

# Oponentní posudek doktorské disertační práce

**Jméno disertanta:** Mgr. František Čejka

**Název práce:** Broadband kinematic ground motion modeling of tectonic earthquakes

**Školitel:** Prof. RNDr. František Gallovič, Ph.D.

**Oponent:** Doc. RNDr. Johana Brokešová, CSc.

**Práce je předložena k obhajobě na:** Matematicko-fyzikální fakultě Univerzity Karlovy,  
obor Geofyzika

---

## Charakteristika předložené práce

Uchazeč zvolil pro svou disertační práci formu, která je umožněna vnitřním předpisem univerzity, a to že práce je složena z jeho dříve publikovaných souvisejících vědeckých článků. Taková práce by měla být doplněna uceleným shrnutím těchto článků. Konkrétně se v tomto případě jedná o tři články publikované v prestižních impaktovaných časopisech a je zřejmé, že přinášejí kvalitní vědecké výsledky. Články však nejsou samostatnou prací doktoranda, nýbrž se jedná o kolektivní práci pěti až šesti autorů. U všech tří článků je sice uchazeč prvním autorem, avšak s výjimkou jednoho není jasný jeho konkrétní přínos. Na druhou stranu je vidět, že publikace vycházejí ze široké mezinárodní spolupráce.

Ve svém posudku budu stručně charakterizovat jednotlivé kapitoly/články, avšak vzhledem k tomu, že články jistě prošly náročným recenzním procesem, nebudu zde uvádět jejich detailní rozbor. Uvedu dílčí připomínky a zejména otázky na uchazeče, které mohou být vnímány jako náměty do diskuse.

Úvod (kapitola 1) je velmi krátký, necelých 9 stran. Jak bylo řečeno výše, měl by obsahovat ucelené shrnutí následných článků a zejména jejich uvedení do kontextu (vzájemně i s jinými pracemi v daném oboru), alespoň stručnou historii výzkumu v dané oblasti (aby bylo zřejmé, co nového předkládané články přinášejí). Velmi vítané by také bylo jednoduché vysvětlení použitých metod, tak aby se čtenář, který není specialistou přímo v dané oblasti, mohl v článcích snáze zorientovat (zejména v případech, kdy z důvodů rozsahu není v článcích pro podrobnější vysvětlení místo). Nic z toho jsem v úvodu nenašla snad s výjimkou objasnění pojmu 'ground motion model' (GMM) a s výjimkou popisu hybridního modelu zdroje kombinujícího integrální a kompozitní přístup (HIC), který je ovšem v samotných článcích vysvětlen a diskutován poměrně podrobně, takže zrovna v tomto ohledu úvod žádnou přidanou hodnotu nepřináší. Místo toho se v úvodu uvádí obecné poznatky jako Gutenberg-Richterův zákon (rovnice 1.1), nebo obecná rovnice pro 'probabilistic seismic hazard assesment' (PSHA, rovnice 1.2), čemuž se ale předložené články vůbec nevěnují. Věnují se případně některým dílčím aspektům, které by v budoucnu bylo možné využít i pro PSHA. Vzhledem k výše uvedenému považuji úvod v jeho předložené podobě za promarněnou

příležitost udělat disertační práci pro čtenáře přívětivější.

Článek, který tvoří druhou kapitolu (Broadband strong ground motion modeling of the 2023 Mw7.8 Kahramanmaraş, Türkiye, earthquake including long-period directivity pulses v časopise *Communications earth & environment*, IF 8.5) se zabývá modelováním silných pohybů půdy vyvolaných relativně nedávným zemětřesením v jižním Turecku poblíž hranic se Sýrií, které mělo v obou zemích katastrofální účinky (desítky tisíc obětí, miliony zasažených lidí, obrovské materiální škody). Článek není rozsahem nijak velký, o to hutnější je svým obsahem. Zkoumá možnosti jak s poměrně jednoduchou geometrií zlomu (zlom se dvěma vůči sobě ukloněnými navazujícími segmenty) a jednoduchým 1D rychlostním modelem lze kinematickým modelováním s využitím metody HIC vystihnout pozorovaná data v okolí zlomu v širokém frekvenčním oboru včetně výrazných efektů direktivity. V článku je nejprve vygenerován optimální model šíření trhliny a rozložení skluzu na základě porovnání teoretických pohybů půdy a pohybů naměřených na stanicích v okolí zlomu. K vytvoření modelu zdroje se využil program ISOLA pro inverzi násobných bodových zdrojů a dále dále program LinSlipInv pro rychlou inverzi skluzu z GNSS dat. Tento model zdroje je pak následně použit k modelování pohybů v pravidelné síti virtuálních stanic, což umožňuje odhad pohybu půdy i mimo oblasti pokryté skutečnými stanicemi. Článek je opatřen rozsáhlým doplňkovým materiálem. Je zřejmé, že za výsledky publikovanými v tomto článku je obrovské množství relativně složitých výpočtů. V této souvislosti bych chtěla ocenit, že článek byl zaslán relativně brzy (přibližně půl roku) po daném zemětřesení. Zaznamenala jsem ale i některé technické nedostatky, např. v obrázku 2.5 (v originálním článku Obr. 5) zcela chybí jeho pravá část zmiňovaná v popisku. Je škoda, že ani při přepisování článku do disertační práce nedošlo k odstranění tohoto nedostatku.

Druhý článek (Ground motion modeling of the 2016 Mw6.2 Amatrice (Italy) earthquake by a broadband hybrid kinematic approach, including empirical site effects, v časopise *Seismological Research Letters*, IF 2.6) tvoří kapitolu 3. Zabývá se modelováním silných pohybů půdy při zemetřesení Amatrice 2016 ve střední Itálii. Po metodické stránce je zde řada podobností s prvním článkem – jednoduchý zlom, jednoduchý 1D model struktury, optimální kinematický HIC model zdroje použitý pro široký rozsah frekvencí do 10 Hz vyladěný na základě srovnání s daty na referenčních stanicích a dopočítání vlnového pole v husté pravidelné síti virtuálních stanic. Na rozdíl od prvního článku se zde skluz neurčuje inverzí, ale vychází se ze skluzu určeného v předchozích studiích. Některé parametry zdroje, např. rychlost trhání se určují pomocí grid-search. Další rozdíl je ve využití výsledků pro empirický model pohyby půdy (GMM) k validaci syntetických dat a tím i modelu zdroje ve vybraných referenčních stanicích na skalním podloží a ve virtuálních stanicích. Po optimalizaci parametrů modelu zdroje se tento dále využívá pro výpočet pohybů půdy v nereferenčních stanicích vykazujících silné lokální efekty. Tyto efekty se do výpočtu zahrnují pomocí korekcí odvozených opět z GMM. Tento článek demonstruje vhodnost kombinování syntetických a empirických přístupů.

Kapitola 4, třetí článek (Constraining Between-Event Variability of Kinematic Rupture Scenarios by Empirical Ground-Motion Model: A Case Study in Central Italy, BSSA, IF 2.6) je čistě teoretickou studií, tj. nepracuje se zde s žádnými reálnými seismogramy. Zabývá se numerickými simulacemi různých hypotetických scénářů zemětřesení v Amatrice pro Mw 6.2, tedy stejné jako pro konkrétní zemětřesení z roku 2016 v předcházejícím článku. Konkrétně je modelováno cca 12 000 scénářů pro různé parametry zdroje. Pro výpočet se opět používá metoda HIC a stejná rychlostní struktura jako v předchozím článku jakož i pravidelná síť virtuálních stanic. V těchto stanicích, podle jejich vzdálenosti od zlomu, se

porovnávají spočtené spektrální hodnoty zrychlení s hodnotami odpovídajícími GMM pro střední Itálii. Článek konstatuje dobrou shodu jak středních hodnot, tak celkové variability. Detailnější analýza odhaluje, že syntetická data podhodnocují tzv. within-event variabilitu (mezi stanicemi pro jeden scénář) a nadhodnocují between-event variabilitu (pro různé scénáře) ve srovnání s GMM. Toto zjištění vedlo k redukci počtu uvažovaných scénářů omezením zdrojových parametrů, aby se dosáhlo lepší shody between-event variability s GMM. Navržené omezení zdrojových parametrů může mít velký význam pro studie zabývající se výpočtem seismického ohrožení v dané oblasti.

Závěrečné shnutí je rozsahem velmi krátké (jeden a půl strany). To mi připadá na tak obsažné články až příliš stručné. Postrádám širší diskusi článků v jejich vzájemném kontextu.

### **Cíle disertační práce a jejich splnění**

Žádné cíle nebyly explicitně formulovány a tedy není možné hodnotit jejich splnění.

### **Aktuálnost zvolené problematiky**

Předložené články se zabývají relativně nedávnými ničivými zemětřeseními ve dvou seismicky velmi aktivních a zároveň hustě obydlených oblastech, ve kterých se podobná zemětřesení opakují. Jakýkoliv příspěvek k lepšímu pochopení modelu příslušného seismického zdroje a k přesnějším odhadům očekávatelných charakteristik seismických pohybů (např. PGA a jeho roložení na daném území) je nanejvýš aktuální.

### **Zvolené metody zpracování a postup řešení**

Ve všech předložených člancích se používá hybridní integrálně-kompozitní kinematické modelování zdroje (metoda HIC), které bylo poprvé publikováno v roce 2007. Dále se ve všech člancích používá přímé modelování pohybu půdy, konkrétně výpočet Geenových funkcí, metodou diskretních vlnových čísel, kterou je možné aplikovat v 1D rychlostních modelech s homogenními vrstvami (tradičně se pro ní používá program Axitra). Domnívám se, že právě tyto dvě metody představují těžiště výpočetní práce uchazeče. V některých člancích se dále používají i inverzní metody, jako například inverze na model zdroje složený z několika bodových zdrojů, určení mechanismu a magnituda (program Isola vyvinutý prof. Zahradníkem) nebo kinematická inverze rozložení skluzu na zlomu z GNSS dat (volně dostupný program LinSlipInv). Výsledky simulací jsou konfrontovány s empirickými modely pohybu půdy v závislosti na vzdálenosti (GMM) pro sledovanou oblast a vyhodnoceny stochastickými postupy. U těchto dalších metod by bylo dobré, kdyby uchazeč během obhajoby vyjasnil, zda a případně do jaké míry se na příslušných výpočtech podílel.

### **Zhodnocení výsledků dosažených disertantem**

Výsledky obsažené v předložených člancích jsou velmi hodnotné, avšak jedná se ve všech případech o kolektivní dílo více autorů. Z předložené dizertace nevyplývá, co konkrétně jsou výsledky dosažené samotným uchazečem. Očekávám, že toto bude vyjasněno v průběhu obhajoby.

## **Význam pro rozvoj vědního oboru nebo pro praxi**

Předložené 3 články mají velký teoretický význam – testování modelů zdroje a jejich konfrontace s pozorováním pro účely realističtějšího odhadu jednotlivých parametrů je každopádně velmi přínosné a může být do budoucna příspěvkem k lepšímu pochopení fyziky zemětřeseného zdroje. Výsledky prezentované v člancích mají ale i významný praktický dopad – mohou být využity ke zpřesnění odhadu seismického ohrožení ve dvou významných seismogenních oblastech, jižní Turecko a střední Itálie. To může v konečném důsledku vést např. k aktualizaci stavebních norem a tedy snaze omezit ztráty (jak na životech, tak hmotné) při opakování podobných zemětřesení.

## **Formální úprava disertační práce a jazyková úroveň**

Formální úprava předložené práce je standardní, jazyková úroveň je velmi nevyrovnaná – zatímco články jsou psány srozumitelnou angličtinou (patrně proto, že prošly revizí a také v souvislosti s účastí spoluautorů z mezinárodní seismologické komunity), v úvodu je řada formulací, které pochopení poněkud ztěžují.

## **Otázky k disertační práci**

K článku 1 (kapitola 2):

- Jakým způsobem byly určeny dodatečné přípovrchové vrstvy v rychlostním modelu (včetně Q)?
- Jak se vypočítává rotačně invariantní horizontální PGA?
- Vysvětlete roli vodní hladiny při konstrukci hybridního modelu zdroje (str. 26 v disertační práci).

K článku 2 (kapitola 3):

- Zlom přechází přes dvě geologické jednotky s různou přípovrchovou strukturou ve svrchních 2 km. Při výpočtu GF se ale uvažuje vždy jen ta struktura, ve které leží stanice. Máte nějaký odhad chyby tohoto postupu? (stejný dotaz i k článku 3)
- V článku jsem nenašla informaci, zda zlom dosahuje až k zemskému povrchu, nebo končí v nějaké hloubce pod povrchem. (stejný dotaz i k článku 3)
- Proč se zde uvažuje geometrický průměr horizontálních složek PGA (a ne rotační invariant jako v článku 1)? Liší se hodnoty významně? (stejný dotaz i k článku 3)
- Popište podrobněji jak se provádí korekce na lokální strukturu?
- V článku se používá GMM SEA21, ale pro určité dílčí korekce se přechází k modelu SEA24 (str. 51 v disertační práci). Jaký je důvod? Proč není vše počítáno buď pro jeden nebo druhý model, ale konzistentně?

K článku 3 (kapitola 4), kromě výše uvedených dotazů společných s článkem 2:

- Týkala se redukce parametrů zdroje také velikosti zlomu? Jak se vlastně vybrala velikost menšího zlomu? Nejsou pouze dvě velikosti zlomu málo pro studium variability? (Obr. 4.4b, pravý panel)

## **Závěrečné zhodnocení**

Uchazeč jistě věnoval značnou pozornost a úsilí přípravě výše uvedených tří článků, přičemž musel pochopit a případně se naučit používat nejrůznější metody, jak přímé, tak inverzní, a využívat jak syntetické tak empirické modely. Články obsahují kvalitní výsledky a jsou velmi aktuální. Uchazeč si osvojil základy vědecké práce, a proto mohu jeho práci doporučit k obhajobě. V případě úspěšné obhajoby doporučuji udělení akademického titulu Ph.D.

V Praze, 5. 9. 2024

Doc. RNDr. Johana Brokešová, CSc  
katedra geofyziky MFF UK