

Zemětřesení a seismologické observatoře

Jan Zedník, Axel Plešinger, Geofyzikální ústav AV ČR Praha, Boční II/1401, 141 31 Praha 4

Jana Pazdírková, Ústav fyziky Země Masarykovy University Brno, Tvrdého 12, 602 00 Brno

ÚVOD

Zemětřesení je krátkodobý převážně zlomový proces, při kterém se do zemského tělesa vyzařují pulzní, tj. širokopásmové rozruchy. Elastické vlny jsou při svém šíření vertikálně i horizontálně nehomogenní Zemí odraženy, lámány, rozptylovány a tlumeny. Na zemském povrchu tak registrujeme komplikované vlnové obrazy složené z mnoha fází, jejichž dominantní frekvence se v závislosti na rozměrech a dynamice ohniskového procesu a na vzdálenosti od něho pohybují od desítek Hz (prostorové vlny lokálních mikrozemětřesení) až po stovky sekund (povrchové vlny silných regionálních a globálních zemětřesení). Amplitudy seismických vln, vyjádřené v jednotkách zrychlení půdy, sahají od desítek nm/s^2 (povrchové vlny slabých vzdálených seismických jevů) až po hodnoty zemského tíhového zrychlení (prostorové vlny velmi silných blízkých zemětřesení). Na jediném místě se tak seismické signály, pomocí nichž seismologové studují procesy v ohnisku zemětřesení a stavbu zemského tělesa [1], mohou lišit frekvenčně o více než čtyři dekády a amplitudově až o 180 dB ($10^9:1$). Zaznamenat věrně tak obrovský rozsah pohybů půdy a frekvencí vyžaduje moderní technické prostředky – širokopásmové seismometrické systémy s velkým dynamickým rozsahem a digitální registrační zařízení. Za posledních dvacet let došlo k prudkému rozvoji počítačové i měřicí techniky. Cílem tohoto článku je nastínit současný stav registrace zemětřesení moderními seismickými stanicemi.

SEISMOLOGICKÉ OBSERVATOŘE A DATOVÁ CENTRA

Stálé seismologické observatoře jsou zřizovány pro nerušená dlouhodobá pozorování seismických jevů – od lokálních mikrozemětřesení přes odpaly průmyslových náloží v blízkých lomech, důlní otřesy vyvolané hornickou činností až po silná vzdálená zemětřesení. Na observatořích jsou umístěny analogové snímače pohybů půdy – seismometry, a registrační zařízení.

Moderní seismometry fungují na principu frekvenčně závislé záporné zpětné vazby. Relativní výchylka setrvačné hmoty vůči pohybům půdy je pomocí kapacitního snímače posunutí s rozlišovací schopností setin nanometru převedena na elektrický signál. Zesílený signál je přiveden přes zpětnovazební obvod do elektromagnetického měniče, který jej přemění na sílu působící na setrvačnou hmotu v opačné polaritě než pohyby půdy. Záporná zpětná vazba zvětšuje linearitu a rozšiřuje propustné frekvenční

pásmo seismometrického systému. Systém lze libovolně přetlumit a realizovat tak např. širokopásmovou charakteristiku plochou pro rychlost půdy. Setrvačná hmota je udržována v nulové poloze při velmi dlouhoperiodických signálech, např. při náklonech či slapových pohybech zemské kůry. Dociluje se tak příznivých vlastností přenosu celého systému ve frekvenčním pásmu zhruba 30 Hz až 300 s. Na popsaném principu dnes pracuje většina komerčně dostupných seismometrických systémů (např. STS od firmy Wieland/Streckeisen [2]) pro širokopásmová globální, regionální i lokální pozorování.

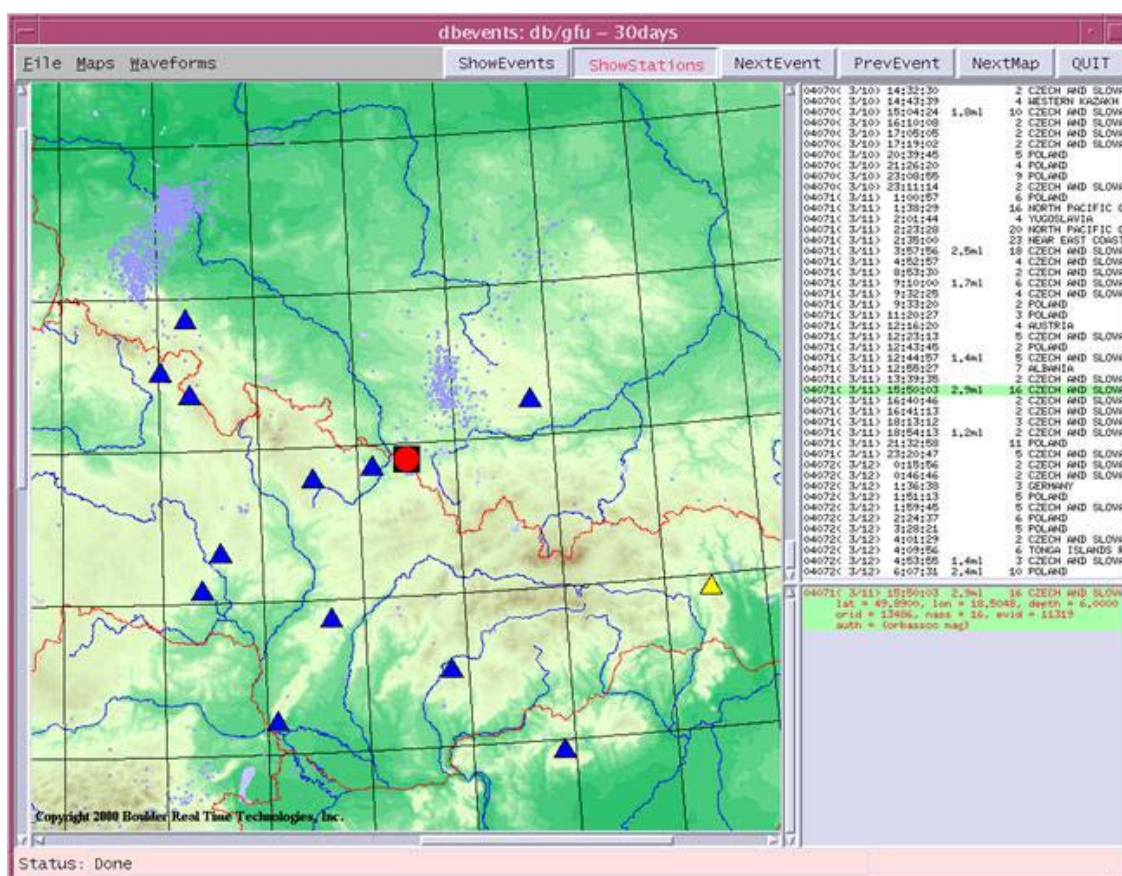
Díky evakuaci vnitřního prostoru seismometru a jeho důslednému odstínění vůči změnám magnetického pole a teploty jsou tyto systémy schopny zaznamenat v uvedeném frekvenčním pásmu všechny seismické signály od úrovně šumu na seismicky nejklidnějších místech na zemském povrchu až po pohyby půdy s amplitudami 1,5 cm/s, což přibližně odpovídá zemětřesení o velikosti 5 na Richterově stupnici v epicentrální vzdálenosti deseti kilometrů. Pro citlivé seismometry jsou budovány betonové pilíře ukotvené do pevného podloží nezávisle na konstrukci okolní budovy nebo jsou seismometry speciální konstrukce spouštěny do vrtů. Seismometry umístěné na pilířích jsou obvykle chráněny navíc proti rušivým výkyvům teploty a tlaku vnějšími izolačními kryty.

Registrační zařízení má za úkol digitalizaci analogových signálů naměřených seismometry a jejich uložení na pevný disk nebo jiné záznamové médium v jednom ze standardních seismologických datových formátů. Digitalizace se realizuje vícekanálovými analogově-číslicovými převodníky, které pracují s rozlišením 24 bitů (starší aparatury mívají rozlišení 16 bitů). Nejrozšířenější digitální záznamová aparatura Quanterra vybavená 24 bitovým převodníkem s dynamickým rozsahem 144 dB je používána na stovkách stanic po celém světě. Přesná časová informace je zajišťována pomocí GPS nebo DCF přijímačů. V současné době již zpravidla registrační zařízení na stanici předává data v reálném čase přes Internet, radiotelemetrii či satelitním spojením do datového centra. U autonomně registrujících stanic bez každodenní kontroly kvality signálu v datovém centru totiž hrozí nebezpečí výpadků a ztráty neopakovatelných dat. Registrační zařízení je napájeno z baterií, aby případné výpadky elektrické sítě neohrozily nepřerušovaný záznam seismických signálů.



Obrázek 1. 24 bitový digitizér EarthData a registrační zařízení SeisComp, kterými je vybavena většina seismologických observatoří Geofyzikálního ústavu AV ČR.

Seismologická datová centra plní celou řadu funkcí: sběr dat ze seismologických observatoří a jejich archivaci, interpretaci seismických signálů a tvorbu bulletinů a katalogů zemětřesení, mezinárodní výměnu digitálních dat a parametrů registrovaných seismických jevů [3]. Pro sběr dat a výměnu digitálních signálů v reálném čase mezi datovými centry se v současné době používají programy Antelope a SeedLink. **Antelope** je komerční produkt obsahující sadu nástrojů na sběr, archivaci a výměnu dat v reálném čase, vizualizaci seismických signálů a interpretaci dat. Údaje o seismických stanicích, adresy digitálních souborů a interpretovaná data jako jsou lokalizace zemětřesení, časy příchodů jednotlivých seismických vln a jejich amplitudy jsou uchovávány ve výkonné relační databázi. Program Antelope je využíván datovými centry v Geofyzikálním ústavu v Praze i v Ústavu fyziky Země v Brně ke sběru a k mezinárodní výměně dat s evropským datovým centrem ORFEUS v Holandsku a řadou dalších seismologických mezinárodních i národních center. Obrázek 2 znázorňuje automatickou lokalizaci silného důlního otřesu v Dole Lazy na Karvinsku, získanou pomocí programu Antelope. Seismické stanice v České republice a v okolích zemích přispěly k určení parametrů tohoto seismického jevu. **SeedLink** je nekomerční program vyvinutý v GeoForschungsZentrum v Postupimi, který je v Evropě hojně používán pro sběr, archivaci a mezinárodní výměnu dat v reálném čase. Umožňuje i zobrazování dat jednotlivých stanic v reálném čase, automatickou lokalizaci zemětřesení a tvorbu jednoduchých webových stránek. Hlavním úkolem je přenos dat pomocí Internetu nebo komunikačního kanálu, který emuluje Internet [4].



Obrázek 2. Jedna z výstupních obrazovek programu Antelope znázorňující polohu důlního otřesu o velikosti 2.9 na Richterově stupnici v Dole Lazy na Karvinsku dne 11. března 2004 (červeně), a seismické stanice použité pro lokalizaci (modře). Tabulka vpravo obsahuje výřez z databáze automatických lokalizací seismických jevů programem Antelope.

SEISMICKÉ SÍTĚ

Seismické stanice jsou sdružovány do tzv. seismických sítí. Hlavními úkoly seismické sítě je sledování seismicity studované oblasti, a případné vyhlášení alarmu po výskytu silných seismických jevů. V některých případech jsou seismické sítě zřizovány pro monitorování důležitých staveb jako jsou jaderné elektrárny nebo velké vodní nádrže. Základními informacemi poskytovanými seismickou sítí je lokalizace seismického jevu, tj. určení polohy epicentra a hloubky ohniska, a odhad jeho síly.

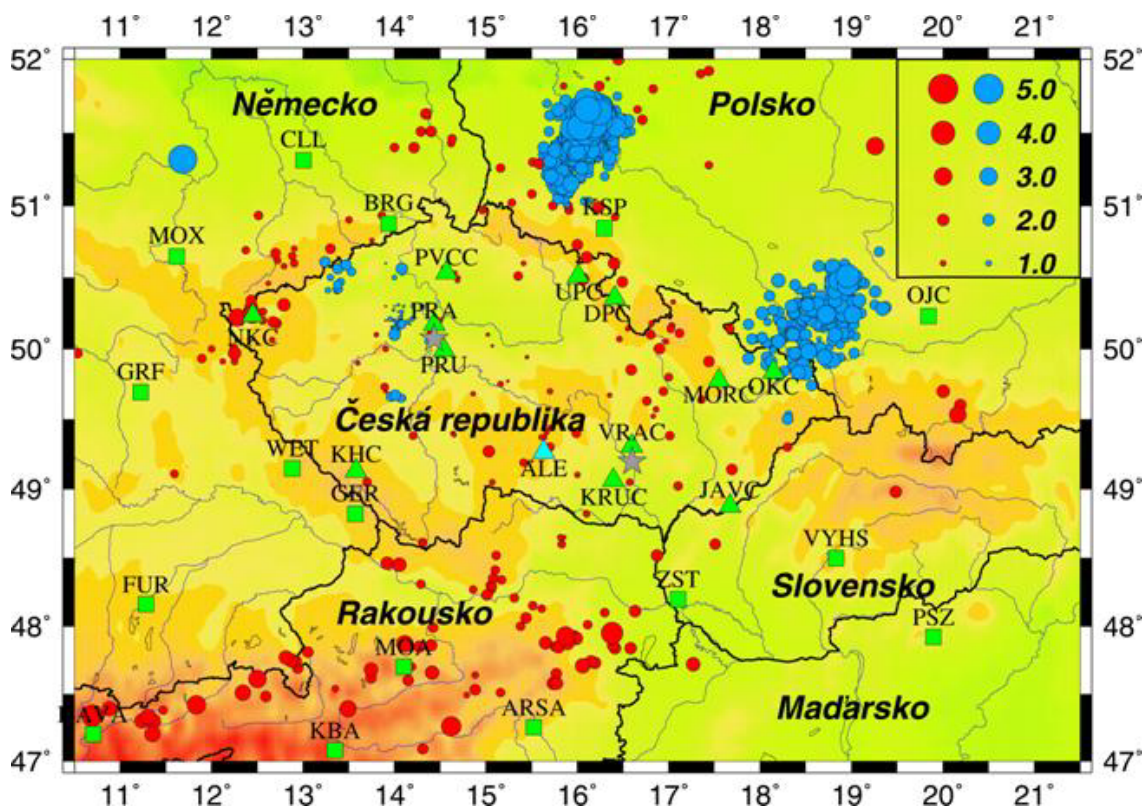
Podle velikosti oblasti, ve které jsou rozmístěny seismické stanice, lze seismickou síť rozdělit na lokální, regionální a globální. **Lokální seismická síť** jsou zaměřeny na sledování relativně malých oblastí. Na území České republiky existuje několik lokálních sítí, které mají nejrůznější účely. Lokální seismická síť Webnet a Krasnet sledují na Chebsku a Sokolovsku v západních Čech zemětřesné roje, které v této oblasti čas od času vznikají. V oblastech s intenzivní hornickou činností jako je

Slezská pánev jsou v jednotlivých dolech zřizovány lokální seismické sítě pro sledování důlních otřesů, které ohrožují těžbu i horníky v dolech. Připomeňme, že při důlním otřesu v Dole Lazy dne 11. března 2004 (Obr. 2) zahynulo sedm horníků. Jaderné elektrárny Temelín a Dukovany jsou vybaveny lokálními seismickými sítěmi, které nepřetržitě monitorují zemětřesnou aktivitu v okolí elektráren.

Regionální seismické sítě pokrývají větší území, v Evropě se zpravidla kryjí s národními seismickými sítěmi. Na území České republiky existuje více než deset stálých seismologických observatoří České regionální seismické sítě [5]. Stanice Praha je naše nejstarší fungující stanice. Byla založena na Karlově ve sklepě Matematické budovy University Karlovy v r. 1927. Vzhledem k silnému rušení ve středu města stanice registruje pouze silná zemětřesení a v současné době slouží hlavně k výuce studentů katedry geofyziky Matematicko-fyzikální fakulty UK. Stanice Cheb byla založena pro sledování zemětřesných rojů již v r. 1908, ale pro silný civilizační neklid byla v šedesátých letech zrušena.

Geofyzikální ústav Akademie věd ČR (dále GFÚ) zřídil na počátku 60. let stanice Průhonice (PRU) u Prahy a Kašperské Hory (KHC) na Šumavě. Na začátku 90. let vybudoval GFÚ ve spolupráci s Vojenským topografickým ústavem stanici Dobruška/Polom (DPC) v Orlických horách. Stanice DPC byla vybavena moderní digitální registrační aparaturou Quanterra a širokopásmovým seismometrem STS-2. Stanice Nový Kostel (NKC) byla zřízena Geofyzikálním ústavem v r. 1986 v průběhu silného zemětřesného roje v západních Čechách. Je vybavena jednak vysoce citlivou krátkoperiodickou aparaturou určenou k zachycení slabých lokálních tektonických otřesů, jednak širokopásmovou registrací. Stanice NKC je součástí lokální seismické sítě WEBNET, která monitoruje zemětřesnou aktivitu v oblasti Chebska, Sokolovska a v přilehlém Bavorsku a Sasku. GFÚ dále provozuje stanici Panská Ves (PVCC) a krátkoperiodickou stanici Úpice (UPC). Indukovanou seismicitu Slezské pánve vyvolanou hornickou činností sleduje stanice Ostrava/Krásné Pole (OKC). V r. 2003 byla většina seismologických observatoří Geofyzikálního ústavu modernizována a vybavena 24 bitovým digitizérem EarthData a registračním zařízením SeisComp, které jsou používány např. v seismické síti Geofon [6]. Data všech stanic jsou v reálném čase přenášena do datového centra GFÚ v Praze.

Čtyři stálé širokopásmové observatoře provozuje také Ústav fyziky Země Masarykovy university v Brně (dále ÚFZ). Vranov (VRAC) u Brna registruje od roku 1991 a v současnosti slouží jako pomocná stanice Mezinárodního monitorovacího systému pro kontrolu zákazu jaderných zkoušek. Stanice Moravský Beroun (MORC) na severní Moravě byla vybudována jako jedna ze stanic sítě Geofon pro sledování regionální seismicity a je v provozu od roku 1991. Seismickou aktivitu kontaktu Českého masivu a Západních Karpat monitorují od roku 1994 stanice Moravský Krumlov (KRUC) na jižní Moravě a Velká Javorina (JAVC) na pomezí ČR a Slovenska. Všechny stanice jsou vybavené širokopásmovými seismometry STS-2 a digitální registrací Quanterra. Data jsou nepřetržitě telemetricky přenášena do datového centra ÚFZ v Brně.

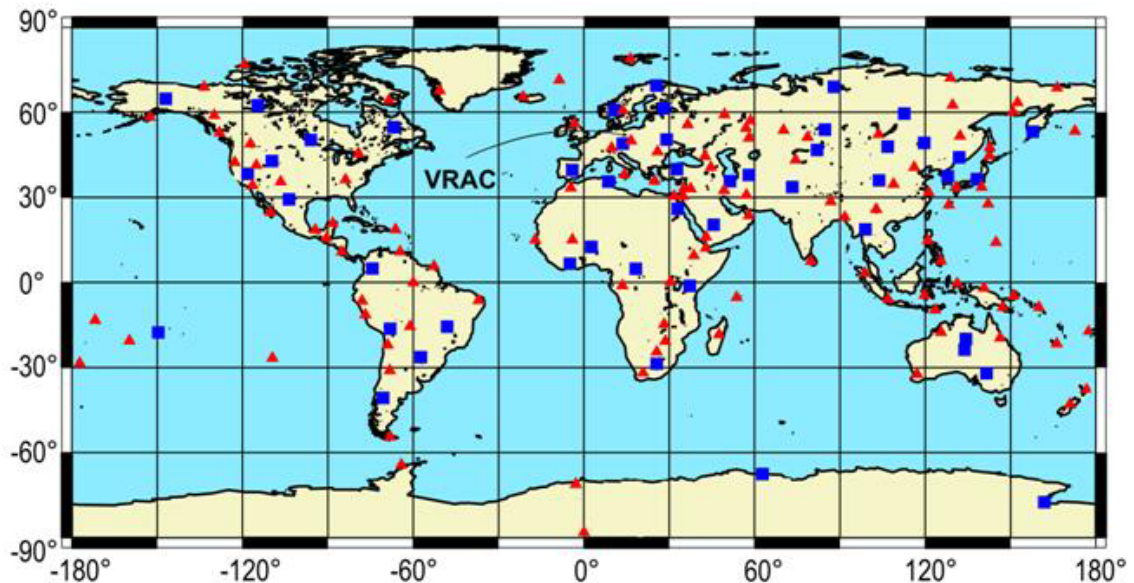


Obrázek 3. Stanice České regionální seismické sítě a sousedních států (zeleně), datová centra GFÚ Praha a ÚFZ Brno (šedě). Tektonická zemětřesení ve střední Evropě za období 1995-1999 jsou označena červeně, důlní otřesy modře, velikost symbolů je úměrná velikosti seismického jevu.

Globální seismické sítě jsou zřizovány mezinárodními datovými centry pro sledování seismicity zemského tělesa. Jednou z nejznámějších a nejkvalitnějších je Globální seismografická síť provozovaná USGS (United States Geological Survey) a konsorciem amerických institucí IRIS (Incorporated Research Institutions for Seismology), které se zabývají seismologií. Tuto síť tvoří 135 špičkových širokopásmových stanic, které jsou rozmístěny vcelku rovnoměrně po zemském povrchu v 59 zemích světa za spolupráce více než 100 organizací. Datové centrum konsorcia IRIS v Seattlu zajišťuje sběr dat, jejich archivaci a mezinárodní výměnu. Veškerá data uložená v datovém centru jsou přístupná seismologické komunitě pro badatelské potřeby pomocí celé řady mechanismů (požadavek elektronickou poštou, vyplněním formuláře na webu a pod.).

Jiným příkladem stálé globální sítě je Mezinárodní monitorovací systém pro verifikaci dodržování Smlouvy o úplném zákazu jaderných zkoušek (CTBTO – Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty). Seismické stanice této sítě jsou vybaveny moderním širokopásmovými snímačem a digitálním registračním zařízením. Data jsou pomocí satelitního spojení nepřetržitě v reálném čase shromažďována v Mezinárodním datovém centru ve Vídni, kde jsou zpracovávána a archivována. První automatická vyhodnocení se opírají o kontinuální záznamy 50 tzv. „primárních“ stanic, které byly vybudovány tak, aby pokud možno rovnoměrně pokrývaly zemský povrch. Ve střední Evropě je seismické monitorování zajištěno primárními stanicemi

GERES umístěnou v jižním Německu v těsné blízkosti hranic České republiky. Síť primárních stanic je doplněna 120 „pomocnými“ stanicemi (obr.4), které poskytují údaje pro zpřesnění lokalizace a identifikace jevů detekovaných primárními stanicemi. Jednou z těchto pomocných stanic je stanice VRAC, jejíž provoz je zajišťován Národním datovým centrem zřízeným na ÚFZ v Brně. Kromě sítě seismických stanic jsou do Mezinárodního monitorovacího systému zařazeny také stanice hydroakustické, infrazvukové a radionuklidové.



Obrázek 4. Současné rozmístění primárních (červeně) a pomocných stanic (modře) v rámci globální seismické sítě Mezinárodního monitorovacího systému (vyznačena je poloha stanice VRAC).

Mobilní seismické sítě jsou zřizovány na dobu několika měsíců nebo i roků ke studiu stavby zemské kůry a svrchního pláště v zájmové oblasti nebo pro monitorování dotřesových sérií významných zemětřesení. Mobilní sítě jsou vybaveny krátkoperiodickými nebo širokopásmovými seismometry a digitálním registračním zařízením podobně jako je tomu u stálých seismických stanic. Data jsou zaznamenávána lokálně na pevné disky nebo do „Flash“ paměti a pokud taková možnost existuje, jsou průběžně přenášena do datového centra ke zpracování a archivaci. Vzhledem k omezenému počtu mobilních aparatur ve vlastnictví jednotlivých datových center jsou organizovány mezinárodní experimenty za účasti více seismologických týmů. Příkladem takového projektu je experiment Bohema, při kterém bylo na území západních Čech a přilehlých oblastí Bavorska a Saska v období let 2001-2003 rozmístěno 152 seismických stanic [7].

Náklady na vybudování zázemí seismologické observatoře a nákup kvalitních seismometrů a moderního registračního zařízení dosahují milionových částek. Také provozní náklady na údržbu observatoří jsou nezanedbatelné. Množství seismických stanic na daném území je omezené a mnohdy nestačí ke spolehlivé lokalizaci

seismických jevů, zvláště za hranicí seismické sítě. Vznikla proto myšlenka **virtuální sítě**, kdy datové centrum využívá nejen data vlastních stanic, ale i stanice sousedních států nebo regionů. Díky dostupnosti většiny seismických stanic v reálném čase a rozvíjející se mezinárodní výměně je vybudování virtuální sítě snadnou záležitostí. Programy typu Antelope nebo SeedLink jsou k tomuto účelu v Evropě hojně využívány a umožňují automatický sběr dat z mnoha seismických stanic, lokalizaci zemětřesení a odhad jejich velikosti. Podstatně se tak zkrátila doba, za kterou jsou datová centra schopna reagovat po vzniku silných ničivých otřesů a informovat civilní ochranu a veřejnost.

LITERATURA

- [1] V. Červený, *Československý časopis pro fyziku* **5**, 433 (1983).
- [2] E. Wielandt, G. Streckeisen, *Bull. Seismol. Soc. Amer.* **72**, 2349 (1982).
- [3] P. Bormann (Editor): *IASPEI New Manual of Seismological Observatory Practice*, GeoForschungsZentrum Potsdam (2002).
- [4] W. Hanka, A. Heinloo, K.-H. Jäckel, *ORFEUS Electronic Newsletter* **2**, 21 (2000).
- [5] J. Zedník, J. Pospíšil, B. Růžek, J. Horálek, A. Boušková, P. Jedlička, Z. Skácelová, V. Nehybka, K. Holub, J. Rušajová, *Studia geophys. et geod.* **45**, 267 (2001).
- [6] W. Hanka, R. Kind, *Annali di Geofisica*, **37**, 1060 (1996).
- [7] J. Plomerová, U. Achauer, V. Babuška, M. Granet and BOHEMA Working Group, *Studia geophys. et geod.* **47**, 691 (2003).