zónami různé vodivosti

Hydraulická vodivost se v zájmové oblasti může měnit, a to v závislosti na deformaci (napětí) a v závislosti na porušení horniny. Uvažujme nejdříve proudění ovlivněné porušením horniny a nikoliv změnou napětí. Potom nejmenší vodivost přiřadíme neporušenému horninovému masivu (neporušená hornina plus homogenizované poruchy), další zónám různého stupně porušení, tedy jednotlivým částem EDZ. Přitom můžeme EDZ segmentovat na řadu částí (zón), nejen na obvyklé EDZ, HDZ (highly damaged zone), CDZ (construction damaged zone), viz např. (Perraz, Diederichs [18]). Výsledkem je dělení oblasti na disjunktní části, $\Omega = \Omega_1 \cup \dots \cup \Omega_m$, kde $k = k_i$ je konstantní v Ω_i .

Inverzní úlohy uvedeného typu byly studovány v (Haslinger a dal. [17]), (Blaheta a dal. [15]). V uvedených referencích byly uvažovány měření průměrného vtoku/výtoku přes části hranice i měření odpovídající tlakovým zkouškám. Je otázkou, jaká měření můžeme realizovat a použít pro určení vodivosti k_i v případě analýzy vodivosti EDZ. Možnosti jsou průměrné toky přes části stěny tunelu, pórové tlaky na stěně tunelu i měření ve vrtech, to vše při proudění daném přirozeným pórovým tlakem nebo při realizaci tlakové zkoušky s injektáží vody.

Inverzní úloha potom spočívá v hledání minima cenové funkce F , která je daná normou rozdílu mezi měřeními veličinami (vektor $\mu \in R^m$) a odpovídajícími výstupy Sp , které jsou odvozeny z řešení $p = \mathcal{M}(k)$ modelu proudění \mathcal{M} (viz část 3.1) s hydraulickými vodivostmi reprezentovanými složkami vektoru $k \in R^s$,

$$F(k) = \frac{1}{2} \|S\mathcal{M}(k) - \mu\|^2$$

V (Blaheta a dal. [15]) je ukázáno, že ve standardní situaci s nepřesným měřením nebo relativně přesným měřením, ale nepřesnostmi v samotném popisu úlohy, může být řešení inverzní úlohy zatíženo velkou chybou. V takovém případě je nutná regularizace cenové funkce, jejíž volba se většinou řídí ad hoc postupy a není jednoduchá. Proto je zajímavé, i když výpočetně náročné, použití techniky bayesovské inverze, viz např. (Blaheta a dal. [15, 16]).

Paolo Fabbri, Mirta Ortombina and Leonardo Piccinini

Estimation of Hydraulic Conductivity Using the Slug Test Method in a Shallow Aquifer in the Venetian Plain (NE, Italy) Permeability or hydraulic conductivity (K) is an essential parameter to understanding the movement of groundwater and pollution. The slug test is a fast and inexpensive technique for the determination of this fundamental value.

Měření stoupání hladiny ve studni

4 Hydromechanika

V případě situace, která neuvažuje zvláště vybrané poruchy nebo trhliny lze využít klasický Biotův model. Podstatný vliv ale také může mít závislost hydraulické propustnosti na deformaci masivu. V případě modelů s trhlínami, je podstatná závislost hydraulické propustnosti na rozevření trhlín.

[16, 36, 35, 37, 38]

4.1 Inverzní úlohy hydromechaniky

V článku ... ???

$$\kappa = \kappa_i \exp(\beta e_d),$$

kde κ_i je permeabilita neporušeného masivu, β je konstanta, kterou je potřeba určit experimentem nebo řešením inverzní úlohy, e_d je ekvivalentní deviatorická deformace,

$$e_d = \frac{2}{\sqrt{6}}[(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2]^{1/2},$$

kde $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ a ε_3 jsou hlavní deformace.

Proti původnímu stavu, pokud ten je nula

Permeabilita může také záviset na velikosti objemové deformace $e_v =$
kombinovaně

$$\kappa = [\kappa_i + \kappa_0 \exp(\beta_v e_v)] \exp(\beta_d e_d).$$

vztah permeabilita-deformace

Nejmenší čtverce

Bayes

5 Stochastické přístupy, Bayesovská inverze

[jen kopie existujícího textíku:] Při využití bayesovské techniky lze řešením inverzní úlohy získat nikoliv určité řešení, ale statistickou informaci o řešení, tedy o parametrech, které máme identifikovat. Taková formulace je přirozená a robustní, předpokládá se nepřesné měření s danou statistickou charakteristikou chyby měření a směřuje se k získání statistického popisu řešení inverzní úlohy. Cílem je tedy odhadnout rozdělení pravděpodobnosti vektoru, jehož složky jsou našem případě konstantní hydraulické vodivosti v daných podoblastech. Bayesovská inverze se zaměřuje na charakterizaci vodivosti $k \in U_{ad}$ reprezentované vektorem $k \in R^m$ nebo vektorem transformovaných hodnot $\lambda = \ln(k) \in R^m$, pro které $\mu = \mathcal{G}(\lambda) + \eta$, kde μ je vektor měření, \mathcal{G} je operátor pozorování, η je šum měření. Bayesovská inverze používá apriorní statistické informace o vektoru λ dané ve formě funkce hustoty (pdf) π_0 a statistické informace o šumu dané jeho společnou pdf π_η . Cílem je pak najít aposteriorní pdf $\pi(\lambda|\mu)$ vektoru λ (a odpovídající vodivosti k) s nejistými (náhodnými) materiálovými parametry. S ohledem na Bayesovu teorém $\pi(t|\mu) \propto \pi_\eta(\mu - G(t))\pi_0(t)$, kde \propto označuje proporcionalitu. Numerická realizace Bayesovské inverze používá vzorkování ze zadního rozdělení algoritmem Metropolis-Hastings. Pro snížení extrémně vysokých výpočetních nákladů používáme aproximaci \tilde{G} k G a zpožděný akceptační algoritmus Metropolis-Hastings [5]. Aproximace \tilde{G} je zajištěna stochastickou Galerkinovou metodou, viz [5, 6, 7].

A deeper insight into the inverse problem can be achieved by using the Bayesian inverse approach [4]. It assumes given statistical properties of the measurement error and does not attempt to get deterministic material characteristics, but attempts to obtain their statistical description, i.e. to estimate the joint probability distribution of a vector representing the piecewise constant hydraulic conductivity in our case. The Bayesian inverse aims at characterization of the conductivity $k \in U_{ad}$ represented by a vector $k \in R^m$ or vector of transformed values $t = \ln(k) \in R^m$ for which $\mu = G(t) + \eta$, where $\mu = (m_{ij})$ is the vector of measurements, G is the observation operator, $G(t) = (q_{ij}(k))$ provides the vector of computed fluxes, η is the measurement noise. The Bayesian inversion uses a prior statistical information about the vector t given in the form of the joint probability density function (pdf) π_0 and statistical information about the noise given by its joint pdf π_η . The aim is then to find the posterior pdf $\pi(t|\mu)$ of the vector t (and correspondingly k) with uncertain (random) material parameters. With respect to the Bayes theorem $\pi(t|\mu) \propto \pi_\eta(\mu - G(t))\pi_0(t)$, where \propto denotes the proportionality. Numerical realization of the Bayesian inversion use sampling from the posterior distribution by the Metropolis-Hastings algorithm. To reduce the extremely high computational cost we use approximation \tilde{G} to G and the delayed acceptance Metropolis-Hastings algorithm [5]. The approximation \tilde{G} is provided by the stochastic Galerkin method, see [5, 6, 7].

6 Shrnutí, poznámky, plány výzkumu a využití získaných poznatků

co fractures

komplexní úloha M-H-T, zde pukliny, i bentonitová výplň

References

- [1] R. Pusch, Geological Storage of Highly Radioactive Waste. Current Concepts and Plans for Radioactive Waste Disposal. Springer 2008
- [2] Krietsch, H., Gischig, V., Evans, K. et al. Stress Measurements for an In Situ Stimulation Experiment in Crystalline Rock: Integration of Induced Seismicity, Stress Relief and Hydraulic Methods. *Rock Mech Rock Eng* 52, 517-542 (2019). <https://doi.org/10.1007/s00603-018-1597-8>
- [3] Lubomír Staš, Josef Malík, Jan Franěk et al., Study of the stress conditions and internal anisotropy in an environment of granitic rocks. Institute of Geonics v.v.i., CAS Ostrava, Annual report Number 120/2017, December 2016
- [4] B.H.G. Brady and E.T. Brown, *Rock Mechanics for Underground Mining*. 3rd Edition, Springer, Dordrecht 2006
- [5] C. Carranza-Torres, C. Fairhurst, The elasto-plastic response of underground excavations in rock masses that satisfy the Hoek-Brown failure criterion. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Volume 36, Issue 6, 1999, Pages 777-809.
- [6] J. Rutqvist, A. Rejeb, M. Tijani, C.-F. Tsang, Analyses of coupled hydrological-mechanical effects during drilling of the FEBEX tunnel at GRIMSEL. In: *Coupled Thermo-Hydro-Mechanical-Chemical Processes in Geo-Systems Fundamentals, Modelling, Experiments and Applications* Edited by Ove Stephanson, Elsevier Geo-Engineering Book Series, Volume 2, (2004), pp. 131-136
- [7] C.S. Desai, H.J. Siriwardane, *Constitutive laws for engineering materials: With emphasis on geologic materials*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 1984
- [8] B. Singh, R. K. Goel, *Engineering Rock Mass Classification*. Butterworth-Heinemann, Elsevier Oxford 2011 pp. 171, 326
- [9] Eduardo de Souza Neto, Djordje Peric, David Owens, *Computational methods for plasticity: theory and applications*. John Wiley & Sons, Chichester 2008
- [10] A. Zang, O. Stephansson, *Stress Field of the Earth's Crust*. Springer Dordrecht 2010
- [11] Bukov
- [12] a
- [13] R. Blaheta et al., Analysis of Äspö Pillar Stability Experiment: Continuous thermo-mechanical model development and calibration. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 5 (2013) 124-135
- [14] R. Blaheta, *Numerical Methods in Elasto-Plasticity*, Peres Publishers, 1999
- [15] Radim Blaheta, Michal Béréš, Simona Domesová, Pengzhi Pan, A comparison of deterministic and Bayesian inverse with application in micromechanics. *Applications of Mathematics* vol. 63(2018), issue 6, pp. 665-686.

- [16] Radim Blaheta, Michal Béréš, Simona Domesová, D. Horák, Bayesian inversion for steady flow in fractured porous media with contact on fractures and hydro-mechanical coupling. *Computational Geosciences* (2020) 24:1911-1932
- [17] Jaroslav Haslinger, Radim Blaheta, Raino A. E. Mäkinen, Parameter identification for heterogeneous materials by optimal control approach with flux cost functionals. *Mathematics and Computers in Simulation*, on-line June 2020
- [18] Matthew A. Perras, Mark S. Diederichs, Predicting excavation damage zone depths in brittle rocks. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 8 (2016), 60-74
- [19] Jonny Rutqvist, Lennart Borgesson, Masakazu Chijimatsu, Jan Hernelind, Lanru Jing, Akira Kobayashi, Son Nguyen, Modeling of damage, permeability changes and pressure responses during excavation of the TSX tunnel in granitic rock at URL, Canada. *Environ Geol* (2009) 57:1263-1274.
- [20] Christoph Butscher, Steady-state groundwater inflow into a circular tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology* 32 (2012) 158-167
- [21] Hadi Farhadian, Arash Nikvar-Hassani, Water flow into tunnels in discontinuous rock: a short critical review of the analytical solution of the art. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* (2019) 78:3833-3849
- [22] John H. Black, Nicholas D. Woodman, John A. Barker, Groundwater flow into underground openings in fractured crystalline rocks: an interpretation based on long channels. *Hydrogeol J* (2017) 25:445-463
- [23] I. Skarydova, M. Hokr, Modelling of tunnel in ow with coupled 3D groundwater and 2D surface flow concept. *Hydropredict 2010 Proceedings*, Prague 2010
- [24] Milan Hokr, Ilona Škarydová, Dalibor Frydrych, Modelling of tunnel in- flow with combination of discrete fractures and continuum. *Computing and Visualization in Science*, volume 15, pages 21-28(2012)
- [25] In-Mo Lee, Seok-Woo Nam, Effect of tunnel advance rate on seepage forces acting on the underwater tunnel face. *Tunnelling and Underground Space Technology* 19 (2004) 273-281
- [26] Christoph Butscher, Steady-state groundwater inflow into a circular tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology* 32 (2012) 158-167
- [27] Hadi Farhadian, Arash Nikvar-Hassani, Water flow into tunnels in discontinuous rock: a short critical review of the analytical solution of the art. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* (2019) 78:3833-3849
- [28] John H. Black, Nicholas D. Woodman, John A. Barker, Groundwater flow into underground openings in fractured crystalline rocks: an interpretation based on long channels. *Hydrogeol J* (2017) 25:445-463
- [29] I. Skarydova, M. Hokr, Modelling of tunnel in ow with coupled 3D groundwater and 2D surface flow concept. *Hydropredict 2010 Proceedings*, Prague 2010
- [30] Milan Hokr, Ilona Škarydová, Dalibor Frydrych, Modelling of tunnel in- flow with combination of discrete fractures and continuum. *Computing and Visualization in Science*, volume 15, pages 21-28(2012)
- [31] In-Mo Lee, Seok-Woo Nam, Effect of tunnel advance rate on seepage forces acting on the underwater tunnel face. *Tunnelling and Underground Space Technology* 19 (2004) 273-281
- [32] Chungsik Yoo, Interaction between Tunneling and Groundwater. Numerical Investigation Using Three Dimensional Stress-Pore Pressure Coupled Analysis. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 131, No. 2, February 1, 2005, pp. 240-250

- [33] Yifeng Chen, Jiamin Hong, Shaolong Tang, Chuangbing Zhou, Characterization of transient ground-water flow through a high arch dam foundation during reservoir impounding. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 8 (2016) 462-471
- [34] M. Hokr, H. Shao, W. P. Gardner, A. Balvín, H. Kunz, Y. Wang & M. Vencel, Real-case benchmark for flow and tracer transport in the fractured rock. *Environmental Earth Sciences* volume 75, Article number: 1273 (2016)
- [35] R. Blaheta, M. Béréš, S. Domesová, J. Haslinger, D. Horák, Inverse problems for identification of the hydraulic conductivity of rocks, fractures and excavation damage zones (EDZ). *Sborník konference Geotechnika 2020, Beskydy Soláň, 10.-11.9. 2020 [TACR ENDORSE]*
- [36] R. Blaheta, M. Béréš, S. Domesová, Inverse problems for flow and hydromechanics in fractured geological media. *CouFrac 2020 Conference Proceedings, [EURAD]*
- [37] Simona Domesová, Michal Béréš and Radim Blaheta, Efficient implementation of the Bayesian inversion by MCMC with acceleration of posterior sampling using surrogate models. *Vyjde v IACMAG Proceedings, Springer 2020 (Proceeding) [TACR ENDORSE]*
- [38] Michal Béréš, Radim Blaheta, Simona Domesová, David Horák, Numerical methods for simulation of coupled hydro-mechanical processes in fractured porous media. *Vyjde v IACMAG Proceedings, Springer 2020 (Proceeding) [EURAD]*