

Földrengés Zágráb térségében 2020. március 22.

GYÓRI ERZSÉBET, KOVÁCS ISTVÁN JÁNOS, SZŰCS ESZTER, WÉBER ZOLTÁN

2020. március 22-én egy 5,4-es magnitúdójú földrengés keletkezett a horvát főváros, Zágráb közelében. A rengést Magyarországon, a Dunántúl nagy részén is érzékelték a lakosság. A cikkben összefoglaljuk a rengés paramétereit, keletkezésének okait, és az okozott hatásokat.

Bevezetés

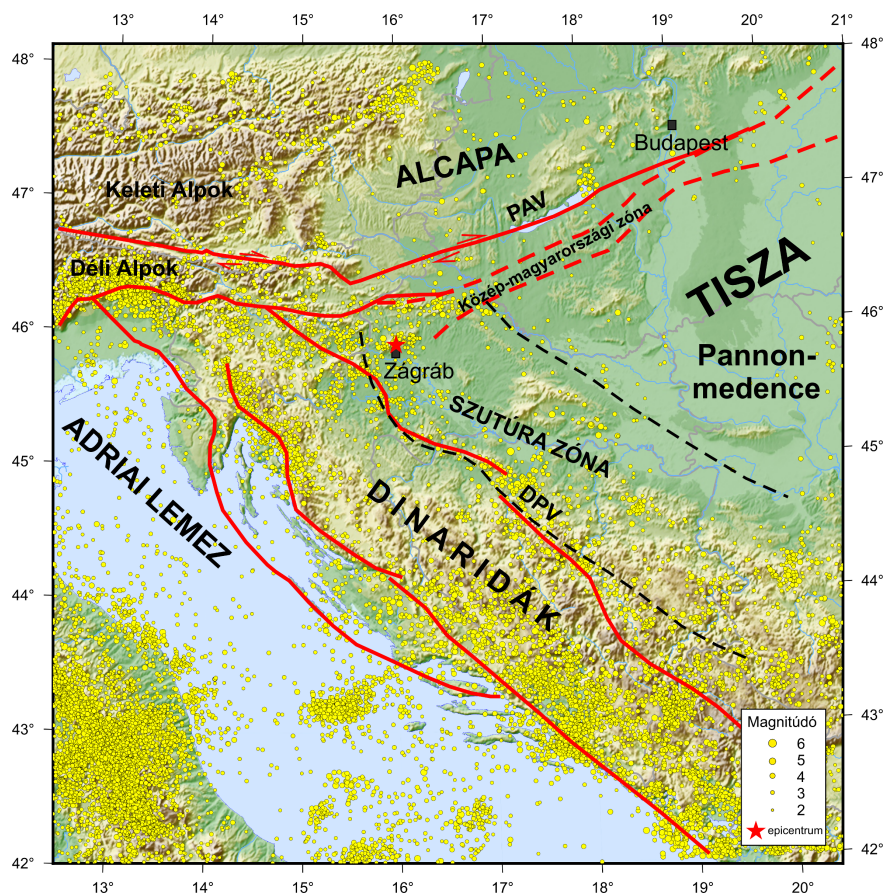
2020. március 22-én, világidőben (UTC) 5:24-kor, helyi idő szerint 6:24-kor erős földrengés ébresztette a zágrábiakat. A rengést Horvátország mellett Ausztriában, Magyarországon, Szlovéniában és Bosznia-Hercegovinában is több helyen érezték. Az USA Geológiai Szolgálatának (USGS, <https://earthquake.usgs.gov/>) tájékoztatása szerint a főrengés közel 10 km-es mélységben pattant ki, momentum magnitúdója $M_w 5,4$ volt.

Zágráb földrengések szempontjából viszonylag veszélyeztetettebb részén található térségünknek. Ennek oka, hogy Zágráb a régiót felépítő 3 kőzetlemez (Alcapa, Tisza és Dinaridák) találkozásánál található (1. ábra).

A horvát főváros közelében található a főbb szerkezeti zónák, a Periadriai, a Közép-magyarországi és a Pannon-medencét DNY-ról határoló Déli peremi vetőzóna. A földrengések kiváltó oka, hogy az Adriai mikrolemez az óramutató járásával ellentétes irányban forog, miközben É-i irányba mozog és ütközik a tőle É-ÉK-re található kőzetlemezekkel. Ennek következtében a lemezekben folyamatosan jelentős feszültség halmozódik fel, ami esetenként erős földrengések formájában oldódik ki a kéreg középső, felső részében.

Zágráb és tágabb környezetének szeizmicitását az így kialakuló feszültségek határozzák meg (Ivancic et al., 2001). Horvátország Pannon-medencére eső területe kevésbé aktív. Az 1. ábra a régió szeizmicitását is bemutatja a 1964.01.01 és 2019.12.31 közötti időszakban, az International Seismological Centre (ISC, www.isc.ac.uk) bulletinje alapján. Ebben az időszokban a régió kis és közepes méretű földrengésekkel volt jellemezhető. Az események túlnyomórészt sekély fészekmélységű, a felső kéregben kipattant földrengések voltak. Az utóbbi idők legnagyobb földrengése az 1998-ban kipattant szlovéniai $M_w 5,7$ Bovec-Krn földrengés volt, amit több mint 400 utórengés követett (Bajc et al., 2001). Azonban korábban, a történelmi múltban előfordultak a Medvednica–Zágráb térségben nagyobb földrengések is. Erős szeizmikus aktivitás volt tapasztalható a XVII., XIX. és a XX. század elején.

Erős földrengés történt 1775. október 13-án, melynek epicentrális intenzitása a Mercalli-Cancani-Sieberg (MCS) skálán mért VII-es és VIII-as értékek közötti volt. Az 1880-as nagy zágrábi földrengés ($M_w 6,3$) két ember halálát okozta, de szinte minden épületet megrongált Zágrábban (Atalić et al. 2021). Ennek az 1880. november 9-i $M_w 6,3$ -as földrengésnek az intenzitása VIII-as volt az MCS skálán.



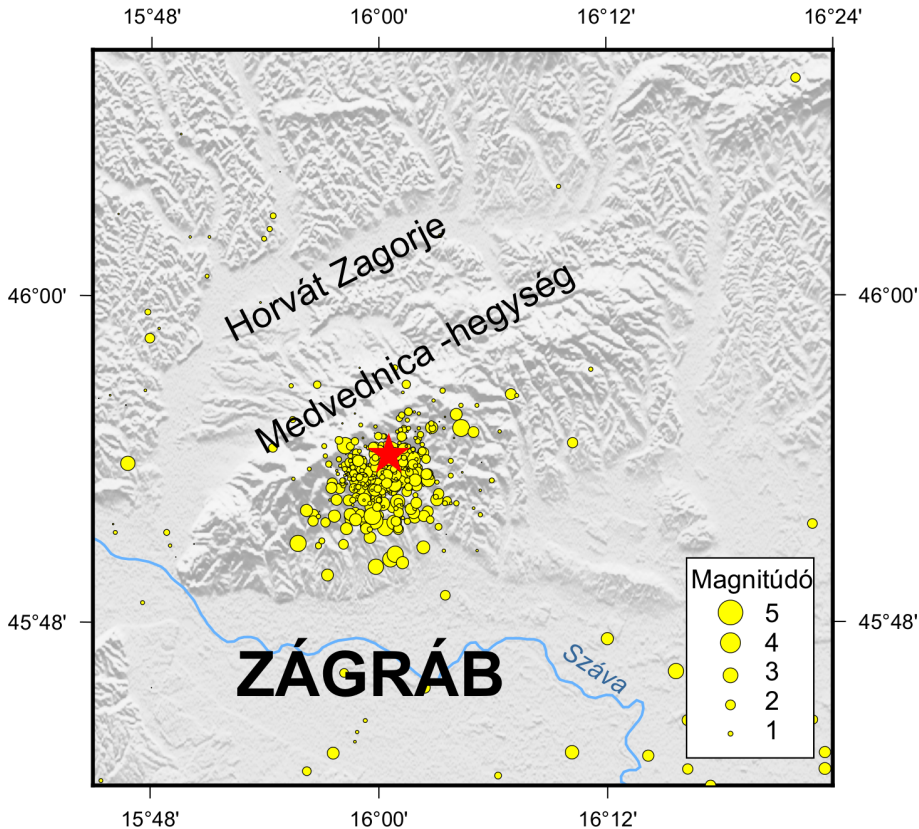
1. ábra. Zágráb környezetének tektonikai felépítése és a szeizmicitás 1964 és 2019 között. (Jelölések: PAV - Periadriai vonal, DPV - Déli peremi vetőzóna; törésvonalak: Sumanovac és Dudjak (2016) után)

Az esemény epicentruma a Zágráb-tól 17 km-rel ÉK-re található Planina faluban volt, ahol szinte az összes épület megsemmisült. Az akkoriban körülbelül 30.000 lakosú Zágrábban hivatalosan 1758 ház megrongálódását jelentették, amelyek 13%-a teljesen összeomlott (Simović 2000; Herak et al., 2009). A Száva folyó völgyében fekvő falvakban talajfolyósodást és iszapvulkánokat figyeltek meg. A földrengést nagy területen, még a mintegy 400 km-re lévő Dubrovnikban is érezték. A zágrábi térségben két másik, károkat okozó földrengés 1905-ben ($M_w 5,6$) és 1906-ban ($M_w 6,1$) volt, amelyek során templomok és lakóházak dőltek romba.

A földrengés paramétere, tektonikai magyarázata

2020. március 22-én, világidőben (UTC) 5:24-kor, helyi idő szerint 6:24-kor keletkezett földrengés epicentruma Zágráb belvárosától 7 km-re északra, a Medvednica hegységben volt (2. ábra).

A főrengést 37 perccel később egy erős ($M_w 4,7$), majd később számos utórengés követte. A rengést követő egy hónapon belül több mint 1000 utórengést regisztráltak (Atalić et al. 2021).



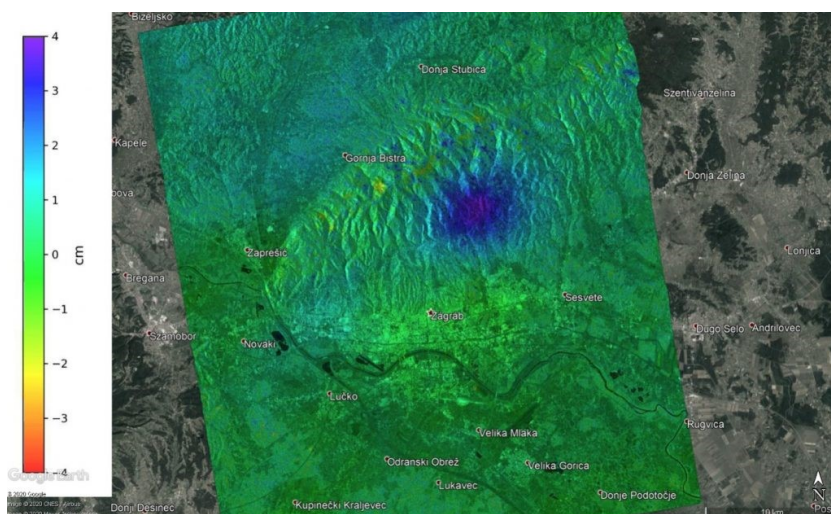
2. ábra. Az utóregések eloszlása a 2020. március 22-i földrengést követő egy évben

A földrengés keletkezésének mechanizmusáról igen értékes kvantitatív információk nyerhetők az utóregések térbeli (2. ábra) és időbeli eloszlásából, a fészekmechanizmus-megoldásokból és a maradandó felszíni deformációk műholdas megfigyeléséből.

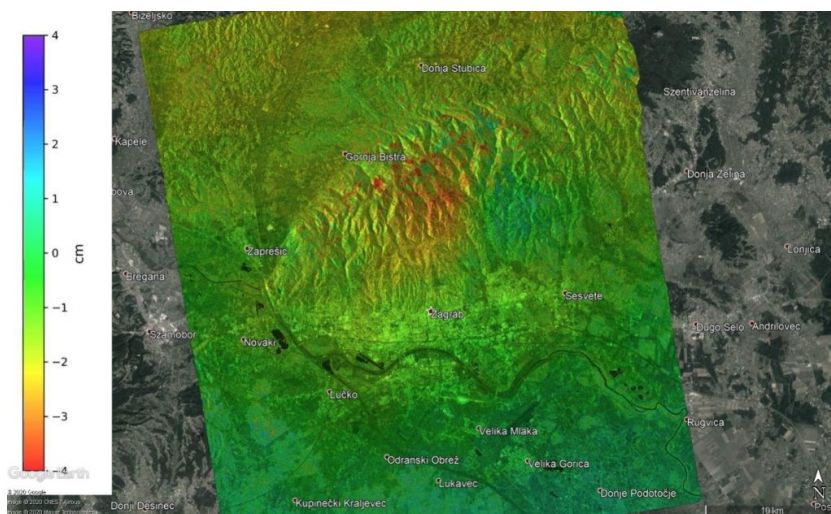
Az ESA Copernicus földmegfigyelő program Sentinel-1 műholdpárja mikrohullámú távérzékelést végez. A különböző időpontokban készített felvételek fázisinformáció-változásai alapján (interferencia elve) a bekövetkezett felszíni deformációk igen nagy pontossággal megfigyelhetők. Ezzel a műholdradar-interferometriás eljárással közel 700 km-es magasságból a nagyerejű földrengések

okozta elmozdulások kedvező feltételek mellett akár néhány mm-es pontossággal térképezhetők.

Az É–D-i longitudinális pályán mozgó műholdas radar missziók a haladás irányára merőlegesen, K–Ny-i irányban végzik a megfigyelést, így észleléseikből elsősorban ilyen irányú deformációk határozhatók meg. Az eltérő műhold-geometriájú felvételek alapján a deformációk vertikális illetve horizontális irányú összetevői is meghatározhatók (3. és 4. ábrák). A számításokból kiderül, hogy a domináns irányú elmozdulás emelkedés volt, aminek mértéke a 4 cm-t is elérte. Emellett kisebb mértékű (1-2 cm) nyugati irányú elmozdulás is megfigyelhető volt a területen.



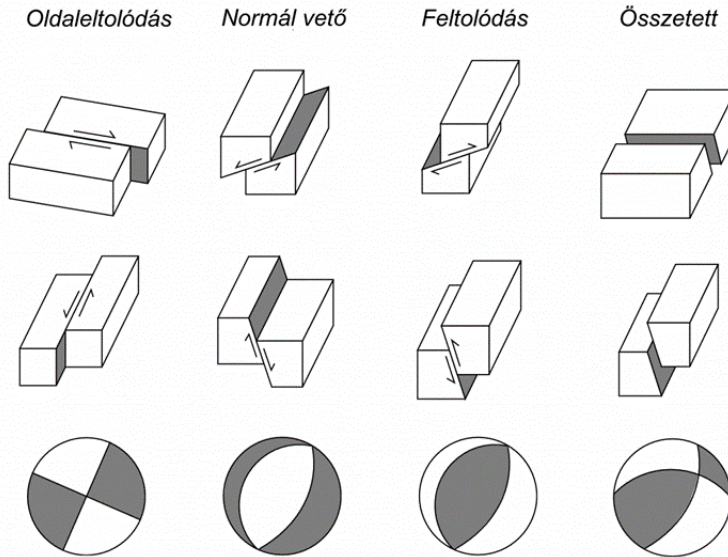
3. ábra. A március 22-i, Zágráb mellett kipattant földrengéshez kapcsolódó Sentinel-1 felvételekből meghatározott vertikális irányú deformációk



4. ábra. A március 22-i, Zágráb mellett kipattant földrengéshez kapcsolódó Sentinel-1 felvételekből meghatározott horizontális (kelet-nyugat, pozitív irányú elmozdulás: kelet) irányú deformációk

A mélyben uralkodó feszültségállapotokról a földrengés fészekmechanizmusa ad információt. Megmutatja a mélyben található törésvonalak térbeli elhelyezkedését és hozzájárul a rengés kinematikájának megismeréséhez, valamint a rengések keletkezéséhez vezető kőzetfeszül-

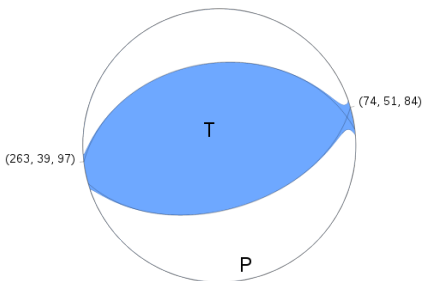
ségek feltérképezéséhez. A fészekmechanizmus megoldásokról készült ábrákat a szeizmológiai szlengben “strandlabdának” nevezzük. Az egyes vetődési típusokhoz jellegzetes mintázatú strandlabda tartozik, így ezek alapján könnyen meg lehet állapítani a vetődés fő tulajdonságait (5. ábra).



5. ábra

Néhány jellegzetes vetőtípus és a hozzájuk tartozó strandlabda

A 2020. március 22-én kipattant zágrábi földrengés fészekmechanizmusát ábrázoló strandlabda (6. ábra) azt mutatja, hogy a rengés során a vetősík egyik oldalán a kőzettömb felfelé tolódott a vetősík másik oldalához képest. A vetősík KÉK-NyDNY irányultságú, dőlése pedig vagy DDK, vagy ÉÉNy. Mindebből arra is következtethetünk, hogy a földrengést okozó kőzetfeszültség kompressziós jellegű és északias irányú.



6. ábra. 2020. március 22-én, Zágráb téségében kipattant földrengés fészekmechanizmusa (forrás: USGS)

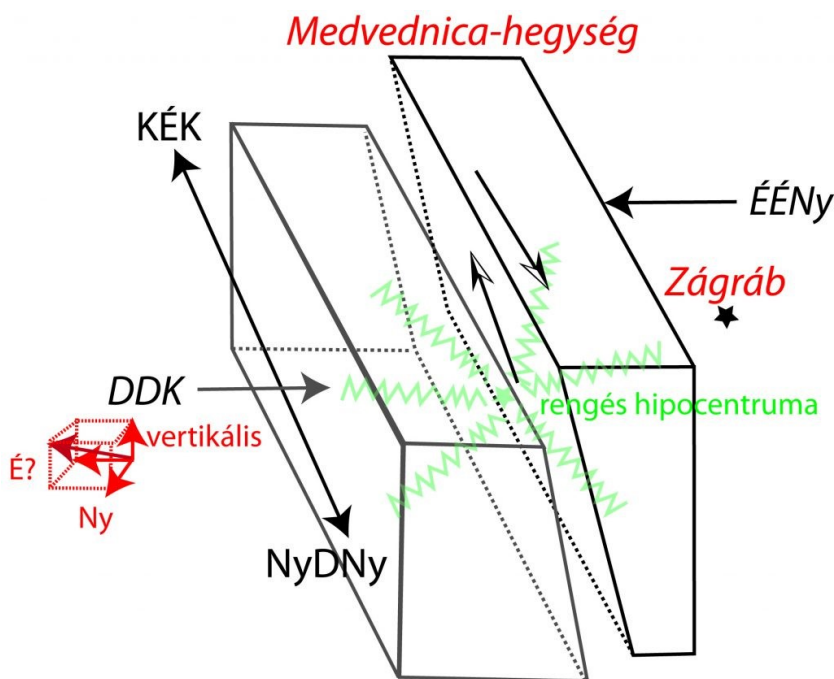
A mai modern szeizmológiában a fészekmechanizmust egyre gyakrabban a szeizmológiai állomásokon regisztrált teljes hullámformák (szeizmogramok) felhasználásával határozzuk meg. Ezzel a módszerrel akkor is megbízható megoldáshoz juthatunk, ha a vizsgált földrengést csak viszonylag kevés műszer regisztrálta. Bármilyen módszert is alkalmazunk azonban, kizárólag a szeizmogramokra támaszkodva nem tudjuk megállapítani, hogy a strandlabdát átszelő két sík közül aktuálisan melyik a törési sík. Ennek eldöntésére további független adatokra is szükség van. Ilyen független információ lehet például az utóregések hipocentrum-eloszlásának vagy a műholdas megfigyelések alapján meghatározott felszíni deformációk ismerete.

A rendelkezésre álló felszíni elmozdulás adatok (vertikális és kelet-nyugat irányú) és a fészekmechanizmus meghatározások alapján a rengés feltehetően egy meredek DDK irányba dőlő sík menti feltolódásos elmozdulás során következett be (7. áb-

ra). Az adatok alapján jelentős volt a felfelé és a nyugat felé történő elmozdulás a Medvednica-hegység területén, Zágrábtól északra. Természetesen geometriai okokból jelen kellett legyen egy É-i vagy D-i elmozdulási komponens is, azonban ennek abszolút meghatározását az alkalmazott InSAR technológia a műholdak jellemzően É-D irányú pályáiból kifolyólag nem vagy csak korlátozottan teszi lehetővé.

A fészkekmechanizusból elméletileg nem csak DDK-i, hanem ÉÉNy-i irányú dőlési sík mentén történő feltolódás is adódhat. Mivel az alkalmazott űrgeodéziai módszer az É-i és D-i irányú mozgásokra kevésbé érzékeny, így a földtani jellemzők segíthetnek a feltolódás jellegének meghatáro-

zásában. Az adatok arra utalnak, hogy a Medvednica-hegység déli előterében számottevő transzpressziós mozgások zajlanak, melyek során a Zágrábtól északra elhelyezkedő Medvednica-hegység emelkedik, és jelentősebb földrengések alkalmával nyugatias irányban mozdul el jobbos vetődések mentén. A helyi geológiai térképezések alapján a Medvednica-hegység területén jellemzően ÉÉNy-i vergenciájú takarókat találunk. Ez azt jelenti, hogy nagyobb kőzettestek tolnak rá a tőlük ÉÉNy-ra elhelyezkedő aljzatra DDK-re dőlő meredek síkok mentén (Šostarić et al., 2012). Így a lokális geológiai adottságok a 7. ábrán bemutatott sematikus földtani modellt valószínűsítik inkább.



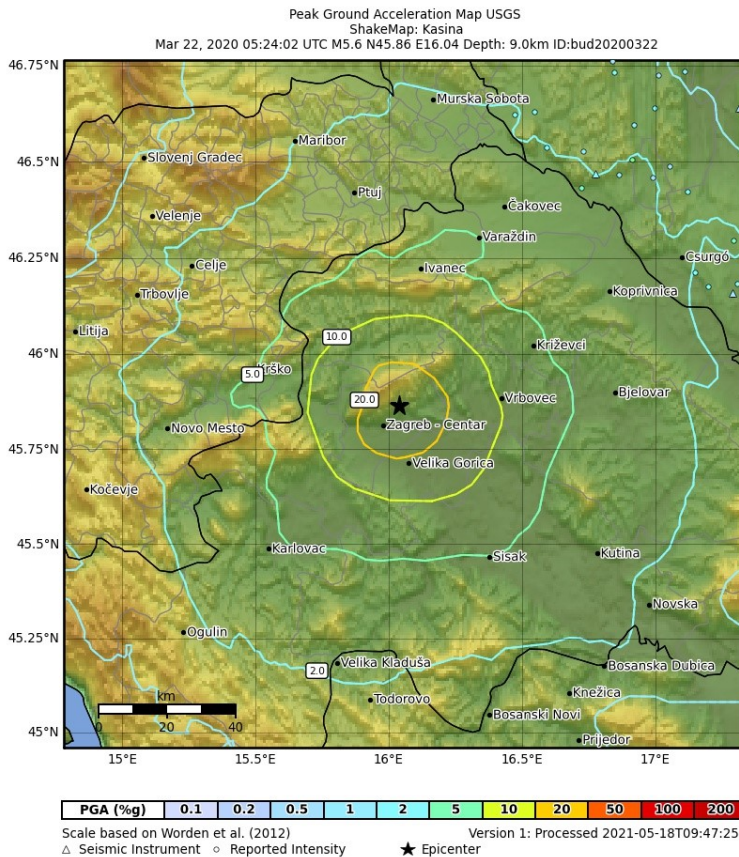
7. ábra. Egy lehetséges sematikus földtani modell a 2020-as évi Zágráb mellett kipattant földrengés-sorozathoz.

A földrengés hatásai Horvátországban

A rengés időpontjában az epicentrum 20 km-es környezetében 2 szeizmológiai állomás és 4 gyorsulásmérő működött. A főrengés közepes magnitúdója ellenére a maximális gyorsulás (PGA) meghaladta a 0,2 g-t, amit a ShakeMap-modellező programmal (Worden and Wald, 2016) készített térkép is jól mutat (8. ábra). (A modellezés során meghatározhatjuk a földren-

gések által okozott talajgyorsulások térbeli eloszlását, amihez gyorsulás-gyengülési összefüggéseket használunk fel, és kalibráljuk a szeizmológiai állomások méréseivel és a területen meghatározott intenzitásokkal.) Azonban a feltételezések szerint a város egyes részein a helyi geológiai felépítés miatt ez a maximális gyorsulásérték akár a kétszeresére is megnőhetett.

A földrengés által keltett talajmozgás maximális intenzitását az epicentrumban az Európai Makroszeizmikus Skálán (EMS) VII-re becsülték.



8. ábra. A maximális vízszintes talajgyorsulás (PGA) eloszlásának becslésére készített ShakeMap térkép

Az első órákban a lakosság körében pánik alakult ki, az emberek a Covid-19-zárlat ellenére az utcára menekültek. 27 ember sérült meg súlyosan, akik közül az egyik később meg is halt.

A mérsékelt intenzitás ellenére a főrengés és az azt követő erősebb utórengések súlyos károkat okoztak Zágrábban és a környező településeken. A rengés energiája a 2–10 Hz közötti nagyfrekvenciás tartományban koncentráldott, ami egybeesett az épületek jelentős részének rezonanciafrekvenciájával. Jelentős károk keletkeztek Zágráb történelmi belvárosában, a régebbi épületek falai és háztetői jelentős károkat szenvedtek. Közöttük volt a XIII. századból származó híres zágrábi székesegyház, amelynek a mennyezete a hajó közel egyharmad részén beszakadt (9. ábra).

Az utcákat helyenként a kéményekről lehulló törmelékek és homlokzati falak szórták tele, amelyek következtében több

tucat parkoló autó károsult. Egyes kerületekben részleges áramkimaradás volt, és a fűtés is akadozott a hőerőmű leállása miatt. Megsérült több kórház épülete, és néhány közülük már nem is volt javítható.

A legtöbb kárt a lakóépületek szenvedték el. Jellemzőek voltak a kémények, oromfalak sérülései, fa tetőszerkezetek károsodása, díszítőelemek és építészeti felületek leesése, födécek és válaszfalak repedései, áthidalók és boltozatok beomlása, falak megrepedése, lépcsőházak és a födécek károsodásai a szerkezeti elemek eltérő mozgása miatt. A becsült gazdasági kár meghaladta a 10 milliárd eurót.

Hazai szempontból fontos tanulság, hogy a súlyos károk Zágrábban a régi városközpont három-öt emeletes, nem megerősített falazatú, az Osztrák-Magyar Monarchia idejéből származó, 1920-ig készült épületeiben voltak, amelyek hasonlóak a budapesti belváros épületeihez.



9. ábra. A Jézus Szíve Bazilika Zágrábban a március 22-ei földrengés után (forrás: <https://moc.media/en/2879>)

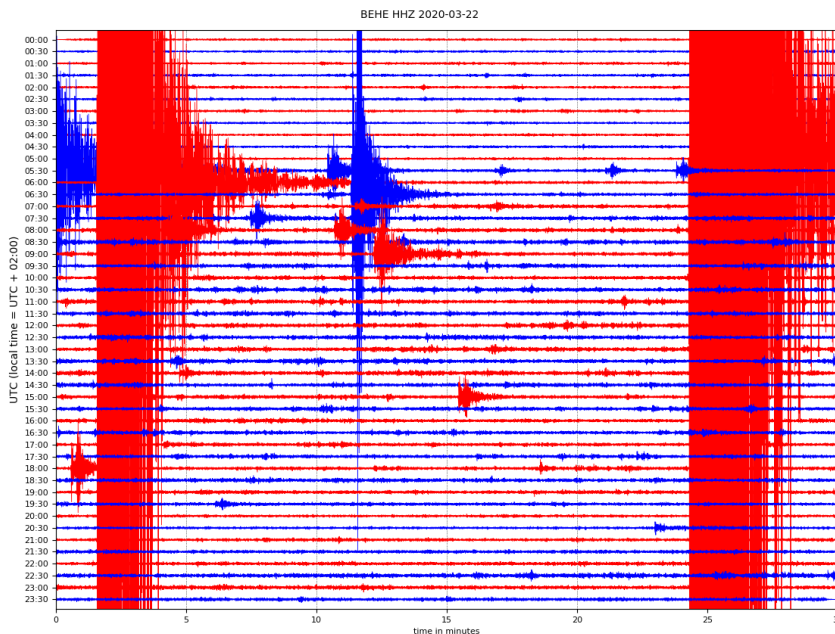
Hazai megfigyelések

A földrengés hullámai közelítőleg 10 másodperccel a rengés kipattanása után érték a horvát határhoz legközelebbi, becsehelyi szeizmológiai állomást (10. ábra), és alig több mint egy perc múlva a legtávolabbi, tarpai állomást is. A Kövesligethy Radó Szeizmológiai Observatóriumban működő automatikus helymeghatározó rendszer két percen belül e-mailben értesítette az Observatórium munkatársait és az Országos Katasztrófavédelmi Főigazgatóság (OKF) központi főügyeletét a rengés helyéről és erősségéről.

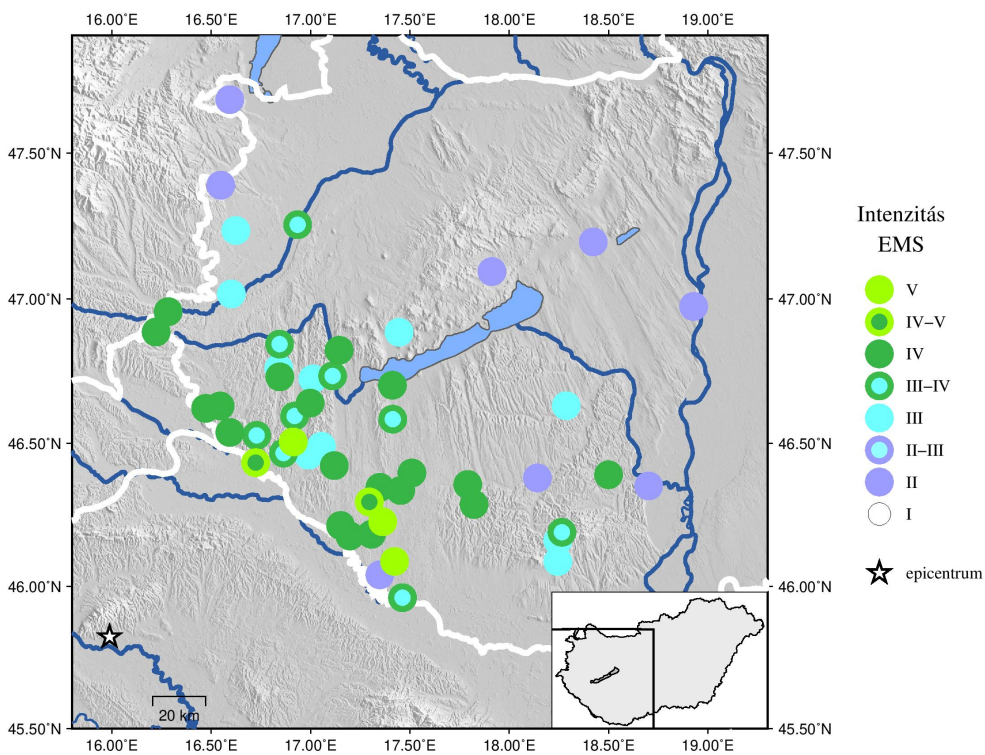
A helyi időben 6:24-kor bekövetkező főrengést Magyarországon, a Dunántúl nagy részén is érezték, de sokan beszámoltak a 7:01-kor kipattanó utórengés érzé-

keléséről is. Néhányan felébredtek, gyenge rázkódásról, hullámzásról számoltak be. Épületeken belül csillárok lengése, tárgyak zörgése, falak recsegése volt megfigyelhető.

A Kövesligethy Radó Szeizmológiai Observatóriumba 51 településről érkezett be összesen 109 kérdőív. A délnyugati határ közelében fekvő három településen, Homokkomáromban, Nagyatádon és Rinyaújlakban a rengés intenzitása elérte az EMS skálán az V-ös fokozatot. A beérkezett kérdőívek alapján meghatározott intenzitások eloszlását a 11. ábra mutatja, a konkrét intenzitás értékek a Magyar Nemzeti Szeizmológiai Bulletin (Hungarian National Seismological Bulletin) 2020-as kötetében (Süle et al., 2021) található meg.



10. ábra. A becsehelyi szeizmológiai állomás felvétele a főrengésről, és a fél órával későbbi erős utórengésről



11. ábra. A 2022. március 22. helyi idő szerint 06:24-kor, Zágráb mellett keletkezett földrengés intenzitásai Magyarország területén.

Hivatkozások

- Atalić, J., Uroš, M., Šavor Novak, M., Demšić, M., & Nastev, M. (2021). The Mw5.4 Zagreb (Croatia) earthquake of March 22, 2020: impacts and response. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 19(9), 3461-3489.
- Bajc, J., A. Aoudia, A. Sarao, and P. Suhadolc (2001): The 1998 Bovec-Krn mountain (Slovenia) earthquake sequence, *Geophys. Res. Let.*, 28, 1839-1842.
- Borojević, Š.S., Franz, N. and Robert, H., 2012. Tectonothermal history of the basement rocks within the NW Dinarides: New 40 Ar/39 Ar ages and synthesis. *Geologica Carpathica*, 63(6), pp.441-452.
- Csontos, L., & Nagymarosy, A. (1998). The Mid-Hungarian line: a zone of repeated tectonic inversions. *Tectonophysics*, 297(1-4), 51-71.
- Herak, D., Herak, M., & Tomljenović, B. (2009). Seismicity and earthquake focal mechanisms in North-Western Croatia. *Tectonophysics*, 465(1-4), 212-220.
- International Seismological Centre (2020), On-line Bulletin, <https://doi.org/10.31905/D808B830>, last accessed 2020.03.29.
- Ivancic, I., D. Herak, S. Markušić, I. Sović, M. Herak (2001). Seismicity of Croatia in the period 1997-2001. *Geofizika*, 18, 17-29.
- Markušić, S.; Stanko, D.; Korbar, T.; Belić, N.; Penava, D.; Kordić, B. The Zagreb (Croatia) M5.5 Earthquake on 22 March 2020. *Geosciences* 2020, 10, 252.
- So, E., Babić, A., Majetic, H., Putrino, V., Verrucci, E., Contreras Mojica, D., ... & D'Ayala, D. (2020). The Zagreb Earthquake of 22 March 2020.
- Simović, V. (2000). Earthquakes in Zagreb area. *Grđevinar*, 52(11.), 637-645. (horvátul)
- Šoštarić, S. B., Neubauer, F., Handler, R., & Palinkaš, L. A. (2012). Tectonothermal history of the basement rocks within the NW Dinarides: new 40 Ar/39 Ar ages and synthesis. *Geologica Carpathica*, 63(6), 441-452.
- Süle, B., Bondár, I., Czanik, C., Czece, B., Czifra, T., Fodor, C., ... Wéber, Z. (2021). Hungarian National Seismological Bulletin 2020. (B. Süle, Ed.). Budapest: ELKH FI Kövesligethy Radó Szeizmológiai Observatórium.
- Šumanovac, F., & Dudjak, D. (2016): Descending lithosphere slab beneath the Northwest Dinarides from teleseismic tomography. *Journal of Geodynamics*, 102, 171-184.
- Worden, C.B. and D.J. Wald (2016). ShakeMap Manual Online: technical manual, user's guide, and software guide, U. S. Geological Survey. [usgs.github.io/shakemap](https://github.io/shakemap).