Tomáš Fischer, Pavla Hrubcová

Zemětřesení. Jak vznikají a jaké tajemství odhalují o nitru Země

Jde o přírodní jev, který dokáže být fascinující i děsivý zároveň. Představte si, že se pod vašima nohama začne bez jakéhokoli varování třást zem. Co za tím vlastně stojí? Zemětřesení vzniká náhlým uvolněním deformační energie v zemské kůře, nejčastěji na rozhraní litosférických desek. Z ohniska se šíří seismické vlny, které způsobují otřesy půdy. Na českém území se vyskytují slabá zemětřesení, nejčastěji v západních Čechách, která patrně souvisejí s místními výrony oxidu uhličitého. Studium zemětřesení pomáhá lépe porozumět vnitřní stavbě Země a omezovat jeho ničivé účinky.

Jak vzniká a kde k němu dochází

Když pomineme nepříliš častá zemětřesení vulkanického původu nebo ta způsobená sesuvy půdy, leží příčina otřesů hluboko pod zemským povrchem. V horninách se hromadí elastické napětí, které při překročení mezní pevnosti vede k náhlému porušení hornin a vzniku trhliny. Podél trhliny se proti sobě náhle posunou dva bloky horniny a zároveň se uvolní nahromaděná energie. Ta se šíří zemským tělesem ve formě seismických vln, jež po dopadu na povrch vyvolávají otřesy. Někdy jsou téměř nepostřehnutelné, jindy natolik silné, že způsobí škody na budovách, infrastruktuře nebo v krajině. Místo vzniku trhliny nazýváme hypocentrem a jeho kolmý průmět na zemský povrch epicentrem.

Většina tektonických zemětřesení vzniká v místech, kde se stýkají litosférické desky – obrovské bloky zemské kůry a nejsvrchnějšího pláště, které se pomalu pohybují po tekutější astenosféře. Jejich vzájemné pohyby nejsou vždy plynulé, někdy se desky do sebe zaklesnou a napětí na jejich rozhraních, ale i uvnitř vzrůstá.

Nejsilnější zemětřesení se tak vyskytují hlavně kolem okrajů litosférických desek (obr. 1). Mezi nejznámější seismické oblasti patří tichomořský ohnivý kruh – pás okolo Tichého oceánu (např. Japonsko, Chile, Indonésie, Aljaška), kde se oceánská deska podsouvá pod kontinentální desku. Nám bližší je Středomoří a oblast Turecka, kde se střetává africká a eurasijská litosférická deska (obr. 2). Silná zemětřesení se vyskytují i v Kalifornii (USA), vznikají tu podél známého zlomu San Andreas. Ačkoli se většina zemětřesení koncentruje do těchto oblastí, mohou se objevit i jinde, včetně míst, kde bychom je vůbec nečekali. Země je totiž živá a stále se mění. A občas nám to dá pořádně najevo. Velikost uvolněné energie závisí na velikosti porušené části zlomu a vzájemného posunu bloků. U největších zemětřesení je uvolněná energie, která se hromadí deformací zemské kůry, srovnatelná s celkovou roční spotřebou energie v ČR. A délka zlomu u nich dosahuje vyšších stovek a šířka vyšších desítek km, vzájemný posun pak přesahuje 10 m.

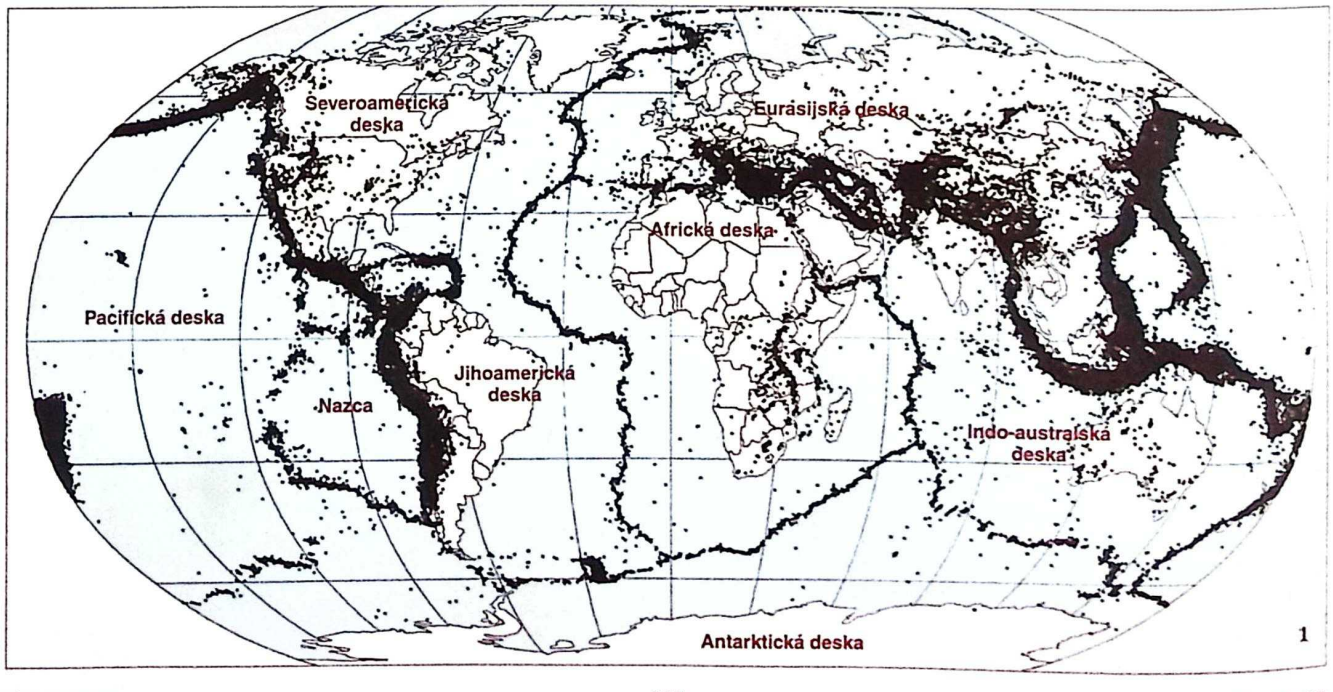
Seismografy

Časový záznam pohybu půdy, seismogram, je základním údajem pro analýzu zemětřesení. Jak ho ale získat, když se při otřesech všechno chvěje a nemáme tak pevný bod, vůči kterému bychom pohyb vztahovali? K tomu využíváme principu setrvačnosti vyjádřené prvním Newtonovým zákonem – když zavěsíme setrvačnou hmotu (závaží) na pružný závěs, zůstane v klidu, i když se okolí bude pohybovat. Příkladem může být kyvadlo, které stojí na místě, i když pohybujeme jeho závěsem. Tento princip zůstává stejný od dob prvních seismografů z konce 19. století. Měříme pohyb závaží zavěšeného na pružině, k níž je přidán tlumicí prvek, který potlačí vlastní kmity tak, abychom místo seismografu neměli netlumený oscilátor. V dnešní době se zaznamenávají tři složky pohybu půdy – vertikální a dvě horizontální – záznam se převádí do digitální formy a zpracovává numerickými algoritmy. Cílem je mít věrný záznam pohybu půdy, na němž můžeme změřit čas příchodu seismických vln, jejich amplitudu a další údaje.

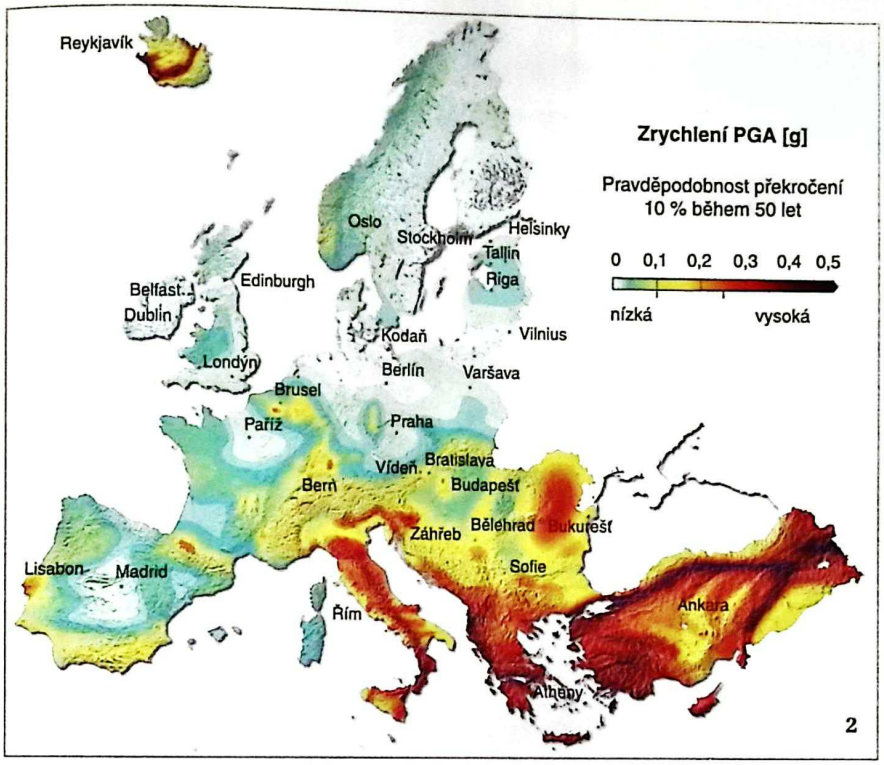
Magnitudo a intenzita zemětřesení

Když se v médiích objeví zpráva o zemětřesení, obvykle zazní jedno číslo, magnitudo, často označované „podle Richterovy škály". Číslo udává sílu zemětřesení a vyvolává různé představy. „Otřesy o síle, magnitudu 7,0

1 Litosférické desky a výskyt zemětřesení. Epicentra zemětřesení (černé body) mapují okraje litosférických desek. Podle: P. D. Lowman a B. C. Montgomery (1998)
2 Mapa seismického ohrožení Evropy zobrazuje očekávaný rozsah pohybu zemského povrchu (špičkové zrychlení podloží, Peak Ground Acceleration – PGA), kterého bude dosaženo s pravděpodobností 10 % během 50 let. Upraveno podle: D. Giardini a kol. (2013)



1



Tab. 1 Zkrácená forma makroseismické stupnice EMS-98. Blíže v textu

Intenzita	Definice	Zkrácený popis typických účinků
1	nepocítěno	Nepocítěno
2	zřídka pocítěno	Pocítěno jen jednotlivci na některých místech v domech
3	slabé	Zemětřesení cítí uvnitř budov někteří lidé (0–20 %) nanejvýš jako houpání nebo lehké chvění.
4	značně pozorované	Zemětřesení cítí uvnitř budov mnozí (10–60 %), venku jen výjimečně. Někteří jsou probuzeni. Okna a dveře rachotí.
5	silné	Zemětřesení cítí uvnitř budov většina (50–100 %), venku někteří. Mnozí spící se probudí. Někteří jsou vystrašeni. Budovy vibrují. Visící objekty se značně houpají. Malé předměty se posouvají. Dveře a okna se otvírají a zavírají.
6	mírně ničivé	Mnozí jsou vystrašeni a vybíhají ven. Některé předměty padají. Mnohé budovy utrpí malé nestrukturální škody jako vlásečnicové trhliny nebo opadané malé kousky omítky.
7	ničivé	Většina lidí je vystrašena a vybíhá ven. Nábytek se posouvá. Předměty padají z polic ve velkém množství. Mnohé dobře postavené běžné budovy utrpí střední škody: opadá omítka, padají části komínů; ve stěnách starších budov jsou velké trhliny a příčky jsou zřícené.
8	těžce ničivé	Mnozí mají problémy udržet rovnováhu. Mnohé domy mají velké trhliny ve stěnách. Několik dobře postavených běžných budov má vážně poškozené stěny. Slabé starší budovy se mohou zřítit.
9	destruktivní	Všeobecná panika. Mnoho slabých budov se řítí. I dobře postavené běžné budovy utrpí velmi těžké škody: těžké poškození stěn a částečně i strukturální škody.
10	velmi destruktivní	Mnohé dobře postavené běžné budovy se řítí.
11	devastující	Většina dobře postavených běžných budov se řítí. I některé dobře antiseismicky postavené budovy jsou zničeny.
12	úplně devastující	Téměř všechny budovy jsou zničeny.

zasáhly oblast...“ Ale co to vlastně znamená? A říká nám to nejdůležitější? Ve skutečnosti existují dvě odlišné veličiny popisující zemětřesení: magnitudo a intenzita. A každá z nich vyjadřuje něco úplně jiného.

• **Magnitudo** je údaj čistě přístrojový. Seismometry po celém světě zaznamenávají sílu seismických vln, která je úměrná velikosti posunutí na zlomu, nebo také energii uvolněné v ohnisku zemětřesení. Magnitudo je číslo určené pro každé zemětřesení jednoznačně, bez ohledu na jeho vzdálenost od pozorovatele nebo hloubku ohniska. Pro zemětřesení je charakteristické právě jedno magnitudo, a protože jde o logaritmickou stupnici, každé zvýšení o jednu jednotku představuje přibližně třicetinásobný nárůst uvolněné energie.

To ale ještě neznamená, že se povrch země bude třást na různých místech stejně silně. A právě tady přichází na řadu druhá veličina, makroseismická intenzita, zkráceně jen intenzita. Ta už není záležitostí přístrojů, ale pozorování.

• **Intenzita** vyjadřuje, jak zemětřesení působilo v konkrétním místě, jestli se jen kýval lustr, nebo se zřítila celá budova. Zohledňuje typ staveb, jejich stáří, odolnost i jak vážná byla případná poškození. Jinou váhu má popraskaná stará hliněná chalupa, jinou zřícený moderní železobetonový dům. Proto se intenzita vztahuje vždy k určité lokalitě a směrem od epicentra zpravidla klesá.

To, co při zemětřesení cítíme, tedy není úměrné magnitudu, ale intenzitě. A zatímco magnitudo vyjadřuje, kolik energie se uvolnilo v hloubce pod povrchem Země, intenzita popisuje, jak moc se tato energie projevila na povrchu, kde žijeme. V Evropě dnes používáme moderní dvanáctistupňovou škálu EMS-98 (tab. 1; viz odkaz na webu Živy). Snaží se objektivizovat a rozlišit různé typy budov, počítá s tím, že jiné škody budou na rodinném domě než na vysokém panelovém domě, a zohledňuje i četnost poškození budov v okolí. U nás se údaje o intenzitě sbírají pomocí makroseismických dotazníků. Vyplňují je lidé, kteří otřesy pocítili. Jejich odpovědi vyhodnocuje Geofyzikální ústav Akademie věd ČR a vytváří mapy intenzity. Čím víc lidí dotazník vyplní, tím přesnější výsledky získáme a tím lépe rozumíme tomu, co se v dané oblasti skutečně odehrálo.

A proč na tom všem záleží? Protože magnitudo samo o sobě nevyjadřuje škody. Na světě každý rok nastane více než 10 zemětřesení s magnitudem přesahujícím 7,0, každý měsíc tak je zaznamenáno nějaké silné zemětřesení. Ale slyšeli jste o všech? Pravděpodobně ne. Některá proběhla pod mořem, jiná daleko od měst a osídlení. A i když měla stejné magnitudo, jejich účinky se mohly výrazně lišit v závislosti na hloubce ohniska, vzdálenosti od osídlení, geologickém podloží nebo směru šíření seismických vln. Zemětřesení navíc neumíme předpovídat. Víme, že k nim většinou dochází na rozhraních litosférických desek, ale nevíme, kdy přesně k danému zemětřesení dojde, jak bude velké, ani kde přesně proběhne.

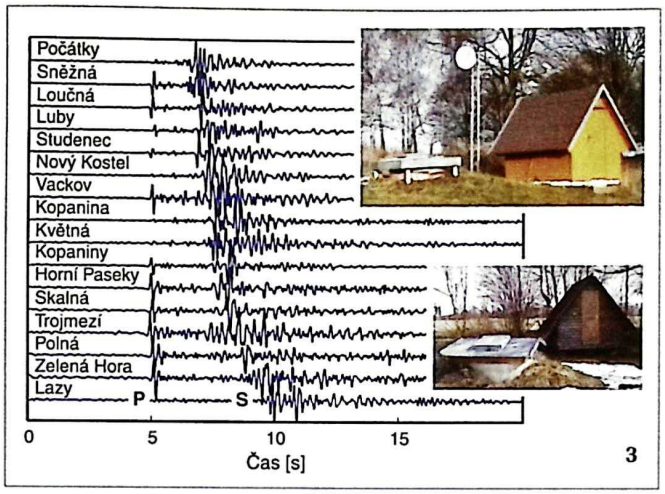
Seismické ohrožení

Znalost výskytu minulých zemětřesení nám ale umožňuje určit pravděpodobnost, s jakou se v dané oblasti v budoucnu odehrají zemětřesení o určité síle. Tak jsou konstruovány mapy vymezující oblasti vysokého a nízkého seismického ohrožení. Mimoto umíme vyslat upozornění, že došlo k silnému zemětřesení a blíží se silné otřesy. Systémy včasného varování využívají toho, že seismické vlny se sice šíří velkou rychlostí, ale stále mnohem pomaleji než signály na datových linkách. V ohrožených městech tak lze spustit sirény, zpomalit jízdu rychlovlaků a učinit další opatření k omezení zranitelnosti kritických infrastruktur. Podobné systémy fungují např. v Japonsku nebo Kalifornii a jsou budovány i v dalších seismicky aktivních oblastech.

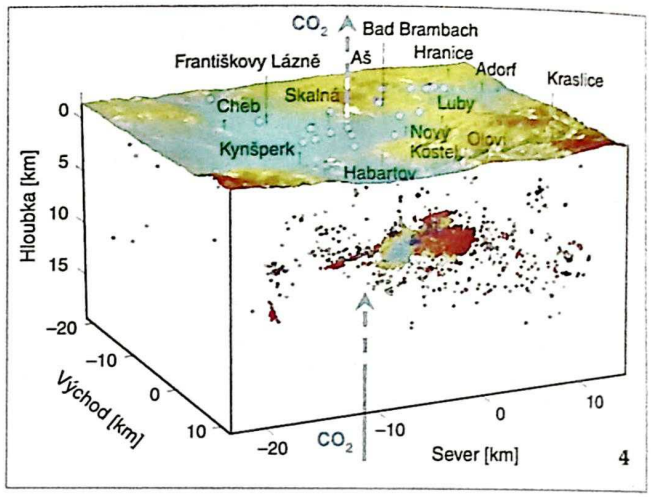
Sílu zemětřesení a jeho účinek na povrchu tak nemůžeme charakterizovat jediným číslem. Chceme-li mu porozumět, musíme vždy rozlišovat mezi tím, jak silně udeřilo v hloubce pod zemí (magnitudo) a jak se to projevilo na povrchu v konkrétním místě (intenzita). Právě kombinace obou údajů pak dává skutečný obraz, co se stalo a proč.

Šíření seismických vln

Zemětřesení poskytují cenné informace o vnitřní stavbě Země. Při jejich vzniku se uvolňuje energie ve formě seismických vln, které se šíří jako vibrace celým zemským



3



4

tělesem. Seismické vlny rozlišujeme na objemové, jež procházejí zemským nitrem (podélné P a příčné S vlny), a povrchové, šířící se podél zemského povrchu (Loveho a Rayleighovy vlny). Nejrychleji se v horninách šíří P vlny, které jsou analogií zvukových vln a jejich rychlost se v přípovrchových vrstvách Země (hloubky několika km) pohybuje mezi 3 a 6 km/s. Šíří se tedy více než 10krát rychleji než zvuk ve vzduchu. Vlny S jsou asi 1,7krát pomalejší než P vlny a jsou zajímavé tím, že se nešíří v tekutinách. Povrchové vlny se šíří pomaleji než S vlny a mají zvláštní vlastnost známou u světla – jsou disperzní, jejich rychlost závisí na vlnové délce. Díky různým vlastnostem seismických vln tak můžeme zkoumat strukturu a vlastnosti zemského nitra.

Způsob lokalizace zemětřesení

Vedle magnituda zemětřesení nás zajímá také jeho poloha a čas vzniku. Tyto parametry se určují při lokalizaci ohniska. Zde rozlišujeme dva termíny: hypocentrum, tedy místo, kde došlo k porušení na zlomu, a epicentrum, které je jeho svislým průmětem na zemský povrch. Lokalizace zemětřesení využívá podobný princip jako lidský mozek při určení směru a vzdálenosti zdroje zvuku. Jde o porovnání časového rozdílu příchodu zvukové vlny do levého a pravého ucha. Namísto uší slouží u zemětřesení seismické stanice. A často jich máme více, což zvyšuje přesnost výsledku. Velkou výhodou je, že každé zemětřesení vysílá dvě výše zmíněné objemové vlny (P a S), šířící se různou rychlostí. Tak můžeme jen s využitím jedné stanice určit vzdálenost ohniska zemětřesení, podobně jako odhadujeme vzdálenost blesku při bouřce (nejprve vidíme blesk, světelnou vlnu, a pak slyšíme hrom, zvukovou vlnu). Když máme seismogramy z více stanic, umíme určit i souřadnice ohniska způsobem podobným triangulaci. Podobně pracuje systém družicové navigace, který určuje polohu vůči několika satelitům na oběžné dráze s využitím časového zpoždění mezi rádiovými vlnami vyslanými z těchto družic.

Výskyt zemětřesení a geodynamická situace v ČR

Česká republika se nachází v seismicky klidné oblasti, mimo aktivní rozhraní litosférických desek, a proto zde zemětřesení nejsou častá ani silná. Přesto se i u nás vyskytují slabší otřesy, které mohou být lokálně pocítěny obyvatelstvem a výjimečně způsobit menší škody. Nejaktivnější jsou západní Čechy, zejména okolí Chebu a Nového Kostela, kde dochází k výskytu zemětřesných rojů, typických pro zdejší oblast (obr. 3 a 4). Mírná seismická aktivita byla zaznamenána také v severovýchodní části ČR mezi Trutnovem a Hronovem, v jižních Čechách a na severní Moravě. Historicky silnější zemětřesení se odehrála např. v letech 1786 (okolí Českého Těšína), 1901 (Hronovsko) nebo r. 1908 (Chebsko). Čas od času překvapí i tam, kde by je málokdo očekával. Připomeňme zemětřesení poblíž Orlíku v r. 2007, Lipna v r. 2009, Hlučína r. 2017 nebo Mirotic na jaře 2024 a 2025. Vedle pocítěných zemětřesení dochází na našem území k množství mikrozemětřesení, velmi slabých otřesů, které většinou nelze vnímat bez přístrojů. Jejich počet vlivem modernizace seismického monitorování vzrůstá. To však neznamená, že se zvyšuje seismická aktivita, pouze se zlepšily naše schopnosti slabá zemětřesení zachytit. Paleoseismologické výzkumy navíc naznačují, že v minulosti na našem území docházelo i k silnějším otřesům (Štěpančíková a kol. 2019).

Geodynamicky se české území nachází ve variském orogénu, tedy pozůstatku starého pohoří z období prvohor. Současný napěťový režim je formován tektonickými silami přicházejícími zejména z oblasti Alp a Karpat, které vyvolávají drobné pohyby a napětí v zemské kůře. Ačkoli zemětřesení u nás nepředstavují závažné riziko, jejich systematické sledování má důležitý význam pro vědecký výzkum i bezpečnost obyvatel a infrastruktury, a proto zde funguje síť moderních seismických stanic.

3 Zemětřesení u Kraslic ze 4. října 2024, zaznamenané stanicemi západočeské sítě WEBNET. Jsou patrné P a S vlny, přičemž rozdíl v čase jejich příchodu se zvětšuje s rostoucí vzdáleností od ohniska. Tento časový rozdíl se využívá při určování polohy zemětřesení.

4 Trojrozměrný řez svrchní zemskou kůrou v oblasti Chebska a Sokolovska. Barevné kroužky označují hypocentra zemětřesení z let 1991–2021. Jejich barva (od modré přes zelenou k červené) odpovídá době vzniku. Světle modré kroužky na povrchu ukazují výrony volného oxidu uhličitého (CO_2, mofety) a uhličité minerální prameny. Orig. T. Fischer (obr. 3 a 4)

Zemětřesné roje

Největší pozornost našich seismologů dlouhodobě poutají zemětřesné roje v západních Čechách, při nichž bývají zaznamenány až desetitisíce mikrozemětřesení (mají maximální magnitudo menší než 2,0). Nejsilnější přesahují magnitudo 4,0. Roje se zde opakují poměrně často – během posledních desetiletí byla zjištěna zvýšená aktivita v letech 1985–86, 2000, 2008, 2011, 2014, 2018 a 2021. Otřesy pocítili lidé v širokém okolí a způsobily i drobné škody na budovách. Atraktivnost oblasti podtrhuje i kvartérní vulkanismus (naposledy asi před 300 tisíci let), výskyt uhličitých minerálních pramenů a hojné výrony volného oxidu uhličitého. Izotopové analýzy helia a uhlíku ukazují, že vystupující plyn uniká z magmatu na rozhraní kůry a pláště (Mohorovičićova diskontinuita; Bräuer a kol. 2008) a CO_2, který je v těchto hloubkách v superkritickém stavu (za vysokého tlaku a teploty se chová částečně jako plyn a částečně jako kapalina), při cestě na povrch musí projít přes oblast zemětřesných ohnisek. Jeho vysoký tlak může lokálně snížit tření a změnit napěťové podmínky na zlomu. Tím může dojít k porušení zlomu, skluzu na zlomu a vzniku zemětřesení (Fischer a kol. 2014). Výsledky experimentů, kdy se do vrtu v hloubce několika km vtlačuje voda, ukazují, že zemská kůra je často ve stavu blízkém porušení a ke spuštění slabého zemětřesení stačí malá změna napětí nebo tlaku kapalin v pórovém prostoru. Vliv migrujícího CO_2 se potvrdil např. u zemětřesných rojů v letech 2008 a 2014. Několik dní po začátku obou rojů byl v monitorovacím vrtu u Hartoušova zaznamenán prudký nárůst množství CO_2, které kulminovalo po několika měsících (Fischer a kol. 2017). To naznačuje, že zemětřesení porušila těsnící vrstvu oddělující svrchní kůru od spodní kůry saturované CO_2 a volný plyn začal unikat k povrchu. Tato pozorování a odvozené modely interakce mezi tektonickou činností a cirkulací hlubinných fluid představují unikátní výsledky vědeckého výzkumu. Není proto divu, že je západočeská oblast nazývána přírodní geodynamickou laboratoří.

Výzkum podpořila Grantová agentura ČR – projekt MUSE: vmísťování magmatu a zemětřesné roje (23-07490K).

Použitá literatura uvedena na webu Živy.