

# Moderní trendy **seismického zabezpečení jaderných elektráren**

*Modern Trends in the Seismic Safety of Nuclear Power Plants*



**Slavomír Entler**

Ústav fyziky plazmatu  
Akademie věd ČR



**Jiří Málek**

Ústav struktury a mechaniky  
hornin Akademie věd ČR



**Johana Brokešová**

Katedra geofyziky  
Matematicko-fyzikální  
fakulty UK

**ABSTRAKT:** Seismické ohrožení je jedním z limitujících faktorů pro rozvoj jaderné energetiky. Nebezpečí, které představují velká zemětřesení a následné efekty, se jasně ukázalo při havárii japonské elektrárny Fukušima Daiči. Článek se zaměřuje na nové trendy snížení seismického rizika a pokročilé systémy seismické bezpečnosti jaderných elektráren. Pro monitoring seismických otřesů v okolí jaderných elektráren jsou vyvíjeny speciální seismografy. K tomu přispívají i čeští vědci, kteří vyvíjejí nový seismický senzor Rotafon, schopný registrovat celkem šest složek seismických pohybů půdy.

**KLÍČOVÁ SLOVA:** jaderná bezpečnost, zemětřesení, seismické zajištění, seismická izolace, seismické senzory, ITER, Rotafon

**ABSTRACT:** Seismic hazard is one of the limiting factors for the development of nuclear energy. Dangers posed by large earthquakes and subsequent effects are clearly demonstrated in the accident of the Japanese power plant Fukushima Daiichi. The article focuses on new trends of seismic hazard mitigation and advanced seismic systems ensuring the safety of nuclear power plants. For seismic monitoring around nuclear power plants, special seismographs are being developed. This is also supported by Czech scientists who develop new seismic sensor Rotafon, which is able to register a total of six components of seismic ground motion.

**KEYWORDS:** nuclear safety, earthquake, seismic protection, seismic isolation, seismic sensors, ITER, Rotafon

Jaderné elektrárny musejí být navrženy a postaveny tak, aby s vysokou pravděpodobností odolaly všem přírodním jevům i událostem vyvolaným lidskou činností. Bezpečnostní systémy musejí zajistit, aby byla v co největší míře zachována funkčnost jaderné elektrárny. I v případě velmi nepravděpodobných událostí musí být bezpodmínečně zajištěno bezpečné odstavení reaktoru. Přitom je třeba brát v úvahu i výjimečné situace, kdy nastane několik nepříznivých okolností najednou. Zvláště komplikované jsou situace, kdy dochází k řetězení nebezpečných událostí. Prvotní událost nemusí způsobit havárii, ale vede ke snížení odolnosti elektrárny vůči jinému nebezpečí.

Jaderná bezpečnost je podle atomového zákona č. 263/2016 Sb. definována jako stav a schopnost jaderného zařízení a osob obsluhujících jaderné zařízení zabránit nekontrolovatelnému rozvoji štěpné řetězové reakce nebo úniku radioaktivních látek anebo ionizujícího záření do životního prostředí a omezit následky takových nehod. Bezpečnostní systémy pro jaderné elektrárny nejsou jednou provždy dané, vyvíjejí se

společně s jadernou technologií. K tomu je ale nezbytné provádět celou řadu sofistikovaných měření. Atomový zákon požaduje zajistit havarijní připravenost jaderných elektráren, definovanou jako schopnost rozpoznat vznik mimořádné situace. Provozovatel jaderných elektráren musí sledovat, měřit, hodnotit, ověřovat a zaznamenávat veličiny, parametry a skutečnosti důležité z hlediska jaderné bezpečnosti, radiační ochrany, fyzické ochrany a havarijní připravenosti v rozsahu stanoveném prováděcími předpisy zákona. Mezi vyžadované činnosti patří také monitorování seismické aktivity v okolí jaderných elektráren, a to nejen při jejich provozu, ale také před jejich výstavbou při výběru lokality pro elektrárnu.

V historii jaderné energetiky, která se rozvíjí přibližně posledních 60 let, byla zaznamenána řada menších nehod a havárií. Mezinárodní agentura pro atomovou energii zavedla pro jejich klasifikaci systém INES (The International Nuclear Event Scale). Zatím dvě z jaderných havárií byly ohodnoceny stupněm INES 7 jako „velmi těžká havárie“. První z nich se odehrála v Černobylu

v Sovětském svazu v roce 1986. Za její primární příčinu byla označena chyba obsluhy. V jejím důsledku došlo k mnoha organizačním změnám v jaderných elektrárnách po celém světě. Ke druhé velmi těžké havárii došlo v elektrárně Fukušima Daiči v Japonsku v roce 2011. Její prvotní příčinou bylo blízké velké zemětřesení, které vyvolalo vlnu tsunami, jež zaplavila některá důležitá technologická zařízení. V reakci na tuto havárii se začala věnovat zvýšená pozornost seismickému ohrožení jaderných elektráren. Vlny tsunami jsou vybuzeny podmořskými zemětřeseními a jejich velikost záleží nejen na velikosti zemětřesení, ale také na charakteru pohybu na tektonickém zlomu, který zemětřesení generuje. Při horizontálním pohybu tsunami téměř nevzniká, naopak při vertikálním pohybu je buzení vlny maximální, přičemž směr pohybu je určen tektonickým napětím. Zemětřesení v Tóhoku s magnitudem 9,1, které způsobilo havárii ve Fukušimě, bylo čtvrtým nejsilnějším zemětřesením za posledních 110 let, kdy lze spolehlivě určit velikost zemětřesení z přístrojových dat. Bylo to poprvé v historii, kdy se zemětřesení s takto velkým magnitudem vyskytlo poblíž jaderné elektrárny. Příchod seismických vln k elektrárně spustil systém automatického odstavení reaktoru a díky tomu při zemětřesení nedošlo k bezprostřední fatální havárii. Bylo však přerušeno hlavní elektrické vedení do elektrárny a napájení důležitých systémů převzaly záložní zdroje. Samotné zemětřesení, i když jeho velikost přesáhla předpoklady, přestála elektrárna bez větších problémů a podle očekávání. Havárii způsobila až druhá vlna tsunami. První vlna tsunami měla výšku do 4 m a byla bezpečně odražena vlnolamem. Ochrana elektrárny vlnolamem a náspem byla navržena proti vlnám do 10 m. Druhá vlna ale měla výšku přes 14 m a zaplavila celý areál elektrárny. Při zaplavení elektrárny voda zatopila záložní zdroje elektrické energie umístěné v suterénních prostorách, na kterých byla v tom okamžiku elektrárna závislá, a zničila elektrické rozvody v areálu i v jeho okolí. Záplava areálu komplikovala pohyb pracovníků a techniky při realizaci provizorních elektrických vedení a havarijních dodávek chladicí vody. Zemětřesením a tsunami poničené silnice neumožňovaly dopravu náhradních elektrických generátorů z jiných míst, na leteckou přepravu byly generátory příliš těžké. Bez elektrické energie postupně přestaly fungovat chladicí systémy a došlo k přehřátí aktivních zón tří reaktorů doprovázenému uvolňováním vodíku. Výpadek monitorovacích a řídicích systémů omezil možnost obsluhy elektrárny adekvátně reagovat. V kontejnmentech byla kvůli možným problémům s vodíkem inertní dusíková atmosféra. Při spuštění havarijní ventilace se však vodík spolu s radioaktivními látkami dostal mimo kontejnment. Následné vodíkové exploze pak poškodily horní části reaktorových budov. Podrobný popis událostí při havárii i po ní lze nalézt v [1].

Zemětřesení je oproti jiným druhům přírodních nebezpečí, jako jsou povodně nebo tajfuny, specifické tím, že přichází zcela bez varování. Při vzniku zemětřesení v blízkém ohnisku zbývá několik desítek sekund, než k jaderné elektrárně dorazí ničivé seismické vlny. Těto časové prodlevy využívají tzv. systémy včasného varování, které mohou automaticky odstavit jaderný reaktor, vypnout některá zařízení a zmírnit tím škody při zemětřesení. Jejich využívání ale komplikuje značné riziko falešných poplachů, které mohou ve svém důsledku jadernou elektrárnu naopak ohrozit. Krátkodobá předpověď zemětřesení se přes velké úsilí seismologů stále nedaří. Je proto nutné, aby antiseismická opatření byla provedena při výstavbě jaderné elektrárny a byla při provozu jaderné elektrárny nepřetržitě funkční. Je nutné také počítat s druhotnými následky zemětřesení, jako jsou vlny tsunami, požáry, sesuvy, záplavy v důsledku přehrazení vodních toků atd., které mohou způsobit větší škody než samotné zemětřesení, jak tomu bylo i při havárii ve Fukušimě.

Díky pokroku seismologie je možné za předpokladu stacionární seismicity stanovit lokální seismické ohrožení, tedy pravděpodobnost síly otřesů v daném místě a daném časovém horizontu. Jaderná elektrárna pak musí být postavena s takovou odolností, aby bylo nebezpečí jejího poškození při zemětřesení velmi malé. Je však třeba mít na paměti, že seismické ohrožení se stanovuje především na základě zkušeností s minulými zemětřeseními v regionu jaderné elektrárny. Protože paměť lidstva není dostatečně dlouhá a geologické důkazy o zemětřesení nejsou zatím dostatečně přesné, je na mnoha místech určování seismického ohrožení značně složitou úlohou. Týká se to obzvláště regionů, kde jsou zemětřesení málo častá, ale nelze je zcela vyloučit. Za dobu životnosti každé jaderné elektrárny se obvykle v jejím okolí vyskytnou slabá zemětřesení. Tato zemětřesení sice nemohou elektrárnu nijak ohrozit, ale pokud je pečlivě monitorujeme, poskytují důležité informace o probíhajících tektonických procesech v regionu a také se z nich dá odhadnout, jaké účinky by na jadernou elektrárnu mělo silné zemětřesení. Na tomto podkladě je pak stanovení seismického ohrožení aktualizováno a je možné přijmout nová odpovídající opatření. Základními předpoklady jaderné seismické bezpečnosti je proto nejen použití seismicky odolných konstrukcí, ale také průběžné sledování lokální seismické aktivity.

### **Seismicky odolné konstrukce**

Tradičním přístupem k dosažení seismické odolnosti stavební konstrukce je použití velmi pevných stavebních prvků – zesílených sloupů, trámů a stěn odolných vůči zemětřesení. V posledních desetiletích je však trendem používat naopak deformovatelné prvky, které mohou seismické kmitání budov zmenšit. Zvláště se jedná o horizontální kmitání, které je pro většinu

budov nebezpečnější než vertikální pohyby. Zatímco tuhé konstrukce odolné proti otřesům přenášejí kmity na budovu, seismické izolace tyto kmity naopak absorbují. Seismicky izolované budovy se mohou při zemětřesení horizontálně pohybovat vůči povrchu Země, a otřesy tak výrazně tlumit (**obr. 1**). Díky tomu nedochází k tak silnému přenosu otřesů na stavební konstrukce budovy. Kmitání je transformováno do užšího frekvenčního pásma, pro které je pak možné odolnost budovy a zařízení optimalizovat [2].

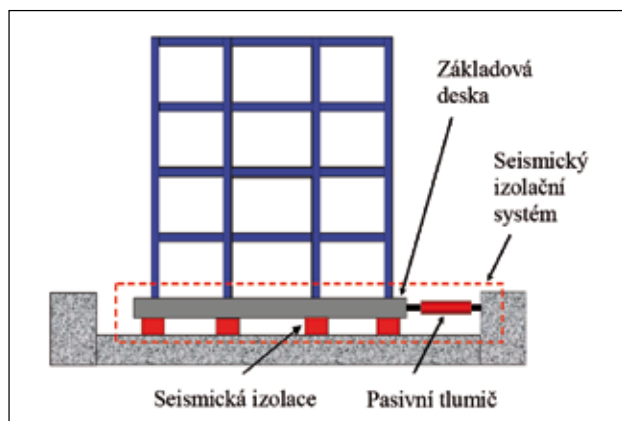
Seismická izolace má pro jaderné elektrárny rozhodující výhodu, protože působí jako tlumič vibrací chrání nejenom stavební konstrukce, ale také veškeré technologické vybavení. Mezi zemní základy a základovou desku stavební konstrukce je umístěna sestava podpěr a tlumičů absorbujících otřesy. Podpěry jsou vysoce pevné ve vertikálním směru, avšak flexibilní v horizontálním směru (**obr. 2**). První seismická izolace jaderného reaktoru byla instalována v elektrárně Koeberg zprovozněné v roce 1976 v Jihoafrické republice. Po ověření funkčnosti následovaly další jaderné elektrárny. V současnosti jsou seismické izolace instalovány pro největší fúzní reaktor na světě v rámci projektu

Experimentálního termojaderného reaktoru ITER, který je budován ve výzkumném středisku Cadarache v seismicky aktivní oblasti na jihu Francie.

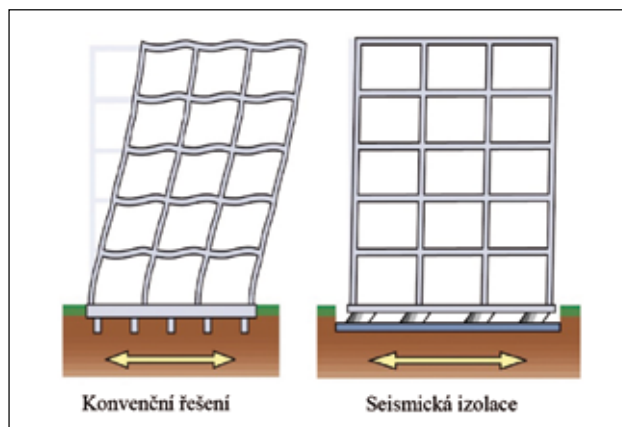
Fúzní reaktory se od dnešních jaderných reaktorů odlišují inherentní jadernou bezpečností. Ta je dána tím, že jaderná fúze nemůže v pozemských podmínkách probíhat samovolně, a proto je ve fúzní elektrárně fyzikálně vyloučená nekontrolovaná jaderná reakce. Únik paliva z reaktoru do ovzduší také nepředstavuje bezpečnostní riziko, protože jde pouze o několik gramů izotopů vodíku. Jde však o jaderné zařízení a je nezbytné v plné míře zajistit jeho jadernou bezpečnost včetně seismické ochrany.

Seismická izolace reaktoru ITER spočívá v uložení základové desky reaktorového komplexu o rozměrech 110 × 80 m na ocelí laminované elastomerní tlumiče [3]. Reaktorový komplex zahrnuje reaktorový kontejnment, tritiový kontejnment a budovu diagnostiky (**obr. 3**). Celkové trvalé zatížení sestavy izolátorů bude zhruba 300 tisíc tun. Rozmístění izolátorů bylo zvoleno na základě analýzy zatížení jednotlivých částí základové desky tak, aby bylo zatížení izolátorů rovnoměrné. Tlumiče jsou umístěny na železobetonových podstavcích, výška podstavců byla zvolena 1,65 m s ohledem na zajištění přístupu k tlumičům při jejich pravidelných kontrolách a údržbě (**obr. 4 a 13**).

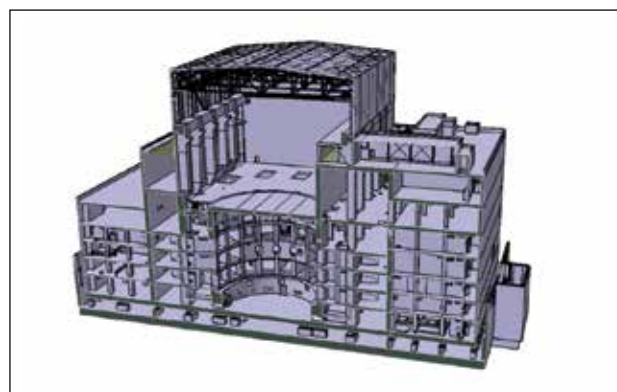
Vlastní tlumiče mají rozměr 900 × 900 × 181 mm a skládají se z 6 vrstev elastomeru o tloušťce 20 mm položených ocelovými plechy o tloušťce 5 mm a uložených mezi ocelové desky o tloušťce 15 mm. Každý tlumič je



Obr. 1: Schéma seismické izolace budovy [2]



Obr. 2: Redukce otřesů prostřednictvím seismické izolace. Seismicky izolované budovy se mohou při zemětřesení horizontálně pohybovat vůči povrchu Země, a otřesy tak výrazně tlumit [2]



Obr. 3: Reaktorový komplex ITER zahrnující reaktorový kontejnment, tritiový kontejnment a budovu diagnostiky je umístěn na společné seismicky izolované základové desce [3]

Tab. 1: Hlavní charakteristiky seismické izolace reaktoru ITER [4]

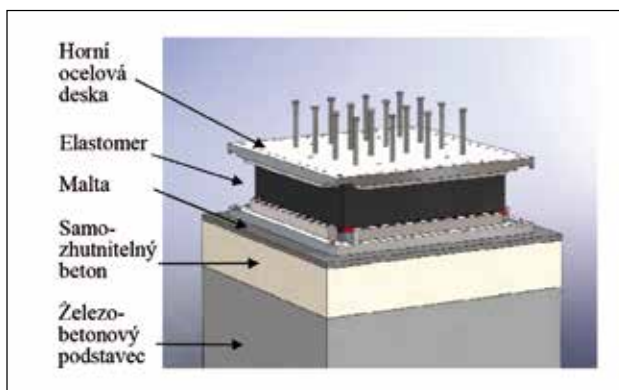
Statická distorze	$G_s = 0,97 \text{ MPa}$
Statická komprese	$K_s = 5\,200 \text{ MN/m}$
Dynamická distorze	$d_{bd} = 112 \text{ mm}$ , $f = 0,55 \text{ Hz}$ ; $G_s = 1,10 \text{ MPa}$ $d_{bd} = 112 \text{ mm}$ , $0,5 < f \text{ (Hz)} < 0,7$ ; $\xi > 6 \%$
Dynamická komprese	$f > 3 \text{ Hz}$ , $\pm 50 \%$ $N_{sg}$ ; $K_{sg} = 5\,200 \text{ MN/m}$ $f > 3 \text{ Hz}$ ; $\xi > 6 \%$

následně osazen přes maltový podklad na dolní nosnou desku a přiklopen horní nosnou deskou. Nosné desky mají rozměry 1 100 × 1 100 × 38 mm (obr. 5). Elastomerní izolátor je klasifikován jako typ C podle EN1337-3 2005. Celkem je použito 493 tlumičů, tolerance horizontálního uložení tlumičů je menší než 1 mm/m. Hlavní charakteristiky izolace jsou uvedeny v tab. 1. Postup instalace tlumičů dokumentují obr. 6–13.

### Seismické monitorování

Seismické monitorování jaderných elektráren je specifická úloha, která vyžaduje speciální metodiku

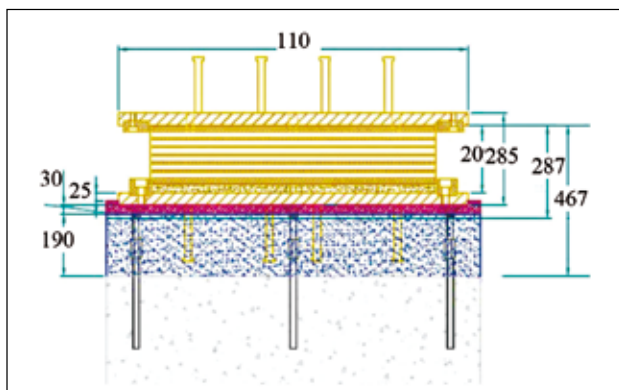
a vhodný typ seismografů. Je třeba splnit několik požadavků, které jsou často ve vzájemném protikladu. Potřebujeme totiž měřit velmi slabá zemětřesení v okolí jaderné elektrárny, avšak elektrárna sama produkuje poměrně silný seismický šum, který tuto snahu komplikuje. Chceme měřit co nejbližší jaderným reaktorům, abychom byli schopni stanovit jejich odezvu na seismické pohyby, avšak právě tam je seismický šum nejsilnější. Seismické otřesy je také nutné měřit v širokém pásmu frekvencí. Nízké frekvence (řádově 0,1 Hz) mohou být nebezpečné například pro liniové stavby, jako je potrubí, na druhé straně na některá technologická zařízení mohou mít vliv i otřesy s frekvencemi několika



Obr. 4: Konstrukce seismického izolátoru [4]



Obr. 7: Dokončené seismické izolátory



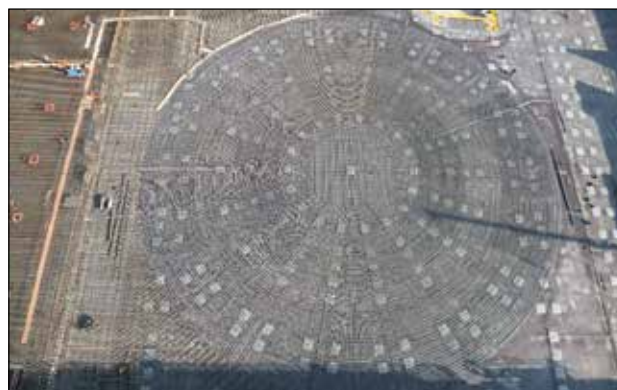
Obr. 5: Příčný řez tlumičem [4]



Obr. 8: Rozmístění izolátorů pod reaktorem



Obr. 6: Montáž tlumiče na betonový podstavec



Obr. 9: Bednění a první vrstva armování základové desky

desítek Hz. Potřebujeme tak provádět vysoce citlivá, širokopásmová seismická měření neovlivněná seismickým šumem.

Klasické seismografy obvykle měří pouze tři složky seismických pohybů, tzv. translační složky, tedy posunutí ve svislém směru a ve dvou navzájem kolmých vodorovných směrech. Na technologická zařízení však mohou mít značný vliv i rotační pohyby, tedy náklony a otáčení kolem svislé osy. Pro měření těchto složek je určen nový prototyp krátkoperiodického šestisložkového seismického senzoru (**obr. 14**), který byl pojmenován Rotaфон a který vyvíjí Matematicko-fyzikální fakulta UK ve spolupráci s Ústavem struktury a mechaniky

hornin AV ČR [5]. Tento přístroj je chráněn českým patentem a v současné době probíhají jeho testy u nás, v Řecku, na Islandu, ve Švýcarsku a v USA (**obr. 15**). Zatímco technologie tlumičů seismických pohybů byla již použita v praxi, v případě registrace rotačních složek seismických pohybů se pohybujeme v oblasti základního výzkumu.

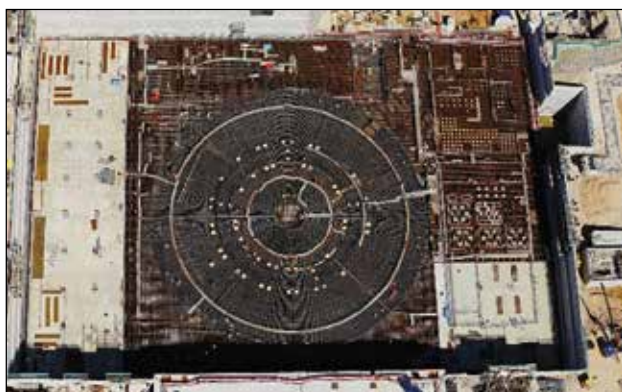
Principem přístroje je měření pomocí rovnoběžných dvojic vysoce citlivých geofonů, které jsou připevněny k tuhé kostře. Geofony měří mechanické kmity na principu pohybu cívky v magnetickém poli a převádějí je na elektrický signál. Nejnovější prototyp Rotaфон-D využívá osm horizontálních a osm vertikálních geofonů.



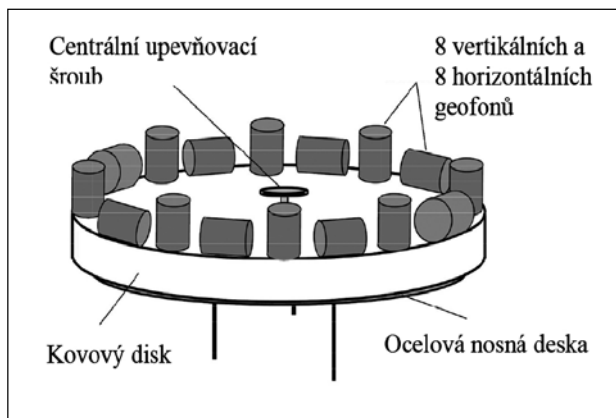
Obr. 10: Detail horní desky izolátorů



Obr. 13: Prostor seismických izolátorů pod základovou deskou



Obr. 11: Kompletní armování základové desky o tloušťce 1,5 m



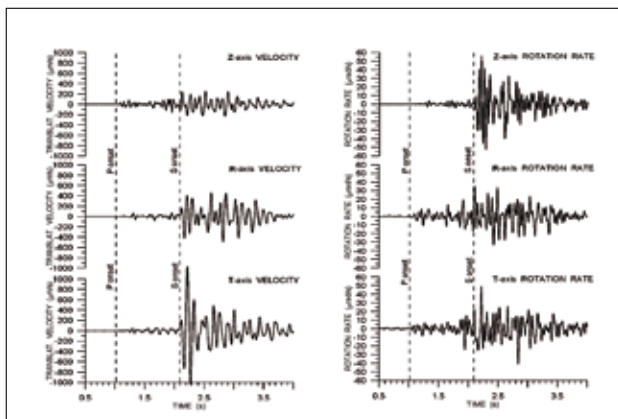
Obr. 12: Ukončená základová deska



Obr. 14: Schéma a fotografie seismického senzoru Rotaфон-D



Obr. 15: Měření Rotafonem v terénu a místa testování senzorů v Kalifornii



Obr. 16: Ukázka dat poskytovaných Rotafonem. Ohnisko mikrozemětřesení o magnitudu 2,2 v lokalitě geotermální elektrárny The Geysers v Kalifornii se nacházelo v hloubce 3 km a jeho epicentrum bylo ve vzdálenosti necelých 7 km

Přístroj tak může odlišit translační pohyb, při kterém je signál z rovnoběžných snímačů shodný, od rotačního pohybu, při kterém rovnoběžné geofony dávají opačný signál, a poskytuje šestisložkový záznam seismického pohybu (obr. 16).

Rotafony tak umožňují komplexní měření dvou typů seismických pohybů vzhledem ke třem navzájem kolmým osám. Doposud nedetekované krátkoperiodické seismické náklony a rotační torzní pohyby mohou hrát důležitou roli při vyhodnocení seismického ohrožení a přispět k charakterizaci účinků zemětřesení v lokalitě elektrárny. Po otestování zařízení a kritickém vyhodnocení metodiky měření mohou Rotafony přispět ke zvýšení bezpečnosti jaderných elektráren.

### Závěr

Zvládnutí seismického ohrožení je jednou z podmínek dalšího bezpečného rozvoje jaderné energetiky. Částečně bude tento problém vyřešen lepší konstrukcí budoucích elektráren a inherentní bezpečností elektráren na bázi jaderné fúze. Přesto musí být kladen velký důraz na pokročilé technologie zmírňující otřesy při zemětřeseních a na odpovídající seismické monitorování umožňující stanovit charakteristiky zemětřesení, kterému elektrárny musejí odolávat. Při modelování účinků zemětřesení na stavby a technologická zařízení je třeba

brát v úvahu kromě seismických translačních pohybů také seismické náklony a torzi. Tím se zabývá nový obor rotační seismologie, který se rozvíjí v posledních dvaceti letech.

### Poděkování

Autoři děkují oběma recenzentům za přínosná doporučení a V. Wagnerovi, autorovi knížky Fukušima I poté, za pomoc při popisu havárie ve Fukušimě. Převzaté fotografie výstavby reaktoru ITER byly použity s laskavým svolením ITER Organization ([www.iter.org](http://www.iter.org)). Publikovaný šestisložkový seismogram byl pořízen při měřeních v USA za podpory Komise J. W. Fulbrighta a grantového projektu GAČR P210-15-02363S. Aktivita byla podpořena Strategii Akademie věd AV21 v rámci výzkumného programu „Systémy pro jadernou energetiku“.



### Literatura:

- [1] V. Wagner. Fukušima I poté. *Novela Bohemica* 2015.
- [2] M. D. Symans. *Seismic protective systems: Seismic isolation. Instructional Material Complementing FEMA 451, Design Examples, FEMA USA* 2007.
- [3] M. B. Syed et al. *The challenging requirements of the ITER anti seismic bearings. Nuclear Engineering and Design* 269 (2014) 212–216.
- [4] S. Diaz. *How to isolate a NPP? Training course on seismic protection of lead-cooled reactors, Nuvia, Italy* 2012.
- [5] Brokešová J. a Málek J (2013). Rotaphone, a Self-Calibrated Six-Degree-of-Freedom Seismic Sensor and Its Strong-Motion Records. *Seismol. Res. Let.*, Vol. 84, No. 5, 737-744, DOI: 10.1785/0220120189.

**Ing. Slavomír Entler** – pracuje v Ústavu fyziky plazmatu Akademie věd ČR. Zabývá se vývojem diagnostických přístrojů pro fúzní reaktory a problematikou integrace fúzních reaktorů do energetiky.

**RNDr. Jiří Málek, PhD.** – je vědeckým pracovníkem v oddělení seismotektoniky Ústavu struktury a mechaniky hornin Akademie věd ČR. Zabývá se seismologií, výzkumem lokální seismicity a vývojem nových metod pro seismická měření.

**doc. RNDr. Johana Brokešová, CSc.** - je docentkou na Katedře geofyziky Matematicko-fyzikální fakulty Univerzity Karlovy. Zabývá se šířením seismických vln, jejich simulací a vývojem nových seismických senzorů.

Recenze: **RNDr. Petr Kolář, CSc.,**  
**Mgr. Petr Špaček, PhD.**