

Posudek dizertační práce Ľubici Valentové: „**Three-dimensional ambient noise tomography of the Bohemia Massif**“

Předložená práce se zabývá tomografií zemské kůry v oblasti Českého masivu pomocí seismických povrchových vln. Hlavním výsledkem práce je 3D regionální model rozložení střížných vln. V práci byly aplikovány a zkombinovány dvě metody, které v oblasti seismologie a geodynamiky zažily opravdový boom v posledních 15 letech. Konkrétně se jedná o adjungovanou metodu, která se prosadila díky stále dostupnějším výpočetním kapacitám. Dále se pak jedná o nedávno objevenou metodu interferometrie seismického neklidu, která umožnila nahradit seismické stanice za virtuální seismické zdroje, a tím vyřešit problém nerovnoměrného rozložení (či přímo neexistujících) přirozených seismických zdrojů. Toto je zásadní právě pro případ tektonicky málo aktivních oblastí (v současnosti), jakou je zrovna Český masiv. Výsledný 3D model střížných vln je nejdetailnější jaký je v současnosti pro Český masiv k dispozici a jistě najde uplatnění v dalším studiu geologické struktury Českého masivu nebo při modelování seismických vlnových polí (např. při studiu zemětřesených zdrojů). Téma práce je velice náročné. Řešení vyžadovalo značné úsilí v oblasti numerických metod a interpretace pozorovaných dat.

Práci tvoří pět kapitol z nichž dvě (kapitoly 2 a 4) byly publikovány formou článku v kvalitních mezinárodních časopisech. První kapitola představuje úvod do metod adjungované tomografie. Druhou kapitolu tvoří optimalizace adjungovaná tomografie z hlediska použité geometrie stanic a použitých vlnových délek. Ve třetí kapitole je představená inverze disperzních křivek. Čtvrtou kapitolu pak tvoří samotná tomografie zemské kůry v oblasti Českého masivu pomocí seismických povrchových vln včetně konstrukce 3D modelu střížných vln a jeho srovnání s geologickým modelem. V páté kapitole je diskutováno srovnání s ostatními dostupnými modely Českého masivu (či jeho částí).

Práce je dobře sepsaná, srozumitelná a poměrně čtivá (vyjma kapitoly 1), ačkoliv se jedná o technicky náročnou úlohu. Jazyková úroveň je dle mého názoru na dobré úrovni. Ačkoli oceňuji stručnost práce, jistě pasáže by zasloužily detailnější popis (viz níže, např. membránová rovnice a souvislost s modelováním povrchových vln). Grafické zpracování práce je na velmi vysoké úrovni, obrázky jsou dobře čitelné.

Za jediný trochu závažnější nedostatek práce považuji prezentovanou analýzu neurčitostí výsledných rychlostních modelů. Tématu se přitom přikládá váha, podtrženo zdůrazňováním Bayesovského přístupu v názvech kapitol. Chybová analýza se však jeví jako poněkud formální (viz moje komentáře níže). Použití Bayesovského formalismu se obecně jeví atraktivní, jelikož představuje rigorózní přístup k řešení obrácených úloh (tj. výsledek ve formě pravděpodobnostního rozložení). Ovšem použití samotného formalismu není vůbec samospásné. Nevhodná volba apriorních distribucí modelových parametrů či distribuce popisující rozložení chyb dat, může vést k nerealistickým odhadům chyb modelových parametrů (to může být v důsledku ještě víc zavádějící, než neuvést chybu vůbec). Je otázka, zda je Bayesovský formalismus pro tuto úlohu opravdu přínosem, vezmeme-li v úvahu složitost této úlohy (mnoho předpokladů, parametrů, různých kombinací metod, regularizací atp.). Nebyla by například lepší strategie „obětovat“ výpočetně náročnou Monte-Carlo metodu za realističtější parametrizaci 3D modelu?

**Otázky k diskuzi při obhajobě:**

Množství komentářů a dotazů níže odkazuje spíše na velikou složitost řešeného problému než na případné nedostatky práce. Za nejpodstatnější považuji vyjádření k otázkám/komentářům č. 2, 5, 6, 9, 10, 11.

1. Kapitola 1 se čte dost nelehce, odvození jsou velmi hutná téměř bez komentářů. Odvození nejsou originální (pokud jsem dobře pochopil), možná by se šlo pouze odkázat na existující

- literaturu. Na jednu stranu jsou prezentovány odvození formulací, které se v práci dále nepoužívají („full waveform misfit“, „envelope cross-correlation travelttime misfit“). Na druhou stranu je nedostatečně uvedena „membránová rovnice“, na jejímž řešení je postavená podstatná část práce. Chybí odvození této rovnice, proč a za jakých předpokladů představuje dobré přiblížení pro modelování povrchových vln. Prosím o stručnou prezentaci na obhajobě.
2. V citlivostních jádrech (sensitivity kernels) se objevuje singularita v blízkosti zdroje a přijímače, která se projevuje velkou citlivostí (např. času šíření) na vlastnosti prostředí v jejich bezprostřední blízkosti. Prosím o detailnější představení této singularity (co je přesně jejím původem, nejedná se např. pouze o artefakt?) Jak interpretovat její regularizaci? Spekuluji, tomografie se počítá pro kombinace stanice/zdroj na zemském povrchu. Struktura u zemského povrchu je značně heterogenní, vymažeme regularizací vliv těchto struktur? Může tato nekonzistence ovlivňovat řešení tomografické úlohy? Ukázka citlivostního jádra pro plnou 3D úlohu by mohla být názorná (viz dotaz číslo 3 níže).
  3. Jak dobře reprezentují jádra na obrázku 1.4 citlivost povrchových vln na strukturu, vezmeme-li v úvahu to, že povrchové vlny nevznikají přímo ve zdroji, ale až v určité vzdálenosti od zdroje (ve vzdálenosti závislé na vlnové délce)?
  4. Na str. 28 se zmiňuje „Minimization employing the adjoint calculation was implemented into the 2D version of SeisSol (<http://www.seissol.org/>). We have further developed this implementation ...“. Prosím o stručné shrnutí vlastních úprav kódu (v práci není zmíněno). Je upravená verze programu volně k dispozici na stránkách (<http://www.seissol.org/>)?
  5. Prosím o detailnější ukázkou sestavení „pozorovaného“ seismogramu z disperzní křivky (odkazují na kapitolu 2.3.2). Do jaké míry je toto korektní? Nejde taková procedura proti smyslu adjungované tomografie formulované pro časy šíření určené korelací? Jeví se to jako nekonzistence. Proč byl použit zrovna tento typ misfitové funkce, který se nezdá být úplně optimální vzhledem k interpretovaným datům (disperzní křivky). Nebylo by přirozenější použití samotných vzájemných korelací šumu?
  6. Jak se určují chyby časů příchodů (či chyby disperzních křivek)? Realistický odhad je stěžejní pro výsledné neurčitosti. Dizertace by si zasloužila stručnou kapitolu o zpracování dat a odhadu chyb. Odhad chyby srovnáním výsledků pro R a Z složky je nedostatečný, skutečná chyba může být značně větší (např. systematická chyba plynoucí z metod zpracování dat, která je pro R a Z složku stejná).
  7. Co je za kritikou šachovnicových testů? Prosím o stručnou diskuzi.
  8. Jaký výsledek by se dosáhl klasickou paprskovou tomografií povrchových vln? Bylo testováno?
  9. V kapitole 3 se prakticky nevyskytují odkazy na stávající literaturu, což je v případě tak klasické úlohy (jakou je inverze disperzních křivek povrchových vln) závažnější. Studium literatury patří k základům vědecké práce a dobrá orientaci v problematice je nutná pro přínosnou diskuzi výsledků. Rozbor neurčitosti výsledných modelů s hloubkou je zavádějící a nereflkuje známá fakta. Str. 68, diskuze průběhu variance s hloubkou má pouze omezenou vypovídací hodnotu, odhad neurčitostí je formální, což je ukázáno v samotné práci – přidáním jediné vrstvy se odhad neurčitostí značně mění (jakou mají vypovídací hodnotu odhady chyb na obr. 3.3?) Závěr je z mého pohledu poněkud nešťastně formulován – právě použitím tenkých vrstev se ukáže, v jakém rozmezí hloubek není model téměř vůbec citlivý na pozorovaná data. Na str. 93. se dává do souvislosti větší rozptyl rychlostí u povrchu s laterální variabilitou sedimentárních vrstev. To je sice možné, ale je nutné též zmínit ztrátu rozlišení v mělkých hloubkách, která souvisí s omezeným frekvenčním pásmem disperzních křivek (konkrétně s nejvyšší použitou frekvencí). Realistické odhady neurčitosti inverzí disperzní křivek musí vykazovat zvýšenou neurčitost u povrchu a ve spodních partiích modelu. Není-li tomu tak, byla zvolena nevhodná parametrizace, která představuje nerealistický apriorní model.
  10. Rozptyl rychlostních profilů invertovaných pouze z Loveho vln (obr. 4.4a) se zdá být autorce příliš velký a jedno z vysvětlení které nabízí je, že pozorovaná data mohou být málo citlivá na rychlosti S vln. Rychlosti Loveho vln ovšem závisí právě pouze na rychlosti S vln! Nezmiňuje se přitom, že odhad rychlostního modelu z omezeného počtu módů disperzních křivek povrchový

vln je silně nelineární a nejednoznačná obrácená úloha i v případě 1D modelu. Přidáváním více dat (tj., sdružená inverze Loveho a Rayleighových disperzních křivek) autorka pozoruje pokles rozptylu výsledného modelu. Toto zdánlivě paradoxní pozorování je zřejmě výsledek Bayesovského formalismu (vystihnout více nezávislých dat je v praxi zpravidla náročné). Bylo by dobré ukázat srovnání syntetických a pozorovaných disperzních křivek (jako na obrázku 5.6) včetně určených chyb.

11. Srovnání modelů od různých autorů na obr. 5.5 (a korespondujících disperzních křivek na obr. 5.6) názorně demonstruje problematiku inverze disperzních křivek povrchových vln a formálnost prezentovaných odhadů neurčitosti. Například, model Kolinsky2011 se od modelu získaného v této práci značně liší (zcela mimo prezentovaný rozptyl), ale disperzní křivky jsou velmi podobné (obr. 5.6). Na druhou stranu, rychlostní profil DSS1988 přepočtený z rychlostí P vln ( $V_p/V_s=1.73$ ) je velmi podobný, ovšem disperzní křivka pro Loveho vlny je odlišná. To vše odkazuje na velice formální odhad neurčitostí v této práci. Srovnání chyby určení disperzní křivky (0.15 km/s) s rozptylem disperzních křivek na obr. 5.6, ukazuje na možnou chybu ve výpočtu či chybnou (nevhodnou) metodologii. Odtud pramení též nerealistický odhad  $V_p/V_s$  poměru (skutečná neurčitost bude větší).

### Chyby, nepřesnosti, komentáře:

- Název práce „Three-dimensional ambient noise tomography of the Bohemia Massif“ není zcela odpovídající, analýza seismického neklidu není předmětem práce, autorka používá disperzní křivky jako data.
- Místo „low period“ používat „short period“
- V rovnici (1.45) se objevuje operátor označená malým  $d(\cdot)$  bez jakéhokoliv popisu.
- Na str. 20 se objevuje zmínka o použití softwaru Seissol2D bez jakéhokoliv citace či úvodu, který ho představuje.
- Chybí shrnující přehled detailů výpočtů (velikost výpočetní oblasti, časový a prostorový krok, jak často bylo ukládáno vlnové pole atp.).
- Str. 29 “Since we have no detailed apriori information on the starting model, we use homogeneous starting model with velocity obtained from average dispersion curve of the studied area.” Není zřejmé, co se myslí průměrnou disperzní křivkou a jak jí reprezentovat homogenním modelem.
- Časy příchodů v syntetických testech byly určovány stejnou metodou jako v případě naměřených dat (tj. určováním disperzních křivek)? Zřejmě ne, až z diskuze později vyplývá, že chyba byla převzata přímo z dat pozorovaných. Syntetické testy byly tedy předpokládám prováděny korelací záznamů.
- Obr. 2.4, chybí zmínka o normalizaci prezentovaných hustot pravděpodobnosti.
- Použití termínu Fresnelova zóna (1., 2., ...) v diskuzi citlivostních jader může být zavádějící. Citlivostní jádra nejsou Fresnelovy zóny, i když je tvarem připomínají.
- Chybí zmínka o výpočetní náročnosti prezentované 2D adjungované tomografie.
- Disperzní křivky vykazují jen malou citlivost na hustotní profil. Přesto by se slušelo uvést, jaké hustoty se v inverzích předpokládaly.
- Str. 86, špatně uvedené jednotky (sekundy) místo km/s pro chyby měření?
- Úvod kapitoly 4 je velmi stručný. Seismický šum se využívá pro odhad rychlostních profilů seismických vln minimálně přes 60 let. K. Aki navrhl metodu SPAC na odhad fázových rychlostí povrchových vln v roce 1957. Disperzní křivky fázových rychlostí v podané práci byly určeny víceméně také na základě této metody.
- Průměrný 1D model (např. obr. 5.5) vykazuje zřetelné rozhraní (okolo 20km) a 3D model nikoliv, což je paradoxní. Čekal bych opak, resp. přítomnost rozhraní ve 3D modelu, které se jeví

rozmazané v průměrném 1D modelu. Zvolená parametrizace pro 3D model zřejmě nedovoluje zobrazit toto rozhraní.

- Na str. 99 se zmiňuje „vertical smoothing effect of surface waves“. O co konkrétně se jedná?
- Výsledné řezy 3D modelem (obr. 4.10) vykazují prostorovou periodu 50 km, odpovídá to šířce vyhlazených citlivostních jader? Je taková struktura realistická (tj. nejedná se pouze o filtrovaný dlouhovlnný obrázek, či dokonce artefakt)?
- Kapitola 5, diskuze: Citlivost povrchových vln na rychlosti P vln je velmi malá, odhadnuté  $V_p/V_s$  poměry jsou nerealistické (viz např. Christensen, N.I. 1996. Poisson's ratio and crustal seismology), což se v diskusi přechází.

**Závěr:** Ľubica Valentová bezpochyby prokázala schopnost samostatně tvořivě vědecky pracovat. V dizertační práci je obsaženo velmi mnoho poctivé a relevantní práce. Uvedené výtky jsou podány spíše jako doporučení pro případnou další vědeckou činnost v oblasti obrácených úloh.

V Praze, 25. března 2018

.....  
RNDr. Jan Burjánek, Ph.D.  
Geofyzikální ústav AV ČR, v.v.i.