GEOFYZIKÁLNÍ ÚSTAV
AKADEMIE VĚD ČESKÉ REPUBLIKY, v. v. i.

Posudek bakalářské práce studenta Přírodovědecké fakulty UK v Praze Jakuba Pokorného, „Možnosti hydraulického štěpení při využívání geotermální energie"

Předložená bakalářská práce se zabývá velmi aktuálním tématem – hydraulickým štěpením horniny v hlubokých vrtech pro účely zvýšení propustnosti geotermálního systému vznikem nových a propojením stávajících puklin. V práci jsou prezentovány základní fyzikální principy mechaniky kontinua a základů hydrauliky tekutin, a základní poznatky o hydraulickém štěpení pomocí přetlakové kapaliny. Závěrečná část práce je věnována geotermálnímu projektu Groß Schönebeck. Autor zde detailně popisuje jednotlivé stimulace a hydraulické cirkulační testy pro ocenění efektivity zvyšování puklinové propustnosti.

Hydraulické štěpení hornin je komplexní disciplína založená na propojení mechaniky hornin a hydrauliky kapalin. Jedná se o složitý fyzikální problém, který vyžaduje velmi dobré teoretické znalosti mechaniky kontinua a hydrodynamiky.

Předložená práce obsahuje základní aparát pro hlubší pochopení fyzikálních procesů probíhajících při hydraulickém štěpení hornin, případně pro modelování těchto procesů. Rozsah předložené práce je široký, fyzika teoretické části je náročná, velmi pravděpodobně přesahující rozsah látky přednášené v bakalářském studiu oboru Geotechnologie. Práce je velmi dobře strukturovaná, srozumitelně napsaná, řada pojmů, formulí a principů je dobře vysvětlena; za to si autor zaslouží pochvalu.

V práci je ale i řada nejasností a nepřesností. Některé z nich naznačují, že autor má v problematice mezery nebo že některé souvislosti ne dobře pochopil. Uvedu ty důležité:

1) Mělo by být explicitně uvedeno, že (a) indexy *i, j, k, l* použité ve vzorcích nebo rovnicích týkajících se mechaniky kontinua a hydrauliky nabývají hodnot *i, j, k, l* = 1,2,3**,** (b) pro zjednodušení zápisu vzorců a jejich přehlednost (např. zobecněný Hookův záklon) je zavedeno Einsteinovo sumační pravidlo. Pokud tato fakta nejsou uvedena, může docházet k chybné interpretaci příslušných formulí.

2) Nepochopil jsem vztah (1) pro transformaci tenzorů na str. 3, prosím o bližší vysvětlení.

3) Pro vysvětlení deformace kontinua je nutné grafické zobrazení, popis uvedený v kap. 2.2. je nedostatečný a částečně i nepřesný. Například tvrzení (str. 4): „Pod pojmem deformace si můžeme představit nejen změny vzájemných poloh hmotných bodů, které tvoří kontinuum, ale také translaci a rotaci takového tělesa jako celku" je zavádějící a tvrzení „Protože má bod *A* polohový vektor **r**, bude mít bod *B* polohový vektor roven **r+dr**, z čehož vyplývá, že se jeho posun bude značit dy_i a tedy tvar vektoru posunutí bude: $dy_i = dx_i + du_i(x_j)$" je chybné.

Pokud $\boldsymbol{u}(x_1,x_2,x_3)$ je vektor posunutí z bodu $A(x_1,x_2,x_3)$ do bodu $A'(y_1,y_2,y_3)$ vlivem deformační síly, tj. $y_i = x_i + u_i$, pak vektor posunutí infinitezimálně vzdáleného bodu $B(x_1 + dx_1, x_2 + dx_2, x_3 + dx_3)$ do bodu $B'(y_1+dy_1, y_2+dy_2, y_3+dy_3)$ bude **u+du.** Výraz $dy_i = dx_i + du_i(x_j)$ je totální diferenciál, kde $du_i(x_j) = \frac{\partial ui}{\partial xj} dx_j$. Z toho vyplývá, že souřadnice bodu B' jsou $y_i + dy_i = x_i + u_i + dx_i + \frac{\partial ui}{\partial xj} dx_j$.

Protože posunutí u_i nezávisí na poloze bodu *B* vzhledem k bodu *A* a je společné všem bodům uvažovaného okolí bodu *A*, popisuje translaci tělesa jako tuhého celku. Výraz $\frac{\partial ui}{\partial xj} dx_j$ však již na poloze bodů *A* a *B*, tj. na dx_i, závisí a charakterizuje tedy rotaci tělesa jako tuhého celku a jeho vlastní deformaci. Z výše uvedeného je evidentní, že $dy_i - dx_i = \frac{\partial ui}{\partial xj} dx_j$; odtud plyne, že $\frac{\partial ui}{\partial xj} dx_j$ představuje přírůstky složek původního vektoru ***dx*** a že tyto přírůstky v sobě musí zahrnovat jak vlastní deformaci, tak i rotaci tělesa.

Pokud se chce J. Pokorný problematikou mechaniky kontinua dále zabývat, doporučuji mu skripta O. Novotného „Mechanika kontinua, postgraduální kurs zpracování geofyzikálních dat a číslicové seismiky, Matematicko-fyzikální fakulta University Karlovy v Praze, 1976“.

4) Síla působící na jednotkový objemový element, vzorec (8), je ve skutečnosti hustota síly f v kontinuu.

Zápis $F = \rho g$ není v pořádku rozměrově, F [$kgm^{-2}s^{-2}$] = [Nm^{-3}], což skutečně odpovídá hustotě síly. To platí i pro diferenciální rovnici (9), která by ve stávající formě měla absurdní řešení.

5) Tvrzení (str.9) „Operace divergence popisuje tok libovolného vektoru uzavřenou plochou vymezující určitý objem ΔV za jednotku času” je chybné. Divergence vektorového pole **a** popisuje tok vektoru **a** uzavřenou plochou $\boldsymbol{\Delta S}$ vztaženou na jednotkový objem v daném místě. Jinak řečeno, hodnota divergence v určitém bodě představuje výtok vektoru **a** z infinitezimálního objemu ΔV dělený tímto objemem, neboli výtok vektoru **a** z jednotkového objemu v daném bodě, viz vzorec (15).

6) Popis Mohr-Coulomb kritéria v kap. 2.8. Porušení horniny je nedostatečný. Chybí jakékoliv vysvětlení principu Mohrovy kružnice a jejích parametrů (souřadnice středu, poloměr, úhel θ). Prosím J. Pokorného alespoň o stručné vysvětlení při obhajobě.

7) Jsem překvapen tvrzením na str. 14 „..kde **dP** je změna tlaku a ρ hustota dané tekutiny. Tento vztah bude mít při omezení se na nestlačitelné kapaliny, kdy ρ=0, tvar: $\psi tlak = P/\rho$“. Kapalina s hustotou ρ=0 je fyzikální nonsens.

8) Pro správné pochopení Darcyho zákona podle vzorce (25) je důležité uvést orientaci souřadného systému. Lze vyvodit, že osa x_3 je vertikální, ale není vůbec jasné, který směr je kladný.

Výraz $(\frac{\partial x3}{\partial xj} + \frac{1}{\rho g}\frac{\partial P}{\partial xj})$ ve vzorci (25) je gradient hydraulické výšky a ne hydraulická výška vyjádřená obecně pomocí gradientu tak jak uvedeno na str. 15.

9) Na str. 18 je uvedeno: „Bernoulliho rovnice vychází z Eulerových pohybových rovnic, které jsou nelineárními parciálními diferenciálními rovnicemi prvního řádu a díky jejich složitosti jsou matematicky obtížně řešitelné. Za určitých předpokladů….. získáme integrací Eulerových pohybových rovnic tento vztah: $\frac{1}{2}v^2 + U + P = C$ (36) “. To je sice pravda, ale pokud uvažujeme ideální kapalinu a její stacionární pohyb, pak rovnici (36) dostaneme přímo ze zákona zachování mechanické energie, bez jakýchkoliv znalostí Eulerových pohybových rovnic. Tvrzení týkající se Bernoulliho rovnice (str. 18) „…součet rychlosti a tlaku musí být ve všech místech průtoku kapaliny při stejné hodnotě potenciální energii konstantní….“ je chybné. Dále autor tvrdí, že pokud pohybovou rovnici $dm\frac{dv}{dt} = -dF$ upravíme tak, aby se zde vyskytoval průřez trubice a hustota kapaliny, snadno pak nalezneme tvar obdobný jako rovnice (36). Toto odvození není složité, ale také není triviální. Prosím pana Pokorného, aby toto odvození ukázal při obhajobě.

10) Na stranách 20 - 21 je uvedeno: „Pokud bychom chtěli zůstat u vlivu velikosti zrn na vodivost trhliny, jistě můžeme poznamenat, že permeabilita proppantu se zvětšuje se čtvercem průměru jednotlivých zrn, což můžeme demonstrovat na obr. 4“. Já tuto závislost v obr. 4 nevidím, proto prosím o vysvětlení. Dále jsem nepochopil problematiku prezentovanou v kap. 4.3. Výška a šířka trhliny. Myslím si, že bez grafického vyobrazení tuto problematiku nelze vůbec vysvětlit.

Tyto kritické připomínky nesnižují zásadním způsobem kvalitu předložené bakalářské práce. Jejich cílem je upozornit studenta J. Pokorného na nutnost hlubšího studia fyziky pro úplné pochopení této problematiky a také na nutnost přesného formulování při prezentaci fyzikálních problémů.

<u>Práci považuji za zdařilou a také užitečnou. Doporučuji ji k obhajobě a navrhuji klasifikaci **výborně-velmi dobře** podle výsledku obhajoby.</u>

V Praze 8. 9. 2016

…………………………………………………………………………………

Ing. Josef Horálek, CSc.
seismické oddělení Geofyzikálního ústavu AV ČR