

**Univerzita Karlova v Praze
Přírodovědecká fakulta**



Zemetrasná aktivita na zlome San Andreas

Bakalárska práca

Jana Voroňáková

Praha 2011

Pod'akovanie

Rada by som sa poďakovala svojmu vedúcemu bakalárskej práce [Doc. RNDr. Janu Vilhelmovi, CSc.](#) za cenné rady, podnetné návrhy a čas, ktorý mi venoval.

Prehlásenie

Prehlasujem, že som bakalársku prácu vypracovala samostatne s použitím uvedenej literatúry.

Praha, 2011

Jana Voroňáková

Podpis:

ABSTRAKT:

Táto práca sa zaoberá zlomom San Andreas ako tektonicky aktívnou oblasťou. Zahŕňa základné informácie o zlome, jeho vzniku a histórii. Ukazuje, ako sa v súčasnosti vedci pokúšajú bojovať s rizikom blížiaceho sa zemetrasenia.

Popísaný je projekt San Andreas Fault Observatory at Depth a jednotlivé predpovedania výskytu nasledujúceho zemetrasenia na zlome.

SUMMARY:

This work deals with the San Andreas fault as a tectonically active area. It includes basic information about the fracture, its origins and history. The work shows, as scientists are now trying to combat the risk of impending earthquakes.

Project of San Andreas Fault Observatory at Depth and individual predictions of the next earthquake rupture are described.

OBSAH:

1. Úvod
2. Základné informácie o zlome San Andreas
 - 2.1 Vznik a vývoj zlomu
 - 2.2 Pohyb na zlome
 - 2.3 Zemetrasenia na zlome San Andreas
 - 2.3.1 Zemetrasenie
 - 2.3.2 Intenzita, magnitúdo, škály
 - 2.3.3 Historické zemetrasenia na zlome
 - 2.3.4 Charakteristické zemetrasenia
3. Seizmológia vo vnútri zlomu
 - 3.1 Vrtanie do zlomu San Andreas
 - 3.2 SAFOD (San Andreas Fault Observatory at Depth)
 - 3.3 Vertikálne seizmické profilovanie na zlome San Andreas
 - 3.3.1 VSP
 - 3.3.2 VSP a SAFOD
4. Predpovedanie zemetrasenia
 - 4.1 Numerické simulácie
 - 4.2. Virtual California
5. Záver
6. Použitá literatúra
7. Apendix A
8. Apendix B
9. Apendix C

1. Úvod

Zemetrasenia patria k najničivejším prírodným fenoménom na Zemi. To platí nielen čo sa týka počtu obetí a miery škôd, ale i pre veľkosť zasiahnutého územia. K tomu tiež prispieva i psychologický faktor. Ročne sa priemerne vyskytnú dve veľké zemetrasenia, ktorých dôsledkom býva materiálna skaza a ťažké straty na životoch. I v súčasnej dobe, cez pokroky vo výskume seizmiky a dynamiky Zemskeho telesa, je predpoveď zemetrasenia a ochrana pred touto katastrofou stále veľmi obtiažna.

Geografické rozmiestnenie ohnisk zemetrasenia je dosť nerovnomerné. Zaujímavé je, že zemetrasením je postihnutá asi 1/10 Zemskeho povrchu, ale hazardu otrasu musí čeliť zhruba polovica svetovej populácie. Z toho vyplýva, že často veľmi husto osídlené oblasti sa nachádzajú na územiach ohrozených rizikom tejto katastrofy. Hlavne seizmické oblasti jsou viazané na všetky typy rozhraní litosferických dosiek.

Veľmi známou oblasťou, kde dochádza k takmer neustálym pohybom na doskovom rozhraní, je transformný zlom San Andreas na západe USA.

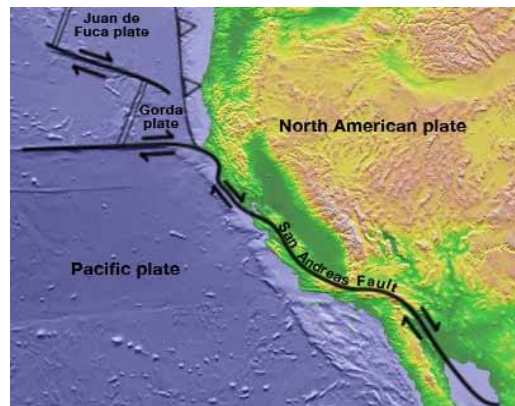
San Andreas, jeden z najstarších a najlepšie pozorovateľných zlomov v zemskej kôre, oddeľuje Kaliforniu a Mexiko od ostatného Severoamerického kontinentu.

Kalifornskí seizmológovia už dávnejšie varujú pred príchodom obrovského zemetrasenia, ktoré by malo byť len otázkou času a mohlo by pripraviť o život tisícky ľudí. Súčasná štúdia odhadujú, že vážne zemetrasenie o sile minimálne 6,7 stupňa Richtrovej stupnice zasiahne v najbližších 30 rokoch Kaliforniu s istotou až na 99%.

Cieľom mojej práce je zoznámiť sa so zlomom San Andreas a ukázať ako Kalifornia bojuje s rizikom prichádzajúceho zemetrasenia skúmaním tohto zlomu.

2. Základné informácie o zlome San Andreas

San Andreas je geologické zlomové pásmo prebiehajúce od San Franciska na juh až po San Diego v Kalifornii. Zlom tvorí hranicu medzi Pacifickou a Severoamerickou litosferickou doskou (Obr.1). Kvôli pohybu týchto dosiek je to miesto zvýšenej frekvencie zemetrasení.



Obr.1. Zlom San Andreas oddelujúci Pacifickú litosferickú dosku od Severoamerickej (zdroj: <http://geomaps.wr.usgs.gov>).

Celé zlomové pásmo San Andreas tvorí rozsiahla komplikovaná sieť zlomov lemujúca východné kalifornské pobrežie. Systém je viac ako 1300 km dlhý, 10 km široký a siaha do hĺbky cez 16 km do vnútra Zemskej kôry (Wallace, 1990). Podrobnú mapu celého zlomového pásma pripájam v Apendixe A.

Delí sa na tri základné segmenty (Obr.2):

- Južný segment (zvaný tiež aj Mojave segment) začína v blízkosti Saltonského mora, pokračuje severozápadným smerom až k pohoriu San Bernardino, pokračuje ďalej pozdĺž južnej časti tohto pohoria k severnej časti pohoria San Gabriel. Toto pohorie je výsledkom pohybu na zlome.
- Centrálny segment prebieha severozápadným smerom od Parkfieldu po Hollister. Tento segment predstavuje fenomén zvaný aseizmické plúženie. Zlom sa posúva pomaly a bez spôsobovania veľkých zemetrasení.
- Severný segment začína pri Hollistri, pokračuje cez San Franciský poloostrov severozápadným smerom pozdĺž pobrežia Kalifornie, v blízkosti Mysu Mendocino zabočí doľava a končí v spojení Mendocino (<http://geology.about.com>)



Obr.2. Severný (Northern SAFZ), Centrálny (Central SAFZ) a Južný (Southern SAFZ) segment zlomu San Andreas (zdroj: <http://geomaps.wr.usgs.gov>).

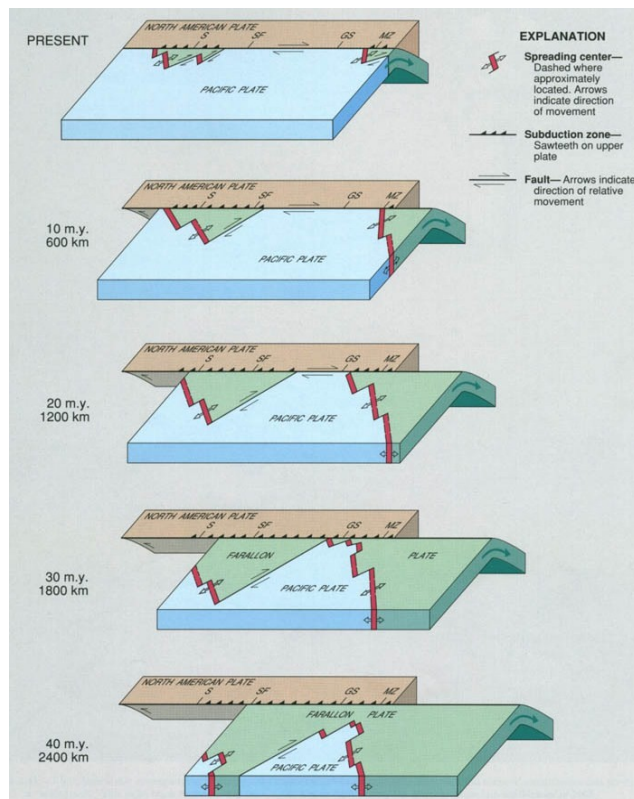
2.1 Vznik a vývoj zlomu

Pred viac ako 30 miliónmi rokmi sa východný okraj západne sa pohybujúcej Faralonovej litosferickej dosky (v súčasnosti nazvanej Gorda doska) stretol so západným okrajom Severoamerickej dosky (Atwater, 1970).

Oceánicka Farralonova doska bola na tomto rozhraní subdukovaná pod kontinentálnu Severoamerickú litosferickú dosku (Obr.3). V tom istom čase, opačný okraj Faralonovej dosky divergoval od dosky Pacifickej, situovanej na západe pozdĺž stredoocéánskeho chrbátu. Rýchlosť konvergencie bola väčšia ako rýchlosť rozširovania sa pozdĺž tohto stredoocéánskeho chrbátu. To spôsobilo pohyb chrbátu smerom k subdukujúcej zóne.

Približne pred 30 miliónmi rokmi, počas stredného Oligicénu, stredoocéánsky chrbát medzi Faralonovou a Pacifickou doskou začal subdukovať pod západný okraj Severoamerickej dosky pozdĺž severo-južne smerujúcej Kordilierskej subdukčnej zóny. Následkom toho sa Faralonská litosferická doska rozdelila na dve menšie, severnú Juan de Fuca dosku a južnú Kokosovú dosku. Pacifická, Juan de Fuca a Kokosová doska pokračovali v subdukcii, pozdĺž subdukčnej zóny sa formovali a oddeľovali od seba navzájom dve spojenia troch litosferických dosiek. Severné Mendocino spojenie spájalo Pacifickú, Juan de Fuca a Severoamerickú dosku a južné Rivera spojenie spájalo dosku Kokosovú, Severoamerickú a Pacifickú.

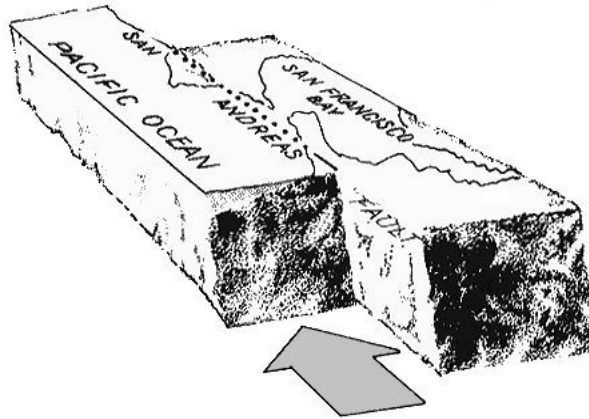
Keď Severoamerická litosferická doska narazila na Pacifickú, relatívny pohyb medzi nimi spôsobil vyvíjanie sa konvergentného rozhrania pozdĺž tejto časti Severoamerickej dosky v transformné rozhranie. Pacifická doska sa pohybuje severozápadným smerom relatívne k Severoamerickej doske a Juan de Fuca a Kokosová doska sa pohybujú juhovýchodne. Tento relatívny pohyb sa prejavuje na zlome San Andreas ako pravostranný horizontálny posun. Celkový posun medzi Severoamerickou a Pacifickou litosferickou doskou je približne 470 km (<http://pubs.usgs.gov>).



Obr.3. Obrázok popisuje vzájomné interakcie medzi Pacifickou, Severoamerickou a Farallonovou litosferickou doskou, pri konštantnom pohybe 6 cm/rok paralelne so zlomom San Andreas (zdroj: Wallace, 1990)

2.2 Pohyb na zlome

San Andreas je transformný zlom, je to zóna medzi dvoma litosferickými doskami, ktoré sa horizontálne klúžu jedna pozdĺž druhej. V prípade zlomu San Andreas ide o pravostranný horizontálny posun (Obr.4).



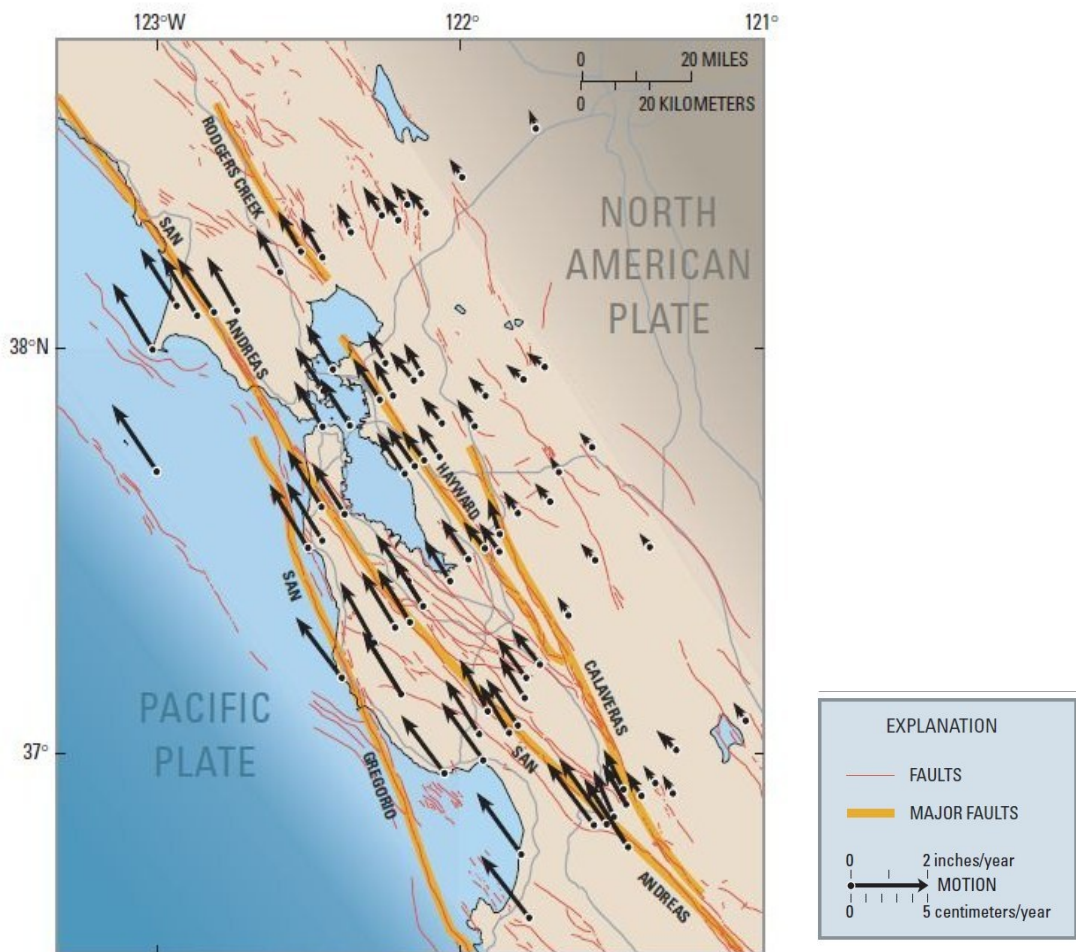
Obr.4. Pohyb blokov pozdĺž zlomu San Andreas (zdroj: <http://digital-desert.com>).

Koncept transformného zlomu popísal v roku 1963 kanadský geofyzik J. Tuzo Willson, ktorý predložil návrh, že tieto veľké zlomy, alebo zlomové pásma, spájajú divergentné doskové rozhranie, dve rozširujúce sa centrá, alebo menej časté konvergentné doskové rozhranie. Väčšina transformných zlomov sa nachádza na dne oceánu. Ale niekoľko zlomov sa objavuje aj vo vnútri kontinentu. Príkladom je práve San Andreas, ktorý spája východný pacifický chrbát, divergentné rozhranie na juhu, s južným Gorda-Juan de Fuca chrbátom, divergentné rozhranie na severe (Obr.5) (<http://pubs.usgs.gov/>).



Obr.5. Transformný zlom San Andreas spájajúci dve divergentné rozhrania, Severné gorda-Juan de Fuca-Explorer na severe a východný pacifický chrbát na juhu (zdroj: <http://pubs.usgs.gov/>).

Pacifická litosferická doska vŕže po Severoamerickej doske priemernou rýchlosťou 48 mm/rok (Obr.6.). Pevnina na západnej strane zlomu (na Pacifickej doske) sa pohybuje severozápadným smerom relatívne k pevnine na východnej strane zlomu (na Severoamerickej doske), (Wallace, 1990).



Obr.6. Obrázok ukazuje neustály pohyb medzi Pacifickou a Severoamericou doskou, rozložený pozdĺž zlomu San Andreas, monitorovaný použitím GPS (Global Position System) (zdroj: <http://pubs.usgs.gov>)

Pohyb ale nie je stály. Kvôli treniu a pevnosti hornín litosferické dosky nemôžu po sebe klzať. Bývajú roky nehybné, tlačiac jedna na druhú. Zvyšujúci sa tlak potom zrazu prelomí horniny pozdĺž zlomu a dosky sklznú naraz o pár centimetrov. Tieto porušenia dávajú vznik zemetraseniam, ktoré sa pravidelne vyskytujú v oblasti zlomu San Andreas (Bolger, 2010).

2.3 Zemetrasenia na zlome San Andreas

2.3.1 Zemetrasenie

Tektonické procesy, ktoré prebiehajú v Zemi, sú hlavným zdrojom hromadenia napätia v určitých miestach. Po dosiahnutí určitej kritickej hodnoty napätia sa v týchto miestach môžu objaviť rôzne katastrofické javy ako zemetrasenia, zosuvy pôdy a sopečná činnosť (Procházková, 2007).

Zemetrasenie je fyzikálny jav prejavujúci sa krátkodobými rýchlymi pohybmi, ktoré vznikajú v Zemskej kôre náhlym uvoľnením energie v jeho obvodových častiach (Zátopek, 1949). Časť energie uvoľnenej v ohnisku zemetrasenia sa premení na seizmické vlny, ktoré sa z ohniska zemetrasenia šíria Zemským telesom. V mieste, vzdialenom od ohniska, trvajú tieto pohyby niekoľko sekúnd až niekoľko desiatok sekúnd. V prípade veľmi silných zemetrasení sa šíria seizmické vlny Zemským telesom aj niekoľko hodín. Takéto vlny môžu Zem rozkmitať ako celok. Hovoríme o tzv. vlastných kmitoch Zeme.

Príčinou 90% zemetrasení je uvoľnenie nahromadeného tektonického napätia v Zemskej kôre a vo vrchnom plášti až do hĺbky približne 750 km, ktoré vzniká ako následok stále prebiehajúcich endogénnych procesov v Zemskej kôre. Približne 7% zemetrasení je vyvolaných sopečnou činnosťou a asi 3% rútením skalných masívov. Sú to prirodzené zemetrasenia.

V niektorých prípadoch môže človek svojím zásahom do horninového prostredia vyvolať prerozdelenie napätia (napríklad v hlbinej bani) a spôsobiť vznik seizmických javov. Takéto zemetrasenia nazývame indukované. Človek môže vytvárať umelé seizmické kmity a to pomocou výbuchov, vibrácií a pádu ťažkých hmôt.

Dopady, teda straty na ľudských životoch a škody na majetku, ktoré vyvolávajú zemetrasenia, závisia na energii uvoľnenej pri zemetrasení, na rozmere a hĺbke ohniska. Pri malej hĺbke ohniska dochádza k väčším škodám v pomerne malej oblasti a pri väčších hĺbkach ohniska môžu byť účinky menšie, avšak k škodám môže dôjsť v rozsiahlej oblasti (Procházková, 2007).

2.3.2 Intenzita, magnitúdo, škály

V roku 1902 vytvoril taliansky seizmológ Giuseppe Mercalli škálu s desiatimi stupňami intenzity zemetrasenia, neskôr modifikovanú na dvanásť stupňovú, ako ukazuje tabuľka 1.1. Škála intenzity hodnotí veľkosť účinku zemetrasenia na povrchu.

Mercalliho škála (Tab.1.) závisí na subjektívnych pozorovaniach, alebo čo sa týka zemetrasení, ktoré ohrozili ľudstvo v minulosti, na presnosti historických záznamov. V roku 1935 preto vytvoril Charles Richter, seizmológ Kalifornského Inštitútu Technológie, kvantitatívnu škálu určenú na meranie magnitudy zemetrasenia (de Boer and Sanders, 2005).

Intenzita a magnitúdo určujú rozdielne charakteristiky zemetrasenia. Magnitúdo popisuje veľkosť energie uvoľnenej zo zdroja zemetrasenia. Intenzita nám ukazuje silu otrasov vyprodukovaných zemetrasením na určitom mieste. Intenzita je určená podľa výsledného účinku, akým vplyva zemetrasenie na ľudí, budovy a životné prostredie (<http://earthquake.usgs.gov/>).

Tab.1. Modifikovaná Mercalliho škála intenzity zemetrasenia

(zdroje: http://earthquake.usgs.gov/learn/topics/mag_vs_int.php, <http://www.geo.mtu.edu/UPSeis/Mercalli.html>)

Mercalliho intenzita	Pomenovanie	Ekvivalentné Richterovo Magnitúdo	Popis
I	Nepozorovateľné	1 až 2	Človek ho nerozpozná, len prístroje.
II	Veľmi slabé	2 až 3	Zemetrasenie pociťuje len zopár ľudí, hlavne v horných poschodiach budov.
III	Slabé	3 až 4	Zemetrasenie je zreteľnejšie pociťované osobami vo vnútri budov, hlavne na horných poschodiach. Stojace autá sa môžu jemne kymácať. Vibrácie sú porovnateľné s vibráciami prechádzajúceho nákladného auta. Trvanie je určené odhadom.
IV	Mierne	4	Vo vnútri budov pociťuje mnoho osôb, zopár i vonku počas dňa. Drnčí riad, okná, steny praskajú. Podobný pocit, ako keby ťažký nákladník narazil do budovy. Stojace autá sa viditeľne kymácajú.
V	Málo silné	4 až 5	Pociťuje skoro každý, spiaci sa prebudia. Rozbíja sa riad i okná. Nestabilné objekty sa prevrátia. Kyvadlové hodiny sa môžu zastaviť.
VI	Silné	5 až 6	Pociťované každým, veľa ľudí je vydesených. Pohybuje sa nábytok. Objavujú sa menšie, neštrukturálne škody na budovách, ako napr. opadávanie malých kúskov omietky.
VII	Veľmi silné	6	Dobre konštruované budovy sú poškodené len nepatrne. Ale zle postavené budovy utrpia značné škody, napr. opadá omietka, padnú časti komínov.
VIII	Rútivé	6 až 7	Mnohí majú problém s udržaním rovnováhy. Objavujú sa jemné škody i na dobre postavených budovách. Obrovské škody na zle postavených stavbách, môže dôjsť i k zrúteniu. Padajú komíny, stĺpy, pomníky i steny. Prevracia sa ťažký nábytok.
IX	Pustošivé	7	Všeobecná panika. Veľké škody i na špeciálne postavených stavbách. Budovy sú posunuté vo svojich základoch. Mnoho slabých štruktúr a budov je zrútených.
X	Ničivé	7 až 8	Väčšina stien a konštrukcií zničené i so základmi. Ohýbajú sa koľajnice.
XI	Katastrofické	8	Ostane stáť len zopár veľmi dobre postavených stavieb. Padajú mosty. Koľajnice sú výrazne ohnuté.
XII	Globálne	8 a viac	Takmer všetko je zničené. Viditeľné zvlnenie zeme. Objekty sú vyhadzované do vzduchu.

2.3.3 Historické zemetrasenia na zlome

Zemetrasenia v Kalifornii sú zaznamenávané už od roku 1769, keď zemetrasenie s predpokladaným magnitúdom 6,0 udrelo neďaleko Los Angeles. Od devätnásteho storočia boli zemetrasenia oveľa viac systematicky zaznamenávané (<http://projects.californiawatch.org>).

V apendixe B je pripojený zoznam zemetrasení na zlome San Andreas s magnitúdom väčším ako 5,5 od roku 1900 dodnes i s jednotlivými popismi.

Jedným z najväčších zemetrasení, ktoré otriaslo Kaliforniou je zemetrasenie z roku 1857 z Fort Tejon s magnitúdom 7,9. Je charakteristické 3 a miestami až 10 metrovým sklzom po dĺžke viac ako 360 km zlomu San Andreas. Vtedajšie záznamy popisujú, že zemetrasenie trvalo 1 až 3 minúty a pociťovala ho väčšina Kalifornie južne od Sacramento (Sieh, 1987).

18. Apríla 1906 otriaslo San Franciskom obrovské ničivé zemetrasenie s magnitúdom 7,8. Otrasy pretrhli 447 kilometrov zlomu San Andreas medzi San Juan Batista na juhu a Cape Mendocino na severe (Ryan, 2001).

Veľa expertov súhlasí, že San Franciské zemetrasenie z roku 1906 označuje počiatok vyvíjania sa vedy o zemetrasení v Spojených štátoch. Tri dni po zemetrasení kalifornský guvernér George Pardee nariadil vyšetrovanie, vedené profesorom A. Lawsonom z Kalifornskej Univerzity v Berkeley. Profesor Lawson zhromaždil vedcov, ktorí počas nasledujúcich dvoch rokov zhromažďovali informácie o zlome, zmapovali celú 447 kilometrov dlhú zlomovú líniu na povrchu San Andreas a zdokumentovali jeho pohyb. V roku 1908 bol vydaný Lawsonov report Kalifornské Zemetrasenie z 18. Apríla 1906: Report Štátnej Vyšetrovacej Komisie pre Zemetrasenie. Tento report je najdôležitejšou štúdiou o určitom zemetrasení a mnohí ho považujú za zdroj modernej seizmológie v Spojených Štátoch (Rodgers, 2006).

San Franciské zemetrasenie z roku 1906 je zároveň aj jedno z prvých veľmi dobre fotografiami zdokumentovaných zemetrasení (Obr.7., Obr.8.).



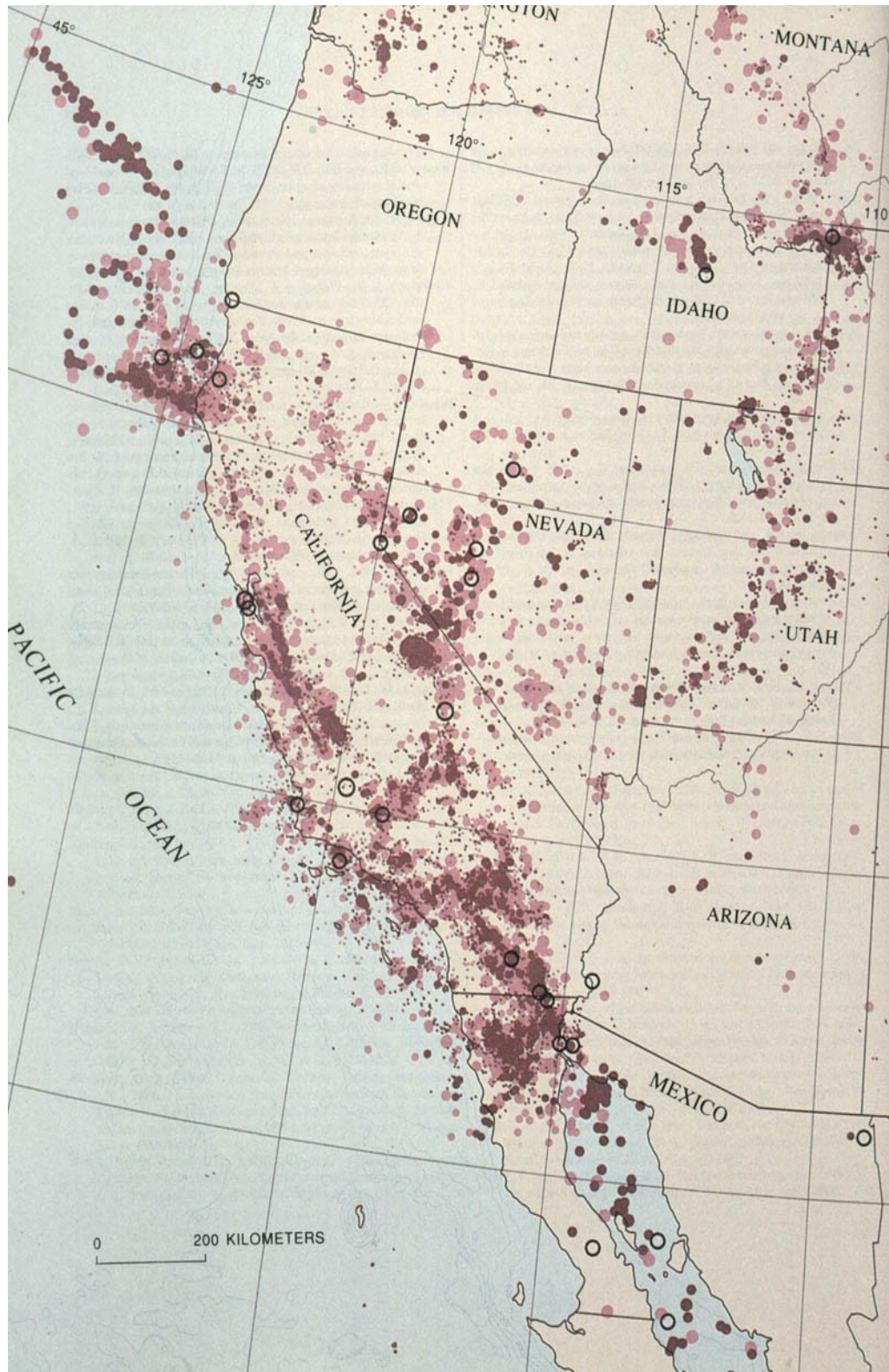
Obr.7. San Franciská mestská hala zničená zemetrasením v roku 1906 (zdroj: <http://seismo.berkeley.edu>).



Obr.8. Oheň približujúci sa do ulice Sacramento v San Francisku po zemetrasení v roku 1906 (zdroj: <http://seismo.berkeley.edu>).

Ďalším z veľkých a ničivých zemetrasení, ktoré vznikli na zlome San Andreas po roku 1906, je zemetrasenie zo 17. Októbra 1989, s epicentrom v blízkosti Loma Prieta. Dosahovalo magnitúdo až 7,1 a trvalo skoro 20 sekúnd (<http://seismo.berkeley.edu>). Pri tomto zemetrasení prišlo o život 62 občanov, počet zranených presahoval 3757 ľudí, bolo zničených viac ako 963 budov a ďalších 18 000 bolo poškodených. Celkové škody na majetku presahovali 6 miliónov dolárov. Vo vtedajšej dobe to bola najdrahšia katastrofa v Spojených Štátoch (Plafker, 1989).

Priestorové rozloženie veľkých zemetrasení z minulých dvoch storočí definujú systém zlomov San Andreas ako 100 až 300 km širokú zónu obsahujúcu mnoho aktívnych zlomov priradených k samotnému zlomu San Andreas (Obr.9.). Okrem dvoch najväčších zemetrasení na zlome San Andreas z rokov 1857 a 1906, ktoré pretrhli celkovo dve tretiny zlomu, väčšina zemetrasení postihuje menšie elementy patriace systému zlomov (Wallace, 1990).



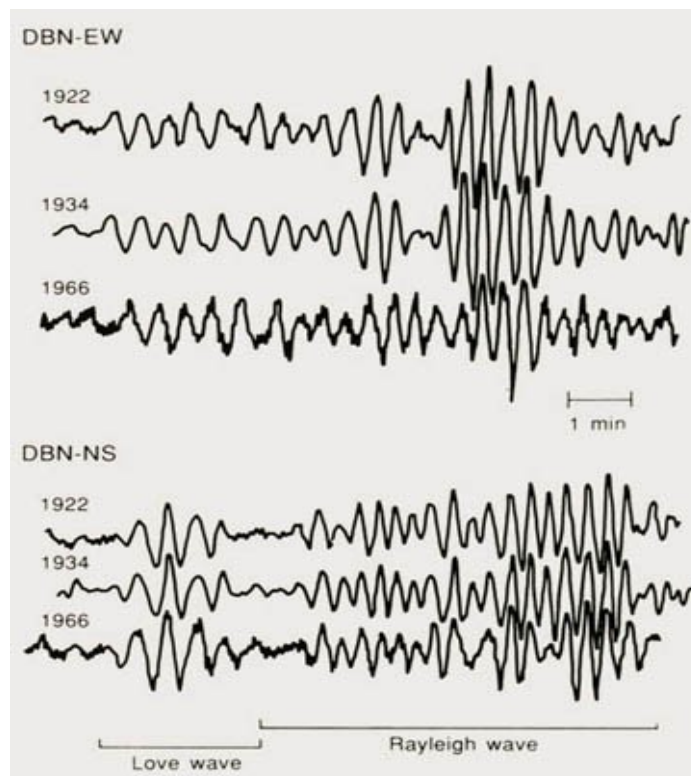
Obr.9. Seizmicita na východe Spojených Štátov. Bodky majú veľkosť podľa magnitúda. Najmenšie predstavujú zemetrasenie s $M < 4$, čierne krúžky $M > 7$. Fialové bodky predstavujú súčasné zemetrasenia, ružové predstavujú známe historické udalosti (zdroj: Wallace, 1990).

2.3.4 Charakteristické zemetrasenia

Priebeh a následky zemetrasení na zlome San Andreas hrajú hlavnú úlohu v dokazovaní existencie pravidelnosti opakovaných procesov (Wallace, 1990).

V Parkfielde praskol zlom od roku 1857 šesťkrát so zemetrasením o $M \sim 6$. Jednotlivé ruptury majú veľmi podobné charakteristiky a nasledujú po sebe každých 22 ± 6 rokov. Posledné tri zemetrasenia, v roku 1922, 1934 a 1966 sú v podstate identické (Obr.10.), (Bakun and McEvelly, 1984).

Data zaznamenané na Milneho seizmografoch priložené v Apendixe C ukazujú, že zemetrasenia z rokov 1901 a 1922 vyprodukovali rovnaké amplitudy povrchových vln, upevňujúc tak špekulácie o tom, že všetky zemetrasenia dvadsiateho storočia sú podobné. Podobnosti v rozsahu, lokácii a načasovaní jednotlivých známych zemetrasení v okolí Parkfieldu naviedli Bakuna a Lindha k predloženiu špecifického modelu opakovania sa, pre zemetrasenia v Parkfielde. Na základe tohto modelu, ďalšie zo série charakteristických zemetrasení bolo očakávané v roku 1993. Tento odhad predstavuje prvú formálne schválenú predpoveď zemetrasenia v Spojených Štátoch (Wallace, 1990).



Obr.10. Povrchové vlny zemetrasení v rokoch 1922, 1934 a 1966 v Parkfielde, zaznamenané tým istým seizmografom v Debilte v Holandsku (zdroj: Wallace, 1990).

3. Seizmológia vo vnútri zlomu

Hlavným cieľom seizmológie je pochopiť fyziku zemetrasení a iných zdrojov seizmických vln v Zemi. Je potrebné vedieť, kde je jadro dynamickej nestability, ako sa vyvíja v priestore a čase, a ako je možné ju zastaviť. Na dosiahnutie tohto cieľa potrebujeme dostatočne dobre vybavené observatória. Ale aj keď máme potrebné inštrumenty, tie musia byť situované dostatočne blízko zdroja aby prekonalí stratu intenzity vlnenia kvôli rozptylu. Riešením tohto problému je vloženie potrebných inštrumentov dovnútra oblasti blízko zdroja a to konkrétne do vrtovej alebo hlbokých dolov.

Vďaka vrtaniu je možné odobrať hlbšie časti kôry na analýzu mineralógie, deformačných mechanizmov a stanovenie vlastností materiálov aktívneho zlomového pásma. Analyzované data sa môžu použiť na výpočet tlaku, tlaku v póroch, na určenie povahy a významu časovo nezávislých chemických a fyzikálnych procesov a monitorovanie procesu vzniku zemetrasenia v jeho jadre (Zobak et al., 2007).

3.1 Vrtanie do zlomu San Andreas

Myšlienka vrtáť do zlomu San Andreas bola navrhnutá počas minulých pár desaťročí niekoľkokrát, ale základy projektu boli položené v Decembri roku 1992, kedy sa konal workshop o vrtaní do zlomu San Andreas v Asilomarskom Konferenčnom Centre v Pacific Grove v Kalifornii. Na workshope sa zúčastnilo 113 vedcov a inžinierov zo siedmich krajín sveta. Cieľom bolo zahájenie vedeckej diskusie o problémoch, ktoré by mohli vzniknúť vrtaním a experimentovaním na zlome, identifikovanie potenciálneho miesta vrtania a identifikovanie technologických zariadení, s ktorými by bolo možné projekt realizovať.

Kľúčový bol požiadavok, ktorý sa týkal miesta uskutočnenia projektu. Ako vhodná oblasť boli označené miesta s plytkou seizmicitou blízko povrchu Zeme a to z dvoch základných dôvodov. Poprvé, pre lepšie výsledky experimentov je potrebné prevádzať ich v blízkosti seizmicky aktívnych častí zlomu, podruhé, prebiehajúcu seizmicitu môžeme použiť na presnú lokáciu aktívnej stopy na zlome. Len tri časti zlomu vyhovovali tomuto požiadavku a to zlom Hayward v blízkosti San Leandro, časť zlomu San Andreas v regióne Melendy Ranch a Middle Mountain región pozdĺž Parkfieldského segmentu. Aj napriek tomu, že každé z týchto troch miest má nejaké výhody, v Júli v roku 1994 bolo na USGS konferencii v Menlo parku rozhodnuté, že najideálnejším miestom na vrtanie je Middle Mountain region, v okolí Parkfieldu (<http://www.icdp-online.org>).

Rozhodujúcimi dôvodmi bolo povrchové plúženie a hojnosť plytkej seizmicity v tejto oblasti; Parkfield sa nachádza v blízkosti miesta často sa opakujúcich zemetrasení s $M \sim 2$ (Thurber et al, 2004).

Význam ma aj jasný geologický kontrast naprieč zlomom, západnú stranu tvoria mäkké granitické horniny a východnú Francisková melanž pozostávajúca z pískovcov, zelených bridlíc a ílovitých bridlíc (Dibblee, 1980).

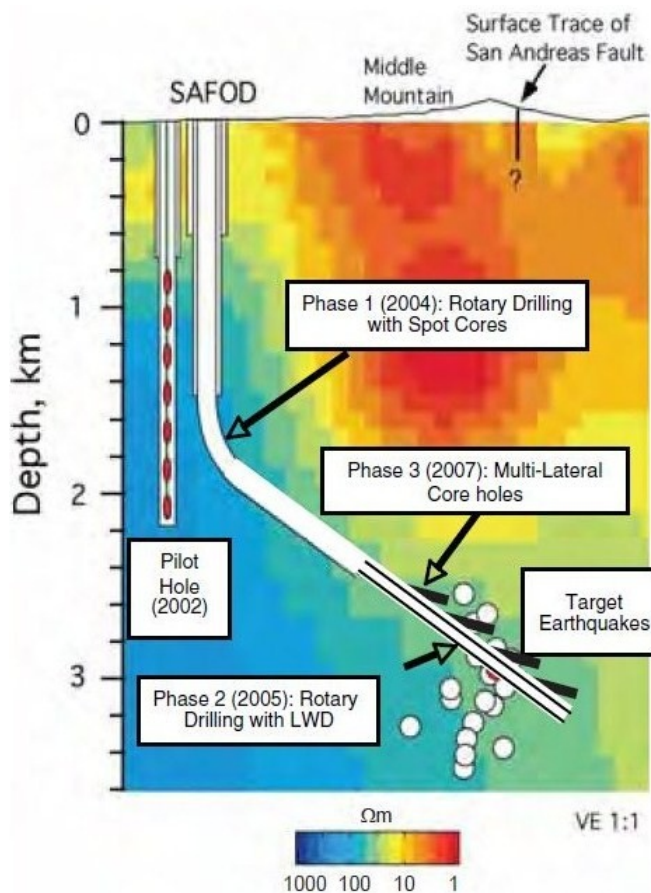
Práve granitické horniny vykazovali veľmi dobré podmienky na vrtanie. Ďalšou výhodou je, že tento segment je predmetom rozsiahleho výskumného procesu objasňovania geologických a geofyzikálnych podmienok a na tomto rozhraní sa nachádza najviac prístrojov na určenie jednotlivých parametrov, ako na ktoromkoľvek inom veľkom deskovom rozhraní na svete (<http://www.icdp-online.org>).

3.2 SAFOD

San Andreas Fault Observatory at Depth je 3,2 km hlboké vrtné observatórium neďaleko Parkfieldu, navŕtané do zlomu San Andreas. Tvoria ho dva vrty: pilotný a hlavný (www.earthscope.org).

Predtým, ako sa začalo pracovať na hlavnom vrte bol navŕtaný pilotný vrt. Bol navŕtaný počas roku 2002. Po tom čo vrt prešiel cez 760 m kvartérnych a terciérnych sedimentov, bol pilotný vrt navŕtaný cez granitový základ do hĺbky 2,17 km, kde bol skúmaný rozsiahlou škálou geofyzikálnych prístrojov (Boness and Zoback, 2004). Od skoro vertikálneho zlomu San Andreas je vzdialený zhruba 2km juhozápadným smerom. Na projekte spolupracovali International Continental Scientific Drilling Program, National Science Foundation a US Geological Survey. Rotačne navŕtaný pilotný vrt je určený k monitorovaniu, experimentovaniu, testovaniu inštrumentov a k ďalším súvisiacim aktivitám na zlome (Hickman, 2004).

Hlavný vrt sa na povrchu nachádza len 10m vedľa pilotného. Vrt prechádza vertikálne Zemskou kôrou zhruba do hĺbky 1,5 km, kde sa potom odkloní od vertikálnej osi o približne 60° a pretína zlom San Andreas v seizmogenickej hĺbke, 2,7km pod povrchom. Samotné vŕtanie začalo v roku 2004 a prebiehalo v troch fázach (Obr.11.). Počas fázy 1 prebiehalo rotačné vŕtanie, vo fáze 2 rotačné vŕtanie pokračovalo skrz celý zlom pričom boli odoberané vzorky horninových materiálov zo zárezov vo vrte, vzorky plynov, zaznamenávali sa data získané počas vŕtania LWD (Logging-While-Drilling). Počas tretej fázy bolo laterálne z hlavného vrta vyvŕtaných zopár menších bočných vrtoŕ určených k odobraniu vzorkov Zemskej kôry (Zoback, 2006).

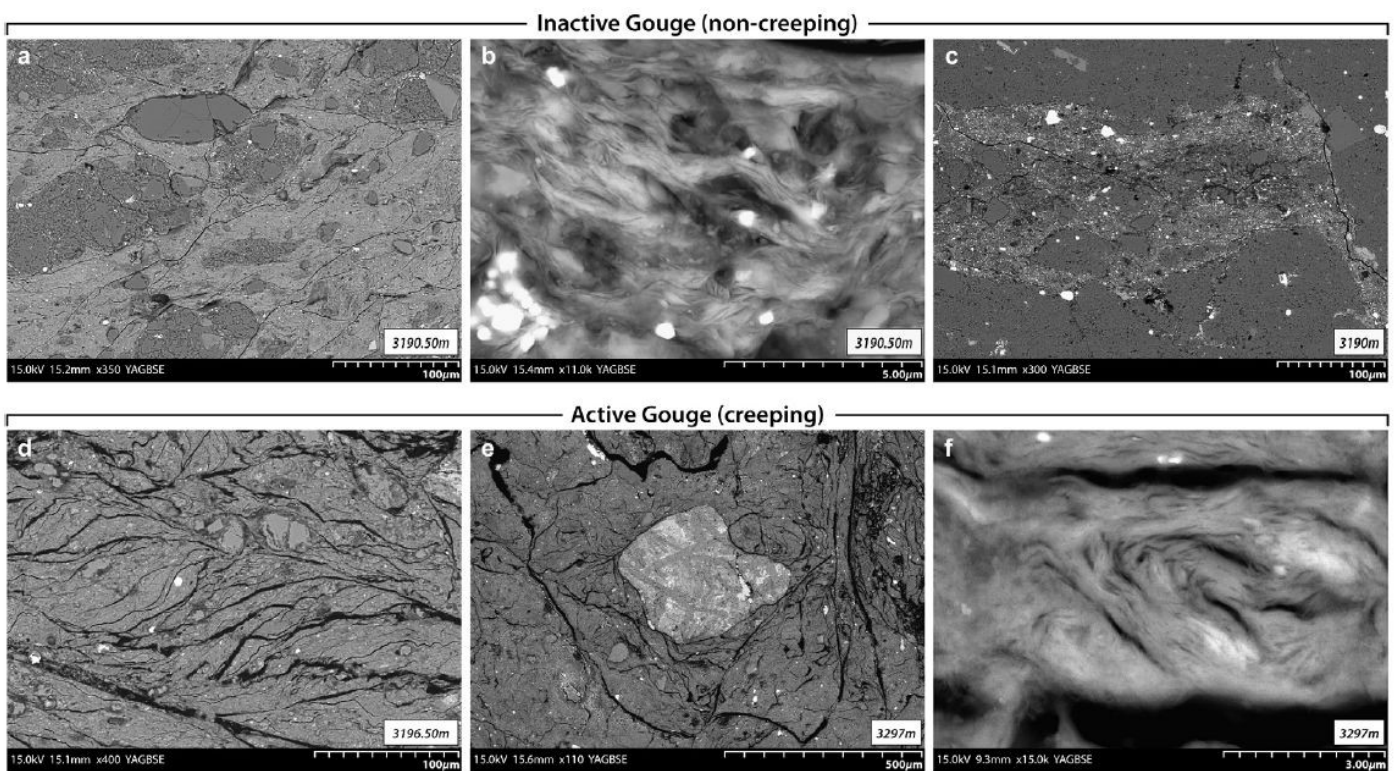


Obr.11. Schéma vrtného programu SAFOD, na pozadí je model elektrickej rezistivity prostredia zlomu (zdroj: Zoback, 2006).

Tieto vzorky kôry predstavujú prvú ukážku materiálu získanú priamo z veľkého aktívneho zlomového pásma (Obr.12., Obr.13.).



Obr.12. Vzorka Zemskej kôry získana počas fázy 3 v hlavnom vrte SAFOD (zdroj: www.earthscope.org)



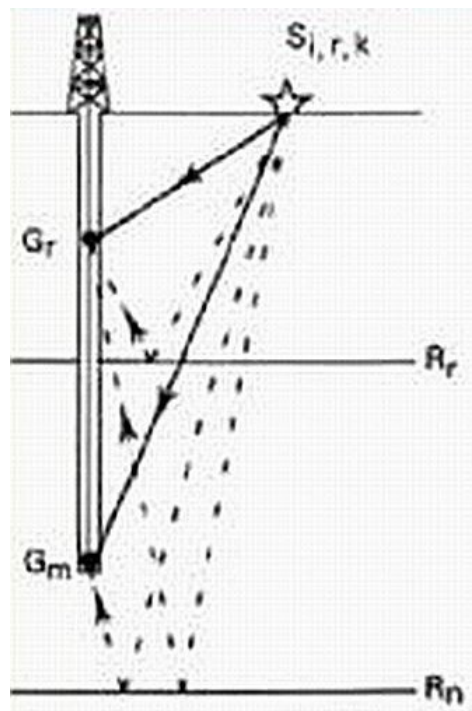
Obr.13. BSE (backscattered electron imaging) zobrazenia typickej textúry spojenej so smektitickými fylsilikátmi nachádzajúcimi sa v neaktívnej (a-c) a aktívnej (d-f) zóne zlomu San Andreas.
 (a-b) Sieť smektitických fylsilikátov obrastená krehkými ryhami a minerálnymi klastikami.
 (c) BSE fotka injektovanej trhlinky, s rozšíreným svetlým pyritom.
 (d) Typická asymetrická štruktúra aktívnej časti zlomu. Foliácia je paralelná, plošné zakrivenie siete prasklín je spojené s odvodnením smektitom bohatej matrix.
 (e) Náhľad na smektitickými fylsilikátmi bohatú, chaoticky foliovanú ryhu, ktorá obklopuje serpentinit.
 (f) Náhľad na záhyby v smektitických fylsilikátových agregátoch.
 (zdroj: Holdsworth, 2010)

3.3 Vertikálne seizmické profilovanie na zlome San Andreas

3.3.1 VSP

Metóda zaznamenávania seizmických vln vo vrte, známa ako vertikálne seizmické profilovanie (VSP), sa začala používať v seizmickom prieskume v 70-tych rokoch minulého storočia. Zistilo sa, že je to veľmi užitočný nástroj na vykreslenie vlastností šírenia seizmických vln v blízkosti vrtu (Hardage, 1985). V prípade zlomu San Andreas bola táto technológia použitá k štúdiu horninového prostredia v blízkosti seizmicky aktívneho zlomu.

Seizmické detektory sú umiestnené na známej hĺbkovej úrovni vo vnútri vrtu a seizmické zdroje sú situované na povrchu (Obr.14.). Metóda VSP využíva vlnové pole smerujúce dolu ku geofónom. Okrem priamych vln tiež využíva odrazené či difragované vlny k poskytnutiu dodatočných informácií o zóne, ktorú pomocou metódy zobrazujeme (Reynolds, 2011).



Obr.14. Obrázok popisuje princíp VSP. Sériu geofónov alebo hydrofónov je zavesená vo vrte, impulz je vypravený zo zdroja S. Priame, odrazené a difragované vlny sú zaznamenané pomocou série geofónov Gr a Gm. Rr a Rn sú rozhrania (zdroj: Reynolds, 2011).

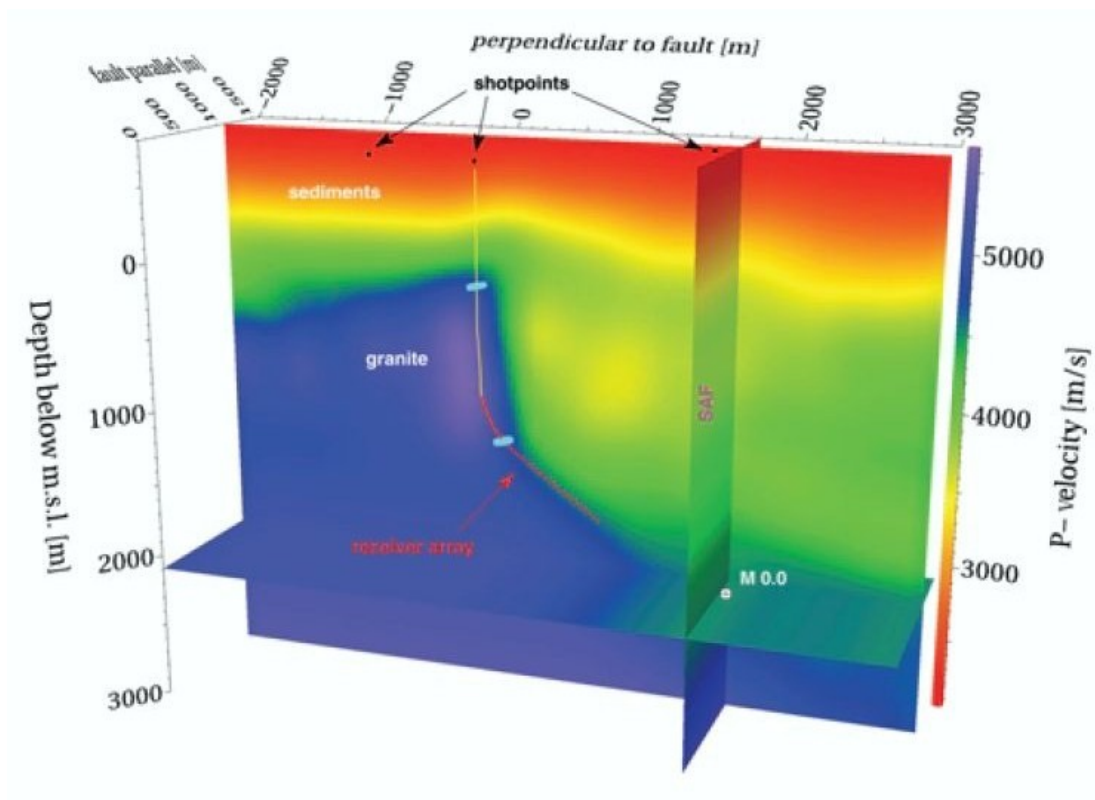
Táto technológia sa stále viac a viac používa pri monitorovaní a prieskume ropných polí. Rastie aj jej využitie v seizmológii a tektonike. V súlade s technologickým pokrokom sa VSP v súčasnosti používa aj na sledovanie seizmickej aktivity v Zemskej kôre. Zobrazenia 2D a 3D VSP dát majú vyššie rozlíšenie ako povrchové seizmické data a prispievajú k lepšej charakterizácii a interpretácii okolitých štruktúr (Chavarria, 2007).

3.3.2 VSP a SAFOD

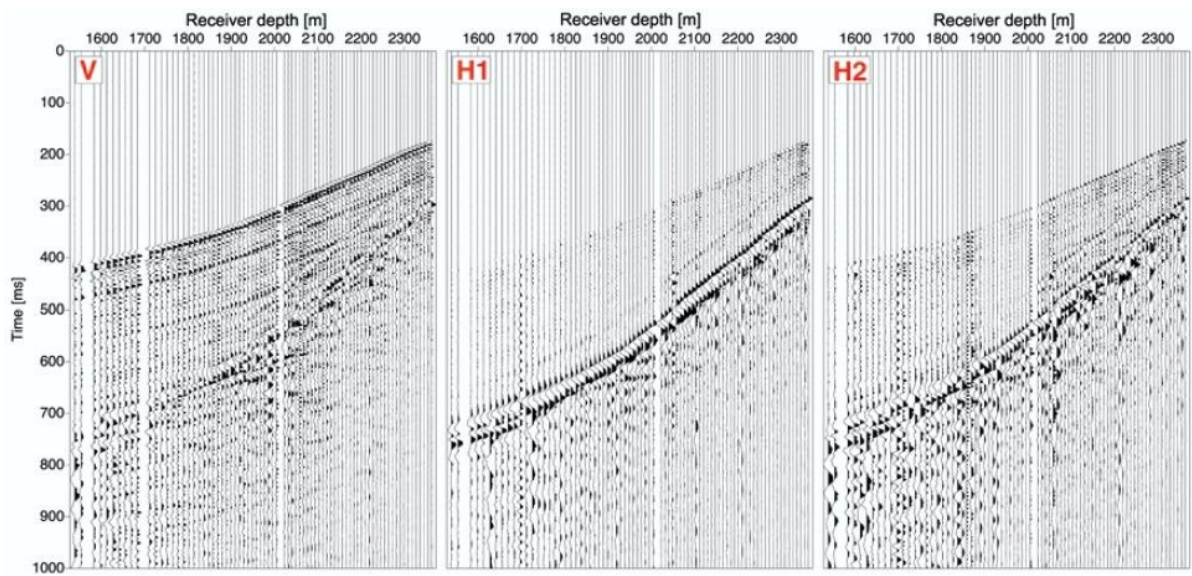
Pri vertikálnom seizmickom profilovaní na zlome San Andreas bolo namerané veľké množstvo kvalitných dát, ktoré poskytli cenné informácie o štruktúre zlomu. VSP pomáhalo presne zmerať a doplniť rýchlostné modely (Obr.15), monitorovať seizmicitu a zobraziť okolie vrtu. Výsledky získané týmto experimentom majú priamy dopad na monitorovanie zemetrasení na San Andreas (Chavarria et al., 2003).

Meranie pozostávalo z trinástich odpalov rôznej veľkosti. Narozdiel od komerčného VSP prieskumu, kde je zdrojom odpalu viac ako tisíc miest na povrchu Zeme, v tomto prípade bolo možné realizovať odpalov len zopár. Napriek tomu dôkladná analýza získaných dát umožnila lepšiu koreláciu medzi pozorovanou litológiou a už existujúcimi geologickými modelmi zlomu San Andreas.

Pri prieskume boli namerané i aktívne i pasívne dáta (Obr.16.). Pasívne dáta predstavovali mnoho zemetrasení na zlome San Andreas s magnitúdom do 2.7 a so širokou škálou hĺbok a hypocentrálnych vzdialeností. Tieto pasívne dáta zahrňovali aj zemetrasenia, ktorých hypocentrom je miesto vŕtania v zlome. Analýza týchto dát skúmaná niekoľkými rozličnými výskumnými skupinami, prispieva k vymedzeniu miesta presnej polohy týchto udalostí a smeruje vedcov pri ďalšom vŕtaní do zlomu San Andreas (Chavarria et al., 2007).



Obr.15. Náhľad na geometriu VSP experimentu na SAFOD. Farby popisujú rýchlostný model. Hlavný vrt (žltý, po zrotovaní červený) prechádza cez sedimenty do hĺbky 760m pod povrchom, kde sa dostane do granitového základu (rýchlostne odpovedá modrej farbe). Červená časť vrtu označuje miesto umiestenia geofónov. Čierne bodky predstavujú miesta odpalov na povrchu Zeme. (zdroj: Chavarria, 2007).



Obr. 16. Zemetrasenie na zlome San Andreas s odhadnutým magnitúdom veľkosti 0,0. Hypocentrálna vzdialenosť najhlbšieho prijímača je niekoľko sto metrov (zdroj: Chavarria et al., 2007).

4. Predpovedanie zemetrasenia

Kalifornia patrí medzi územia, na ktorých sa zemetrasenie vyskytuje frekventovane. Niektoré môžu byť veľmi ničivé, ako napríklad zemetrasenie z roku 1989 v Loma Prieta. Presné predpovede pravdepodobnosti ďalšieho zemetrasenia môžu ľuďom pomôcť sa naň pripraviť (Field, 2008).

Multidisciplinárna spolupráca vedcov a inžinierov v zoskupení nazvanom WGCEP 2007 (Working Group on California Earthquake Probabilities) zverejnila prvú všeobecnú konštrukciu pravdepodobnosti výskytu zemetrasenia na celom území Kalifornie zvanú UCERF (Uniform California Earthquake Rupture Forecast). Kombinuje data z geodézie (presné data o pomalom relatívnom pohybe tektonických dosiek), geológie (zmapované jednotlivé časti zlomov), seizmológie (výskyt zemetrasení v dokumentovanej minulosti) a paleoseizmológie (data z výhodzov a výkopov naprieč zlomom dokumentujúce zemetrasenia z dávnej geologickej minulosti). UCERF poskytuje dôležité nové informácie určené k zlepšeniu bezpečnosti počas seizmickej aktivity, upraveniu základov budov a tiež pomáha spoločnosti pripraviť sa na budúce zemetrasenie. V súčasnosti nie je možné stanoviť presný dátum, čas a miesto nasledujúcich zemetrasení, táto práca však popisuje pravdepodobnosť výskytu budúceho zemetrasenia s určitou veľkosťou, ktoré by sa mohlo vyskytnúť počas konkrétneho časového obdobia (<http://www.scec.org/ucerf/>).

Vedci pracujúci na štúdiu UCERF prišli k záveru, že pravdepodobnosť, že územie Kalifornie postihne zemetrasenie s magnitúdom 6.7 a viac v najbližších tridsiatich rokoch je väčšia ako 99% (Tab.2.). Takéto zemetrasenie by mohlo spôsobiť obrovské škody na majetku a straty ľudských životov. Pravdepodobnosť výskytu zemetrasenia s magnitúdom 7.5 a väčším je v nasledujúcich tridsiatich rokoch 46%. Je 59% šanca, že by zemetrasenie s magnitúdom 6.7 a viac nastalo v južnej časti zlomu San Andreas a 21% šanca, že by sa vyskytlo v časti severnej (Tab.3), (Field, 2008).

Tab.2. Tabuľka reprezentuje súčasné najlepšie odhady (zdroj: Field, 2008).

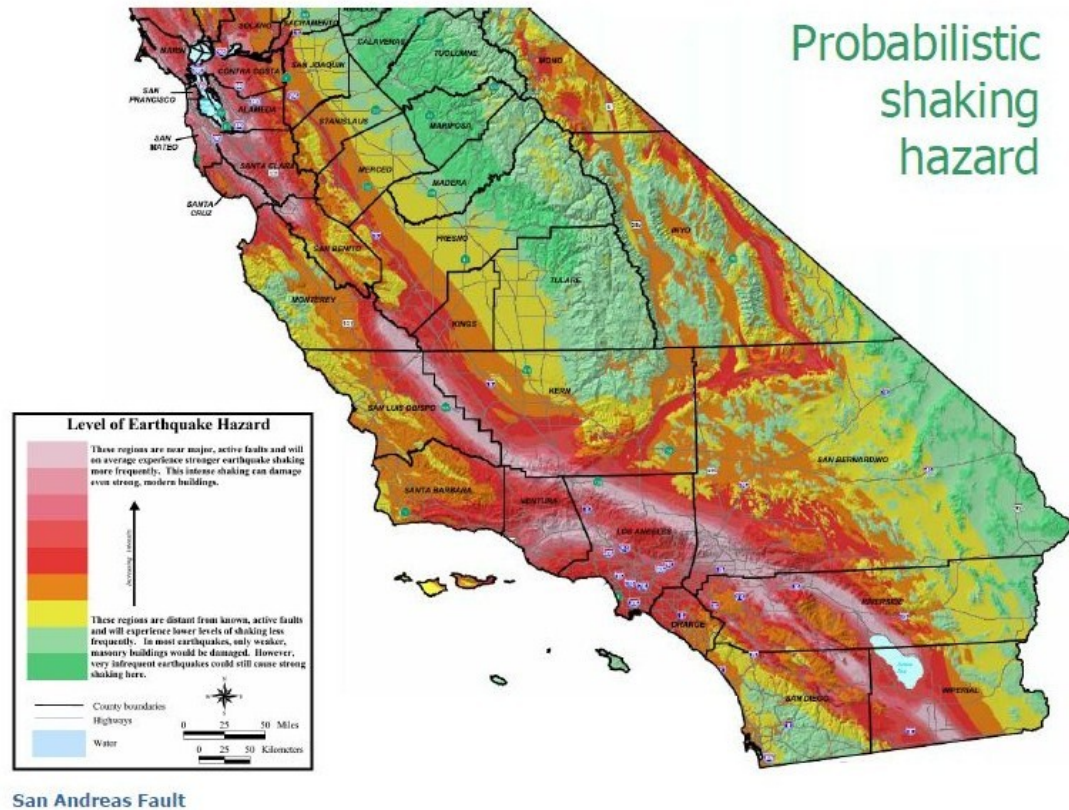
Magnitúdo	Pravdepodobnosť, že sa jeden alebo viac zemetrasení s priradeným magnitúdom objaví v najbližších 30 rokoch.	Priemerná doba opakovania sa (v rokoch)
6,7	>99%	5
7	94%	11
7,5	46%	48
8	4%	650

Tab.3. Tabuľka ukazuje pravdepodobnosť výskytu zemetrasenia v najbližších 30 rokoch na siedmich častiach systému zlomov San Andreas, ku ktorým majú vedci k dispozícii najviac potrebných dát (zdroj: Field, 2008). Mapa jednotlivých zlomov k náhľadu je v Apendixe A.

Zlom	Pravdepodobnosť výskytu zemetrasenia s magnitúdom 6,7 a viac
Južná časť San Andreas	59%
Hayward-Rodgers Creek	31%
San Jacinto	31%
Severná časť San Andreas	21%
Elsinore	11%
Calaveras	7%
Garlock	6%

4.1 Numerické simulácie

Hlavným cieľom výskumu zemetrasení je kvantifikovanie rizika vzniku zemetrasenia, schopnosť predpovedať jeho magnitudo, miesto a čas výskytu. Úlohou je vykreslenie máp predpokladaného nebezpečenstva- hazard maps (Obr.17).



Obr.17. Obrázok ukazuje pokus o vytvorenie hazard map (zdroj: www.earthscope.org)

V súčasnosti sa vedci pokúšajú nahradiť štatistické výpočty pravdepodobnosti vzniku rizika zemetrasenia počítačovými simuláciami dejov v Zemskej kôre.

Numerické simulácie sa používajú hlavne na predpovedanie počasia. Keď sa na to pozrieme z globálneho hľadiska, tieto simulačné modely sa vzťahujú na základné cirkulačné modely (Covey, 2003). Turbulentný fenomén reprezentujú dynamické parametre a rovnice sú typicky riešené cez priestorové mriežky, ktoré majú dĺžku od desiatok do stoviek kilometrov. Aj keď sú známe len jednoduché formy rovníc dynamiky tekutín slúžiace k zobrazeniu chaotického chovania, simulačné modely aj počasia aj klímy opakovane poukazujú na ich význam v predpovedaní (Yikilmaz, 2010).

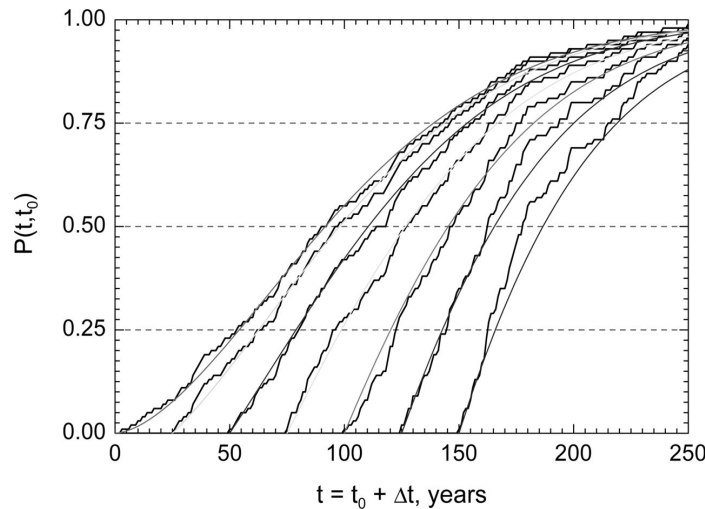
Numerické simulácie nám pomáhajú pochopiť ako procesy prebiehajú v časovej škále po sekundách a priestorovej škále na jednotlivých metroch, ako napríklad procesy v zdroji zemetrasenia na aktívnom zlome. Tiež pomáhajú objasniť vplyv procesov ktoré sa vyskytujú na časovej škále v rokoch a priestorovej škále v kilometroch, ako napríklad výskyt veľkých zemetrasení. Numerické simulácie sú teda nevyhnutnou súčasťou pochopenia fyziky zemetrasenia na zlomových systémoch (Rundle, 2005a).

4.2 Virtual California

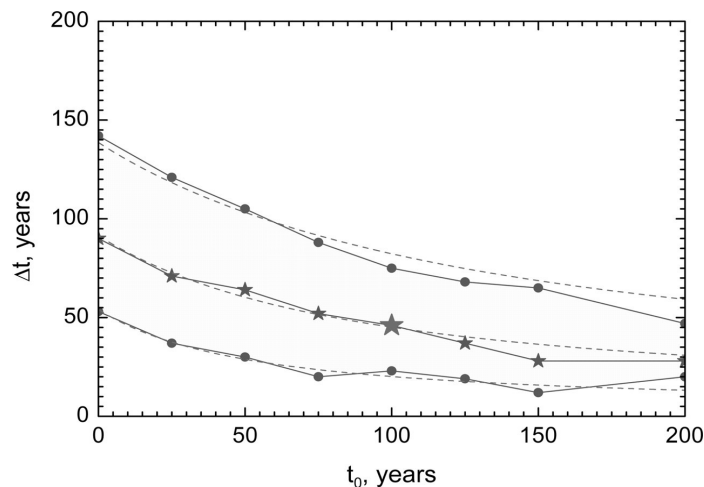
Jeden z modelov, ktorý vytvoril Rundle za účelom simulovania regionálnej seismicity, sa nazýva Virtual California. Tento model zahŕňa i akumulácie napätia a interakcie medzi a pozdĺž jednotlivých zlomov (Yikilmaz, 2010).

Základom modelu je teda séria zmapovaných zlomov s odhadnutou rýchlosťou sklzu, stanovenou dlhodobou rýchlosťou sklzu, parametrizácia zákonov trenia postavená na základe laboratórnych experimentoch, výskyt zemetrasení na daných zlomoch v minulosti a elastické interakcie (Rundle, 2005a).

Kvantitatívny výstup týchto simulácií je štatistické rozloženie opakovania sa časov t medzi jednotlivými po sebe nasledujúcimi veľkými zemetraseniami na danom zlome (Obr.18., Obr.19.), (Rundle, 2005b).



Obr.18. Hromadiaca sa pravdepodobnosť $P(t, t_0)$ že zemetrasenie s $M \geq 7.0$ sa objaví na zlome San Andreas v blízkosti San Franciska v čase $t = t_0 + \Delta t$ rokov, po poslednom veľkom zemetrasení, pokiaľ sa posledné veľké zemetrasenie v minulosti objavilo v čase t_0 (Výsledky pre časy $t_0 = 0, 25, 50, 75, 100, 125, a 150$ rokov). (zdroj: Rundle, 2005b)



Obr.19. Očakávaný čas príchodu ďalšieho veľkého zemetrasenia. Malé hviezdy odpovedajú 50% pravdepodobnosti z Obr.18. a označujú stredný čas Δt zostávajúci do ďalšieho veľkého zemetrasenia ako funkcia času t_0 od posledného veľkého zemetrasenia. Veľké hviezdy popisujú stredný čas čakania (50% pravdepodobnosť) ďalšieho veľkého zemetrasenia odo dnes. (zdroj: Rundle, 2005b)

5. Záver

San Andreas, zlomové pásmo spájajúce Pacifickú litosferickú dosku so Severoamericku, je v súčasnosti najviac skúmaným zlomom na svete. Kvôli pohybu tektonických dosiek je to miesto zvýšeného nebezpečenskva výskytu zemetrasenia.

Pre pochopenie procesov vzniku a šírenia zemetrasenia bol v roku 1992 započatý projekt SAFOD (San Andreas Fault Observatory at Depth), ktorého cieľom bolo prevítať sa priamo do seizmogenickej hĺbky zlomu San Andreas. Teraz, keď je vrtanie dokončené, odoberajú sa vzorky kôry a rozbieha sa široká škála výzkumných projektov. Vzorky kôry sú skúmané v dvadsiatich laboratóriách po celom svete. Výsledné štúdie nám poskytnú priamy náhľad na komplex fyzikálnych a chemických procesov prebiehajúcich vo vnútri aktívneho zlomu.

Zlom San Andreas je zaujímavý aj tým, že sa tu každých 22 ± 6 rokov opakujú zemetrasenia s rovnakými charakteristikami. Na základe modelov opakovania sa vykresľujú seizmológovia mapy seizmických rizík s uvedením pravdepodobnosti výskytu zemetrasenia v určitom čase a na určitom mieste.

Prevenencia voči hazardu zemerarsenia zahŕňa informovanosť a pripravenosť obyvateľstva postihnutých oblastí. Ak by sa nejaké veľké zemetrasenie odohralo napríklad v Los Angeles alebo v San Franciscu, miestne authority vyhlasujú, že sú na katastrofu pripravené. Policajti, hasiči a záchranné služby každoročne absolvujú výcvik zameraný na správanie sa v prípade veľkého zemetrasenia a všetci sú si istí, že skutočnú udalosť zvládnu.

6. Použitá literatura

- Alden, A.: *All About The San Andreas Fault*, The New York Times Company, Page Last Modified: 2011, [cit. 10.5.2011], Page URL: http://geology.about.com/od/geology_ca/tp/aboutsaf.htm
- Atwater, T. (1970): *Implications of plate tectonics for the Cenozoic tectonic evolution of western North America*, Geological Society of America Bulletin 81, 3513-3536
- Bakun, W.H., McEvilly, T.V. (1984): *Recurrence models and Parkfield, California, earthquakes*, Journal of Geophysical Research 89, 3051-3058
- Bakun, W.H., Lindh, A. G. (1985): *The Parkfield, California, earthquake prediction experiment*, Science 229, 619-624
- Berkeley Seismological Laboratory: *Where can I learn more about the 1906 earthquake?*, Last modified: August 30, 2011, [cit. 15.7.2011], Page URL: http://seismo.berkeley.edu/faq/1906_0.html
- de Boer, J.Z., Sanders, D.T. (2005): *Earthquakes in Human History. Far-Reaching Effects of Seismic Disruptions*, Princeton University Press, 278 str.
- Bolger, A. (2010): *Geophysics*, Global Media, 304 str.
- Boness, N., Zoback, M.D. (2004): *Stress-induced seismic velocity anisotropy and physical properties in the SAFOD pilot hole in Parkfield CA*, Geophysical Research Letters 31, L15S17
- Chavaria, J.A., Malin, P., Catchings, R.D., Shalev, E. (2003): *A look Inside the San Andreas Fault at Parkfield Through Vertical Seismic Profiling*, Science 302, 1746-1748
- Chavaria, J.A., Goertz, A., Karrenbach, M., Paulsson, B., Milligan, P., Soutyrine, V., Hardin, A., Dushman, D., LaFlame, L. (2007): *The use of VSP techniques for fault zone characterization: An example from the San Andreas Fault*, The Leading Edge 26, 770-776
- Corey, M., Taggart, K. (2011): *150 years of California earthquakes*, U.S. Geological Survey, Page Last Modified: April 7, 2011, [cit. 7.7.2011], Page URL: <http://projects.californiawatch.org/earthquakes/california-earthquake-history/>
- Covey, C., AchutaRao, K., Cubash U., Jones, P., Lambert, S., Mann, M., Phillips, T., Taylor, K. (2003): *An overview of results from the couplet model intercomparison project*, Global and Planetary Change 37, 103-133
- Dibblee, T. W. (1980): *Studies of the San Andreas fault zone in Northern California*, California Division of Mines and Geology 140, 3-18
- Earthscope: *San Andreas Fault Borehole*, Earthscope, National Science Foundation, Page Last Updated: 2011, [cit. 16.7.2011], Page URL: <http://www.earthscope.org/observatories/safod>
- Earthscope: *Core Viewer Selected Section: Hole E - Run 1 - Section 1*, Earthscope, National Science Foundation, [cit. 18.7.2011], Page Last Updated: 2011, Page URL: http://www.earthscope.org/data/safod_core_samples
- Field, E. H., Milner, K. R., WGCEP (2008): *Forecasting Californias Next Earthquakes- What Can We Expect In The Next 30 Years?*, Geological Survey, Fs. 2008-3027
- Hardage, B.A. (1985): *Vertical Seismic Profiling. Part A: Principles I*, Geophysical Press
- Herman, A.K., Chin, J.L., Ueber, E., Shauffer, H.P., Handley, J.H. (2001): *Beyond the Golden Gate- Oceanography, Geology, Biology, and Enviromental Issues in the Gulf of the Farallones*, U.S. Geological Survey Profesional Paper 1198, 66 str.

- Hickman, S., Zoback, M., Ellsworth, W. (2004): *Introduction to special section: Preparing for the San Andreas Fault Observatory at Depth*, Geophysical Research Letters 31, L12S01
- Holdsworth, R.E., van Diggelen, E. W. E., Spiers, C. J., de Bresser, J. H. P., Walker, R. J., Bowen, L. (2010): *Fault rocks from the SAFOD core samples: Implication for weakening at shallow depths along the San Andreas Fault, California*, Journal of Structural Geology 33, 132-144
- Plafker, G., Galloway, J.P. Eds. (1989): *Lessons learned from the Loma Prieta, California, earthquake of October 17, 1989*, Geological Survey, 48 str.
- Procházková, D. (2007): *Seismické inženýrství na prahu třetího tisíciletí*, Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství v Ostravě, 25 str.
- Reynolds, J. M. (2011): *An Introduction To Applied and Environmental Geophysics*, John Wiley and Sons, 712 str.
- Rodgers, A.J., Jr. (2006): *Re-creating the 1906 San Francisco Earthquake*, Science and Technology Review 09/2006, 4-12
- Rundle, J. B., Rundle, P. B., Donnellan, A., Turcotte, D. L., Shcherbakov, R., Li, P., Malamud, B. D., Grant, L. B., Fox, G. C., McLeod, D., Yakolev, G., Parker, J., Klein, W., Tiampo, K. F., (2005b): *A simulation-based approach to forecasting the next great San Francisco earthquake*, Proceedings of the National Academy of Sciences 102, 363-367
- Rundle, J.B., Rundle, P.B., Donnellan, A., Li, P., Klein, W., Morein, G., Turcote, D.L., Grant, L. (2005a): *Stress transfer in earthquakes, hazard estimation and ensemble forecasting: Interferences from numerical simulations*, Tectonophysics 413, 109-125
- Ryan, H.F., Ross, S.L., Graymer, R.W. (2001): *Earthquakes, Faults and Tectonics*, U.S. Geological Survey Professional Paper 1198, 37-46
- SCEC: *Uniform California Earthquake Rupture Forecast (UCERF)*, Southern California Earthquake Center, Page Last modified: April 15, 2008, [cit. 4.8.2011], Page URL: <http://www.scec.org/ucerf/>
- Schulz, S.S., Wallace R.E.: *The San Andreas Fault*, [cit. 15.5.2011], Page URL: <http://digital-desert.com/san-andreas-fault/san-andreas-04.html>
- Sieh, K.E (1987): *Slip along the San Andreas Fault associated with the great 1857 earthquake*, Bulletin of the Seismological Society of America 68, 1421-1448
- Stoffer, P.W. (2005): *The San Andreas Fault In The San Francisco Bay Area, California: A Geology Fieldtrip Guidebook To Selected Stops On Public Lands*, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, Page Last Modified: March 25, 2005 , [cit. 8.6.2011], Page URL: <http://pubs.usgs.gov/of/2005/1127/>
- Thurber, C., Roecker, S., Zhang, H., Baher S., Ellsworth, W.L. (2004): *Fine-scale structure of the San Andreas fault zone and location of the SAFOD target earthquakes*, Geophysical Research Letters 31, L12S02
- Topozada T.R., Branum, D.M., Reichle, M.S., Hallstrom, C.L. (2002): *San Andreas Fault Zone, California: M ≥ 5.5 Earthquake History*, Bulletin of the Seismological Society of America 92, 2555-2601
- USGS: *J. Tuzo Wilson: Discovering transforms and hotspots*, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, Page Last Updated: May 05 1999, [cit. 6.6.2011], Page URL: <http://pubs.usgs.gov/gip/dynamic/Wilson.html>
- USGS: *Magnitude / Intensity Comparison*, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, Page Last Modified: February 22, 2010, [cit. 24.6.2011], Page URL:

http://earthquake.usgs.gov/learn/topics/mag_vs_int.php

USGS: *Understanding Plate Motions*, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, Page Last Updated: May 05, 1999, [cit. 27.5.2011], Page URL: <http://pubs.usgs.gov/gip/dynamic/understanding.html>

USGS: *What is a tectonic plate?*, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, Page Last Updated: May 05, 1999, [cit. 27.5.2011], Page URL: <http://pubs.usgs.gov/gip/dynamic/tectonic.html>

USGS: *3D/4D mapping of the San Andreas Fault Zone*, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, Page Last Modified: Jun 27, 2011, [cit. 6.6.2011], Page URL: <http://geomaps.wr.usgs.gov/3D4Dmapping/index.htm>

Wallace, R.E. (1990): *The San Andreas Fault System, California*, U.S. Geological Survey Profesional Paper 1515, 283 str.

Wood, M.M.: *Modified Mercalli Intensity Scale*, UPSeis, Page Last Updated: April 16, 2007, [cit. 14.7.2011], Page URL: <http://www.geo.mtu.edu/UPSeis/Mercalli.html>

Yikilmaz, M. B., Turcotte, D. L., Yakovlev, G., Rundle, J. B., Kellog, L. H. (2010): *Virtual California earthquake simulations: simple models and their application to an observed sequence of earthquakes*, Geophysical Journal International 180, 734-742

Zátopek, A. (1949): *Jak se studují zemětřesení*, Jednota čs. matematiků a fyziků, 124str.

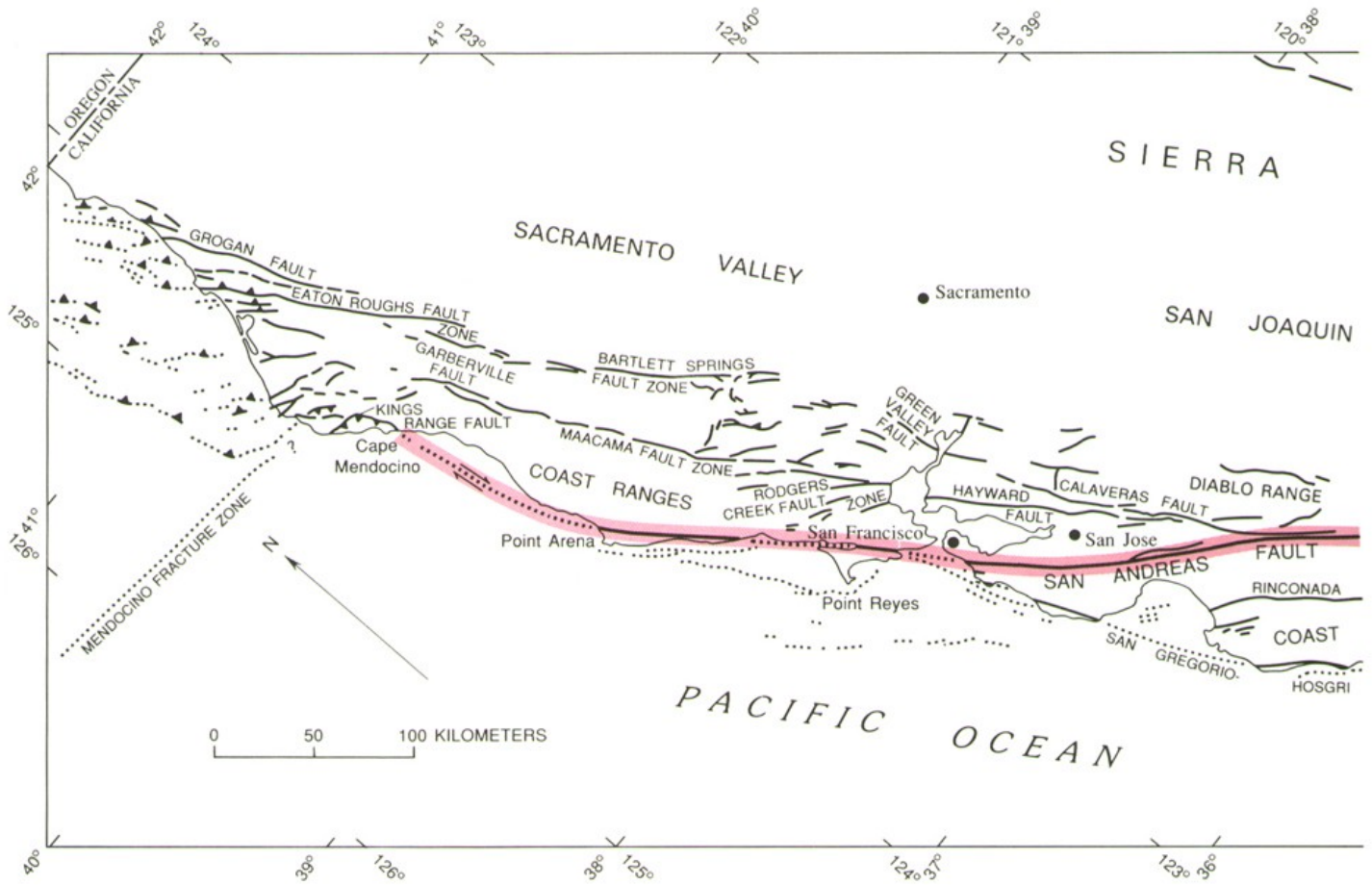
Zobak, M.D. (2006): *SAFOD penetrates the San Andreas Fault*, Scientific drilling 2/2006, 32-33

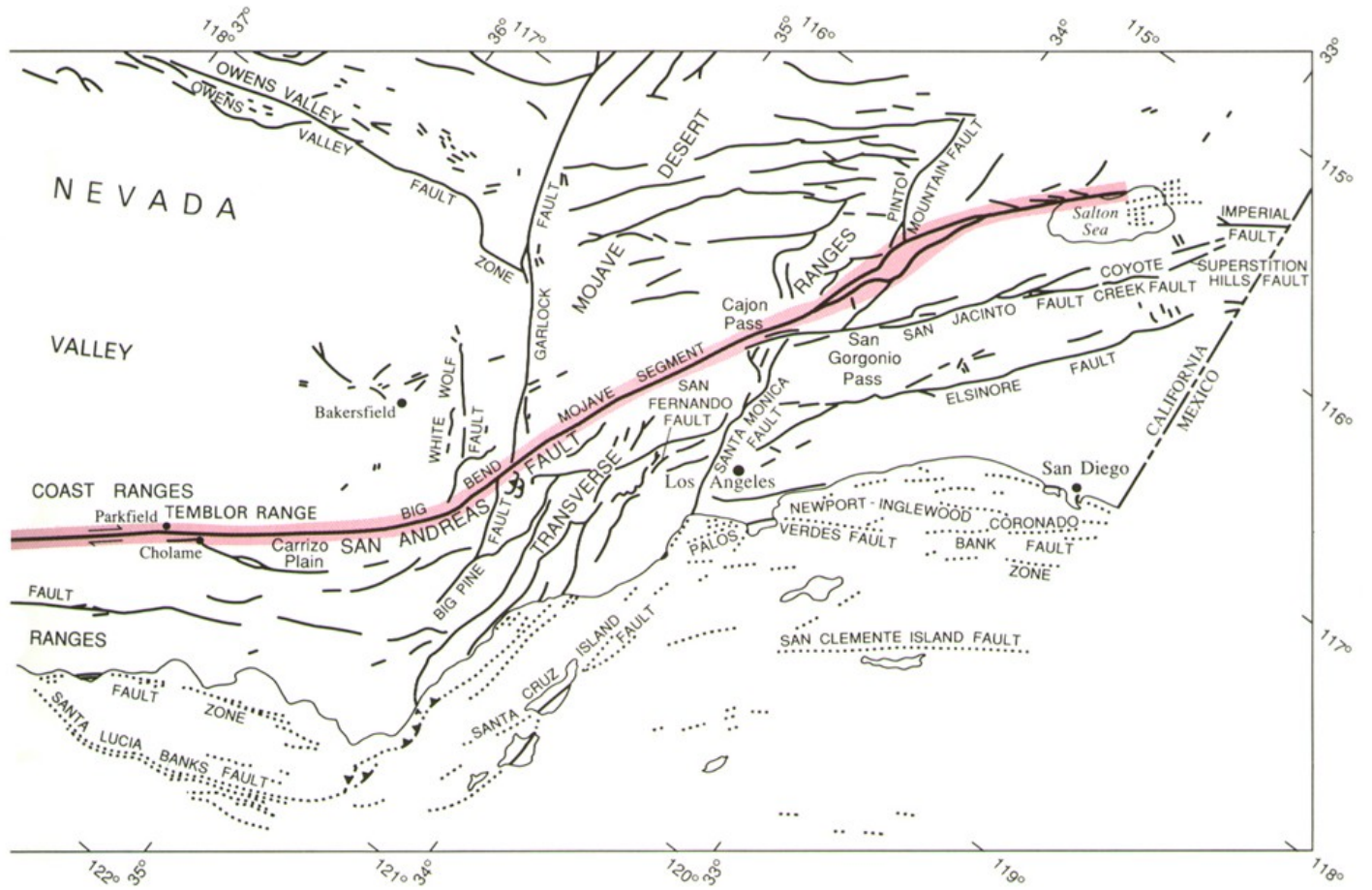
Zoback, M. D., Hickman, S.H., Ellsworth, W.L. (1998): *Scientific Drilling into the San Andreas Fault at Parkfield, CA: Project Overview and Operational Plan*, U.S. Geological Survey, U.S. Department of Energy, International Continental Drilling Program, Page Last Updated: August 30, 1998, [cit. 4.8.2011], Page URL: http://www.icdp-online.org/upload/pdf/safod/SAFOD_PH_proposal.html

Zoback, M. D., Hickman, S.H., Ellsworth, W.L. (2007): *The role of fault zone drilling*, Treatise on Geophysics 4, 649-674

7. Appendix A

Podrobná mapa systému zlomov San Andreas (zdroj: Wallace, 1990)





8. Apendix B

Príloha popisuje zemetrasenia s magnitúdom $\geq 5,5$ v oblasti, ktorá je ohraničená šrafovanou líniou na obrázku (zdroj: Topozada, 2002).

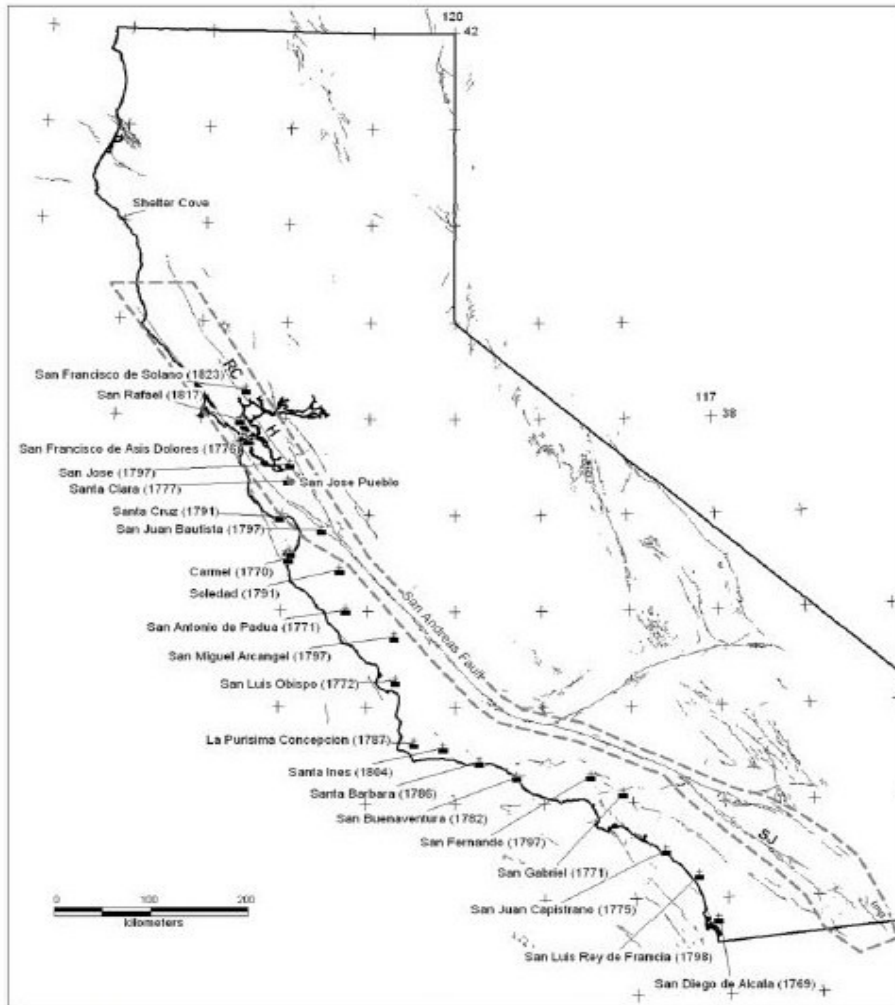


Figure 1. Index map showing the California missions. The dates the missions were established are indicated. All missions were secularized in 1834. Dashed region represents area of San Andreas fault zone considered in this article. Fault zones: H, Hayward; RC, Rogers Creek; SJ, San Jacinto; Imp, Imperial.

Dátum	Magnitúdo	Oblasť/Popis
3. marec 1901	6,4	Údolie Parkfield-Priest: Toto zemetrasenie spôsobilo značné škody v Parkfiede a susedných mestách, malé otrasy bolo cítiť aj na severe v San Francisku a na východe v Porterville. V Monterey Bay vzniklo tsunami pravdepodobne podmorským zosuvom pôdy (Lander et al., 1993). V regióne Monterey Canyon bolo zmapovaných niekoľko podmorských zosuvov pôdy (Greene and Kenedy, 1989). Boli registrované štyri následné otrasy s M 5-5,5.
11. júl 1905	6,1	San Jose: Boli zničené komíny v San Jose, Santa Clara, Santa Cruz, Watsonville, Haywarde a Livermore. V San Francisku bolo rozbitých pár okien a padala omietka. V Oaklande padal porcelán a tretky.
3. august 1903	6,2	San Jose: V San Jose padali kamenné ozdoby a omietka na ulicu. V Santa Clara padala omietka, praskali steny a rozbíjali sa okná. V Oaklande padali okná a malta z budov, ľudia vybehovali von. Podobný efekt bol aj v pociťovaný aj v San Francisku.
18. apríl 1906	7,8	Obrovské zemetrasenie v San Francisku. Obrovské San Franciské zemetrasenie vzniklo ruptúrou zlomu San Andreas od línie Monterey-San Benito County až po líniu Humbolt-Mendocino County. Značné škody boli spôsobené od severnej časti okresu Monterey po juh okresu Humbolt. Okolo 3000 zomrelo, straty na majetku presahovali čiastku 524 miliónov dolárov. Zemetrasenie trvalo viac ako 1 minútu.
19. apríl 1906	6,2	Imperial Valley: presná poloha neznáma.
18. máj 1906	5,6	San Juan Batista
20. september 1907	5,8	Parkfield:
11. marec 1910	5,8	Watsonville: V Chittendne padali z regálov fľaše, domy sa kývali a praskali. V Santa Cruz padala omietka, rozbíjal sa porcelánový riad a okná. Vo Watsonville boli porozbíjané okná a porcelán. V Salinas sa všetci prebudili, niektorí vystrašení ľudia vybehli von. Toto bol pravdepodobne oneskorený následný otras po obrovskom San Franciskom zemetrasení.
11. apríl 1910	5,8	Anza-Borego Springs
1. júl 1911	6,4	Juhovýchod San Jose: Tehlové steny popraskali a komíny boli zničené až vo vzdialenosti 35 km v údolí Santa Clara.
23. jún 1915	6	Imperial Valley
23. jún 1915	5,9	Imperial Valley
6. august 1916	5,6	Palcines Area: V Palcines boli zničené komíny na hoteloch, menšie škody vznikli v Hollistri. Obrovské balvany sa skotúľali na diaľnicu v Chittenden Pass v okrese Santa Cruz.

30. september 1916	5,7	Pohorie Borrego
23. október 1916	5,5	Tejon Pass región: 10 minút neskôr bolo cítiť následné otrasy s $M \sim 5$.
28. máj 1917	5,5	Imperial Valley
21. apríl 1918	6,8	San Jacinto: V San Jacintu a Hemete bolo zranených niekoľko občanov, jeden smrteľne. Škody na majetku presiahli sumu 200 000 dolárov.
1. máj 1918	5,6	Imperial Valley
6. jún 1918	5,5	Pohorie pri San Jacinto
16. február 1919	5,7	Tejon Pass región
10. marec 1922	6,3	Údolie Parkfield-Priest:
18. august 1922	5,7	Údolie Parkfield-Priest:
23. júl 1923	6,2	San Bernardino región
7. november 1923	5,5	Imperial Valley
1. január 1927	5,5	Mexicalli
1. jún 1927	5,8	Mexicalli
2. október 1928	5,5	San Jacinto: Lokácia je len približná
8. január 1934	6	Parkfield
25. marec 1937	5,6	Pepperwood
19. máj 1940	7	Imperial Valley: Pri zemetrasení zvanom El Centro prišlo o život 9 ľudí, škoda na majetkoch bola vyčíslená na 6 miliónov dolárov, zahŕňa tiež škody spôsobené následnými otrasmami v blízkosti Brawley. Na zlome bolo namerané pravostranné posunutie o 5,8m.
19. máj 1940	5,5	Imperial Valley: následný otras
19. máj 1940	5,5	Imperial Valley: následný otras
19. máj 1940	5,5	Imperial Valley: následný otras
20. december 1940	5,5	Fort Bragg
21. október 1942	6,4	Pohorie Fish Creek, údolie Lower Borrego: toto zemetrasenie spôsobilo len menšie škody na majetkoch.
22. október 1942	6	Saltonské more: následný otras
15. august 1945	5,7	San Jacinto
4. december 1948	6	Desert hot spring
29. júl 1950	5,5	Imperial Valley
24. január 1951	5,8	Imperial Valley
14. jún 1953	5,5	Brawley
19. marec 1954	6,3	Arroyo Salada
19. marec 1954	5,5	Arroyo Salada: následný otras

25. apríl 1954	5,6	Watsonville: Východne od Watsonvillu bolo niekoľko zle postavených domov posunutých zo svojích základov a vážne poškodených. Pozdĺž rieky Pajaro praskala zem.
9. apríl 1961	5,5	Hollister: Dve silné zemetrasenia poškodili mnoho budov v Hollistri a v susedstve, cena zničeného majetku dosahovala 250 000 dolárov. Väčšie škody napáchalo zemetrasenie aj v okrese Courthouse. Južne od Hollistru sa objavila 15m prasklina.
9. apríl 1961	5,5	Hollister
28. jún 1966	5,5	Parkfield
28. jún 1966	6	Parkfield
9. apríl 1968	6,6	Pohorie Borrego: Toto zemetrasenie bolo sprevádzané povrchovou ruptúrou na segmente Coyot Creek, vo veľmi riedko osídlenej oblasti.
28. apríl 1969	5,8	Borrego Springs
2. október 1969	5,6	Santa Rosa: Dve 83-minút trvajúce zemetrasenia v Santa Rosa spôsobili smrť jedného človeka a poškodenia majetku v cene 8,35 miliónov dolárov. Niekoľko tehlových a drevených trámov bolo poškodených na starších budovách, padali komíny, chodníky popraskali a praskli podzemné potrubia. Obe zemetrasenia pociťovali ľudia južne od Santa Cruzu až po východ Sacramento.
2. október 1969	5,7	Santa Rosa
6. august 1979	5,7	Jazero Coyote: Bolo zranených 16 ľudí a škoda na majetku sa vyšplhala na 500 tisíc dolárov. V Hollistri a Gilroy boli poškodené komíny a rozbitý kryštál.
15. október 1979	6,5	Imperial Valley: Toto zemetrasenie zranilo 90 ľudí a spôsobilo 30 miliónové škody na majetku.
16. október 1979	5,5	Imperial Valley
25. február 1980	5,5	Anza
26. apríl 1981	5,9	Imperial Valley
24. apríl 1984	6,2	Morgan Hill: Škody na majetku presahovali 8 miliónov dolárov, 27 ľudí bolo zranených.
26. január 1986	5,5	Palcines- Hollister: Len škoda na vinných nádržiach v Palcines sa vyšplhala na 800 tisíc dolárov, v Hollistri popraskali plynovody a vodovodné potrubia. V Tres Pinos spadli dva komíny.
8. júl 1986	6	Severný Palm Spring
24. november 1987	6,2	Zlom Elmore Ranch
24. november 1987	6,6	Superstitions Hills
18. október 1989	6,9	Loma Prieta

9. Appendix C

Tabuľky veľkých zemetrasení v Kalifornii a Nevade v rokoch 1769-1989:
(data poukazujú na podobnosť v lokácii, čase a rozsahu zemetrasenia)
(zdroj: Wallace, 1990)

TABLE 6.1.—Major California and Nevada earthquakes, 1769–1989

Date and origin time (GMT)	<i>M</i>	Lat N. and Long W.	Locality	<i>M_L</i>	<i>M_{G-R}</i>	<i>M_S</i>	<i>M_I</i>	<i>M</i>
1769/07/28	6?	34° 118°	Los Angeles Basin	—	—	—	6	—
1800/11/22 21:30	6½?	33° 117°18'	San Diego region	—	—	—	≥6½	—
1808/06/21	6?	37°48' 122°30'	San Francisco region	—	—	—	6	—
1812/12/08 15:00	7	34°22' 117°39'	Wrightwood	—	—	—	6.9	—
1812/12/21 19:00	7	34°12' 119°54'	Santa Barbara Channel	—	—	—	7.1	—
1827/09/24 04:00	5½?	34° 119°	Los Angeles region	—	—	—	5½ to 6	—
1836/06/10 15:30	6¾	37°48' 122°12'	Hayward fault	—	—	—	6.8	—
1838/06/? p.m.	7	37°36' 122°24'	San Francisco Peninsula	—	—	—	≥7.0	—
1852/11/29 20:00	6½	32°30' 115°	Volcano Lake, B.C.	—	—	—	6 to 7	—
1855/07/11 04:15	6?	34° 6' 118° 6'	Los Angeles region	—	—	—	6	—
1856/02/15 13:25	5¾	37°30' 122°18'	San Francisco Peninsula	—	—	—	5.5	—
1857/01/09 16:00	8¼	35°42' 120°18'	Great Fort Tejon earthquake	—	—	—	7.6	7.8
1857/09/03 03:05	6¼	39°18' 120°	Western Nevada or eastern Sierra Nevada	—	—	—	6.0	—
1858/11/26 08:35	6¼	37°30' 121°54'	San Jose region	—	—	—	6.1	—
1858/12/16 10:00	6	34° 117°30'	San Bernadino region	—	—	—	6	—
1860/03/15 19:00	6½	39°30' 119°30'	Carson City, Nev. region	—	—	—	6.3	—
1861/07/04 00:11	5¾	37°48' 122° 0'	San Ramon Valley	—	—	—	5.6	—
1862/05/27 20:00	6	32°42' 117°12'	San Diego region	—	—	—	5.9	—
1864/02/26 13:47	6	37° 6' 121°42'	Southern Santa Cruz Mountains	—	—	—	5.9	—
1864/03/05 16:49	5¾	37°42' 122°	East of San Francisco Bay	—	—	—	5.7	—
1865/10/08 20:46	6½	37° 0' 122° 0'	Southern Santa Cruz Mountains	—	—	—	6.3	—
1866/07/15 06:30	6	37°30' 121°18'	Western San Joaquin Valley	—	—	—	5.8	—
1868/05/30 05:10	6	39°18' 119°42'	Virginia City, Nev.	—	—	—	5.8, 6	—
1868/10/21 15:53	7	37°42' 122° 6'	Hayward fault	—	—	—	6.8	—
1869/12/27 01:55	6¼	39°24' 119°42'	Olinghouse fault, Nev. (?)	—	—	—	6.1	—
1869/12/27 10:00	6	39° 6' 119°48'	Carson City, Nev. region	—	—	—	5.9	—
1870/02/17 20:12	6	37°12' 122° 6'	Los Gatos	—	—	—	5.8	—
1871/03/02 21:05	6	40°24' 124°12'	Cape Mendocino	—	—	—	5.9	—
1872/03/26 10:30	7.6	36°42' 118° 6'	Owens Valley	—	—	—	7.3	7.6
1872/03/26 14:06	6¾	36°54' 118°12'	Owens Valley	—	—	—	6.5	—
1872/04/03 12:15	6¼	37° 118°12'	Owens Valley	—	—	—	6.1	—
1872/04/11 19:00	6¾	37°30' 118°30'	Owens Valley	—	—	—	6.6	—
1872/05/03 01:00	5¾	33° 115°	Imperial Valley (?)	—	—	—	≥5.5	—
1872/11/12 00:00	6	39°? 117°?	Austin, Nev. region (?)	—	—	—	6	—
1873/11/23 05:00	6¾	42° 124°	Crescent City	—	—	—	6.7	—
1875/01/24 12:00	6	40°12' 120°30'	Honey Lake	—	—	—	5.8	—
1875/11/15 22:30	6¼	32°30' 115°30'	Imperial Valley to Colorado River delta (?)	—	—	—	6.2	—
1878/05/09 04:25	6	40° 6' 124°	Punta Gorda region	—	—	—	5.8	—
1881/02/02 00:11	5¾	36° 0' 120°30'	Parkfield	—	—	—	5.6	—
1881/04/10 10:00	6	37°24' 121°24'	Western San Joaquin Valley	—	—	—	5.9	—
1882/03/06 21:45	5¾	36°54' 121°12'	Hollister	—	—	—	5.7	—
1883/09/05 12:30	6¼	34°12' 119°54'	Santa Barbara Channel	—	—	—	6.0	—
1884/01/28 07:30	5¾	41°6' 123°36'	Klamath Mountains	—	—	—	5.7	—
1884/03/26 00:40	6	37°6' 122°12'	Santa Cruz Mountains	—	—	—	5.9	—
1885/01/31 05:45	5¾	40°24' 120°36'	Susanville	—	—	—	5.7	—
1885/04/12 04:05	6¼	36°24' 121°	Southern Diablo Range	—	—	—	6.2	—
1887/06/03 10:48	6½	39°12' 119°48'	Carson City, Nev. region	—	—	—	6.3	—
1888/04/29 04:48	6	39°42' 120°42'	Mohawk Valley	—	—	—	5.9	—
1889/05/19 11:10	6¼	38° 0' 121°54'	Antioch	—	—	—	6.0	—
1889/06/20 06:00	6	40°30' 120°42'	Susanville	—	—	—	5.9	—
1889/09/30 05:20	5¾	37°12' 118°42'	Bishop region	—	—	—	5.6	—
1890/02/09 12:06	6½	33°24' 116°18'	San Jacinto or Elsinore fault region (?)	—	—	—	6.3	—
1890/04/24 11:36	6¼	36°54' 121°36'	Pajaro Gap	—	—	—	6.0	—
1890/07/26 09:40	6¼	40°30' 124°12'	Cape Mendocino	—	—	—	6.0	—
1891/07/30 14:10	6	32° 115°	Colorado River delta region	—	—	—	6.0	—

TABLE 6.1.—Major California and Nevada earthquakes, 1979–1989—Continued

Date and origin time (GMT)	<i>M</i>	Lat N. and Long W.	Locality	<i>M_L</i>	<i>M_{G-R}</i>	<i>M_S</i>	<i>M_I</i>	M
1892/02/24 07:20	7	32°33' 115°38'	Laguna Salada, B.C.	—	—	—	6.7, 7.2	—
1892/04/19 10:50	6½	38°24' 122° 0'	Vacaville	—	—	—	6.4	—
1892/04/21 17:43	6¼	38°30' 121°54'	Winters	—	—	—	6.2	—
1892/05/28 11:15	6¼	33°12' 116°12'	San Jacinto or Elsinore fault region (?)	—	—	—	6.3	—
1892/11/13 12:45	5¾	36°48' 121°30'	Hollister	—	—	—	5.6	—
1893/05/19 00:35	5¾	34° 6' 119°24'	Pico Canyon	—	—	—	5.5, 5.9	—
1894/07/30 05:12	6	34°18' 117°36'	Lytle Creek region	—	—	—	5.9, 6.0	—
1894/09/30 17:36	6	40°18' 123°42'	Cape Mendocino region	—	—	—	5.8	—
1894/10/23 23:03	5¾	32°48' 116°48'	East of San Diego	—	—	—	5.7	—
1896/08/17 11:30	6	36°42' 118°18'	Southeastern Sierra Nevada	—	—	—	5.9	—
1897/06/20 20:14	6¼	37° 0' 121°30'	Gilroy	—	—	—	6.2	—
1898/03/31 07:43	6¼	38°12' 122°24'	Mare Island	—	—	(6.5)	6.2	—
1898/04/15 07:07	6½	39°12' 123°48'	Mendocino	—	—	(6.7)	6.4	—
1899/04/16 13:40	7	41°? 126°?	West of Eureka	—	—	7.0	5.7	—
1899/07/06 20:10	5¾	37°12' 121°30'	Morgan Hill	—	—	(4.7)	5.8	—
1899/07/22 20:32	5¾	34°18' 117°30'	Lytle Creek region	—	—	(5.6)	6.5, 6.4	—
1899/12/25 12:25	6.4	33°48' 117° 0'	San Jacinto and Hemet	—	—	6.4	6.6, 6.7	—
1901/03/03 07:45	6.4	36° 0' 120°30'	Parkfield	—	—	6.4	5.8	—
1903/01/24 05:27	6.6	31°30' 115°	Colorado River delta region	—	7+	6.6	—	—
1903/06/11 13:12	5½	37°24' 121°54'	San Jose	—	—	(5.4)	5.8	—
1903/08/03 06:49	5½	37°18' 121°48'	San Jose	—	—	(5.3)	5.8	—
1906/04/18 13:12	8¼	37°42' 122°30'	Great 1906 earthquake	6.9	8¼, 8.3	7.8, 8.3	7.8	7.7
1906/04/19 00:30	6.2	32°54' 115°30'	Imperial Valley	—	6+	6.2	5.8	—
1906/04/23 09:10	6.4	41° 124°	Arcata	—	—	6.4	—	—
1907/09/20 01:54	5.3	34°12'? 117° 6'?	San Bernardino region	—	6	*	5.3	—
1908/11/04 08:37	6?	36°? 117°?	Death Valley region	—	6½	*	—	—
1909/10/29 06:45	5.8	40°30' 124°12'	Cape Mendocino	—	6+	5.8, (5.1)	6.4	—
1910/03/11 06:52	5.8	36°54' 121°48'	Watsonville	—	—	5.8	5.5	—
1910/03/19 00:11	6.0	40°? 125°?	West of Cape Mendocino	—	—	6.0	6.2	—
1910/05/15 15:47	5½	33°42' 117°24'	Glen Ivy Hot Springs	—	—	(5.5)	6.0, 5.3	—
1910/08/05 01:31	6.6	42° 127°	West of Crescent City	—	6.8	6.6	—	—
1911/07/01 22:00	6.5	37°15' 121°45'	Calaveras fault	—	6.6	6.5	6.2	—
1914/02/18 18:17	5½?	39°30' 119°48'	Truckee region	—	—	*	6	—
1914/04/24 08:34	6	39°30' 119°48'	Truckee region	—	—	(5.5), (5.6)	6.4	—
1915/05/06 12:09	6.2	40° 126°	West of Cape Mendocino	—	6¼	6.2, (6.0)	—	—
1915/06/23 03:59	6.0	32°48' 115°30'	Imperial Valley	—	6¼	6.0, (5.6)	5.6, 5.5	—
1915/06/23 04:56	5.9	32°48' 115°30'	Imperial Valley	—	6¼	5.9	5.6, 5.5	—
1915/10/03 06:52	7.3	40°30' 117°30'	Pleasant Valley, Nev.	—	7¾	7.6, 7.4, 7.3	—	7.2
1915/11/21 00:13	7.1	32° 115°	Volcano Lake, B.C.	—	7.1	7.1, 6.8	—	—
1915/12/31 12:20	6.5	41° 126°	West of Eureka	—	6½	6.5, (6.4)	—	—
1916/02/03 05:03	5.9	41° 117°48'	North of Pleasant Valley, Nev.	—	—	(5.1)	5.9	—
1916/10/23 02:44	5.3	34°54' 118°54'	Tejon Pass region	—	5½±	6	5.2, 5.3	(5.3)
1916/11/10 09:11	6.1	35°30' 116° 0'	South of Death Valley	—	6.1	(5.7, 5.9)	—	—
1918/04/21 22:32	6.9	33°48' 117° 0'	San Jacinto	—	6.8	7.2, 6.9	6.6	(6.8)
1918/07/15 00:23	6.5	41° 125°	West of Eureka	—	6½	6.5	5.9	—
1922/01/26 09:31	6.0	41° 126°	West of Eureka	—	6	(6.1)	—	—
1922/01/31 13:17	7.3	41° 125°30'	West of Eureka	—	7.3	7.4	—	—
1922/03/10 11:21	6.3	36° 0' 120°30'	Parkfield	—	6½	6.3	6.3	6.1
1923/01/22 09:04	7.2	40°30' 124°30'	Cape Mendocino	—	7.2	7.3	6.5, 6.8	—
1923/07/23 07:30	6.0	34° 0' 117°18'	San Bernardino region	—	6¼	—	6.0	6.0
1925/06/04 12:02	6	41°30' 125°	West of Eureka	—	6	(5.8)	—	—
1925/06/29 14:42	6.3	34°18' 119°48'	Santa Barbara	—	6¼	—	6.3	(6.9)
1926/10/22 12:35	6.1	36°37' 122°21'	Monterey Bay	—	6.1	—	6.1	—
1926/10/22 13:35	6.1	36°33' 122°11'	Monterey Bay	—	6.1	—	—	—
1926/12/10 08:38	6.0	40°45' 126°	West of Cape Mendocino	—	6.0	(6.2)	—	—

TABLE 6.1.—Major California and Nevada earthquakes, 1979–1989—Continued

Date and origin time (GMT)	<i>M</i>	Lat N. and Long W.	Locality	<i>M_L</i>	<i>M_{G-R}</i>	<i>M_S</i>	<i>M_I</i>	M
1927/09/18 02:07	6	37°30' 118°45'	Bishop region-----	—	6	—	5.5	—
1927/11/04 13:50	7.3	34°42' 120°48'	Southwest of Lompoc-----	—	7.3, 7.5	(7.2)	6.2	(7.3)
1932/06/06 08:44	6.4	40°45' 124°30'	Eureka-----	—	6.4	(6.4)	5.9	—
1932/12/21 06:10	7.2	38°45' 118°	Cedar Mountain, Nev.-----	—	7.2	(7.4)	—	—
1933/01/05 06:51	5.9	38°46' 117°44'	Cedar Mountain, Nev.-----	5.7	5.9	—	—	—
1933/03/11 01:54	6.3	33°37' 117°58'	Long Beach-----	6.3	6¼	(6.5)	6.2	6.2
1933/06/25 20:45	6.1	39° 4' 119°20'	Yerington, Nev.-----	—	6.1	—	—	—
1934/01/30 20:16	6.3	38°18' 118°24'	Excelsior Mountain, Nev.-----	—	6.3, 6.3	(6.4)	—	—
1934/06/08 04:47	6.0	36° 0' 120°30'	Parkfield-----	5.2, 6.0, 6.1	6.0	—	5.6	6.1
1934/07/06 22:48	6.5	41°15' 125°45'	West of Eureka-----	—	6.5	—	—	—
1934/12/30 13:52	6.5	32°15' 115°30'	Laguna Salada, B.C.-----	6.5	6.5	—	—	(6.4)
1934/12/31 18:45	7.0	32° 31°45'	Colorado River delta-----	7.1	7.0	—	—	(7.1)
1935/02/24 01:45	5.3	31°59' 115°12'	Colorado River delta-----	6.0	5¼	—	—	(≤5.3)
1936/06/03 09:15	5.9	40° 125°30'	West of Cape Mendocino-----	—	5.9	—	—	—
1937/03/25 16:49	6.0	33°28' 116°25'	Buck Ridge-----	6.0, 5.9	6.0	—	5.9	—
1940/02/08 08:05	6	39°45' 121°15'	Chico-----	5.7	6	—	—	—
1940/05/19 04:36	7.1	32°44' 115°30'	Imperial Valley-----	6.2	6.7, 7.1	7.2	6.4, 6.6	6.9, 7.1
1940/12/07 22:16	5½	31°40' 115° 5'	Colorado River delta-----	6.0	5¼	—	—	(≤5.3)
1941/02/09 09:44	6.6	40°42' 125°24'	West of Cape Mendocino-----	6.4	6.6	—	—	—
1941/04/09 17:08	5.3	31° 114°	Gulf of California-----	6.0	5¼	—	—	—
1941/05/13 16:01	6.0	40°18' 126°24'	West of Cape Mendocino-----	6.0	6	—	—	—
1941/07/01 07:50	5.9	34°22' 119°35'	Carpenteria-----	5.9	5.9	—	5.5, 6.0	(6.0)
1941/09/14 16:43	5.8	37°34' 118°44'	Tom's Place-----	5.8, 6.0	5.8	—	5.6	—
1941/09/14 18:39	6.0	37°34' 118°44'	Tom's Place-----	6.0	6.0	—	5.6	(5.5)
1941/10/03 16:13	6.4	40°24' 124°48'	West of Cape Mendocino-----	6.4	6.4	—	—	—
1942/10/21 16:22	6.5	33° 3' 116° 5'	Fish Creek Mountains-----	6.5	6½	—	6.0, 6.3	6.6
1942/12/03 09:44	5.9	39°42' 119°18'	North of Wadsworth, Nev.-----	5.5	5.9	—	—	—
1945/05/19 15:07	6.2	40°24' 126°54'	West of Cape Mendocino-----	6.0	6.2	—	—	—
1945/09/28 22:24	6.0	41°54' 126°42'	West of Crescent City-----	6.0	6.0	—	—	—
1946/03/15 13:49	6.3	35°44' 118° 3'	Walker Pass-----	6.3	6¼	—	6.1	6.0
1947/04/10 15:58	6.4	34°59' 116°33'	Manix-----	6.2	6.4	—	6.3, 6.4	6.6
1948/12/04 23:43	6.5	33°56' 116°23'	Desert Hot Springs-----	6.5	6.5±	—	6.2, 6.5	6.0
1948/12/29 12:53	6.0	39°33' 120° 5'	Verdi, Nev.-----	6.0	6.0	—	5.7	—
1949/03/24 20:56	6.2	41°18' 126°	West of Eureka-----	5.9	6.2	—	—	—
1949/05/02 11:25	5.9	34° 1' 115°41'	Pinto Mountain-----	5.9	5.9	—	—	—
1951/10/08 04:10	6	40°15' 124°30'	West of Cape Mendocino-----	5.8	6	—	—	—
1951/12/26 00:46	5.9	32°48' 118°18'	San Clemente Island-----	5.9	5.9	—	—	—
1952/07/21 11:52	7.7	35° 0' 119° 1'	Kern County earthquake-----	7.2	7.7	7.8	7.0	7.5, 7.3
1952/07/21 12:05	6.4	35° 0' 119° 0'	Kern County-----	6.4	—	—	—	—
1952/07/23 00:38	6.1	35°22' 118°35'	Kern County-----	6.1	—	—	—	5.7
1952/07/29 07:03	6.1	35°23' 118°51'	Bakersfield-----	6.1	—	—	—	6.3
1952/11/22 07:46	6.0	35°44' 121°12'	Bryson-----	6.0	6±	—	—	—
1954/01/12 23:33	5.9	35° 0' 119° 1'	West of Wheeler Ridge-----	5.9	—	—	—	5.7
1954/03/19 09:54	6.2	33°17' 116°11'	Arroyo Salada-----	6.2, 6.2	—	—	6.2	6.4
1954/07/06 11:13	6.6	39°25' 118°32'	Rainbow Mountain, Nev.-----	6.8	6.6	6.3	—	6.2
1954/07/06 22:07	6.4	39°18' 118°30'	Rainbow Mountain, Nev.-----	6.0	6.4	—	—	6.1
1954/08/24 05:51	6.8	39°35' 118°27'	Stillwater, Nev.-----	6.8	6.8	6.9	—	6.6
1954/08/31 22:20	6.3	39°30' 118°30'	Stillwater, Nev.-----	5.8	6.3	—	—	5.8
1954/10/24 09:44	6.0	31°30' 116°	East of Santo Tomas, B.C.-----	6.0	—	—	—	6.0
1954/11/12 12:26	6.3	31°30' 116°	East of Santo Tomas, B.C.-----	6.3	—	—	—	6.3
1954/11/25 11:16	6.5	40°16' 125°38'	West of Cape Mendocino-----	6.1	6.5	7.2	—	—
1954/12/16 11:07	7.1	39°19' 118°12'	Fairview Peak, Nev.-----	7.2	7.1	—	—	7.2
1954/12/16 11:11	6.8	39°30' 118° 0'	Dixie Valley, Nev.-----	7.1	6.8	—	—	7.0
1954/12/21 19:56	6.6	40°56' 123°47'	East of Arcata-----	6.5	6.6	—	—	—
1956/02/09 14:32	6.8	31°45' 115°55'	San Miguel, B.C.-----	6.8	—	—	6.3	6.5

TABLE 6.1.—Major California and Nevada earthquakes, 1979–1989—Continued

Date and origin time (GMT)	<i>M</i>	Lat N. and Long W.	Locality	<i>M_L</i>	<i>M_{G-R}</i>	<i>M_S</i>	<i>M_I</i>	<i>M</i>
1956/02/09 15:24	6.1	31°45′ 115°55′	San Miguel, B.C.-----	6.1	—	—	—	6.0
1956/02/14 18:33	6.3	31°30′ 115°30′	San Miguel, B.C.-----	6.3	—	—	—	6.2
1956/02/15 01:20	6.4	31°30′ 115°30′	San Miguel, B.C.-----	6.4	—	—	—	6.2
1956/10/11 16:48	6.0	40°40′ 125°46′	West of Cape Mendocino-----	6.0	—	—	—	—
1956/12/13 13:15	6.0	31° 115°	Western shore, Gulf of California-----	6.0	—	—	—	—
1959/03/23 07:10	6.3	39°36′ 118° 1′	Dixie Valley, Nev.-----	6.3	—	—	—	—
1959/06/23 14:35	6.1	39° 5′ 118°49′	Schurz, Nev.-----	6.1	—	—	—	—
1960/08/09 07:39	6.2	40°19′ 127° 4′	West of Cape Mendocino-----	6.2	—	—	—	—
1966/06/28 04:26	6.0	36° 0′ 120°30′	Parkfield-----	5.5, 5.6, 5.7	—	6.0	5.7	6.1
1966/08/07 17:36	6.3	31°48′ 114°30′	Gulf of California-----	6.3	—	—	—	6.3
1966/09/12 16:41	6.0	39°25′ 120° 9′	Truckee-----	6.0	—	—	—	5.9
1968/04/09 02:28	6.5	33°11′ 116° 8′	Borrego Mountain-----	6.4, 6.3, 6.8	—	6.8	6.3	6.5
1968/06/26 01:42	5.4	40°14′ 124°16′	Punta Gorda-----	5.9	—	5.4	—	—
1971/02/09 14:00	6.5	34°25′ 118°24′	San Fernando-----	6.4, 5.8	—	6.5, 6.5	6.5	6.7
1973/02/21 14:45	5.2	34° 4′ 119° 2′	Point Mugu-----	5.9, 5.6	—	5.2	—	5.3
1979/08/06 17:05	5.7	37° 7′ 121°31′	Coyote Lake-----	5.8	—	5.7	5.6	5.7
1979/10/15 23:16	6.5	32°36′ 115°18′	Imperial Valley-----	6.6, 6.5, 6.4	—	6.9, 6.7	6.0	6.4 to 6.6
1980/01/24 19:00	5.8	37°50′ 121°47′	Livermore-----	5.8	—	5.9	—	5.8
1980/05/25 16:33	6.1	37°36′ 118°50′	Mammoth Lakes-----	6.1, 6.4, 6.2	—	6.1	—	6.2
1980/05/25 16:49	5.9	37°39′ 118°54′	Mammoth Lakes-----	6.0, 5.9	—	—	—	—
1980/05/25 19:44	5.8	37°33′ 118°49′	Mammoth Lakes-----	6.1, 6.6, 6.4	—	5.8	—	5.9
1980/05/27 14:50	6.0	37°29′ 118°48′	Mammoth Lakes-----	6.2, 6.4, 5.8	—	6.0	—	5.9
1980/06/09 03:28	6.4	32°12′ 115° 5′	Victoria, B.C.-----	6.1, 6.1	—	6.4	—	6.4
1980/11/08 10:27	7.2	41° 7′ 124°40′	West of Eureka-----	6.9	—	7.2	—	7.4
1981/04/26 12:09	6.0	33° 8′ 115°39′	Westmorland-----	5.6	—	6.0	—	5.9
1981/09/04 15:50	5.9	33°40′ 119° 7′	North of Santa Barbara Island-----	5.3	—	5.9	—	5.9
1981/09/30 11:53	5.8	37°35′ 118°52′	Mammoth Lakes-----	5.9, 6.0, 5.9	—	5.8	—	5.7
1983/05/02 23:42	6.5	36°14′ 120°19′	Coalinga-----	6.7, 6.1, 6.1	—	6.5	—	6.4, 6.5
1983/07/22 02:39	5.7	36°14′ 120°25′	Coalinga-----	6.0, 5.6	—	5.7	—	5.7, 6.0
1984/04/24 21:15	6.1	37°19′ 121°39′	Morgan Hill-----	6.2	—	6.1	—	6.2, 6.5
1984/09/10 03:14	6.7	40°23′ 127° 9′	Mendocino Fracture Zone-----	6.6	—	6.7	—	6.7
1984/11/23 18:08	5.7	37°27′ 118°36′	Round Valley-----	6.1, 6.2	—	5.7	—	5.8
1985/08/04 12:01	5.9	36° 8′ 120°10′	North Kettleman Hills-----	5.6	—	5.9	—	6.1, 6.1
1986/07/08 09:20	6.0	34° 0′ 116°36′	North Palm Springs-----	5.9	—	6.0	—	6.2
1986/07/20 14:29	5.6	37°34′ 118°26′	Chalfant Valley-----	5.9, 5.9	—	5.6	—	5.8
1986/07/21 14:42	6.2	37°32′ 118°26′	Chalfant Valley-----	6.5, 6.0	—	6.2	—	6.3, 6.4
1986/07/31 07:22	5.2	37°28′ 118°22′	Chalfant Valley-----	5.8, 5.9	—	5.2	—	5.5
1987/10/01 14:42	5.8	34° 3′ 118° 5′	Whittier Narrows-----	5.9	—	5.8	—	6.1
1987/11/24 01:53	6.2	33° 4′ 115°47′	Elmore Ranch fault-----	5.8	—	6.2	—	5.9
1987/11/24 13:16	6.6	33° 1′ 115°51′	Superstition Hills-----	6.0	—	6.6	—	6.5
1989/10/18 00:04	7.1	37° 2′ 121°53′	Loma Prieta-----	7.0	—	7.1	—	7.0