

Posudek diplomové práce Bc. Františka Staňka „Stabilita zdrojových mechanismů určených inverzí povrchových dat“

Předložená diplomová práce studenta Františka Staňka je syntetickou studií stability a spolehlivosti ohniskových mechanismů dvou reálných konfigurací seismických sítí určených k monitorování hydraulického štěpení. Tyto dva druhy sítí reprezentují dva současně používané přístupy k sledování seismicity indukované během injektáže fluid do ložisek tekutých paliv a zemního plynu za pomoci přijímačů umístěných na povrchu či v jeho bezprostřední blízkosti.

Autor přistoupil k zadanému problému zodpovědně a pracoval systematicky. Pro oba typy sítí, zde označených FracStar® (sít' 911 přijímačů hvězdicovitě rozmístěných na povrchu) a BurriedArray™ (sít' 99 přijímačů v téměř pravidelných rozstupech zakopaných do hloubek okolo 100 m), provedl detailní analýzu vlivu šumu, nepřesného strukturního modelu a zanedbání anizotropie na určení zdrojového mechanismu. Pokusil se i o jejich vzájemné srovnání, i když, jak sám v závěrečné diskuzi uvádí, tím že nepoužil stejný rychlostní model prostředí a stejnou hloubku zdroje, je toto porovnání víceméně jen orientační. Strukturní model pro BurriedArray™ totiž obsahuje kanál nízkých rychlostí, který výsledky značně ovlivňuje.

Diplomová práce je rozdělena na dva větší celky. V první části autor nejprve uvádí rozsáhlý popis rozložení nekonvenčních zdrojů na Zemi, smysl a účel hydraulického štěpení a metodiku monitorování mikroseismicity, která je při něm vyvolána. Následuje teoretické pozadí fyziky, z kterého vycházejí použité výpočetní programy 'Anisotropic Wavefront Tracer', 'ForwardMechanism' a 'InvertMechanism'. V této části diplomové práce se autor dopustil nejvíce chyb a nepřesností. Například popisuje momentový tenzor (MT) jako '*model ekvivalentních sil*' (str. 17 a 19). Domnívám se, že by zde měl upřesnit, že MT je zcela obecným popisem dipólového zdroje, tj. modelem ekvivalentních dvojic sil, který zahrnuje jak dipóly s točivým momentem, orientované ve směrech všech tří os, tak dipóly bez momentu. Z úvahy, že zemětřesení je vnitřním zdrojem dále plyne, že jeho celkový otáčivý moment musí být také nulový, a tudíž nemůže být popsán jednoduchým dipólem. Potřebujeme nejméně dva dipóly s opačnými točivými momenty, tzv. dvojité dipól (DC). Momentovým tenzorem rozhodně nelze modelovat jednoduchou ekvivalentní sílu. Velmi často je v práci použita ne zcela přesná, někdy až neodborná terminologie. Domnívám se, že je to následek sepsání práce v českém jazyce, přestože většina použité literatury je v jazyce anglickém. Za nejhorší považuji používání slangového výrazu '*plážový míč*' (na str. 15, 16, 19 a 50) v diplomové práci, která má '*zdrojový mechanismus*' obsažen i v názvu. Správné označení je právě již zmíněný zdrojový nebo ohniskový mechanismus, který se tradičně graficky zobrazuje pomocí stereografické plochojevné projekce znamének prvních nasazení P vln na spodní ohniskovou polokouli. V případě čistě smykové trhliny, což je převládající mechanismus většiny tektonických zemětřesení, je ohnisková koule rozdělena dvěma na sebe kolmými rovinami na 4 stejné kvadranty. Jedna z těchto rovin je rovinou zlomu a druhá je na ní kolmá. Z momentového tenzoru nelze jednoznačně určit, která rovina je která. Uvítala bych, kdyby autor důsledně používal jednotné označení pro tyto kvadranty, buď tlak - tah, nebo komprese - dilatace, a ne jejich různé kombinace (str. 19 a 59). To pak vede k chybám, jako v popisu obr. 16, kde se píše: '*černé kvadranty představují kompresi a bílé kvadranty tlak*'. Komprese i tlak je to samé a bílé kvadranty představují dilataci neboli tah. Další nepřesné pojmy nebo nestandardní označení fyzikálních veličin vyjmenuji v pořadí, v jakém se objevily v diplomové práci:

- rychlostní prostředí (str. 1, 2) - správně rychlostní model prostředí;
- přípovrch (str. 12) - nestandardní označení, lépe by bylo použít nějaký opisný tvar;
- nadložní kra (str. 16) - při popisu MT se spíše používá pojem visící blok;
- podložní kra (str. 16) - při popisu MT se spíše používá pojem ležící blok;
- tenzor T (str. 22) - správně se nazývá tenzor napětí a standardně se označuje σ ;
- deformace E (str. 23) - správně tenzor malých deformací, standardně označovaný e ;
- tenzor elasticity C_{ijmn} (str. 23) - lépe tenzor elastických parametrů nebo '*stiffness*' tenzor;
- sřizný modul μ (str. 24, 37) - lépe modul pružnosti ve smyku nebo jen Lamého konstanta.

V předložené práci mi chybí číslování rovnic. Respektive autor některé rovnice očísloval a některé ne. V diplomové práci by měla být dodržena stejná formální pravidla. Navíc se ve dvou uvedených vzorcích objevily chyby. Na str. 22 se v druhém vzorci vyskytuje hustota ρ na druhé straně rovnice. Správně má být ve tvaru :

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \frac{\partial T_{ij}}{\partial x_j} .$$

Na str. 25 pak v první rovnici chybí závorky, správně :

$$v_p = \sqrt{p/\rho} = \sqrt{(\lambda + 2\mu)/\rho} = \sqrt{(K + 4\mu/3)/\rho} .$$

V druhé části diplomové práce se autor podrobně věnuje testování různých vlivů na inverzi amplitud P vln zaznamenaných pomocí přijímačů umístěných na zemském povrchu či v jeho bezprostřední blízkosti. Chtěla bych ocenit jeho precizní přístup k určování stability a spolehlivosti získaných ohniskových mechanismů a rozboru jednotlivých vlivů, nejprve každého zvlášť a pak i jejich kombinací. Bylo by žádoucí, aby se před každým zpracováním reálných dat provedla tato detailní syntetická analýza, při které je nasimulováno konkrétní rozložení přijímačů dané sítě a je použit konkrétní rychlostní model prostředí. Asi není tak překvapivé, že vliv šumu na získané mechanismy je pro BurriedArray™ menší než pro FracStar®, neboť některé přijímače sítě FracStar® se nacházely buď v blízkosti injektážního vrtu nebo silniční komunikace, kde je vysoký reálný šum. Toto by mohlo být zdůrazněno při zmínce o asymetrickém rozložení reálného šumu pro FracStar® na str. 48. U přijímačů sítě BurriedArray™, které byly zakopány, je reálný šum menší a tudíž jsou výsledky pro syntetický a reálný šum podobné. Vliv šumu je ale obecně menší než vliv nepřesného modelu prostředí (příliš zjednodušený rychlostní model či zanedbání anizotropie). Čím je strukturní model více zjednodušen, tím dochází k strmějšímu nárůstu falešných nestřížných složek v MT. Je-li však velikost šumu oproti signálu více jak dvojnásobná, přebije přítomnost šumu efekt špatného modelu prostředí. Vliv anizotropie je oproti vlivu nepřesného modelu až druhořadý. Autor na str. 65 uvádí, že *'vliv modelu vnáší větší či menší systematickou chybu orientace zdroje'*. Je však tato chyba opravdu systematická? Myslím si, že nelze prokázat systematické zmenšení či zvětšení jednotlivých úhlů (strike, dip, rake). Orientace zdroje vyčíslená v této práci pomocí úhlu Ω (odchylka P/T osy od správného řešení) je relativně stabilní a robustní. Na str. 60 se konstatuje, že *'úhly Ω jsou velmi podobné'*. Toto konstatování lze uvést v článku, ale v rámci diplomové práce by měly být hodnoty Ω buď uvedeny nebo graficky zobrazeny. Jak již bylo mnohokrát publikováno, orientace střížné části zdroje je vždy stabilnější než dekompozice MT do jednotlivých složek. Chyby způsobené přítomností šumu, nepřesným modelem prostředí i nepřesnou lokací se vždy více promítnou do složky představující tzv. kompenzovaný lineární vektorový dipól (CLVD) než do objemové (ISO) složky zdroje. Stabilita jednotlivých řešení je v práci přehledně ukázána v tabulkách. Autor velmi zdařile určil maximální hodnotu misfitu, pro kterou je získané řešení ještě stabilní a spolehlivé. Tato hodnota je pak využita při zpracování reálných dat. Při porovnání obou sítí má BurriedArray™ horší misfit dat než FracStar®, což může být způsobeno, jak desetkrát menším počtem přijímačů, tak větší hloubkou ohniska, ale i přítomností kanálu nízkých rychlostí v strukturním modelu.

Předložená diplomová práce má ale i technické nedostatky. Obrázky jsou sice narozdíl od rovnic očíslovány všechny, ale na jednom místě je v textu odkaz na špatný obrázek. Na str. 50, ř. 9 se autor odkazuje na obr. 33 a 34, na kterých je znázorněn šum a ne zmiňované amplitudy. Ty jsou na obr. 36 a 37. Na obrázku 19 jsou použity v postupu práce pro popis parametrů zdroje písmena D, S a L. Domnívám se, že jde o dip, strike a rake, tak by bylo buď vhodné označení D, S a R nebo δ , Φ a λ . U třech obrázků (obr. 23, 26 a 29) je nekvalitní popis horizontálních os a u obr. 24 je popis os i barevné stupnice nedostatečný. Popisek obr. 38 by bylo vhodné doplnit odkazem na detailní popis (viz obr. 34). Autor by měl také vždy dodržovat standardní pravidla pro citování použité literatury. Citace se neuvádí pod rovnicí (str. 18, 20), ale přímo do textu, který vzorec uvádí. V českém textu nelze v citaci textu dvou autorů použít spojku 'and' (str. 18 - Aki and Richard, zde dokonce pozměněno i jméno autora). Dále, je-li více autorů než dva, uvádí se jméno prvního a kol. a ne všechny tři jména (str. 29 - Lambaré, Lucio a Hanyga) nebo jen jméno prvního autora (str. 56 - Williams-Stroud).

Některá použitá slovní spojení a obraty nejsou zcela jednoznačné a bylo by vhodné je v předpokládané budoucí publikaci upřesnit, např.:

- str. 1, ř. 28 - *závislost rychlosti ...* čeho?
- str. 17, ř. 13 - *inverzí amplitud ...* kterých vln?
- str. 19, ř. 6 - *MT je možné určit z pohybů zemského povrchu, povrchových vln nebo objemových vln ...* jaký pohyb zemského povrchu nezpůsobí povrchové nebo objemové vlny?
- str. 24 - doplnit, že vzorec pro rychlost platí pouze pro rovinné vlny;
- str. 46, ř. 12 - zmínit, že tento druh šumu se nazývá bílý šum;
- str. 50, ř. 15 - *nejmenší amplitudy jsou v místech tlakové osy P ...* tato formulace je trochu zavádějící, lépe by bylo použít největší záporné amplitudy;
- str. 54, ř. 33 - *vysoký signál ...* co to je?, nejedná se o vysokofrekvenční signál?

V textu se objevuje několik drobných překlepů nebo formálních chybiček - např.:

- str. 4, ř. 2 - baliva ... paliva;
- str. 14, ř. 7 - seimic ... seismic;
- str. 25, ř. 2 - ortotrombická ... ortorombická;
- str. 25, ř. 4 - transverzní ... transverzální;
- str. 33, ř. 5 - bzla ... byla;
- str. 33, ř. 6 - seismivké ... seismické;
- str. 54, ř. 32 - byby ... chyby.

Celkové hodnocení: Jak jsem již výše uvedla, předloženou diplomovou práci považuji za dobře provedenou. Oceňuji pečlivý přístup Bc. Františka Staňka k detailní analýze stability a spolehlivosti určených zdrojových mechanismů. Velmi se mi líbila závěrečná diskuze, ve které zmiňuje všechna úskalí porovnávání obou typů odlišných sítí FracStar® a BurriedArray™. Také zde uvádí i podrobný plán dalších analýz, kterým se hodlá v blízké budoucnosti věnovat. Bylo by přínosné, aby takto nastartovaný výzkum neskočil pouze obhajobou této diplomové práce. Úroveň práce ale zbytečně snižuje místy její ledabylé technické provedení. Hodnocení proto rozdělím na dvě části: **věcnou část klasifikuji stupněm výborně, a část provedení práce klasifikuji stupněm velmi dobře.** Zároveň bych chtěla komisi doporučit, aby při hodnocení práce brala do úvahy hlavně výsledky věcné části práce a aby se klasifikace za provedení práce stala pro autora výstrahou, zvláště pokud chce dále pokračovat v doktorandském studiu.

V Praze, dne 17. května 2012

.....
RNDr. Zuzana Jechumtálová, Ph.D.
Geofyzikální ústav AV ČR, v.v.i.