

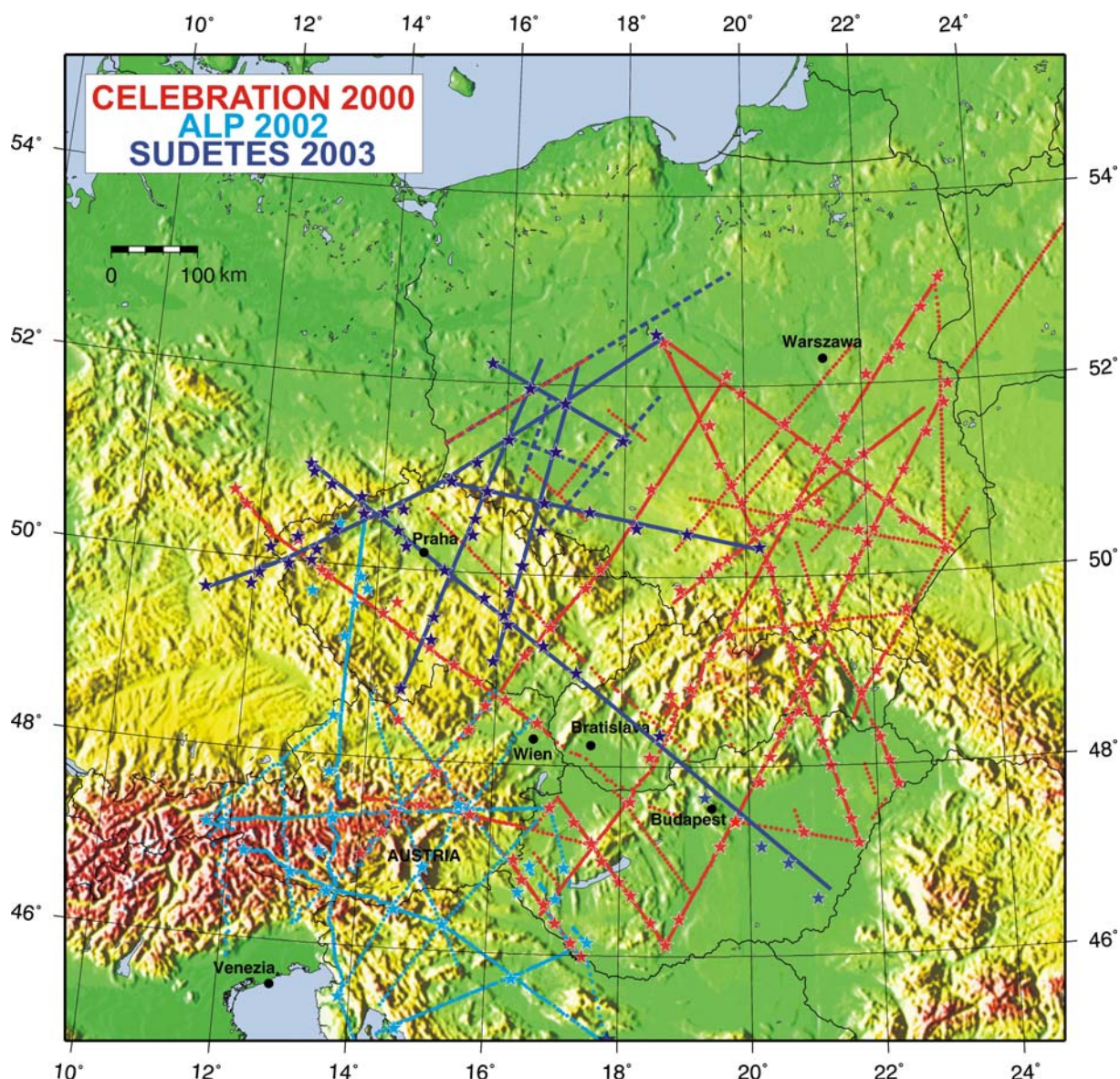
Seismické profilování ve střední Evropě a jeho přínos ke studiu litosféry

Pavla Hrubcová, Miroslav Novotný, Bohuslav Růžek, Aleš Špičák
Geofyzikální ústav AV ČAV, Boční II/1401, 141 31 Praha 4

Mezinárodní seismické experimenty uskutečněné v posledních letech ve střední Evropě studují stavbu zemské kůry a svrchního pláště pod touto oblastí. Pro studium hlubinné stavby se využívá seismická refrakční metoda, kdy se registrují seismické vlny generované odpaly a následně je zjišťována rychlost šíření vln v horninovém prostředí. Tyto údaje umožňují zpřesnit naše znalosti o vlastnostech svrchních partií litosféry do hloubek 50-60 km.

Úvod

V posledních letech se moderní geologicko-geofyzikální výzkum střední Evropy zaměřil mj. na studium zemské kůry a svrchního pláště. Nejvíce informací o hlubinné stavbě poskytuje metoda, založená na interpretaci seismických vln uměle vyvolaných odpaly na zemském povrchu a zaznamenaných pomocí seismických stanic. Sérii moderních seismických experimentů zahájil v devadesátých letech projekt POLONAISE'97, na který navázaly začátkem našeho tisíciletí projekty CELEBRATION 2000, ALP 2002 a SUDETES 2003. Za účasti více než 25 výzkumných institucí z mnoha zemí světa byla odměřena hustá síť seismických profilů, pokrývající střední Evropu (obr. 1). K registraci seismických vln bylo použito přes 1000 mobilních digitálních seismických stanic. Velikost náloží se zpravidla pohybovala od 200 do 400 kg, výjimečně bylo odpáleno 4000 kg i více; největší nálož v Bělorusku byla 15 000 kg. Seismické vlny vybuzené tímto mohutným odpalem bylo možné zaznamenat na seismických stanicích vzdálených až 600 km. Časoprostorová koordinace experimentů byla zajištěna družicovou navigační službou GPS. Vlastní experiment sestává z odpálení náloží v odpalových bodech s rozestupy přibližně 30 km a následné registrace seismické energie pomocí digitálních stanic rozmístěných podél linií profilů s krokem 3 km. Nasazení velkého počtu stanic, nesrovnatelně většího než při kterémkoli refrakčním experimentu uskutečněném v minulosti v Evropě, umožnilo zásadní inovaci při koncipování terénní části experimentu. Stanice bylo možné rozmístit současně podél několika navzájem se křížujících profilů a tím zaznamenávat jak seismické vlny podél profilu s příslušným bodem odpalu, tak i vlny šířící se ke stanicím na profilech okolních. Tento přístup umožňuje nejen konstrukci standardních 2-D rychlostních řezů podél profilů, ale také 3-D interpretaci získaných dat. Podrobnosti o výše uvedených seismických projektech lze nalézt v [1-5].



Obr. 1: Pozice seismických profilů a jednotlivých bodů odpalu v mezinárodních projektech. Profil CEL 09 prochází jižně od Prahy a má směr SZ-JV.

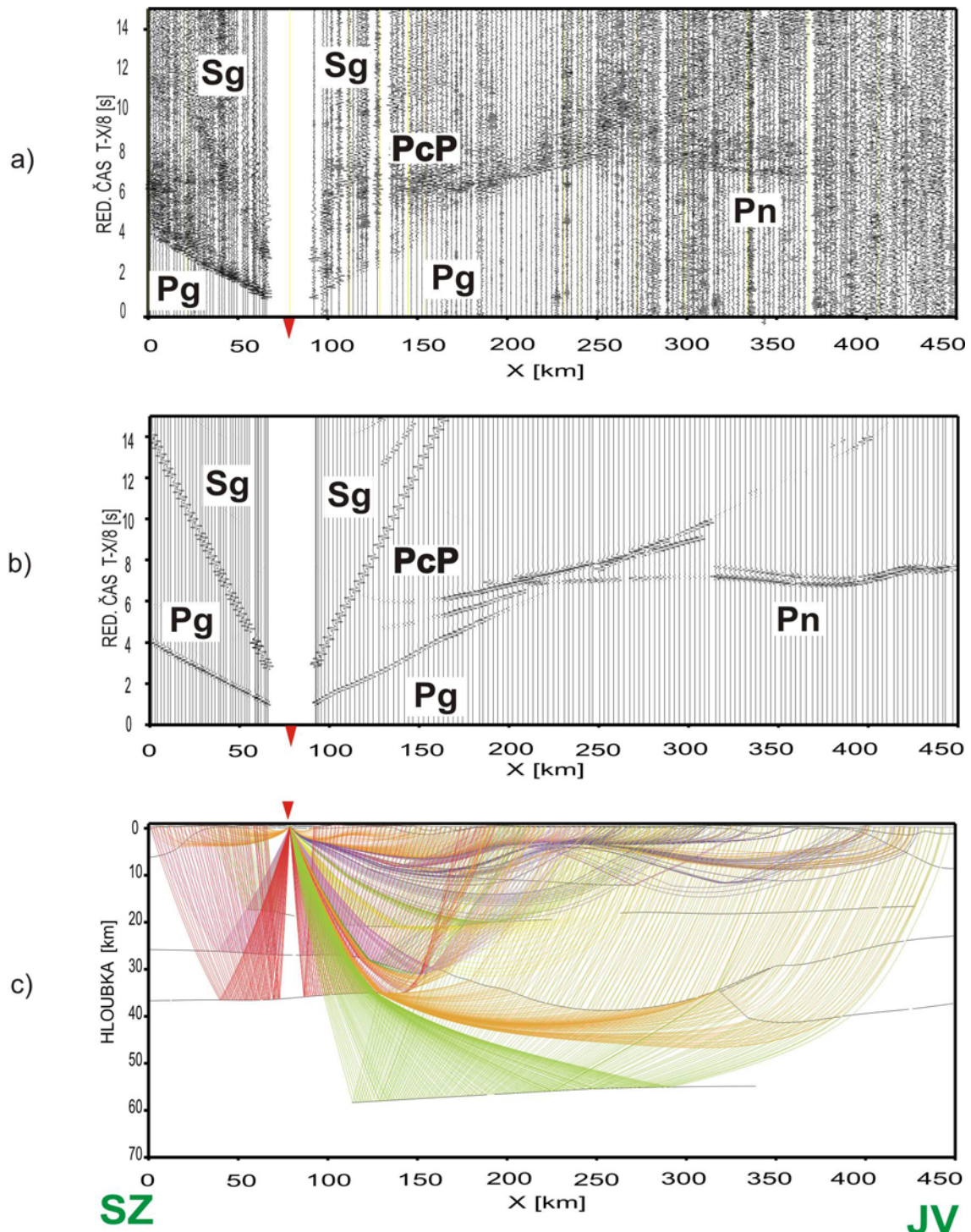
Interpretace naměřených dat

Ke studiu hlubinné stavby se v seismickém výzkumu využívají především elastické podélné vlny (**P vlny**) refragované v kůře (**Pg**) a ve svrchním plášti (**Pn**). Přítomnost rozhraní v prostředí signalizují odražené vlny označované symbolem **PcP** pro korová rozhraní a **PmP** pro rozhraní kůra-plášť. Podobné značení se užívá i pro střížné vlny (**S vlny**), které však přicházejí později a zpravidla je obtížné je vydělit na pozadí ostatních interferujících vln. Interpretaci získaných dat je možné rozdělit na dva typy, profilovou a neprofilovou. Prvním krokem interpretace při profilovém zpracování dat je určení rozložení rychlosti z časů prvních nasazení refragovaných P vln pomocí tomografických inverzních metod [např. 6-8]. Vybranou tomografickou metodou je nejdříve spočtena matice rychlostí šíření elastických vln v definované pravidelné síti bodů. Diskretizační kroky sítě jsou voleny s ohledem na hustotu odpalových bodů a rozmístění seismických stanic, na kterých se odečítají časy příchodu seismických vln. Při výpočtu se spočítají teoretické časy příchodu vln od odpalu ke stanici podle Fermatova principu a tyto časy se porovnají s naměřenými hodnotami. Z reziduí

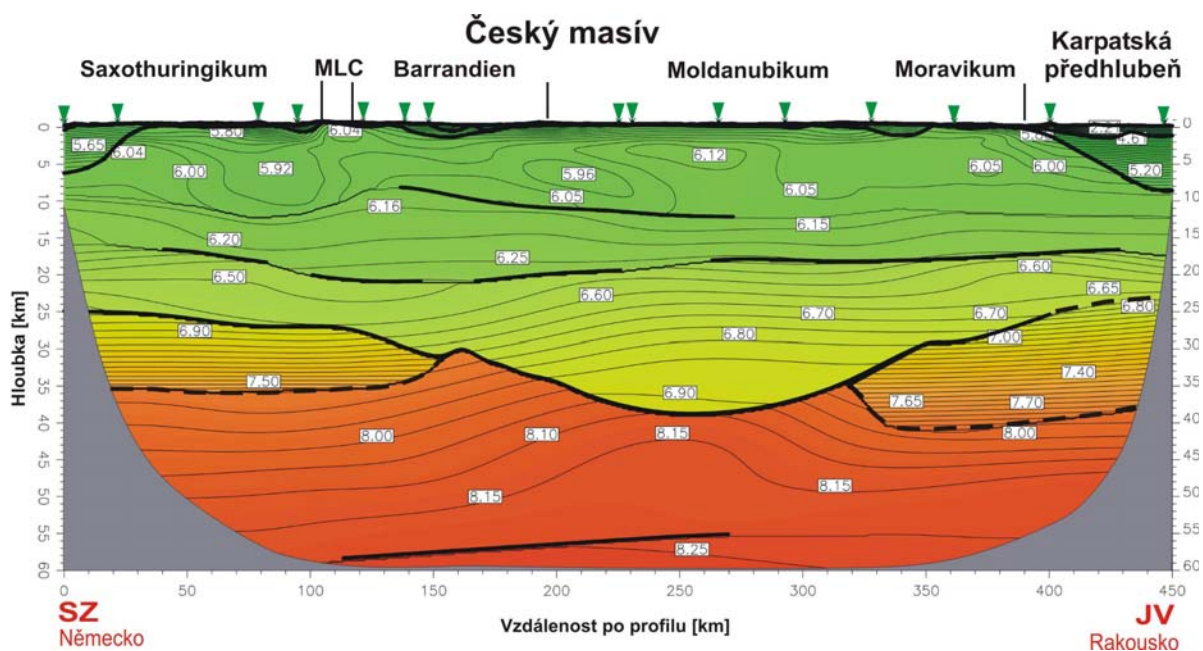
teoretických a naměřených časů příchodu se počítají rychlostní odchylky, o které se model opraví a postup se zopakuje.

Po inverzních kinematických úlohách, zpracovávajících jen časy příchodu seismických vln, nastupují metody založené na interaktivním přístupu interpretátora, které mohou vzít v úvahu i amplitudy vln. Obvykle se používají paprskové metody [9], které konstruují trajektorie šíření energie seismické vlny a počítají čas šíření energie podél nich. Zároveň se sestavují tzv. syntetické seismogramy, které představují teoretické vlnové obrazy. Výpočet celého vlnového pole omezuje mnohoznačnost řešené úlohy. V této fázi se do interpretace zahrnují také odražené vlny a modelují se rychlostní rozhraní, na nichž dochází k odrazu seismické energie. K modelování interference odražených vln v silně zvrstvených korových blocích se dále používá metoda reflektivity [10], která počítá kompletní vlnové pole pro zvolené lokální 1-D rychlostní modely.

Obr. 2 znázorňuje naměřené vlnové obrazy (obr. 2a) a výsledky interpretace pro jeden bod odpalu na seismickém profilu CEL09 projektu CELEBRATION 2000. Tento profil prochází Českým masívem ve směru SZ-JV podél linie Mariánské Lázně – Jindřichův Hradec a zasahuje jak do Německa, tak i do Rakouska a Maďarska (obr.1). Výsledný rychlostní model a jemu odpovídající syntetický seismogram, tj. teoretické vlnové pole spočtené paprskovou metodou představují obr. 2b, c. Samotný rychlostní model podél tohoto profilu je pak znázorněn na obr. 3. Model vykazuje vysokogradientovou přípovrchovou zónu do hloubek 2-3 km s rychlostmi 5,1 – 6,1 km/s. Ve střední kůře je gradient rychlostí malý a laterálně homogenní, což svědčí o konsolidovanosti prostředí související s velkým geologickým stářím Českého masívu. Naopak laterální variabilita rychlostí ve spodní kůře je velká a umožňuje rozdělit Český masív na tři oblasti. V severozápadní části masívu je spodní kůra laminovaná a vysoce reflektivní. V centrální oblasti Českého masívu je na hranici kůra – plášť zřetelný rychlostní skok a kůra zde dosahuje mocností až 40 km. Ve třetí, jihovýchodní oblasti masívu, je přechod z kůry do pláště reprezentován širokou gradientovou zónou s postupně narůstajícími rychlostmi. Rozdíly v rozložení rychlostí ve spodní kůře patrně odrážejí různý tektonický vývoj dílčích jednotek Českého masívu.



Obr. 2: Modelování rychlostí a odrazných rozhraní v kůře a plášti podél profilu CEL09. a) naměřené vlnové pole pro jeden bod odpalu, b) syntetický seismogram spočtený pro ověřovaný model, c) rychlostní model a dráhy paprsků vyslaných od bodu odpalu k seismickým stanicím. Jednotlivé typy vln jsou vysvětleny v textu.



Obr. 3: Výsledný rychlostní řez podél profilu CEL09 a jeho schematické tektonické začlenění v Českém masívu. MLC – Mariánsko-Lázeňský komplex. Zelené trojúhelníky udávají pozice jednotlivých odpalů.

Jak bylo výše uvedeno, použití velkého počtu registračních stanic umožňuje nejen profilové zpracování, ale také zjišťování azimutálních variací charakteristik šíření vln, či v nejpříznivějším případě přímé zjišťování parametrů anizotropie geologického prostředí. V tomto případě využívá interpretace pouze vlny Pg, refragované v kůře. Azimutálně závislou rychlost šíření Pg vln je možné vysvětlit regionální anizotropií prostředí a s výhodou ji studovat pomocí jednoduchých modelů anizotropie. Vyhodnocení dat naměřených v průběhu experimentu CELEBRATION 2000 přineslo zajímavé výsledky [5]. Rychlost šíření vln vykazuje systematické azimutální variace, indikující efektivní regionální anizotropii Českého masívu. Minimální, resp. maximální rychlosti šíření Pg vln jsou $v_{\min} = 5.98$ km/s, $v_{\max} = 6.10$ km/s, koeficient anizotropie je 1.5% - 2.5%. Směr maximální rychlosti šíření SV-JZ dobře souhlasí se směrem kolmým k orientaci maximálního kompresního napětí ve střední Evropě, podle kterého se zároveň do Českého masívu dobře šíří seismická energie silných alpských a severoitalských zemětřesení. Bližší diskuse výsledků inverze vede k závěru, že efektivní anizotropie není způsobena nespojitostmi geologického prostředí, nýbrž je s největší pravděpodobností důsledkem přednostní orientace minerálních komponent horninového prostředí a uspořádanou stavbou geologických jednotek.

Závěr

V porovnání s minulými refrakčními experimenty provedenými ve střední Evropě v 60. a 70. letech jako tzv. hlubinné seismické sondování [11] se soubor dat získaný ze současných seismických projektů na přelomu tisíciletí vyznačuje lepším pokrytím zájmového území, digitální formou záznamu všech seismických vln a možností i mimoprofilového zpracování. Naproti tomu vydělení užitečných vln ve vlnových obrazech znesnadňuje poměrně řídké rozmístění seismických stanic i bodů odpalu. Tyto parametry experimentu určují hloubkové a laterální rozlišení dosažitelné ve výsledných rychlostních řezech nezávisle na aplikovaných metodách. Digitální forma naměřených

dat však umožňuje jejich pozdější doplňování. Plné využití potenciálu získaných dat není tedy jen současnou záležitostí, ale i stálou výzvou do budoucna.

Literatura

- [1] Brueckl E., Bodoky T., Hegedus E., Hrubcová P., Gossar A., Grad M., Guterch A., Hajnal Z., Keller G.R., Špičák A., Sumanovac F., Thybo H., Weber F., ALP2002 Working Group, Stud. Geophys. Geod. 47, 671 (2003)
- [2] Grad M., Špičák A., Keller G.R., Guterch A., Brož M., Hegedus E., SUDETES 2003 Working Group, Stud. Geophys. Geod. 47, 681 (2003)
- [3] Guterch A., Grad M., Thybo H., Keller G. R., POLONAISE Working Group, Tectophysics 314, 101 (1999)
- [4] Guterch, A., Grad M., Keller G.R., Posgay K., Vozar J., Špičák A., Brueckl E., Hajnal Z., Thybo H., Selvi O., CELEBRATION 2000 Experiment Team, Stud. Geophys. Geod., 47, 659 (2003)
- [5] Růžek, B., Vavryčuk V., Hrubcová P., Zedník J., CELEBRATION Working Group, J.Geophys.Res., 108(B8), 2392 (2003)
- [6] Hole, J.A., J. Geophys. Res. 97, 6553 (1992)
- [7] Novotný M., J.Geophys., 7 (1981)
- [8] Nowack R.L., Braile L.W., *Seismic Tomography*. Chapman and Hall, London (1993)
- [9] Červený, V., Pšenčík I., *SEIS83 - Numerical Modelling of Seismic Wave Fields in 2-D Laterally Varying Layered Structures by the Ray Method*. World Data Center , Boulder, 36-40, 1984.
- [10] Fuchs K., Müller G., Geophys. J. R. Astron. Soc. 23, 417 (1971)
- [11] Červený V., Čs. čas. fyz. A34, 236 (1984)