
SÚČASNÁ SEIZMICKÁ A VULKANICKÁ AKTIVITA ZEME

JEJ VÝVOJ A MOŽNÉ PRÍČINY



Súčasná seizmická a vulkanická aktivita Zeme, jej vývoj a možné príčiny

Autor

Earth Pulse Research

Rok vydania

2026

Verzia dokumentu

Verzia 1.0

Originálny jazyk

Slovenský

Oficiálna stránka projektu:

<https://earthpulseresearch.org>

Odporúčaný spôsob citovania

Earth Pulse Research. (2026).

Current seismic and volcanic activity of the Earth, its evolution and possible causes.

Dostupné na: <https://earthpulseresearch.org>

Upozornenie

Táto správa je určená na informačné a výskumné účely. Interpretácie uvedené v texte vychádzajú z dostupných vedeckých údajov a môžu sa meniť s príchodom nových poznatkov.

Autorské práva

© 2026 Earth Pulse Research.

Všetky práva vyhradené.

Obsah

Úvod.....	5
1. Globálny nárast seizmickej aktivity vo svete.....	6
Vývoj ročných počtov globálnych zemetrasení.....	6
Zemetrasenia $M \geq 4,4$	6
Zemetrasenia $M \geq 4,5$	7
Zemetrasenia $M \geq 7$	8
Vývoj globálnej seizmickej siete.....	8
Zdôvodnenie výberu seizmologických katalógov.....	10
2. Nárast seizmickej a vulkanickej aktivity na okrajoch eurázijskej platne v roku 2025.....	13
Rusko a Sibír: Prebudenie stabilnej platformy a historické rekordy.....	13
Kamčatka: Historické megazemetrasenie a porušené seizmické zákony.....	13
Historický kontext: Porovnanie s rokom 1952.....	13
Porušenie Báthovho zákona.....	17
Vulkanická aktivita na Kamčatke: Prebudenie šiestich sopiek naraz.....	21
Sibírska Arktída: Bezprecedentná aktivita na stabilnej platforme.....	21
Mjanmarsko: Fenomén "supershear" zemetrasenia a bezprecedentný nárast zemetrasení.....	23
Región Egejskej platne a príľahlé oblasti: Bezprecedentný nárast aktivity.....	24
Santorini: Bezprecedentný seizmický roj a pohyb magmy.....	26
Kolumbo: Rastúca magmatická komora pod morom.....	27
Zlomová línia západného Turecka a Egejského mora.....	28
Jan Mayen a Svalbard: Prebudenie arktickej vulkanickej zóny.....	29
3. Seizmická aktivita na okrajoch Eurázijskej dosky v rokoch 2023 - 2025.....	31
Taiwan.....	33
Japonsko.....	35
Island.....	37
Turecko.....	39
Filipíny.....	40
4. Aktivácia ďalších zlomov.....	43
Východoafrický rift: Desaťnásobný nárast aktivity.....	43
Prebúdajúce sa sopky.....	44
Stredoatlantický chrbát.....	45
Juhovýchodný indický hrebeň.....	46
Drakov prieliv: Prebudenie antarktckej zóny.....	48
Kanada: Prebudenie Tintina zlomu po 12 000 rokoch ticha.....	50
Seizmotektonický pás Tien Shan.....	51
5. Ohnivý kruh: Globálna aktivácia.....	53
Južná Amerika.....	53
Severná Amerika: Cascadia.....	54
Mount Rainier: Najväčší seizmický roj v histórii.....	55
Mount Adams.....	56
Mount St. Helens.....	56
6. Prebúdajúce sa supervulkány.....	58
Campi Flegrei – Historický rok aktivity.....	58
Rok 2025: Rekordná seizmická aktivita.....	59
Bradyseizmus: Neustále zdvíhanie kaldery.....	60
Rekordné teploty fumarol: 165°C.....	61
Topiaci sa asfalt a dym z ciest.....	62
Emisie CO ₂ : 5 500 ton denne.....	62
Syntéza: Všetky indikátory smerujú k prebudeniu.....	63
Je Campi Flegrei pred malou alebo veľkou erupciou?.....	64

Čo by znamenala supererupcia Campi Flegrei?.....	66
Sakurajima a kaldera supervulkánu Aira.....	67
Nemecko: Laacher See.....	69
7. Globálny nárast vulkanickej aktivity.....	71
8. Zhodnotenie dostupných dát, metodík a fyzikálnych súvislostí.....	73
Gutenberg–Richterov zákon.....	73
9. Limity čisto tektonického výkladu a potreba širšieho kontextu.....	75
10. Iné globálne geodynamické zmeny systému Zeme.....	76
Zmeny rotácie Zeme a dĺžky dňa (LOD).....	76
Dynamika jadro–plášť a jej dlhodobé zmeny.....	77
Pohyb severného magnetického pólu.....	78
Vývoj geomagnetického poľa a jeho oslabenie.....	81
Nárast pozorovaní červených polárnych žiar v nezvyčajne nízkych zemepisných šírkach.....	83
Porovnanie významných geomagnetických búrok podľa sily (intenzity) a výskytu polárnych žiar.....	85
Otepľovanie oceánov a zmeny v oceánskych prúdoch.....	87
Bezprecedentné otepľovanie oceánov v posledných rokoch.....	87
Otepľovanie oceánov v hĺbke: menej viditeľné, no zásadné.....	88
Vplyv otepľovania na oceánske prúdy.....	89
Golfský prúd a AMOC.....	89
Úloha geotermálneho tepla.....	90
Väzby medzi seizmickou aktivitou a teplotnými anomáliami oceánov.....	90
11. Opakujúce sa cyklické udalosti v histórii Zeme.....	92
Mladší dryas – náhle klimatické zmeny a geomagnetická exkurzia Gothenburg.....	94
Heinrichova udalosť 1 (H1) a geomagnetická exkurzia Hilina Pali.....	98
Heinrichova udalosť 2 (H2) a geomagnetická exkurzia Lake Mungo 2.....	99
Heinrichova udalosť 3 (H3) a geomagnetická exkurzia Lake Mungo 1 / Mono Lake.....	100
Heinrichova udalosť 4 (H4) a Laschampská geomagnetická exkurzia.....	101
Paralela so súčasnosťou: Opakovanie historických cyklov.....	103
Záver.....	105
PodĎakovanie.....	107

Úvod

Táto správa analyzuje výrazný nárast seizmickej a vulkanickej aktivity zaznamenaný v priebehu roka 2025 v globálnom aj regionálnom meradle. Na základe údajov z medzinárodných seizmologických databáz a národných geofyzikálnych ústavov bolo identifikované zvýšenie počtu zemetrasení, hrozby potenciálnych sopečných erupcií a sprievodných geodynamických javov v porovnaní s dlhodobým priemerom posledných dekád. Táto analytická práca sa zameriava na kvantitatívne vyhodnotenie týchto zmien, ich priestorovú distribúciu a potenciálne súvislosti s hlbšími tektonickými procesmi.

Osobitná pozornosť je venovaná oblastiam, kde sa zvýšená aktivita prejavuje dlhodobo a kumulatívne, teda nielen v roku 2025, ale aj v predchádzajúcich rokoch. Analýza poukazuje na to, že pozorované javy nepredstavujú izolované udalosti, ale môžu byť súčasťou širšieho trendu postupne rastúcej seizmickej energie uvoľňovanej v litosfére. Tento trend sa prejavuje nielen nárastom počtu zemetrasení, ale aj zvýšeným výskytom seizmických rojov, silných dotrasov a udalostí, ktoré vykazujú odchýlky od klasických seizmologických zákonitostí.

Významným zistením správy je výrazná priestorová koncentrácia najsilnejších zemetrasení a najintenzívnejšej vulkanickej aktivity pozdĺž okrajov Eurázijskej tektonickej platne v posledných rokoch. Od oblasti Islandu cez Stredomorie, Turecko, Mjanmarsko, Filipíny, Indonéziu, až po Japonsko a Kamčatku sa vytvára takmer súvislý pás zvýšenej geodynamickej aktivity. Práve v týchto regiónoch boli v posledných rokoch zaznamenané opakované silné zemetrasenia, rozsiahle seizmické roje a prípady neobvykle silných dotrasov, čo naznačuje pretrvávajúce alebo rastúce napätie v zlomových systémoch.

Táto práca tiež dokumentuje zvýšenú aktivitu viacerých vulkanických systémov, vrátane prebúdzania dlhodobo pokojných oblastí a zrýchlených zmien v magmatických systémoch. Kombinácia seizmických a vulkanických prejavov naznačuje hemodynamickú aktiváciu a možné zmeny v hlbších zemských procesoch, vrátane aktivácie plášťa, reorganizácie napäťových polí kôry a zmien v okrajových tektonických procesoch.

Cieľom tohto dokumentu je poskytnúť komplexný, podložený pohľad na súčasný vývoj seizmickej a vulkanickej aktivity za posledné desaťročia a identifikovať konkrétne regióny, kde sa tieto javy koncentrujú. Analýza prezentovaná v správe zdôrazňuje potrebu považovať zvýšenie seizmickej a vulkanickej aktivity nie za epizodický jav, ale za súčasť globálneho, dlhodobého procesu. Závažnejšie dôsledky takýchto geodynamických zmien si vyžadujú zmenu prístupu k štúdiu procesov na planéte, prehodnotenie seizmických rizík a monitorovanie aktívnych zón. Pozornosť by sa mala venovať informovanosti verejnosti a príprave infraštruktúry na potenciálne katastrofy.

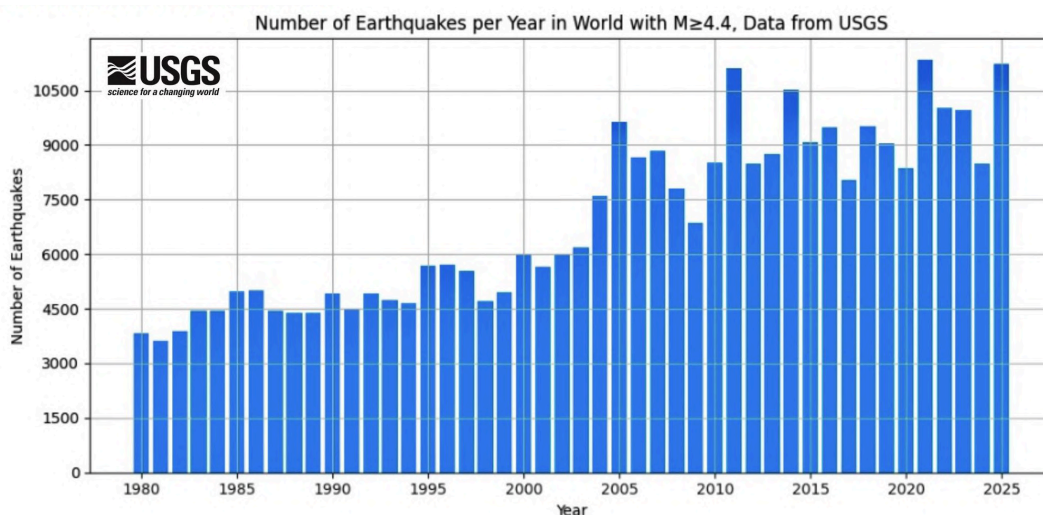
1. Globálny nárast seizmickej aktivity vo svete

Vývoj ročných počtov globálnych zemetrasení

Pri hodnotení dlhodobého vývoja globálnej seizmickej aktivity boli pre detailnejšiu analýzu zvolené prahové magnitúdy $M \geq 4,4$ a $M \geq 4,5$, ktoré podľa historického globálneho pokrytia seizmických sietí predstavujú úroveň, od ktorej sú zemetrasenia vo väčšine regiónov sveta dlhodobo spoľahlivo zaznamenávané.

Ako uvádza analýza siete USGS (NEIC) z roku 1998, prahové hodnoty úplnosti magnitúdy (magnitude completeness threshold) vychádzajú pre väčšinu svetových regiónov v intervale $M 4,3 - M 4,4$ ¹. Autori preskúmali údaje zo všetkých 50 regiónov, ktoré ako prvé navrhli Gutenberg a Richter (1954) a formalizovali Flinn a Engdahl (1965). Rozdelenie na 50 seizmických regiónov predstavuje globálne členenie Zeme na veľké tektonicko-seizmické oblasti, aby bolo možné systematicky porovnávať seizmicitu medzi jednotlivými časťami planéty v jednotnom globálnom rámci.

Zemetrasenia $M \geq 4,4$



Obr. 1: Globálny nárast zemetrasení s $M \geq 4,4$, graf bol vytvorený v Pythone využitím dát z katalógu USGS: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>

Graf na obr. 1, zobrazuje ročný počet globálne zaznamenaných zemetrasení s magnitúdou $M \geq 4,4$ v období 1980 – 2025 na základe údajov z katalógu USGS. Táto prahová hodnota bola zvolená s ohľadom na analýzy kompletnosti seizmologických katalógov, podľa ktorých sa prah globálnej kompletnosti katalógu NEIC (USGS) pohybuje približne v rozmedzí $M \approx 4,4 - 4,5$. Použitie magnitúdy $M \geq 4,4$ tak umožňuje zahrnúť väčší počet udalostí pri zachovaní približnej globálnej reprezentatívnosti dát.

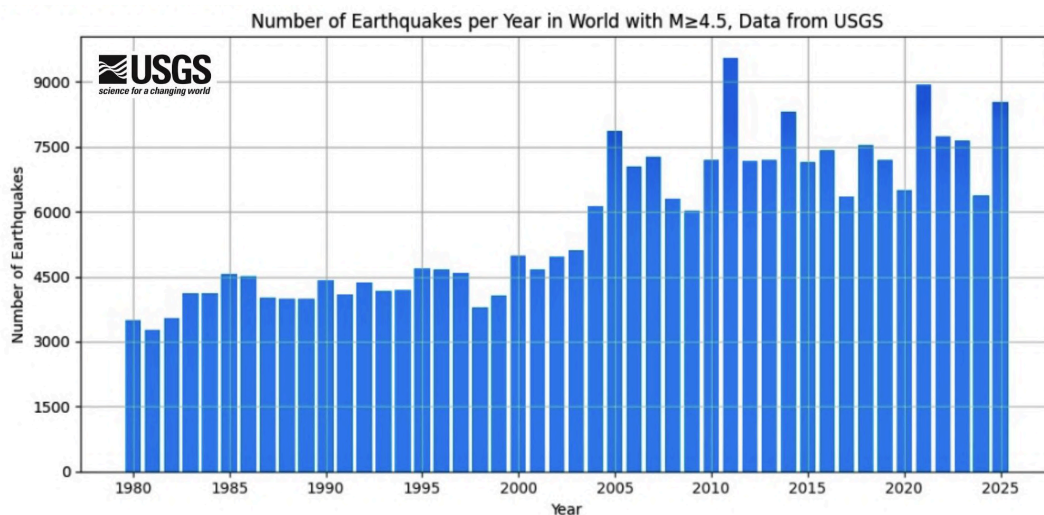
Z grafu je zrejmé, že počet zaznamenaných zemetrasení tejto magnitúdy vykazuje od polovice 90. rokov postupný rast, ktorý nesúvisí výhradne so zlepšovaním globálneho seizmického monitoringu, ale odráža reálnu seizmickú aktivitu planéty. Približne od roku 2005 sa ročné počty udalostí pohybujú výrazne vyššie než v 80. a 90. rokoch. Zaujímavým javom je najmä vývoj v nedávnom období, v ktorom

¹ <https://ds.iris.edu/news/IRISnewsletter/volume2000no1/page-02-04.htm>

možno pozorovať relatívne zhustenú seizmickú aktivitu. Najvyšší počet udalostí (11 353) bol zaznamenaný v roku 2021, pričom rok 2025 predstavuje druhý najvyšší počet zaznamenaných zemetrasení (11 211) v celom analyzovanom časovom intervale.

Je potrebné zároveň poznamenať, že katalóg USGS ComCat je dynamická databáza, ktorá sa priebežne aktualizuje na základe údajov z globálnych a regionálnych seizmických sietí. Parametre udalostí môžu byť dodatočne revidované a do katalógu môžu byť spätne dopĺňané aj staršie udalosti. Z tohto dôvodu sa môže konečný počet zemetrasení za najnovšie roky ešte mierne meniť a je možné, že počet udalostí zaznamenaných v roku 2025 sa v budúcnosti ešte mierne zvýši.

Zemetrasenia $M \geq 4,5$



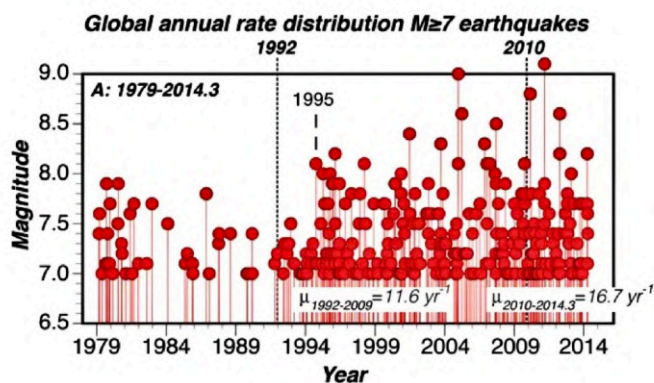
Obr. 2: Globálny nárast zemetrasení s $M \geq 4,5$, graf bol vytvorený v Pythone využitím dát z katalógu USGS: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>

Podobný obraz poskytuje aj graf na obr. 2 pre $M \geq 4,5$, ktorý predstavuje ešte prísnejší prah spoľahlivej globálnej detekcie. Aj pri tomto magnitúdovom limite je po prelome tisícročí pozorovateľný posun k vyšším ročným počtom udalostí v porovnaní s 80. a 90. rokmi, pričom posledné roky sa vyznačujú zvýšenou variabilitou na vyššej základnej úrovni. Po roku 2004 došlo k citeľnému zvýšeniu počtu zaznamenaných udalostí a v nasledujúcich rokoch sa hodnoty stabilizovali na výrazne vyšších úrovniach než v predchádzajúcich dekádach. V posledných rokoch sa ročné počty opakovane pohybovali medzi najvyššími hodnotami celého časového radu, pričom rok 2025 patrí medzi výrazne nadpriemerné roky sledovaného obdobia. To potvrdzuje, že zvýšené počty zaznamenaných udalostí sa prejavujú aj pri magnitúdach, ktoré sú už dlhodobo globálne spoľahlivo registrované.

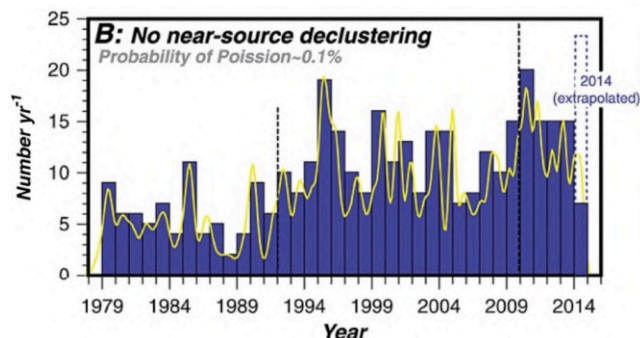
Skutočnosť, že podobný rast počtu udalostí je pozorovaný aj pri magnitúdach $M \geq 4,4$ a $M \geq 4,5$, teda v intervale, ktorý je podľa analýz USGS považovaný za globálne takmer úplne zaznamenaný už od 90. rokov, naznačuje, že nárast počtu zaznamenaných zemetrasení v posledných desaťročiach nemožno vysvetliť zlepšovaním detekčných technológií. Najmä zvýšené hodnoty v posledných rokoch, vrátane druhého historického maxima pri $M \geq 4,4$ v roku 2025, poukazujú na výraznú úroveň súčasnej zaznamenatej globálnej seizmickej aktivity.

Zemetrasenia $M \geq 7$

Diagramy na obr. 3 a obr. 4 z recenzovanej štúdie publikovanej v Geophysical Research Letters (AGU)² zobrazujú globálnu ročnú distribúciu zemetrasení s magnitúdou $M \geq 7$ v období 1979 – 2014.3. Každý bod na obr. 3 predstavuje jednotlivé silné zemetrasenie, pričom os x zobrazuje čas a os y jeho magnitúdu. Zároveň je znázornená aj ročná miera výskytu týchto udalostí (obr. 4).



The 2010–2014.3 global earthquake rate increase



Obr. 3: Globálne časové rozloženie zemetrasení s magnitúdou $M \geq 7,0$ od roku 1979, zdroj:

<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2014GL060513> <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2014GL060513>

Obr. 4: Ročný histogram zemetrasení s magnitúdou $M \geq 7,0$ od roku 1979, zdroj:

Už na prvý pohľad je viditeľný jasný zlom okolo roku 1995. Do tohto obdobia sú silné zemetrasenia $M \geq 7$ relatívne redšie a časovo rovnomernejšie rozložené. Po roku 1995 však dochádza k výraznému nárastu frekvencie, čo autori kvantifikujú aj štatisticky:

- pre obdobie 1992 – 2009 je priemerná miera výskytu približne 12 udalostí za rok,
- zatiaľ čo v období 2010 – 2014.3 už dosahuje 17 udalostí za rok.

Okrem zlomu v roku 1995 je v grafe badateľný aj ďalší zosilňujúci sa trend po roku 2010, kedy nielen rastie počet udalostí, ale objavuje sa aj vyššia koncentrácia veľmi silných zemetrasení ($M \geq 8$ a ojedinele blízko $M \geq 9$). Toto obdobie vykazuje zvýšenú „hustotu“ bodov, čo naznačuje, že nejde len o náhodné kolísanie, ale o zmenu režimu globálnej seizmickej aktivity.

Dôležité je, že pri zemetraseniach s magnitúdou $M \geq 7$ nehrá úlohu zlepšovanie meracej techniky alebo hustota seizmických staníc – tieto udalosti sa spoľahlivo zaznamenávali už od začiatku minulého storočia. Pozorovaný nárast preto poukazuje na reálny globálny jav.

Grafy tak poskytujú silný dôkaz, že zvýšená seizmická aktivita v posledných desaťročiach sa netýka len slabších zemetrasení ($M \geq 4$), ale zasahuje aj najsilnejšie a energeticky najvýznamnejšie udalosti, pričom kľúčové zlomové obdobia sú okolo rokov 1995 a 2010.

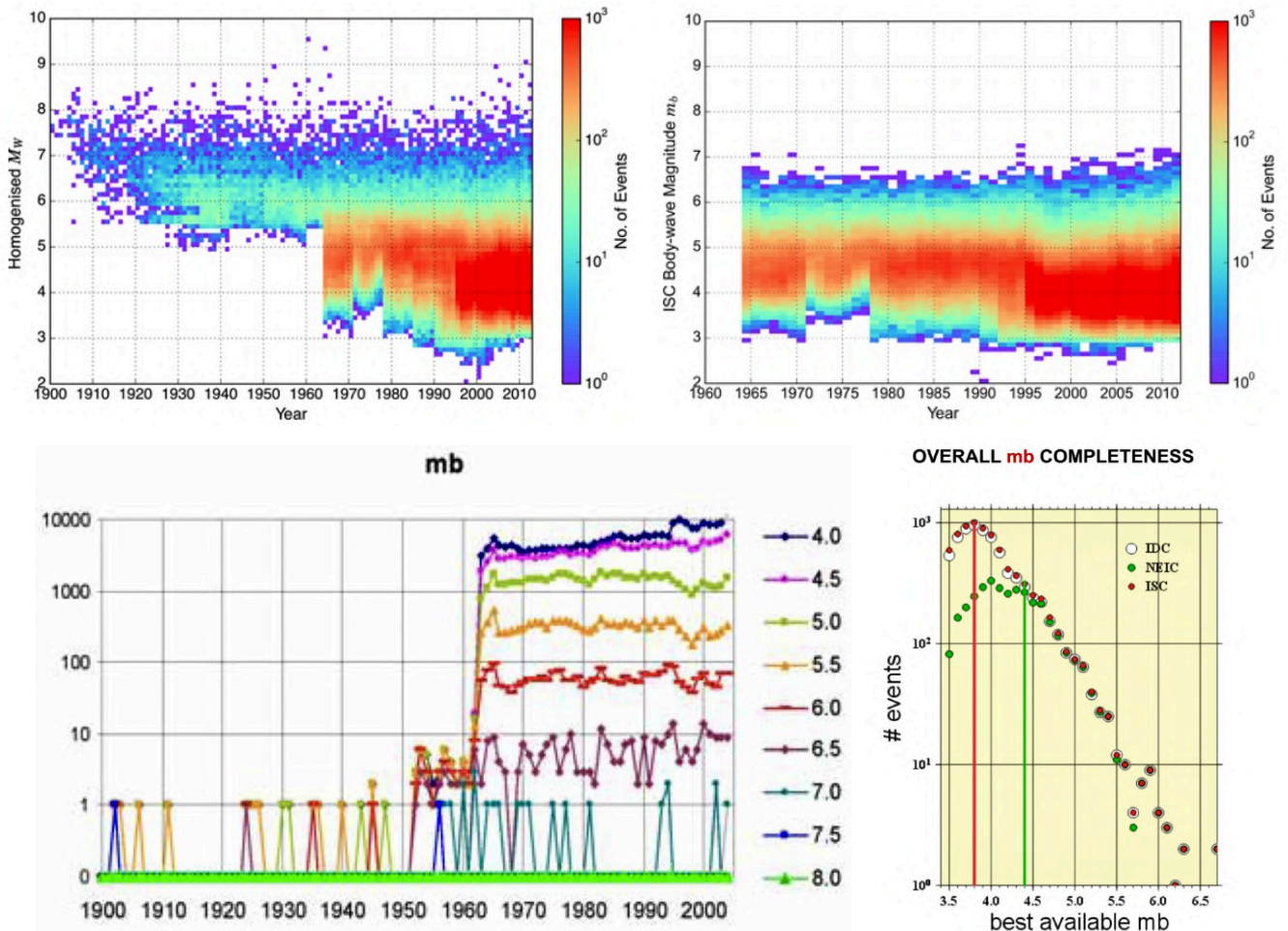
Vývoj globálnej seizmickej siete

Moderný globálny monitoring nastúpil s vytvorením Global Seismographic Network (GSN), ktorý sa začal budovať v 80. a 90. rokoch ako digitálna sieť približne 150 vysoko kvalitných seizmických staníc

² <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2014GL060513>

rovnomerne rozmiestnených po planéte. GSN prenáša dáta v reálnom čase a slúži ako jadro súčasného globálneho seizmického monitoringu, pričom jeho stanice poskytujú konzistentné a vysoko citlivé záznamy zemetrasení širokého spektra magnitúd.³

Vďaka postupnému rozvoju globálnych seizmických sietí – najmä systémov WWSSN a jeho následných digitálnych nástupcov, ako sú siete GEOSCOPE a GSN – sa schopnosť globálne detegovať slabšie zemetrasenia výrazne zlepšila počas druhej polovice 20. storočia. Analýzy globálnych katalógov (napr. ISC a NEIC) znázorňujú postupné zachytávanie zemetrasení rôznych magnitúd na planéte.⁴



Obr. 5: Hore naľavo: hustota magnitúd M_w zemetrasení s časom pre rozšírený globálny katalóg ISC do roku 2013, hore napravo: hustota magnitúd m_b zemetrasení s časom pre revidovaný bulletin ISC, zdroj:

<https://academic.oup.com/gji/article/206/3/1652/2583518?login=false>.

Dole naľavo: ročný počet zemetrasení m_b v katalógu NEIC (USGS) podľa času a magnitúdy, 1900 – 2004, zdroj:

https://www.researchgate.net/publication/2178834_Does_the_Earth_show_up_an_impending_mega-earthquake#pf5.

Dole napravo: celková kompletosť magnitúd m_b pre rôzne katalógy za rok 2001: bulletin ISC je štandardne najúplnejší pre m_b , prah magnitúdy pre bulletin ISC je okolo m_b 3,8, pre bulletin NEIC (USGS) m_b 4,4, zdroj:

<https://www.isc.ac.uk/docs/papers/download/2004p01/>.

Obr. 5 znázorňuje vývoj detekčných schopností globálnych seizmologických katalógov a odhad magnitúdy kompletnosti M_c na základe údajov ISC, IDC a NEIC (USGS). Horné diagramy zobrazujú časový vývoj zaznamenaných zemetrasení podľa magnitúdy. V ľavom diagrame sú udalosti vyjadrené

³ <https://eos.org/editors-vox/global-seismic-networks-recording-the-heartbeat-of-the-earth>
<https://www.usgs.gov/publications/achievements-and-prospects-global-broadband-seismographic-networks-after-30-years>

⁴ <https://academic.oup.com/gji/article/206/3/1652/2583518?login=false>

v momentovej magnitúde M_w , zatiaľ čo pravý diagram používa body-wave magnitúdu m_b , ktorá je často dostupná aj pre staršie historické udalosti. Z oboch diagramov je zrejmé, že s postupným rozvojom globálnych seizmických sietí dochádza k výraznému zvýšeniu počtu zaznamenaných slabších zemetrasení, čo sa prejavuje znižovaním detekčného prahu katalógov najmä od druhej polovice 20. storočia.

Spodný ľavý diagram predstavuje vývoj počtu zemetrasení v katalógu NEIC (USGS) podľa rôznych magnitúdových prahov v období 1900 – 2004. Graf ukazuje výrazný nárast zaznamenaných udalostí od 60. rokov, ktorý súvisí najmä s rozvojom globálnej siete seizmických staníc a postupným znižovaním detekčného prahu.

Pravý spodný diagram priamo porovnáva kompletnosť katalógov ISC, IDC a NEIC za rok 2001. Z neho vyplýva, že bulletin ISC je vo všeobecnosti najúplnejší, pričom jeho prah kompletnosti je približne $m_b \approx 3,8$, zatiaľ čo katalóg NEIC (USGS) má vyšší prah kompletnosti približne $m_b \approx 4,4$. Táto hodnota je veľmi blízka hranici $M \approx 4,5$, ktorá je v literatúre často považovaná za praktickú hranicu globálne spoľahlivo zaznamenaných zemetrasení v moderných katalógoch.

Na základe uvedených zdrojov a údajov v nich prezentovaných možno usudzovať, že približná prahová hodnota kompletnosti katalógu NEIC (USGS) sa globálne pohybuje v rozmedzí $M \approx 4,4 - 4,5$, pričom spoľahlivé celoplanetárne zachytávanie zemetrasení tejto veľkosti je možné predpokladať minimálne od polovice 90. rokov 20. storočia. Z analyzovaných diagramov zároveň vyplýva, že zemetrasenia v tomto magnitúdovom intervale boli v globálnych katalógoch zaznamenané už v skorších obdobiach.

Magnitúda m_b (body-wave magnitude) je založená na amplitúde primárnych seizmických vln (P-vln) a v globálnych seizmologických katalógoch sa často uvádza najmä pri starších udalostiach, keďže bola dlhodobo štandardne používaná v medzinárodných bulletinových systémoch väčšinou pri zemetraseniach strednej intenzity. V modernej seizmológii sa však čoraz častejšie využíva momentová magnitúda M_w , ktorá je odvodená z fyzikálneho seizmického momentu a presnejšie charakterizuje celkovú energiu zemetrasenia. V intervale približne $M 4 - 5$ sú však hodnoty m_b a M_w vo väčšine prípadov veľmi podobné, pričom rozdiel medzi nimi je zvyčajne malý. Preto je možné pri interpretácii prahov kompletnosti katalógov v tomto magnitúdovom rozsahu tieto hodnoty považovať za približne porovnateľné.

Zdôvodnenie výberu seizmologických katalógov

Pri analýze časových zmien seizmickej aktivity je kľúčovou otázkou výber vhodného seizmologického katalógu. Rôzne databázy sa líšia metodikou spracovania údajov, časovým rozsahom, použitými typmi magnitúd aj mierou úplnosti. V tejto práci bol použitý najmä katalóg USGS, ale aj iné katalógy, ktoré sa navzájom dopĺňajú a umožňujú spoľahlivejšie posúdiť regionálnu seizmicitu. Výber jednotlivých zdrojov bol založený najmä na ich dostupnosti, metodike spracovania údajov, časovom pokrytí a praktickej použiteľnosti pri štatistickej analýze.

USGS

Katalóg United States Geological Survey (USGS) predstavuje jeden z najpoužívanejších zdrojov moderných seizmologických údajov. V tejto práci bol využitý predovšetkým kvôli zameraniu sa na analýzu seizmickej aktivity za posledné roky, najmä v časovom horizonte približne posledných 1–3 rokov. Jednou z charakteristických vlastností tohto katalógu je, že údaje o zemetraseniach sa priebežne aktualizujú a spresňujú. V prvých hodinách až dňoch po udalosti sú záznamy založené na

rýchlych automatických riešeniach, ktoré sa neskôr dopĺňajú o presnejšie lokalizácie a revidované hodnoty magnitúdy. V dôsledku toho môže počet zemetrasení zaznamenaných v posledných rokoch v budúcnosti mierne narastať, keď sa do katalógu dopĺňajú ďalšie identifikované udalosti alebo sa upravujú parametre už evidovaných zemetrasení.

Výhodou katalógu USGS je jeho vysoká transparentnosť a jednoduchá overiteľnosť údajov. Dáta sú voľne dostupné prostredníctvom webového rozhrania aj prostredníctvom štandardu FDSN (Federation of Digital Seismograph Networks), ktorý umožňuje automatizované sťahovanie údajov a ich ďalšie spracovanie v rôznych analytických nástrojoch a programovacích prostrediach (napr. Python, MATLAB alebo R). Katalóg zároveň používa jednotnú preferovanú magnitúdu pre každé zemetrasenie, čo výrazne uľahčuje štatistické spracovanie dát. V porovnaní s niektorými komplexnejšími databázami tak poskytuje relatívne jednoduché a priamo použiteľné údaje aj pre používateľov bez hlbšieho seizmologického zázemia.

VolcanoDiscovery

Databáza VolcanoDiscovery bola využitá najmä pri analýze seizmickej aktivity v konkrétnych regiónoch sveta, kde obsahovala výrazne väčší počet zaznamenaných udalostí než katalógy USGS alebo ISC. Tento zdroj agreguje údaje z rôznych seizmologických služieb a umožňuje zobrazovať zemetrasenia podľa rôznych magnitúdových prahov, najčastejšie M2+, M3+ a M4+, pričom časové pokrytie pre mnohé oblasti siaha do roku 1990. Pre potreby tejto práce boli z tejto databázy využívané iba zemetrasenia s magnitúdou $M \geq 4$.

Výhodou databázy VolcanoDiscovery je najmä jej prehľadné webové rozhranie, ktoré umožňuje rýchle zobrazenie štatistík, diagramov a mapových prehľadov seizmickej aktivity bez nutnosti sťahovania dát a ich ďalšieho spracovania. Takéto vizualizačné nástroje môžu byť užitočné najmä pri rýchlej orientácii v regionálnej seizmicite.

Na druhej strane má tento zdroj aj významné obmedzenia. Pri podrobnejšom porovnaní sa ukázalo, že katalóg v niektorých prípadoch vykazuje nekonzistentnosti v súčtoch zemetrasení za jednotlivé krajiny alebo regióny. Okrem toho boli v posledných rokoch zaznamenané prípady, keď databáza dodatočne pridala väčší počet udalostí do starších časových období bez jasného metodického vysvetlenia. Tieto skutočnosti znižujú celkovú dôveryhodnosť databázy a vyžadujú opatrnosť pri interpretácii jej štatistických výstupov.

EMSC

Európske stredomorské seizmologické centrum (European-Mediterranean Seismological Centre – EMSC) prevádzkuje databázu zemetrasení zameranú predovšetkým na Európu, Stredomorie a príľahlé oblasti. Jej systematické digitálne záznamy sú dostupné približne od roku 1998. Katalóg integruje údaje z množstva národných seizmologických služieb a poskytuje rýchle informácie o zemetraseniach vrátane ich lokalizácie, magnitúdy a základných parametrov.

V tejto práci bol katalóg EMSC využitý najmä v oblasti, kde poskytoval hustejšie alebo úplnejšie záznamy než iné globálne databázy. Ide najmä o severný región, konkrétne oblasť Jan Mayen a Svalbard, kde európske seizmologické siete často zaznamenávajú väčší počet slabších udalostí než globálne katalógy. V takýchto prípadoch môže databáza EMSC poskytovať detailnejší obraz regionálnej seizmicity.

Prečo nie ISC Bulletin

Aj keď sa v podobných seizmologických analýzach často využíva katalóg ISC Bulletin, najmä pre jeho vysokú mieru kompletnosti a integráciu údajov z veľkého počtu globálnych a regionálnych seizmických sietí, v tejto práci nebol použitý ako primárny zdroj dát. Dôvodom je zameranie analýzy na najnovší vývoj seizmickej aktivity v posledných rokoch. Najnovšie roky v katalógu ISC Bulletin totiž ešte neprešli úplnou revíziou, pričom finálna kontrola a zlúčenie riešení z rôznych seizmických sietí môže trvať približne až dva roky. V nerevidovaných dátach sa preto môžu dočasne vyskytovať duplicity alebo paralelné riešenia tej istej udalosti z rôznych agentúr, čo môže viesť k miernemu nadhodnoteniu počtu zemetrasení v najnovších rokoch, kým nie je katalóg úplne revidovaný. Z tohto dôvodu bol v tejto práci pre analýzu aktuálnej seizmickej aktivity použitý katalóg USGS ComCat (NEIC), ktorý poskytuje rýchlo aktualizované a operatívne spracované údaje s jednotným preferovaným riešením udalostí, čím umožňuje konzistentnejšiu analýzu seizmicity v časovom horizonte posledných rokov.

Použitie viacerých katalógov v tejto práci umožňuje kombinovať výhody jednotlivých databáz – globálne pokrytie a jednoduchú prácu s údajmi v prípade USGS, vizuálnu dostupnosť štatistík v databáze VolcanoDiscovery a regionálnu presnosť európskych údajov EMSC. Takýto prístup zároveň znižuje riziko systematických chýb, ktoré by mohli vzniknúť pri použití iba jedného zdroja seizmologických údajov.

2. Nárast seizmickej a vulkanickej aktivity na okrajoch eurázijskej platne v roku 2025

Rusko a Sibír: Prebudenie stabilnej platformy a historické rekordy

Kamčatka: Historické megazemetrasenie a porušené seizmické zákony

Dňa 29. júla 2025 zaznamenali seizmologické stanice na celom svete jedno z najsilnejších zemetrasení v modernej histórii merania. Zemetrasenie s magnitúdou M 8,8 postihlo polostrov Kamčatka na ruskom Ďalekom východe. Táto udalosť sa radí na šieste miesto medzi najsilnejšie zemetrasenia od začiatku moderných seizmologických záznamov – rovnako silné ako historické zemetrasenie v Čile z 27. februára 2010.⁵

Historický kontext: Porovnanie s rokom 1952

V roku 1952 sa na Kamčatke odohralo veľmi silné zemetrasenie s magnitúdou M 9,0 – piate najsilnejšie v histórii pozorovaní. Toto zemetrasenie spôsobilo približne 18-metrové tsunami a odhady počtu obetí sa pohybujú medzi 2300 a 14 000.⁶ Hypocentrum tohto megazemetrasenia v roku 1952 bolo v hĺbke 22 km⁷, pričom megazemetrasenie v roku 2025 malo hĺbku 35 km⁸.

Bežne sa predpokladá, že mega-zemetrasenia s magnitúdou okolo M9 v megazlomových zónach predstavujú uvoľnenie sklzového deficitu, ktorý sa na rozhraní litosférických platní hromadí po celé stáročia. Udalosť na Kamčatke v roku 2025 (M 8,8 – 8,9) však, súdiac podľa rozmiestnenia dotrasov, roztrhla prakticky rovnaký segment ako zemetrasenie M 9,0 z roku 1952. Tento mimoriadne krátky interval medzi dvoma veľkými ruptúrami sponchybuje platnosť konvenčných predstáv o priebehu seizmického cyklu.⁹

Výsledky japonskej štúdie zobrazené na obr. 6 naznačujú, že ruptúra z roku 2025 bola sprevádzaná zlomovými sklzmi presahujúcimi 9 m na rozsiahlej oblasti od južnej Kamčatky až po severné Kurilské ostrovy. Tento sklz výrazne prevyšuje približne 6 m konvergencie platní nahromadenej od roku 1952 a priestorovo sa zhoduje s oblasťou maximálneho sklzu počas udalosti z roku 1952. V zónach najväčších sklzov došlo k približne dvojnásobnému zrýchleniu rýchlosti sklzu, pravdepodobne vplyvom dynamických napätí a komplexného trecieho správania na zlome. Po hlavnej ruptúre sa v oblasti rozhrania platní objavili dotrasy s nízkym uhlom normálového zlomu, ktoré naznačujú, že počas hlavného zemetrasenia došlo k tzv. dynamickému prekročeniu rovnovážneho šmykového napätia na poruche. Autori štúdie naznačujú, že takéto úplné uvoľnenie napätia je nezvyčajné aj medzi megazemetraseniami.

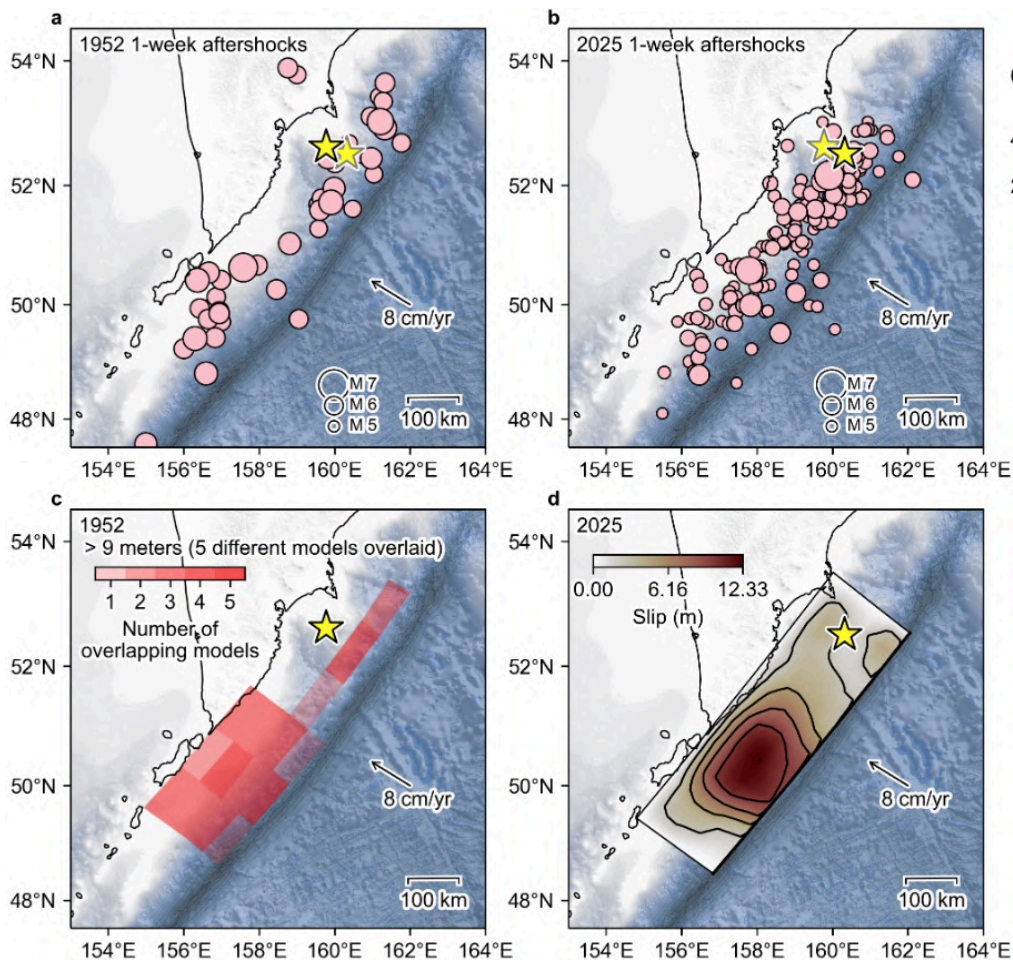
⁵ https://en.wikipedia.org/wiki/Lists_of_earthquakes

⁶ https://en.wikipedia.org/wiki/1952_Severo-Kurilsk_earthquake

⁷ https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/official19521104165830_30/executive

⁸ <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000qw60/executive>

⁹ <https://seismica.library.mcgill.ca/article/view/2012/2650>



Obr. 6: Porovnanie megazemetrasení na Kamčatke v rokoch 1952 a 2025. (a, b) Dotrasy po udalostiach (a) 1952 a (b) 2025 za nasledujúci týždeň (4. – 11. novembra 1952; 29. júla – 5. augusta 2025). Čierne ohraničená hviezda predstavuje epicentrum hlavného otrasu po udalostiach (a) 1952 a (b) 2025. Ružové kruhy predstavujú dotrasy. Pre porovnanie, sivo ohraničená hviezda predstavuje epicentrum hlavného otrasu po udalostiach (a) 2025 a (b) 1952. (c, d) Koseizmické modely zosuvov pre udalosti z rokov 1952 a 2025. Zdroj: <https://seismica.library.mcgill.ca/article/view/2012/2650>

Nasledujúce obrázky 7 - 10 zobrazujú porovnanie počtu zemetrasení nachádzajúcich sa v zóne (155,0° E – 163,5° E, 49,5° N – 55° N), ktorá zahŕňa bezprostredné dotrasy (nie seizmicitu pozadia - “background seismicity”) týchto hlavných megazemetrasení (1952 M 9,0 a 2025 M 8,8), ktoré spadajú do 1 - 2x dĺžky roztrhnutého zlomu kritéria USGS pre zónu dotrasov.¹⁰ Pre nasledujúce porovnania priamych dotrasov bola pre hranice seizmickej zóny zvolená 1x dĺžka roztrhnutia zlomu. U megazemetrasenia v roku 1952 bolo roztrhnutie zlomu odhadované približne na 600 – 700 km.¹¹ U megazemetrasenia v roku 2025 bolo roztrhnutie zlomu odhadované približne na 600 km.¹²

Metodické zdôvodnenie výberu hraníc seizmických zón pre porovnanie dotrasov po megazemetraseniach na Kamčatke v rokoch 1952 a 2025

Analytické priestorové okno bolo definované ako 155,0° E – 163,5° E, 49,5° N – 55,0° N, s cieľom zachytiť priame dotrasy viazané na megathrustové ruptúry zemetrasení Kamčatka 1952 (M 9,0) a 2025 (M 8,8) pri zachovaní maximálnej porovnateľnosti oboch udalostí.

¹⁰ <https://www.usgs.gov/faqs/foreshocks-aftershocks-whats-difference>

¹¹

https://www.researchgate.net/publication/227083108_Asp erity_Distribution_of_the_1952_Great_Kamchatka_Earthquake_and_its_Relation_to_Future_Earthquake_Potential_in_Kamchatka

¹² <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772467025000703>

Voľba pozdĺžnych hraníc (155,0 – 163,5° E)

Východná a západná hranica boli zvolené tak, aby plne zahŕňali pozdĺžny rozsah oboch koseizmických ruptúr, ako je zrejmé z priestorovej distribúcie skorých dotrasov a z modelov koseizmického slipu (Yagi a kol. 2025, obr. 1). Zvolený rozsah presahuje pozdĺžnu dĺžku kratšej ruptúry (2025) a zároveň pokrýva celé jadro dlhšej ruptúry z roku 1952, pričom nevykazuje významné zahrnutie vzdialenej alebo tektonicky nesúvisiacej seizmicity.

Voľba severnej hranice (55,0° N)

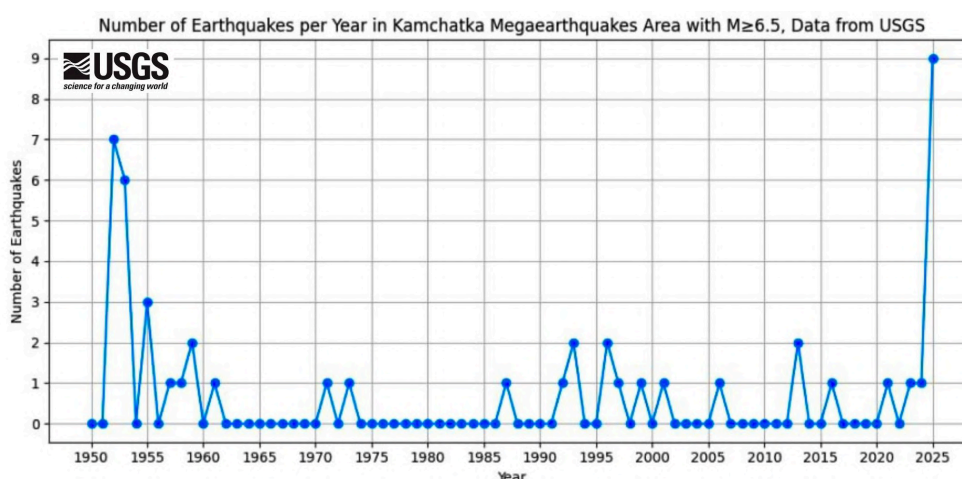
Severná hranica analytického okna bola stanovená tak, aby zahŕňala severný okraj pozorovanej zóny dotrasov oboch udalostí.

Kľúčové odôvodnenie južnej hranice (49,5° N)

Južná hranica analytického okna (49,5° N) bola zvolená vedome konzervatívne, na základe kombinácie geometrických, seizmologických a tektonických kritérií. Ako vyplýva zo štúdie Yagiho a kol. 2025, Obr. 1c – d, kontinuálny koseizmický slip ani súvislé jadro dotrasov oboch udalostí nesiahajú južnejšie než približne 49,5° N. Seizmicita pozorovaná južne od tejto hranice je riedka, priestorovo nesúvislá a predstavuje prechod k tektonickému prostrediu Kurilského oblúka.

Zahrnutie oblastí južnejších než 49,5° N by preto viedlo k:

- miešaniu megathrustových aftershockov s prechodovou alebo vzdialene spustenou seizmicitou,
- zníženiu tektonickej homogenity analyzovanej oblasti,
- a potenciálnemu skresleniu porovnania aftershockových vlastností oboch udalostí.



Obr. 7: Počet zemetrasení s $M \geq 6,5$ v seizmickej zóne megazemetrasení na Kamčatke, dáta: USGS

<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>

The graph was created using data from the USGS catalog in Python. The Kamchatka Megathrust Area is represented as a bounding box defined by the following geographic coordinates: 155.0°E–163.5°E longitude and 49.5°N–55.0°N latitude.

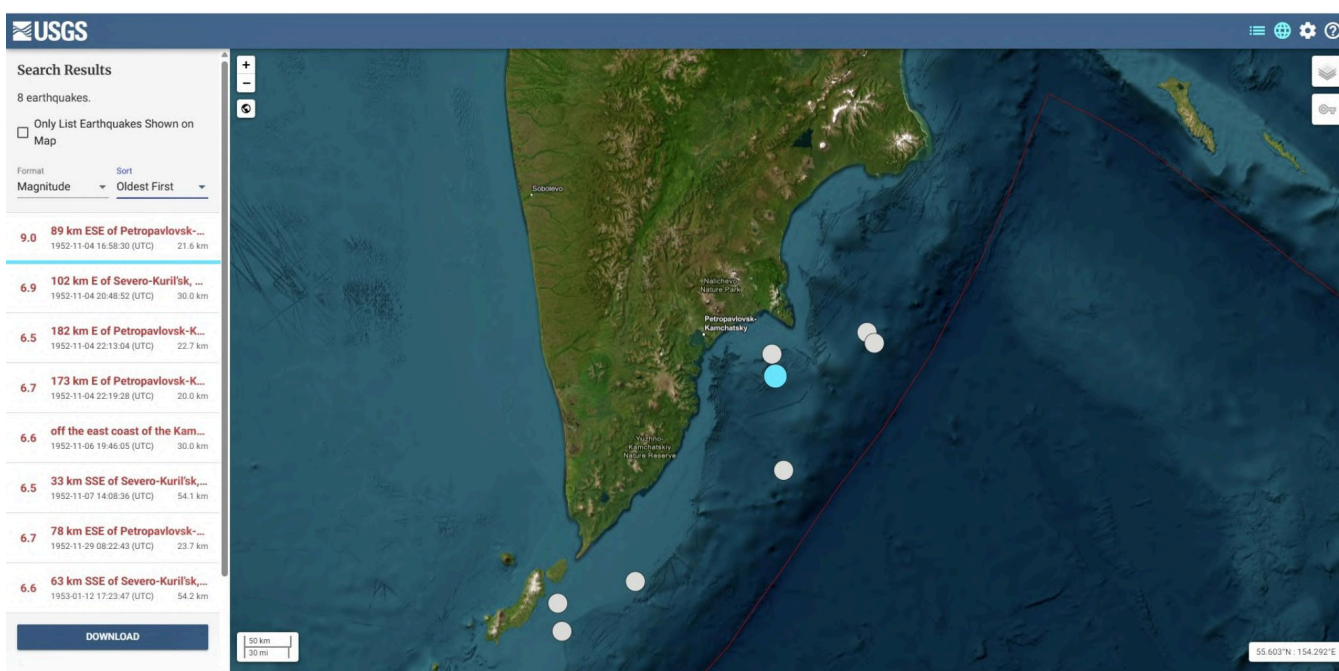


Obr. 8: Zóna pre porovnanie otrasov pred a po megazemetraseniach na Kamčatke, zdroj: Google Earth, vlastná úprava

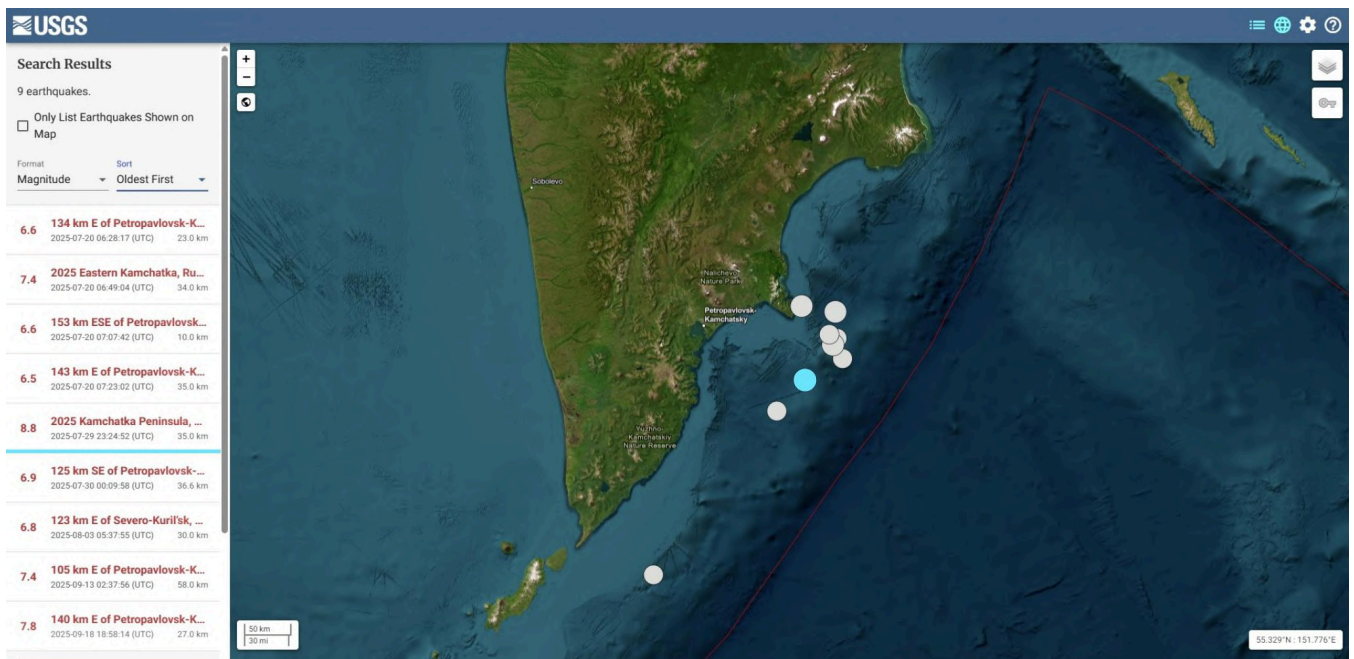
Graf z katalógu USGS (obr. 7) ukazuje, že výskyt zemetrasení s magnitúdou $M \geq 6,5$ v megathrustovej oblasti Kamčatky ($155,0^\circ \text{ E} - 163,5^\circ \text{ E}$, $49,5^\circ \text{ N} - 55,0^\circ \text{ N}$) je silne koncentrovaný do období bezprostredne súvisiacich s megazemetraseniami. Megazemetrasenie z dňa 4. novembra 1952 malo v prvých 5 mesiacoch po udalosti 7 dotrasov magnitúdy $M 6,5$ a vyššej (4. november 1952 – 4. apríl 1953).

Podobný, avšak ešte výraznejší nárast aktivity je pozorovaný v roku 2025 po megazemetrasení $M 8,8$, ktorý predstavuje najvyššiu ročnú frekvenciu silných predtrasov aj dotrasov v celom analyzovanom časovom úseku. Toto zemetrasenie, ktoré bolo slabšie o dve desatiny magnitúdy, má už dokopy 4 predtrasy s magnitúdou $M 6,5$ a väčšou a 4 dotrasy s magnitúdou $M 6,5$ a väčšou za 5 mesiacov od jeho vzniku (29. júl 2025 – 31. december 2025).

Obdobie dotrasov je pravdepodobne dlhšie, avšak v analýze máme zatiaľ k dispozícii 5 mesiacov od posledného megazemetrasenia. Mimo týchto dvoch období je výskyt zemetrasení $M \geq 6,5$ sporadický až nulový, čo potvrdzuje, že silná seizmicita v tejto oblasti je primárne viazaná na megathrustové ruptúry a ich následné sekvencie dotrasov.



Obr. 9: Výpis zemetrasení a ich poloha s magnitúdou väčšou ako $M 6,5$ v zóne dotrasov megazemetrasenia v roku 1952 a prvých 3 mesiacov roku 1953 z USGS: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>



Obr. 10: Výpis zemetrasení a ich poloha s magnitúdou väčšou ako M 6,5 v zóne predtrasov a dotrasov megazemetrasenia v roku 2025 z USGS: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>

Navyše, megazemetrasenie zo 4. novembra 1952 (M 9) nemalo žiadny predtras ani dotras s magnitúdou M 7 a viac, pričom megazemetrasenie z dňa 29. júla 2025 (M 8,8) malo v tom istom roku jeden silný predtras s magnitúdou M 7,4 a dva silné dotrasy s magnitúdami M 7,4 a M 7,8. Dotrasy sú porovnávané za časový úsek 5 mesiacov od vzniku megazemetrasenia:

- **20. júla 2025:** M 7,4 (Kamčatka) – najprv považované za hlavné zemetrasenie
- **29. júla 2025:** M 8,8 (Kamčatka) – skutočné megazemetrasenie
- **13. septembra 2025:** M 7,4 (Kamčatka) – dotras
- **18. septembra 2025:** M 7,8 (Kamčatka) – dotras

Kritický rozdiel: Toto historické megazemetrasenie z roku 1952 nemalo žiaden predtras ani dotras s magnitúdou M 7+ v prvých mesiacoch po zemetrasení.¹³ Kamčatské zemetrasenia v roku 2025 sa teda správajú fundamentálne odlišne od historického precedensu.

Zemetrasenia s magnitúdou M 6,5 boli zvolené v porovnávej štúdii z hľadiska spoľahlivosti ich zaznamenávania minimálne od 50. rokov.

Porušenie Báthovho zákona

Ešte pozoruhodnejšie než samo hlavné megazemetrasenie tohto roka je však charakter pred- a dotrasov, ktoré porušujú základné seizmologické zákonitosti. Podľa Báthovho zákona¹⁴ býva najsilnejší dotras približne o 1,2 magnitúdy slabší než hlavné zemetrasenie. Tohtoročné kamčatské megazemetrasenie však tento vzorec dramaticky porušuje.

“Všetci seizmológovia si mysleli, že dotras, ktorý sa stal 13. septembra (mal magnitúdu 7,4 – pozn. NSN), bol už najsilnejší, ako sa očakáva podľa zákonov seizmológie. Zvyčajne má magnitúdu o 1,2

¹³ <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/browse/significant.php?year=1952>

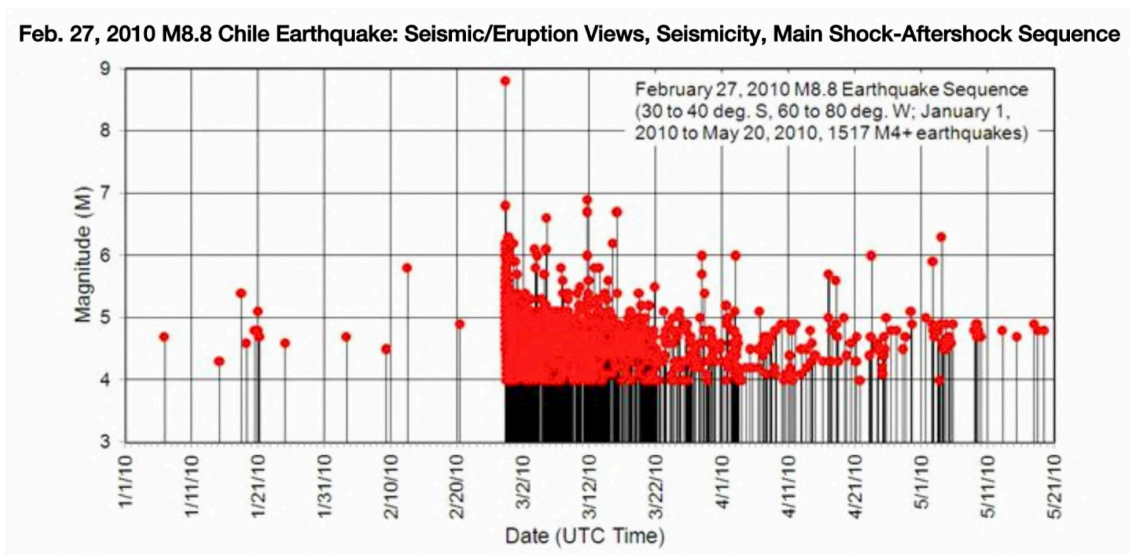
¹⁴ <https://arxiv.org/abs/physics/0307083>

nižšiu ako hlavný otras. Vyskytol sa však ešte silnejší,” povedal Jurij Vinogradov, riaditeľ Jednotnej geofyzikálnej služby Ruskej akadémie vied.¹⁵

27. februára 2010 sa udialo v Čile megazemetrasenie s rovnakou magnitúdou ako tohtoročné kamčatské megazemetrasenie - M 8,8. Spolu sa tieto zemetrasenia delia o 6. priečku najsilnejších zemetrasení v meranej histórii. Obe zemetrasenia sa udiali v rovnakej hĺbke, hĺbka hypocentra čílskeho megazemetrasenia bola 35 km¹⁶ a kamčatského megazemetrasenia taktiež 35 km¹⁷.

Braile (2010) vo svojej štúdií analyzoval priame predtrasy a dotrasy (nie pozadovú seizmicitu - “background seismicity”) čílskeho megazemetrasenia v jeho priamej seizmickej zóne (obr. 11 - 12).¹⁸ Dengler (2025) analyzoval veľké predtrasy a dotrasy kamčatského megazemetrasenia v jeho bezprostrednej seizmickej zóne (obr. 13).¹⁹

Porovnanie priebehu predtrasov a dotrasov tohtoročného kamčatského megazemetrasenia s rovnako silným zemetrasením v Čile (M 8,8 z 27. februára 2010) ukazuje výrazné rozdiely. V prípade čílskeho zemetrasenia nebol zaznamenaný žiadny predtras s magnitúdou vyššou ako M 6,0 a po hlavnom otrase sa nevyskytol ani jeden priamy dotras silnejší ako M 7,0.



Obr. 11: Predtrasy a dotrasy megazemetrasenia v Čile v roku 2010. Zdroj: <https://web.ics.purdue.edu/~braile/edumod/chile/chile.htm>

¹⁵ <https://nsn.fm/incident/novoe-moschnoe-zemletryasenie-na-kamchatke-privelo-seismologov-v-zameshatelstvo>

¹⁶ <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S089598112300514X>

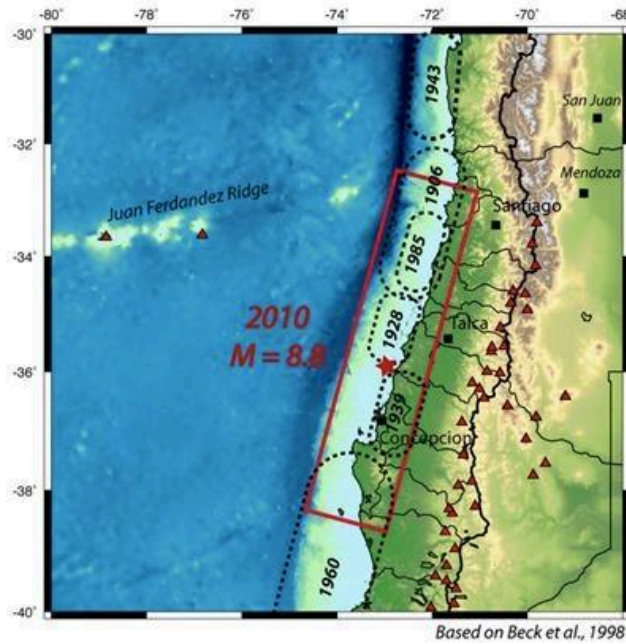
¹⁷ <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000qw60/executive>

¹⁸ <https://web.ics.purdue.edu/~braile/edumod/chile/chile.htm>

¹⁹

<https://www.msn.com/en-us/public-safety-and-emergencies/natural-disasters/lori-dengler-a-very-large-aftershock-reminder-that-the-kamchatka-earthquake-sequence-is-not-over/ar-AA1MYowB>

Magnitude 8.8 OFFSHORE MAULE, CHILE
Saturday, February 27, 2010 at 06:34:17 UTC



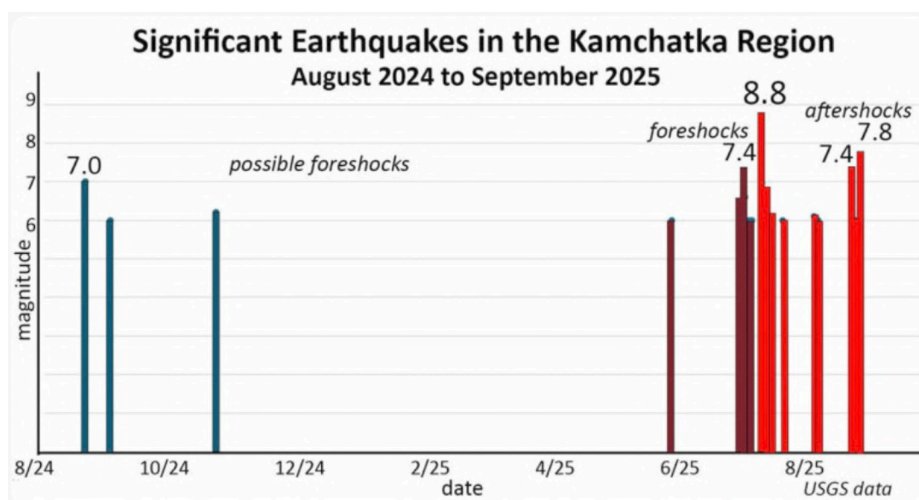
Coastal Chile has a history of very large earthquakes. Since 1973, there have been 13 events of magnitude 7.0 or greater.

The February 27 shock originated about 230 km north of the source region of the magnitude 9.5 earthquake of May, 1960 – the largest earthquake worldwide in the last 200 years or more.

An outline of the approximate rupture from this Magnitude 8.8 earthquake and its relationship to the largest earthquakes along the coast of Chile this century.

Obr. 12: Zóna dotrasov megazemetrasenia v Čile v roku 2010. Zdroj: <https://web.ics.purdue.edu/~braile/edumod/chile/chile.htm>

V prípade Kamčatky v roku 2025 bol priebeh seizmickej aktivity podstatne intenzívnejší. Hlavnému zemetraseniu predchádzalo minimálne sedem predtrasov s magnitúdou vyššou ako M 6,0, pričom dva z nich presiahli dokonca M 7,0. Už rok predtým, v roku 2024, sa v tej istej oblasti odohralo zemetrasenie s magnitúdou M 7,0, ktoré viacerí seizmológovia interpretovali ako uvoľnenie nahromadeného napätia. Následný vývoj však ukázal, že toto zemetrasenie bolo skôr predzvesťou oveľa silnejšej udalosti. Po hlavnom otrase navyše nasledovali mimoriadne silné dotrasy – 13. septembra 2025 s magnitúdou M 7,4 a 18. septembra 2025 s magnitúdou M 7,8.



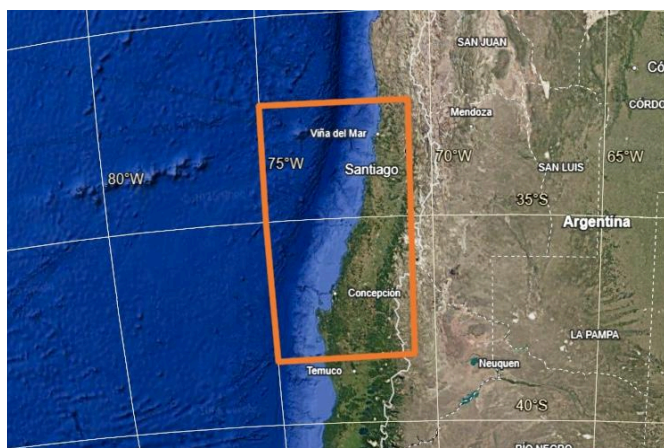
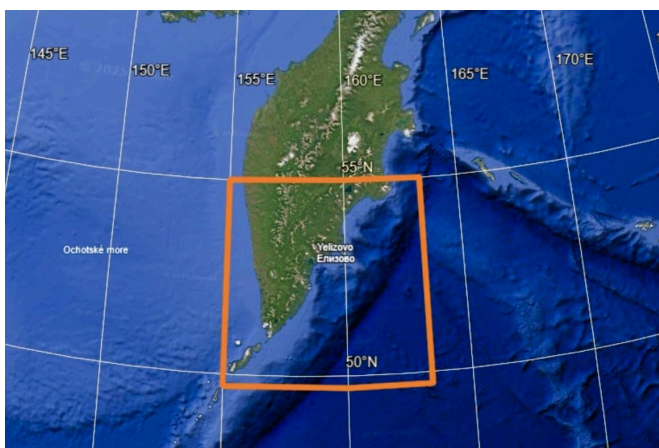
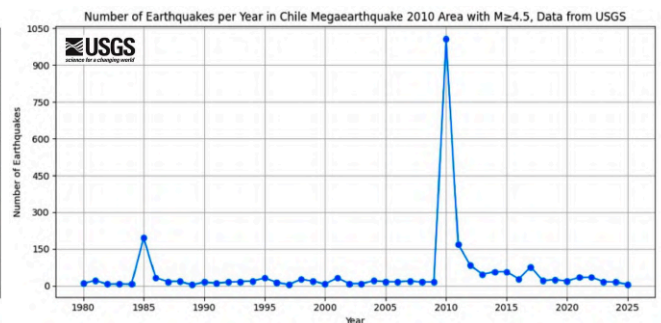
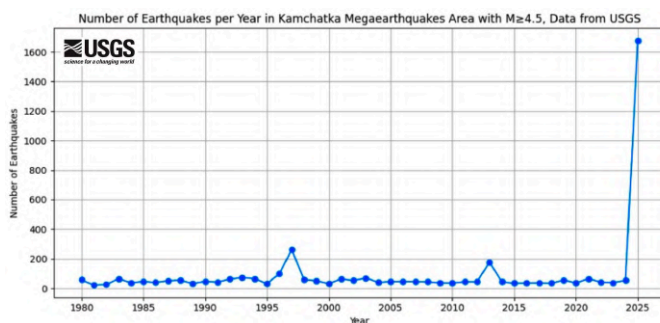
Obr. 13: Predtrasy a dotrasy s magnitúdou nad 6 megazemetrasenia na Kamčatke 2024 - 2025. Zdroj: <https://www.msn.com/en-us/public-safety-and-emergencies/natural-disasters/lori-dengler-a-very-large-aftershock-reminder-that-the-kamchatka-earthquake-sequence-is-not-over/ar-AA1MYowB>

Klasické seizmologické modely predpovedajú, že najväčší dotras je približne o magnitúdu 1,2 menší ako hlavný otras. V prípade kamčatskej sekvencie však boli zaznamenané viaceré silné dotrasy a najmä jeden s M 7,8, ktorý sa vymyká tomuto zákonu. Niektoré dotrasy dosiahli magnitúdu prekračujúcu M 7,0, čo samo o sebe predstavuje silné zemetrasenie.

Navyše, aj pri slabších otrasoch sa ukazuje výrazný rozdiel medzi týmito dvoma megazemetraseniami s rovnakou magnitúdou M 8,8 a približne rovnakou hĺbkou ohniska. Kým megazemetrasenie v Čile v roku 2010 vygenerovalo približne 1000 dotrasov s magnitúdou $M \geq 4,5$ (obr. 15), megazemetrasenie na Kamčatke v roku 2025 ich vyprodukovalo podstatne viac – približne 1700 (obr. 14). Tieto rozdiely sú prehľadne znázornené na grafoch na obrázkoch 14 - 15, ktoré porovnávajú počet dotrasov v oboch prípadoch.

Súradnice pre oblasť na zachytenie dotrasov čílskeho megazemetrasenia $75,0^\circ W - 71,0^\circ W$ a $38,0^\circ S - 32,5^\circ S$ boli zvolené tak, aby čo najpresnejšie pokrývali hlavnú oblasť predtrasovej a dotrasovej seizmickej aktivity súvisiacej s megazemetrasením M 8,8 v Čile v roku 2010. Tento priestor zahŕňa segment rozhrania medzi Nazcou a Juhoamerickou doskou, na ktorom došlo k hlavnému ruptúrnemu procesu, a zároveň pokrýva pozdĺžny aj priečny rozsah pozorovanej oblasti dotrasov identifikovanej v seizmologických katalógoch.

Západovýchodný rozsah analyzovanej priestorovej oblasti ($75^\circ W - 71^\circ W$) siaha od oceánskej časti zlomovej zóny až po pevninské oblasti, čím umožňuje zachytiť seizmickú aktivitu lokalizovanú pozdĺž celého šmykového rozhrania aj v nadložnej kontinentálnej kôre. Severojužný rozsah ($38,0^\circ S - 32,5^\circ S$) zodpovedá dĺžke hlavnej ruptúrnej zóny megazemetrasenia a zahŕňa oblasti s najvyššou hustotou dotrasov.



Obr. 14: Zemetrasenia s $M \geq 4,5$ na Kamčatke, analyzovaná priestorová oblasť: $155,0^\circ E - 163,5^\circ E$, $49,5^\circ N - 55,0^\circ N$, zdroj dát: USGS, zdroj obrázka: Google Earth, vlastná úprava

Obr. 15: Zemetrasenia s $M \geq 4,5$ v Čile, analyzovaná priestorová oblasť: $75,0^\circ W - 71,0^\circ W$, $38,0^\circ S - 32,5^\circ S$, zdroj dát: USGS, zdroj obrázka: Google Earth, vlastná úprava

Takéto správanie môže naznačovať, že nedošlo len k jednorázovému uvoľneniu nahromadeného napätia, ale že celá oblasť prechádza procesom zásadnej tektonickej reorganizácie.

Vulkanická aktivita na Kamčatke: Prebudenie šiestich sopiek naraz

Len niekoľko mesiacov po tohtoročnom kamčatskom megazemetrasení došlo na polostrove Kamčatka k erupciám šiestich sopiek naraz – podľa vedcov ide o mimoriadne nezvyčajný jav, aký sa naposledy pozoroval v roku 1737 po zemetrasení s magnitúdou M 9,0. Jurij Demjančuk, vedúci vulkanologickej stanice v dedine Ključ, povedal, že za päť desaťročí svojej práce na Kamčatke nevidel takúto rozsiahlu sopečnú aktivitu.²⁰

Kamčatka je domovom 29 aktívnych vulkánov a ďalších desiatky potenciálne aktívnych. V roku 2025 došlo k výraznej eskalácii aktivity nielen u tradičných „pracovníkov“ ako Ključevskaja sopka (najvyššia aktívna sopka Eurázie s výškou 4750 metrov), ale aj u sopiek, ktoré boli desaťročia alebo dokonca stáročia pokojné.

Zvlášť výnimočná je sopka Krašeninnikov, ktorá vybuchla prvýkrát po približne 600 rokoch - jej posledná známa erupcia sa datuje do 15. storočia. Sopka Kronotská vybuchla po 100 rokoch pokoja. Prebudenie dlho spiacich vulkánov môže signalizovať zásadné zmeny v hlbokých magmatických systémoch.

Sibírska Arktída: Bezprecedentná aktivita na stabilnej platforme

Jedným z najzáhadnejších a potenciálne najvýznamnejších javov roka 2025 je neobvykle silná seizmická aktivita zaznamenaná v oblasti Krasnojarska a Jakutska (obr. 16 - 17). Táto skutočnosť je geologicky mimoriadne nezvyčajná, pretože daná oblasť leží v srdci sibírskej platformy – jednej z najstarších a najstabilnejších tektonických štruktúr na Zemi.

Sibírska platforma je kratonická oblasť, teda časť kontinentálnej kôry, ktorá je stará viac ako dve miliardy rokov a vyznačuje sa extrémnou stabilitou. V takýchto oblastiach sú silné zemetrasenia mimoriadne zriedkavé, pretože absencia aktívnych tektonických okrajov znamená minimálne nahromadené napätie. O to viac prekvapuje, že práve v roku 2025 začala táto oblasť vykazovať seizmickú aktivitu, ktorá je pre ňu netypická.²¹

Sergej Šibajev, riaditeľ jakutskej pobočky Federálneho výskumného centra „Jednotná geofyzikálna služba Ruskej akadémie vied“ poznamenal, že všetky školy, štadióny a vládne inštitúcie v Jakutsku by mali byť navrhnuté a postavené s ohľadom na seizmické nebezpečenstvo magnitúdy 7.²²

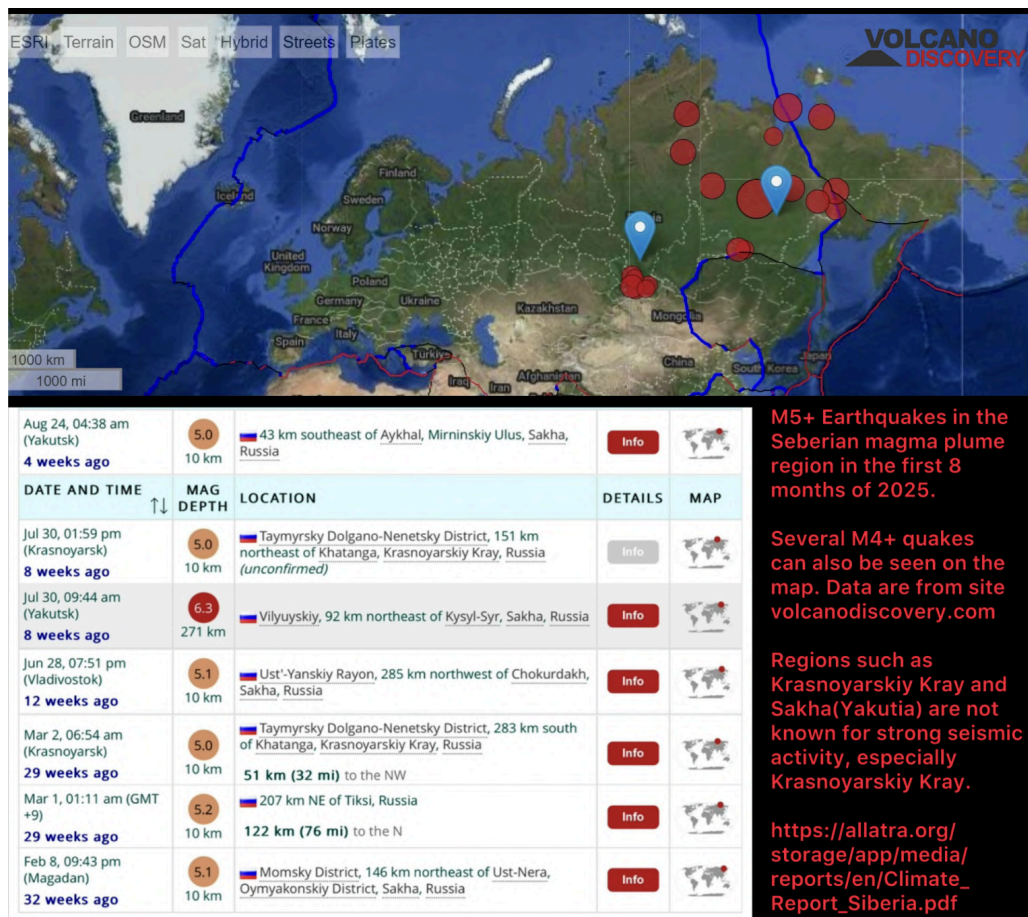
²⁰ <https://www.ap7am.com/en/110864/volcano-in-russias-kamchatka-ejects-ash-up-to-92-km-high>

²¹

<https://news.sgnorilsk.ru/2025/03/05/zemletryasenie-v-hatange-neharakternoe-yavlenie-dlya-sejsmicheski-spokojnogo-tajmyra/>

<https://dzen.ru/a/ZqjG6iMaR2Fxfei4>

²² <https://ysia.ru/v-yakutii-rastet-kolichestvo-zemletryasenij-uchenyj-rasskazal-o-sejsmicheskoy-opasnosti/>



Obr. 16: Zemetrasenia s magnitúdou nad M 5 v oblasti Krasnojarského kraja a Jakutska v prvých 8 mesiacoch roku 2025.

Zdroje: <https://www.volcanodiscovery.com/earthquakes/russia/sakha/archive/2025.html>,
<https://www.volcanodiscovery.com/earthquakes/russia/krasnoyarskiy-krai/archive/2025.html>

Земетрасение nastalo na severe Krasnojarského územia

Epicentrum sa nachádzalo 650 kilometrov východne od Norilsk.

<https://gazetazp.ru/news/obschestvo/na-severe-krasnojarskogo-kraja-proizoshlo-zemletrjasenie.html>

№Норильск. "Norilsk News" - Земетрасение nastalo za polárnym kruhom Krasnojarského územia. Epicentrum sa nachádzalo 650 kilometrov od Norilsk a 283 kilometrov od Khatangy.

Podľa internetového portálu [Volcanodiscovery](http://Volcanodiscovery.com), ktorý zhromažďuje informácie o aktuálnej seizmologickej situácii vo svete, sa udalosť stala 2. marca o 06:54 miestneho času. Údaje potvrdzujú viaceré európske agentúry.

Epicentrum sa nachádzalo na súradniciach 69,566 severnej zemepisnej šírky a 104,913 východnej zemepisnej dĺžky, teda v skutočnosti medzi náhornou plošinou Putorana a náhornou plošinou Anabar, v údolí rieky Kotaj. Zemetrasenie s magnitúdou 5,1 stupňa Richterovej stupnice ležalo v malej hĺbke, asi 10 kilometrov. Pre túto oblasť sú také silné zemetrasenia úplne nezvyčajné.

Vo všeobecnosti je od začiatku roka 2025 v arktickej časti Ruska zvýšená seizmická aktivita. Podľa Európsko-stredomorského seizmologického centra došlo 28. februára o 19.11 moskovského času k zemetraseniu s magnitúdou 5,2 pri pobreží Sibíri v Laptevovom mori. Epicentrum sa nachádzalo na súradniciach 73.080 S a 132.520 E, 197 km od dediny Tiksi. Na okraji Severného ľadového oceánu je zemetrasenie takého rozsahu veľmi zriedkavým javom.

Поčet zemetrasení v Jakutsku rastie. Vedec hovoril o seizmickom nebezpečenstve

V roku 2024 bolo v republike zaznamenaných 267 zemetrasení s intenzitou 3 a viac bodov

PRÁVIDY 14.51, 15. apríla Text: Maria Gorokhova

Prečítajte si nás ďalej Telegram ДЗЕН WhatsApp

V Jakutsku sa v posledných rokoch zvýšilo seizmické nebezpečenstvo. V roku 2024 bolo v republike zaznamenaných 267 zemetrasení s intenzitou 3 a viac bodov, od začiatku tohto roka - 21. Z toho druhého to bolo deň predtým okrese Olekminsky 5-6 bodov. Preto počet otrasov rastie, kedy a kde došlo k najväčším zemetraseniam v Jakutsku, aké nebezpečenstvá hrozia v budúcnosti, povedal pre YSIA Sergej Šibajev, riaditeľ jakutskej pobočky Federálneho výskumného centra "Jednotná geofyzikálna služba Ruskej akadémie vied".

V Jakutsku sa zemetrasenia začali vyskytovať častejšie

Obr. 17: "Zemetrasenie nastalo na severe Krasnojarského územia" a "Počet zemetrasení v Jakutsku rastie", zdroje:

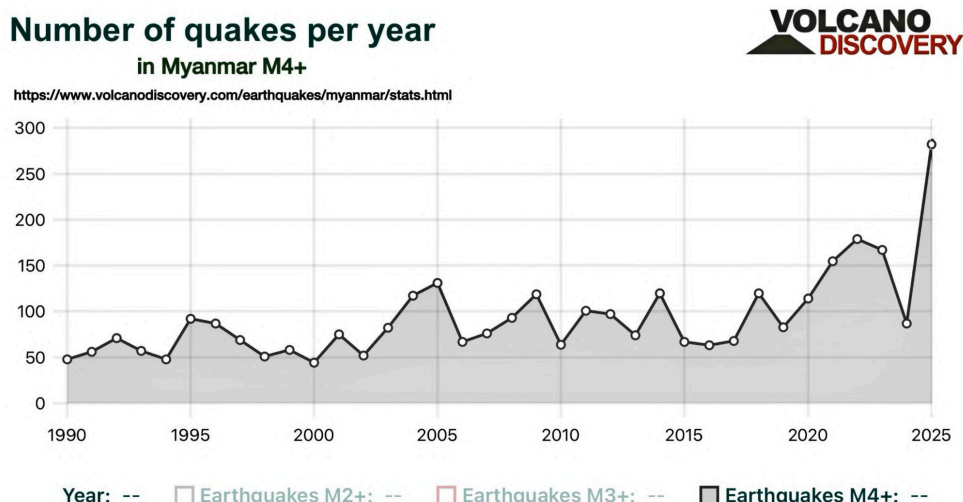
<https://gazetazp.ru/news/obschestvo/na-severe-krasnojarskogo-kraja-proizoshlo-zemletrjasenie.html>,
<https://ysia.ru/v-yakutii-rastet-kolichestvo-zemletrjasenij-uchenyj-rasskazal-o-seismicheskoj-opasnosti/>

Mjanmarsko: Fenomén "supershear" zemetrasenia a bezprecedentný nárast zemetrasení

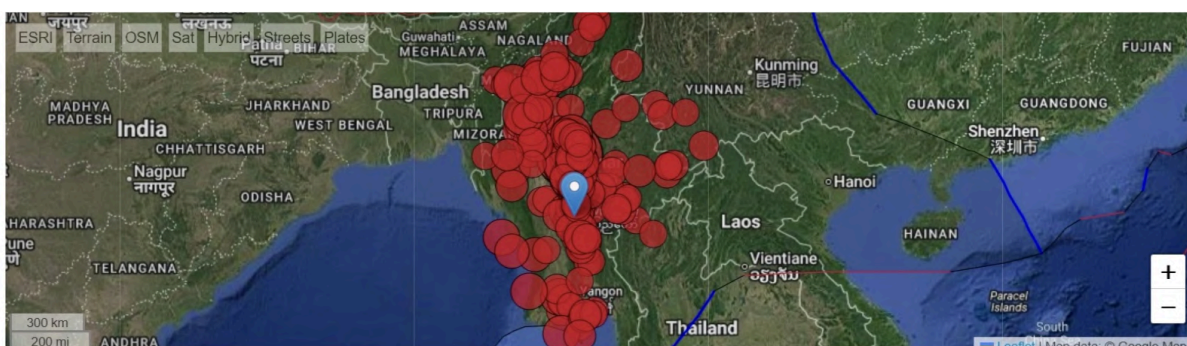
Dňa 28. marca 2025 postihlo Mjanmarsko zemetrasenie s magnitúdou M 7,7, ktoré malo výnimočnú charakteristiku – išlo o takzvané "supershear" zemetrasenie prekonávajúce rekordy²³. Tento pojem označuje zemetrasenia, pri ktorých sa zlomová trhlina šíri rýchlosťou presahujúcou rýchlosť šmykových seizmických vln v danom materiáli (až 5 km za sekundu).²⁴

Supershear zemetrasenia sú veľmi vzácne a predstavujú najdeštruktívnejší typ seizmických udalostí. Keď sa zlom šíri nadzvukovou rýchlosťou (vzhľadom na seizmické vlny), vytvára sa akási "seizmická úderová vlna" podobná sonickému tresku pri nadzvukových lietadlách. To vedie k výrazne väčšiemu uvoľneniu energie a ničivejším účinkom než pri bežných zemetraseniach.

Výskyt takéhoto zemetrasenia v Mjanmarsku, ktoré leží v zložitej tektonickej zóne interakcie medzi Indickou a Eurázijskou platňou, je významným indikátorom extrémne vysokých napätí v zemskej kôre.



Obr. 18: Počet zemetrasení s M4+ v Mjanmarsku, zdroj: <https://www.volcanodiscovery.com/earthquakes/myanmar/stats.html>



Obr. 19: Počet zemetrasení s M4+ v Mjanmarsku v roku 2025, zdroj: <https://www.volcanodiscovery.com/earthquakes/myanmar/stats.html>

²³ <https://phys.org/news/2025-08-reconstruction-myanmar-earthquake-supershear-event.html>

<https://phys.org/news/2025-07-supershear-boomerang-rupture-myanmar-earthquake.html>

²⁴ <https://doi.org/10.1029/2001GL013112>

Mjanmarsko zažíva tento rok aj bezprecedentnú seizmickú aktivitu v počte zemetrasení. Zatiaľ čo bežne Mjanmarsko malo ročne menej ako 100 - 150 zemetrasení s magnitúdou M 4 a viac, za celý rok 2025 malo Mjanmarsko celkovo 282 zemetrasení s magnitúdou 4 a viac podľa portálu VolcanoDiscovery²⁵ a 300 zemetrasení s magnitúdou M 4 a viac podľa portálu earthquakelist.²⁶

Toto zemetrasenie M7,7 a následné dotrasy spustili výrazný nárast seizmickej aktivity, ako je vidieť na obrázkoch 18 - 19.

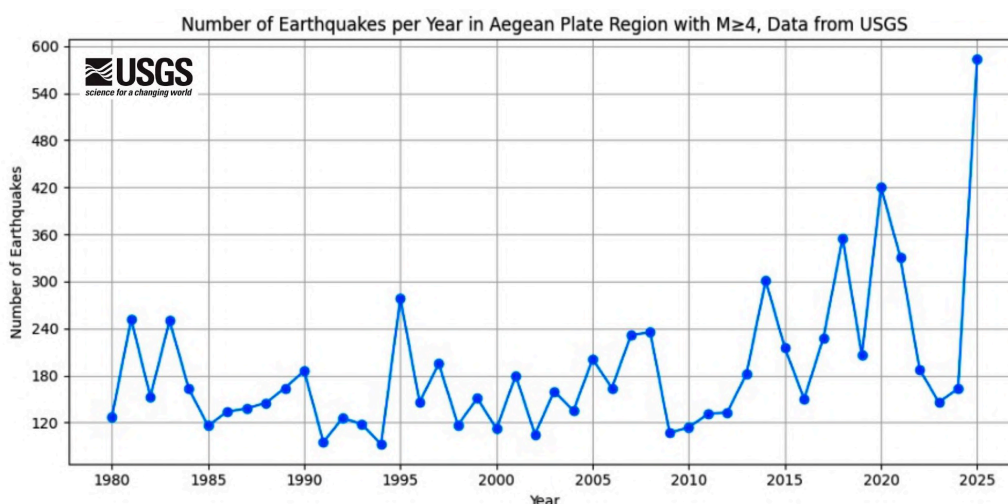
Databáza VolcanoDiscovery bola pre analýzu seizmickej aktivity v tejto oblasti zvolená, pretože obsahovala najväčší počet zaznamenaných zemetrasení v porovnaní s databázami USGS a ISC, pričom v niektorých rokoch bol počet udalostí dokonca približne dvojnásobný.

Región Egejskej platne a príľahlé oblasti: Bezprecedentný nárast aktivity

Širšia oblasť Egejskej platne zažívala v roku 2025 bezprecedentný nárast seizmickej a vulkanickej aktivity, ktorý výrazne prekročoval historické záznamy a signalizuje potenciálne fundamentálne zmeny v tektonickom a vulkanickom režime oblasti.

Počet zemetrasení s magnitúdou M 4+ bol v tejto oblasti v roku 2025 väčší ako 500, čo predstavuje viac ako dvojnásobný nárast oproti bežnému priemeru 200 - 250 udalostí ročne (obr. 20 - 21).

Oblasť Egejskej platne patrí medzi najlepšie seizmologicky monitorované oblasti Stredomoria a katalógy v tejto oblasti sú spoľahlivé pre zemetrasenia približne M4+ už od 80.–90. rokov.²⁷



Obr. 20: Počet zemetrasení s M \geq 4 v oblasti Egejskej platne, dáta: USGS <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>

²⁵ <https://www.volcanodiscovery.com/earthquakes/myanmar/stats.html>

²⁶ <https://earthquakelist.org/myanmar/>

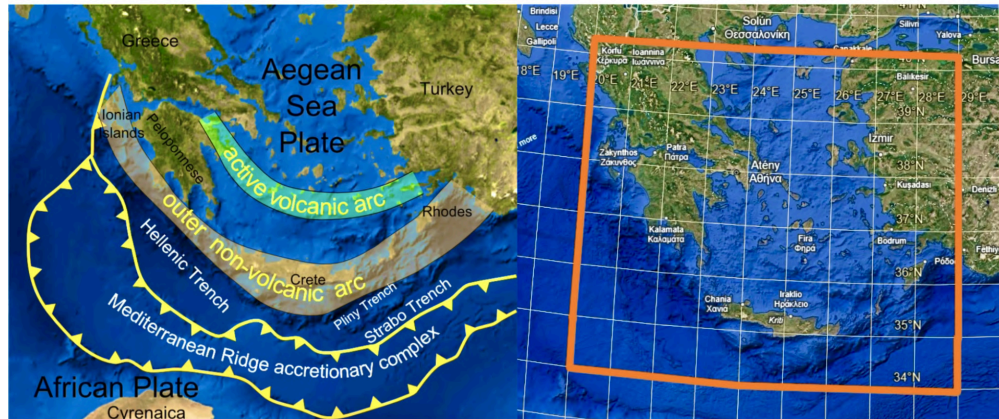
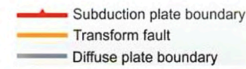
²⁷

https://iris.unipa.it/retrieve/5b73c537-7859-4830-bca8-4008514d9f1a/2022_Sparacino%20et%20al%20-%20Aegean%20-Anatolia%20coupling%5D%20ESR_compressed.pdf



The graph was created using data from the USGS catalog in Python. The Aegean Plate is represented as a bounding box defined by the following geographic coordinates: 20.0°E–29.0°E longitude and 34.0°N–40.3°N latitude.

<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>



Obr. 21: Analyzovaná zóna Egejskej platne, zdroje:

<https://www.keeptalkinggreece.com/2020/01/25/turkey-earthquake-greece-lekkas/> (hore vľavo),
https://fr.wikipedia.org/wiki/Arc_%C3%A9g%C3%A9en#/media/Fichier%3AHellenic_arc.png (dole vľavo), Google Earth,
 vlastná úprava (dole vpravo)

Táto oblasť je súčasťou Egejsko-anatolského deformačného pásma, kde sa stretávajú tri tektonické platne: Egejská, Anatolská, Africká platňa. Egejský vulkanický oblúk, ktorý je jednou z najaktívnejších tektonicko-vulkanických zón Európy. Tento proces je zodpovedný za existenciu vulkanických systémov:

- **Santorini-Kolumbo** (najznámejší a najaktívnejší)
- **Nisyros** – aktívna hydrotermálna aktivita²⁸, posledná erupcia pred 24 000 rokmi²⁹
- **Methana** – aktívne fumaroly a horúce pramene³⁰
- **Milos** – rozsiahla hydrotermálna aktivita v okolí³¹

Zvýšená seizmická aktivita v roku 2025 naznačuje reaktiváciu tohto vulkanického oblúka.

Egejská platňa má tenšiu kôru než kontinentálne oblasti – hrúbka kôry tu dosahuje len 25 - 30 kilometrov v porovnaní s 35 - 40 kilometrami v stabilných kontinentálnych oblastiach.³² Táto tenšia kôra znamená, že región rýchlejšie reaguje na zmeny v hlbších procesoch Zeme.

Zemská kôra sa tu neustále rozťahuje, trhá a prepadáva, čo vyvoláva početné zemetrasenia a súvisí aj s vulkanickou aktivitou. Rýchlosť rozťahovania dosahuje 3 - 4 centimetre ročne v niektorých častiach, čo je geologicky veľmi rýchly proces.³³

Egejská platňa by mohla fungovať ako "seizmický indikátor" hlbších procesov v plášti, reagujúc ako prvá na zmeny, ktoré sa neskôr prejavujú aj v iných oblastiach.

²⁸ <https://nisyros.de/en/geology-of-nisyros-volcano/the-volcanic-craters-of-nisyros>

²⁹ <https://www.mdpi.com/2076-3263/11/3/132>

³⁰ <https://athensattica.com/point/methana-peninsula/>

³¹ <https://greekcitytimes.com/2026/01/01/milos-island-hydrothermal-vents-discovery/>

³² <https://academic.oup.com/gji/article/169/3/1139/625072?login=false>

³³ <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0040195105005123>

Santorini: Bezprecedentný seizmický roj a pohyb magmy

Santorini (staroveká Théra) je jedným z najznámejších vulkanických systémov na svete, známa aj pre svoju dramatickú geologickú históriu.

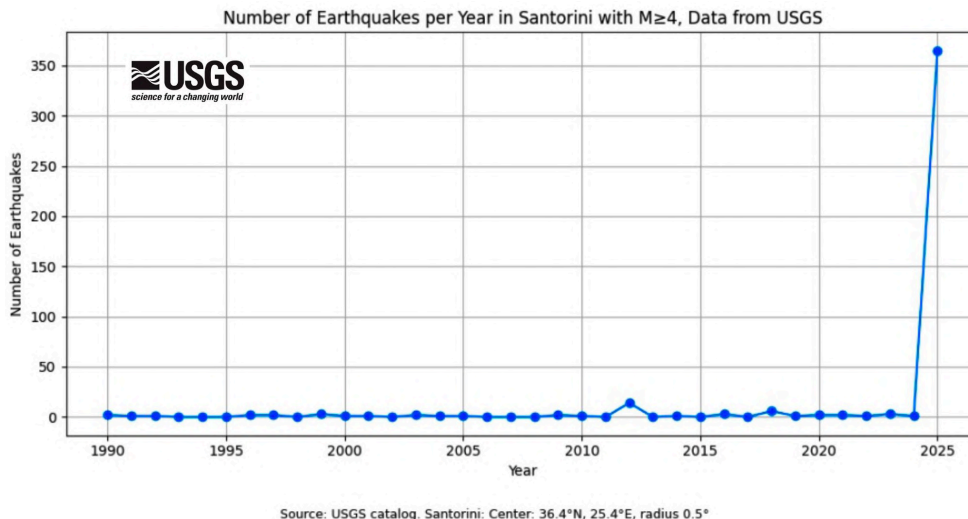
Najväčšia známa erupcia Santorini sa odohrala okolo roku 1600 pred n. l. (presné datovanie je predmetom diskusie) a dosiahla stupeň 7 na VEI. Táto takzvaná mýnojská erupcia vyprodukovala približne 60 kubických kilometrov vulkanického materiálu a vytvorila súčasnú kalderu. Erupcia spustila masívne tsunami, ktoré postihlo celé východné Stredozemie. Mnohí bádatelia ju spájajú so zánikom bronzovekej mýnojskej civilizácie na Kréte.

Začiatkom roka 2025 vedci zaznamenali bezprecedentný roj zemetrasení v oblasti Santorini, ktorý podľa štúdie z University of Oregon súvisel s pohybom magmy pod sopkou.³⁴ Zatiaľ čo bežne sa na Santorini nevyskytovali takmer žiadne zemetrasenia magnitúdy 4 a viac, tento rok ich tam bolo viac ako 350 podľa databázy USGS (obr. 22).

Štúdiá využívajúca pokročilé seizmické analýzy odhalila, že zemetrasenia neboli spôsobené len tektonickými procesmi, ale že magma sa pohybovala v podzemných komorách pod kalderou. Tento pohyb magmy vytváral tlak, ktorý sa prejavil ako séria zemetrasení.

Grécke a medzinárodné vulkanologické tímy zaznamenali:³⁵

- Dramatický nárast seizmickej aktivity
- Deformácie terénu (GPS merania ukázali mierne zdvíhanie centrálnej časti kaldery)
- Zvýšené emisie vulkanických plynov z podmorských fumarol



Obr. 22: Počet zemetrasení s magnitúdou 4 a viac v okolí kaldery Santorini, zdroj dát: USGS
<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>

³⁴ <https://news.uoregon.edu/study-finds-magma-helped-drive-recent-santorini-earthquakes>

³⁵ <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2025GL115856>

Kolumbo: Rastúca magmatická komora pod morom

Približne 7 kilometrov severovýchodne od Santorini leží podmorská kaldera Kolumbo – najaktívnejší podmorský vulkán v oblasti Santorini. Táto kaldera je široká približne 3 kilometre a hlboká 500 metrov. Vznikla pri poslednej veľkej explozívnej erupcii v roku 1650 s masívnymi emisiami tefry.³⁶

Podmorské roboty a oceánografické expedície v roku 2025 zaznamenali:³⁷

- Nové fumaroly (podmorské prieduchy s vulkanickými plynmi) v okolí Kolumba
- Zvýšené teploty morského dna (lokálne až o 10 - 15°C vyššie než okolie)
- Anomálie v chemickom zložení morskej vody indikujúce únik vulkanických plynov (CO₂, SO₂, H₂S)
- Seizmickú aktivitu pod morským dnom súvisiacu s prítokom magmy

Nové výskumy ukázali, že pod sopkou Kolumbo sa nachádza rozsiahla magmatická komora, ktorá sa od poslednej erupcie v roku 1650 postupne zväčšuje. Vedci využili metódu full-waveform inversion, pokročilú seizmickú techniku analyzujúcu celý priebeh seizmických vln, vďaka ktorej sa im podarilo vytvoriť detailný trojrozmerný obraz magmatického systému pod touto podmorskou sopkou. Zistili, že pod kalderou existuje rozsiahla zóna čiastočne roztavenej horniny, teda magmy, uložená približne 2 až 4 kilometre pod morským dnom. Objem magmy v tejto komore sa postupne zvyšuje, keďže z väčších hĺbok neustále vystupuje nové magma, a celý systém sa tak naplňuje už približne 375 rokov od poslednej veľkej erupcie.³⁸

Vedci upozorňujú na možnosť tsunamigénnej erupcie, keďže aktivita magmatickej komory by mohla viesť k mimoriadne explozívnemu vývoju. V prípade, že sa magma dostane do kontaktu s morskou vodou, jej výbušnosť sa dramaticky zvyšuje. Podmorské erupcie totiž predstavujú špecifické riziko – horúca magma s teplotou približne 800 až 1200 °C pri kontakte s vodou spôsobuje jej prudké vyparovanie, čo vedie k takzvaným fréatomagmatickým výbuchom, považovaným za najexplozívnejší typ vulkanickej aktivity³⁹. Tlak vznikajúci pri náhlom odparení obrovského množstva vody môže vyústiť do extrémne silných erupcií, vytvorenia masívnych tsunami, keď sa vodný stĺpec nad miestom erupcie náhle zdvihne a vyvolá ničivé vlny, ako aj do produkcie veľkého množstva jemného sopečného popola, ktorý môže narušiť leteckú dopravu naprieč Európou.

Historické záznamy z erupcie sopky Kolumbo v roku 1650 opisujú, že lode sa plavili cez „vriacu morskú vodu“, pemza dopadala až stovky kilometrov od miesta výbuchu a do atmosféry unikalo obrovské množstvo vulkanických plynov. Následky boli tragické – na blízkych ostrovoch zahynulo približne 70 ľudí.

Kombinácia aktivity Santorini a Kolumbo je obzvlášť znepokojujúca, pretože naznačuje, že celý vulkanický systém južnej časti Egejského mora prechádza fázou reaktívacie. Niektoré štúdie naznačujú, že obe kaldery môžu byť napojené na spoločný hlbinný magmatický rezervoár, čo znamená, že aktivita jednej môže ovplyvniť druhú.⁴⁰

³⁶ <https://link.springer.com/article/10.1007/s00445-025-01871-8>

³⁷ <https://goldschmidtabstracts.info/2025/31407.pdf>

³⁸ <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2022GC010475>

³⁹ <https://geologybase.com/phreatomagmatic-eruptions/>

⁴⁰ <https://www.nature.com/articles/s41586-025-09525-7>

Zlomová línia západného Turecka a Egejského mora

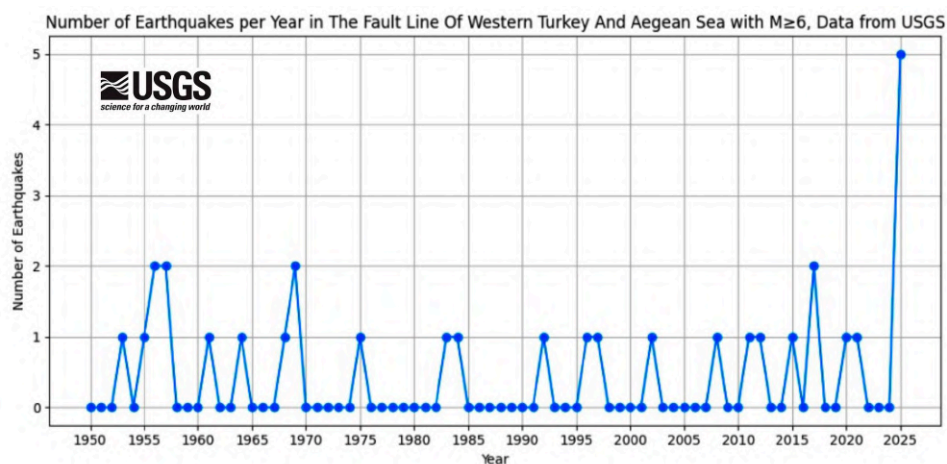
Spolu s Egejskou platňou zažíva dramatický nárast aktivity aj susedné Turecko - konkrétne oblasť západného Turecka.

V roku 2025 sa v oblasti západného Turecka a Egejského mora odohralo päť zemetrasení s magnítudou nad M 6, čo sa nestalo minimálne od roku 1950 (obr. 23 - 24):

- **Apríl 2025:** M 6,2 pri **Istanbule**
- **Máj 2025:** Dve zemetrasenia M 6+ pri **Kréte** (Grécko)
- **August 2025:** M 6+ pri **Balikesire** (Turecko)
- **Október 2025:** M 6+ pri **Balikesire** (Turecko)

Koncentrácia piatich silných zemetrasení v priebehu jedného roka v relatívne malej geografickej oblasti je extrémne nezvyčajná a naznačuje výrazné zmeny v rozložení tektonického napätia.

Obzvlášť znepokojivé sú dve zemetrasenia M 6+ v septembri a októbri pri Balikesire, ktoré sa odohrali v oblasti Západoanatolského zlomu - zóny, kde sa stretáva Západoanatolská platňa s Egejskou platňou.



Obr. 23: Počet zemetrasení s $M \geq 4$ v oblasti zlomovej línie západného Turecka a Egejského mora, dáta: USGS
<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>



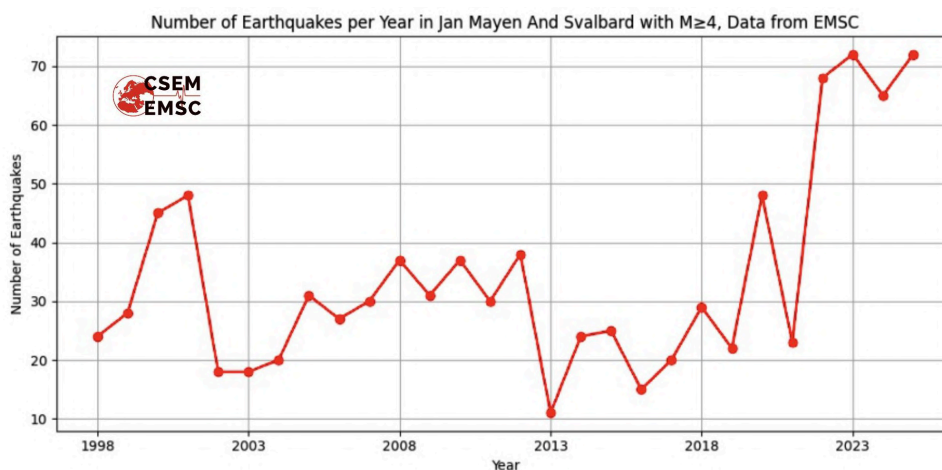
Obr. 24: Analyzovaná zóna zlomovej línie západného Turecka a Egejského mora, zdroje: Google Earth, vlastná úprava (naľavo), <https://www.keptalkinggreece.com/2020/01/25/turkey-earthquake-greece-lekkas/> (napravo)

Jan Mayen a Svalbard: Prebudenie arktickej vulkanickej zóny

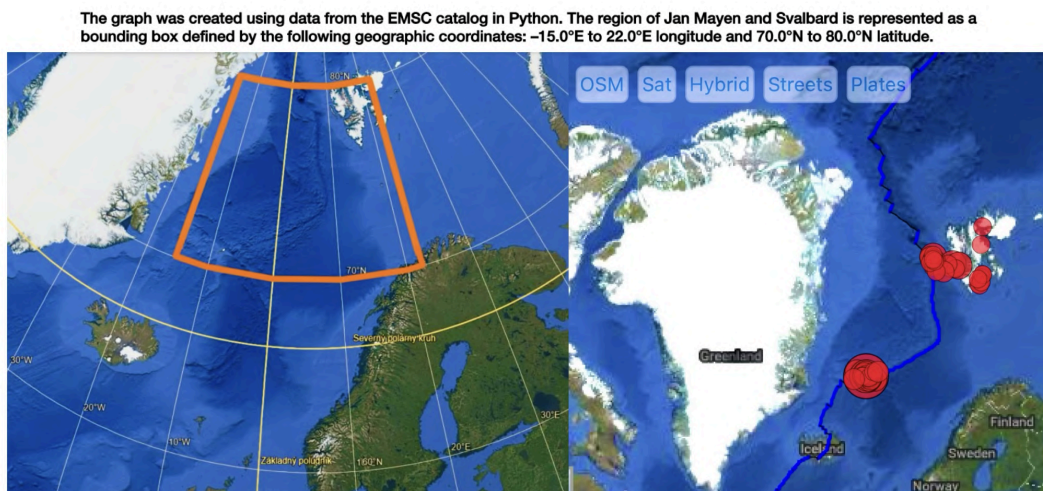
Oblasť okolo ostrovov Jan Mayen a Svalbard v Severnom ľadovom oceáne zažíva v posledných rokoch výrazný nárast seizmickej aktivity, ktorý v roku 2025 dosahuje nové maximá. Táto oblasť, často prehliadaná kvôli svojej odľahlosti a extrémnym klimatickým podmienkam, sa ukazuje byť geologicky oveľa aktívnejšou než sa predpokladalo.

Zatiaľ čo bežne sa v oblasti Jan Mayen a Svalbard neregistrovalo viac ako približne 50 zemetrasení M 4+ ročne, posledné roky ich počet prekračuje 70+ (obr. 25 - 26).

Tento viac než dvojnásobný nárast seizmickej aktivity v oblasti, ktorá bola historicky považovaná za relatívne pokojnú, je geologicky významný. Arktické oblasti všeobecne vykazujú nižšiu seizmickú aktivitu než tektonicky aktívnejšie pásma ako Ohnivý kruh, preto je akýkoľvek výrazný nárast hodný pozornosti.



Obr. 25: Počet zemetrasení s $M \geq 4$ v okolí ostrovov Jan Mayen a Svalbard, zdroj dát: EMSC
https://www.emsc-csem.org/Earthquake_information/



Obr. 26: Analyzovaná zóna okolia ostrovov Jan Mayen a Svalbard, zdroj: Google Earth, vlastná úprava (naľavo), zemetrasenia s $M \geq 4$ v okolí ostrovov v roku 2025, zdroj: <https://www.volcanodiscovery.com/earthquakes/svalbard-jan-mayen/archive/2025.html> (napravo)

Pre analýzu seizmicity tejto oblasti bola použitá databáza EMSC (European-Mediterranean Seismological Centre), keďže regióny Jan Mayen a Svalbard sú pokryté najmä nórskymi seizmickými sieťami, ktorých údaje sú prostredníctvom EMSC pravidelne publikované a agregované spolu s údajmi ďalších európskych agentúr. Vďaka relatívne hustej regionálnej sieti staníc je v tejto arktickej oblasti

seizmicita približne od začiatku 90. rokov spoľahlivo zaznamenávaná približne od magnitúdy $M \approx 4$ a vyššie.⁴¹

Jan Mayen je domovom aktívnej sopky Beerenberg, jedinej aktívnej sopky Nórska a najsevernejšej pozemnej aktívnej sopky sveta. V roku 2025 navyše vykazoval zvýšenú seizmickú aktivitu, ktorá môže naznačovať hýbajúcu sa magmu pod povrchom.⁴²

Celá seizmicky najaktívnejšia oblasť leží na rozhraní Eurázijskej dosky a Severoamerickej dosky. Najviac zemetrasení je koncentrovaných práve na zlome, čím sa poukazuje na zvyšujúcu sa seizmickú aktivitu v rámci okrajových zlomov Eurázijskej dosky.

⁴¹ https://nnsn.geo.uib.no/reports/2013/seismicity_2013.pdf

⁴² https://www.volcanodiscovery.com/de/jan_mayen-earthquakes.html

3. Seizmická aktivita na okrajoch Eurázijskej dosky v rokoch 2023 - 2025

Zvýšená a abnormálna seizmická aktivita na okrajoch eurázijskej platne je pozorovaná nie len v roku 2025, ale aj v rokoch 2024 a 2023. Nasledujúce prezentované grafy na obrázkoch 27 až 39 na základe databáz USGS a Volcano Discovery dokumentujú výrazné a v mnohých prípadoch bezprecedentné nárasty počtu zemetrasení s magnitúdou $\geq M4$ v niekoľkých kľúčových oblastiach: Anatolská/Aegejská oblasť (Turecko 2023), Filipíny (2023), Japonsko – Ishikawa (2024), Taiwan (2024), Mjanmarsko (2025) a zlomová zóna Kamčatka–Kurily (2025). Tieto nárasty výrazne presahujú dlhodobé priemery pozorované od 80. rokov 20. storočia a zahŕňajú nielen hlavné megazemetrasenia, ale aj mimoriadne silné a dlhodobé série dotrasov.

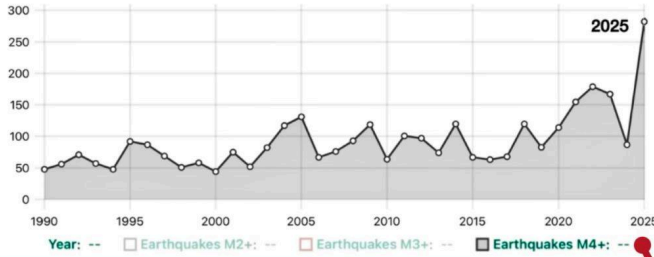
Osobitnú pozornosť si vyžaduje súbežná vulkanická aktivita na okrajoch Eurázijskej platne, najmä erupčný cyklus na Reykjaneskom polostrove na Islande (2023–2024) a seizmicko-vulkanická aktivácia v oblasti Egejskej platne vrátane Santorini (2025). Časová a priestorová zhoda týchto javov so zvýšenou seizmicitou na miestach okrajov platne naznačuje stav zvýšeného regionálneho až transregionálneho napätia v rámci celej platňovej hranice Eurázie.

Grafické dôkazy poukazujú na abnormálnu intenzitu a synchronizáciu seizmických a vulkanických procesov v posledných rokoch. Výsledky podporujú hypotézu, že súčasné obdobie predstavuje výnimočnú fázu v dynamike okrajov Eurázijskej platne, ktorá si vyžaduje zvýšenú pozornosť, detailnejšie fyzikálne modelovanie prenosu napätia a kontinuálny monitoring z hľadiska seizmického aj vulkanického rizika.

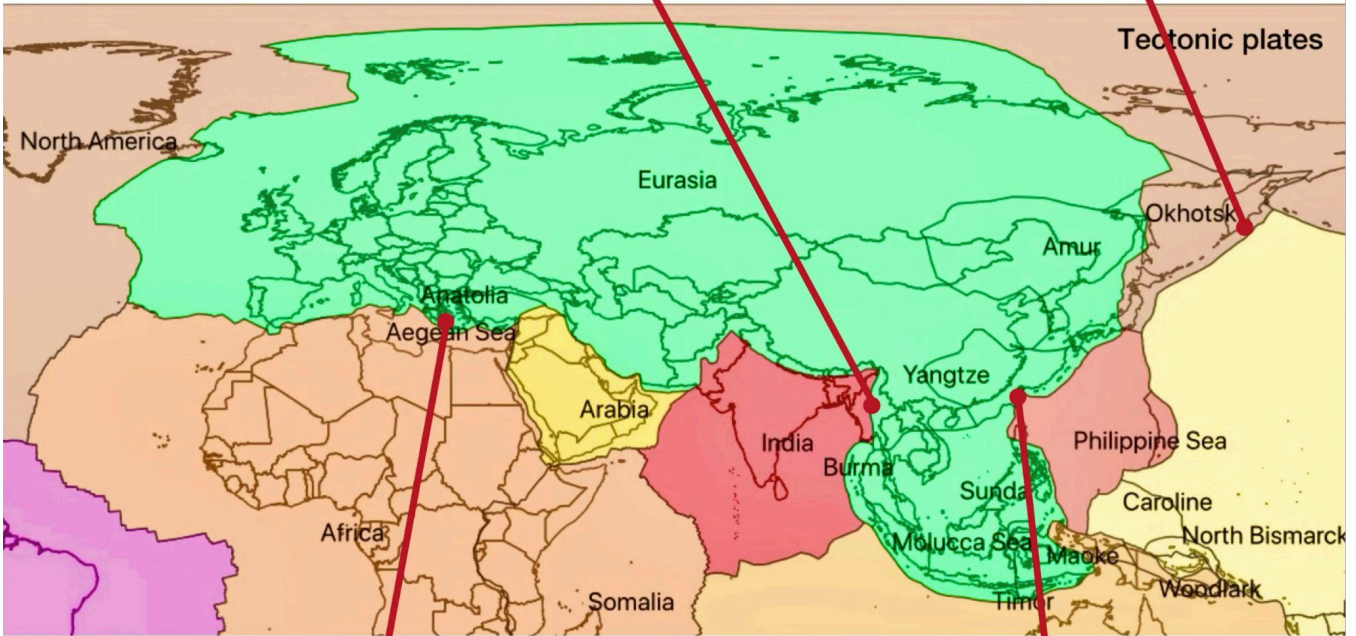
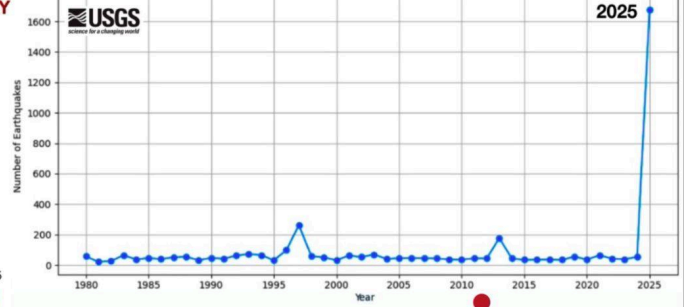
Niektoré grafy v tejto práci nezobrazujú celé obdobie až do roku 2025, ale končia jeden alebo dva roky skôr. Dôvodom je zameranie na konkrétne roky, v ktorých došlo k výrazným megazemetraseniam, s cieľom prehľadnejšie znázorniť zmeny v celkovom počte zemetrasení v danom roku. Pozornosť sa sústreďuje najmä na ročné súčty zemetrasení vrátane dotrasov, ktoré v týchto prípadoch dosiahli hodnoty výrazne vyššie než dlhodobé priemery zaznamenané od roku 1980. Porovnanie s predchádzajúcimi obdobiami zároveň ukazuje, že aj pri výskyte silných zemetrasení podobnej magnitúdy v minulosti bol celkový počet zaznamenaných udalostí v rovnakých regiónoch spravidla nižší.

Number of quakes per year in Myanmar M4+

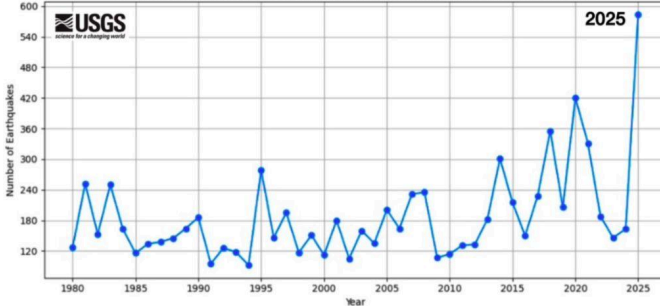
<https://www.volcanodiscovery.com/earthquakes/myanmar/stats.html>



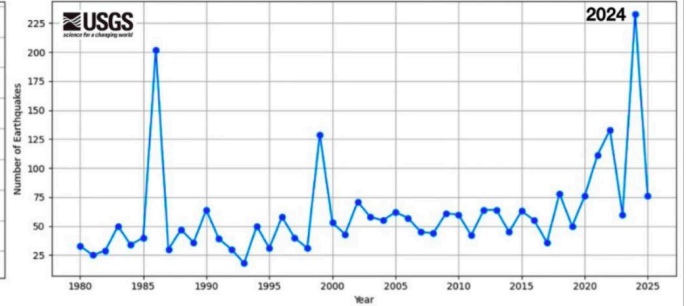
Number of Earthquakes per Year in Kamchatka Megaequakes Area with M≥4.5, Data from USGS



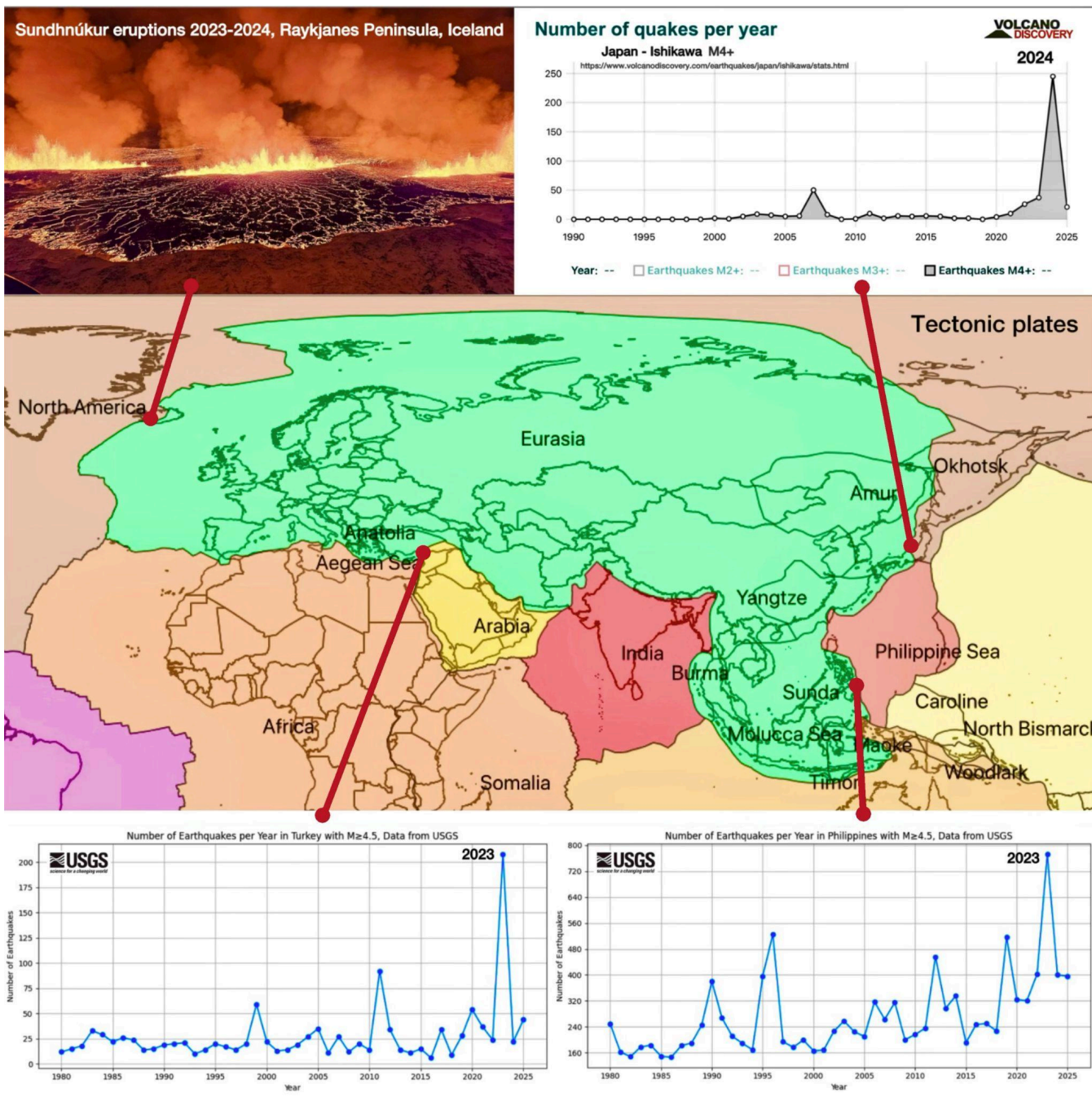
Number of Earthquakes per Year in Aegean Plate Region with M≥4, Data from USGS



Number of Earthquakes per Year in Taiwan with M≥4.5, Data from USGS



Obr. 27: Seizmická aktivita na okrajoch Eurázijskej dosky zahŕňajúcej aj Ochotskú platňu v rokoch 2025 - 2024, zdroje dát: USGS <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>, <https://www.volcanodiscovery.com/earthquakes/myanmar/stats.html>



Obr. 28: Seizmická aktivita spojená s vulkanizmom na okrajoch Eurázijskej dosky zahŕňajúcej aj Ochotskú platňu v rokoch 2024 - 2023, zdroj dát: USGS <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>, <https://www.volcanodiscovery.com/earthquakes/japan/ishikawa/stats.html>

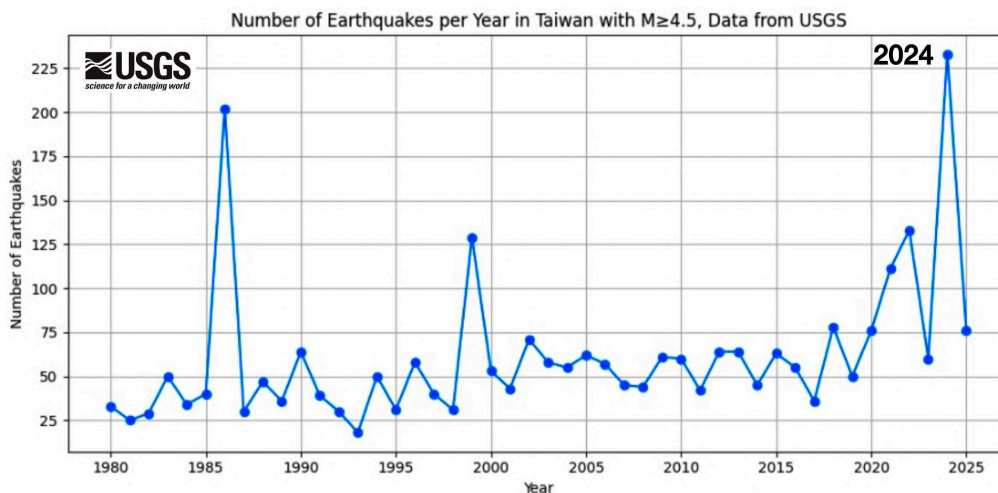
Abnormálna seizmická aktivita v Mjanmarsku, na Kamčatke a Egejskej platni v roku 2025 zobrazená v podobe grafov na obrázku je podrobne popísaná v predošlých kapitolách na obr. 6 - 15, 18 - 21.

Taiwan

Dňa 3. apríla 2024 zasiahlo východné pobrežie Taiwanu silné zemetrasenie s magnitúdou $M 7,4$.⁴³ Zároveň zaznamenal Taiwan v roku 2024 rekordnú seizmickú aktivitu od začiatku presného

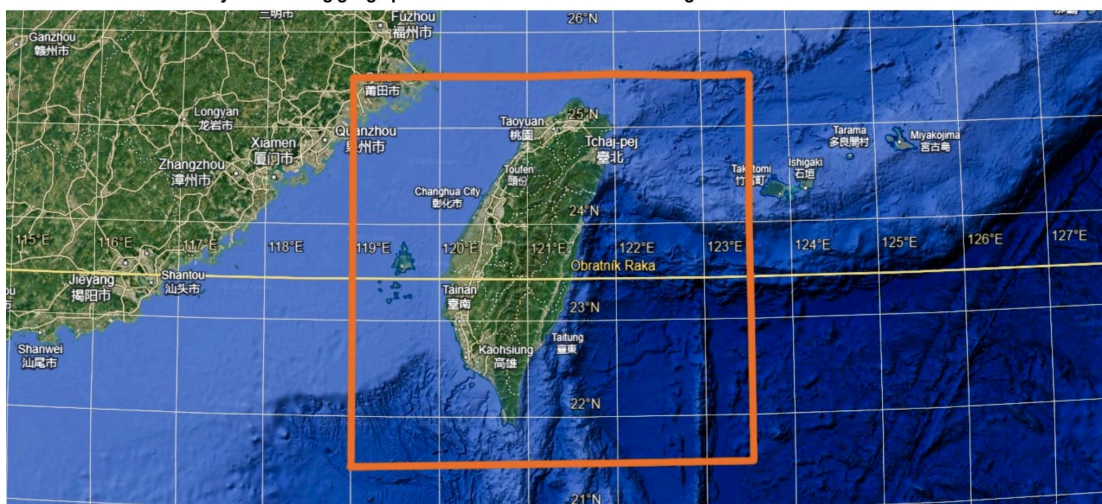
⁴³ <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us7000m9g4/executive>

seizmického monitorovania.⁴⁴ Najväčší dotras s magnitúdou M 6,5 sa vyskytol 13 minút po hlavnom otrase, čo naznačuje významnú seizmickú aktivitu v regióne.⁴⁵ Zemetrasenie bolo také energeticky výrazné, že vyvolalo aj neobvyklé vlny v ionosfére.⁴⁶



Obr. 29: Počet zemetrasení s $M \geq 4,5$ v okolí Taiwanu, dáta: USGS <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>

Graph was created using data from the USGS catalog in Python. The region of Taiwan is represented as a bounding box defined by the following geographic coordinates: 119.0°E–123.5°E longitude and 21.5°N–25.5°N latitude.



Obr. 30: Analyzovaná zóna okolia Taiwanu, zdroj: Google Earth, vlastná úprava

Ako vidno na obrázkoch 29 - 30, na základe údajov z katalógu USGS je zrejmé, že seizmická aktivita na Taiwane v roku 2024 výrazne vzrástla. Tento nárast je úzko spätý so silným zemetrasením o magnitúde M 7,4, ktoré spustilo mimoriadne rozsiahlu sekvenciu dotrasov. Celkový počet zemetrasení s magnitúdou $M \geq 4,5$ v roku 2024 dosiahol najvyššie hodnoty v celom sledovanom období od roku 1980, pričom výrazne prevyšuje aj rok 1999, keď ostrov zasiahol ešte silnejší otras M 7,7 (Chi-Chi) v západnej časti centrálného Taiwanu.⁴⁷ Kým po zemetrasení v roku 1999 sa ročný počet udalostí $M \geq 4,5$ pohyboval okolo 130, v roku 2024 tento počet presiahol 225 udalostí. Graf tak jasne ilustruje, že hoci hlavný otras v roku 2024 bol o niečo slabší než v roku 1999, následná seizmická odozva bola podstatne intenzívnejšia, čo poukazuje na výnimočne zvýšenú seizmickú aktivitu v poslednom období.

44

<https://watchers.news/2024/12/07/taiwan-logs-record-seismic-activty-with-42-quakes-surpassing-magnitude-5-5/>

45 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S277246702400054X>

46 <https://www.mdpi.com/2072-4292/17/7/1241>

47 <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp0009eq0/executive>

Zvýšená seizmická aktivita je na grafe na obrázku 29 badateľná aj v roku 1986, keď Taiwan zasiahlo rovnako silné zemetrasenie na východnom pobreží ostrova s magnitúdou približne M 7,4.⁴⁸ Tento otras sa prejavil výrazným nárastom počtu udalostí M ≥ 4,5, ktorý však v porovnaní s rokom 2024 zostáva nižší. Z grafu vyplýva, že v roku 1986 bol ročný počet zemetrasení s magnitúdou M 4,5 a vyššou na úrovni 200 udalostí, zatiaľ čo v roku 2024 tento počet výrazne presiahol hranicu 225. Obe zemetrasenia sa stali v rovnakej lokalite v blízkosti mesta Hualien, pričom zemetrasenie z roku 2024 malo väčšiu hĺbku hypocentra (40 km) oproti 34 km u zemetrasenia z roku 1986.

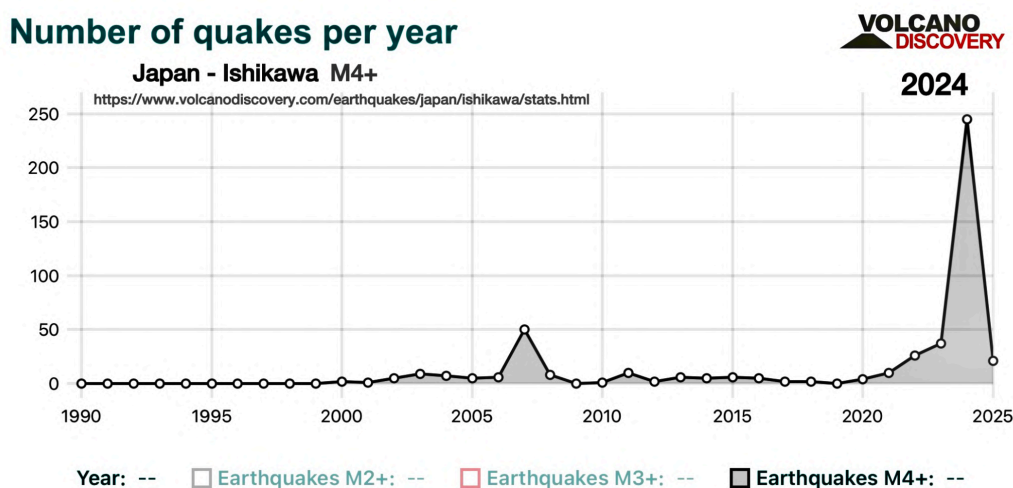
Graf počtu zemetrasení s magnitúdou M ≥ 4,5 v oblasti Taiwanu podľa databázy USGS na obrázku 29 ukazuje od 80. rokov jasný a dlhodobý rastúci trend seizmickej aktivity. Kým v 80. rokoch sa ročné počty väčšinou pohybovali na úrovni niekoľkých desiatok udalostí, od prelomu 90. rokov a po roku 2000 je viditeľný stabilný nárast priemernej ročnej hodnoty, ktorá sa postupne posúva k vyšším desiatkam až viac než stovke zemetrasení ročne. V poslednej dekáde sa navyše objavujú výrazné maximá, čo poukazuje na konzistentné zvyšovanie počtu takto silných zemetrasení.

Japonsko

Na Nový rok 2024 zasiahlo polostrov Noto zemetrasenie M 7,5 v zóne, kde sa podobne silné otrasy neočakávali. Ide o jedno z najväčších intraplatňových zemetrasení v Japonsku. Roje zemetrasení tu prebiehali tri roky a ide o prvé zemetrasenie magnitúdy M 7 v rámci rojovej aktivity od roku 1919.⁴⁹

Graf na obrázku 31 znázorňuje mimoriadny nárast seizmickej aktivity v Japonsku v prefektúre Ishikawa za rok 2024, na obrázku 32 je lokalizácia zemetrasení s M4+ v Japonsku v prefektúre Ishikawa za rok 2024.⁵⁰

Databáza VolcanoDiscovery bola pre analýzu seizmickej aktivity v tejto oblasti zvolená najmä preto, že obsahovala najvyšší počet zaznamenaných zemetrasení v porovnaní s databázami USGS a ISC. V niektorých rokoch bol počet evidovaných udalostí v tejto databáze dokonca približne dvojnásobný.



Obr. 31: Počet zemetrasení s M ≥ 4 v Japonsku v prefektúre Ishikawa od roku 1990. Zdroj: <https://www.volcanodiscovery.com/earthquakes/japan/ishikawa/stats.html>

⁴⁸ <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp0003009/executive>

⁴⁹ <https://academic.oup.com/gji/article/240/2/1048/7915983>

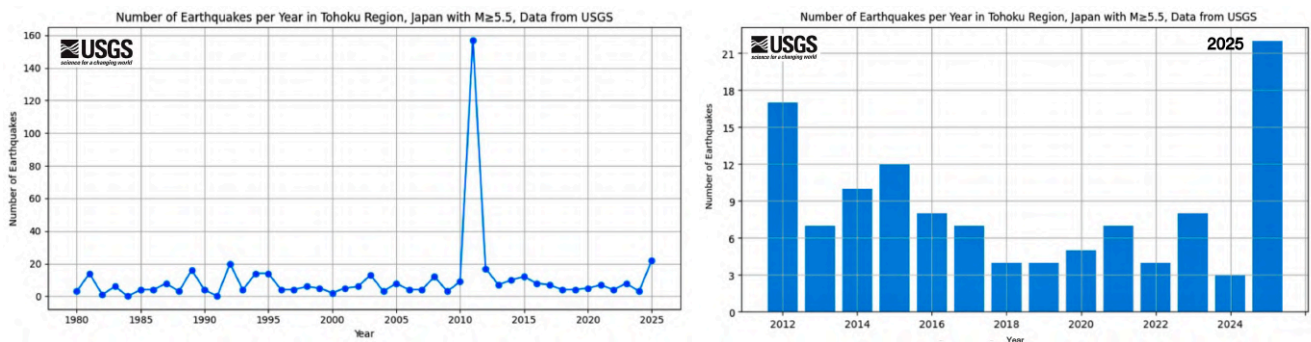
⁵⁰ <https://www.volcanodiscovery.com/earthquakes/japan/ishikawa/stats.html>



Obr. 32: Lokalizácia zemetrasení s M4+ v Japonsku v prefektúre Ishikawa za rok 2024. Zdroj: <https://www.volcanodiscovery.com/earthquakes/japan/ishikawa/stats.html>

Polostrov Noto sa nachádza mimo hlavných zlomových rozhraní Japonska, v oblasti vnútorných deformácií medzi Okhotskou doskou a Amurským blokom (súčasť širšej eurázijskej platne). Práve preto sa tu takéto veľké zemetrasenia vyskytujú len zriedkavo. Väčšina najsilnejších japonských otrasov vzniká na okrajoch platní – najmä na zlomových zónach Pacifickej a Filipínskej platne. Zemetrasenie M 7,5 – 7,6 z 1. januára 2024 je preto výnimočné intraplatňové zemetrasenie, ktoré nastalo v oblasti, kde sa dlhodobo neočakávali otrasy tejto magnitúdy, a to napriek prebiehajúcej rojovej aktivite. Je najsilnejším zemetrasením, aké zasiahlo prefektúru Išikawa od roku 1885.⁵¹

Okrem toho dňa 8. decembra 2025 sa udialo zemetrasenie s magnitúdou M 7,6 pri pobreží Tóhoku v prefektúre Aomori. Obe tieto udalosti patria k najsilnejším zemetraseniam zaznamenaným na území Japonska od roku 2011 (Tóhoku M 9,0 – 9,1)⁵² a nastali v relatívne krátkom časovom odstupe, pričom každá z nich zasiahla odlišnú časť krajiny. Skutočnosť, že dve najsilnejšie seizmické udalosti za viac než desaťročie po megazemetrasení v Tóhoku vznikli v rozdielnych tektonických prostrediach Japonska, poukazuje na pretrvávajúcu a priestorovo rozšírenú seizmickú aktivitu v rámci japonského súostrovia.

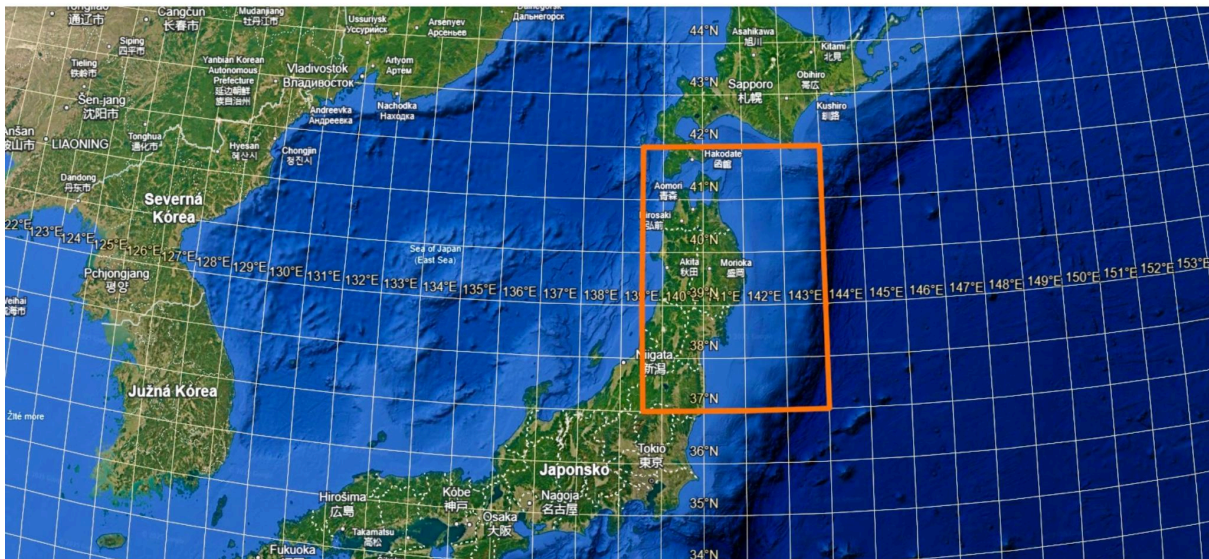


Obr. 33: Počet zemetrasení s M ≥ 5,5 v Japonsku v oblasti Tóhoku od roku 1980 (naľavo) a od roku 2012 (napravo), zdroj dát: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>

⁵¹ <https://science.nasa.gov/earth/earth-observatory/earthquake-lifts-the-noto-peninsula-152350/>

⁵² <https://www.nippon.com/ja/features/h20002/>

The graph was created using data from the USGS catalog in Python. Tohoku Region is represented as a bounding box defined by the following geographic coordinates: 139.5°E–144.0°E longitude and 37.0°N–42.0°N latitude.



Obr. 34: Analyzovaná zóna v Japonsku, oblasť Tóhoku, zdroj: Google Earth, vlastná úprava

Grafy na obrázkoch 33 zobrazujú dlhodobý vývoj seizmickej aktivity v oblasti Tóhoku pre zemetrasenia s magnitúdou $M \geq 5,5$ a jasne poukazujú na výnimočný charakter aktuálneho roka. Absolútne maximum v časovej rade predstavuje rok 2011, ktorý bol priamym dôsledkom megazemetrasenia v Tóhoku ($M 9,0$) a jeho rozsiahlej dotrasovej sekvencie. Po tomto období seizmicita výrazne poklesla a v nasledujúcich rokoch sa pohybovala na relatívne stabilnej, nízkej úrovni, s len miernymi výkyvmi. Prahová hodnota magnitúdy $M \geq 5,5$ bola zvolená preto, že zemetrasenia tejto veľkosti predstavujú hornú časť kategórie stredne silných zemetrasení. Tento prah zároveň poskytuje dostatočný počet udalostí pre štatistickú analýzu, pričom vylučuje veľké množstvo menších dotrasov typických pre veľké megathrust zemetrasenia, akým bolo napríklad zemetrasenie Tóhoku v roku 2011. Obrázok 34 znázorňuje ohraničenie analyzovanej zóny na mape.

Aktuálny rok však vykazuje najvyšší počet silných otrasov ($M \geq 5,5$) od skončenia hlavnej dotrasovej fázy po roku 2011. Ako ukazuje detailný stĺpcový graf posledných rokov (obr. 33 napravo), ide o výrazný nárast v porovnaní s predchádzajúcim desaťročím, ktorý nemá obdobu od roku 2011 a ani pred ním. Táto zvýšená seizmicita naznačuje opätovnú aktiváciu napätových procesov v zlomovej zóne medzi Pacifickou a Ochotskou platňou, ako aj na pridružených zlomových systémoch v severovýchodnom Japonsku. Hoci nejde o megazemetrasenie porovnateľné s rokom 2011, rozsah a frekvencia silných udalostí robia z aktuálneho roka seizmicky najvýraznejšie obdobie v regióne za viac než dekádu.

Island

Island, ostrov vytvorený vulkanickým procesom na stredoatlantickom chrbte, je synonymom pre vulkanickú aktivitu. Napriek tomu prekvapila vulkanologickú komunitu aktivita v oblasti, ktorá bola po stáročia považovaná za neaktívnu.

Od konca roku 2023 začal Reykjanesský polostrov na juhozápade Islandu zažívať vulkanické prebudenie. Po približne 800 rokoch relatívneho pokoja sa zóna stala miestom opakovaných

erupčných udalostí.⁵³ V rokoch 2023 - 2024 došlo k sérii erupcií, ktoré postihli obec Grindavík a ohrozili geotermálnu elektrárňu Svartsengi aj slávnú Modrú lagúnu.

Rok 2025 priniesol pokračovanie a dokonca zintenzívnenie tejto aktivity. Vulkanológovia zaznamenali, že magmatický systém pod polostrovom je napájaný z hlbokých zdrojov, čo naznačuje, že aktivita by mohla pokračovať desaťročia alebo dokonca stáročia.⁵⁴



Obr. 35: Sundhnúkur eruptions 2023-2024, Reykjanes Peninsula, Iceland, zdroj: https://en.wikipedia.org/wiki/2023%E2%80%932025_Sundhn%C3%BAkur_eruptions

Erupcia 16. júla 2025 na Sundhnúksíggar (Reykjanes) otvorila trhlinu dlhou približne 700 - 1 000 metrov, láva sa rozlievala (obr. 35), evakuovali sa rezidenti a turistické oblasti ako Blue Lagoon.⁵⁵ Zdvih terénu 2 - 3 cm v lokalite Svartsengi počas júla/augusta 2025 je znakom kontinuálnej akumulácie magmy.⁵⁶

Island leží na stredoatlantickom chrbte – mieste, kde sa od seba vzdiaľujú Severoamerická a Eurázijská platňa rýchlosťou približne 2 centimetre ročne. Súčasne však ostrov leží nad islandským magmatickým chocholom, ktorý dodáva dodatočné množstvo magmy. Táto kombinácia robí z Islandu jedno z najaktívnejších vulkanických území na svete.

Reaktivácia Reykjanesského polostrova po takmer tisícročnom spánku je významným signálom. Ukazuje, že aj zdanlivo neaktívne vulkanické systémy môžu nečakane ožiť, často s minimálnym predchádzajúcim varovaním. Pre Island, krajinu s populáciou len 380 000 ľudí, predstavuje táto situácia značné výzvy – nielen pre bezpečnosť, ale aj pre ekonomiku závislú na turizme a geotermálnej energii.

⁵³

<https://guidetoiceland.is/best-of-iceland/volcanic-eruptions-on-the-reykjanes-peninsula-in-iceland-a-complete-time-line-2021-2024>

⁵⁴ <https://en.vedur.is/about-imo/news/a-magma-intrusion-has-started-on-sundhnuksgigarod-crater-row>

<https://phys.org/news/2024-06-iceland-volcano-eruptions-decades.html>

<https://www.smithsonianmag.com/smart-news/hidden-underground-magma-pools-fueled-icelands-volcanic-eruptions-study-suggests-180984818/>

⁵⁵ <https://www.washingtonpost.com/world/2025/07/16/iceland-volcano-eruption-blue-lagoon/>

⁵⁶ <https://volcano.si.edu/showreport.cfm?doi=GVP.WVAR20250730-371020>

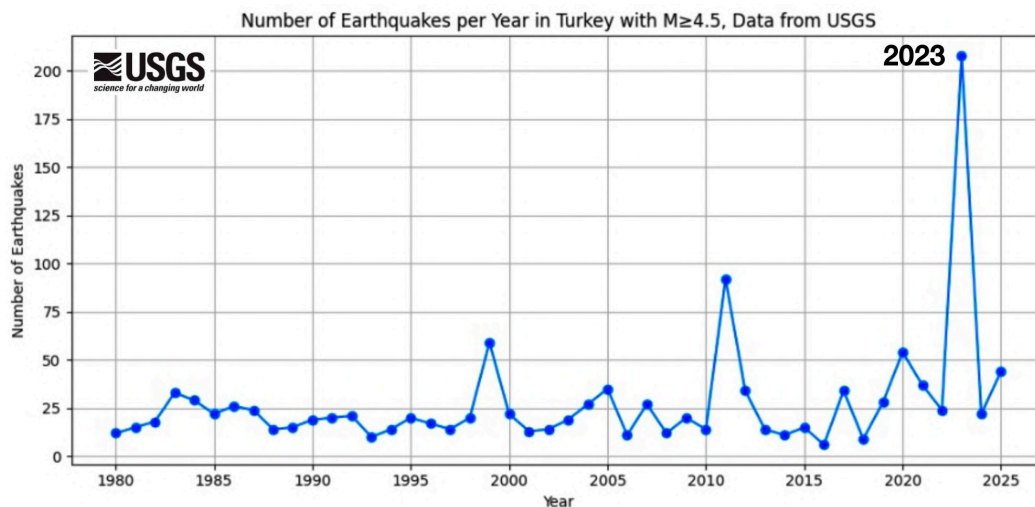
Turecko

Vo februári 2023 došlo ku dvojici veľmi silných zemetrasení M 7,8 a M 7,5 (USGS), ktoré zasiahli rozsiahly systém zlomov vo Východnej Anatólii. Otrasy boli najsilnejšie, aké Turecko zažilo od roku 1939.⁵⁷

Rozdiel medzi zemetrasením v roku 1939 a týmto je však ten, že zemetrasenie nebolo "doublet" - zdvojené. Takéto prípady veľmi silných zemetrasení v priebehu hodín sú veľmi zriedkavé, prípad Turecka 2023 patrí k najvzácnejším a najextrémnejším doubletom, ktoré poznáme.

Navyše, udalosť z 6. februára 2023 v Turecku možno považovať za výnimočnú viacnásobnú sekvenciu veľkých zemetrasení, ktorá predstavuje mimoriadne zriedkavý „kaskádový“ scenár v globálnej seizmológii. V priebehu približne 9 hodín po sebe nasledovali dva hlavné otrasy s momentovými magnitúdami M 7,8 (ohnisková hĺbka 8,6 km) a M 7,5 (ohnisková hĺbka 7 km), pričom medzi nimi došlo ešte k mimoriadne silnému dotrasu s magnitúdou M 6,6.⁵⁸ Tento dotras, ktorého epicentrum sa nachádzalo v okrese Nurdağı v provincii Gaziantep, svojou veľkosťou presahuje bežnú definíciu dotrasu a ešte viac podčiarkuje výnimočnosť celej sekvencie, keďže takáto koncentrácia veľmi silných zemetrasení v tak krátkom časovom intervale je na globálnej úrovni mimoriadne zriedkavá.

Ďalšou mimoriadnosťou je, že ruptúra tohto zemetrasenia sa šírila po viacerých segmentoch a miestami dosiahla supershear rýchlosť. Supershear zemetrasenia sú extrémne zriedkavé a patria medzi najničivejšie typy ruptúr. Energia sa potom uvoľňuje oveľa prudšie a spôsobuje výrazne silnejšie otrasové účinky než bežné zemetrasenia.⁵⁹



Obr. 36: Počet zemetrasení s $M \geq 4,5$ v Turecku od roku 1980, zdroj dát: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>

⁵⁷

<https://www.rcce-collective.net/wp-content/documents-repo/Earthquake/Resources/Situation/EarthquakeGZT-FlasUpdate-FIN.pdf>

⁵⁸ <https://link.springer.com/article/10.1007/s10518-024-01865-5>

⁵⁹ <https://arxiv.org/abs/2302.07214>

The graph was created using data from the USGS catalog in Python. The region of Turkey is represented as a bounding box defined by the following geographic coordinates: 26.5°E–44.0°E longitude and 36.0°N–42.0°N latitude.



Obr. 37: Analyzovaná zóna v oblasti Turecka, zdroj obrázka: Google Earth, vlastná úprava

Graf na obrázku 36 poukazuje na výnimočnosť seizmickej sekvencie vo východnom a juhovýchodnom Turecku v roku 2023 v porovnaní s historickými silnými zemetraseniami v krajine. Následná dotrasová aktivita bola mimoriadne rozsiahla – v priebehu týždňov a mesiacov bolo zaznamenaných vyše 200 zemetrasení s magnitúdou M 4,5+, vrátane desiatok otrasov s magnitúdou M 5 – M 6, zatiaľ čo bežne ročne sa v Turecku vyskytuje menej ako 25 takých zemetrasení. Obrázok 37 znázorňuje ohraničenie analyzovanej zóny na mape.

V porovnaní s inými významnými tureckými zemetraseniami, ako bolo zemetrasenie v İzmit v auguste 1999 (M 7,6) nasledované zemetrasením v Düzce v novembri 1999 (M 7,2) či Van v októbri 2011 (M 7,2)⁶⁰, predstavuje rok 2023 výraznú odchýlku. Hoci tieto udalosti dosahovali väčšie magnitúdy ako M 7 a mali ničivé následky, ich dotrasové sekvencie mali klasickejší priebeh s podstatne nižším počtom otrasov M 4,5+ a rýchlejším útlmom aktivity. Seizmická sekvencia z roku 2023 tak naznačuje komplexnú, viacsegmentovú ruptúru a kaskádový prenos napätia pozdĺž Východoanatolského zlomu, čo z nej robí jednu z najneobvyklejších a najenergetickejších dotrasových sekvencií zaznamenaných v Turecku v modernej seizmologickej histórii.

Filipíny

Mindanao – v decembri 2023 zasiahlo juh Filipín zemetrasenie približne M 7,6 v zlomovej zóne pri ostrove Mindanao. Toto zemetrasenie bolo najsilnejšie vo Filipínach za posledných 33 rokov, avšak nezvyčajné bolo, že toto zemetrasenie malo mnoho silných dotrasov (graf v pravom dolnom rohu obrázka).⁶¹

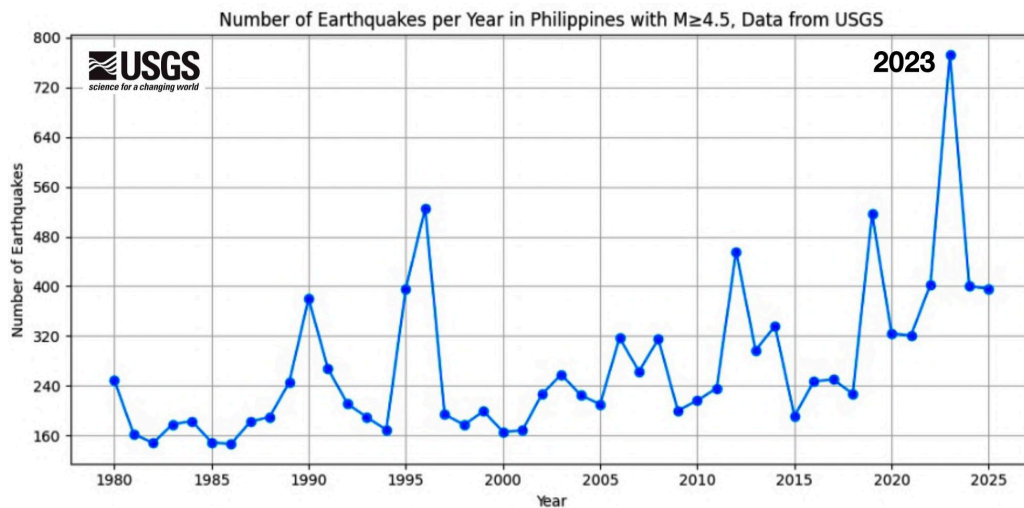
Štyri dotrasy s magnitúdami M 6,3 – 6,9 nastali už niekoľko hodín po hlavnom otrase, pričom aspoň dva z nich vykazovali výraznú odchýlku od očakávania podľa Bathovho zákona, keď rozdiel magnitúd medzi hlavným otrasom a najsilnejšími dotrasmi bol podstatne menší než typická hodnota ~1,2.⁶²

⁶⁰ <https://www.aa.com.tr/en/turkiye/last-123-years-largest-earthquakes-in-turkiye/2836533>

⁶¹

<https://temblor.net/temblor/major-earthquake-strikes-the-philippines-followed-by-unusually-large-aftershocks-15758/>

⁶² <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/browse/significant.php?year=2023>



Obr. 38: Počet zemetrasení s $M \geq 4,5$ v oblasti Filipín od roku 1980, zdroj dát: USGS <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>

Graph was created using data from the USGS catalog in Python. The region of Philippines is represented as a bounding box defined by the following geographic coordinates: 116.0°E–127.5°E longitude and 4.5°N–21.0°N latitude.



Obr. 39: Analyzovaná zóna v oblasti Filipín, zdroj obrázka: Google Earth, vlastná úprava

Na základe údajov USGS a grafu počtu zemetrasení s $M \geq 4,5$ od 80. rokov na obrázku 38 je zaujímavé porovnať dve najväčšie seizmické udalosti na Filipínach za posledných 45 rokov: zemetrasenie $M 7,7^{63}$ v roku 1990 (Luzon) a zemetrasenie $M 7,6$ v roku 2023 (Mindanao). V roku 1990 došlo k jednému z najsilnejších a najničivejších zemetrasení v histórii krajiny, avšak celkový počet zaznamenaných zemetrasení v tomto roku bol podľa grafu len mierne zvýšený v porovnaní s okolitými rokmi (rádovo niekoľko stoviek udalostí $M \geq 4,5$).

Naopak, rok 2023, v ktorom nastalo zemetrasenie $M 7,6$, vykazuje podľa databázy USGS výrazne vyšší celkový počet zemetrasení – graf ukazuje najvyšší ročný súčet od 80. rokov, čo poukazuje na intenzívnu a dlhšie trvajúcu dotrasovú aktivitu. Inými slovami, hoci zemetrasenie v roku 1990 bolo silnejšie než to v roku 2023, sprevádzalo ho podstatne menej dotrasov so strednou magnitúdou, ktoré už v tom čase boli technicky dobre detekovateľné. Tento kontrast je nezvyčajný a môže naznačovať rozdiely v mechanizme porušenia zlomov, v rozložení napätia v zemskej kôre alebo v spôsobe uvoľňovania seizmickej energie medzi oboma udalosťami.

⁶³ <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp0004bxs/executive>

Podobný, hoci výrazne slabší efekt, je viditeľný aj v polovici 90. rokov, keď graf zaznamenáva výrazný skok v rokoch 1995 – 1996. Tento nárast súvisí so sériou silných filipínskych zemetrasení okolo magnitúdy M 7. V porovnaní s tým však rok 2023 výrazne vyčnieva – nielen absolútnym počtom otrasov, ale aj rozsahom a trvaním seizmickej odozvy, čo naznačuje mimoriadne efektívny prenos napätia v rámci komplexného tektonického systému Filipín.

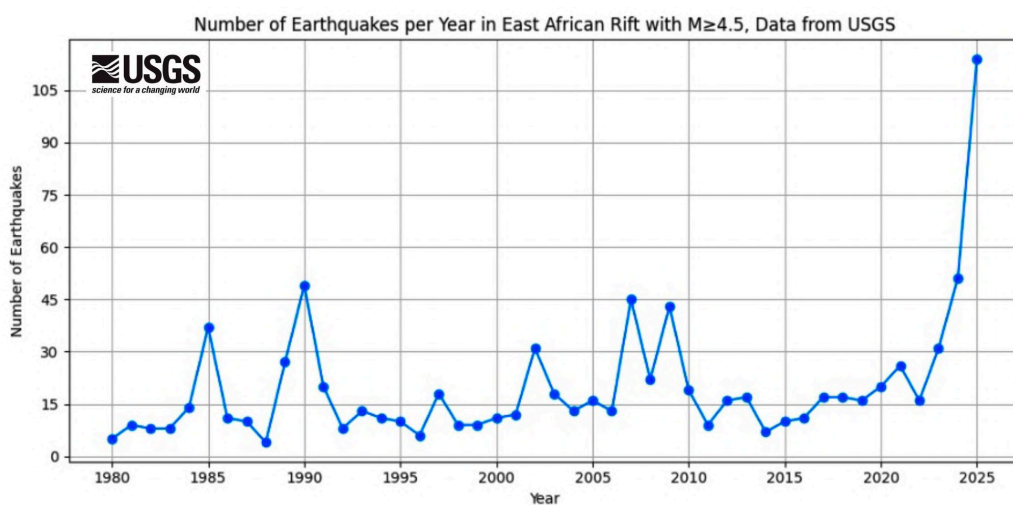
Z grafu databázy USGS je zrejmé, že od začiatku 90. rokov, a ešte výraznejšie od približne roku 2000, pozorujeme postupný nárast ročného počtu zaznamenaných zemetrasení s magnitúdou $M \geq 4,5$ na Filipínach. Kým v 80. rokoch sa ročné hodnoty pohybovali prevažne okolo 150 – 200 udalostí, po roku 2000 sú bežné hodnoty 250 – 350 a v poslednej dekáde sa objavujú aj výrazné maximá, najmä okolo rokov 2012, 2019 a 2023. Tento trend poukazuje na zvýšenú seizmickú aktivitu v regióne. Obrázok 39 znázorňuje ohraničenie analyzovanej zóny na mape.

4. Aktivácia ďalších zlomov

Východoafrický rift: Desaťnásobný nárast aktivity

Východoafrický rift je miestom, kde sa africký kontinent doslova rozdeľuje na dve časti. Tento obrovský tektonický systém sa tiahne od Libanonu cez Červené more, Etiópiu, Keňu, Tanzániu až po Mozambik – vzdialenosť približne 6000 kilometrov.

V oblasti Východoafrického riftu bol v roku 2025 zaznamenaný bezprecedentný nárast seizmickej aktivity. Zatiaľ čo bežný ročný počet zemetrasení s magnitúdou $M \geq 4,5$ v oblasti Východoafrického riftu býva menej než 15, v roku 2025 ich bolo vyše 100 (obr. 40 - 41).



Obr. 40: Počet zemetrasení s $M \geq 4,5$ v oblasti Východoafrického riftu od roku 1980, zdroj dát: USGS <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>

The graph was created using data from the USGS catalog in Python. The East African Rift is represented as a bounding box defined by the following geographic coordinates: 28.0°E–42.0°E longitude and 15.0°S–12.0°N latitude.



Obr. 41: Analyzovaná zóna oblasti Východoafrického riftu, zdroj obrázka: Google Earth, vlastná úprava

Väčšina týchto otrasov zasiahla Etiópiu začiatkom roka, no oblasť stále nespí. Podľa správ bolo tento rok postihnutých približne 100 000 ľudí, 70 000 ľudí bolo evakuovaných.⁶⁴

⁶⁴ <https://reliefweb.int/report/ethiopia/ethiopia-earthquake-2025-dref-operation-mdret037>

Prekvapujúce bolo pozorovanie z roku 2005, keď sa v etiópskej oblasti Afar za niekoľko dní otvorila trhlina dlhá 60 km a široká 2 m. Išlo o bezprecedentnú udalosť – dovtedy sa nikdy nezaznamenalo, že by sa tak rozsiahla geologická zmena udiala v tak krátkom čase a bolo to považované za nemožné.⁶⁵

V septembri 2005 začala v tejto oblasti séria zemetrasení, ktorá vyvrcholila erupciou vulkánu Dabbahu. Počas niekoľkých dní magma vytvorila obrovskú intrúziu (podpovrchovú injekciu magmy) do zemskej kôry, čo spôsobilo vytvorenie 60-kilometrovej trhliny. Tento proces, ktorý by za normálnych okolností mal trvať stáročia až tisícročia, sa odohral v priebehu dní.

Prebúdajúce sa sopky

Odvtedy sa v regióne prebudilo viacero sopiek, ktoré boli považované za vyhasnuté:

Nabro v Eritrei - erupcia v roku 2011 po viac než 10 000 rokoch spánku, bez predchádzajúcich známk, ktoré by ju varovne signalizovali – bola prekvapením pre geológov. Erupcia začala 12. júna 2011 a bola prvou zaznamenanou erupciou tohto vulkánu v historických časoch. Popol z erupcie dosiahol výšku až 13 kilometrov a postihol širokú oblasť vrátane Eritrey, Etiópie a Sudánu.⁶⁶

Dabbahu v Etiópii - jediná známa erupcia sa odohrala v roku 2005 po silnom seizmickom roji. Práve táto erupcia bola spojená s vytvorením 60 - kilometrovej trhliny.⁶⁷

Dofan a Fentale v Etiópii - začali prejavovať známky aktivácie až tento rok (2025) po sérii zemetrasení. Tieto vulkány, ktoré boli považované za neaktívne alebo spiace, vykazujú zvýšenú seizmickú aktivitu, deformácie terénu a emisie plynov.⁶⁸

Vulkán Hayli Gubbi v Etiópii - prebudil sa 23.11.2025 po 12 000 rokoch (v celom holocéne nie je zaznamenaná žiadna jeho erupcia). Neočakávane vybuchol a vyprodukoval mohutný stĺp popola s výškou 10 km nad zemou. Odborníci pokladali tento výbuch za veľmi nezvyčajný jav.⁶⁹

V Etiópii, kde je rift najaktívnejší, zaznamenali geológovia intenzívne seizmické roje a zvýšenú vulkanickú aktivitu. Sopka Erta Ale, domov jedného z mála permanentných lávových jazier na svete, vykazuje zvýšenú aktivitu. V januári 2025 došlo k významnému nárastu lávových prúdov, ktoré sa prvýkrát za približne 20 rokov rozšírili mimo kalderu a dosiahli historické táboriská v oblasti - čo je jasný signál zvýšenej erupčnej aktivity.⁷⁰ Počas júla 2025 bol zaznamenaný krátky, ale intenzívny výbuch a husté emisie popola, čo signalizuje ďalšiu fázu aktivity mimo jej bežného tichšieho stavu.⁷¹

⁶⁵ <https://www.nature.com/articles/nature04978>

⁶⁶ <https://earthobservatory.nasa.gov/images/event/50989>

⁶⁷ <https://www.volcanodiscovery.com/dabbahu.html>

⁶⁸ <https://www.volcanodiscovery.com/dofen.html>

<https://www.volcanodiscovery.com/fantale.html>

<https://link.springer.com/article/10.1007/s00445-025-01884-3>

⁶⁹

<https://www.ndtv.com/world-news/why-volcano-hayli-gubbi-erupted-after-12-000-years-what-experts-said-969490>

<https://www.cbsnews.com/news/volcano-erupts-first-time-12000-years-hayli-gubbi-ethiopia/>

⁷⁰

<https://watchers.news/2025/01/17/lava-surge-at-erta-ale-volcano-reaches-historic-camp-for-first-time-in-20-years-ethiopia/>

⁷¹ <https://watchers.news/2025/07/15/erta-ale-volcano-eruption-dense-ash-emission-ethiopia-july-2025/>

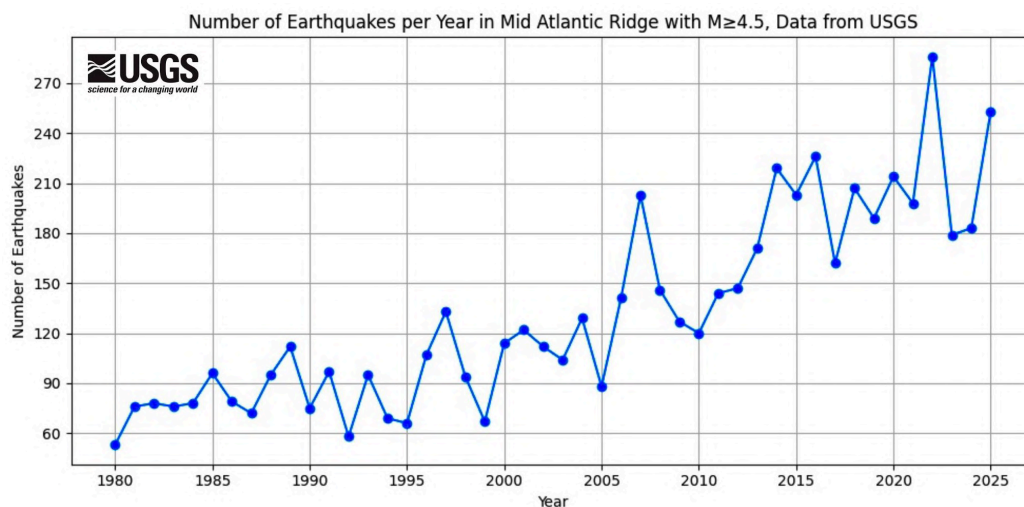
Tento rok bola zaregistrovaná aj tepelná anomália na sopečnom komplexe Ol Doinyo Lengai v severnej Tanzánii, jedinom aktívnom vulkáne produkujúcom natrokarbonatitovú lávu (lávu bohatú na sodík a draslík namiesto kremičitanu), ktorá je chladnejšia a menej viskózna ako typická bazaltová láva. V roku 2025 satelitné snímky Sentinel zachytili termálnu anomáliu nad kráterom, ktorá naznačuje zvýšenú tepelnú aktivitu alebo potenciálny prelomený horúci materiál blízko povrchu - niečo, čo sa v tejto oblasti nevyskytuje bežne v takej intenzite.⁷²

Všetko nasvedčuje tomu, že pod Afrikou sa v poslednej dobe výrazne zaktivoval mocný magmatický chochol tlačiaci nahor nové množstvo magmy a prebúdžajúci dlho spiacu sopku.

Stredoatlantický chrbát

Graf na obrázku 42 znázorňuje vývoj počtu zemetrasení s magnitúdou $M \geq 4,5$ v oblasti Stredoatlantického chrbta v rokoch 1980 – 2025. Stredoatlantický chrbát je mimoriadne rozsiahly systém stredoocéánskych chrbtov, tiahnuci sa naprieč Atlantikom, kde sa od seba vzdáľujú litosférické platne a dochádza k tvorbe novej oceánskej kôry. Niekedy sa o ňom hovorí ako o najdlhšom vulkanickom systéme na Zemi dlhom viac ako 16 000 km⁷³.

Práve v takýchto oblastiach je zemská kôra najtenšia a bezprostredne napojená na procesy prebiehajúce v zemskom plášti. V dôsledku toho môže táto časť Zeme citlivejšie reagovať na zmeny v prísune magmy, tepelného toku alebo dynamike plášťových prúdov.



Obr. 42: Počet zemetrasení s $M \geq 4,5$ na Stredoatlantickom chrbáte, zdroj dát: USGS

<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>

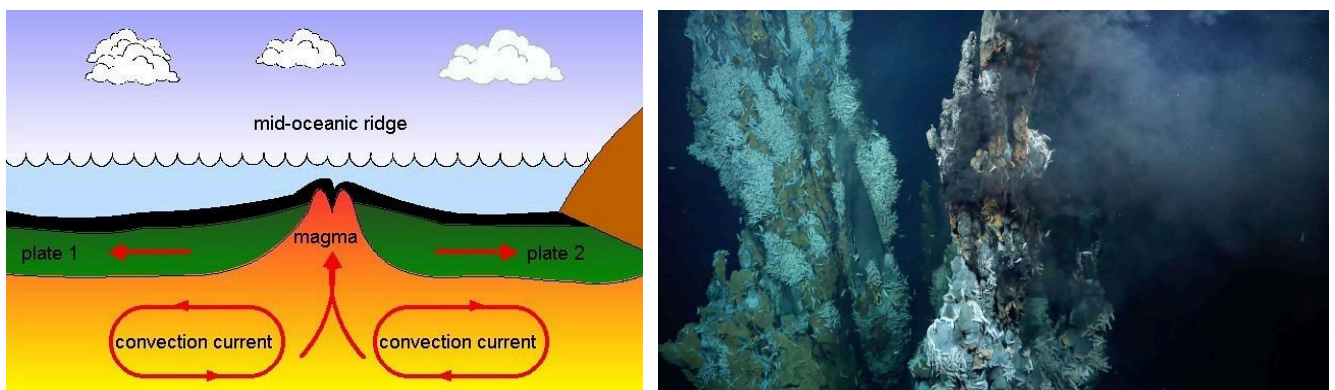
⁷² <https://www.volcanoes.de/2025/06/14/ol-doinyo-lengai-thermal-anomaly-suggests-lava-overflow/>

⁷³ <https://whc.unesco.org/en/tentativelists/6231/>

The graphs were created with data from the ISC and Geofon Catalog using Python. The Mid-Atlantic Ridge is represented as a bounding box with the following geographic coordinates: 45.0°W–10.0°W longitude and 50.0°S–50.0°N latitude.



Obr. 43: Analyzovaná zóna oblasti Stredoatlantického chrbáta, zdroj: Google Earth, vlastná úprava (naľavo), https://www.researchgate.net/figure/Map-of-the-mid-Atlantic-ridge-Heezen-B-Tharp-M-1968_fig3_341592959 (napravo)



Obr. 44: **Naľavo:** schéma stredoocéánskeho chrbáta v oblasti, kde magma stúpa, chladne a vytvára novú kôru, zdroj: <https://www.flickr.com/photos/114042825@N07/11877403915>,

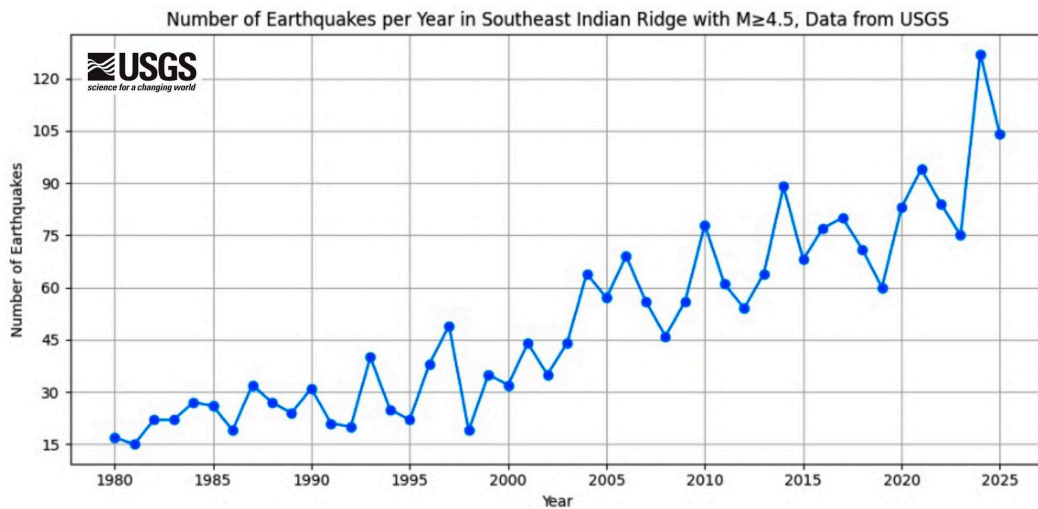
Napravo: vysokoteplotné hydrotermálne prieduchové pole objavené na podmorskej hore Puy des Folles na Stredoatlantickom chrbte v hĺbke približne 2 000 metrov, zdroj: <https://oceanexplorer.noaa.gov/expedition/23lost-cities/>

Z grafu na obrázku 42 je zreteľný dlhodobý rast počtu zaznamenaných zemetrasení, najmä po roku 2000. Výrazné medziročné výkyvy naznačujú reálne epizódy zvýšenej aktivity. Najvýraznejší nárast okolo roku 2007 a opätovne v rokoch 2014, 2016, 2022 a 2025 časovo zodpovedá obdobiam, keď boli na rôznych úsekoch Stredoatlantického chrbáta zdokumentované silnejšie zemetrasenia (M 6 - M 7) a následné série dotrasov. V takýchto prípadoch sa ročný počet udalostí zvyšuje nie kvôli jednej izolovanej udalosti, ale v dôsledku sekvencií otrasov rozložených v čase a priestore. Obrázok 43 znázorňuje ohraničenie analyzovanej zóny na mape.

Juhovýchodný indický hrebeň

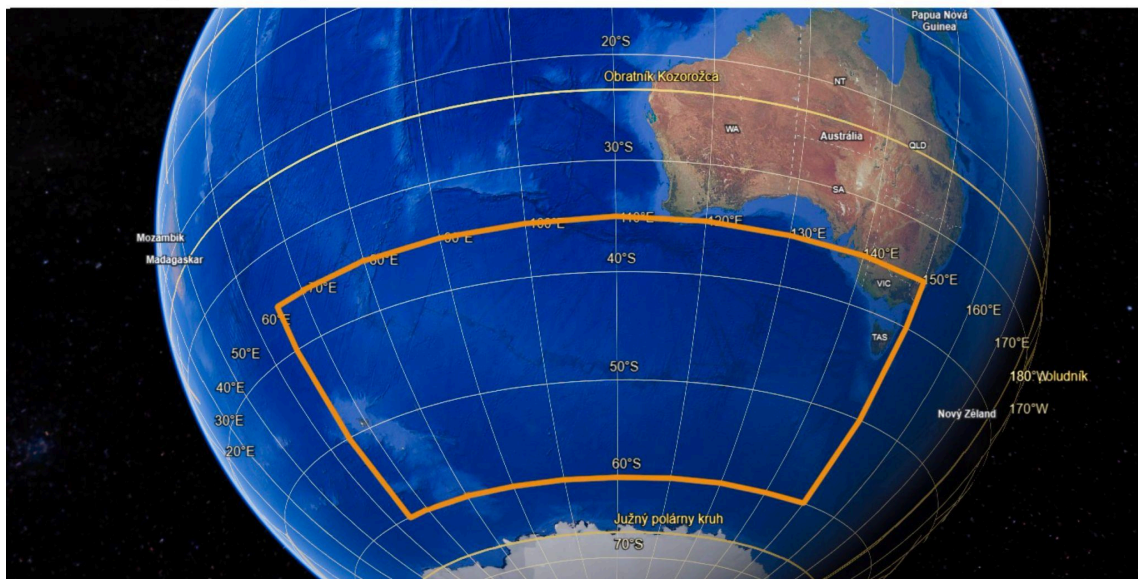
Graf na obr. 45 zobrazuje vývoj počtu zemetrasení s magnitúdou $M \geq 4,5$ na juhovýchodnom úseku Indického oceánskeho chrbáta za obdobie od roku 1980 do roku 2025 na základe údajov United States Geological Survey. Už na prvý pohľad je zrejмый dlhodobý rastúci trend – zatiaľ čo na začiatku sledovaného obdobia sa počet zemetrasení pohyboval približne na úrovni 15 – 25 udalostí ročne, v posledných rokoch dosahuje hodnoty okolo 90 – 120 udalostí ročne. Tento nárast nie je lineárny, ale prebieha v niekoľkých krokoch, pričom výraznejšie zvýšenia možno pozorovať najmä po roku 2000 s maximom v roku 2024 a druhým najväčším maximom v roku 2025. Charakteristické sú aj krátkodobé

poklesy (napr. koncom 90. rokov alebo okolo roku 2008), po ktorých nasleduje návrat na vyššiu úroveň aktivity, čo naznačuje pulzujúci charakter deformácie oceánskej kôry.



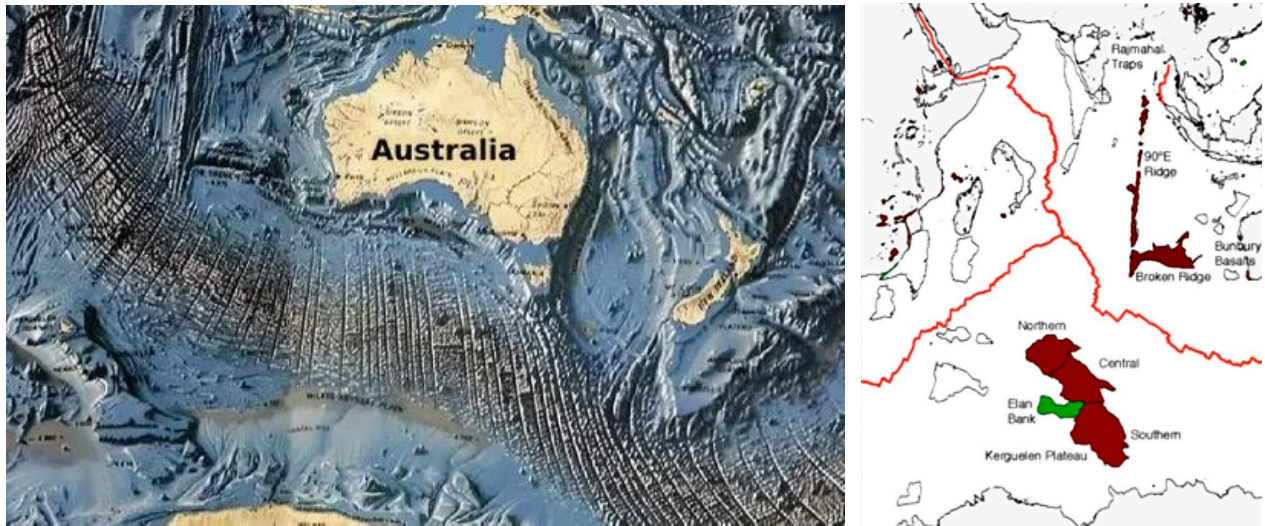
Obr. 45: Počet zemetrasení s $M \geq 4,5$ na Juhovýchodnom indickom hrebeni, zdroj dát: USGS <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>

The graph was created using data from the USGS catalog in Python. The region of Southeast Indian Ridge is represented as a bounding box defined by the following geographic coordinates: 65.0°E-150.0°E longitude and 60.0°S-35.0°S latitude.



Obr. 46: Analyzovaná zóna oblasti Juhovýchodného indického hrebeňa, zdroje: Google Earth, vlastná úprava

Juhovýchodný Indický chrbát, podobne ako Stredoatlantický chrbát, predstavuje divergentné rozhranie litosférických platní, kde vzniká nová oceánska kôra. Aj tu ide o dynamické prostredie, v ktorom je zemská kôra tenká, rozlamaná a priamo prepojená s procesmi v hornom zemskom plášti, preto tu seizmická aktivita citlivo reaguje na zmeny napätia či magmatické impulzy.



Obr. 47: Analyzovaná zóna oblasti Juhovýchodného indického hrebeňa, zdroj:

<https://www.geologyin.com/2025/02/oceanic-crust.html>

Ide o významnú časť globálneho systému oceánskych chrbtov, ktorý obopína celú Zem. Chrbát je dlhý takmer 6000 km a spája dve významné tektonické uzly – Rodriguesov trojitý uzol v Indickom oceáne a Macquarieho trojitý uzol v Tichom oceáne. Okrem toho je Juhovýchodný Indický chrbát ovplyvnený “horúcim bodom” Kerguelen, ktorý sa nachádza západne od chrbta a spôsobuje lokálne zvýšenú vulkanickú aktivitu a ovplyvňuje tvar aj vývoj oceánskeho dna (obr. 47).⁷⁴

Drakov prieliv: Prebudenie antarktckej zóny

Drakov prieliv (Drake Passage) medzi Južnou Amerikou a Antarktídou je známy ako jedno z najnebezpečnejších morí na svete kvôli silným prúdom a vlnám. Geologicky je však táto oblasť miestom, kde sa stretávajú dve oceánske platne – Antarktická a Južnoamerická (konkrétne Scotia platňa).

V roku 2025 bola oblasť Drakovho prielivu mimoriadne seizmicky aktívna. Odohralo sa tu až 5 zemetrasení s magnitúdou 6 a vyššou, aj keď priemerne sa tu vyskytuje jedno takéto zemetrasenie ročne (obr. 48). Navyše, posledné zemetrasenie s magnitúdou nad M 7 tu bolo zaznamenané pred viac ako 100 rokmi, no v roku 2025 sa tu vyskytli tri takéto udalosti (obr. 50): zemetrasenie M 7,4 dňa 2. mája 2025, M 7,5 dňa 22. augusta 2025⁷⁵ a zemetrasenie M 7,6 dňa 10. októbra 2025⁷⁶.

Pri skúmaní katalógu USGS za rok 1998 bolo zistené, že oblasť antarktckého Pacifiku mala prah úplnosti magnitúdy 5,3, preto bola pre porovnanie seizmickej aktivity v tejto oblasti zvolená magnitúda $M \geq 6$.⁷⁷

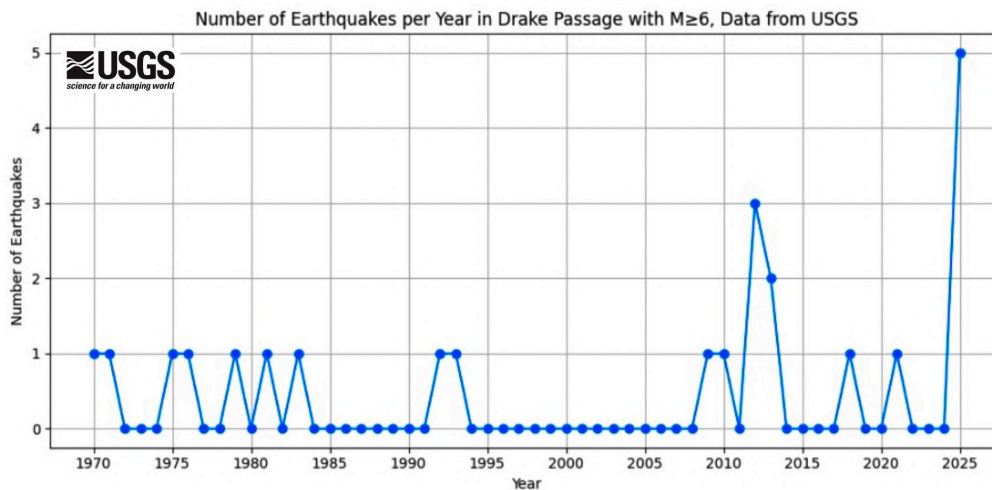
⁷⁴ https://en.wikipedia.org/wiki/Southeast_Indian_Ridge

⁷⁵ <https://www.volcanodiscovery.com/earthquakes/22087250/2025-08-22/02h16/magnitude7-Drake-Passage.html>

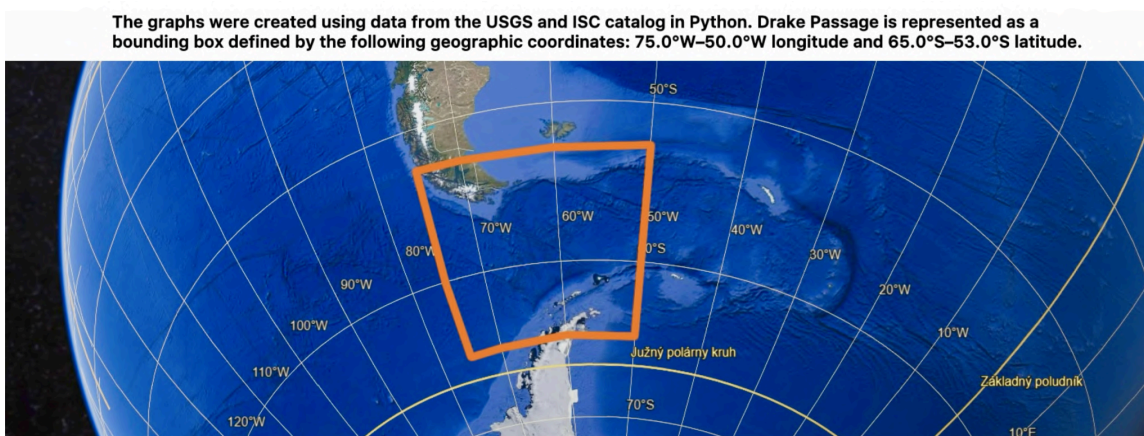
⁷⁶

<https://www.volcanodiscovery.com/earthquakes/22261987/2025-10-10/20h29/magnitude7-Antarctica-Drake-Passage.html>

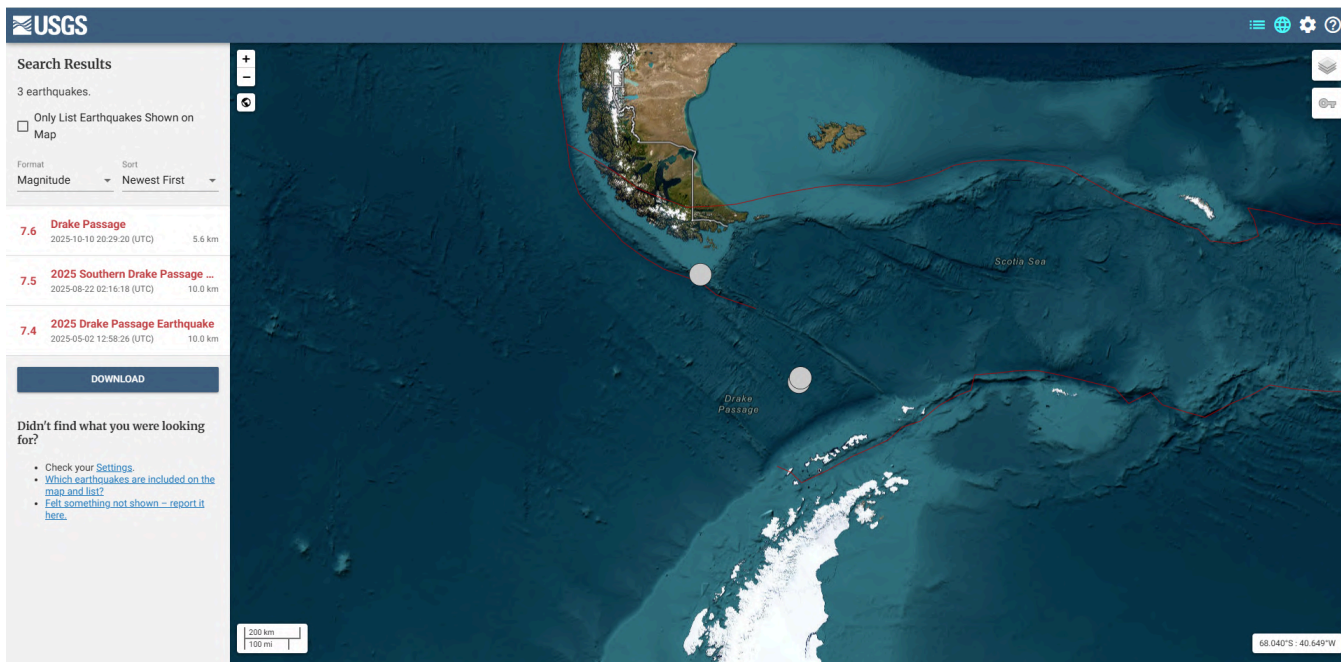
⁷⁷ <https://ds.iris.edu/news/IRISnewsletter/volume2000no1/page-02-04.htm>



Obr. 48: Počet zemetrasení s $M \geq 6$ v oblasti Drakovho prielivu od roku 1970, zdroj dát: USGS <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>



Obr. 49: Analyzovaná zóna oblasti Drakovho prielivu, zdroj: Google Earth, vlastná úprava



Obr. 50: Zemetrasenia s s magnítudou nad $M 7$ v roku 2025 v oblasti Drakovho prielivu, zdroj: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/map/?extent=-68.12248,-97.64648&extent=-47.98992,-27.33398&range=search&baseLayer=satellite&timeZone=utc&search=%7B%22name%22:%22Search%20Results%22,%22params%22:%7B%22starttime%22:%222025-01-01%2000:00:00%22,%22endtime%22:%222026-01-01%2023:59:59%22,%22maxlatitude%22:-53,%22minlatitude%22:-65,%22maxlongitude%22:-50,%22minlongitude%22:-75,%22minmagnitude%22:7,%22orderBy%22:%22time%22%7D%7D>

Seizmická aktivita v tejto oblasti výrazne prekračuje dlhodobý priemer a oblasť sa nachádza vo fáze mimoriadneho seizmického oživenia.

Antarktída: 140 sopiek pod ľadom

Drakov prieliv sa nachádza pri západnej Antarktíde – oblasti, kde sa pod ľadom ukrýva 140 sopiek, čo z nej robí jeden z najväčších vulkanických systémov na Zemi. Keďže ide o najjužší prieliv okolo Antarktídy, jeho tvar a poloha výrazne ovplyvňujú cirkuláciu vody okolo kontinentu, globálnu oceánsku cirkuláciu aj klímu.

Historický seizmický roj v Bransfieldovom prielive (2020 - 2021)

V blízkom Bransfieldovom prielive sa v rokoch 2020 – 2021 odohral jeden z najväčších seizmických rojov v histórii.⁷⁸

- Viac ako 85 000 zemetrasení za šesť mesiacov
- Epicentrum pri podmorskej sopke Orca Seamount, považovanej dovtedy za neaktívnu
- Pohyb zemskej kôry na ostrove Kráľa Juraja až o 11 cm

Podľa vedcov išlo o dôsledok vzrastu magmatickej aktivity a presunu magmy do vyšších vrstiev kôry – pravdepodobne až po čiastočné uvoľnenie magmy.

Kanada: Prebudenie Tintina zlomu po 12 000 rokoch ticha

Zatiaľ čo pozornosť geologickej komunity sa sústreďuje na známe seizmické zóny ako Cascadia, San Andreas alebo japonské zlomové zóny, v roku 2025 sa do povedomia dostala oveľa menej známa, no potenciálne rovnako nebezpečná štruktúra – Tintina zlom v severnej Kanade a na Aljaške.

Tintina zlom je masívna posuvná zlomová línia, ktorá sa tiahne cez severozápadnú Kanadu (územie Yukon) a pokračuje na Aljašku, s celkovou dĺžkou približne 1000 kilometrov. Hoci geológovia o tomto zlome vedeli už desaťročia, až nedávno sa ukázala jeho skutočná seizmická kapacita.

V prelomovej štúdií publikovanej v časopise Geophysical Research Letters v januári 2025 vedci z University of British Columbia, Arizona State University a ďalších inštitúcií zrekonštruovali seizmickú históriu Tintina zlomu pomocou paleoseizmologických metód – analýzy sedimentov, deformácií terénu a geologických záznamov minulých zemetrasení.⁷⁹

Kľúčové zistenie štúdie je znepokojujúce: Tintina zlom bol tichý viac než 12 000 rokov. Posledné veľké zemetrasenie na tomto zlome sa odohralo na konci poslednej ľadovej doby, približne 12 400 rokov pred súčasnosťou.

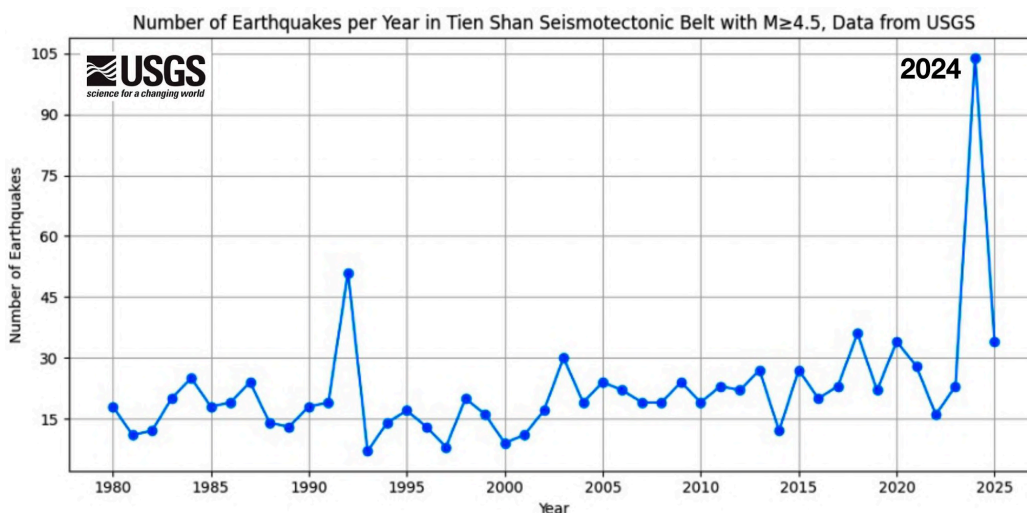
⁷⁸ <https://www.nature.com/articles/s43247-022-00418-5>

⁷⁹ <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2025GL116050>

Pre kontext: Väčšina veľkých zlomov má "návrátové obdobie" (recurrence interval) medzi veľkými zemetraseniami v rozsahu stoviek až tisícok rokov. Cascadia Subduction Zone má interval približne 300 - 500 rokov. San Andreas zlom v južnej Kalifornii má interval približne 150 - 200 rokov na niektorých segmentoch. 12 000 rokov je extrémne dlhá doba – dostatočne dlhá na to, aby sa nahromadilo obrovské množstvo tektonického napätia. Zemetrasenie na zlome by mohlo prekročiť M 7,5 a spôsobiť rozsiahle škody na infraštruktúre⁸⁰.

Seizmotektonický pás Tien Shan

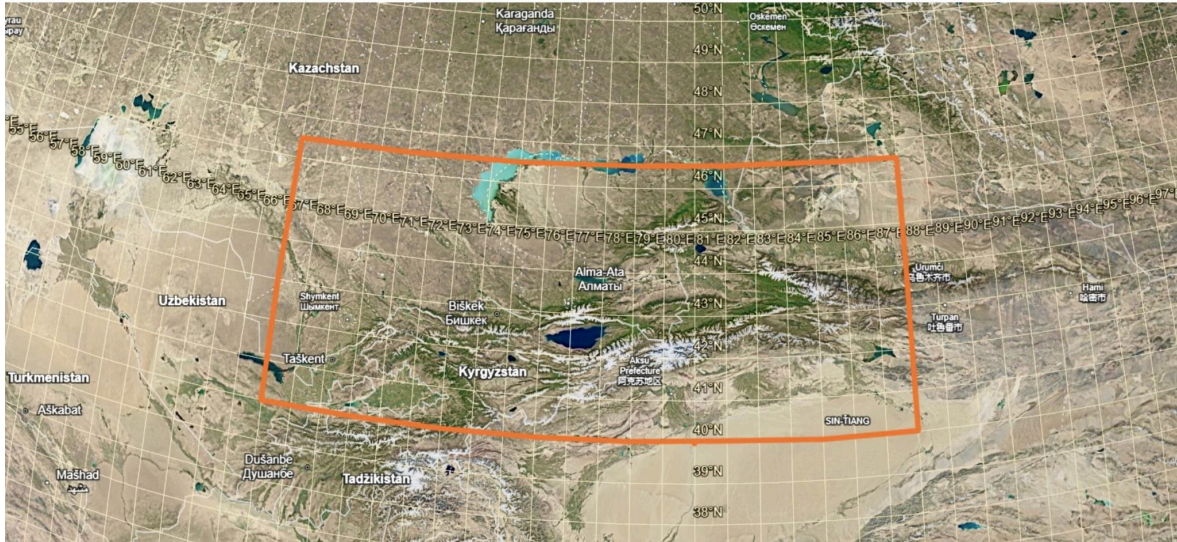
Pás Tien Shan je súčasťou širšej kolíznej zóny strednej Ázie. Tento horský systém predstavuje spoločný tektonický prvok juhovýchodného Kazachstanu, Kirgizska a západnej Číny. Tien Shan je výrazne seizmicky aktívny v dôsledku deformácie zemskej kôry, ktorá vzniká ako následok zrážky indickej a eurázijskej litosférickej platne. Hoci sa hlavná kolízna hranica nachádza južnejšie, deformačné napätia sa prenášajú stovky kilometrov smerom na sever a spôsobujú aktívne pohyby a časté zemetrasenia aj vo vnútrozemí Eurázie.



Obr. 51: Počet zemetrasení s $M \geq 4,5$ v oblasti seizmotektonického pásu Tien Shan od roku 1980, zdroj dát: USGS <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>

⁸⁰ <https://scitechdaily.com/scientists-warn-tintina-fault-could-unleash-major-earthquake/>

The graph was created using data from the USGS catalog in Python. The region of Tien Shan seismotectonic belt is represented as a bounding box defined by the following geographic coordinates: 67.0°E–88.0°E longitude and 40.0°N–46.5°N latitude.



Obr. 52: Analyzovaná zóna oblasti seizmotektonického pásu Tien Shan, zdroj: Google Earth, vlastná úprava

Graf na obr. 51 analyzovanej oblasti (obr. 52) znázorňuje vývoj počtu zemetrasení s magnitúdou $M \geq 4,5$ v seizmotektonickom pásu Tien Shan v období od začiatku 80. rokov 20. storočia po rok 2025, na základe údajov katalógu USGS. Analyzovaná oblasť zahŕňa juhovýchodný Kazachstan, Kirgizsko a západný Sin-ťiang v Číne a predstavuje aktívne deformovaný vnútrokontinentálny orogén (horské pásmo alebo oblasť, ktorá vznikla a je formovaná tektonickými procesmi) v rámci kolíznej zóny medzi Indickou a Eurázijskou platňou.

Z grafu je zreteľný dlhodobý mierny nárast počtu zaznamenaných zemetrasení, najmä od prelomu tisícročí. Popri tomto trende sú viditeľné aj výrazné krátkodobé výkyvy, ktoré korešpondujú s výskytom silných hlavných otrasov a ich následných dotrasových sekvencií.

Jedným z najvýraznejších seizmických rokov v analyzovanom období je rok 1992, keď sa 19. augusta odohralo silné zemetrasenie v oblasti Suusamyr Basin v severnom Tien Shan v Kirgizsku. Toto zemetrasenie dosiahlo magnitúdu približne $M 7,3$ (podľa niektorých zdrojov až $M 7,5$), malo hypocentrum v hĺbke približne 17 – 27 km. Patrí medzi najsilnejšie zemetrasenia zaznamenané v regióne Tien Shan v modernej dobe a jeho účinky boli citelné v Kirgizsku, Kazachstane, Uzbekistane aj v západnej Číne. V grafe sa rok 1992 prejavuje výrazným nárastom počtu zemetrasení, čo je typický dôsledok rozsiahlej dotrasovej aktivity po silnom hlavnom otrase.

Napriek tomu mimoriadne pozoruhodný je však rok 2024, ktorý v analyzovanom časovom rade vykazuje najvyšší počet zemetrasení s magnitúdou $M \geq 4,5$ od začiatku 80. rokov. V tomto roku sa v rámci rovnakého tektonického segmentu odohralo veľmi silné zemetrasenie s magnitúdou približne $M 7,0$. Hoci jeho magnitúda bola nižšia než pri zemetrasení v Suusamyre v roku 1992, vyznačovalo sa mimoriadne bohatou dotrasovou sekvenciou, s vysokým počtom otrasov v intervale magnitúd $M 4,5$ a vyšších. Práve táto neobvykle intenzívna dotrasová aktivita je hlavným dôvodom extrémne vysokého počtu zaznamenaných zemetrasení v roku 2024, čo robí tento rok seizmicky najaktívnejším v celom sledovanom období.

5. Ohnivý kruh: Globálna aktivácia

Tichomorský ohnivý kruh (Ring of Fire) je pásmo vulkánov a tektonických zlomov, ktoré obkružuje Tichý oceán v podkovitom tvare (obr. 53). Táto oblasť je domovom približne 75 % všetkých aktívnych a spiacich vulkánov na Zemi (približne 450 vulkánov) a miestom, kde dochádza k približne 90 % všetkých zemetrasení.



Obr. 53: Ohnivý kruh, zdroj: <https://www.britannica.com/place/Ring-of-Fire>

Ohnivý kruh sa tiahne od západného pobrežia Južnej a Severnej Ameriky cez Aljašku, Kamčatku, Japonsko, Filipíny, Indonéziu až po Antarktídu – celková dĺžka približne 40 000 kilometrov.

Za posledné roky vykazujú rôzne segmenty Ohnivého kruhu zvýšenú seizmickú aktivitu, ako dokazuje táto správa.

Južná Amerika

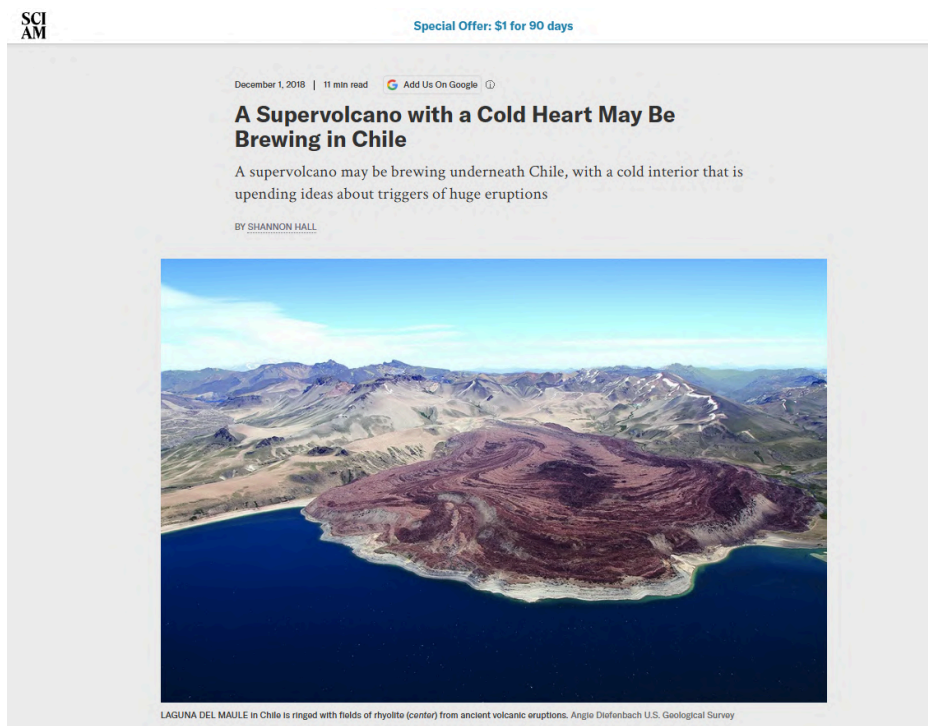
Komplex Laguna del Maule v centrálnej Čile sa v roku 2025 stal predmetom zvýšenej pozornosti geológov kvôli intenzívnej seizmickej aktivite. Od začiatku roka sa pravidelne zaznamenávajú vulkanicko-tektonické zemetrasenia, vrátane napríklad 160 otrasov za dve hodiny počas jednej z epizód v apríli 2025, čo signalizuje pohyb vnútorných štruktúr a prienik magmy spôsobujúcich napätie v kôre.⁸¹

V júli a auguste 2025 sa aktivita ešte zvýšila. Oficiálny chilský Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) spolu so Servicio Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres

⁸¹ <https://www.paisllobo.cl/2025/04/reportan-160-sismos-en-dos-horas-en-el.html>

(SENAPRED) vyhlásili pre Laguna del Maule alert technický stupeň „žltá“, teda zvýšené sledovanie, na základe tisícok registrovaných zemetrasení a trvalých deformácií povrchu.⁸²

Podľa týždennej správy Smithsonian / USGS bolo v júli viac ako 11 000 vulkano-tektonických zemetrasení a súčasne sa zaznamenal rýchly rast deformácií povrchu, čo dokazuje, že systém nie je stabilný a magma pravdepodobne pokračuje v pohybe a intrúzii pod vulkánom.⁸³



Obr. 54: “V Čile sa možno schyľuje k erupcii supervulkánu”, zdroj:

<https://www.scientificamerican.com/article/a-supervolcano-with-a-cold-heart-may-be-brewing-in-chile/>

Dlhodobé merania ukazujú, že oblasť bola a zostáva jednou z najrýchlejšie nafukujúcich sa vulkanických zón na svete, čo je výsledok skladania magmy pod povrchom a histórie veľkých výbuchov v holocéne. Pôvodná mediálna a vedecká diskusia o tom, že by Laguna del Maule mohol byť „supervulkán“ odkazuje na obrovské množstvo akumulovanej magmy pod kalderou, ktorá by pri prudkej explózii teoreticky mohla produkovať extrémne veľké erupcie (obr. 54).⁸⁴

Severná Amerika: Cascadia

V severozápadnej časti Spojených štátov a v Kanade leží Kaskádové pohorie, vulkanický oblúk, v ktorom sa nachádza okolo 120 vulkánov. Toto pásmo zahŕňa známe vulkány ako Mount St. Helens, Mount Rainier, Mount Hood a Mount Shasta.

⁸²

<https://web.senapred.cl/2025/08/06/sernageomin-decreta-alerta-tecnica-amarilla-para-el-complejo-volcanico-laguna-del-maule/>

⁸³ <https://volcano.si.edu/volcano.cfm?vn=357061>

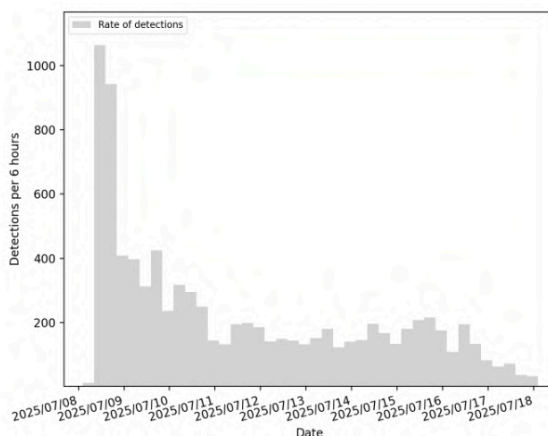
⁸⁴ <https://www.scientificamerican.com/article/a-supervolcano-with-a-cold-heart-may-be-brewing-in-chile/>
<https://www.independent.co.uk/news/world/americas/chile-andes-earthquake-laguna-del-maule-volcano-b2732340.html>

Mount Rainier: Najväčší seizmický roj v histórii

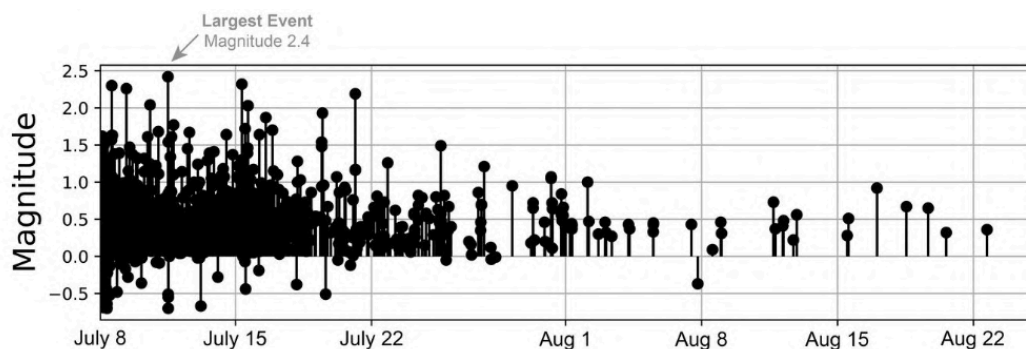
Mount Rainier je aktívny stratovulkán pokrytý ľadom, nachádzajúci sa 97 km juhovýchodne od Seattlu v štáte Washington. Jeho posledná známa erupcia sa odohrala asi pred 1000 rokmi, no podľa Národného systému včasného varovania pred sopkami USGS je považovaný za sopku s veľmi vysokým rizikom na základe mnohých faktorov, vrátane vzdialenosti od ľudí, majetku a infraštruktúry.⁸⁵

V júli 2025 zažil Mount Rainier bezprecedentnú udalosť – najväčší seizmický roj, aký bol kedy zaznamenaný na tomto vulkáne od začiatku moderného monitoringu v 80. rokoch 20. storočia. Posledný veľký roj na Mount Rainier v roku 2009 mal maximálnu magnitúdu M 2,5 a trval tri dni. Tento roj prekonáva roj z roku 2009, čo sa týka celkového počtu udalostí, frekvencie udalostí a uvoľnenia energie.⁸⁶

Od 8. júla do 31. júla 2025 tu bolo celkovo detekovaných 10 834 zemetrasení. Aktívne fázy dosahovali až 20 - 25 zemetrasení za hodinu, postupne klesajúc na niekoľko udalostí za hodinu do konca júla. Najsilnejšie zemetrasenie v roji sa odohralo 11. júla s magnitúdou M 2,4. Hĺbka hypocentra zemetrasení bola 1,5 - 6,5 km pod povrchom.⁸⁷ Obrázok 52 znázorňuje množstvo detekovaných zemetrasení od 8. do 18. júla 2025 a na obrázku 53 sú znázornené jednotlivé magnitúdy udalostí (obr. 55 - 56).



Obr. 55: Graf miery detekcie bezprecedentného seizmického roja na Mount Rainier medzi 8. júlom a 18. júlom 2025, zdroj: <https://pnsn.org/blog/mount-rainier-earthquake-swarm-of-july-2025>



Obr. 56: Graf magnitúd zemetrasení počas seizmického roja od 8. júla do 25. augusta 2025 na Mount Rainier, zdroj: <https://www.usgs.gov/observatories/cvo/news/monitoring-stations-detect-small-magnitude-earthquakes-mount-rainier>

⁸⁵ <https://volcanoes.usgs.gov/hans-public/volcano/wa6>

⁸⁶

<https://www.usgs.gov/observatories/cvo/news/monitoring-stations-detect-small-magnitude-earthquakes-mount-rainier>

⁸⁷ <https://pnsn.org/blog/2025/07/18/mount-rainier-earthquake-swarm-of-july-2025>

Podľa Harolda Tobina, profesora na University of Washington, riaditeľa PNSN a štátneho seizmológa Washingtonu, bol seizmický roj spôsobený horúcou vodou hlboko v sopke, ktorá spustila pohyb pozdĺž existujúcich zlomov.⁸⁸

Mount Rainier je známy priemernou frekvenciou približne 10 zemetrasení mesačne, pričom roje sa vyskytujú raz alebo dvakrát ročne. Júlový roj z roku 2025 však prekonal všetky predchádzajúce záznamy, je považovaný za najvýznamnejší v histórii pozorovaní Mount Rainier.

Mount Adams

Ešte znepokojivejšia je situácia na Mount Adams, druhej najvyššej sopke vo Washingtone. Mount Adams obvykle zaznamenáva jedno malé zemetrasenie každé 2 - 3 roky. Avšak medzi septembrom 2024 a januárom 2025 bolo zaznamenaných 12 zemetrasení – najsilnejšie dosiahlo magnitúdu M 2,0.

„Toto je vulkán, ktorý očakávame, že bude aktívny ako ďalší, a toto je ten, na ktorý sa chceme pripraviť,“ povedal Wes Thelen, geológ pre USGS.⁸⁹

Mount St. Helens

Sopka zažila minulý rok od februára do júna približne 350 zemetrasení. Jedno zo zemetrasení malo magnitúdu M 2,0. Táto seizmická aktivita predstavuje najväčší krátkodobý nárast zemetrasení od poslednej erupcie sopky v roku 2008.

Vedci považujú malé zemetrasenia pod sopkou Mount St. Helens za súčasť procesu dobíjania, pri ktorom sa pod sopkou hromadí magma v rezervoári asi 4 až 10 km pod hladinou mora.⁹⁰

Reakcia úradov

Vo februári 2025 sa štátni úradníci zhromaždili, aby diskutovali o tom, ako by reagovali, ak by Mount Adams alebo Mount St. Helens erupovali. Cieľom bolo vytvoriť nový Mount Adams/Mount St. Helens Coordination Plan, ktorý bol naposledy aktualizovaný v roku 2014.⁹¹

Megazlomová zóna Cascadia: 300 rokov nahromadeného napätia

Hoci vulkány v oblasti Cascadia vykazujú v roku 2025 zvýšenú aktivitu, ešte väčšou hrozbou je megazlomová zóna Cascadia, ktorá sa tiahne od severnej Kalifornie po Vancouver Island v dĺžke približne 1000 kilometrov.

Pravdepodobnosť megakatastrofy: Podľa USGS existuje 15% pravdepodobnosť približne M9 zemetrasenia na megazlomovej zóne Cascadia v nasledujúcich 50 rokoch podľa časovo závislého

⁸⁸ <https://www.dailyuw.com/article/earthquake-20250728>

⁸⁹ <https://www.fox13seattle.com/news/eruption-planning-mt-adams-helens>

⁹⁰ <https://www.kfyrtv.com/2024/06/23/magma-beneath-mount-st-helens-is-recharging-scientists-say/>

⁹¹ <https://mil.wa.gov/news/what-to-do-about-mount-st-helens-and-mount-adams>

Brownian passage-time modelu (zohľadňujúceho, že posledný veľký otras nastal v roku 1700). Pravdepodobnosť, že nastane zemetrasenie M 8 v nasledujúcich 50 rokoch je 30 %.⁹²

Táto zóna je schopná produkovať megathrust zemetrasenia podobné japonskému Tōhoku (2011, M9,1) alebo čilskému Valdivia (1960, M 9,5). Takéto zemetrasenie by mohlo spustiť ničivé tsunami postihujúce celé pobrežie Washingtonu, Oregonu a severnej Kalifornie, kde žijú milióny ľudí.⁹³

V októbri 2025 bola publikovaná nová štúdia z Oregon State University naznačujúca prepojenie medzi megazlomovou zónou Cascadia a San Andreas zlomom, čo by mohlo znamenať, že jedno masívne zemetrasenie by mohlo spustiť ďalšie.⁹⁴

⁹² <https://pubs.usgs.gov/fs/2025/3050/fs20253050.pdf>

⁹³

<https://scitechdaily.com/the-west-coast-is-at-risk-new-megathrust-fault-research-indicates-that-the-next-big-earthquake-could-be-imminent/>

⁹⁴ <https://www.axios.com/local/portland/2025/10/15/cascadia-san-andreas-fault-connection-earthquake>

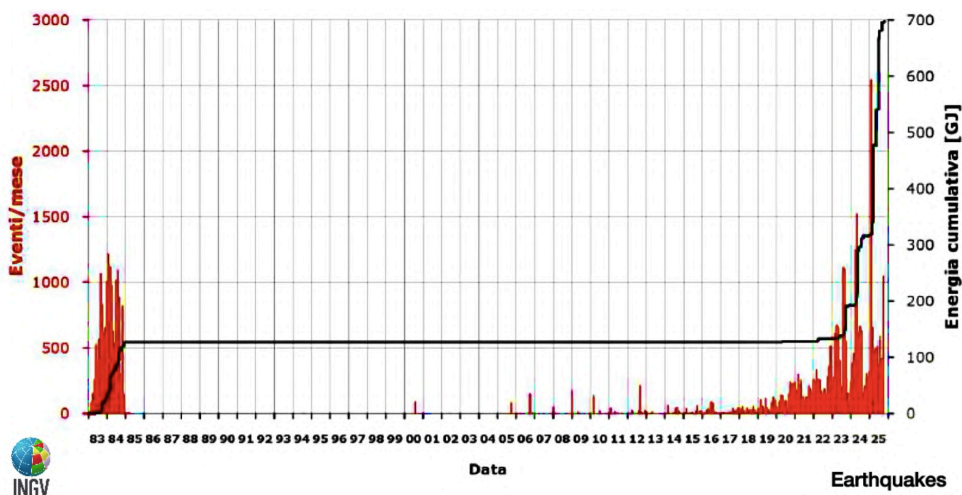
Naposledy sa menšia erupcia odohrala v roku 1538, keď vznikol kopec Monte Nuovo (Nová hora) – 123 metrov vysoký kužeľ, ktorý sa vytvoril za jediný týždeň v septembri 1538. Táto erupcia, hoci malá v porovnaní s megaerupciami, zabila približne 24 ľudí a zničila prakticky celé mesto Pozzuoli.

Campi Flegrei sa často radí medzi supervulkány – obrovské geologické systémy schopné erupcií s globálnymi dôsledkami.

Rok 2025: Rekordná seizmická aktivita

Rok 2025 bol rekordným rokom seizmickej aktivity v Campi Flegrei. INGV (Taliansky národný inštitút geofyziky a vulkanológie) tu už lokalizoval vyše 5150 zemetrasení, čo je viac než 4900 v predchádzajúcom roku.⁹⁹

A nie je to len kvantitatívny nárast (obr. 58). Nielenže sa z roka na rok zvyšuje počet zemetrasení, ale aj ich magnitúda – a teda aj celková energia, ktorá sa pri nich uvoľňuje. Situácia sa preto v žiadnom prípade neupokojuje. Naopak, stáva sa čoraz napätejšou a riziko katastrofických udalostí rastie.



Obr. 58: Bezprecedentná seizmická aktivita v počte zemetrasení v okolí Campi Flegrei, zdroj:

<https://www.ov.ingv.it/index.php/monitoraggio-e-infrastrutture/bollettini-tutti/bollett-mensili-cf/anno-2025-3/1897-bollettino-mensile-campi-flegrei-2025-10/file>

Rok 2025 priniesol aj rekordný počet silnejších zemetrasení. Až 5 otrasov s magnitúdou nad M 4,0 sa odohralo priamo v kaldere, pričom v blízkosti Neapola sa odohrali ďalšie 2 zemetrasenia s magnitúdou nad M 4,0.¹⁰⁰

Najsilnejšie zemetrasenia v histórii pozorovaní Campi Flegrei:

- **30. júna 2025:** M 4,6
- **13. marca 2025:** M 4,6
- **13. mája 2025:** M 4,4

Tieto hodnoty predstavujú najväčšie zemetrasenia, aké tu kedy boli namerané v modernej histórii inštrumentálnych záznamov.¹⁰¹

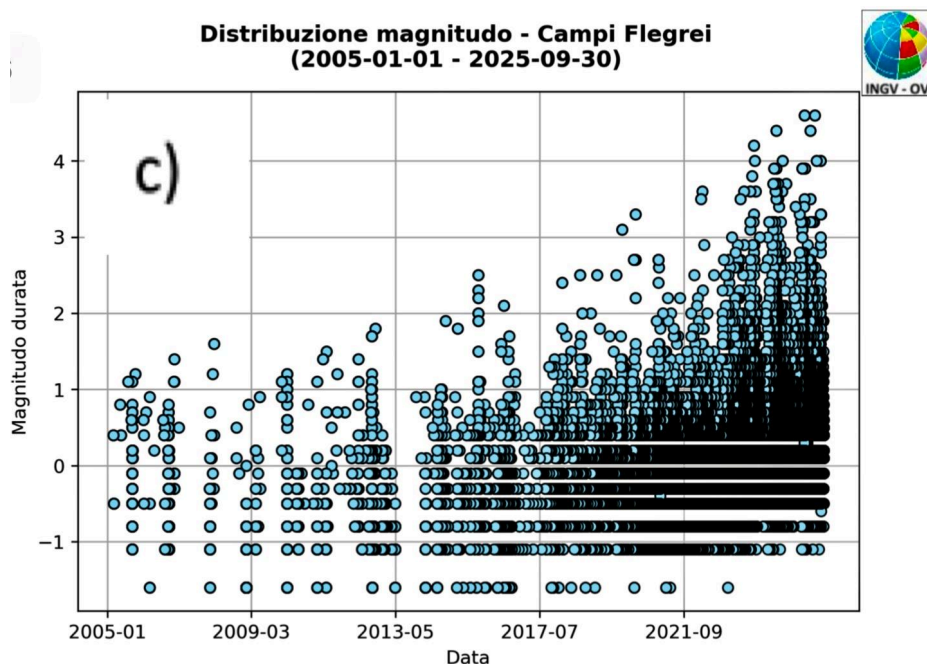
⁹⁹ <https://www.vulkane.net/blogmobil/campi-flegrei-erdbebenschwarm-am-11-oktober/>

¹⁰⁰ <https://www.terremotiflegrei.it/filtro.php?from=2025-01-01&to=2025-11-03&minmag=4>

<https://www.volcanodiscovery.com/campi-flegrei-earthquakes/archive/2025.html>

¹⁰¹ <https://www.nature.com/articles/s43247-025-02604-7>

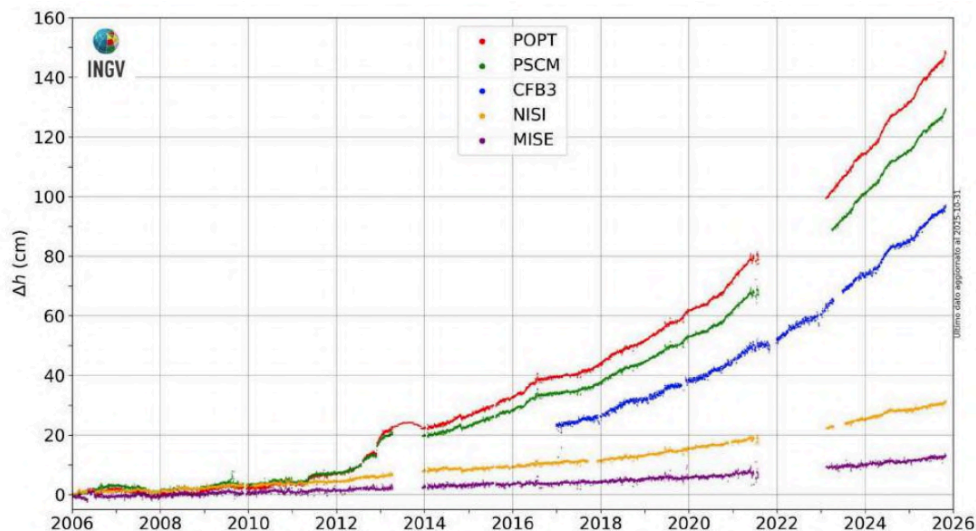
Pre porovnanie, pred rokom 2023 len zriedka dochádzalo k zemetraseniam s magnitúdou prekročujúcou M 3,0 (obr. 59).



Obr. 59: Bezprecedentná seizmická aktivita v intenzite zemetrasení v okolí Campi Flegrei, zdroj: <https://www.ov.ingv.it/index.php/monitoraggio-e-infrastrutture/bollettini-tutti/bollett-mensili-cf/anno-2025-3/1897-bollettino-mensile-campi-flegrei-2025-10/file>

Bradyseizmus: Neustále zdvíhanie kaldery

Kaldera Campi Flegrei sa od roku 2005 neustále zdvíha (obr. 60) – momentálne tempom približne 15 milimetrov za mesiac. Tento jav je spôsobený hromadením plynov a magmy pod povrchom.¹⁰²



Obr. 60: Bezprecedentné zdvíhanie kaldery Campi Flegrei, zdroj: <https://www.ov.ingv.it/index.php/monitoraggio-e-infrastrutture/bollettini-tutti/bollett-mensili-cf/anno-2025-3/1897-bollettino-mensile-campi-flegrei-2025-10/file>

¹⁰² <https://newsroom24.it/notizia/2025/10/02/campi-flegrei-lasfalto-bolle-arrivano-i-tecnici-dellingv>

V minulosti predchádzal veľkým erupciám výraznejší zdvih terénu (desiatky metrov). Podľa štúdie publikovanej v Nature Communications Earth & Environment (2023) je povrchová kôra oslabená a jej elasticita je znížená desaťročiami opakovaných cyklov inflácie a deflácie (bradyseizmus).¹⁰³

Ako píše vedci: „Magmatickej erupcii môžu tentoraz predchádzať slabšie signály, napríklad nižšie rýchlosti seizmicity alebo menšie množstvo zdvihu pôdy.“ Tento scenár pripomína kalderu Rabaul (Papua New Guinea) v roku 1994, kde erupcia prišla po podstatne slabších varovných signáloch ako tie, ktoré sa objavili o dekádu skôr. V roku 1983 - 1985 zaznamenali v Rabaul masívnu infláciu a tisíce zemetrasení, ale erupcia nenastala. Keď potom v roku 1994 skutočne prišla erupcia, varovné signály boli oveľa jemnejšie – no erupcia bola ničivá.

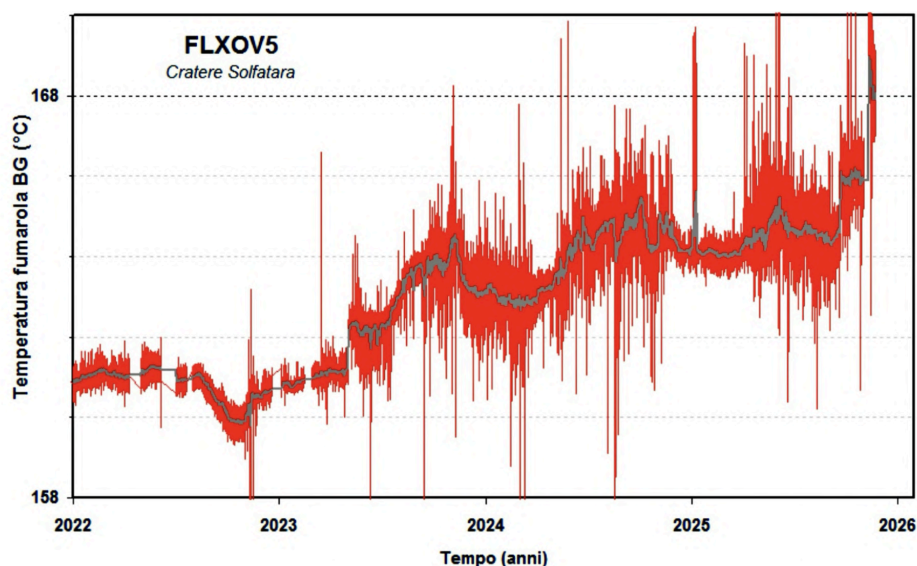
Pre Campi Flegrei to znamená, že nemôžeme spoliehať na dramatické varovné signály. Erupcia môže prísť aj pri menšom zdvihu pôdy než v minulosti.

Rekordné teploty fumarol: 165°C

V auguste 2025 upozornil riaditeľ neapolskej pobočky INGV, Mauro Di Vito, že teplota hlavnej fumaroly v oblasti Solfatara dosiahla až 165°C – najvyššiu hodnotu, aká bola kedy zaznamenaná.¹⁰⁴ V októbri dosahovala táto teplota dokonca až 168 - 170°C (obr. 61).

Solfatara je jednou z najaktívnejších oblastí Campi Flegrei – kráter s intenzívnou fumarolickou aktivitou (výstup vulkanických plynov) a horúcimi bahennými jazerami. Nárast teploty naznačuje zvýšený tok tepla z hlbších vrstiev, čo môže indikovať prítok nového magmatu do systému alebo zosilnenie hydrotermálnej cirkulácie.

Pre kontext: Teploty fumarol v Solfatara sa dlhodobo pohybovali okolo 95 - 110°C. Skok na 165°C predstavuje dramatickú zmenu.¹⁰⁵



Obr. 61: Rekordné teploty fumarol. Zdroj:

<https://www.ov.ingv.it/index.php/monitoraggio-e-infrastrutture/bollettini-tutti/bollett-mensili-cf/anno-2025-3/1897-bollettino-mensile-campi-flegrei-2025-10/file>

¹⁰³ <https://www.nature.com/articles/s43247-023-00842-1>

¹⁰⁴

https://www.ilmattino.it/napoli/area_metropolitana/terremoto_campi_flegrei_di_vito_ingv_campi_flegrei_aumentat_a_emissione_gas_solfatara_diminuite_pisciarelli-9032201.html?refresh_ce

¹⁰⁵

<https://www.ov.ingv.it/index.php/monitoraggio-e-infrastrutture/bollettini-tutti/bollett-mensili-cf/anno-2025-3/1897-bollettino-mensile-campi-flegrei-2025-10/file>

Topiaci sa asfalt a dym z ciest

V lete 2025 sa miestni obyvatelia s obavami pozerali na topiaci sa asfalt v okolí Solfatary, kde sa vozovka deformovala a na jej povrchu sa objavovali bubliny. Fotografie z oblasti ukazujú asfalt deformovaný teplom stúpajúcim zo zeme (obr. 62).¹⁰⁶

V októbri 2025 z čerstvo položeného asfaltu začal vychádzať sivastý dym, pričom sa v ňom otvorila 30-centimetrová diera. Fotografie publikované miestnymi médiami ukazujú, ako sa spod cesty valí para a plyn.¹⁰⁷ Tieto javy nie sú len kuriozitou – sú priamym dôkazom, že teplo a plyny z hlbokých vrstiev dosahujú povrch s nezvyčajnou intenzitou.



Obr. 62: Topenie asfaltu a unikajúce plyny. Zdroje:

<https://www.fanpage.it/napoli/la-strada-dei-campi-flegrei-e-deformata-bolle-sullasfalto-alla-solfatara-i-tecnici-dellingv/>,
<https://napoli.zon.it/campi-flegrei-segnalata-fuoriuscita-di-fumo-dallasfalto/>

Emisie CO₂: 5 500 ton denne

Emisie CO₂ (oxidu uhličitého) v oblasti Campi Flegrei dramaticky rastú. V novembri 2025 v oblasti Solfatara už bolo zaznamenaných až 5500 ton CO₂ denne (obr. 63).¹⁰⁸

¹⁰⁶

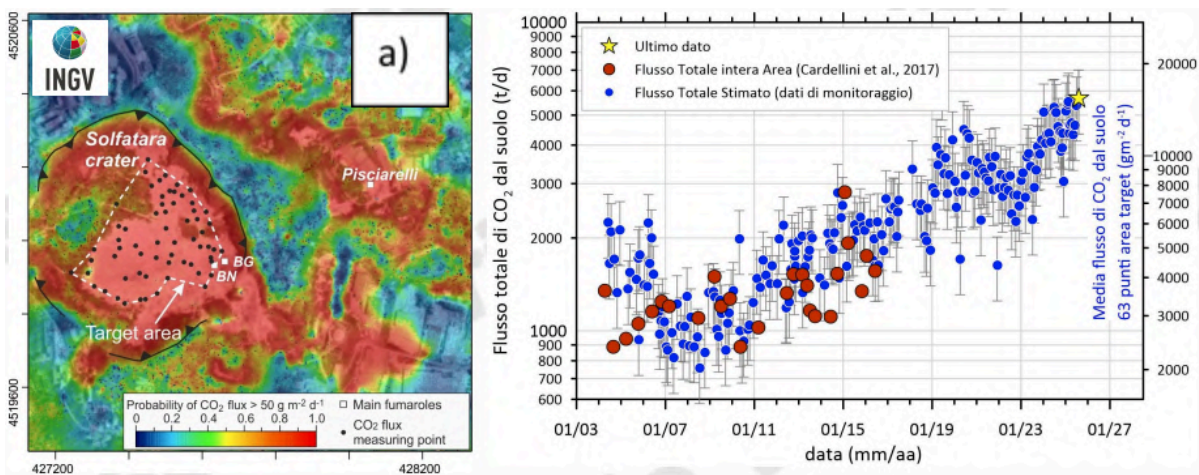
<https://www.fanpage.it/napoli/la-strada-dei-campi-flegrei-e-deformata-bolle-sullasfalto-alla-solfatara-i-tecnici-dellingv/>

¹⁰⁷ <https://www.ilfattovesuviano.it/2025/10/campi-flegrei-fuoriesce-fumo-dallasfalto/>

<https://napoli.zon.it/campi-flegrei-segnalata-fuoriuscita-di-fumo-dallasfalto/>

¹⁰⁸

https://www.ilmattino.it/napoli/area_metropolitana/pappalardo_campi_flegrei_velocita_di_sollevamento_bradisismo_aumentata_un_valore_medio_di_20_millimetri_al_mese-9164652.html



Obr. 63: Emisie CO₂ v kaldere dosahujú rekordných hodnôt 5500 t/deň. Zdroj:

<https://www.ov.ingv.it/index.php/monitoraggio-e-infrastrutture/bollettini-tutti/bollett-mensili-cf/anno-2025-3/1897-bollettino-mensile-campi-flegrei-2025-10/file>

Syntéza: Všetky indikátory smerujú k prebudeniu

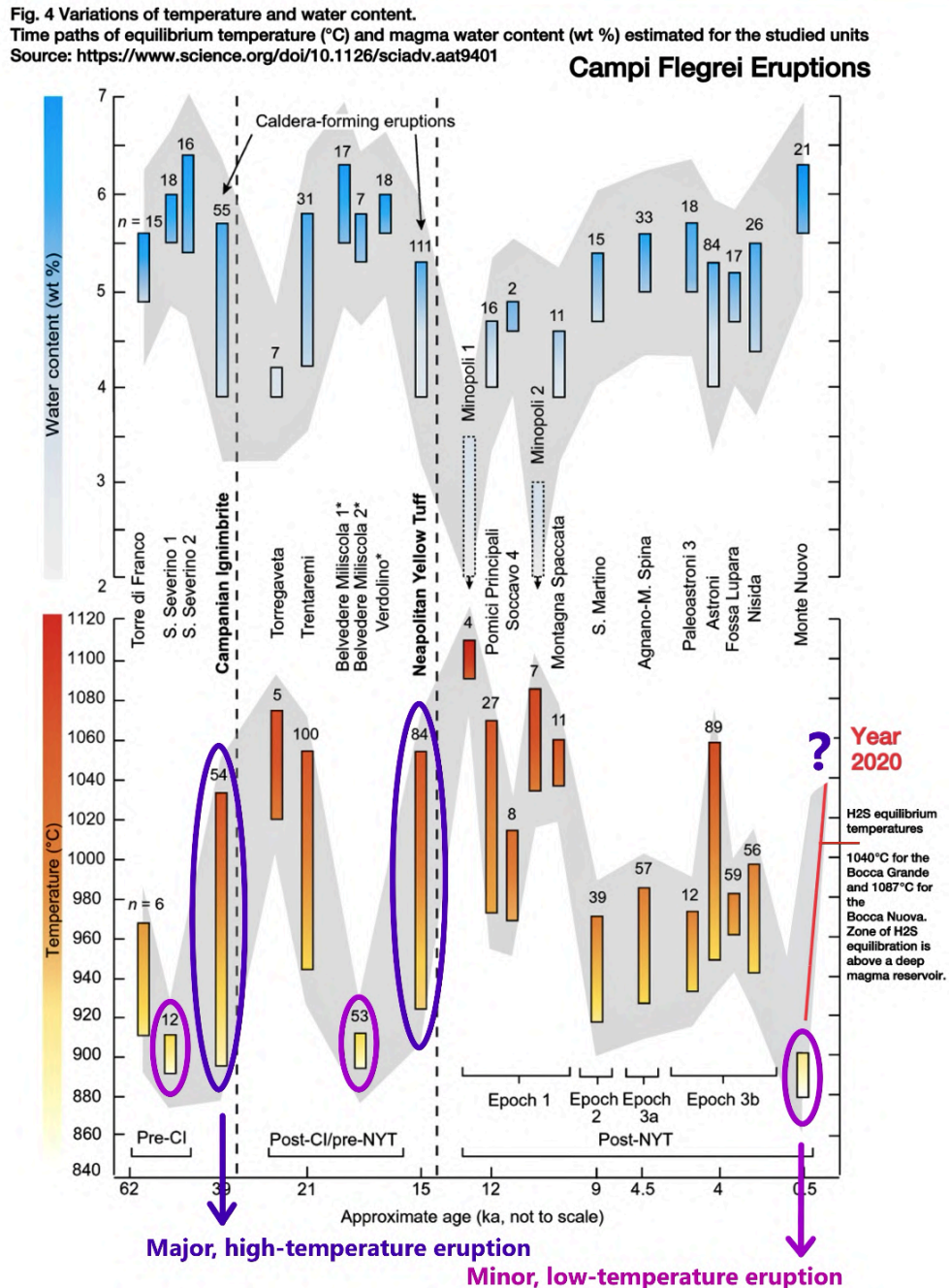
Tabuľka všetkých kľúčových parametrov v roku 2025:

Parameter	Hodnota 2025	Historické maximum	Trend
Počet zemetrasení	5150+	Rekord	↑ Rastie
Najsilnejšie zemetrasenie	M4,6	Rekord	↑ Rastie
Počet zemetrasení M4+	5 v kaldere + 2 okolie	Rekord	↑ Rastie
Rýchlosť zdvíhania	15 - 20 mm/mesiac	Blízko rekordu	↑ Rastie
Celkové zdvíhanie od 2005	>1 meter	Blízko rekordu	↑ Rastie
Teplota fumarol	165°C	Rekord	↑ Rastie
Emisie CO ₂	5500 ton/deň	Rekord	↑ Rastie
Povrchové prejavy	Topenie asfaltu, dym z ciest	Extrémne	↑ Zhoršuje sa

Všetko nasvedčuje tomu, že supervulkán Campi Flegrei sa naozaj prebúdzá.

Je Campi Flegrei pred malou alebo veľkou erupciou?

Štúdia publikovaná v časopise Science Advances analyzovala chemické a mineralogické zloženie magmy z minulých erupcií Campi Flegrei. Diagram na obr. 64 ukazuje teplotu a nasýtenie vodou magmy počas prípravy jednotlivých erupcií – hovorí o tom, aká horúca musela byť magma, aby vznikli pozorované minerály.¹⁰⁹



Obr. 64: Teplota magmy a obsah vody v minulých erupciách Campi Flegrei, zdroj:

<https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.aat9401>

¹⁰⁹ <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.aat9401>

Na diagrame je jasný vzor: Pred veľkými erupciami (Neapolitan Yellow Tuff pred 15 000 rokmi a Kampánska ignimbrítová erupcia pred 39 000 rokmi) – kde teplota magmy dosahovala približne 1050°C – vždy predchádzala menšia erupcia s nízkou teplotou magmy, veľmi podobná erupcii Monte Nuovo z roku 1538.

Dr. Forni zistil, že chemické zloženie erupcie Monte Nuovo z roku 1538 je podobné ako pri dávnejších aktivitách, keď sopka postupne formovala kaldery. Prítomnosť dvoch kalder naznačuje, že Campi Flegrei pravdepodobne dokončila aspoň jeden cyklus. Ak tento vzorec stále platí, chemické zloženie naznačuje, že „môžeme byť na začiatku nového cyklu,“ uviedol Dr. Forni.¹¹⁰

Inými slovami: Erupcia Monte Nuovo v roku 1538 nemusela byť izolovaná malá udalosť, ale prvým krokom v novom cykle, ktorý historicky viedol k megaerupciám.

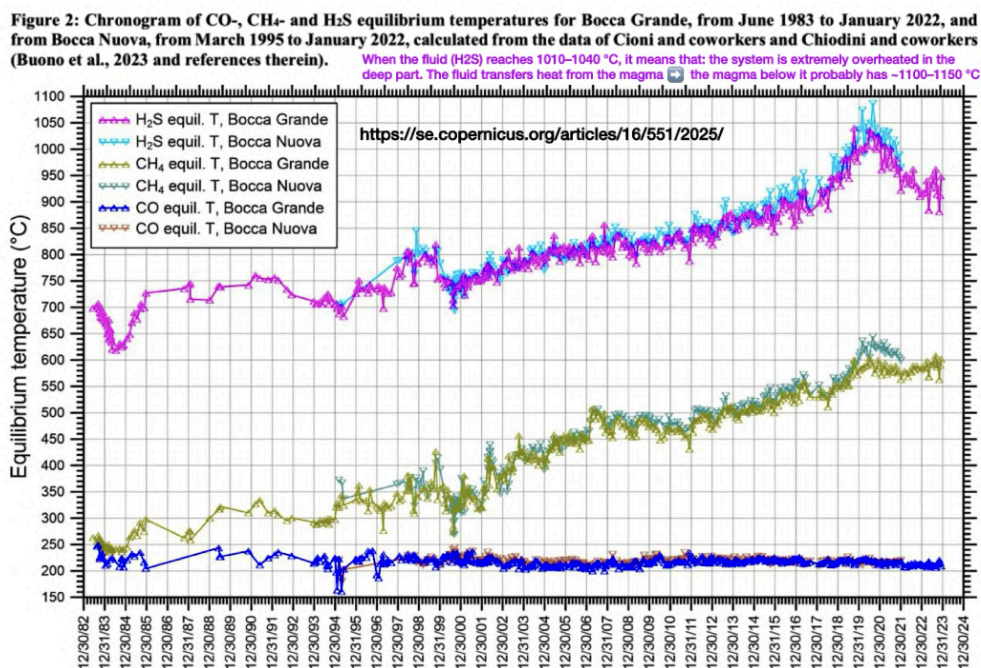
Rekordné teploty v hlbokom rezervoári: 1040°C+

Ešte alarmujúcejšie sú najnovšie údaje o teplotách v hlbokom magmatickom systéme. Štúdia publikovaná v časopise Solid Earth (2025) sledovala plynové geoidikátory a geofyzikálne údaje pre oblasť Solfatara a odhalila znepokojivé zmeny.¹¹¹

Zatiaľ čo plytšia vrstva fluidného systému zostala relatívne stabilná, hlboký rezervoár (6,5 – 7,5 km pod povrchom) prešiel medzi rokmi 1984 – 2022 „pozoruhodným a progresívnym“ nárastom teploty a tlaku:

- **1984:** Približne 650°C
- **2020:** 1010 – 1040°C (a maximálne až 1087°C)

To znamená nárast o 360-390°C za 36 rokov – geologicky mimoriadne rýchla zmena (obr. 65).



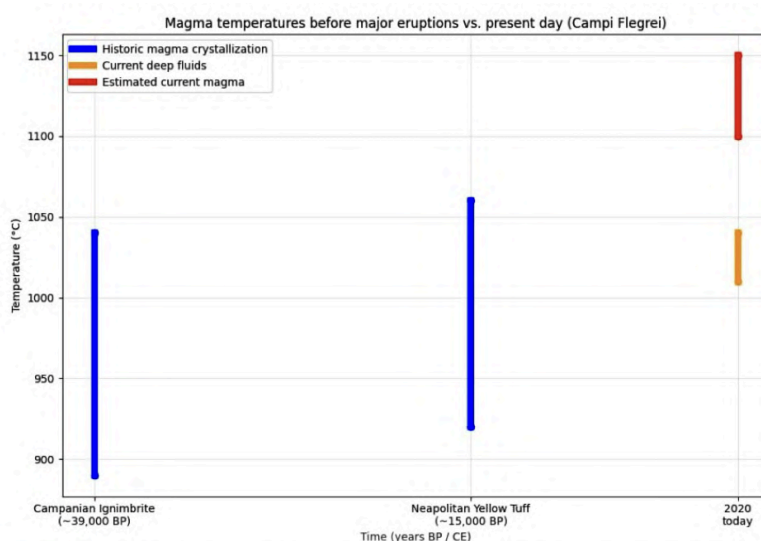
Obr. 65: Nárast teploty plynových geoidikátorov, ružová čiara: H₂S (hlboký rezervoár magmy), zdroj: <https://se.copernicus.org/articles/16/551/2025/>

¹¹⁰ <https://www.nytimes.com/2018/11/14/science/volcano-eruption-italy.html#>

¹¹¹ <https://se.copernicus.org/articles/16/551/2025/>

Autori štúdie na základe výpočtových údajov zároveň uvádzajú, že teplota magmy v hlbokom rezervoári musí byť vyššia ako teplota fluidného systému (superkritických plynov/kvapalín). Odhad súčasnej teploty magmy v hlbokom rezervoári môže byť až 1100 – 1150°C. To znamená, že dnešná hlboká magma je pravdepodobne horúcejšia než väčšina historických magiem v pred-supererupčných štádiách (obr. 66).

Vulkanológ INGV Mastrolorenzo povedal tento rok: „Supererupcia už dávno mešká.“¹¹²



Obr. 66: Teplota magmy pred veľkými erupciami a súčasná teplota magmy v Campi Flegrei. Graf vytvorený na základe dát z vedeckých článkov: <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.aat9401>, <https://se.copernicus.org/articles/16/551/2025/>

Čo by znamenala supererupcia Campi Flegrei?

Dopady v rôznych vzdialenostiach:

Priama zóna výbuchu (0 – 100 km)

- Totálna devastácia – ničivé pyroklastické prúdy (rozpálené plyny, popol a kamene) by okamžite zničili všetko v okolí.
- Zemetrasenia a zosuvy pôdy by mohli zmeniť geografiu celého regiónu.
- Silné explózie by zničili infraštruktúru a spôsobovali obrovské tlakové vlny.

Blízka zóna (100 – 500 km)

- Spad popola by mohol dosiahnuť niekoľko metrov, čo by spôsobilo kolaps budov.
- Toxické plyny (oxid siričitý, fluorovodík) by mohli spôsobiť vážne zdravotné problémy, ako poškodenie pľúc a otravy.
- Znečistenie vody – kyslé dažde by kontaminovali zásoby pitnej vody.

Stredná zóna (500 – 1500 km)

- Silný spad popola (niekoľko centimetrov až desiatky cm) by narušil dopravu a dýchacie problémy pre ľudí aj zvieratá.

¹¹² <https://themunicheye.com/supervolcano-near-naples-eruption-threat-13549>

- Zablokovanie slnečného svetla by viedlo k dočasnému ochladeniu a narušeniu poľnohospodárstva.
- Letectvo by bolo paralyzované, popol poškodzuje motory lietadiel.

Globálny efekt (viac ako 1500 km)

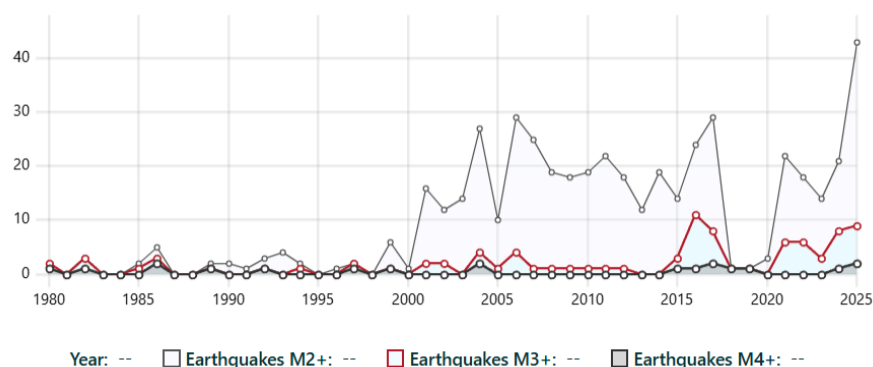
- Globálne ochladenie – popol a plyny by mohli ochladiť planétu o 2 – 5°C na niekoľko rokov.
- Kolaps úrody – oslabené slnečné žiarenie by znížilo fotosyntézu a mohlo spôsobiť hospodársku krízu.
- Zvýšená kyslosť oceánov kvôli oxidom síry v atmosfére.

Sakurajima a kaldera supervulkánu Aira

Sakurajima leží v kaldere supervulkánu Aira na ostrove Kjúšú a je považovaná za jednu z najaktívnejších sopiek nielen v Japonsku, ale i vo svete. Vznikla pred 13 000 rokmi mohutnou erupciou. Jej aktivita sa v posledných tisícročiach postupne zvyšovala, avšak doteraz nezaznamenala takú veľkú erupciu ako pred 13 000 rokmi¹¹³. Rýchlosť dodávky magmy do plytkej magmatickej komory sa však zvýšila za posledných približne 500 rokov¹¹⁴.

Z pohľadu relatívne modernej histórie je dôležité poznamenať erupciu z roku 1914 - ktorá zásadným spôsobom zmenila ostrov v tom, že lávový tok spojil severný výbežok ostrova s pevninou.¹¹⁵

V posledných rokoch je v okolí sopky Sakurajima pozorovaná zvýšená seizmická aktivita, ktorá sa prejavuje nárastom počtu slabších až mierne silných zemetrasení (M 2+). Graf na obr. 67 ukazuje, že v posledných rokoch – a najmä v roku 2025 – dosahuje počet udalostí nízkych magnitúd hodnoty, ktoré výrazne prevyšujú dlhodobý priemer od 80. rokov. Takáto zvýšená seizmicita a neprestávajúca intenzívna erupčná aktivita naznačuje aktívne presuny magmy a tlakové zmeny v plytkom magmatickom systéme.



Obr. 67: Zvyšujúca sa seizmická aktivita v oblasti sopky Sakurajima (kaldera Aira). Pozn.: v rokoch 2018-2020 chýbajú zemetrasenia v databáze stránky VolcanoDiscovery pre celé Japonsko. Zdroj:

<https://www.volcanodiscovery.com/sakurajima-earthquakes.html>

113

https://www.researchgate.net/publication/365734586_Long-term_change_of_the_eruption_activities_of_Sakurajima_volcano_Japan_inferred_from_the_fallout_tephra_deposits

https://qbank.gsj.jp/volcano/Act_Vol/sakurajima/text/eng/exp01-2e.html#

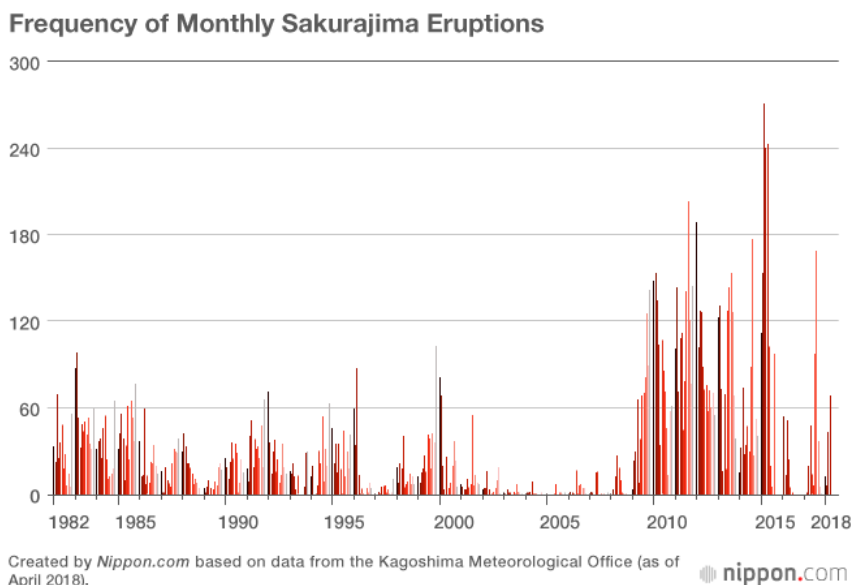
114

https://www.researchgate.net/publication/377509384_Increase_in_magma_supply_to_Sakurajima_volcano%27s_Japan_shallow_magma_chamber_over_the_past_500_years

115

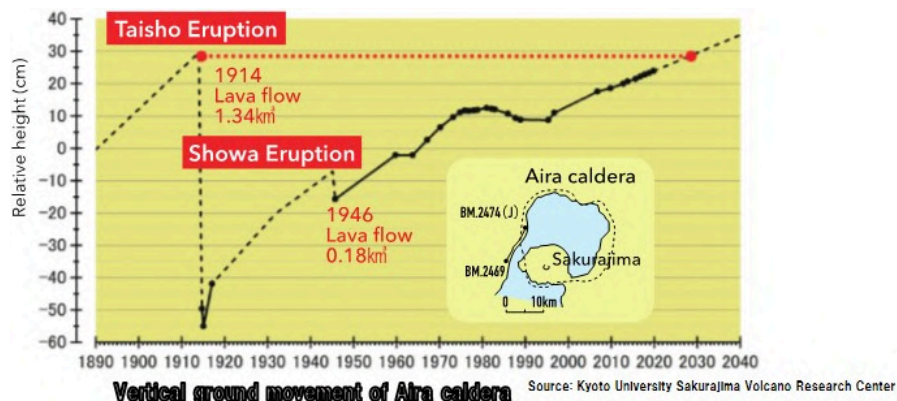
https://www.researchgate.net/publication/320043455_The_1914_Taisho_eruption_of_Sakurajima_volcano_stratigraphy_and_dynamics_of_the_largest_explosive_event_in_Japan_during_the_twentieth_century

Hoci je Sakurajima od roku 1955 takmer v nepretržitej erupcii¹¹⁶, jej erupčná aktivita sa v posledných rokoch zvyšuje (obr. 68). Najvyššie hodnoty erupcií dosahovala v rokoch 2010 - 2015¹¹⁷, hoci ani v roku 2025 jej aktivita neprestávala (361 erupcií)¹¹⁸.



Obr. 68: Frekvencia erupcií sopky Sakurajima, zdroj: <https://www.nippon.com/en/features/h00194/>

Z hľadiska deformácie terénu sa na stránke mesta Kagoshima (spravujúceho oblasť sopky) uvádza, že od erupcie v roku 1914 sa v oblasti pozoruje zdvih pôdy (obr. 69) – doklad toho, že magma pod sopkou sa akumuluje.¹¹⁹



Obr. 69: Zdvih pôdy v kaldere Aira od roku 1890, zdroj: <https://www.city.kagoshima.lg.jp/kikikanri/leadingcity/current.html>

Už pred 10 rokmi JMA a vulkanológovia upozorňovali, že Sakurajima „by mohla smerovať k veľkej erupcii“ – analýza deformácie a seizmickej aktivity z tohto obdobia bola interpretovaná ako možný významný výbuch v budúcnosti¹²⁰. Odvtedy pretrvávajú erupčná aktivita a stále sa zosilňuje seizmická aktivita v oblasti Sakurajimy, ktorá je súčasťou kalderového systému supervulkánu Aira.

¹¹⁶ <https://www.offthetrackjapan.com/sakurajima/>

¹¹⁷ <https://www.nippon.com/en/features/h00194/>

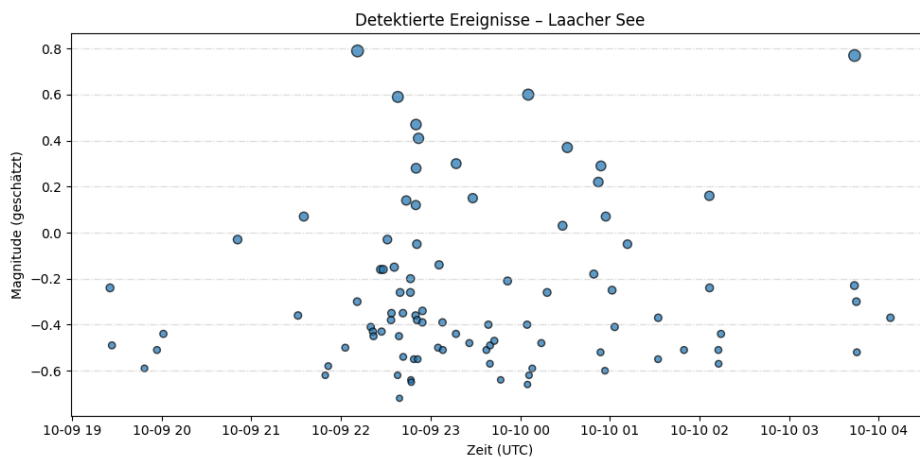
¹¹⁸ https://www.data.jma.go.jp/kagoshima/vol/data/skr_erp_num.html

¹¹⁹ <https://www.city.kagoshima.lg.jp/kikikanri/leadingcity/current.html>

¹²⁰ <https://www.wired.com/2015/08/sakurajima-japan-might-headed-towards-large-eruption/>

Nemecko: Laacher See

Laacher See je vulkanické jazero v nemeckej spolkovej krajine Porýnie-Falcko, približne 24 kilometrov severozápadne od Koblenze. Jazero vyplňuje kalderu, ktorá vznikla pri masívnej erupcii pred približne 12 900 rokmi. Táto erupcia, ktorá dosiahla stupeň VEI 6, vyprodukovala približne 20 kubických kilometrov vulkanického materiálu a postihla veľkú časť strednej Európy.¹²¹



Obr. 70: Bezprecedentne intenzívny seizmický roj v okolí Laacher See 9.-10. októbra 2025, zdroj: <https://erdbebennews.de/2025/10/erdbebenschwarm-am-laacher-see/>

V piatok 10. októbra 2025 bol zaznamenaný bezprecedentne intenzívny roj drobných zemetrasení – najsilnejší za celé 20-ročné obdobie pozorovaní (obr. 70). Podľa nemeckých seizmologických služieb: „V oblasti jazera sa síce v minulosti objavili menšie otrasy a lokálne roje, no aktivita takéhoto rozsahu je úplne bezprecedentná.“¹²²

Navyše, 31. októbra 2025 k zemetraseniu s magnítudou približne M 2,7 – 2,9 asi 10 km od kaldery pri Koblenzi.¹²³

Podľa najnovších štúdií existujú pod Laacher See konkrétne seizmické a geofyzikálne signály, ktoré naznačujú zložitejšie správanie tekutín a magmy v hĺbke. Mikrosezmicita a momentová analýza slabších otrasov ukazujú, že mnohé zemetrasenia v regióne sú spojené s tektonickou aktiváciou zlomov a pretlakom fluidných fáz, čo môže súvisieť s pretrvávajúcimi procesmi v magmatickom systéme pod vulkánom.¹²⁴

Publikovaná štúdia seizmológov a geofyzikov tiež ukazuje, že pod Laacher See dochádza k prebiehajúcemu magmatickému dopĺňaniu, teda k pomalému prítoku magmatických fluid. Študované nízkofrekvenčné zemetrasenia sa vyskytujú vo vrstvách od približne 10 km až do 40 km hĺbky a sú interpretované ako signál migrácie magmatických tekutín a plynov smerom nahor.¹²⁵

¹²¹ <https://ejm.copernicus.org/articles/37/385/2025/>

¹²² <https://erdbebennews.de/2025/10/erdbebenschwarm-am-laacher-see/>

¹²³

<https://www.volcanodiscovery.com/earthquakes/quake-info/22334958/quake-felt-Oct-31-2025-Near-Koblenz-Rheinland-Pfalz-Germany.html>

¹²⁴ <https://academic.oup.com/gji/article/244/2/ggaf475/8340366?login=false>

¹²⁵

<https://www.gfz.de/en/press/news/details/deep-low-frequency-earthquakes-indicate-migration-of-magmatic-fluids-beneath-laacher-see-volcano-eifel-germany>

Geodetické merania odhalili signifikantné deformácie povrchu, ktoré môžu súvisieť s dynamikou podložného magmatického systému. Monitorovacie siete GNSS zaznamenali krátkodobú vertikálnu deformáciu, pri ktorej niektoré stanice vykázali zdvih až približne 39 mm v priebehu jedného dňa (5. decembra 2022) v lokalite severne od Laacher See pri porovnaní s predchádzajúcim dňom, čo môže poukazovať na lokálne tlakové zmeny v kôre alebo systémových procesoch spojených s magmatickými fluidami.¹²⁶ Takýto rozsah zdvihu pôdy sa pri sopkách zvyčajne akumuluje počas niekoľkých rokov, nie v priebehu jedného dňa.

Okrem toho v porovnaní s okolitou oblasťou sa pod Laacher See pozoruje zvýšené uvoľňovanie CO₂, ktoré vychádza z magmatického systému pozdĺž zlomov a trhlín. CO₂ sa uvoľňuje priamo v jazere aj na suchých brehoch, pričom ročný tok CO₂ sa odhaduje v rozpätí 5000 až 12 800 ton ročne, čo je považované za znak trvajúcej vulkanickej aktivity a úniku plynnej zložky z magmatického zdroja pod vulkánom.¹²⁷

Obr. 71: “Sopka v Nemecku sa dobíja novou magmou“ a “Prebúdza sa aktívna sopka v Nemecku?“, zdroje: <https://www.dw.com/en/the-lake-laach-volcano-in-germany-is-recharging-with-fresh-magma/a-47384295>, <https://www.armstrongeconomics.com/international-news/nature/germanys-active-volcano-awakening/>

Tieto kombinované dôkazy – zvýšené slabé zemetrasenia vrátane M 2,7 udalosti v roku 2025, seizmické signály nízkych frekvencií spojené s migráciou magmatických fluid, a trvalé CO₂ emisie – svedčia o tom, že Laacher See, hoci neprešiel erupciou už vyše 12 000 rokov, je geologicky aktívny systém, v ktorom dochádza k vnútorným procesom magmatického dopĺňania a tlakovým zmenám. Jeho zvýšená aktivita zaznamenaná v posledných rokoch vyvoláva otázky o možnom prebudení tohto systému po tisícročiach pokoja (obr. 71).¹²⁸

126

https://files.igs.org/pub/resource/pubs/workshop/2024/IGSWS-2024-PS0504-Deng-Deformation_Monitoring_on_Laacher_See_Volcano_by_GNSS.pdf

¹²⁷ <https://academic.oup.com/gji/article/216/3/2025/5257845?login=false>

¹²⁸ <https://www.armstrongeconomics.com/international-news/nature/germanys-active-volcano-awakening/>

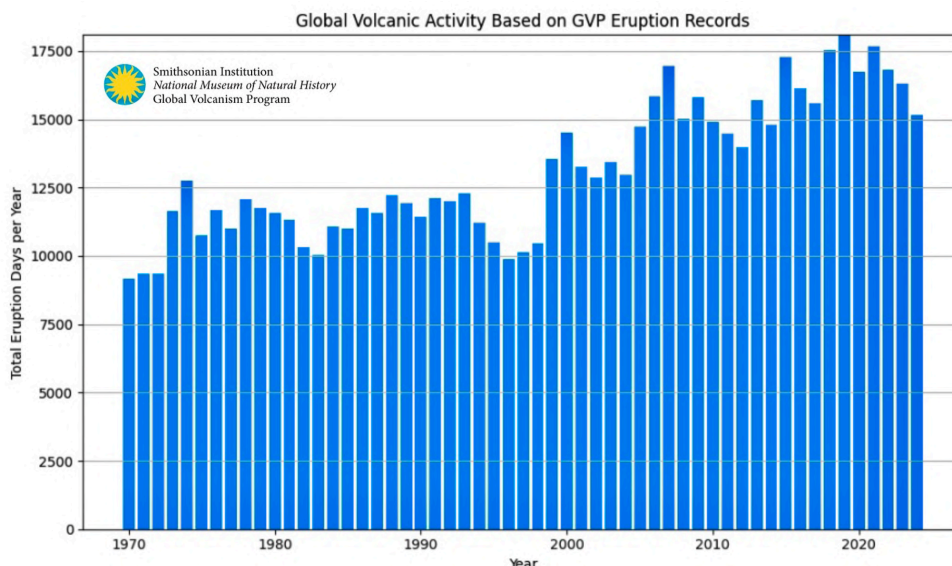
7. Globálny nárast vulkanickej aktivity

Nasledujúci graf na obr. 72 zobrazuje celkový súčet dní so zaznamenanou sopečnou aktivitou na planéte za jednotlivé roky na základe databázy Smithsonian Institution – Global Volcanism Program (GVP). Táto metrika predstavuje časovo integrovaný indikátor globálnej vulkanickej aktivity, ktorý zahŕňa počet erupcií, ich trvanie aj súbežnú aktivitu viacerých sopiek a je vhodný na porovnanie úrovne zaznamenatej aktivity medzi jednotlivými rokmi.

Od roku 1968 Global Volcanism Program (GVP) kontinuálne zhromažďuje globálne historické aj súčasné údaje o vulkanickej aktivite, ktoré tvoria základ databázy *Volcanoes of the World* a súvisiacich online databáz. Tento systém zahŕňa záznamy o erupciách, typoch vulkánov a ich aktivite počas približne posledných 10 000 rokov, čím predstavuje jeden z najkomplexnejších zdrojov informácií o vulkanizme na svete.¹²⁹

GVP zároveň integruje aj externé dáta, vrátane satelitných meraní, napríklad údajov o koncentráciách oxidu siričitého (SO₂)¹³⁰ alebo sledovaním zmien farby stromov zo satelitov NASA¹³¹. Spolupráca medzi Smithsonian Institution a NASA tak významne prispieva k presnejšiemu monitorovaniu a pochopeniu globálnej vulkanickej činnosti, pričom moderné satelitné technológie umožňujú sledovať erupcie takmer v reálnom čase aj v odľahlých oblastiach sveta.

História systematického monitorovania globálnej vulkanickej aktivity pomocou satelitných systémov (detekciou tepelných anomálií) siaha do 70. rokov, kedy boli senzory AVHRR (Advanced Very-High-Resolution Radiometer) umiestnené na družiciach NOAA. V rokoch 1999–2002 spustenie systému MODIS na družici Terra v roku 1999 a neskôr aj na družici Aqua v roku 2002 znamenalo zlepšenie v globálnom monitorovaní vulkánov, pretože umožnili každodenné termálne snímky s globálnym pokrytím.¹³²



Obr. 72: Globálny nárast vulkanickej aktivity vo svete, graf bol vytvorený v Pythone využitím dát z Global Volcanism Program, Smithsonian Institution: https://volcano.si.edu/gvp_votw.cfm

¹²⁹ <https://fsm-data.sprep.org/dataset/volcanoes-world-global-volcanism-program>

¹³⁰

<https://data.nasa.gov/dataset/multi-satellite-air-quality-sulfur-dioxide-so2-database-long-term-l4-global-v2-msaqso2l4-a-d5d7e>

¹³¹ <https://www.weforum.org/videos/nasa-volcanic-eruptions/>

¹³² https://en.wikipedia.org/wiki/Advanced_Very-High-Resolution_Radiometer

Graf ukazuje ročný súčet dní, počas ktorých bola pozorovaná vulkanická erupčná aktivita na celej planéte podľa dát z Global Volcanic Program (GVP) od roku 1970 až do roku 2024. Od polovice 70. rokov je zreteľný dlhodobý rast, ktorý však pozostáva z niekoľkých náhlych skokov, po ktorých sa aktivita ustáli na vyššej úrovni. Dôležité je rozlišovať medzi artefaktmi monitorovania a pravdepodobnými reálnymi epizódami zvýšenej globálnej aktivity.

Prvý výrazný nárast v rokoch 1973–1974 nastáva ešte pred érou moderného satelitného monitorovania. V tomto období už databáza GVP systematicky zhromažďovala globálne informácie o erupciách prostredníctvom pozemných observatórií a hlásení, no bez jednotného diaľkového dohľadu. Tento skok preto nie je možné vysvetliť technickým zlepšením detekcie a skôr odráža skutočne vysokú úroveň súčasne prebiehajúcich erupcií na viacerých sopkách.

Podobne aj nárasty v rokoch 2005–2007, 2015 a 2018–2019 nastávajú už v období, keď je globálna detekcia erupcií zo satelitov (MODIS, OMI, neskôr VIIRS) dostatočne presná na úrovni ± 1 deň¹³³. V týchto rokoch teda nie je relevantné vysvetlenie, že ide len o zlepšenie pozorovania – skoky nahor s vysokou pravdepodobnosťou odrážajú reálne obdobia zvýšeného počtu súčasne aktívnych sopiek a dlhšie trvajúcich erupcií.

Výnimku tvorí rok 1999, kde je opatrnosť na mieste. Tento nárast časovo korešponduje so spustením satelitu Terra (MODIS), ktorý znamenal zlepšenie v globálnom a systematickom sledovaní tepelnej aktivity. Je preto možné, že práve v tomto bode sa v dátach prejavuje kombinácia reálnej aktivity a skokového zlepšenia detekcie, najmä pri vzdialených a dlhodobých aktívnych sopkách. Po roku 2000 sa však krivka správa konzistentnejšie a ďalšie výrazné nárasty už nemožno jednoducho pripísať technologickým zmenám. Celkovo graf naznačuje, že globálna vulkanická aktivita sa nevyvíja lineárne, ale v epizódach, pričom niektoré z nich – najmä po roku 2005 – pravdepodobne predstavujú skutočné globálne zosilnenie vulkanickej činnosti, nie len lepší pohľad na rovnaký jav.

¹³³ <https://science.nasa.gov/earth/earth-observatory/sensing-remote-volcanoes/>

8. Zhodnotenie dostupných dát, metodík a fyzikálnych súvislostí

Ako vyplýva z tejto práce, v posledných desaťročiach je možné v globálnych seizmologických databázach pozorovať nárast počtu zaznamenaných zemetrasení stredných magnitúd, približne v intervale M 4 – M 5.

Ktoré dáta sú najviac hodné pozornosti

Z hľadiska interpretácie dát je dôležité zamerať sa práve na pásmo magnitúd M 4,0 – M 5,0. Ak by totiž existoval skorý signál globálnej zmeny seizmického režimu, najpravdepodobnejšie by sa prejavil práve v tomto rozsahu. Nejde totiž o mikroseizmicitu, ale o udalosti spojené so skutočným uvoľňovaním napätia v zemskej kôre. Zároveň ide o dostatočne početnú skupinu udalostí, ktorá umožňuje robustné štatistické sledovanie, a zároveň o magnitúdy citlivé na jemnejšie zmeny napäťového poľa a hlbších geodynamických procesov. Z tohto dôvodu možno globálne trendy v pásme M 4 – M 5 po roku 2000 považovať za relevantný indikátor – nie ako dôkaz zásadnej zmeny, ale ako potenciálny skorý signál, ktorý si zaslúži systematickú pozornosť.

Regionálne anomálie a hlboké procesy

Popri štatistických trendoch je dôležité vnímať aj širší fyzikálny kontext. V rôznych častiach sveta sa v posledných rokoch pozoruje zvýšená aktivita seizmických rojov, napríklad v oblastiach ako Campi Flegrei či Santorini. Súčasne existujú dôkazy o dlhodobých zmenách v magmatických systémoch a pribúdajú aj poznatky o dynamike hlbokých častí planéty, vrátane variácií rotácie zemského jadra a väzby medzi jadrom a plášťom, ktoré sa môžu prejavovať napríklad zmenami magnetického poľa alebo pohybom magnetického pólu. Diskutované sú aj možné pulzy tepla a materiálu v zemskom plášti. Tieto javy nie sú v rozpore s poznatkami súčasnej vedy, avšak zatiaľ nie sú integrované do jednotného globálneho modelu. Je preto dôležité rozlišovať medzi tým, že niečo „neexistuje“, a tým, že to zatiaľ nie je dostatočne preskúmané alebo jednoznačne preukázané.

Gutenberg–Richterov zákon

Interpretáciu trendov v seizmicite je vhodné zasadiť aj do rámca Gutenberg–Richterovho zákona, ktorý opisuje vzťah medzi magnitúdou zemetrasení a ich frekvenciou. Tento zákon hovorí, že s rastúcou magnitúdou počet udalostí exponenciálne klesá – typicky približne desaťnásobne pri zvýšení magnitúdy o jeden stupeň.

Základná formulácia

Gutenberg–Richterov zákon opisuje vzťah medzi magnitúdou zemetrasenia a ich počtom:

$$\log_{10} N = a - bM$$

kde:

- **N** = počet zemetrasení s magnitúdou $\geq M$,
- **a** = seizmická aktivita oblasti (celková „produktívnosť“),
- **b** ≈ 1 (typicky medzi 0,8–1,2) – pomer medzi malými a veľkými udalosťami.

Praktický význam: na každé zvýšenie magnitúdy o 1 klesne počet zemetrasení približne **10-násobne**.

Prečo je to potenciálne znepokojujúce

Ak by platilo, že počet M 4+ zemetrasení globálne a reálne rastie a parameter b zostáva stabilný, potom nevyhnutne musí v dlhšom časovom horizonte rásť aj počet M 5, následne M 6 a nakoniec aj M 7+. Inými slovami, veľké zemetrasenia nemôžu „chýbať navždy“, ak sa systém naozaj stáva aktívnejším na nižších magnitúdach.

Z pohľadu súčasného stavu poznania je preto možné formulovať niekoľko opatrných záverov. Existuje rastúci počet indícií, ktoré nemožno jednoducho vysvetliť jediným faktorom, najmä ak sa zohľadnia súčasne štatistické trendy v stredných magnitúdach, regionálne anomálie a poznatky o hlbokých geodynamických procesoch. Regionálne a vnútroplanetárne procesy naznačujú, že seizmicita môže mať aj iné spúšťače než len pohyb litosférických dosiek. Pásmo magnitúd M 4 – M 5 predstavuje relevantnú úroveň, na ktorej sa môžu prípadné globálne zmeny prejaviť ako prvé.

Dnes nie je vedecky korektné ignorovať súbežný výskyt štatistických trendov v stredných magnitúdach, regionálnych seizmických rojov a hlbokých geodynamických zmien. Ide o situáciu, ktorú možno najlepšie opísať ako predparadigmatickú fázu: niečo, čo ešte nie je konsenzus, ale už to nemožno odbiť ako náhodu bez ďalšieho skúmania.

9. Limity čisto tektonického výkladu a potreba širšieho kontextu

Doterajšia analýza sa zameriavala na vývoj seizmickej a vulkanickej aktivity na globálnej aj regionálnej úrovni, s dôrazom na porovnanie časových trendov v rámci metodicky porovnateľných dátových súborov. Takýto prístup umožňuje identifikovať anomálie a zmeny v správaní jednotlivých systémov, no zároveň prirodzene naráža na hranice čisto lokálneho alebo regionálneho výkladu.

Hoci je platňová tektonika etablovaným a úspešným rámcom vysvetľujúcim priestorové rozloženie zemetrasení a vulkánov, samotná existencia tektonických rozhraní ešte nevysvetľuje časovú synchronizáciu zvýšenej aktivity naprieč viacerými, navzájom vzdialenými regiónmi. Rovnako nevysvetľuje, prečo sa v určitých obdobiach pozoruje súbežný nárast seizmickej aj vulkanickej aktivity, vrátane zvýšeného výskytu seizmických rojov a zmien v správaní magmatických systémov.

Tieto pozorovania samy o sebe nepredstavujú dôkaz existencie globálneho riadiaceho mechanizmu, no vytvárajú legitímny priestor pre otázku, či zvýšená seizmická a vulkanická aktivita nemusí byť prejavom širšieho planetárneho kontextu, v ktorom lokálne tektonické procesy reagujú na pomalšie, hlbšie a globálnejšie zmeny v dynamike Zeme.

Cieľom nasledujúcej kapitoly preto nie je nahradiť existujúce tektonické modely, ale rozšíriť analytický rámec o ďalšie globálne parametre, ktoré môžu – priamo alebo nepriamo – súvisieť s pozorovanými javmi. V tomto kontexte sa ako relevantné javia otázky týkajúce sa dlhodobých zmien v rotácii Zeme, dynamike jadro–plášť, vývoji geomagnetického poľa a pohybe severného magnetického pólu, ktoré budú v nasledujúcej kapitole diskutované ako možné prejavy hlbšej dynamickej reorganizácie planéty.

10. Iné globálne geodynamické zmeny systému Zeme

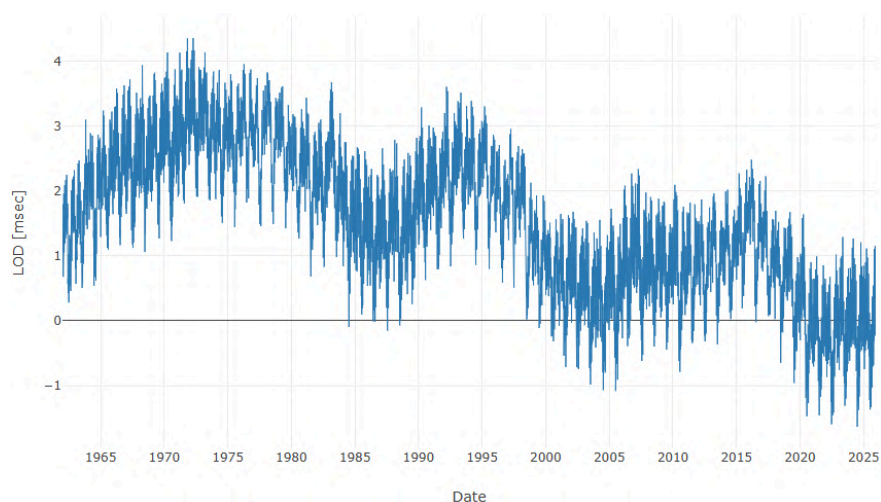
Zmeny rotácie Zeme a dĺžky dňa (LOD)

Dĺžka dňa (LOD) predstavuje citlivý parameter rotácie Zeme, ktorý je systematicky monitorovaný Medzinárodnou službou pre rotáciu Zeme a referenčné systémy (IERS) od začiatku 60. rokov 20. storočia. Oficiálne grafy IERS ukazujú, že rotácia Zeme nie je konštantná, ale vykazuje krátkodobé aj strednodobé odchýlky od referenčnej hodnoty 86 400 sekúnd (obr. 73).

Približne od roku 2020 boli opakovane zaznamenané dni kratšie než priemerná dĺžka dňa, a to o jednotky milisekúnd. Moderné merania založené na atómových hodinách potvrdzujú, že v posledných rokoch došlo k sérii rekordne krátkych dní, pričom niektoré z nich patria k najkratším v celej histórii presných meraní rotácie Zeme. Tento jav je pozoruhodný najmä preto, že dlhodobý geologický trend rotácie Zeme je opačný – postupné spomaľovanie spôsobené prílivovým pôsobením Mesiaca.¹³⁴

Náhle a opakované zrýchlenie rotácie Zeme v kontexte tohto dlhodobého, fyzikálne dobre podloženého trendu spomaľovania poukazuje na pôsobenie dodatočnej energie alebo impulzu v rámci zemského systému. Takéto správanie nemožno vysvetliť ako náhodnú fluktuáciu okolo rovnovážneho stavu, ale skôr ako prejav dynamických procesov, ktoré dočasne menia rozdelenie momentu hybnosti medzi jednotlivými zložkami planéty. Zrýchlenie rotácie tak naznačuje aktívnu výmenu energie medzi jadrom, plášťom, oceánmi a atmosférou, prípadne vplyv hlbších vnútroplanetárnych mechanizmov, ktoré narúšajú očakávaný trend postupného spomaľovania.

Tieto pozorovania zdôrazňujú, že rotácia Zeme je vysoko dynamický parameter a môže slúžiť ako citlivý indikátor prebiehajúcich hlbokých geofyzikálnych procesov. Zmeny LOD tak nadobúdajú význam nielen ako technický merateľný údaj, ale aj ako súčasť širšieho obrazu súčasnej energetickej a dynamickej premeny zemského systému.



Obr. 73: Zmena dĺžky dňa v milisekundách, zdroj:

https://datacenter.iers.org/singlePlot.php?plotname=EOPC04_14_62-NOW_IAU1980-LOD&id=223

134

<https://www.forbes.com/sites/jamiecartereurope/2022/07/28/earth-is-suddenly-spinning-faster-why-our-planet-just-recorded-its-shortest-day-since-records-began/>

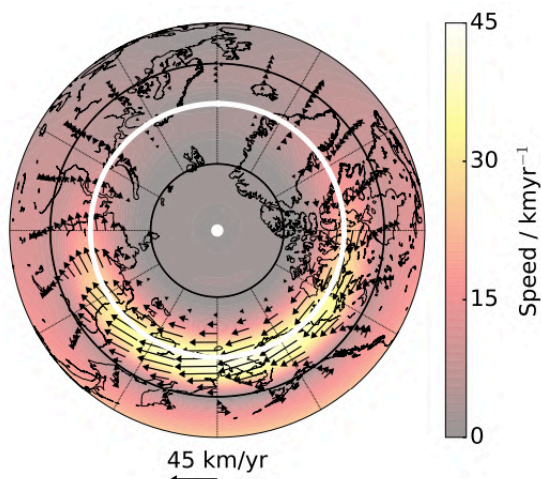
Dynamika jadro–plášť a jej dlhodobé zmeny

Hlboká geodynamika Zeme je formovaná komplexnou interakciou medzi jej vnútornými vrstvami, najmä medzi pevným vnútorným jadrom, tekutým vonkajším jadrom a plášťom. Tieto vrstvy netvoria rigidný systém, ale sú navzájom dynamicky prepojené prostredníctvom gravitačných, elektromagnetických a mechanických väzieb. Jedným z kľúčových pozorovaných javov posledných rokov sú variácie relatívnej rotácie vnútorného jadra Zeme voči plášťu a povrchu planéty, potvrdené modernou seizmologickou analýzou opakujúcich sa seizmických signálov.

Nedávne štúdie založené na dlhodobých seizmických dátach poskytli presvedčivé dôkazy, že vnútorné jadro Zeme sa v minulosti otáčalo mierne rýchlejšie než zvyšok planéty (tzv. superrotácia), avšak v posledných desaťročiach došlo k výraznej zmene tohto trendu. Analýzy naznačujú, že približne v poslednom desaťročí sa relatívna rotácia vnútorného jadra spomalila, čo poukazuje na zmeny v mechanickej a elektromagnetickej väzbe medzi jadrom a okolitými vrstvami.¹³⁵

Tieto zmeny sa úzko spájajú s dynamikou tekutého vonkajšieho jadra, ktoré zohráva kľúčovú úlohu v prenose momentu hybnosti medzi jednotlivými vrstvami Zeme a zároveň je miestom generovania geomagnetického poľa prostredníctvom geodynamama.

Analýza vysokorozlišovacích magnetických dát zo satelitnej misie Swarm Európskej vesmírnej agentúry odhalila existenciu úzkeho a výrazne zosilneného prúdu tekutého železa vo vonkajšom jadre, lokalizovaného pod severnými vysokými zemepisnými šírkami. Tento prúd, často označovaný ako „core flow jet“, zrýchlil v období rokov 2000–2016 približne trojnásobne, pričom jeho rýchlosť dosiahla hodnoty okolo 40 km za rok (obr. 74). Pre porovnanie, typické veľkorozmerné prúdenia vo vonkajšom jadre sa pohybujú rádovo len okolo 10–20 km za rok. Pozorovaný prúd je teda nielen výrazne rýchlejší než bežné prúdenia, ale zároveň predstavuje lokalizovanú a časovo dynamickú štruktúru, ktorá sa vyvíjala v priebehu niekoľkých desaťročí – čo je z pohľadu hlbokaj geodynamiky Zeme mimoriadne krátky časový interval.¹³⁶



Obr. 74: Zmena rýchlosti pohybu tekutého kovu v jadre, ktorý je zodpovedný za generovanie magnetického poľa podľa pozorovaní zo satelitov Swarm, zdroj: <https://www.nature.com/articles/ngeo2859>

135

<https://www.natureworldnews.com/articles/62027/20240617/earths-rotation-confirmed-slowed-down-inner-core-appears-reversing-backtracking.htm>

¹³⁶ <https://www.nature.com/articles/ngeo2859>

https://eprints.whiterose.ac.uk/id/eprint/108112/1/accepted_version.pdf

Tieto satelitné pozorovania poskytujú nezávislý dôkaz o prebiehajúcich dynamických procesoch vo vonkajšom jadre, ktoré sú priestorovo aj časovo štruktúrované a prebiehajú na škálach rokov až desaťročí. V kombinácii so seizmologickými dôkazmi o zmene rotácie vnútorného jadra vytvárajú konzistentný obraz Zeme ako systému, v ktorom hlboké procesy prechádzajú merateľnými zmenami v relatívne krátkych časových intervaloch z pohľadu geofyziky.

Existujú silné indície, že všetky tieto zmeny v povrchových javoch, ako je seizmicita či vulkanizmus môžu byť prejavom hlbšej dynamickej reorganizácie planéty, ktorej plný rozsah ešte nie je úplne pochopený. Tento rámec poskytuje legitímny základ pre ďalšie skúmanie širších planetárnych súvislostí.

Pohyb severného magnetického pólu

Magnetický severný pól nie je rovnaký ako geografický severný pól. Geografický pól je poloha na povrchu Zeme, definovaná osou rotácie. Naproti tomu magnetický pól je bod, kde magnetické siločiarly vychádzajú z povrchu kolmo, a je premenný v čase, pretože vzniká pohybom vodivého tekutého železa a niklu vo vonkajšom jadre Zeme.

Historicky sa magnetický severný pól presúval pomaly po Kanadskom Arktickom území, no od polovice 20. storočia tento pohyb výrazne zrýchlil. Pred rokom 1990 sa pohyboval iba niekoľko desiatok kilometrov za rok (približne 10–15 km/rok), ale od 90. rokov sa jeho rýchlosť zvýšila na desiatky kilometrov ročne. V 2000-tych rokoch dosahoval priemernú rýchlosť asi 50–60 km/rok, čo predstavuje výrazné zrýchlenie oproti skorším desaťročiam a smeruje od Kanady k Sibíri. V roku 2019 bol tento pohyb natoľko rýchly, že sa model geomagnetického poľa World Magnetic Model (WMM) musel aktualizovať o rok skôr než bolo plánované, pretože staršie predpovede prestávali byť dostatočne presné pre navigačné systémy.¹³⁷

V štúdiu zverejnenej 31. januára 2020 na blogu *Graphically Speaking* autor Robert Allison, PhD z North Carolina State University analyzoval údaje z National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) týkajúce sa polohy severného magnetického pólu (obr. 75 a 76 naľavo). NOAA zhromažďuje tieto údaje ako súradnice magnetického severného pólu z *International Geomagnetic Reference Field (IGRF)* modelov a dlhodobých meraní, ktoré sledujú ročné zmeny v pozícii pólu.

Allison použil tieto dáta na výpočet ročnej dráhy magnetického severného pólu a následne vypočítal, že v roku 2019 sa rýchlosť posunu severného magnetického pólu medziročne výrazne zrýchlila voči predchádzajúcemu trendu. Podľa jeho analýzy sa pól pohyboval približne 25,3 míľ za rok (40,7 km/rok) v predchádzajúcom období a v roku 2019 sa tento posun zvýšil na približne 48,3 míľ za rok (77,7 km/rok).

Tento dramatický nárast rýchlosti nebol len vizuálnou kuriozitou, ale mal praktické dopady na geofyzikálne modelovanie a navigačné systémy, pretože World Magnetic Model (WMM) – globálny model magnetického poľa používaný pri navigácii – sa musel aktualizovať skôr než sa očakávalo kvôli rýchlym zmenám polohy magnetického pólu¹³⁸ v dôsledku zmien v dynamike geomagnetického poľa v tekutom vonkajšom jadre planéty¹³⁹. V tomto roku bola zaznamenaná aj vôbec najvyššia vulkanická

¹³⁷

<https://www.smithsonianmag.com/smart-news/earths-magnetic-north-pole-is-shifting-toward-siberia-and-raising-questions-about-unusual-movement-180985892/>

¹³⁸ <https://www.ncei.noaa.gov/news/world-magnetic-model-out-cycle-release>

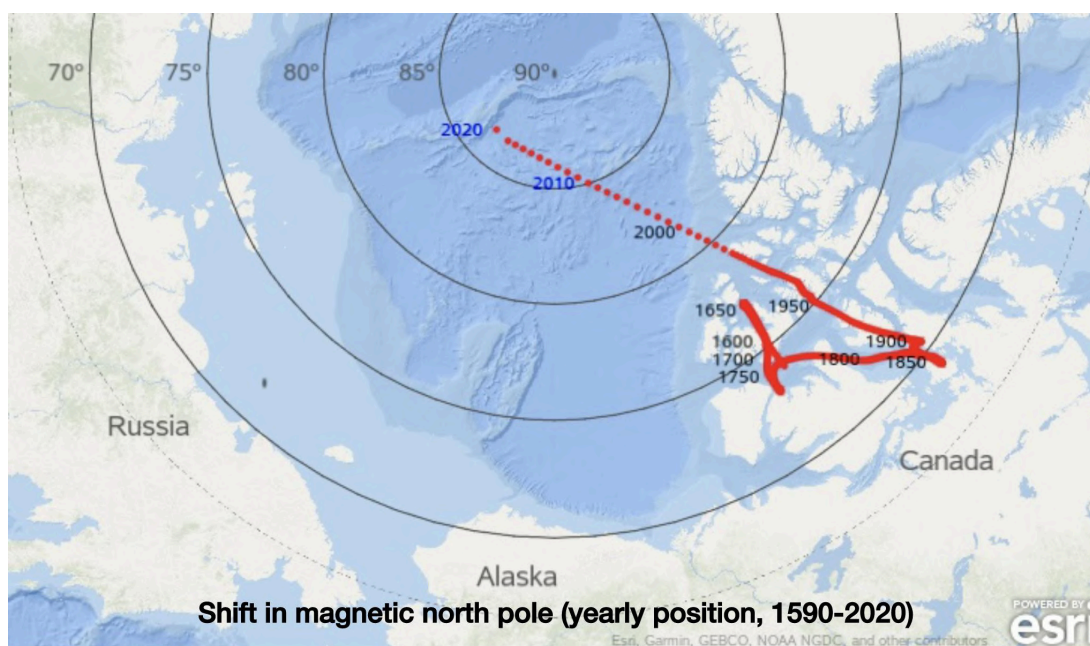
¹³⁹

<https://www.npr.org/2019/02/04/691471616/as-magnetic-north-pole-zooms-toward-siberia-scientists-update-world-magnetic-mod>

aktivita na planéte, ako ukazuje graf vyššie v tejto práci. V roku 2019 zažil vulkán Stromboli jednu z najsilnejších erupčných kríz za posledných sto rokov¹⁴⁰. Dve paroxyzmálne explózie prerušili „normálnu“ miernu explozívnu činnosť.

V roku 2019 sa aj v podzemí kaldery Campi Flegrei začali výrazné zmeny. Merania ukázali, že horúce plyny a magma sa začali presúvať smerom nahor, čo narušilo bežný obeh horúcich podzemných tekutín. Inými slovami, vnútorný „potrubný systém“ sopky sa začal správať inak než predtým.¹⁴¹

V roku 2019 bol taktiež zaznamenaný aj významný roj zemetrasení na supervulkáne Taupo (Nový Zéland). Vedci po analýze zemetrasení a deformácií terénu uviedli, že zemetrasenia boli spôsobené novým prítokom magmy do rezervoáru.¹⁴²



Data source: <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/GeomagneticPoles.shtml>

Obr. 75: Pohyb severného magnetického pólu, na mapke vidno výrazné zrýchlenie pólu za rok 2019, zdroj: <https://blogs.sas.com/content/graphicallyspeaking/2020/01/31/magnetic-north-moved-50-miles-last-year-lets-map-it/>

Porovnanie historických výpočtov rýchlosti posunu severného magnetického pólu, ktoré vykonal Robert Allison na základe ročných polôh publikovaných NOAA v roku 2020, so súčasnými oficiálnymi údajmi NOAA (2026) ukazuje rozdiely v uvádzaných hodnotách (obr. 76). V rokoch 2015 – 2019 sú takmer všetky rýchlosti vypočítané z novších údajov NOAA vyššie než hodnoty vypočítané Allisonom, pričom rozdiely sa pohybujú približne v rozsahu 2 až 9 km ročne.

¹⁴⁰ <https://www.nature.com/articles/s41467-021-24420-1>

¹⁴¹ <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012821X24001778>

¹⁴² <https://earthsky.org/earth/taupo-supervolcano-needs-monitoring/>
<https://www.geonet.org.nz/vabs/6WkpJjHluMfBLGRAYmiQjX>

Year	Latitude (degrees)	Longitude (degrees east)	Distance from previous year (miles)
2020	86.502	164.036	48.3
2019	86.448	175.346	25.3
2018	86.471	-178.755	26.4
2017	86.455	-172.587	27.6
2016	86.395	-166.290	28.7
2015	86.289	-160.025	29.8

199.659	86.305	2015.000
192.206	86.467	2016.000
184.522	86.562	2017.000
176.901	86.598	2018.000
169.615	86.568	2019.000
162.867	86.494	2020.000
156.786	86.400	2021.000
151.272	86.275	2022.000
146.334	86.126	2023.000
141.945	85.958	2024.000
138.057	85.778	2025.000

Obr. 76: **Naľavo:** dáta o polohe severného magnetického pólu na rovnakej stránke, ktoré boli dostupné v roku 2020, zdroj: https://sascommunities.github.io/graphics-programming/robert/magnetic_north_pole.htm

Napravo: súčasné dáta o polohe severného magnetického pólu (2026), zdroj: <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/data/poles/NP.xy>

Porovnanie rýchlosti posunu severného magnetického pólu (2015–2020)

Rok	Allison – výpočet z polôh NOAA (km/rok)	Súčasný údaj NOAA (km/rok)	Rozdiel (km)
2015	47,9	50,4	+2,5
2016	46,2	55,2	+9,0
2017	44,4	53,0	+8,6
2018	42,5	50,7	+8,2
2019	40,7	48,4	+7,7
2020	77,7	46,1	-31,6

Najvýraznejší nesúlad sa objavuje v roku 2020, kde Allisonov výpočet naznačuje medziročný posun približne 77,7 km, zatiaľ čo súčasné údaje NOAA uvádzajú hodnotu približne 46,1 km. Rozdiel tak dosahuje viac než 30 km.

V roku 2020 bol už druhýkrát v krátkom časovom rozmedzí (prvýkrát koncom roka 2019) aktualizovaný IGRF model, ktorý je stále viditeľný aj v čase tejto analýzy. Geofyzici vytvárajúci globálne matematické modely magnetického poľa Zeme rozdelili prudkú zmenu plynulejšie v čase, trajektória sa „narovнала“, medziročné skoky sa zmenšili.

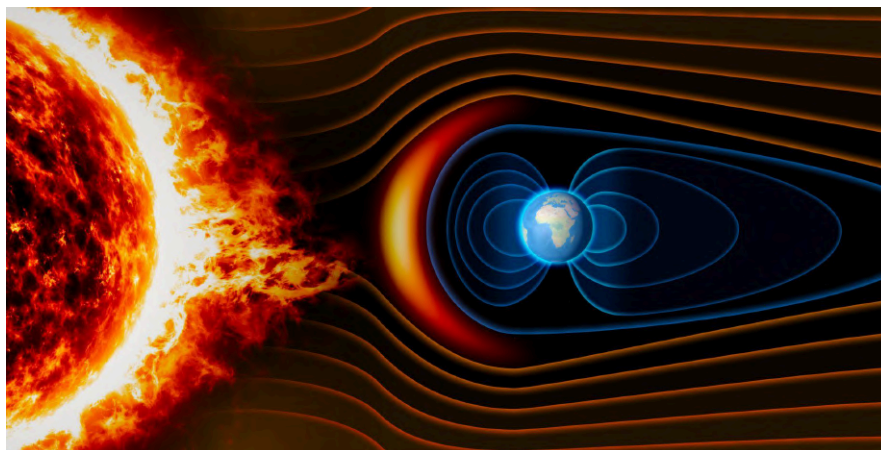
Napriek týmto rozdielom oba prístupy konzistentne ukazujú, že dynamika severného magnetického pólu prešla od 90. rokov 20. storočia výraznou zmenou, s obdobím zrýchleného pohybu v druhej dekáde 21. storočia. Tieto pozorovania naznačujú, že procesy prebiehajúce v zemskom jadre, ktoré riadia vývoj geomagnetického poľa vykazujú významné zmeny.

Tento pohyb je výsledkom zmien v geodynamike Zeme, najmä zmien v prúde tekutého kovu v jej vonkajšom jadre, kde sa generuje magnetické pole. Zmeny v sile magnetického poľa pod rôznymi regiónmi (napríklad oslabenie v Kanade a posilnenie v oblasti Sibíri) môžu tlačiť magnetický pól k Sibíri.

Vývoj geomagnetického poľa a jeho oslabenie

Geomagnetické pole Zeme predstavuje kľúčový globálny ochranný mechanizmus, ktorý chráni planétu pred nabitými časticami slnečného vetra a kozmickým žiarením (obr. 77). Je generované pohybom elektricky vodivého tekutého kovu vo vonkajšom jadre Zeme a jeho charakter sa prirodzene mení v čase. Dlhodobé merania však ukazujú, že v posledných dvoch storočiach došlo ku globálnemu oslabeniu celkovej intenzity geomagnetického poľa približne o 10 – 15 %, čo predstavuje významnú zmenu v rámci geologických mierok.

Zaujímavým aspektom je nekonzistentnosť hodnôt, ktoré boli v rôznych obdobiach komunikované verejnosti odbornou komunitou. Napríklad v roku 2004 článok v *National Geographic* uvádzal, že celkové magnetické pole Zeme zoslablo približne o 10 % od začiatku systematických meraní¹⁴³. Po spustení satelitnej misie Swarm Európskej vesmírnej agentúry v roku 2013 však viaceré zdroje, odvolávajúce sa na vtedy najnovšie dáta ESA, hovorili o oslabení až o 15 % za posledných 200 rokov¹⁴⁴. Na oficiálnych stránkach ESA sa stále nachádza vyjadrenie, ktoré bolo publikované v roku 2021, že celkový magnetický ochranný štít Zeme sa oslabil až o 15% iba za 150 rokov¹⁴⁵. Týchto 15 % už nie je len o sile, ale aj ochrannej funkcii magnetického poľa Zeme. Berie sa pritom do úvahy nie len veľkosť poľa, ale aj geometria a konfigurácia poľa, ktorá určuje ako dobre pole chráni planétu, teda regionálne slabé miesta, zmeny v magnetosfére a magnetopauze (ako ďaleko od Zeme sa pole rozťahuje a ako efektívne odkláňa slnečný vietor).



Obr. 77: Ochranný magnetický štít našej planéty, zdroj obrázka:

<https://reasons.org/explore/blogs/todays-new-reason-to-believe/earths-magnetosphere-appears-designed-for-habitability>

V súčasnosti sa však v popularizačných materiáloch najčastejšie uvádza hodnota oslabenia magnetického poľa v celosvetovom priemere iba 9 %. Tieto dáta spracováva IGRF, ide o matematický model hlavnej zložky poľa (abstraktná a zjednodušená reprezentácia poľa) a nezachytáva všetky regionálne slabé miesta. Teda:

- 9 % hovorí o slabnutí magnetického poľa ako fyzikálnej veličiny a teda o slabnutí hlavnej dipólovej zložky
- 15 % hovorí o slabnutí ochranného efektu poľa (štítu)

¹⁴³ <https://www.nationalgeographic.com/science/article/earths-magnetic-field-is-fading>

¹⁴⁴ <https://www.pbs.org/newshour/nation/are-the-earths-poles-about-the-flip>

<https://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-2545465/Forget-global-warming-worry-MAGNETOSPHERE-Earth-s-magnetic-field-collapsing-affect-climate-wipe-power-grids.htm>

¹⁴⁵ https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/FutureEO/Swarm/Our_protective_shield

https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2021/08/Our_protective_shield

Paradox, ktorý je tu kľúčový (a často sa prehliada); dipól slabne pomalšie (IGRF ~10 %), ale ochranná schopnosť poľa slabne rýchlejšie (ESA ~15 %), pretože magnetický štít nie je úmerný len veľkosti dipólu, ale aj jeho geometrii, výške magnetopauzy, regionálnym „dieram“ v poli. Inými slovami, menšia zmena v dipóle môže spôsobiť väčšiu zmenu v ochrannom účinku.

„Vedci už vedia, že magnetický sever sa posúva. Raz za niekoľko stoviek tisíc rokov sa magnetické póly otočia tak, že kompas ukazuje na juh namiesto na sever. Aj keď zmeny sily magnetického poľa sú súčasťou tohto bežného cyklu obratu pólů, údaje zo Swarm ukázali, že pole začína slabnúť rýchlejšie než v minulosti. Predtým výskumníci odhadovali, že pole slabne približne o 5 percent za storočie, no nové údaje ukázali, že pole v skutočnosti slabne o 5 percent za desaťročie, teda desaťkrát rýchlejšie, než sa predpokladalo. Preto nové údaje naznačujú, že namiesto úplného obratu o približne 2 000 rokov, ako sa predpokladalo, by sa to mohlo stať skôr.“
(Live Science¹⁴⁶)

Niektoré interpretácie satelitných meraní naznačujú, že aktuálne zmeny geomagnetického poľa by mohli predznamenať blížiaci sa obrat magnetických pólů. Navyše, aj samotné geomagnetické exkurzie sú už sprevádzané výrazným oslabovaním magnetického poľa Zeme aj so všetkými dôsledkami pre biosféru. Údaje z misí ako Swarm ukazujú, že oslabenie magnetického poľa, ktoré chráni našu Zem pred nebezpečným žiarením, sa javí rýchlejšie než staršie modely predpokladali, pole slabne rýchlejšie než desaťnásobný odhad z minulého storočia, a preto by sa ďalší obrat — kde si severný a južný pól vymenia miesta — mohol uskutočniť skôr, ako sa pôvodne predpokladalo.¹⁴⁷

Okrem globálneho oslabenia je pozornosť sústredená aj na regionálne anomálie geomagnetického poľa, najmä Juhoatlantickú anomáliu (South Atlantic Anomaly – SAA), kde je intenzita poľa výrazne nižšia než globálny priemer (oslabenie o 20 - 25% za posledných 200 rokov¹⁴⁸). Táto oblasť sa v posledných desaťročiach rozširuje a vykazuje dynamické zmeny, ktoré sú predmetom intenzívneho výskumu, keďže majú praktické dôsledky pre satelitné systémy a kozmickú techniku.

Okrem Juhoatlantickej anomálie sa v posledných rokoch čoraz väčšia pozornosť venuje aj regionálnym zmenám geomagnetického poľa na severnej pologuli, najmä v oblasti Kanady a Sibíri. Už v roku 2019 upozornili analýzy založené na satelitných a pozemných meraniach na zrýchlený presun magnetického severného pólu z kanadskej Arktídy smerom k Sibíri. Tento posun je interpretovaný ako prejav nerovnováhy v prúde tekutého železa vo vonkajšom jadre, kde sa mení relatívny vplyv hlavných magnetických „lobusov“ pod Kanadou a Sibírou.¹⁴⁹

Novšie výskumy z rokov 2024–2025, založené najmä na dátach zo satelitnej misie Swarm, ukazujú, že tieto zmeny nie sú len otázkou polohy magnetického pólu, ale sú sprevádzané aj lokálnymi oslabeniami a reorganizáciou intenzity magnetického poľa vo vysokých zemepisných šírkach severnej pologule. Štúdie poukazujú na vznik a zosilňovanie rozsiahlej oblasti so zníženou intenzitou poľa, ktorá sa rozprestiera od severnej Kanady cez Arktídu smerom k severnej Sibíri. Táto „slabá zóna“ sa síce nedá

¹⁴⁶ <https://www.livescience.com/46694-magnetic-field-weakens.html>

¹⁴⁷ <https://www.scientificamerican.com/article/earth-s-magnetic-field-flip-could-happen-sooner-than-expected/>
<https://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-5334421/Earths-magnetic-poles-signs-FLIP.html#ixzz55tuzOSAx>

¹⁴⁸ https://en.wikipedia.org/wiki/South_Atlantic_Anomaly

¹⁴⁹ <https://www.livescience.com/magnetic-north-pole-to-siberia.html>

priamo porovnávať s Juhoatlantickou anomáliou z hľadiska absolútnej intenzity oslabenia, no jej rast a priestorová kontinuita sú z geofyzikálneho hľadiska pozoruhodné.¹⁵⁰

Podľa interpretácií autorov ide o prejav prebiehajúcej reorganizácie prúdenia vo vonkajšom jadre, kde sa mení distribúcia magnetického toku na rozhraní jadra a plášte. Tieto procesy môžu prebiehať paralelne s globálnym oslabením poľa, no zároveň vytvárať výrazne asymetrický obraz regionálnych anomálií, v ktorom severná a južná pologuľa vykazujú odlišnú dynamiku.

Tieto regionálne pozorovania z Kanady a Sibíri dopĺňajú obraz Zeme ako planéty, ktorej geomagnetické pole sa nemení homogénne, ale prostredníctvom lokálnych zosilnení, oslabení a preskupení magnetických štruktúr, úzko viazaných na dynamiku tekutého vonkajšieho jadra. V spojení s globálnym oslabením poľa, Juhoatlantickou anomáliou a zmenami rotácie vnútorného jadra tak vytvárajú konzistentný, hoci komplexný obraz prebiehajúcich hlbokých procesov, ktorých úplný význam sa stále len postupne odhaľuje.

Jedným z nepriamych, no veľmi výrečných ukazovateľov postupného oslabenia magnetického poľa Zeme je nárast výskytu polárnych žiar v nezvyčajne nízkych zemepisných šírkach, bližšie k rovníku, a zároveň zmena ich charakteru a intenzity¹⁵¹. Kým v minulosti sa v strednej Európe objavovali prevažne len slabé červené odlesky, dnes sú čoraz častejšie pozorované aj zelené a ružové polárne žiary¹⁵². Červené polárne žiary vznikajú vo veľmi vysokých vrstvách atmosféry, približne nad 200 km, kde excitované atómy kyslíka vyžarujú červené svetlo. Zelené polárne žiary vznikajú v nižších výškach okolo 100–200 km, kde energetické častice interagujú s atómovým kyslíkom, zatiaľ čo ružové až fialové odtiene vznikajú ešte hlbšie, zvyčajne pod hranicou 100 km, pri excitácii molekulárneho dusíka.¹⁵³

Skutočnosť, že dnes pozorujeme zelené a ružové polárne žiary v zemepisných šírkach, kde boli kedysi výnimočné aj slabé červené prejavy, a to dokonca aj počas geomagnetických búrok nižšej intenzity, naznačuje, že nabité častice zo Slnka prenikajú hlbšie do atmosféry než v minulosti. Tento posun poukazuje na zníženú ochrannú schopnosť magnetického poľa Zeme, ktoré už nedokáže tak účinne odkláňať energetické častice, čím vytvára podmienky na častejšie, rozsiahlejšie a farebne bohatší výskyt polárnych žiar aj mimo typických aurorálnych oblastí.

Nárast pozorovaní červených polárnych žiar v nezvyčajne nízkych zemepisných šírkach

Graf na obr. 78 zobrazuje počet nocí s pozorovanou polárnou žiarou v strede Európy, v Českej republike počas jednotlivých slnečných cyklov (7. – 25. cyklus, roky 1830 - 2025). Údaje vychádzajú z archívu overených pozorovaní¹⁵⁴ a vyjadrujú počet nocí, v ktorých sa polárna žiara vyskytla – nie počet

¹⁵⁰

https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/FutureEO/Swarm/Swarm_reveals_growing_weak_spot_in_Earth_s_magnetic_field

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0031920125001414?via%3Dihub>

<https://www.livescience.com/planet-earth/a-massive-weak-spot-in-earths-magnetic-field-is-growing-scientists-disc-over>

¹⁵¹

<https://science.nasa.gov/science-research/heliophysics/how-nasa-tracked-the-most-intense-solar-storm-in-decades/>

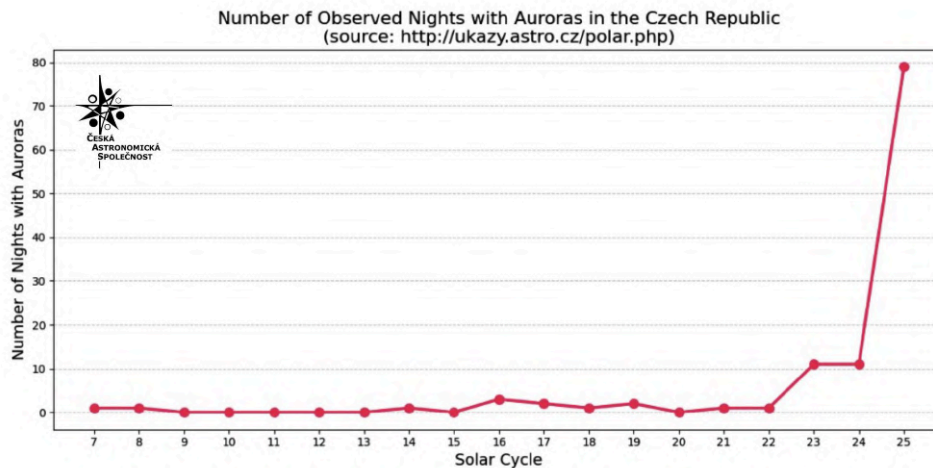
¹⁵²

<https://www.imeteo.sk/spravy/a-uz-fakt-nieco-nie-je-v-poriadku-polarna-ziara-ziskala-zelene-farby-co-je-u-nas-vzacnostou>

¹⁵³ <https://science.nasa.gov/sun/auroras/>

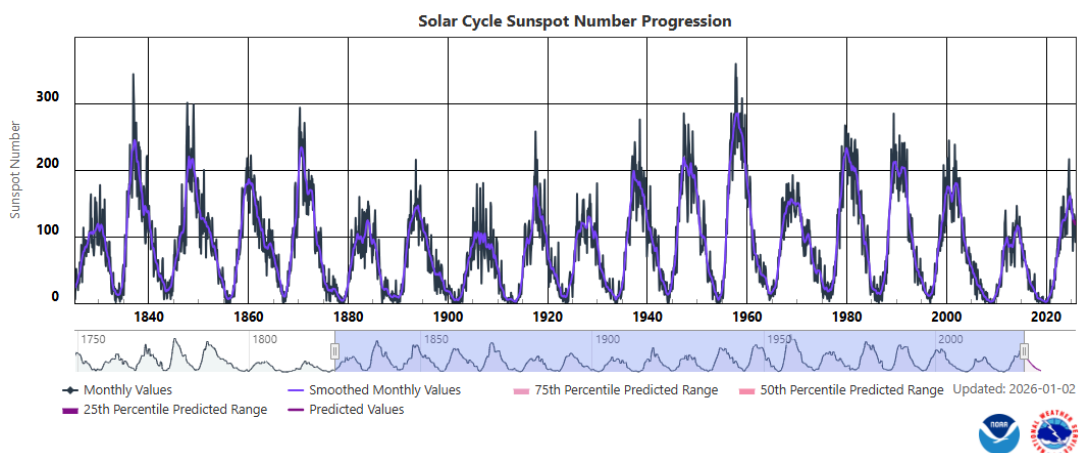
¹⁵⁴ <http://ukazy.astro.cz/polar.php>

fotografií či hlásení v rámci jednej noci. Staršie historické obdobia sú záznamy z kroník z rôznych obcí Českej republiky alebo zo starších vedeckých časopisov.



Obr. 78: Počet nocí s pozorovaniami polárných žiar v strede Európy, Česká republika, zdroj dát: <http://ukazky.astro.cz/polar.php>

Výrazný nárast v 25. slnečnom cykle nemožno vysvetliť iba lepšou technikou alebo „viacerými mobilmi“. Porovnateľné pozorovacie možnosti existovali už počas predchádzajúcich cyklov - 24. a 23. cyklus (cca od roku 2000) - aj keď pozorovacie záznamy dosahovali iba okolo 10 polárných žiar za cyklus oproti takmer 80-im v súčasnom cykle, ktorý ešte neskončil. Zároveň dostupné ukazovatele slnečnej aktivity naznačujú, že súčasný cyklus nie je fyzikálne výrazne silnejší než niektoré cykly 20. storočia (obr. 79).¹⁵⁵



Obr. 79: Sila slnečných cyklov (7. - 25. cyklus) meraná počtom slnečných škvŕn, zdroj: <https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression>

Dôležitým faktorom je aj oslabovanie magnetického poľa Zeme, ktoré funguje ako ochranný štít pred nabitými vysokoenergetickými časticami zo Slnka. Slabšia magnetická ochrana umožňuje týmto časticiam prenikať hlbšie do atmosféry a do nižších zemepisných šírok, čo môže viesť k častejšiemu výskytu polárných žiar v strednej Európe – aj bez extrémne silnej slnečnej aktivity.

¹⁵⁵ <https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression>

Porovnanie významných geomagnetických búrok podľa sily (intenzity) a výskytu polárnych žiar

Nasledujúca tabuľka porovnáva päť významných geomagnetických udalostí (Halloween Storms 29. – 30. 10. 2003 – G5, Superstorm 20. 11. 2003 – G5, Mother's Day Storm 10. 5. 2024 – G5 a Cannibal Storm 12. 11. 2025 – G4 a geomagnetická búrka z 19.1.2026 – G4) z hľadiska ich intenzity a predovšetkým rozsahu výskytu polárnych žiar na oboch hemisférach. Kľúčovými fyzikálnymi parametrami v tabuľke sú Dst index a IMF Bz, ktoré umožňujú objektívne porovnať, ako hlboko do nižších zemepisných šírok dokázali jednotlivé udalosti „zatlačiť“ aurorálny ovál.

Udalosť	Dst index (nT)	IMF Bz (min.)	Aurory v južnej hemisfére	Link	Aurory v severnej hemisfére	Link
Halloween Storms 29. - 30. 10. 2003 - G5	-350 nT	-54 nT	Austrália po Nový Južný Wales (Coonabarabran 31°S)	https://www.sws.bom.gov.au/Educational/1/3/16	Európa až po Rakúsko, Španielsko, Katalánsko (Lleida 41,5°N)	https://spaceweather.com/aurora/gallery_01oct03_page4.html
	-383 nT	-35,5 nT			USA od Kalifornie až po Texan (Houston 30°N) a po Floridu	https://www.swpc.noaa.gov/sites/default/files/rimages/Service%20Assessment%20Sep%202007.%202004.pdf
Superstorm 20. 11. 2003 - G5	-422 nT	-53 nT	Nie v obývaných oblastiach, iba v blízkosti Antarktídy	https://svs.gsfc.nasa.gov/2857/	Európa Slovinsko, Chorvátsko až po Grécko (Atény 38°N), USA až po Georgia (Atlanta 34°N) a po Floridu	https://spaceweather.com/aurora/gallery_01nov03_page3.html
Mother's Day Storm 10. 5. 2024 - G5	-412 nT	-50 nT	Rozsiahle Aurora Australis viditeľné v Austrálii až po severný Queensland (Townsville 19°S), Nový Zéland, Chile (Magallanes), Argentína, Uruguaj, južná Brazília, Juhoafrická republika a Namibia	https://en.wikipedia.org/wiki/May_2024_solar_storms	Aurory viditeľné v USA až po Florida Keys, Mexiko (polostrov Yucatan), Bahamy, Jamajka, Portoriko 18°N, Hawaj; v Európe na juh až po Portugalsko, Španielsko, Sardínia, Alžírsko, Kanárske ostrovy (La Palma 28°N); v Ázii napr. Turecko, India, Japonsko, Čína	https://en.wikipedia.org/wiki/May_2024_solar_storms
"Cannibal Storm" 12. 11. 2025 - G4	-238 nT	-49,5 nT	Rozsiahle Aurora Australis vo veľkej časti Austrálie a na Novom Zélande až po Queensland (Texas 29°S)	https://www.abc.net.au/news/2025-11-13/aurora-australis-in-photos-november-2025/106003620	Výrazné zelené aurory, s červenými, fialovými a ružovými odtieňmi nad väčšinou USA, siahajúcimi až na Texas, Georgiu a na Floridu (Space Coast 28°N)	https://www.space.com/stargazing/auroras/severe-geomagnetic-storm-sparks-northern-lights-across-north-america-and-as-far-south-as-mexico-photos
					Mexico (Zacatecas 23°N)	https://watchers.news/2025/11/12/two-cmes-impact-earth-sparking-g4-severe-geomagnetic-storming-and-aurora-as-far-south-as-mexico/
					severná Európa až po Rakúsko, Maďarsko	https://phys.org/news/2025-11-solar-storms-northern-unexpected.html
					Španielsko (Katalánsko, Andalúzia, Calar Alto 37°N)	https://www.caha.es/science-mainmenu-95/meteors-and-fireballs/impressive-and-beautiful-aurora-borealis-on-november-12th-2025
19. 1. 2026 – G4	-119 nT	-49 nT	Rozsiahle polárne žiary v Tasmánii, Viktórii, Južnej Austrálii, Novom Južnom Wales, Západnej Austrálii a Queenslande (ostrov Hamilton 20,5°S)	https://www.abc.net.au/news/2026-01-21/spectacular-aurora-australis-seen-across-australia/106251474	Pozorované nad veľkou časťou Európy až po: Francúzsko, Rumunsko, Švajčiarsko, Chorvátsko, Portugalsko (40°N), USA: až na juh do Alabamy, Georgie, Nového Mexika (Deming 32°N), Ázia: Čína	https://watchers.news/2026/01/20/cme-impact-causes-g4-severe-geomagnetic-storm-amazing-aurora-across-usa-and-europe/
						https://www.space.com/stargazing/auroras/severe-g4-geomagnetic-storm-sparks-jaw-dropping-northern-lights-worldwide-photos

Poradie geomagnetických búrok podľa rozsahu výskytu polárnych žiar (podľa zemepisných šírok):

1. Mother's Day Storm – 10. 5. 2024 (G5)

Najrozsiahlejšia udalosť zo všetkých porovnávaných. Polárne žiary boli pozorované mimoriadne blízko k rovníku na oboch hemisférach – na severnej až v Karibiku (okolo 18° s. š.) a na južnej v severnej Austrálii (okolo 19° j. š.). Výskyt bol veľmi vyvážený medzi oboma pologuľami, čo z nej robí globálne najvýraznejšiu aurorálnu udalosť.

2. Cannibal Storm – 12. 11. 2025 (G4)

Napriek nižšej kategórii búrky prenikli polárne žiary veľmi blízko k rovníku. Na severnej hemisfére boli zaznamenané až v Mexiku (približne 23° s. š.) a na južnej v Austrálii okolo 29° j. š. V porovnaní s historickými búrkami boli aurory geograficky rozsiahlejšie, než by sa pri tejto intenzite očakávalo.

3. Halloween Storms – 29.–30. 10. 2003 (G5)

Išlo o mimoriadne silné geomagnetické búrky, ktoré vznikli tesne po sebe a navzájom sa spojili do jednej intenzívnej, niekoľko dní trvajúcej udalosti zasahujúcej Zem. Spôsobili ich dve veľmi silné slnečné erupcie, ktoré nastali v priebehu približne 24 hodín. Aurory sa počas tejto známej udalosti dostali hlboko do miernych zemepisných šírok, no nie tak blízko k rovníku ako pri Cannibal Storm. Na severnej hemisfére boli viditeľné až v južných častiach USA (okolo 30° s. š.), strednej Európy až v Katalánsku a na južnej hemisfére v Austrálii približne do 31° j. š.

4. Geomagnetická búrka – 19. 1. 2026 (G4)

Táto udalosť mala nerovnomerný priebeh. Na južnej hemisfére prenikli polárne žiary veľmi nízko, až do severnej Austrálie (okolo 20,5° j. š.), zatiaľ čo na severnej hemisfére zostali vo vyšších zemepisných šírkach, najmä nad južnou Európou a juhom USA. Treba zdôrazniť, že slnečná erupcia, ktorá túto udalosť spôsobila bola klasifikovaná ako X1.9, čo je výrazne slabšia erupcia, ako tie, ktoré spôsobili ostatné geomagnetické udalosti uvádzané vyššie.

5. Superbúrka – 20. 11. 2003 (G5)

Hoci išlo o veľmi silnú geomagnetickú búрку, výskyt polárnych žiar bol z globálneho hľadiska najmenej rozsiahly. Na severnej hemisfére sa dostali do južných častí USA a Európy, no na južnej hemisfére zostali prevažne v blízkosti Antarktídy a neprenikli do nízkych zemepisných šírok.

Extrémne geomagnetické udalosti, ako Carringtonova udalosť z roku 1859 (odhadovaný Dst -900 nT^{156} až -1750 nT^{157}), ktorá je považovaná za najintenzívnejšiu geomagnetickú búрку v zaznamenanej histórii, dokázali vyvolať výskyt polárnych žiar až v tropických zemepisných šírkach na severnej aj južnej pologuli. V tomto prípade však išlo o výnimočnú situáciu, keď Zem zasiahla mimoriadne silná slnečná erupcia s odhadovanou intenzitou až okolo triedy X50. Práve táto extrémna energia zo Slnka bola kľúčovým faktorom, ktorý umožnil tak výrazné rozšírenie aurorálneho oválu smerom k rovníku. Nešlo teda o bežný jav, ale o dôsledok jednej z najsilnejších slnečných erupcií, aké boli kedy zaznamenané.

NASA považuje tzv. *Mother's Day Storm* za najsilnejšiu slnečnú búрку, ktorá zasiahla Zem za posledné dve desaťročia, pričom sprievodné polárne žiary patria k najintenzívnejším pozorovaným za približne

¹⁵⁶ <https://www.usgs.gov/programs/geomagnetism/science/severe-magnetic-storm-january-6-2025>

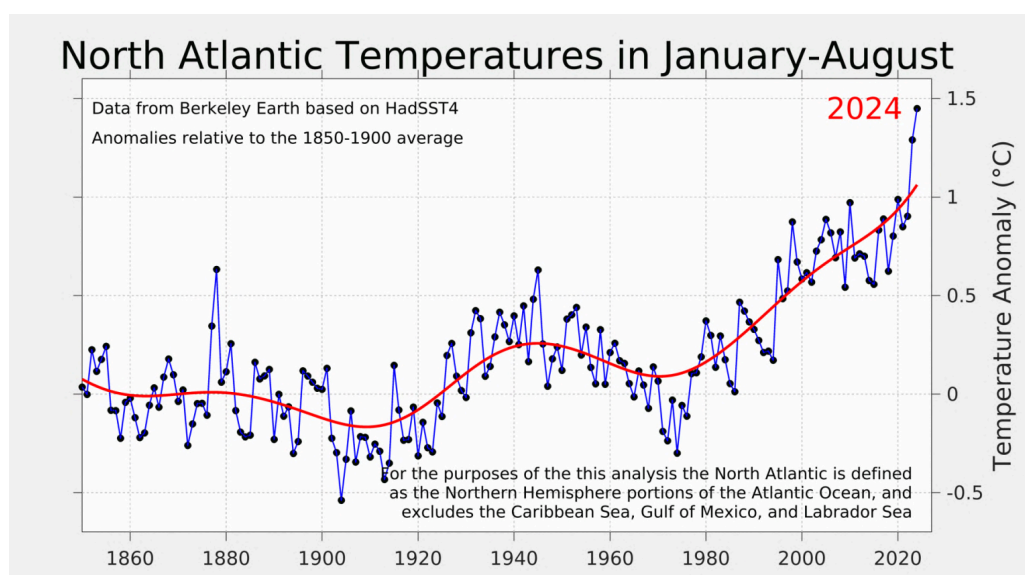
¹⁵⁷ https://science.nasa.gov/science-research/planetary-science/23jul_superstorm/

až 500 rokov¹⁵⁸. Zároveň však viaceré pozorovania naznačujú, že v súčasnosti dokážu aj menej energetické slnečné a geomagnetické udalosti vyvolať výskyt polárnych žiar v neobvykle nízkych zemepisných šírkach, bližšie k rovníku, než bolo bežné v minulosti. Tento jav, ktorý bol kedysi typický najmä pre extrémne slnečné búrky, poukazuje na zvýšenú citlivosť magnetosféry Zeme a je konzistentný s dlhodobým trendom postupného oslabovania geomagnetického poľa.

Otepľovanie oceánov a zmeny v oceánskych prúdoch

Bezprecedentné otepľovanie oceánov v posledných rokoch

Oceány Zeme sa v posledných rokoch otepľujú tempom, ktoré nemá obdobu v modernej histórii meraní. Podľa údajov NOAA, Copernicus Marine Service a NASA dosiahli globálne teploty povrchu oceánov v rokoch 2023 – 2025 historické maximá, pričom viacero mesiacov po sebe prekonávalo dlhodobé rekordy.



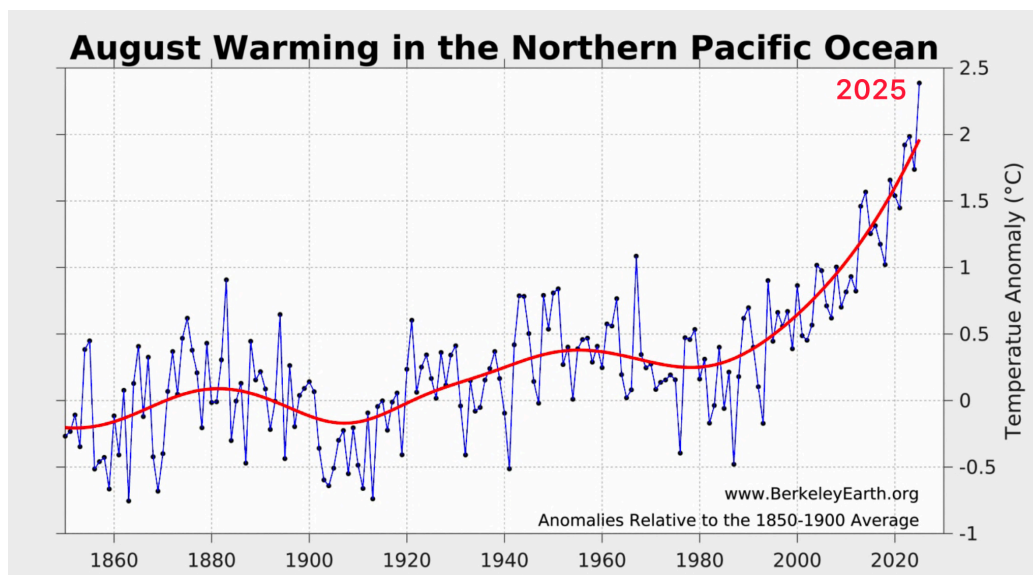
Obr. 80: Teploty severného Atlantického oceánu za obdobie január-august v rokoch 1850-2024, zdroj: <https://berkeleyearth.org/august-2024-temperature-update/>

Mimoriadne výrazné je otepľovanie severného Atlantiku, kde boli v lete 2024 zaznamenané odchýlky +1 °C až +1,5 °C nad priemerom rokov 1850 – 1900, čo je v mierkach oceánografie extrémna hodnota (obr. 80)¹⁵⁹. Severný Atlantik pritom zohráva kľúčovú úlohu v globálnej cirkulácii oceánov a regulácii klímy.

158

<https://science.nasa.gov/science-research/heliophysics/how-nasa-tracked-the-most-intense-solar-storm-in-decades/>

159 <https://berkeleyearth.org/august-2024-temperature-update/>



Obr. 81: Teploty severného Tichého oceánu v auguste v rokoch 1850-2025, zdroj: <https://berkeleyearth.org/august-2025-temperature-update/>

Teploty v severnom Pacifiku dosahovali historické rekordy za ktorýkoľvek mesiac v prvej polovici roka 2025 (obr. 81) a dosahovali teplotné anomálie, ktoré sú typickejšie pre pevninské oblasti ako pre veľké oceánske panvy. Toto otepľovanie pokračuje v dlhodobom trende posledných troch desaťročí, ktorý sa však v poslednom čase zrýchlil. Podľa Berkeley Earth nedávne otepľovanie v severnom Pacifiku prebieha rýchlejšie, ako modely pre túto časť sveta predpokladali.¹⁶⁰

Viacerí klimatológovia zároveň upozorňujú, že rozsah otepľovania oceánov v posledných rokoch presiahol nielen historické rekordy, ale aj očakávania klimatických modelov. Vedec NASA Gavin Schmidt sa v tejto súvislosti vyjadril, že vývoj v roku 2023 nepredstavoval len pokračovanie známeho trendu, ale obsahoval aj „ďalší faktor navyše“, ktorý spôsobil dodatočné oteplenie. Podľa jeho slov je tento dodatočný efekt výrazne väčší, než vedci predpokladali alebo zatiaľ dokážu uspokojuivo vysvetliť.¹⁶¹

Otepľovanie oceánov v hĺbke: menej viditeľné, no zásadné

Zvlášť znepokojujúcim aspektom súčasného vývoja je fakt, že oceán sa nezohrieva iba na povrchu, ale aj v stredných a veľkých hĺbkach. Štúdiá rekonštruujúca teplotný vývoj Tichého oceánu za posledných 10 000 rokov ukazuje, že stredné hĺbky oceánov sa za posledných približne 60 rokov otepľovali až 15-krát rýchlejšie než počas predchádzajúcich tisícročí.¹⁶²

Priame dôkazy hlbokomorského otepľovania priniesla aj štúdiá z oblasti pri pobreží Uruguaja, kde bolo v hĺbke približne 4,5 km zaznamenané oteplenie vody o 0,02 – 0,04 °C. Hoci sa môže zdať táto zmena zanedbateľná, ide o obrovské množstvo akumulovaného tepla vzhľadom na gigantický objem hlbokého

¹⁶⁰ <https://berkeleyearth.org/august-2025-temperature-update/>

¹⁶¹ <https://phys.org/news/2024-01-driven-mystery-nasa-scientist.html>

¹⁶²

https://www.researchgate.net/publication/258215955_Pacific_Ocean_Heat_Content_During_the_Past_10000_Years

oceánu.¹⁶³ Ako uviedol oceánograf Christopher Meinen:

„Ak sa zamyslíme nad objemom hlbokého oceánu, ide o obrovské množstvo tepla.“ (Meinen, 2020¹⁶⁴)

Tieto zistenia potvrdzujú, že oceán funguje ako masívny tepelný rezervoár, v ktorom aj zdanlivo malé teplotné zmeny predstavujú zásadný energetický posun v systéme Zeme.

Vplyv otepľovania na oceánske prúdy

Oceánske prúdy sú výsledkom kombinácie vetra, rozdielov teploty a slanosti (hustoty vody), rotácie Zeme a konfigurácie oceánskeho dna. Spolu vytvárajú globálny „dopravný pás“ (termohalinnú cirkuláciu), ktorý zásadne ovplyvňuje klímu planéty.

Nedávne výskumy ukazujú, že zmeny teploty a hladiny oceánov ovplyvňujú cirkuláciu dokonca aj v abysálnych (veľmi hlbokých) vrstvách oceánu. Štúdia publikovaná v *Scientific Reports* (2023) preukázala, že anomálie morskej hladiny sú prepojené so zmenami cirkulácie v hĺbkach niekoľkých kilometrov, čo potvrdzuje vertikálnu prepojenosť oceánskeho systému.¹⁶⁵

Z globálneho pohľadu sa zdá, že väčšina oceánskych prúdov sa od 90. rokov 20. storočia zrýchľuje – podľa štúdie z roku 2020 až o približne 36 % za 30 rokov, pravdepodobne v dôsledku energetickej nerovnováhy klimatického systému a otepľovania oceánov.¹⁶⁶

Golfský prúd a AMOC

Výraznou výnimkou z tohto trendu je Atlantická meridionálna cirkulácia (AMOC), ktorej súčasťou je aj Golfský prúd. Ten zabezpečuje prenos tepla z tróпов do severného Atlantiku a je dôvodom, prečo je severozápadná Európa výrazne teplejšia než oblasti v rovnakej zemepisnej šírke v Severnej Amerike.

Viaceré štúdie naznačujú, že AMOC v posledných desaťročiach oslabuje a že v rokoch 2009–2010 došlo k jej náhlemu spomaleniu približne o 30 %, čo výrazne presiahlo očakávania modelov¹⁶⁷. Zaujímavé je, že toto obdobie sa časovo zhoduje s výraznou teplotnou anomáliou severného Atlantiku¹⁶⁸, ako aj s intenzívnou seizmickou a vulkanickou aktivitou v oblasti stredoatlantického hrebeňa a Islandu (erupcia Eyjafjallajökull v 2010)¹⁶⁹.

Mediálne správy z posledných rokov často hovoria o možnom kolapse Golfského prúdu alebo AMOC už v najbližších desaťročiach, niektoré dokonca uvádzajú možnosť okolo roku 2025. Kolaps by mal pre Európu dramatické dôsledky – výrazné ochladenie, zmeny zrážkových režimov a rozšírenie arktického vplyvu smerom na juh.¹⁷⁰

¹⁶³ <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2020GL089093>

¹⁶⁴

<https://www.theguardian.com/environment/2020/oct/14/enormous-amount-of-heat-even-deepest-ocean-is-warming-study?ref=marketbulletin-dotcom>

¹⁶⁵ <https://www.nature.com/articles/s41598-023-48074-9>

¹⁶⁶ <https://phys.org/news/2020-02-global-ocean-circulation-1990s.html>

¹⁶⁷

https://www.researchgate.net/publication/262983696_Impact_of_a_30_reduction_in_Atlantic_meridional_overturning_during_2009-2010

¹⁶⁸ <https://www.sciencenews.org/article/north-atlantic-heat-record-sea-surface-temperature>

¹⁶⁹ https://en.wikipedia.org/wiki/2010_eruptions_of_Eyjafjallaj%C3%B6kull

¹⁷⁰ <https://www.nature.com/articles/s41467-023-39810-w>

<https://www.theguardian.com/environment/2023/jul/25/gulf-stream-could-collapse-as-early-as-2025-study-suggests>

<https://edition.cnn.com/2023/07/25/world/gulf-stream-atlantic-current-collapse-climate-science-intl/index.html>

Úloha geotermálneho tepla

Popri vplyve topenia grónskych ľadovcov a prísunu sladkej vody do severného Atlantiku sa čoraz viac diskutuje aj úloha geotermálneho tepla z oceánskeho dna. Viaceré modelové a observačné štúdié ukazujú, že geotermálny ohrev môže významne ovplyvňovať hlbokooceánsku cirkuláciu a meniť rozloženie tepla v oceáne.¹⁷¹

Hoci väčšina stredoatlantického hrebeňa nie je detailne monitorovaná, existujú dôkazy o zvýšenej hydrotermálnej a vulkanickej aktivite v severnom Atlantiku okolo rokov 2009 – 2010 (napr. Lucky Strike Ridge, Island), čo mohlo prispieť k vytvoreniu abnormálne teplej vodnej „škrvny“, ktorá ovplyvnila dynamiku Gofského prúdu.¹⁷²

Väzby medzi seizmickou aktivitou a teplotnými anomáliami oceánov

Niektoré výskumy naznačujú, že procesy prebiehajúce hlboko pod oceánskym dnom môžu byť prepojené s tým, čo následne pozorujeme na povrchu oceánov. Konkrétne ide o možné súvislosti medzi seizmickou aktivitou a zmenami teploty morskej hladiny (SST – Sea Surface Temperature), ktoré poukazujú na komplexnejšie prepojenie medzi litosférou, oceánom a atmosférou.

Bruce Leybourne a jeho kolegovia analyzovali seizmické záznamy spolu so satelitnými meraniami teploty oceánov a zamerali sa najmä na oblasť Stredozemného a Jadranského mora, teda tektonicky aktívny región rozhraní platní. Identifikovali obdobia zvýšenej seizmickej aktivity, ktoré sa objavovali v krátkych pulzoch (dni až týždne), pričom následne – s časovým oneskorením približne 1 až 2 mesiace – zaznamenali nárast teploty morskej hladiny. Autori tieto súvislosti interpretujú ako možný dôsledok transportu tepla z hlbších vrstiev oceánu smerom k povrchu, potenciálne súvisiaceho so zvýšeným geotermálnym tokom alebo hydrotermálnou aktivitou.¹⁷³

Určitý typ väzby medzi seizmicitou a klímou popisuje Oleg Molchanov, ktorý analyzoval dlhodobé dáta z rokov 1973 až 2008 v oblasti rovníkového Pacifiku. Zameril sa na porovnanie seizmickej aktivity s teplotnými anomáliami oceánu reprezentovanými SST indexmi viazanými na ENSO. Zistil podobnú periodicitu oboch javov, pričom zmeny v seizmicite predchádzali teplotné anomálie približne o 1,5 roka.¹⁷⁴

Výraznejšie prepojenie medzi tektonickou aktivitou a globálnou teplotou rozpracúva Viterito, ktorý sa sústreďuje na seizmicitu v oblastiach stredoocéánskych chrbtov (mid-ocean spreading zones). Vo svojej práci poukazuje na výrazný nárast seizmickej aktivity v týchto oblastiach približne od roku 1995, keď priemerný ročný počet zemetrasení s magnitúdou 4 až 6 vzrástol zo zhruba 225 udalostí (v období 1990 – 1994) na viac než 510 udalostí ročne v nasledujúcich rokoch, čo predstavuje nárast o približne 127 %. Tento posun na vyššiu úroveň seizmicity sa stabilizoval v priebehu približne dvoch rokov a

¹⁷¹

https://www.researchgate.net/publication/280930612_Impact_of_the_oceanic_geothermal_heat_flux_on_a_glacial_ocean_state

<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/2000JC000532>

<https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/29/16/jcli-d-15-0458.1.xml>

<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2008gl036078>

¹⁷² <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0012821X13002161>

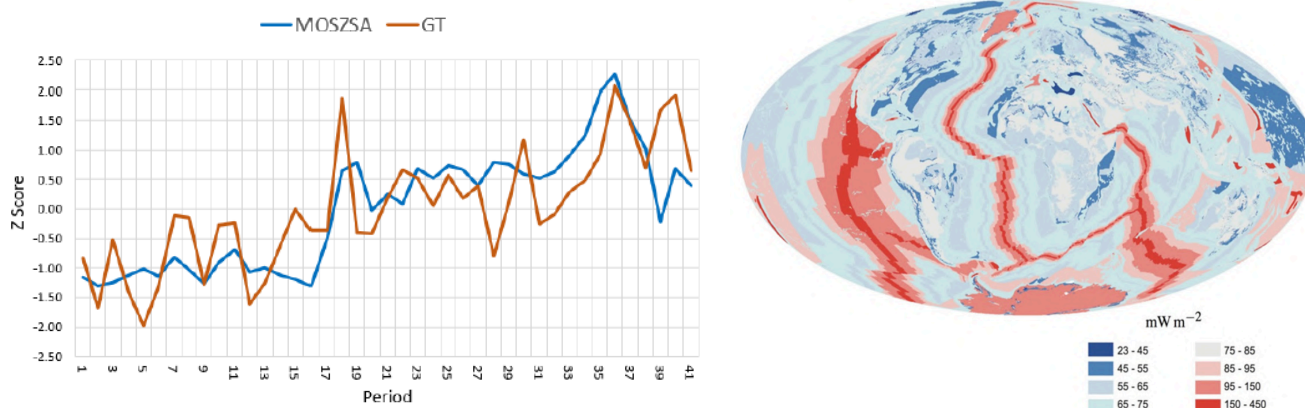
<https://www.plateclimatology.com/gulf-stream-shut-down-caused-by-geological-heat-flow/>

¹⁷³

<https://www.semanticscholar.org/paper/Earthquakes-Linked-to-2003-European-Heat-Wave%3A-for/33369dc72b64fe006e1deac8d0922ac08ba47687>

¹⁷⁴ <https://nhess.copernicus.org/articles/10/299/2010/nhess-10-299-2010.pdf>

časovo sa zhoduje so sériou zmien v klimatickom systéme, vrátane rastu globálnych teplôt, zmien v termohalínnej cirkulácii, charakteristikách El Niño či dynamike arktického ľadu. Viterito tieto súvislosti interpretuje ako možný dôsledok zvýšeného prísunu tepla do oceánov z oblastí oceánskych chrbtov, ktorý sa následne môže šíriť oceánskou cirkuláciou a ovplyvňovať globálnu klímu (obr. 82).¹⁷⁵



Obr. 82: **Nalavo:** Súčasný rast globálnych teplôt (GT) a seizmickej aktivity v zóne stredoocéánskych chrbtov (MOSZSA) od roku 1979 do roku 2021 s dvojnásobným oneskorením zohľadneným v analýze (t. j. MOSZSA z roku 1979 je spárovaná s GT z roku 1981, MOSZSA z roku 1980 je spárovaná s GT z roku 1982 atď.), zdroj:

<https://juniperpublishers.com/ijesnr/IJESNR.MS.ID.556271.php>

Napravo: Geotermálny ohrev stredoocéánskych chrbtov, zdroj:

https://www.researchgate.net/publication/256542901_Earth's_surface_heat_flux

Súčasnú pozorovanú otepľovanie oceánov – na povrchu aj v hĺbkach – spolu so zmenami v oceánskej cirkulácii naznačujú, že oceánsky systém Zeme prechádza mimoriadne dynamickým obdobím, porovnateľným s veľkými klimatickými prechodmi v minulosti. Hoci priame príčinné prepojenia medzi jednotlivými javmi (klimatické zmeny, geotermálne procesy, cirkulácia) ešte nie sú úplne objasnené, dostupné dáta ukazujú, že ide o globálnu a hlboko prepojenú reorganizáciu systému oceán–klíma.

Naposledy sa Golský prúd zastavil pred 12 000 rokmi na začiatku holocénu, kedy prebiehala klimatická zmena a teploty výrazne stúpali¹⁷⁶. Nielen spomaľovanie Golského prúdu, ale i ďalšie súčasné pozorovania ako otepľovanie oceánov či topenie grónskych ľadovcov¹⁷⁷ naznačujú, že zmeny, ktoré sa teraz odohrávajú, sa diali naposledy v takom rozsahu pred 12 000 rokmi.

¹⁷⁵ <https://juniperpublishers.com/ijesnr/IJESNR.MS.ID.556271.php>

¹⁷⁶ <https://www.britannica.com/science/climate-change/Abrupt-climate-changes-in-Earth-history>

¹⁷⁷

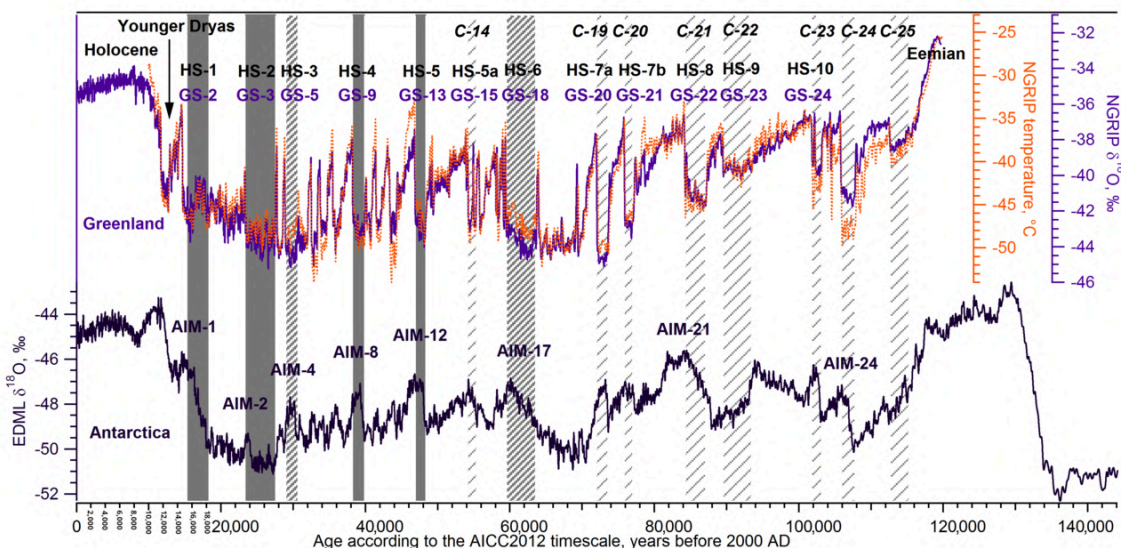
<https://www.sciencealert.com/losing-greenland-s-ice-will-raise-seas-higher-than-any-level-seen-in-12-000-years>

11. Opakujúce sa cyklické udalosti v histórii Zeme

História Zeme je charakteristická opakujúcimi sa cyklami klimatických a geodynamických zmien, ktoré prebiehajú v mierkach stoviek až tisícov rokov. Okrem dobre známych Milankovičových cyklov boli v geologických a paleoklimatických záznamoch identifikované aj výrazné opakujúce sa udalosti spojené s rýchlymi zmenami klímy, oceánskej cirkulácie, rozsahu ľadovcov a magnetického poľa Zeme. Tieto javy naznačujú, že klimatický systém Zeme funguje v režime prerušovaných, no opakovateľných prechodov medzi stabilnými a nestabilnými stavmi.

V priebehu posledných 130 000 rokov sa opakovane objavujú cyklické udalosti (obr. 83), pri ktorých sa spájajú:

- podpovrchové otepľovanie oceánov,
- kolaps alebo oslabenie veľkých morských prúdov,
- masívne výrony ľadovcov do oceánu,
- zvýšená sopečná aktivita,
- výkyvy magnetického poľa Zeme.



Obr. 83: Chronológia klimatických udalostí dôležitých pre posledné obdobie ľadovcové (~posledných 120 000 rokov), ako boli zaznamenané v polárnych ľadových jadrách, a približná relatívna poloha Heinrichových udalostí HS-1 - HS-10, pôvodne zaznamenaných v jadrách morských sedimentov zo severného Atlantiku, zdroj:

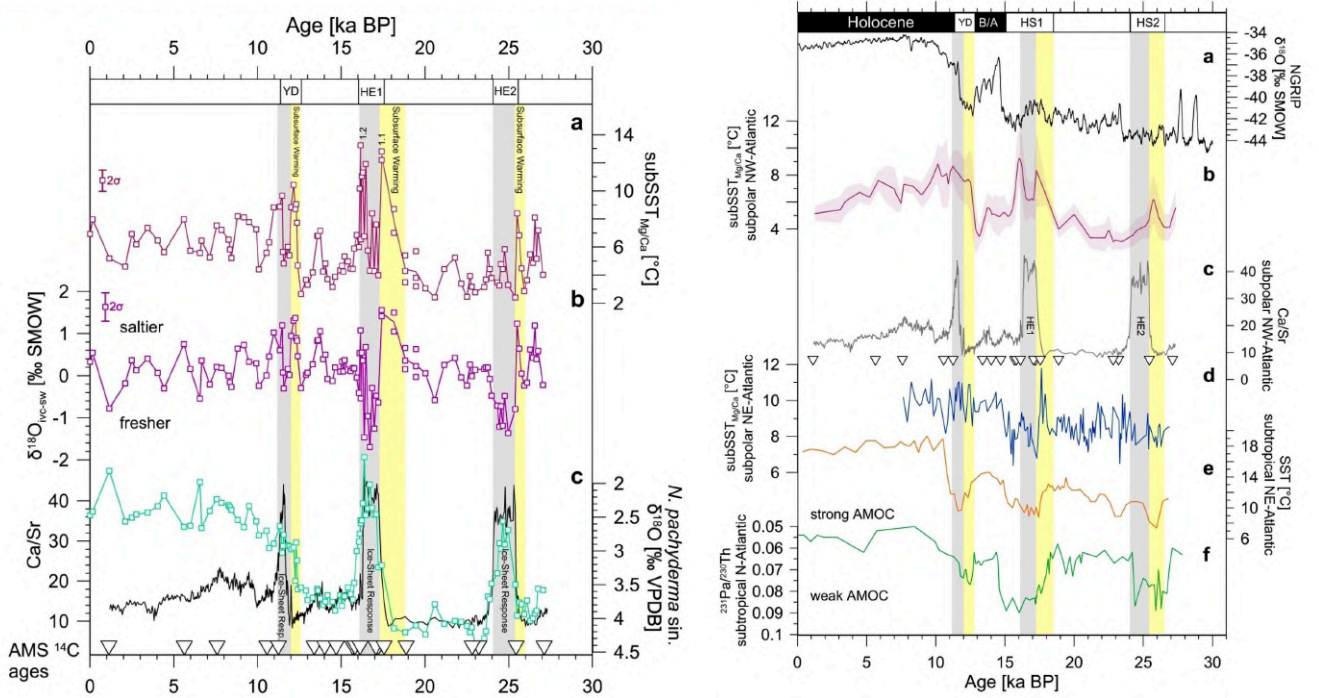
https://en.wikipedia.org/wiki/Heinrich_event#/media/File:Approximate_chronology_of_Heinrich_events_vs_Dansgaard-Oeschger_events_and_Antarctic_Isotope_Maxima.png

Jedným z najvýraznejších príkladov takýchto cyklických procesov sú epizódy masívneho uvoľňovania ľadovcov do severného Atlantiku, ktoré sa opakovane vyskytovali počas posledných glaciálnych období s približnou periódou okolo 10–12 tisíc rokov, pomenované ako Heinrichove udalosti¹⁷⁸. Týmto udalostiam predchádzalo podpovrchové otepľovanie oceánu v subpolárnych oblastiach severného Atlantiku a oslabenie veľkopriestorovej oceánskej cirkulácie (obr. 84). Teplé podpovrchové vody v hĺbkach stoviek metrov destabilizovali ľadové šelfy a ľadovce „zdola“, čo viedlo k ich kolapsu a následným rýchlym klimatickým zmenám, a to aj bez výrazného predchádzajúceho otepľovania atmosféry.¹⁷⁹

178

https://www.researchgate.net/publication/223634267-Origin_and_Consequences_of_Cyclic_Ice_Rafting_in_the_Northeast_Atlantic_Ocean_During_the_Past_130000_Years

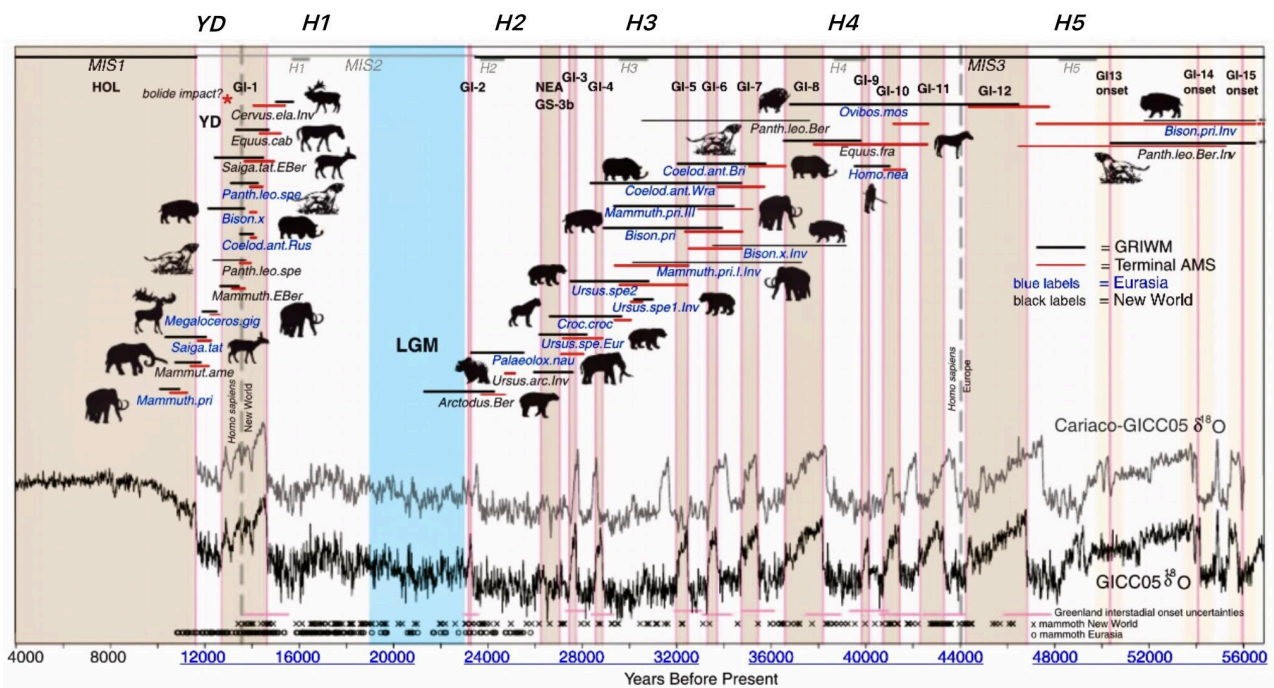
179 https://www.researchgate.net/publication/362166766-Subsurface_ocean_warming_preceded_Heinrich_Events



Obr. 84: **Naľavo:** Záznamy zo sedimentov na dne oceánu za posledných 27 000 rokov ukazujú, že voda pod hladinou oceánu sa začala výrazne oteplovať ešte pred Heinrichovými udalosťami. To znamená, že oceán sa najskôr zohrieva v hlbších vrstvách a až následne došlo k masívnemu uvoľňovaniu ľadu do mora.

Napravo: Porovnanie zástupných klimatických údajov zo sedimentov morského dna s údajmi z Grónska a severného Atlantiku za posledných 27 000 rokov ukazuje, že hlavná oceánska cirkulácia v Atlantiku (AMOC) sa oslabovala ešte pred Heinrichovými udalosťami, a to súčasne s otepľovaním vody pod hladinou oceánu.

Zdroj: <https://www.researchgate.net/publication/362166766> Subsurface ocean warming preceded Heinrich Events



Obr. 85: Hlavné prechodné udalosti megafauny (celoregionálne vymieranie alebo globálne vymieranie alebo invázie druhov alebo hlavných kladov) a klimatické záznamy neskorého pleistocénu, Heinrichove udalosti H1 - H5, zdroj:

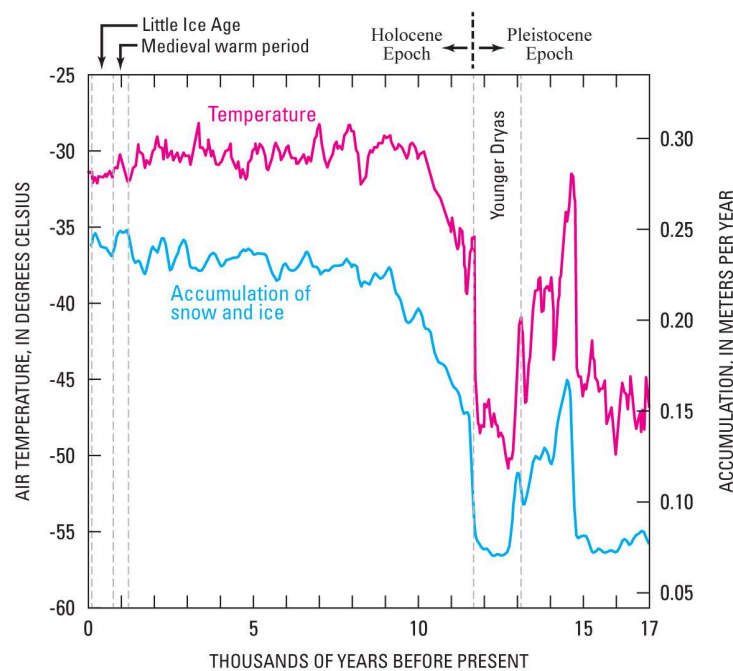
<https://www.researchgate.net/publication/280733346> PALEOECOLOGY Abrupt warming events drove Late Pleistocene Holarctic megafaunal turnover

Rýchle klimatické prechody mali zároveň zásadný vplyv na biosféru. Paleoeologické záznamy naznačujú, že prudké otepľovania a reorganizácie klímy zohrali významnú úlohu pri rozsiahlych ekologických zmenách vrátane vyhynutia veľkých živočíšnych druhov na severnej pologuli na konci poslednej doby ľadovej (Obr. 85). Tieto udalosti poukazujú na vysokú citlivosť prírodných systémov na náhle klimatické impulzy.¹⁸⁰

Súhrnne tieto poznatky ukazujú, že klimatické, oceánske a geodynamické procesy Zeme nevykazujú len plynulý vývoj, ale aj opakujúce sa fázy zrýchlených a náhlych zmien. Vzorce pozorované v minulosti naznačujú, že vnútorné spätné väzby systému Zeme môžu v určitých obdobiach viesť k rýchlym prechodom medzi odlišnými stavmi planéty, čo má významné dôsledky pre pochopenie súčasných aj budúcich zmien.

Mladší dryas – náhle klimatické zmeny a geomagnetická exkurzia Gothenburg

Obdobie pred približne 12 900 – 11 700 rokmi je známe ako Mladší dryas. Išlo o náhlu a dramatickú klimatickú epizódu, ktorá prerušila postupné otepľovanie po poslednej dobe ľadovej (obr. 86). Po rýchlom a výraznom otepľovaní sa severná pologuľa opäť prudko ochladila, a to o niekoľko stupňov.



Obr. 86: Zmeny teploty odobraté z centrálnej oblasti grónskeho ľadového štítu počas neskorého pleistocénu a začiatku holocénu, zdroj: <https://pubs.usgs.gov/pp/p1386a/gallery2-fig35.html>

Z pohľadu klímy bol Mladší dryas šokom:

- ľadovce sa prestali topiť alebo sa opäť rozšírili,
- vegetácia sa rýchlo zmenila,
- ekosystémy sa dostali pod extrémny tlak,

180

https://www.researchgate.net/publication/280733346_PALEOECOLOGY_Abrupt_warming_events_drove_Late_Pleistocene_Holarctic_megafaunal_turnover

- mnohé populácie megafauny definitívne vymizli.

Dôležité však je, že Mladší dryas nebol len klimatickou udalosťou. Prebiehal súčasne s výraznými zmenami v oceánskej cirkulácii, sopečnej aktivite aj geomagnetickom poli Zeme.

Kolaps oceánskych prúdov a ochladenie planéty

Jedným z kľúčových mechanizmov Mladšieho dryasu bolo oslabenie až kolaps Atlantickej meridionálnej cirkulácie (AMOC), teda systému prúdov, ktorého súčasťou je aj Gólfsky prúd.

Pred touto udalosťou:

- severný Atlantik vykazoval výrazné podpovrchové otepľovanie oceánu,
- teplé vody sa hromadili pod hladinou,
- ľadové štíty boli destabilizované zdola.

Dôležité je, že oceány sa pod povrchom otepľovali – čo je presne ten istý vzorec, ktorý pozorujeme aj dnes.

Vulkanizmus na prahu holocénu

Obdobie Mladšieho dryasu a jeho bezprostredné okolie bolo zároveň jedným z najaktívnejších sopečných období posledných desiatok tisíc rokov.

Jednou z diskutovaných hypotéz vysvetľujúcich náhle ochladenie v období Mladšieho dryasu bola predstava dopadu veľkého kozmického telesa (kométy, meteoritu) v atmosfére. Geochemické záznamy zo sedimentov však ukazujú, že anomálie zaznamenané na prelome pleistocénu a holocénu možno vysvetliť aj bez potreby extraterestrického impaktu. Ich charakter zodpovedá skôr rozsiahlej a časovo kumulovanej vulkanickej aktivite, ktorá do atmosféry uvoľnila veľké množstvo aerosólov, síranov a jemného prachu schopného výrazne ovplyvniť klímu severnej pologule.¹⁸¹

Za jeden z hlavných spúšťačov klimatických zmien na začiatku Mladšieho dryasu sa považuje mohutná explozívna erupcia sopky Laacher See v dnešnom Nemecku, ku ktorej došlo približne pred 13 000 rokmi. Táto erupcia patrila medzi najväčšie v Európe za posledné stovky tisíc rokov, mala index VEI 6 a bola mimoriadne bohatá na sírany. Vypustené aerosóly sa rýchlo rozšírili nad severným Atlantikom a Európou, kde mohli zosilniť ochladzovací efekt už oslabenej oceánskej cirkulácie. Uvažuje sa aj o tom, že nešlo o izolovanú udalosť, ale o súčasť širšej fázy zvýšenej aktivity viacerých vulkanických systémov severnej pologule.¹⁸²

Pred približne 13 100 rokmi aj výrazná vulkanická fáza Glacier Peak v oblasti severozápadného Pacifiku, ktorá nepredstavovala jedinou erupciu, ale sled veľkých explozívnych udalostí (obr. 87)¹⁸³. Aj blízka sopka Mount Saint Helens vybuchla v období pred viac ako 13 000 rokmi¹⁸⁴. Tieto erupcie

¹⁸¹ <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.aax8587>

¹⁸²

https://www.researchgate.net/publication/355976582_Volcanic_climate_forcing_preceding_the_inception_of_the_Younger_Dryas_Implications_for_tracing_the_Laacher_See_eruption
<https://cp.copernicus.org/articles/14/969/2018/>

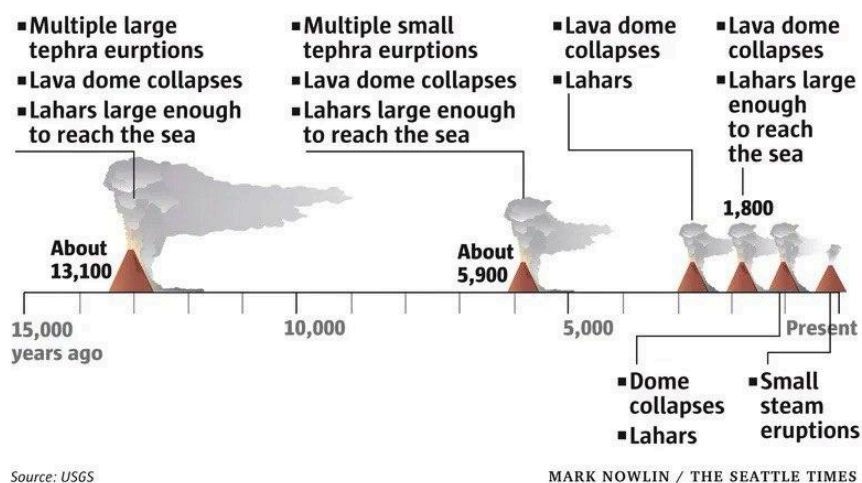
¹⁸³

<https://www.seattletimes.com/seattle-news/science/washingtons-hidden-glacier-peak-volcano-is-among-the-most-dangerous/>

¹⁸⁴ <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.aax8587>

ukazujú, že sopečný oblúk Cascadia bol v týchto časoch vysoko aktívny a pravdepodobne rozptýlil sopečné aerosóly a kryptotefru po celej severnej pologuli.

Eruption history of Glacier Peak



Obr. 87: História erupcií sopiek Glacier Peak, zdroj:

<https://www.seattletimes.com/seattle-news/science/washingtons-hidden-glacier-peak-volcano-is-among-the-most-dangerous/>

Pred približne 12 000 rokmi sa vyformovala kaldera sopky Mount Okmok na Aleutských ostrovoch počas veľkej erupcie s indexom vulkanickej explozivnosti (VEI) 6, ktorá vyprodukovala najmenej 30 km³ DRE (hustota ekvivalentná hornine).¹⁸⁵

Mnohí vedci pripisujú vrstvu popola uloženú v severnom Atlantiku a po celej Európe asi pred 12 000 rokmi masívnej erupcii sopky Katla. Katla patrí medzi sopky schopné veľmi rýchlo uvoľniť veľké objemy jemného materiálu a síranov do atmosféry.¹⁸⁶

V Stredomorí prebehla približne pred 12 000 rokmi pliniánska erupcia hlavnej pemzy Pomici Principali, ktorá je považovaná za najenergetickejšiu erupciu, aká sa vyskytla za posledných 15 000 rokov aktivity supervulkánu Campi Flegrei.¹⁸⁷

Pred približne 13 000 rokmi vznikla sopka Sakurajima nachádzajúca sa v kaldere supervulkánu Aira v Japonsku. Táto erupcia Satsuma Tephra je doteraz najväčšou erupciou v histórii Sakurajimy, najaktívnejšej sopky Japonska (objem pyroklastického materiálu bol približne 11 km³).¹⁸⁸

Súhrnne možno konštatovať, že Mladší dryas nebol výsledkom jednej izolovanej udalosti, ale obdobím, v ktorom sa zosúladiли viaceré procesy: kolaps oceánskych prúdov, oslabenie magnetického poľa a fáza mimoriadne intenzívnej globálnej vulkanickej aktivity. Práve táto kumulácia javov mohla viesť k rýchlej a výraznej klimatickej zmene, akú v holocéne už nepozorujeme.

¹⁸⁵ <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2019JB018977>

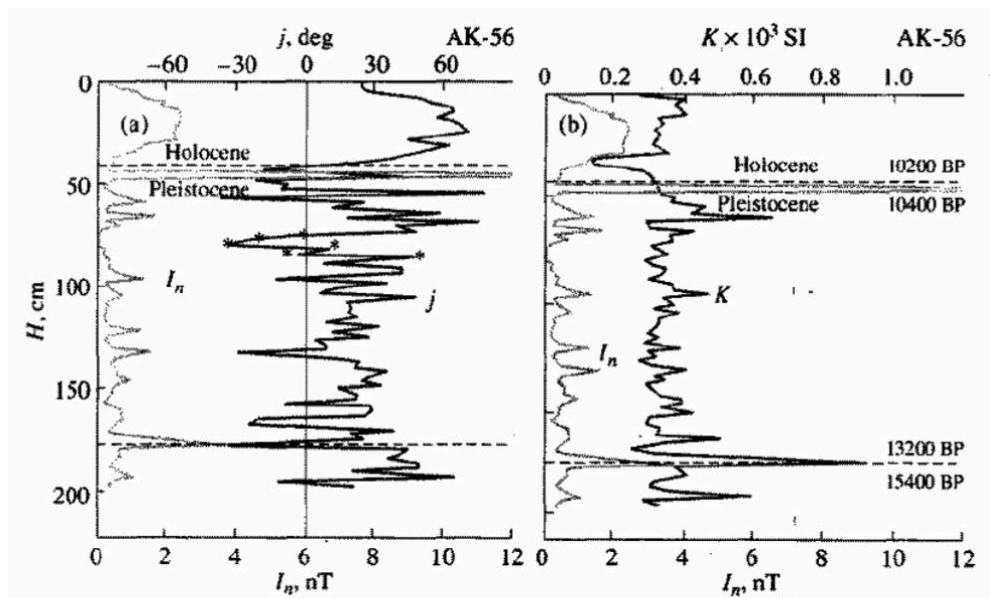
¹⁸⁶ <https://www.britannica.com/place/Katla>

¹⁸⁷ <https://www.ov.ingv.it/index.php/flegrei-storia-eruttiva/prima-epoca>

¹⁸⁸ https://qbank.gsj.jp/volcano/Act_Vol/sakurajima/text/eng/exp01-2e.html#

Gothenburgská geomagnetická exkurzia

Mladší dryas sa časovo prekrýva s výraznou geomagnetickou exkurziou, počas ktorej došlo k dočasnému oslabeniu magnetického poľa Zeme a v niektorých regiónoch aj k jeho lokálnej až úplnej reverzii. Záznamy zo severnej Európy ukazujú, že v tomto období, približne pred 12 400 – 12 350 rokmi, magnetické pole krátkodobo stratilo svoju stabilitu. Táto udalosť je známa ako Gothenburgská geomagnetická exkurzia a časovo korešponduje s chladnou fázou Mladšieho dryasu.¹⁸⁹ Existencia tejto udalosti sa potvrdila aj v sedimentoch dna Barentsovho mora (obr. 88)¹⁹⁰ a v jazere Paleo Danyang v Číne¹⁹¹.



Obr. 88: Graf zobrazuje zmeny magnetických vlastností sedimentov v severnej časti Barentsovho mora v závislosti od hĺbky a času. Viditeľné výkyvy prirodzenej remanentnej magnetizácie (magnetická “pamäť” hornín), smeru magnetického poľa j (a) a magnetickej citlivosti K (b) odrážajú zmeny geomagnetického poľa v minulosti. Hviezdičkami je označené obdobie Gothenburgskej geomagnetickej exkurzie, teda krátkodobej nestability magnetického poľa približne pred 12–13 tisíc rokmi, zdroj: https://www.researchgate.net/publication/241600625_Manifestation_of_the_Gothenburg_geomagnetic_field_excursion_in_the_Barents_Sea_bottom_sediments

Dôležité je, že záznamy z viacerých nezávislých sedimentárnych archívov naznačujú, že nešlo o lokálnu anomáliu, ale o širší geomagnetický jav, ktorý prebiehal súčasne s výraznými klimatickými a oceánskymi zmenami. Geomagnetická nestabilita sa tak javí ako ďalší článok reťazca procesov, ktoré počas Mladšieho dryasu prebiehali synchronizovane s kolapsom oceánskej cirkulácie, zvýšenou vulkanickou aktivitou a rýchlymi klimatickými výkyvmi.

¹⁸⁹ https://www.researchgate.net/publication/229127294_The_Gothenburg_Magnetic_Excursion
<https://www.cambridge.org/core/journals/quaternary-research/article/abs/gothenburg-magnetic-excursion/17B25AEC7351A029824A7B8F33EB6C63>
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1367912019304924>

¹⁹⁰

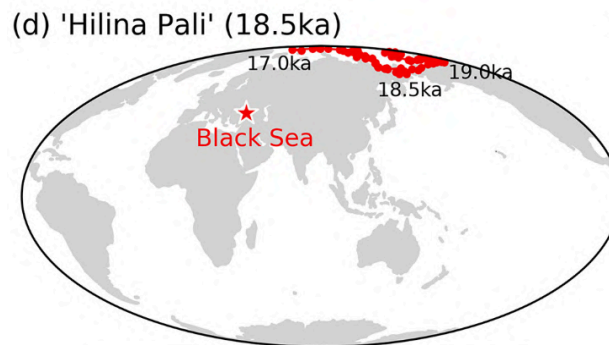
https://www.researchgate.net/publication/241600625_Manifestation_of_the_Gothenburg_geomagnetic_field_excursion_in_the_Barents_Sea_bottom_sediments

¹⁹¹ <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1367912019304924?via%3Dihub>

Heinrichova udalosť 1 (H1) a geomagnetická exkurzia Hilina Pali

Otepľovanie oceánov, ktoré vyvrcholilo Heinrichovou udalosťou 1, sa začalo približne pred 18 000 až 19 000 rokmi. V tomto období došlo k výraznému podpovrchovému otepľovaniu severného Atlantiku a k oslabeniu oceánskej cirkulácie, čo napokon viedlo k destabilizácii ľadových šelfov a masívnemu uvoľneniu ľadovcov do oceánu.

Časovo sa s týmto obdobím prekrýva geomagnetická exkurzia Hilina Pali, ku ktorej došlo približne pred 18 500 rokmi (obr. 89)¹⁹². Počas tejto exkurzie došlo k výraznému, hoci dočasnému oslabeniu intenzity geomagnetického poľa, čo naznačuje zvýšenú dynamiku procesov vo vonkajšom jadre Zeme.



Obr. 89: Dráhy virtuálnych geomagnetických pól (VGP) vypočítané z paleomagnetických smerových súvislostí Čierneho mora, zdroj: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2019JB019225>

Súbežne s týmito udalosťami prebehli aj významné sopečné procesy. Približne pred 18 000 rokmi došlo k najväčšej známej erupcii komplexu Somma–Vesuv, ktorá výrazne prispela k formovaniu dnešnej kaldery sopky¹⁹³.

V rovnakom časovom období sa odohrali aj rozsiahle erupčné udalosti v západnej Antarktíde, čo poukazuje na globálne zvýšenú sopečnú aktivitu na konci poslednej doby ľadovej. Séria masívnych erupcií približne pred 18 000 rokmi, trvajúca takmer dve storočia, mohla výrazne urýchliť prechod klímy do teplejšieho stavu. Podľa novej štúdie tieto erupcie uvoľnili do atmosféry veľké množstvo látok narúšajúcich ozónovú vrstvu, čo viedlo k jej výraznému oslabeniu a následnému otepleniu antarktiskej atmosféry. Hoci sa doba ľadová už prirodzene blížila ku koncu, táto udalosť pravdepodobne pôsobila ako katalyzátor náhlych a dramatických klimatických zmien, čím potvrdzuje, že klimatický systém môže reagovať veľmi citlivo aj na relatívne krátkodobé, no intenzívne impulzy.¹⁹⁴

¹⁹² <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2019JB019225>

¹⁹³ <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0377027398000250>
<https://www.protezionecivile.gov.it/en/approfondimento/eruptive-history/>
<https://volcano.si.edu/volcano.cfm?vn=211020>

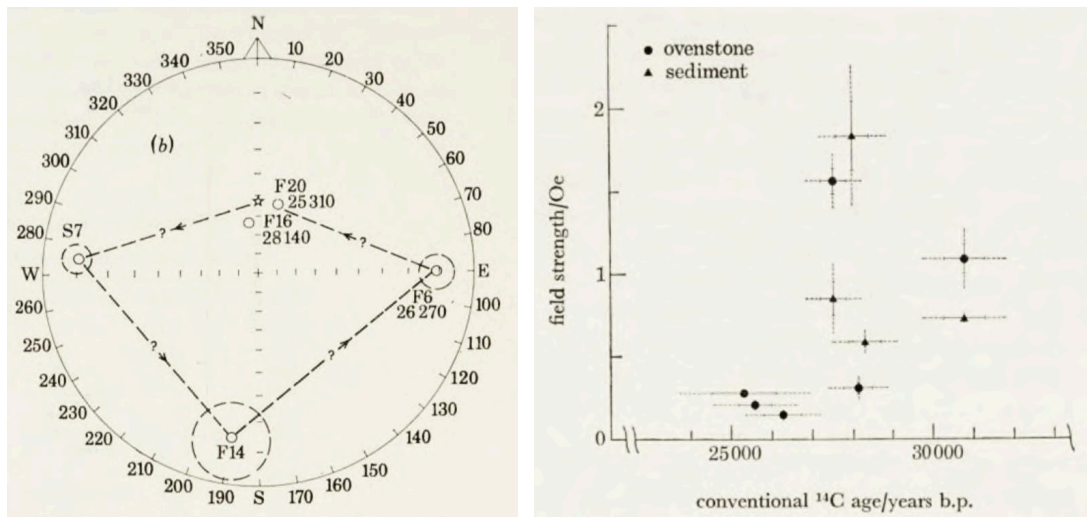
¹⁹⁴ <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1705595114>

<https://www.sciencenordic.com/climate-change-denmark-geology/volcanic-eruptions-hastened-the-end-of-the-last-ice-age/1448735>

Heinrichova udalosť 2 (H2) a geomagnetická exkurzia Lake Mungo 2

Otepľovanie oceánov, ktoré vyústilo do Heinrichovej udalosti 2, sa začalo približne pred 25 000 - 26 000 rokmi. Tento proces bol opäť charakterizovaný postupným nárastom teploty podpovrchových vôd v severnom Atlantiku a následným narušením stability ľadovcových systémov.

Do tohto obdobia spadá aj výrazná geomagnetická exkurzia identifikovaná v oblasti jazera Mungo v Austrálii, datovaná približne do obdobia 26 000 rokov pred súčasnosťou. Archeomagnetické záznamy z tohto regiónu poukazujú na výrazné zmeny smeru a nízke intenzity magnetického poľa, čo naznačuje globálny charakter geomagnetickej nestability. Pri tejto mladšej exkurzii sa magnetické pole nielen výrazne smerovo odklonilo, ale zároveň došlo aj k výraznému poklesu jeho intenzity. Merania naznačujú, že sila poľa bola podstatne nižšia než bežné hodnoty, často len okolo 0,2 až 0,4 Oe. V tomto období teda magnetické pole vykazovalo kombináciu smerovej nestability a nízkej intenzity, čo predstavuje typický znak geomagnetickej exkurzie (obr. 90).¹⁹⁵



Obr. 90: **Naľavo:** Stereografická projekcia smerov magnetizácie pozorovaných počas geomagnetického výkyvu pred 26 000 rokmi (kolísanie smeru magnetického poľa) charakterizovaná nízkymi silami poľa.

Napravo: Priemerné merania intenzity starovekého magnetického poľa. Počas exkurzie približne pred 26 000 rokmi, bolo magnetické pole výrazne oslabené. Merania ukazujú hodnoty hlboko pod dnešnou úrovňou, často okolo 0,2 – 0,4 Oe. Zdroj:

<https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsta.1976.0048>

Z geologického hľadiska je toto obdobie spojené s jednou z najväčších známych sopečných erupcií v histórii Zeme – supererupciou sopky Taupo na Novom Zélande, známou ako erupcia Oranui (okolo 25 500 rokov pred súčasnosťou). Táto udalosť dosiahla stupeň VEI 8 a vyprodukovala približne 1 170 km³ erupčného materiálu, čo predstavuje extrémny zásah do klimatického a environmentálneho systému planéty.¹⁹⁶

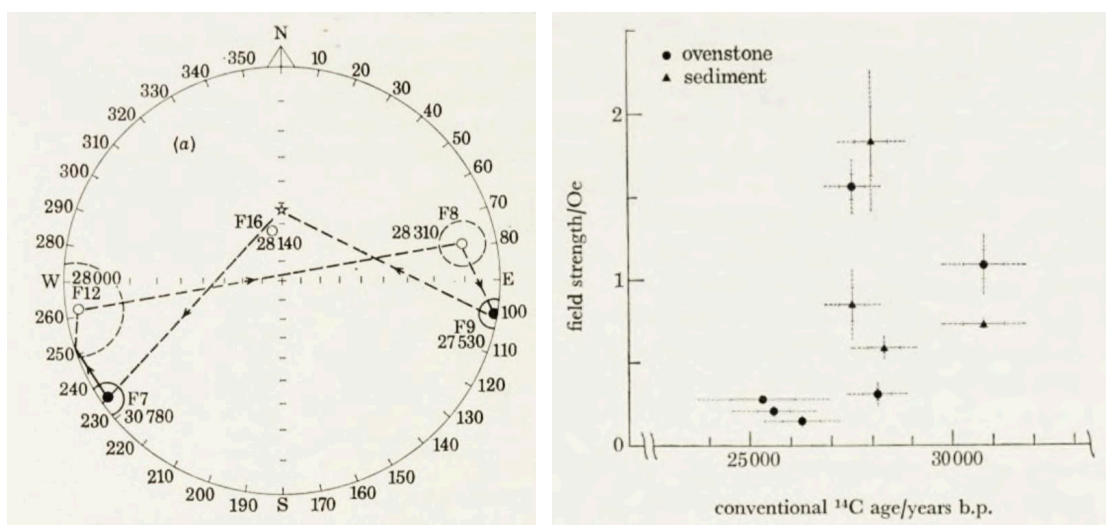
¹⁹⁵ <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsta.1976.0048>

¹⁹⁶ <https://earthsky.org/earth/taupo-supervolcano-needs-monitoring/>
<https://eos.org/science-updates/implications-of-a-supervolcanos-seismicity>
https://en.wikipedia.org/wiki/Oruanui_eruption

Heinrichova udalosť 3 (H3) a geomagnetická exkurzia Lake Mungo 1 / Mono Lake

Otepľovanie oceánov predchádzajúce Heinrichovej udalosti 3 sa začalo približne pred približne 31 000 rokmi. Aj v tomto prípade išlo o postupné hromadenie tepla v podpovrchových vrstvách oceánu, ktoré viedlo k destabilizácii ľadovcov a následnému masívnemu výronu ľadu do severného Atlantiku.

Z rovnakého obdobia pochádza ďalšia geomagnetická exkurzia zaznamenaná v oblasti jazera Mungo (Austrália), datovaná približne pred 30 000 rokmi. Počas tejto exkurzie sa smer zemského magnetického poľa výrazne odchyľoval od bežného axiálneho dipólového smeru, avšak samotná intenzita poľa bola nezvyčajne vysoká. Merania zo sopečných hornín a vypálených sedimentov ukazujú, že sila magnetického poľa dosahovala alebo presahovala hodnoty porovnateľné s dnešným poľom, približne v rozmedzí 1,0 až 1,5 Oe. To znamená, že hoci bolo pole smerovo nestabilné, jeho celková intenzita zostávala silná (obr. 91).¹⁹⁷



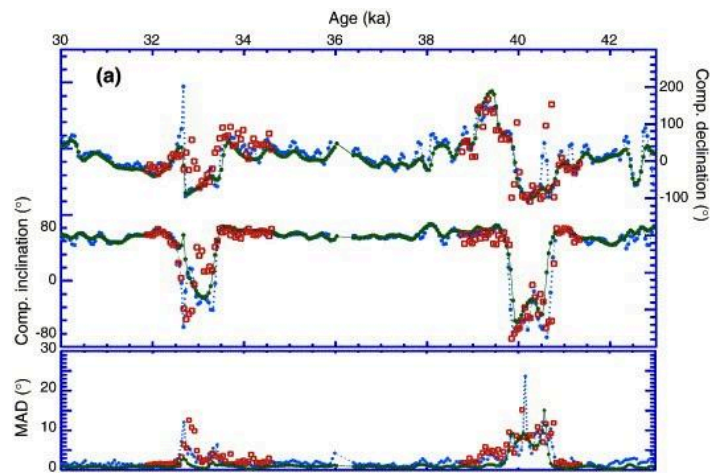
Obr. 91: **Naľavo:** Stereografická projekcia smerov magnetizácie pozorovaných počas geomagnetického výkyvu charakterizovaného abnormálne vysokými silami poľa medzi 31 000 a 28 000 rokmi pred súčasnosťou.

Napravo: Priemerné merania intenzity starovekého magnetického poľa. Počas exkurzie približne pred 30 000 rokmi sila magnetického poľa dosahovala alebo presahovala hodnoty porovnateľné s dnešným poľom, približne v rozmedzí 1,0 až 1,5 Oe. **Zdroj:** <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsta.1976.0048>

Tento obraz dočasnej nestability sa dá časovo a procesne korelovať s výrazne zdokumentovanou geomagnetickou exkurziou známych lokalít v Severnej Amerike – tzv. Mono Lake Excursion, ktorá je jedným z najlepšie zaznamenaných paleomagnetických markerov v sedimentoch severnej pologule. Podľa paleomagnetických a tefrochronologických dát Mono Lake exkurzia prebehla približne medzi 31 500 a 33 300 rokmi pred súčasnosťou a je potvrdená napríklad v sedimentoch Wilson Creek Formation pri Mono Lake v Kalifornii a v susedných povodiach ako Pyramid Lake a Carson Sink v Nevade, kde sa jej magnetické stopy nachádzajú nad charakteristickou sopečnou vrstvou Ash #15 (obr. 92).¹⁹⁸

¹⁹⁷ <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsta.1976.0048>

¹⁹⁸ <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0277379102002494?via%3Dihub>



Obr. 92: Graf zachytáva pokles a neštandardné správanie zemského magnetického poľa počas exkurzie Mono Lake približne v intervale 33 ka a okolo 40 ka, ktoré sa prejavuje výraznými zmenami deklinácie (smeru magnetického poľa „do strán“) a inklinácie (smeru magnetického poľa „dole“ alebo „hore“) a zároveň zvýšenými hodnotami MAD (ukazovateľ rozptylu/nespoľahlivosti merania), čo poukazuje na nestabilitu magnetického záznamu v tomto období. Zdroj: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0012821X06000574>

V tomto časovom intervale prebehla aj najväčšia erupcia supervulkánu v Japonsku. Supervulkán Aira počas tejto mohutnej erupcie pred približne 30 000 rokmi vytvoril svoju kalderu. Najnovší odhad celkového objemu vyvrhnutého z kaldery Aira sa pohybuje medzi 800 a 900 km³, čo je približne 1,5-násobok predchádzajúceho odhadu 600 miliárd kubických metrov. Táto erupcia je na indexe VEI klasifikovaná ako 8, čo z nej robí „megakolosálnu“ erupciu a mala ničivé následky pre životné prostredie.¹⁹⁹

Heinrichova udalosť 4 (H4) a Laschampská geomagnetická exkurzia

Otepľovanie oceánov, ktoré vyústilo do Heinrichovej udalosti 4, sa začalo približne pred 40 000 rokmi. Toto obdobie je jedným z najlepšie zdokumentovaných príkladov súbehu klimatických, geomagnetických a vulkanických extrémov.

Približne pred 41 200 rokmi prebehla Laschampská geomagnetická exkurzia (obr. 93), počas ktorej došlo k dramatickému oslabeniu geomagnetického poľa – na niektorých miestach až na zlomok jeho dnešnej intenzity²⁰⁰. Toto oslabenie malo výrazné dôsledky pre atmosférickú chémiu, vrátane zmien koncentrácie ozónu, a bolo sprevádzané globálnymi environmentálnymi zmenami.²⁰¹

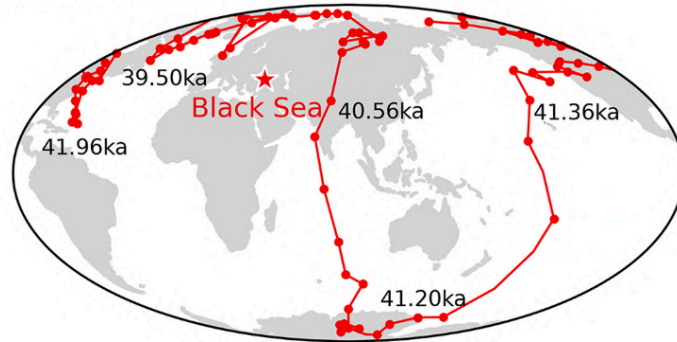
¹⁹⁹ <https://www.asahi.com/ajw/articles/14532350>

²⁰⁰ <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2019JB019225>

²⁰¹ <https://www.science.org/doi/10.1126/science.abb8677>

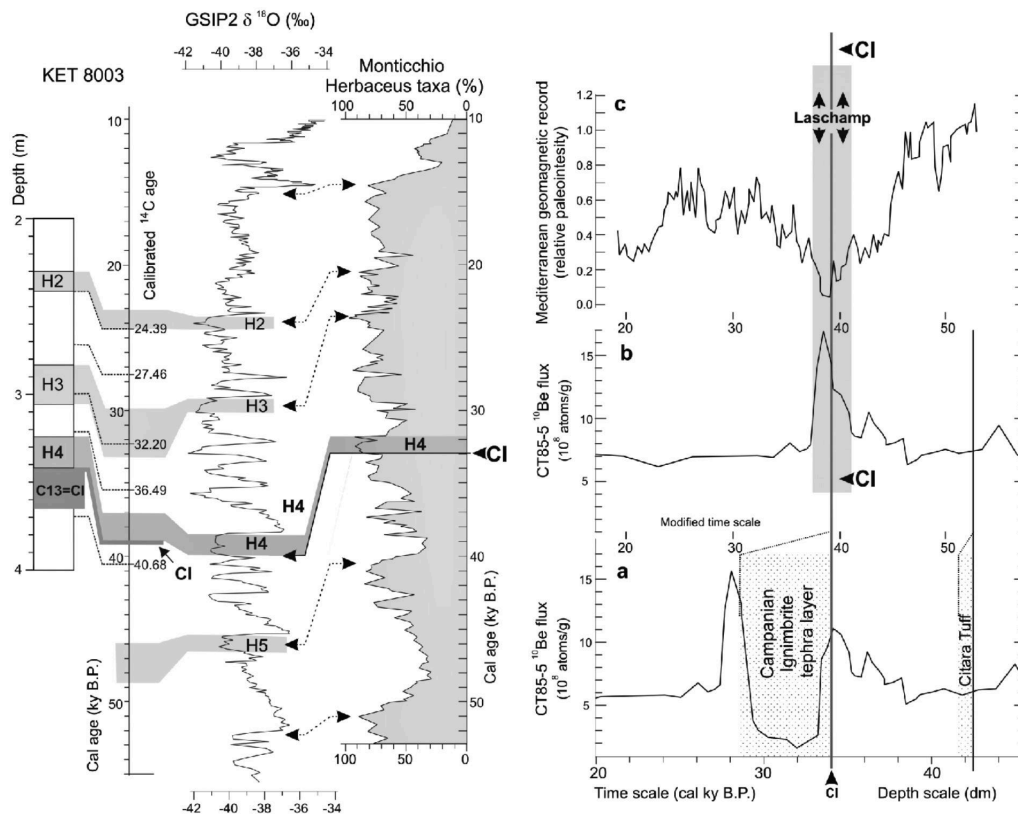
<https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2020/EGU2020-12314.html>

(b) Laschamps (41.2ka)



Obr. 93: Dráhy virtuálnych geomagnetických pól (VGP) vypočítané z paleomagnetických smerových súvislostí Čierneho mora, zdroj: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2019JB019225>

Do rovnakého obdobia spadá aj jedna z najväčších sopečných erupcií v Európe – Campanian Ignimbrite erupcia, ktorá formovala veľkú časť kaldery Campi Flegrei v Taliansku. Táto erupcia dosiahla stupeň VEI 7 a vyprodukovala približne 430 – 680 km³ erupčného materiálu²⁰². Je spájaná s výrazným ochladením klímy v Európe a s rozsiahlymi ekologickými dôsledkami, aj zánikom neandertálcov.²⁰³



Obr. 94: **Naľavo:** Porovnanie zmeny klímy zaznamenané v ľadových jadrách, morských sedimentoch a jazerných záznamoch ukazuje, že Heinrichova udalosť H4 časovo približne súvisí s erupciou Campanian Ignimbrite CI a veľkými zmenami vegetácie a klímy. Šípky naznačujú rovnaké globálne obdobie klimatického stresu.

Napravo: Prudký pokles intenzity geomagnetického poľa počas Laschampskej exkurzie a zároveň zvýšený tok izotopu ¹⁰Be, ktorý vzniká pri silnejšom prenikaní kozmického žiarenia pri oslabenom magnetickom poli. Do toho istého časového okna spadá aj vrstva popola z erupcie Campanian Ignimbrite CI, čo naznačuje súbeh viacerých extrémnych procesov.

Zdroj:

https://www.researchgate.net/publication/239939045_The_Campanian_Ignimbrite_Eruption_Heinrich_Event_4_and_Palaeolithic_Change_in_Europe_A_High-Resolution_Investigation

²⁰² <https://www.frontiersin.org/journals/earth-science/articles/10.3389/feart.2020.543399/full>

²⁰³ <https://www.ov.ingv.it/index.php/flegrei-storia-eruttiva/le-eruzioni-principali/ignimbrite-campana>

V rovnakom časovom rámci, približne pred 38 000 až 40 000 rokmi, sa formovala aj kaldera sopky Gorely na Kamčatke, s odhadovaným objemom erupčného materiálu okolo 100 km³ a magnitúdou VEI 7²⁰⁴. Súbeh týchto udalostí poukazuje na obdobie výnimočnej globálnej geodynamickkej aktivity.

V štúdií z knihy "Vulkanizmus a zemská atmosféra" sú detailne porovnané klimatické záznamy z rôznych častí Európy a severného Atlantiku s dôkazmi veľkej erupcie Campanian Ignimbrite a s poklesom intenzity geomagnetického poľa počas Laschampskej exkurzie. Výsledky ukazujú, že tieto udalosti sa časovo prekrývajú približne okolo 39 – 41 tisíc rokov pred súčasnosťou a spadajú do obdobia začiatku Heinrichovej udalosti H4, čo poukazuje na fázu výraznej globálnej nestability environmentálneho systému (obr. 94).²⁰⁵

Záznamy zároveň ukazujú, že počas oslabenia geomagnetického poľa sa zvyšoval tok kozmogénnych izotopov, čo naznačuje intenzívnejšie prenikanie kozmického žiarenia do atmosféry. Súbežne sa v sedimentárnych záznamoch objavuje vrstva sopečného materiálu z erupcie Campanian Ignimbrite, ktorá je spájaná s výrazným ochladením klímy v Európe a možnými ekologickými stresmi pre vtedajšie ekosystémy aj ľudské populácie.²⁰⁶

Paralela so súčasnosťou: Opakovanie historických cyklov

V minulosti Zem opakovane prechádzala cyklami, počas ktorých dochádzalo k zmenám v správaní magnetického poľa a posunom magnetických pólův, k výrazným klimatickým výkyvom (fázy globálneho otepľovania striedané ochladzovaním) a k obdobiam sprevádzaným intenzívnou vulkanickou činnosťou, ktoré v konečnom dôsledku prispievali aj k ekologickým kolapsom a vyhynutiu megafauny.

Analýza súčasných geodynamických procesov ukazuje znepokojivú podobnosť s obdobiami extrémnej globálnej nestability, aké Zem zažila v historických cyklických udalostiach, naposledy pred približne 12 000 rokmi. Súčasné anomálie nie sú izolovanými udalosťami, ale tvoria komplexný obraz systémovej zmeny planéty, ktorá koreluje s historickými cyklami katastrofických udalostí.

V súčasnosti pozorujeme znepokojivo podobnú kombináciu javov:

- **vstup do obdobia prepólovania Zeme alebo magnetickej exkurzie** (zrýchľujúci sa drift severného magnetického pólu, pokles intenzity magnetického poľa)
- **mimoriadne rýchle otepľovanie oceánův**, najmä v podpovrchových vrstvách, ktoré patrí medzi najvýraznejšie za posledných približne 10 000 rokov
- **oslabovanie Atlantickej meridiónálnej cirkulácie (vrátane Golského prúdu)**, ktorý sa výrazne narušil naposledy pred približne 12 000 rokmi a zmeny v ďalších oceánskych prúdoch
- **globálny nárast seizmickej a vulkanickej aktivity**, vrátane prebúdzania systémův, ktoré boli aktívne naposledy práve pred 12 000 rokmi, napr.:
 - **Tintina zlom (Kanada)**, ktorý sa ozýva po viac než 12 000 rokoch tektonického pokoja
 - **sopka Hayli Gubbi (Etiópija)**, ktorá sa v roku 2025 prebudila po približne 12 000 rokoch

²⁰⁴ <https://volcano.si.edu/volcano.cfm?vn=300070>

²⁰⁵

https://www.researchgate.net/publication/239939045_The_Campanian_Ignimbrite_Eruption_Heinrich_Event_4_and_Palaeolithic_Change_in_Europe_A_High-Resolution_Investigation

²⁰⁶ https://www.researchgate.net/publication/349448597_A_global_environmental_crisis_42000_years_ago

<https://www.theguardian.com/science/2021/feb/18/end-of-neanderthals-linked-to-flip-of-earths-magnetic-poles-study-suggests>

- **zvýšená aktivita supervulkánu Campi Flegrei (Taliansko)** naznačujúca potenciál ďalšej veľkej erupčnej fázy systému, ktorý mal jednu z najenergetickejších erupcií približne pred 12 000 rokmi
- **Sakurajima v kaldere supervulkánu Aira (Japonsko)**, ktorá vstupuje do fázy najvyššej aktivity za posledných 13 000 rokov, kedy bola vyformovaná mohutnou erupciou
- **supervulkán Laacher See (Nemecko)**, ktorý bol aktívny práve na prahu holocénu pred približne 13 000 rokmi a v súčasnosti vykazuje najvýraznejšie prejavy nepokoja za posledné desaťročia

Tieto príklady nevytvárajú izolované anomálie, ale skôr globálny vzorec návratu vnútornej aktivity Zeme po dlhodobej stabilite, ktorá trvala prakticky celé obdobie holocénu (cca 12 000 rokov) – éry, v ktorej sa rozvinula ľudská civilizácia.

Aj keď je možné, že v minulosti boli podobné klimatické a geodynamické zmeny rozložené do dlhších časových období, dnes môžeme čeliť situácii, v ktorej sa tieto prirodzené procesy zrýchľujú. Naznačujú to bezprecedentné trendy v otepľovaní oceánov aj v dynamike geodynamických procesov planéty.

Jedným z faktorov, ktorý môže tento vývoj ďalej zosilňovať, je rastúca koncentrácia mikro- a nanoplastov v biosfére, pretože sa hromadí výskum ukazujúci, že tieto častice už nepredstavujú len pasívne znečistenie, ale existuje hypotéza, že v podobe prvku narúšajúceho energetickú rovnováhu Zeme podporujú akumuláciu tepla v oceánoch a atmosfére, oslabujú prirodzenú výmenu tepla medzi vrstvami a „uzatvárajú“ planetárny systém, čím znižujú schopnosť planéty efektívne redistribuovať a uvoľňovať prebytočné teplo do okolitého priestoru.

Podrobnejšie sú tieto hypotézy rozpracované napríklad v správe „Nanoplasty v biosfére“ (MSH ALLATRA), ktorá poukazuje na ich rastúcu prítomnosť v atmosfére aj oceánoch a na potenciálne dôsledky ich akumulácie v rôznych zložkách životného prostredia, vrátane narúšania prirodzenej výmeny a redistribúcie tepla v planetárnom systéme. Tieto poznatky predstavujú dôležitý doplnkový kontext k analýze súčasných globálnych zmien a dynamiky procesov prebiehajúcich na Zemi.²⁰⁷

²⁰⁷ https://allatra.org/storage/app/media/reports/en/Nanoplastics_in_the_Biosphere_Report.pdf

Záver

Súhrn dostupných dát zo seizmologických, vulkanologických a geofyzikálnych pozorovaní naznačuje, že Zem sa v posledných desaťročiach nachádza v období zvýšenej geodynamickej variability. Analýza globálnych aj regionálnych dát ukazuje, že nejde len o zvýšený počet udalostí, ale aj o zmenu ich charakteru, priestorového rozloženia a vzájomného prepojenia. Zaznamenané javy preto nemožno interpretovať výlučne ako izolované regionálne epizódy, ale skôr ako prejavy globálne zvýšenej dynamiky tektonického systému Zeme.

Najvýraznejšie prejavy tejto dynamiky sa koncentrujú pozdĺž hlavných rozhraní litosférických platní, najmä na okrajoch Eurázijskej platne. Megazemetrasenie na Kamčatke v roku 2025 s magnitúdou $M 8,8$, sprevádzané rozsiahlymi dotrasovými sekvenciami a simultánnou aktiváciou viacerých dlhodobopokojných sopiek, predstavuje výnimočný príklad tesného prepojenia hlbokkej seizmicity a vulkanických procesov. Prebudenie sopiek Krašeninnikov, Kronocká a Bezymiannyj po desaťročiach až storočiach pokoja naznačuje rozsiahlu magmatickú reorganizáciu, ktorá presahuje lokálny rámec jednej vulkanickej štruktúry.

Stredomorský región, predovšetkým Egejská oblasť, vykazuje dramatický nárast seizmickej aktivity v pásmach stredných magnitúd. Oblasť Santorini–Kolumbo poskytuje jasné dôkazy prebiehajúcej magmatickej aktivácie – seizmické roje, rast magmatickej komory, tepelné a chemické anomálie morského dna. Ide o prepojený vulkanický systém s potenciálom explozívnych, vrátane tsunamigénnych, erupcií, ktorého správanie zapadá do širšieho obrazu zvýšenej regionálnej nestability.

Osobitnú pozornosť si zaslúžia aj pozorovania zo Sibírskej platformy, tradične považovanej za jednu z najstabilnejších oblastí planéty. Výskyt zemetrasení s magnitúdami nad $M 5$ v oblastiach Krasnojarska a Jakutska predstavuje výraznú anomáliu v porovnaní s historickými záznamami a môže naznačovať aktiváciu hlbokých štruktúr plášťa.

V oblasti Campi Flegrei v Taliansku bol rok 2025 rekordný nielen z hľadiska počtu lokalizovaných zemetrasení, ale aj ich intenzity. Kombinácia viac než 5000 otrasov, historicky najsilnejších zaznamenaných udalostí, prudkého nárastu emisií CO_2 a zvýšených teplôt fumarol poskytuje presvedčivé dôkazy pokračujúcej destabilizácie tohto supervulkanického systému. Navyše, indikátory teploty magmy v hlbokom rezervoári naznačujú, že Campi Flegrei je pred potenciálnou supererupciou.

Z globálneho hľadiska dlhodobé časové rady potvrdzujú postupný nárast počtu zemetrasení stredných magnitúd ($M 4 - M 5$) a častejší výskyt seizmických rojov v rôznych tektonických prostrediach. Hoci oficiálny vedecký konsenzus tieto trendy zatiaľ interpretuje predovšetkým ako dôsledok zlepšenej detekcie a katalogizácie, existujú opodstatnené dôvody považovať pásmo stredných magnitúd za potenciálny skorý indikátor hlbších zmien v napäťovom poli Zeme. Práve v tomto rozsahu by sa prípadné globálne zosilňovanie seizmicity prejavilo najprv, skôr než by bolo možné očakávať nárast extrémnych udalostí.

V kontexte Gutenberg–Richterovho zákona má tento vývoj zásadný význam. Ak by sa ukázalo, že nárast počtu zemetrasení $M 4+$ je fyzikálne reálny a parameter b zostáva stabilný, v dlhšom časovom horizonte by nevyhnutne musel nasledovať nárast udalostí vyšších magnitúd. Skutočnosť, že tento efekt zatiaľ nie je jednoznačne pozorovateľný, môže súvisieť s krátkym štatistickým oknom, zriedkavosťou veľkých zemetrasení a oneskorenou reakciou systému na zmeny napäťového poľa.

Celkovo výsledky tejto analýzy naznačujú, že súčasný stav Zeme nemožno redukovať na krátkodobú výkyvovú epizódu. Súbežný výskyt štatistických trendov v stredných magnitúdach, regionálnych seizmických rojov, aktivácie dlhodobopokojných vulkanických systémov a indícií hlbokých geodynamických procesov (procesov v plášti a jadre) poukazuje na fázu zvýšenej globálnej dynamiky. Už nie je vedecky korektné tieto javy ignorovať alebo vysvetľovať jediným faktorom. Táto práca preto

zdôrazňuje potrebu systematického monitorovania, revízie existujúcich modelov seizmického rizika a hlbšieho skúmania procesov, ktoré v súčasnosti formujú dynamiku Zeme.

Celkové zistenia práce preto naznačujú potrebu rozšíriť analytický rámec sledovania dynamiky Zeme – nielen na úroveň lokálnych tektonických procesov, ale aj na úroveň globálnych systémových zmien planéty, vrátane procesov prebiehajúcich v hlbokých vrstvách Zeme a v jej interakcii s atmosférickým a oceánskym systémom. V tomto širšom kontexte nadobúdajú mimoriadny význam aj historické paralely a cyklické zmeny v systéme Zeme, ktoré môžu pomôcť lepšie pochopiť súčasné trendy a ich potenciálny ďalší vývoj.

Pod'akovanie

Autori by chceli poďakovať všetkým ľuďom, ktorí ich počas prípravy tejto správy podporovali a povzbudzovali. Osobitná vďaka patrí priateľom, kolegom a čitateľom, ktorí svojimi komentármi, otázkami a diskusiami prispeli k hlbšiemu premýšľaniu o tejto téme.

Autori zároveň ďakujú všetkým recenzentom a vedcom, ktorí poskytli spätnú väzbu k jednotlivým častiam textu. Ich postrehy a kritické poznámky pomohli spresniť niektoré interpretácie a rozšíriť pohľad na skúmanú problematiku.

Zdroje

1. *IRIS Newsletter: Volume 2000, No. 1* (2000). Available at: <https://ds.iris.edu/news/IRISnewsletter/volume2000no1/page-02-04.htm> (Accessed: March 16, 2026).
2. Parsons, T. and Geist, E.L. (2014) "The 2010–2014.3 global earthquake rate increase," *Geophysical Research Letters*, 41(13), pp. 4479–4485. Available at: <https://doi.org/10.1002/2014GL060513>.
3. Ringler, A.T. (2022) "Global Seismic Networks: Recording the Heartbeat of the Earth," *Eos*, 9 September. Available at: <https://eos.org/editors-vox/global-seismic-networks-recording-the-heartbeat-of-the-earth> (Accessed: March 16, 2026).
Achievements and prospects of global broadband seismographic networks after 30 years of continuous geophysical observations | U.S. Geological Survey (2022). Available at: <https://www.usgs.gov/publications/achievements-and-prospects-global-broadband-seismographic-networks-after-30-years> (Accessed: March 16, 2026).
4. Weatherill, G.A., Pagani, M. and Garcia, J. (2016) "Exploring earthquake databases for the creation of magnitude-homogeneous catalogues: tools for application on a regional and global scale," *Geophysical Journal International*, 206(3), pp. 1652–1676. Available at: <https://doi.org/10.1093/gji/ggw232>.
5. "Lists of earthquakes" (2026) *Wikipedia*. Available at: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Lists_of_earthquakes&oldid=1343016360 (Accessed: March 16, 2026).
6. "1952 Severo-Kurilsk earthquake" (2026) *Wikipedia*. Available at: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=1952_Severo-Kurilsk_earthquake&oldid=1333427734 (Accessed: March 16, 2026).
7. *M 9.0 - 89 km ESE of Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia*. Available at: https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/official19521104165830_30/executive (Accessed: March 16, 2026).
8. *M 8.8 - 2025 Kamchatka Peninsula, Russia Earthquake*. Available at: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000qw60/executive> (Accessed: March 16, 2026).
9. Yagi, Y. *et al.* (2025) "Breaking the Cycle: Short Recurrence and Overshoot of an M9-class Kamchatka Earthquake," *Seismica*, 4(2). Available at: <https://doi.org/10.26443/seismica.v4i2.2012>.
10. *Foreshocks, aftershocks - what's the difference?* | U.S. Geological Survey (2024). Available at: <https://www.usgs.gov/faqs/foreshocks-aftershocks-whats-difference> (Accessed: March 16, 2026).
11. Johnson, J.M. and Satake, K. (1999) "Asperity Distribution of the 1952 Great Kamchatka Earthquake and its Relation to Future Earthquake Potential in Kamchatka," *Pure and Applied Geophysics*, 154(3–4), pp. 541–553. Available at: <https://doi.org/10.1007/s000240050243>.
12. Xu, D., Wang, W. and Ren, Z. (2025) "Preliminary slip distribution of the July 29, 2025 MW 8.8 Kamchatka, Russia earthquake," *Earthquake Research Advances*, p. 100427. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.eqrea.2025.100427>.
13. *Significant Earthquakes - 1952*. Available at: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/browse/significant.php?year=1952> (Accessed: March 16, 2026).
14. Helmstetter, A. and Sornette, D. (2003) "Bath's law Derived from the Gutenberg-Richter law and from Aftershock Properties," *Geophysical Research Letters*, 30(20), p. 2003GL018186. Available at: <https://doi.org/10.1029/2003GL018186>.
15. *На Камчатке произошло новое землетрясение* (2025) *Национальная Служба Новостей - НСН*. Available at:

- <https://nsn.fm/incident/novoe-moschnoe-zemletryasenie-na-kamchatke-privelo-seismologov-v-zameshate-istvo> (Accessed: March 16, 2026).
16. Pirti, A. (2024) "Investigation and prediction of the 2010 Maule, Chile earthquake by using GNSS on 25, 26 and 27 February 2010," *Journal of South American Earth Sciences*, 133, p. 104702. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104702>.
 17. *M 8.8 - 2025 Kamchatka Peninsula, Russia Earthquake*. Available at: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000qw60/executive> (Accessed: March 16, 2026).
 18. Braille, L. (2010). *Feb. 27, 2010 M8.8 Chile Earthquake: Seismic/Eruption Views, Seismicity, Main Shock-AfterShock Sequence*. Available at: <https://web.ics.purdue.edu/~braille/edumod/chile/chile.htm> (Accessed: March 16, 2026).
 19. *Lori Dengler | A very large aftershock reminder that the Kamchatka earthquake sequence is not over* (2025). Available at: <https://www.msn.com/en-us/public-safety-and-emergencies/natural-disasters/lori-dengler-a-very-large-aftershock-reminder-that-the-kamchatka-earthquake-sequence-is-not-over/ar-AA1MYowB> (Accessed: March 16, 2026).
 20. *Volcano in Russia's Kamchatka ejects ash up to 9.2 km high* (2025) *ap7am.com*. Available at: <https://www.ap7am.com/en/110864/volcano-in-russias-kamchatka-ejects-ash-up-to-92-km-high> (Accessed: March 16, 2026).
 21. "Землетрясение в Хатанге нехарактерное явление для сейсмически спокойного Таймыра" (2025) *Новости «Северного Города»*, 5 March. Available at: <https://news.sgnorilsk.ru/2025/03/05/zemletryasenie-v-hatange-neharakternoe-yavlenie-dlya-sejsmicheskoi-spokojnogo-tajmyra/> (Accessed: March 16, 2026).
- Силой 6 - 8 баллов. Ученые оценили прогноз мощных землетрясений в Якутии, Дзен | Статьи* (2024). Available at: <https://dzen.ru/a/ZqjG6iMaR2Fxfei4> (Accessed: March 16, 2026).
22. Горохова, М. (2025) *В Якутии растет количество землетрясений. Ученый рассказал о сейсмической опасности — ЯСИА, Новости Якутии и Якутска — свежие новости онлайн на сайте ysia.ru — ЯСИА*. Available at: <https://ysia.ru/v-yakutii-rastet-kolichestvo-zemletryasenij-uchenyj-rasskazal-o-sejsmicheskoi-opasnosti/> (Accessed: March 16, 2026).
 23. Egan, R. (2025) *Reconstruction of record-breaking Myanmar earthquake confirms supershear event*. Available at: <https://phys.org/news/2025-08-reconstruction-myanmar-earthquake-supershear-event.html> (Accessed: March 16, 2026).
- Tsukuba, U. of (2025) Supershear "boomerang" rupture found in Myanmar earthquake defies typical seismic patterns*. Available at: <https://phys.org/news/2025-07-supershear-boomerang-rupture-myanmar-earthquake.html> (Accessed: March 16, 2026).
24. Bouchon, M. *et al.* (2001) "How fast is rupture during an earthquake? New insights from the 1999 Turkey Earthquakes," *Geophysical Research Letters*, 28(14), pp. 2723–2726. Available at: <https://doi.org/10.1029/2001GL013112>.
 25. *Earthquake statistics: Myanmar - detailed charts and tables, current and past seismic activity*. Available at: <https://www.volcanodiscovery.com/earthquakes/myanmar/stats.html> (Accessed: March 16, 2026).
 26. *The complete Myanmar earthquake report (up-to-date 2026)*. Available at: <https://earthquakelist.org/myanmar/> (Accessed: March 16, 2026).
 27. Sparacino, F. *et al.* (2022) "Seismic coupling for the Aegean - Anatolian region," *Earth-Science Reviews*, 228, p. 103993. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.103993>.

28. *Nisyros: The volcanic craters in the Nisyros caldera*. Available at: <https://nisyros.de/en/geology-of-nisyros-volcano/the-volcanic-craters-of-nisyros> (Accessed: March 16, 2026).
29. Antoniou, V. *et al.* (2021) "Nisyros Volcanic Island: A Geosite through a Tailored GIS Story," *Geosciences*, 11(3). Available at: <https://doi.org/10.3390/geosciences11030132>.
30. "Methana Peninsula" *Visit Attica*. Available at: <https://athensattica.com/point/methana-peninsula/> (Accessed: March 16, 2026).
31. Giannopoulos, B. (2026) "Newly Discovered Extensive Hydrothermal Vent Fields Off Milos Island, Greece Greek City Times," *Greek City Times*, 1 January. Available at: <https://greekcitytimes.com/2026/01/01/milos-island-hydrothermal-vents-discovery/> (Accessed: March 16, 2026).
32. Di Luccio, F. and Pasyanos, M.E. (2007) "Crustal and upper-mantle structure in the Eastern Mediterranean from the analysis of surface wave dispersion curves," *Geophysical Journal International*, 169(3), pp. 1139–1152. Available at: <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2007.03332.x>.
33. Casten, U. and Snopek, K. (2006) "Gravity modelling of the Hellenic subduction zone — a regional study," *Tectonophysics*, 417(3), pp. 183–200. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2005.11.002>.
34. Halnon, E. (2025) *Study finds that magma helped drive recent Santorini earthquakes*, *OregonNews*. Available at: <https://news.uoregon.edu/study-finds-magma-helped-drive-recent-santorini-earthquakes> (Accessed: March 16, 2026).
35. Papazachos, C. *et al.* (2025) "The Santorini 2024–2025 Volcano-Tectonic Sequence: Constraining the Initial Phase of the Intra-Caldera Unrest," *Geophysical Research Letters*, 52(13), p. e2025GL115856. Available at: <https://doi.org/10.1029/2025GL115856>.
36. Maeno, F. (2025) "Global database on surface phenomena and hazards of explosive submarine eruptions with application to hazards of the Kolumbo Volcanic Field," *Bulletin of Volcanology*, 87(10), p. 87. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00445-025-01871-8>.
37. Anagnostou, E. *et al.* (2025) "Hydrothermal mercury inputs from the Kolumbo Submarine Volcano," *Goldschmidt2025 abstracts*. *Goldschmidt2025*, Prague, Czech Republic: European Association of Geochemistry. Available at: <https://doi.org/10.7185/gold2025.31407>.
38. Chrapkiewicz, K. *et al.* (2022) "Magma Chamber Detected Beneath an Arc Volcano With Full-Waveform Inversion of Active-Source Seismic Data," *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 23(11), p. e2022GC010475. Available at: <https://doi.org/10.1029/2022GC010475>.
39. Mcnair, B. (2024) "What Are Phreatomagmatic Eruptions and How They Form?," *Geology Base*, 10 January. Available at: <https://geologybase.com/phreatomagmatic-eruptions/> (Accessed: March 16, 2026).
40. Isken, M.P. *et al.* (2025) "Volcanic crisis reveals coupled magma system at Santorini and Kolumbo," *Nature*, 645(8082), pp. 939–945. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41586-025-09525-7>.
41. Department of Earth Science University of Bergen (2013) "Seismicity of Norway and surrounding areas for 2013." Available at: https://nnsn.geo.uib.no/reports/2013/seismicity_2013.pdf (Accessed: March 16, 2026).
42. *Jan Mayen*. Available at: https://www.volcanodiscovery.com/de/jan_mayen-earthquakes.html (Accessed: March 16, 2026).
43. *M 7.4 - 15 km S of Hualien City, Taiwan*. Available at: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us7000m9g4/executive> (Accessed: March 16, 2026).
44. Kothari, R. (2024) "Taiwan logs record seismic activity with 42 quakes surpassing M5.5 in 2024" . Available at:

- <https://watchers.news/2024/12/07/taiwan-logs-record-seismic-activity-with-42-quakes-surpassing-magnitude-5-5/> (Accessed: March 16, 2026).
45. Qiu, J. *et al.* (2025) "Coseismic deformation and seismogenic structure of the 2024 Hualien Earthquake measured by InSAR and GNSS," *Earthquake Research Advances*, 5(1), p. 100328. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.eqrea.2024.100328>.
 46. Mao, Z. *et al.* (2025) "Seismo-Traveling Ionospheric Disturbances from the 2024 Hualien Earthquake: Altitude-Dependent Propagation Insights," *Remote Sensing*, 17(7). Available at: <https://doi.org/10.3390/rs17071241>.
 47. *M 7.7 - 21 km S of Puli, Taiwan*. Available at: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp0009eq0/executive> (Accessed: March 16, 2026).
 48. *M 7.4 - 8 km SSW of Hualien City, Taiwan*. Available at: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp0003009/executive> (Accessed: March 16, 2026).
 49. Chen, Y. *et al.* (2025) "Coseismic slip model and early post-seismic deformation processes of the 2024 M7.5 Noto Peninsula, Japan earthquake revealed by InSAR and GPS observations," *Geophysical Journal International*, 240(2), pp. 1048–1063. Available at: <https://doi.org/10.1093/gji/ggae429>.
 50. *Earthquake statistics: Ishikawa-ken, Japan - detailed charts and tables, current and past seismic activity*. Available at: <https://www.volcanodiscovery.com/earthquakes/japan/ishikawa/stats.html> (Accessed: March 16, 2026).
 51. "Earthquake Lifts the Noto Peninsula - NASA Science" (2024), 25 January. Available at: <https://science.nasa.gov/earth/earth-observatory/earthquake-lifts-the-noto-peninsula-152350/> (Accessed: March 16, 2026).
 52. List of major earthquakes since the Great East Japan Earthquake (2025) *nippon.com*. Available at: <https://www.nippon.com/ja/features/h20002/> (Accessed: March 16, 2026).
 53. *Volcanic Eruptions on the Reykjanes Peninsula in Iceland - A Complete Timeline (2021-2025)* (2026) *Guide to Iceland*. Available at: <https://guidetoiceland.is/best-of-iceland/volcanic-eruptions-on-the-reykjanes-peninsula-in-iceland-a-complete-timeline-2021-2024> (Accessed: March 16, 2026).
 54. *The ninth eruption on the Sundhnúkur crater row has ended | News | Icelandic Meteorological office* (2025). Available at: <https://en.vedur.is/about-imo/news/a-magma-intrusion-has-started-on-sundhnuksgigarod-crater-row> (Accessed: March 16, 2026).
- Iceland's volcano eruptions may last decades, researchers find* (2024). Available at: <https://phys.org/news/2024-06-iceland-volcano-eruptions-decades.html> (Accessed: March 16, 2026).
- Molinek, R. (2024) *Hidden Underground Magma Pools Fueled Iceland's Volcanic Eruptions, Study Suggests*, *Smithsonian Magazine*. Available at: <https://www.smithsonianmag.com/smart-news/hidden-underground-magma-pools-fueled-icelands-volcanic-eruptions-study-suggests-180984818/> (Accessed: March 16, 2026).
55. Schanen, N. (2025) "Iceland volcano leaves visual spectacle in 12th eruption in four years," *The Washington Post*, 16 July. Available at: <https://www.washingtonpost.com/world/2025/07/16/iceland-volcano-eruption-blue-lagoon/> (Accessed: March 16, 2026).
 56. *Global Volcanism Program | Report on Reykjanes (Iceland) — 30 July-5 August 2025* (2025). Available at: <https://volcano.si.edu/ShowReport.cfm?doi=10.5479/si.GVP.WVAR20250730-371020> (Accessed: March 16, 2026).

57. United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs (2023) "Earthquake: Türkiye and north-west Syria." Available at: <https://www.rcce-collective.net/wp-content/documents-repo/Earthquake/Resources/Situation/Earthquake/GZT-FlashUpdate-FIN.pdf> (Accessed: March 16, 2026).
58. Demir, A. *et al.* (2025) "Destructive impact of successive high magnitude earthquakes occurred in Türkiye's Kahramanmaraş on February 6, 2023," *Bulletin of Earthquake Engineering*, 23(3), pp. 893–919. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10518-024-01865-5>.
59. Rosakis, A., Abdelmeguid, M. and Elbanna, A. (2023) "Evidence of Early Supershear Transition in the Mw 7.8 Kahramanmaraş Earthquake From Near-Field Records." arXiv. Available at: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2302.07214>.
60. Sahin, S. (2023) "Last 123 years' largest earthquakes in Türkiye". Available at: <https://www.aa.com.tr/en/turkiye/last-123-years-largest-earthquakes-in-turkiye/2836533> (Accessed: March 16, 2026).
61. Temblor (2023) "Major earthquake strikes the Philippines, followed by unusually large aftershocks," *Temblor.net*, 7 December. Available at: <https://temblor.net/temblor/major-earthquake-strikes-the-philippines-followed-by-unusually-large-aftershocks-15758/> (Accessed: March 16, 2026).
62. *Significant Earthquakes - 2023*. Available at: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/browse/significant.php?year=2023> (Accessed: March 16, 2026).
63. *M 7.7 - 4 km E of Macapsing, Philippines*. Available at: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp0004bxs/executive> (Accessed: March 16, 2026).
64. *Ethiopia Earthquake 2025 - DREF Operation (MDRET037) - Ethiopia | ReliefWeb* (2025). Available at: <https://reliefweb.int/report/ethiopia/ethiopia-earthquake-2025-dref-operation-mdret037> (Accessed: March 16, 2026).
65. Wright, T.J. *et al.* (2006) "Magma-maintained rift segmentation at continental rupture in the 2005 Afar dyking episode," *Nature*, 442(7100), pp. 291–294. Available at: <https://doi.org/10.1038/nature04978>.
66. "Earth Observatory - NASA Science" (1999), 29 April. Available at: <https://earthobservatory.nasa.gov/images/event/50989> (Accessed: March 16, 2026).
67. *Dabbahu*. Available at: <https://www.volcanodiscovery.com/dabbahu.html> (Accessed: March 16, 2026).
68. *Dofen*. Available at: <https://www.volcanodiscovery.com/dofen.html> (Accessed: March 16, 2026).
- Fantale*. Available at: <https://www.volcanodiscovery.com/fantale.html> (Accessed: March 16, 2026).
- Way, L. *et al.* (2025) "Real-time satellite monitoring of the 2024–2025 dyke intrusion sequence at Fentale-Dofen volcanoes, Ethiopia," *Bulletin of Volcanology*, 87(11), p. 100. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00445-025-01884-3>.
69. *Experts On Why Volcano Hayli Gubbi Erupted After 12,000 Years* (2025) NDTV. Available at: <https://www.ndtv.com/world-news/why-volcano-hayli-gubbi-erupted-after-12-000-years-what-experts-said-9694900> (Accessed: March 16, 2026).
- Press, T.A. (2025) *Volcano in Ethiopia erupts for first time in nearly 12,000 years: "It felt like a sudden bomb"* - CBS News. Available at: <https://www.cbsnews.com/news/volcano-erupts-first-time-12000-years-hayli-gubbi-ethiopia/> (Accessed: March 16, 2026).
70. Yadav, R. (2025) *Lava surge at Erta Ale volcano reaches historic camp for first time in 20 years, Ethiopia, The Watchers*. Available at:

<https://watchers.news/2025/01/17/lava-surge-at-erta-ale-volcano-reaches-historic-camp-for-first-time-in-20-years-ethiopia/> (Accessed: March 16, 2026).

71. Blašković, T. (2025) *Sudden eruption produces dense ash plume at Erta Ale volcano, Ethiopia*, *The Watchers*. Available at: <https://watchers.news/2025/07/15/erta-ale-volcano-eruption-dense-ash-emission-ethiopia-july-2025/> (Accessed: March 16, 2026).
72. Szeglat, M. (2025) "OI Doinyo Lengai: Thermal Anomaly Suggests Lava Overflow | volcanoes and eruptions," 14 June. Available at: <https://www.volcanoes.de/2025/06/14/ol-doinyo-lengai-thermal-anomaly-suggests-lava-overflow/> (Accessed: March 16, 2026).
73. UNESCO World Heritage Centre (2017) *Mid-Atlantic Ridge*. Available at: <https://whc.unesco.org/en/tentativelists/6231/> (Accessed: March 16, 2026).
74. "Southeast Indian Ridge" (2025) *Wikipedia*. Available at: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Southeast Indian Ridge&oldid=1315112042](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Southeast_Indian_Ridge&oldid=1315112042) (Accessed: March 16, 2026).
75. *Major magnitude 7.5 earthquake - 2025 Southern Drake Passage Earthquake on Thursday, Aug 21, 2025, at 10:16 pm (GMT -4)*. Available at: <https://www.volcanodiscovery.com/earthquakes/22087250/2025-08-22/02h16/magnitude7-Drake-Passage.html> (Accessed: March 16, 2026).
76. *Major magnitude 7.6 earthquake - Drake Passage on Friday, Oct 10, 2025, at 04:29 pm (GMT -4)*. Available at: <https://www.volcanodiscovery.com/earthquakes/22261987/2025-10-10/20h29/magnitude7-Antarctica-Drake-Passage.html> (Accessed: March 16, 2026).
77. *IRIS Newsletter: Volume 2000, No. 1* (2000). Available at: <https://ds.iris.edu/news/IRISnewsletter/volume2000no1/page-02-04.htm> (Accessed: March 16, 2026).
78. Cesca, S. *et al.* (2022) "Massive earthquake swarm driven by magmatic intrusion at the Bransfield Strait, Antarctica," *Communications Earth & Environment*, 3(1), p. 89. Available at: <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00418-5>.
79. Finley, T. *et al.* (2025) "Large Surface-Rupturing Earthquakes and a >12 kyr, Open Interseismic Interval on the Tintina Fault, Yukon," *Geophysical Research Letters*, 52(14), p. e2025GL116050. Available at: <https://doi.org/10.1029/2025GL116050>.
80. "Scientists Warn: Tintina Fault Could Unleash Major Earthquake" (2025) *SciTechDaily*, 27 July. Available at: <https://scitechdaily.com/scientists-warn-tintina-fault-could-unleash-major-earthquake/> (Accessed: March 16, 2026).
81. Team Paislobo Prensa (2025) *Reportan 160 sismos en dos horas en el volcán Laguna del Maule*, *Paislobo Prensa*. Available at: <https://www.paislobo.cl/2025/04/reportan-160-sismos-en-dos-horas-en-el.html> (Accessed: March 16, 2026).
82. National Service for Disaster Prevention and Response SENAPRED (2025) "Sernageomin issues yellow technical alert for the Laguna del Maule volcanic complex". Available at: <https://www.senapred.cl/2025/08/06/sernageomin-decreta-alerta-tecnica-amarilla-para-el-complejo-volcanico-laguna-del-maule/> (Accessed: March 16, 2026).
83. *Global Volcanism Program | Laguna del Maule* (2025) *Smithsonian Institution | Global Volcanism Program*. Available at: <https://volcano.si.edu/volcano.cfm?vn=357061> (Accessed: March 16, 2026).

84. Hall, S. (2018) *A Supervolcano with a Cold Heart May Be Brewing in Chile*, *Scientific American*. Available at: <https://www.scientificamerican.com/article/a-supervolcano-with-a-cold-heart-may-be-brewing-in-chile/> (Accessed: March 16, 2026).
- Volcano warning after 160 earthquakes in just two hours* (2025) *The Independent*. Available at: <https://www.independent.co.uk/news/world/americas/chile-andes-earthquake-laguna-del-maule-volcano-b2732340.html> (Accessed: March 16, 2026).
85. *Newest Volcano Notice Including Mount Rainier* (2025). Available at: <https://volcanoes.usgs.gov/hans-public/volcano/wa6> (Accessed: March 16, 2026).
86. *Monitoring stations detect small magnitude earthquakes at Mount Rainier during July and August 2025* | U.S. Geological Survey (2025). Available at: <https://www.usgs.gov/observatories/cvo/news/monitoring-stations-detect-small-magnitude-earthquakes-mount-rainier> (Accessed: March 16, 2026).
87. PNSN (2025) "Mount Rainier earthquake swarm of July, 2025". Available at: <https://pnsn.org/blog/mount-rainier-earthquake-swarm-of-july-2025> (Accessed: March 16, 2026).
88. Daily, A.H.T. (2025) *Mount Rainier undergoes largest earthquake swarm in decades*, *The Daily*. Available at: <https://www.dailyuw.com/article/earthquake-20250728> (Accessed: March 16, 2026).
89. Pfeffinger, R. (2025) *WA seismic activity prompting new eruption plan for Mount Adams, Mount St. Helens*, *FOX 13 Seattle*. FOX 13 Seattle. Available at: <https://www.fox13seattle.com/news/eruption-planning-mt-adams-helens> (Accessed: March 16, 2026).
90. Staff, F. 12 and staff, G.N. (2024) *Magma beneath Mount St. Helens is 'recharging,' scientists say*, <https://www.kfyrtv.com>. Available at: <https://www.kfyrtv.com/2024/06/23/magma-beneath-mount-st-helens-is-recharging-scientists-say/> (Accessed: March 16, 2026).
91. Washington Military Administrator (2025) *What to do about Mount St. Helens and Mount Adams?* Available at: <https://mil.wa.gov/news/what-to-do-about-mount-st-helens-and-mount-adams> (Accessed: March 16, 2026).
92. Wirth, E. *et al.* (2025) "Earthquake Probabilities and Hazards in the U.S. Pacific Northwest." Available at: <https://pubs.usgs.gov/fs/2025/3050/fs20253050.pdf>.
93. "The West Coast Is at Risk: New Megathrust Fault Research Indicates That the Next Big Earthquake Could Be Imminent" (2024) *SciTechDaily*, 28 August. Available at: <https://scitechdaily.com/the-west-coast-is-at-risk-new-megathrust-fault-research-indicates-that-the-next-big-earthquake-could-be-imminent/> (Accessed: March 16, 2026).
94. Williams, K. (2025) *West Coast quake zones may be more connected than previously thought*, *Axios*. Available at: <https://www.axios.com/local/portland/2025/10/15/cascadia-san-andreas-fault-connection-earthquake> (Accessed: March 16, 2026).
95. Silleni, A. *et al.* (2020) "The Magnitude of the 39.8 ka Campanian Ignimbrite Eruption, Italy: Method, Uncertainties and Errors," *Frontiers in Earth Science*, 8. Available at: <https://doi.org/10.3389/feart.2020.543399>.
96. Costa, A. *et al.* (2021) "The long and intertwined record of humans and the Campi Flegrei volcano (Italy)," *Bulletin of Volcanology*, 84(1), p. 5. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00445-021-01503-x>.
97. Marti, A. *et al.* (2016) "Reconstructing the plinian and co-ignimbrite sources of large volcanic eruptions: A novel approach for the Campanian Ignimbrite," *Scientific Reports*, 6, p. 21220. Available at: <https://doi.org/10.1038/srep21220>.

98. *Did a volcanic cataclysm 40,000 years ago trigger the final demise of the Neanderthals?* (2015) *ScienceDaily*. Available at: <https://www.sciencedaily.com/releases/2015/03/150320112332.htm> (Accessed: March 16, 2026).
99. Szeglat, M. (2025a) "Campi Flegrei: Erdbebenschwarm am 11. Oktober," *Vulkane Net Newsblog*, 11 October. Available at: <https://www.vulkane.net/blogmobil/campi-flegrei-erdbebenschwarm-am-11-oktober/> (Accessed: March 16, 2026).
100. *Monitoraggio Terremoti Campi Flegrei*. Available at: <https://www.terremotiflegrei.it/filtro.php?from=2025-01-01&to=2025-11-03&minmag=4> (Accessed: March 16, 2026).
- Campi Flegrei (Phlegrean Fields)*. Available at: <https://www.volcanodiscovery.com/campi-flegrei-earthquakes/archive/2025.html> (Accessed: March 16, 2026).
101. Rapagnani, G. *et al.* (2025) "Coupled earthquakes and resonance processes during the uplift of Campi Flegrei caldera," *Communications Earth & Environment*, 6(1), p. 607. Available at: <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02604-7>.
102. *Campi Flegrei, l'asfalto "bolle": arrivano i tecnici dell'INGV* (2025) *Newsroom Italia*. Available at: <https://newsroom24.it/notizia/2025/10/02/campi-flegrei-lasfalto-bolle-arrivano-i-tecnici-dellingv> (Accessed: March 16, 2026).
103. Kilburn, C.R.J. *et al.* (2023) "Potential for rupture before eruption at Campi Flegrei caldera, Southern Italy," *Communications Earth & Environment*, 4(1), p. 190. Available at: <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00842-1>.
104. Guardascione, P. (2025) "Earthquake in Campi Flegrei, Di Vito (INGV): "In Campi Flegrei, gas emissions have increased at Solfatara and decreased at Pisciarelli." Available at: https://www.ilmattino.it/napoli/area_metropolitana/terremoto_campi_flegrei_di_vito_ingv_campi_flegrei_aumentata_emissione_gas_solfatara_diminuite_pisciarelli-9032201.html?refresh_ce (Accessed: March 16, 2026).
105. INGV (2025) "Bollettino di Sorveglianza CAMPI FLEGREI OTTOBRE 2025". Available at: <https://www.ov.ingv.it/index.php/monitoraggio-e-infrastrutture/bollettini-tutti/bollett-mensili-cf/anno-2025-3/1897-bollettino-mensile-campi-flegrei-2025-10/file> (Accessed: March 16, 2026).
106. Frattasi, P. (2025) "The Campi Flegrei road is full of bubbles and deformed. INGV technicians at Solfatara." Available at: <https://www.fanpage.it/napoli/la-strada-dei-campi-flegrei-e-deformata-bolle-sullasfalto-alla-solfatara-i-tecnici-dellingv/> (Accessed: March 16, 2026).
107. "Smoke billows from the asphalt at Campi Flegrei" (2025). Available at: <https://www.ilfattovesuviano.it/2025/10/campi-flegrei-fuoriesce-fumo-dallasfalto/> (Accessed: March 16, 2026).
- Campi Flegrei: segnalata fuoriuscita di fumo dall'asfalto* (2025) *Napoli ZON*. Available at: <https://napoli.zon.it/campi-flegrei-segnalata-fuoriuscita-di-fumo-dallasfalto/> (Accessed: March 16, 2026).
108. *Terremoto Campi Flegrei, Pappalardo: «Sollevamento in aumento con media di 20 millimetri al mese»* (2025). Available at: https://www.ilmattino.it/napoli/area_metropolitana/pappalardo_campi_flegrei_velocita_di_sollevamento_bradisismo_aumentata_un_valore_medio_di_20_millimetri_al_mese-9164652.html (Accessed: March 16, 2026).
109. Forni, F. *et al.* (2018) "Long-term magmatic evolution reveals the beginning of a new caldera cycle at Campi Flegrei," *Science Advances*, 4(11), p. eaat9401. Available at: <https://doi.org/10.1126/sciadv.aat9401>.

110. “Campi Flegrei Volcano’s Ancient Cycle Seems to End in Large Eruption” (2018). Available at: <https://www.nytimes.com/2018/11/14/science/volcano-eruption-italy.html#> (Accessed: March 16, 2026).
111. Marini, L., Principe, C. and Lelli, M. (2025) “Time changes during the last 40 years in the Solfatara magmatic–hydrothermal system (Campi Flegrei, Italy): new conceptual model and future scenarios,” *Solid Earth*, 16(6), pp. 551–578. Available at: <https://doi.org/10.5194/se-16-551-2025>.
112. The Munich Eye (2025) *Supervolcano Near Naples Poses Immediate Eruption Threat*. Available at: <https://themunicheye.com/supervolcano-near-naples-eruption-threat-13549>. (Accessed: March 16, 2026).
113. Nishihara, A., Geshi, N. and Naruo, H. (2022) “Long-term change of the eruption activities of Sakurajima volcano, Japan, inferred from the fallout tephra deposits,” *Frontiers in Earth Science*, 10, p. 988373. Available at: <https://doi.org/10.3389/feart.2022.988373>.
- Sakurajima(2): Eruption History of Sakurajima Volcano*. Available at: https://gbank.gsj.jp/volcano/Act_Vol/sakurajima/text/eng/exp01-2e.html# (Accessed: March 16, 2026).
114. Huber, C. and Toramaru, A. (2024) “Increase in magma supply to Sakurajima volcano’s (Japan) shallow magma chamber over the past 500 years,” *Geology*, 52(4), pp. 235–239. Available at: <https://doi.org/10.1130/G51763.1>.
115. Todde, A. *et al.* (2017) “The 1914 Taisho eruption of Sakurajima volcano: stratigraphy and dynamics of the largest explosive event in Japan during the twentieth century,” *Bulletin of Volcanology*, 79(10), p. 72. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00445-017-1154-4>.
116. “Sakurajima | Kagoshima Travel Information” (2025), 29 September. Available at: <https://www.offthetrackjapan.com/sakurajima/> (Accessed: March 16, 2026).
117. *Sakurajima, Japan’s Most Active Volcano* (2018) *nippon.com*. Available at: <https://www.nippon.com/en/features/h00194/> (Accessed: March 16, 2026).
118. Kagoshima Meteorological Office (2026). Monthly eruptions of Sakurajima. Available at: https://www.data.jma.go.jp/kagoshima/vol/data/skr_erp_num.html (Accessed: March 16, 2026).
119. *Outline of Sakurajima (Current Status)*. Available at: <https://www.city.kagoshima.lg.jp/kikikanri/leadingcity/current.html> (Accessed: March 16, 2026).
120. Klemetti, E. (2015) “Sakurajima in Japan Might Be Headed Towards a Large Eruption,” *Wired*, 15 August. Available at: <https://www.wired.com/2015/08/sakurajima-japan-might-headed-towards-large-eruption/> (Accessed: March 16, 2026).
121. Marks, P.L. and Nowak, M. (2025) “Vesiculation dynamics – Part 1: Decompression-induced H₂O vesicle formation in the Lower Laacher See phonolitic melt,” *European Journal of Mineralogy*, 37(4), pp. 385–412. Available at: <https://doi.org/10.5194/ejm-37-385-2025>.
122. Skapski, J. (2025) “Erdbebenschwarm am Laacher See,” *Erdbebennews*, 10 October. Available at: <https://erdbebennews.de/2025/10/erdbebenschwarm-am-laacher-see/> (Accessed: March 16, 2026).
123. *Weak mag. 2.7 earthquake - 14 km west of Koblenz, Kreisfreie Stadt Pirmasens, Rheinland-Pfalz, Germany, on Friday, Oct 31, 2025, at 01:55 am (Berlin time)*. Available at: <https://www.volcanodiscovery.com/earthquakes/quake-info/22334958/info.html> (Accessed: March 16, 2026).
124. Laumann, P. *et al.* (2026) “Microseismicity reveals fault activation and fluid processes beneath the Neuwied Basin and Laacher See Volcano, East Eifel, Germany,” *Geophysical Journal International*, 244(2), p. ggaf475. Available at: <https://doi.org/10.1093/gji/ggaf475>.
125. *Deep low-frequency earthquakes indicate migration of magmatic fluids beneath Laacher See Volcano (Eifel, Germany)* (2019). Available at:

- <https://www.gfz.de/en/press/news/details/deep-low-frequency-earthquakes-indicate-migration-of-magmatic-fluids-beneath-laacher-see-volcano-eifel-germany> (Accessed: March 16, 2026).
126. Deng, Z. *et al.* (2024) "Deformation Monitoring on Laacher See by GNSS." Available at: https://files.igs.org/pub/resource/pubs/workshop/2024/IGSWs-2024-PS0504-Deng-Deformation_Monitoring_on_Laacher_See_Volcano_by_GNSS.pdf.
127. Hensch, M. *et al.* (2019) "Deep low-frequency earthquakes reveal ongoing magmatic recharge beneath Laacher See Volcano (Eifel, Germany)," *Geophysical Journal International*, 216(3), pp. 2025–2036. Available at: <https://doi.org/10.1093/gji/ggy532>.
128. "Is Germany's Active Volcano Awakening?" (2019) *Armstrong Economics*, 16 May. Available at: <https://www.armstrongeconomics.com/international-news/nature/germanys-active-volcano-awakening/> (Accessed: March 16, 2026).
129. Secretariat of the Pacific Regional Environment Programme (2021) "Volcanoes of the World - Global Volcanism Program". Available at: <https://fsm-data.sprep.org/dataset/volcanoes-world-global-volcanism-program> (Accessed: March 16, 2026).
130. NASA/GSFC/SED/ESD/TISL/GESDISC (2025) *Multi-Satellite Air Quality Sulfur Dioxide (SO₂) Database Long-Term L4 Global V2 (MSAQSO2L4) at GES DISC - NASA Open Data Portal*. Available at: <https://data.nasa.gov/dataset/multi-satellite-air-quality-sulfur-dioxide-so2-database-long-term-l4-global-v2-msaqso2l4-a-d5d7e> (Accessed: March 16, 2026).
131. World Economic Forum "NASA tracks volcanic eruption signs from space". Available at: <https://www.weforum.org/videos/nasa-volcanic-eruptions/> (Accessed: March 16, 2026).
132. "Advanced Very-High-Resolution Radiometer" (2025) *Wikipedia*. Available at: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Advanced_Very-High-Resolution_Radiometer&oldid=1330309367 (Accessed: March 16, 2026).
133. "Sensing Remote Volcanoes - NASA Science" (2004). Available at: <https://science.nasa.gov/earth/earth-observatory/sensing-remote-volcanoes/> (Accessed: March 16, 2026).
134. Carter, J. (2022) *Earth Is Suddenly Spinning Faster. Why Our Planet Just Recorded Its Shortest Day Since Records Began*, *Forbes*. Available at: <https://www.forbes.com/sites/jamiecartereurope/2022/07/28/earth-is-suddenly-spinning-faster-why-our-planet-just-recorded-its-shortest-day-since-records-began/> (Accessed: March 16, 2026).
135. Franco, L. (2024) *Earth's Rotation Confirmed to Have Slowed Down, Inner Core Appears to be Reversing and Backtracking*, *Nature World News*. Available at: <https://www.natureworldnews.com/articles/62027/20240617/earths-rotation-confirmed-slowed-down-inner-core-appears-reversing-backtracking.htm> (Accessed: March 16, 2026).
136. Livermore, Philip W., Hollerbach, R. and Finlay, C.C. (2017) "An accelerating high-latitude jet in Earth's core," *Nature Geoscience*, 10(1), pp. 62–68. Available at: <https://doi.org/10.1038/ngeo2859>.
137. Jeffries, E. (2025) *Earth's Magnetic North Pole Is Shifting Toward Siberia and Raising Questions About Unusual Movement*, *Smithsonian Magazine*. Available at: <https://www.smithsonianmag.com/smart-news/earths-magnetic-north-pole-is-shifting-toward-siberia-and-raising-questions-about-unusual-movement-180985892/> (Accessed: March 16, 2026).
138. *World Magnetic Model Out-of-Cycle Release* (2019) *National Centers for Environmental Information (NCEI)*. Available at: <https://www.ncei.noaa.gov/news/world-magnetic-model-out-cycle-release> (Accessed: March 16, 2026).

139. Paris, F. (2019) "As Magnetic North Pole Zooms Toward Siberia, Scientists Update World Magnetic Model," *NPR*, 4 February. Available at: <https://www.npr.org/2019/02/04/691471616/as-magnetic-north-pole-zooms-toward-siberia-scientists-update-world-magnetic-mod> (Accessed: March 16, 2026).
140. Andronico, D. *et al.* (2021) "Uncovering the eruptive patterns of the 2019 double paroxysm eruption crisis of Stromboli volcano," *Nature Communications*, 12(1), p. 4213. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41467-021-24420-1>.
141. Giacomuzzi, G. *et al.* (2024) "Tracking transient changes in the plumbing system at Campi Flegrei Caldera," *Earth and Planetary Science Letters*, 637, p. 118744. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2024.118744>.
142. Whitt, K.K. (2021) *EarthSky* | *Taupo supervolcano needs monitoring, scientists say*. Available at: <https://earthsky.org/earth/taupo-supervolcano-needs-monitoring/> (Accessed: March 16, 2026).
- GeoNet (2022) Taupō Volcano: Volcanic Alert Level raised to Level 1. Ongoing earthquakes and deformation indicating minor volcanic unrest. Available at: <https://www.geonet.org.nz/vabs/6WkpJjHluMfBLGRAymIQjX> (Accessed: March 16, 2026).
143. *Earth's Magnetic Field Is Fading* (2004) *Science*. Available at: <https://www.nationalgeographic.com/science/article/earths-magnetic-field-is-fading> (Accessed: March 16, 2026).
144. *Are the Earth's poles about to flip?* | *PBS News* (2013). Available at: <https://www.pbs.org/newshour/nation/are-the-earths-poles-about-the-flip> (Accessed: March 16, 2026).
- Zolfagharifard, E. (2014) *Forget global warming, it's the MAGNETOSPHERE we need to worry about*, *Mail Online*. Available at: <https://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-2545465/Forget-global-warming-worry-MAGNETOSPHERE-Earths-magnetic-field-collapsing-affect-climate-wipe-power-grids.html> (Accessed: March 16, 2026).
145. *Our protective shield*. Available at: https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/FutureEO/Swarm/Our_protective_shield (Accessed: March 16, 2026).
- Our protective shield* (2021). Available at: https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2021/08/Our_protective_shield (Accessed: March 16, 2026).
146. Dickerson, K. (2014) *Earth's Magnetic Field Is Weakening 10 Times Faster Now*, *Live Science*. Available at: <https://www.livescience.com/46694-magnetic-field-weakens.html> (Accessed: March 16, 2026).
147. *Scientific American* (2014) *Earth's Magnetic Field Flip Could Happen Sooner Than Expected*, *Scientific American*. Available at: <https://www.scientificamerican.com/article/earth-s-magnetic-field-flip-could-happen-sooner-than-expected/> (Accessed: March 16, 2026).
- Zolfagharifard, E. (2018) *Earth's magnetic poles show signs they are about to FLIP*, *Mail Online*. Available at: <http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-5334421/Earths-magnetic-poles-signs-FLIP.html> (Accessed: March 16, 2026).
148. "South Atlantic Anomaly" (2025) *Wikipedia*. Available at: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=South_Atlantic_Anomaly&oldid=1326326002 (Accessed: March 16, 2026).

149. Geggel, L. (2020) *The north magnetic pole is leaving Canada for Siberia. These “blobs” may be the reason why.*, *Live Science*. Available at: <https://www.livescience.com/magnetic-north-pole-to-siberia.html> (Accessed: March 16, 2026).
150. *Swarm reveals growing weak spot in Earth’s magnetic field* (2025). Available at: https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/FutureEO/Swarm/Swarm_reveals_growing_weak_spot_in_Earth_s_magnetic_field (Accessed: March 16, 2026).
- Finlay, C.C., Kloss, C. and Gillet, N. (2025) “Core field changes from eleven years of *Swarm* satellite observations,” *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 368, p. 107447. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2025.107447>.
151. Pare, S. (2025) *A massive weak spot in Earth’s magnetic field is growing, scientists discover*, *Live Science*. Available at: <https://www.livescience.com/planet-earth/a-massive-weak-spot-in-earths-magnetic-field-is-growing-scientists-discover> (Accessed: March 16, 2026).
152. “How NASA Tracked the Most Intense Solar Storm in Decades - NASA Science” (2024), 16 May. Available at: <https://science.nasa.gov/science-research/heliophysics/how-nasa-tracked-the-most-intense-solar-storm-in-decades/> (Accessed: March 16, 2026).
153. iMeteo.sk (2024) *A už fakt niečo nie je v poriadku! Polárna žiara získala ZELENÉ farby, čo je u nás vzácnosťou*, *iMeteo.sk*. Available at: <https://www.imeteo.sk/spravy/a-uz-fakt-nieco-nie-je-v-poriadku-polarna-ziara-ziskala-zelene-farby-co-je-u-nas-vzacnostou> (Accessed: March 16, 2026).
154. “Auroras - NASA Science” (2025), 4 February. Available at: <https://science.nasa.gov/sun/auroras/> (Accessed: March 16, 2026).
155. *Polární záře z ČR - Optické úkazy v atmosféře*. Available at: <http://ukazy.astro.cz/polar.php> (Accessed: March 16, 2026).
156. *Solar Cycle Progression | NOAA / NWS Space Weather Prediction Center*. Available at: <https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression> (Accessed: March 16, 2026).
157. *Severe Magnetic Storm-January 6, 2025 | U.S. Geological Survey* (2025). Available at: <https://www.usgs.gov/programs/geomagnetism/science/severe-magnetic-storm-january-6-2025> (Accessed: March 16, 2026).
158. “Near Miss: The Solar Superstorm of July 2012 - NASA Science” (2014), 22 July. Available at: https://science.nasa.gov/science-research/planetary-science/23jul_superstorm/ (Accessed: March 16, 2026).
159. Rohde, R. (2024) “August 2024 Temperature Update,” *Berkeley Earth*, 2 October. Available at: <https://berkeleyearth.org/august-2024-temperature-update/> (Accessed: March 16, 2026).
160. Rand, D. (2025) “August 2025 Temperature Update,” *Berkeley Earth*, 17 September. Available at: <https://berkeleyearth.org/august-2025-temperature-update/> (Accessed: March 16, 2026).
161. AUBOURG, L. (2024) *2023’s record heat partly driven by “mystery” process: NASA scientist*. Available at: <https://phys.org/news/2024-01-driven-mystery-nasa-scientist.html> (Accessed: March 16, 2026).
162. Rosenthal, Y., Linsley, B.K. and Oppo, D.W. (2013) “Pacific Ocean Heat Content During the Past 10,000 Years,” *Science*, 342(6158), pp. 617–621. Available at: <https://doi.org/10.1126/science.1240837>.
163. Meinen, C.S. *et al.* (2020) “Observed Ocean Bottom Temperature Variability at Four Sites in the Northwestern Argentine Basin: Evidence of Decadal Deep/Abysal Warming Amidst Hourly to Interannual Variability During 2009–2019,” *Geophysical Research Letters*, 47(18), p. e2020GL089093. Available at: <https://doi.org/10.1029/2020GL089093>.

164. Holden, E. (2020) “Temperatures of deepest ocean rising quicker than previously thought,” *The Guardian*, 14 October. Available at: <https://www.theguardian.com/environment/2020/oct/14/enormous-amount-of-heat-even-deepest-ocean-is-warming-study> (Accessed: March 16, 2026).
165. Frey, D.I., Morozov, E.G. and Smirnova, D.A. (2023) “Sea level anomalies affect the ocean circulation at abyssal depths,” *Scientific Reports*, 13(1), p. 20829. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-48074-9>.
166. Monroe, R. and Diego, U. of C.-S. (2025) *Study shows acceleration of global mean ocean circulation since 1990s*. Available at: <https://phys.org/news/2020-02-global-ocean-circulation-1990s.html> (Accessed: March 16, 2026).
167. Bryden, H.L. *et al.* (2014) “Impact of a 30% reduction in Atlantic meridional overturning during 2009–2010.” In situ Observations/All Depths/Deep Seas: North Atlantic/Current Field. Available at: <https://doi.org/10.5194/osd-11-789-2014>.
168. “Why is the North Atlantic breaking heat records?” (2023), 15 June. Available at: <https://www.sciencenews.org/article/north-atlantic-heat-record-sea-surface-temperature> (Accessed: March 16, 2026).
169. “2010 eruptions of Eyjafjallajökull” (2026) *Wikipedia*. Available at: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=2010_eruptions_of_Eyjafjallaj%C3%B6kull&oldid=1339641370 (Accessed: March 16, 2026).
170. Ditlevsen, P. and Ditlevsen, S. (2023) “Warning of a forthcoming collapse of the Atlantic meridional overturning circulation,” *Nature Communications*, 14(1), p. 4254. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41467-023-39810-w>.
- Carrington, D. and editor, D.C.E. (2023) “Gulf Stream could collapse as early as 2025, study suggests,” *The Guardian*, 25 July. Available at: <https://www.theguardian.com/environment/2023/jul/25/gulf-stream-could-collapse-as-early-as-2025-study-suggests> (Accessed: March 16, 2026).
- Paddison, L. (2023) *A crucial system of ocean currents is heading for a collapse that ‘would affect every person on the planet,’ CNN*. Available at: <https://www.cnn.com/2023/07/25/world/gulf-stream-atlantic-current-collapse-climate-scn-intl> (Accessed: March 16, 2026).
171. Ballarotta, M. *et al.* (2015) “Impact of the oceanic geothermal heat flux on a glacial ocean state.” *Climate Modelling/Modelling only/Pleistocene*. Available at: <https://doi.org/10.5194/cpd-11-3597-2015>.
- Scott, J.R., Marotzke, J. and Adcroft, A. (2001) “Geothermal heating and its influence on the meridional overturning circulation,” *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 106(C12), pp. 31141–31154. Available at: <https://doi.org/10.1029/2000JC000532>.
- Downes, S.M. *et al.* (2016) “The Transient Response of Southern Ocean Circulation to Geothermal Heating in a Global Climate Model,” *Journal of Climate*, 29(16), pp. 5689–5708. Available at: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0458.1>.
- Hofmann, M. and Morales Maqueda, M.A. (2009) “Geothermal heat flux and its influence on the oceanic abyssal circulation and radiocarbon distribution,” *Geophysical Research Letters*, 36(3). Available at: <https://doi.org/10.1029/2008GL036078>.
172. Crawford, W.C. *et al.* (2013) “Hydrothermal seismicity beneath the summit of Lucky Strike volcano, Mid-Atlantic Ridge,” *Earth and Planetary Science Letters*, 373, pp. 118–128. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2013.04.028>.

- Kamis, J.E. (2015) *Gulf Stream Shut Down Caused By Geological Heat Flow, Plate climatology*. Available at: <https://www.plateclimatology.com/gulf-stream-shut-down-caused-by-geological-heat-flow/> (Accessed: March 16, 2026).
173. “Earthquakes Linked to 2003 European Heat Wave: Implications for Global Warming-Evidence in the Adriatic and Mediterranean Basins (Revisited)” (2020). Available at: <https://www.semanticscholar.org/paper/Earthquakes-Linked-to-2003-European-Heat-Wave%3A-for/33369dc72b64fe006e1deac8d0922ac08ba47687> (Accessed: March 31, 2026).
174. Molchanov, O. (2010) “About climate-seismicity coupling from correlation analysis,” *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10(2), pp. 299–304. Available at: <https://doi.org/10.5194/nhess-10-299-2010>.
175. Viterito, A. (2022) “1995: An Important Inflection Point in Recent Geophysical History,” *International Journal of Environmental Sciences & Natural Resources*, 29(5), pp. 1–11. Available at: <https://doi.org/10.19080/IJESNR.2021.29.556271>.
176. *Climate change - Abrupt Changes, Earth History, Impacts | Britannica* (2026). Available at: <https://www.britannica.com/science/climate-change/Abrupt-climate-changes-in-Earth-history> (Accessed: March 16, 2026).
177. Staff, S. (2020) “Scientists: Greenland’s Ice Loss This Century on Track to Be Worst in 12,000 Years,” *ScienceAlert*, 30 September. Available at: <https://www.sciencealert.com/losing-greenland-s-ice-will-raise-seas-higher-than-any-level-seen-in-12-000-years> (Accessed: March 16, 2026).
178. Heinrich, H. (1988) “Origin and Consequences of Cyclic Ice Rafting in the Northeast Atlantic Ocean During the Past 130,000 Years,” *Quaternary Research*, 29(2), pp. 142–152. Available at: [https://doi.org/10.1016/0033-5894\(88\)90057-9](https://doi.org/10.1016/0033-5894(88)90057-9).
179. Max, L. *et al.* (2022) “Subsurface ocean warming preceded Heinrich Events,” *Nature Communications*, 13(1), p. 4217. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31754-x>.
180. Cooper, A. *et al.* (2015) “Abrupt warming events drove Late Pleistocene Holarctic megafaunal turnover,” *Science*, 349(6248), pp. 602–606. Available at: <https://doi.org/10.1126/science.aac4315>.
181. Sun, N. *et al.* (2020) “Volcanic origin for Younger Dryas geochemical anomalies ca. 12,900 cal B.P.,” *Science Advances*, 6(31), p. eaax8587. Available at: <https://doi.org/10.1126/sciadv.aax8587>.
182. Abbott, P. *et al.* (2021) “Volcanic climate forcing preceding the inception of the Younger Dryas: Implications for tracing the Laacher See eruption,” *Quaternary Science Reviews*, 274, p. 107260. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2021.107260>.
- Baldini, J.U.L., Brown, R.J. and Mawdsley, N. (2018) “Evaluating the link between the sulfur-rich Laacher See volcanic eruption and the Younger Dryas climate anomaly,” *Climate of the Past*, 14(7), pp. 969–990. Available at: <https://doi.org/10.5194/cp-14-969-2018>.
183. *Washington’s hidden Glacier Peak volcano is among the most dangerous* (2018) *The Seattle Times*. Available at: <https://www.seattletimes.com/seattle-news/science/washingtons-hidden-glacier-peak-volcano-is-among-the-most-dangerous/> (Accessed: March 16, 2026).
184. Sun, N. *et al.* (2020) “Volcanic origin for Younger Dryas geochemical anomalies ca. 12,900 cal B.P.,” *Science Advances*, 6(31), p. eaax8587. Available at: <https://doi.org/10.1126/sciadv.aax8587>.
185. Dai, C. *et al.* (2020) “Characterization of the 2008 Phreatomagmatic Eruption of Okmok From ArcticDEM and InSAR: Deposition, Erosion, and Deformation,” *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(6), p. e2019JB018977. Available at: <https://doi.org/10.1029/2019JB018977>.

186. *Katla | Icelandic, Glacier, Eruption | Britannica* (2026). Available at: <https://www.britannica.com/place/Katla> (Accessed: March 16, 2026).
187. Sansivero, F. "The First Epoch (15,000 - 10,600 years)". Available at: <https://www.ov.ingv.it/index.php/flegrei-storia-eruttiva/prima-epoca>.
188. *Sakurajima(2): Eruption History of Sakurajima Volcano*. Available at: https://gbank.gsj.jp/volcano/Act_Vol/sakurajima/text/eng/exp01-2e.html# (Accessed: March 16, 2026).
189. Mörner, N.-A. (1977) "The Gothenburg Magnetic Excursion," *Quaternary Research*, 7, pp. 413–427. Available at: [https://doi.org/10.1016/0033-5894\(77\)90031-X](https://doi.org/10.1016/0033-5894(77)90031-X).
- Chen, Z. *et al.* (2020) "Paleomagnetic evidence for the Gothenburg geomagnetic excursion during the Pleistocene–Holocene transition recorded in the Paleo-Danyang Lake, eastern China," *Journal of Asian Earth Sciences*, 201, p. 104140. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2019.104140>.
190. Guskova, E. *et al.* (2007) "Manifestation of the Gothenburg geomagnetic field excursion in the Barents Sea bottom sediments," *Geomagnetizm I Aeronomiya - GEOMAGN AERON*, 47, pp. 781–786. Available at: <https://doi.org/10.1134/S0016793207060126>.
191. Chen, Z. *et al.* (2020) "Paleomagnetic evidence for the Gothenburg geomagnetic excursion during the Pleistocene–Holocene transition recorded in the Paleo-Danyang Lake, eastern China," *Journal of Asian Earth Sciences*, 201, p. 104140. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2019.104140>.
192. Liu, J. *et al.* (2020a) "The Norwegian–Greenland Sea, the Laschamps, and the Mono Lake Excursions Recorded in a Black Sea Sedimentary Sequence Spanning From 68.9 to 14.5 ka," *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(8), p. e2019JB019225. Available at: <https://doi.org/10.1029/2019JB019225>.
193. Bertagnini, A. *et al.* (1998) "The Pomici di Base plinian eruption of Somma-Vesuvius," *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 83(3), pp. 219–239. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(98\)00025-0](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(98)00025-0).
- Eruptive history*. Available at: <https://www.protezionecivile.gov.it/en/approfondimento/eruptive-history/> (Accessed: March 16, 2026).
- Global Volcanism Program | Vesuvius* (1999) *Smithsonian Institution | Global Volcanism Program*. Available at: <https://volcano.si.edu/volcano.cfm?vn=211020> (Accessed: March 16, 2026).
194. McConnell, J.R. *et al.* (2017) "Synchronous volcanic eruptions and abrupt climate change ~17.7 ka plausibly linked by stratospheric ozone depletion," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(38), pp. 10035–10040. Available at: <https://doi.org/10.1073/pnas.1705595114>.
- Jex, C. (2017) *Volcanic eruptions hastened the end of the last ice age*. Available at: <https://www.sciencenordic.com/climate-change-denmark-geology/volcanic-eruptions-hastened-the-end-of-the-last-ice-age/1448735> (Accessed: March 16, 2026).
195. Barbetti, M.F. and McElhinny, M.W. (1976) "The Lake Mungo geomagnetic excursion," *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A: Mathematical and Physical Sciences*, 281(1305), pp. 515–542. Available at: <https://doi.org/10.1098/rsta.1976.0048>.
196. Whitt, K.K. (2021) *EarthSky | Taupo supervolcano needs monitoring, scientists say*. Available at: <https://earthsky.org/earth/taupo-supervolcano-needs-monitoring/> (Accessed: March 16, 2026).
- Wilson, F.I.-K., S.J. Barker, B. Smith, C.J.N. (2020) "Implications of a Supervolcano's Seismicity," *Eos*, 5 March. Available at: <https://eos.org/science-updates/implications-of-a-supervolcanos-seismicity> (Accessed: March 16, 2026).

- “Oruanui eruption” (2026) *Wikipedia*. Available at: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Oruanui_eruption&oldid=1335449906 (Accessed: March 16, 2026).
197. Barbetti, M.F. and McElhinny, M.W. (1976) “The Lake Mungo geomagnetic excursion,” *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A: Mathematical and Physical Sciences*, 281(1305), pp. 515–542. Available at: <https://doi.org/10.1098/rsta.1976.0048>.
 198. Benson, L. et al. (2003) “Age of the Mono Lake excursion and associated tephra,” *Quaternary Science Reviews*, 22(2), pp. 135–140. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0277-3791\(02\)00249-4](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(02)00249-4).
 199. *Kagoshima blast 30,000 years ago dumped ash in Tokyo | The Asahi Shimbun: Breaking News, Japan News and Analysis* (2022) *The Asahi Shimbun*. Available at: <https://www.asahi.com/ajw/articles/14532350> (Accessed: March 16, 2026).
 200. Liu, J. et al. (2020) “The Norwegian-Greenland Sea, the Laschamps, and the Mono Lake Excursions Recorded in a Black Sea Sedimentary Sequence Spanning From 68.9 to 14.5 ka,” *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(8), p. e2019JB019225. Available at: <https://doi.org/10.1029/2019JB019225>.
 201. Cooper, A., Turney, C.S.M., et al. (2021) “A global environmental crisis 42,000 years ago,” *Science*, 371(6531), pp. 811–818. Available at: <https://doi.org/10.1126/science.abb8677>.

Cooper, A. and Turney, C. (2020) *The Adams Event, a geomagnetic-driven environmental crisis 42,000 years ago*. EGU2020-12314. Copernicus Meetings. Available at: <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-12314>.
 202. Silleni, A. et al. (2020) “The Magnitude of the 39.8 ka Campanian Ignimbrite Eruption, Italy: Method, Uncertainties and Errors,” *Frontiers in Earth Science*, 8. Available at: <https://doi.org/10.3389/feart.2020.543399>.
 203. Sansivero, F. “*The Campanian Ignimbrite*”. Available at: <https://www.ov.ingv.it/index.php/flegrei-storia-eruttiva/le-eruzioni-principali/ignimbrite-campana>
 204. *Global Volcanism Program | Gorely* (2014) *Smithsonian Institution | Global Volcanism Program*. Available at: <https://volcano.si.edu/volcano.cfm?vn=300070> (Accessed: March 16, 2026).
 205. Fedele, F. et al. (2003) “The Campanian Ignimbrite Eruption, Heinrich Event 4, and Palaeolithic Change in Europe: A High-Resolution Investigation,” *Washington DC American Geophysical Union Geophysical Monograph Series*, pp. 301–325. Available at: <https://doi.org/10.1029/139GM20>.
 206. Cooper, A., Turney, C.S.M., et al. (2021) “A global environmental crisis 42,000 years ago,” *Science*, 371(6531), pp. 811–818. Available at: <https://doi.org/10.1126/science.abb8677>.

Davis, N. and correspondent, N.D.S. (2021) “End of Neanderthals linked to flip of Earth’s magnetic poles, study suggests,” *The Guardian*, 18 February. Available at: <https://www.theguardian.com/science/2021/feb/18/end-of-neanderthals-linked-to-flip-of-earths-magnetic-poles-study-suggests> (Accessed: March 16, 2026).
 207. ALLATRA International Public Movement (2025). Nanoplastics in the biosphere. From molecular impact to planetary crisis. Available at: https://allatra.org/storage/app/media/reports/en/Nanoplastics_in_the_Biosphere_Report.pdf (Accessed: March 16, 2026).