



Vulkánkitörés - levegőminőség - éghajlat

Kövesi-Lázár Krisztina

Országos Meteorológiai Szolgálat, lazark@met.hu

DOI:10.56474/legkor.2022.3.3

Napjainkban számos kutatás támasztja alá a vulkáni tevékenység éghajlatot befolyásoló hatását. A kitörés során a légkörbe juttatott vulkáni anyag kénben gazdag, ami vízzel reagálva kén-sav-aeroszollá alakul. A vulkáni anyag intenzívebb kitörés hatására feljut a sztratoszférába, ahol a magaslégköri futószelek szárnyán könnyedén szétterül nagy területen és akár évekig is ott maradhat. A kén-sav-aeroszol felhő sztratoszférikus jelenlétének megannyi veszélyes és messzemenő következménye van: többek közt csökkenő földfelszíni hőmérséklet, emelkedő sztratoszférikus hőmérséklet, ózombontás. Mivel reális statisztikai eséllyel a jövőben is várhatók kiemelt jelentőségű kitörések, fontos tisztában lenni a vulkáni tevékenység hatásaival, és tanulni a múltbéli események következményeiből. A cikkben bemutatásra kerül néhány jelentős vulkáni tevékenység a közeli és távoli múltból egyaránt, valamint azok éghajlatra és társadalomra gyakorolt hatásai.

Volcanic eruption - air quality - climate

Nowadays, a number of studies support the impact of volcanic activity on the climate. The volcanic material released into the atmosphere during the eruption is rich in sulphur, which reacts with water to form a sulphate aerosol. The volcanic material enters the stratosphere as a result of a more intense eruption, where it easily spreads over a large area by the wind and can last for years. The stratospheric presence of a sulphate aerosol cloud has many dangerous and far-reaching consequences, including a decrease in surface temperature, an increase in stratospheric temperature, and a decrease in ozone concentration. As there are realistic statistical chances of future eruptions, it is important to be aware of the effects of volcanic activity and to learn from the consequences of past events. The article presents some significant eruptions from both the recent and distant past and their effects on climate and society.

A vulkánkitörések hatása az éghajlatra

Jelenleg körülbelül 48 aktív vulkánt tartanak számon a Földön (2022. március 17.), de a szennyezőanyag kibocsátás szunnyadó állapotra is jellemző. A vulkánt aktívnak tekintjük, ha az időszakos

kitörések közt nem telik el több, mint három hónap (*Global Volcanism Program*).

A vulkánkitörések során kén-dioxid kerül a légkörbe, amely színtelen, erős szagú, reaktív gáz. Magas koncentrációja kifejezetten káros hatással lehet az emberi egészségre. Súlyosbíthatja

a tüdőbetegségeket és hozzájárulhat szív- és érrendszeri megbetegedésekhez. Antropogén kibocsátása szénégetéshez, erőművek olajához, illetve réz- és nikkelkohászathoz köthető. Természetes folyamatok révén a kén-dioxid vulkánkitörések által kerül a levegőbe (CAM5, 2022). Az elmúlt időszakban több ilyen esemény is bekövetkezett a Földön. A vulkán kitörésekor nagymennyiségű kén-dioxid kerülhet a sztratoszférába, amely kis mértékben csökkenti a földfelszíni hőmérsékletet (Harangi, 2017, 2013b). A kén-dioxid ugyanis vízzel reagálva ködös kénsav-aeroszol réteget képez. Mivel az aeroszol részecskék elnyelik, illetve szórják a beérkező sugárzást, a felszínre érkező rövidhullámú sugárzás gyengülését okozzák. A sugárzási hatások eredményeként a troposzféra alsó rétegeiben csökken, a sztratoszférában viszont emelkedik a hőmérséklet. Mivel a kén-dioxid az esetek túlnyomó hányadában a troposzférában marad, a légköri sugárzásra gyakorolt hatása lokális és általában nincs jelentős befolyással az éghajlatra (CAM5, 2022). A nagyobb magasságokba feltört vulkáni eredetű anyag légköri tartózkodási ideje megnő, így a légköri jelenlét hatása is jelentősebb. Míg a troposzférában néhány hétig, a sztratoszférában néhány évig is fennmaradhat a vulkáni hamu és por. Ha mégis kiugróan nagy mennyiségű kén-dioxid kerül a sztratoszférába, akkor a keletkező kénsav-aeroszol reakciói révén bontja a sztratoszférikus ózont (Harangi, 2017), mely a föld védőpajzsaként szolgál a nagy energiájú, káros UV-C sugárzás és az UV-B sugárzás rövidebb hullámhosszú része ellen (Lázár, 2018).

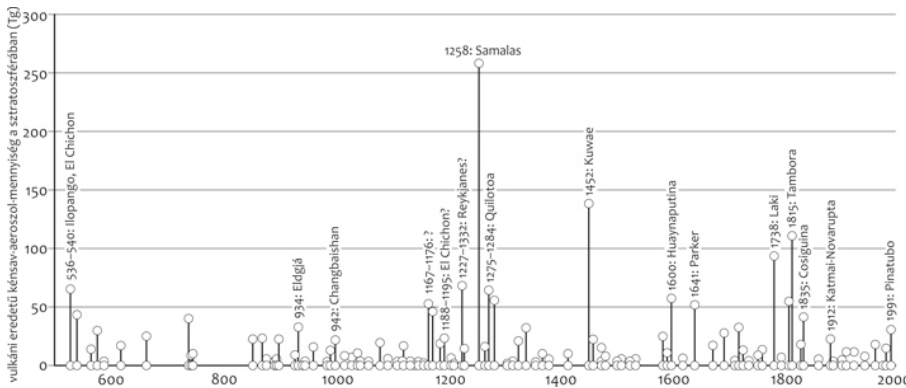
A felszínen okozott mérhető hőmérsékletcsökkenéshez legalább 1–5 megatonna kén-dioxidnak kell a sztratoszférába jutni a számítások szerint, amely 1–3 évig érezhető hatását (Harangi, 2017). A Tambora 1815-ben bekövetkezett jelentős kitörésekor 55 megatonna kén-dioxid került a légkörbe, aminek eredményeképp több, mint 100 megatonna kénsav-aeroszol terült szét a sztratoszférában. A földi átlaghőmérséklet kb. 1 °C-kal csökkent ennek következtében (Harangi, 2017). Több, hasonlóan nagy erejű kitörés időben egymáshoz közel akár egy évtizedig is elhúzódó klimatikus hatást okozhat. Ám a vulkánkitörések

közül nemcsak a nagy erejűek vannak hatással az éghajlatra, hanem a kis és közepes erősségűek együttes hatása is befolyásolja azt. A 2000 és 2013 közötti vulkánkitörések 0,05–0,12 °C-kal csökkentették a globális hőmérsékletet. Ez időszak alatt bekövetkezett számos vulkánkitörés közül három esetben is meghaladta a kibocsátott kén-dioxid mennyisége az 1 megatonnát: Sarychev 1,2 megatonna (2009), Nabro 1,5 megatonna (2011), Kasatochi 1,7 megatonna (2008) légkörbe juttatott kén-dioxid (Harangi, 2017). A földi ökoszféra viszont rendkívül összetett. Az 1982-ben bekövetkezett El Chichon vulkán kitörése révén 13 megatonna kén-dioxid került a légkörbe és bár emiatt jelentős mértékben csökkent a beérkező napsugárzás mennyisége, mégsem következett be számottevő lehűlés a kompenzáló El Niño hatás miatt (Harangi, 2017).

A vulkanikus eredetű kénsav-aeroszol sztratoszférikus jelenlétével nem csupán a beeső napsugárzást gátolja, számos más következménnyel is jár, vélhetőleg még fel sem kutattuk az összezet. Tanulmányok alátámasztják, hogy a kénsav-aeroszol felhő elnyeli a földfelszínről visszaverődő infravörös sugarakat, ennek következtében felmelegszik a sztratoszféra, ami a légköri áramlatokban okoz kardinális változást. Továbbá aeroszol mivolta révén hatékony felületet biztosít heterogén reakcióknak, ami a kulcsfontosságú sztratoszférikus ózont bontja. A vulkáni gázok további elemi összetevője a bróm, mely tízszer hatékonyabb bontja az ózont, mint az antropogén kibocsátáshoz köthető klór. Modellszámításokkal egyértelműen kimutatható, hogy a vulkánkitörések csökkenthetik az ózonréteg vastagságát (Harangi, 2017). Az aeroszol felhőnek tehát mennyi veszélyes és messzemenő következménye van, amelyekre pár példát a következő fejezet tartalmaz a múlt nevezetes eseményei kapcsán.

A múlt vulkánkitörési katalógusa

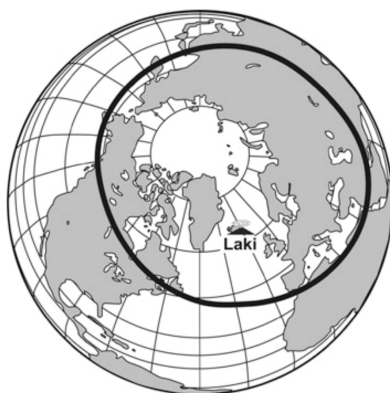
Kizárólag vulkánműködés eredményezhet markánsan kiugró szulfátkoncentráció-anomáliát. Ennek a ténynek és néhány tudományos vizsgálatnak köszönhetően mára több, mint 10 000 évre visszamenőleg ismerjük a szignifikáns kén-dioxid



1. ábra. Az elmúlt 1500 év nagy vulkánkitörései, amelyek nyomot hagytak a grönlandi vagy antarktisi jégtakaróban. (Forrás: Harangi, 2017)

kibocsátással járó vulkánkitöréseket. Az elmúlt 2000 év ilyen jellegű eseményei ráadásul éves pontossággal datálhatók (1. ábra). Ilyen tudományos vizsgálatok a közettani és a jégfurat minták elemzése. Előbbi esetén a kristályok üvegzárványai és a kőzetek üveges alapanyaga, utóbbinál pedig a jégbezárt levegőbuborékok összetételének vizsgálata segíti az elmúlt idők légkörének megismerését (Harangi, 2017). Mivel feltehetőleg a jövőben is várhatóak vulkánkitörések, fontos tanulni az elmúlt események következményeiből.

Az elmúlt 300 év két legkiemelkedőbb vulkáni eseménye az 1783-as Laki és az 1815-ös Tambora kitörések. Az izlandi Laki-hasadék hatalmas intenzitású árbazalt kitörésének tulajdonítható az 1783–84-es év rendkívüli hideg időjárása. 122 megatonna kén-dioxid került a levegőbe

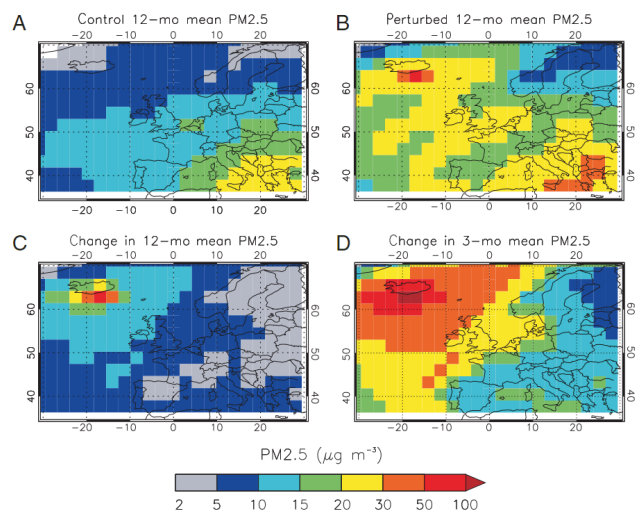


2. ábra. Az izlandi Laki 1783-as kitörését követően a száraz, fojtó szmog ellepte az északi félteke jelentős részét, beleértve teljes Európát. (Forrás: Harangi, 2013b)

(Harangi, 2013a), amelynek egy része a felszín közelében sűrű, fojtó szmogként belepte az északi félteke számottevő részét, köztük egész Európát (2. ábra) (Harangi, 2013b). A legintenzívebb időszak nagy erejű robbanásokkal az első pár hét volt, ekkor jelentős mennyiségű kén-dioxid gáz került a sztratoszférába is.

A kitörés következtében éhínségtől szenvedtek szerte a világban. Izland népességének legalább az egyötöde vesztette életét (OMSZ, 2012), de az elmaradó monszunesők miatt a Nílus és a Niger által éltetett területeken is több ezren haltak éhen (Harangi, 2013b). A 27 km hosszú Laki-hasadék mentén 8 hónap alatt 140 vulkáni kúp nőtt ki (Harangi, 2013a).

Napjainkban egy Laki-hasadékhoz hasonló kitörés következményeit kutatta Anja Schmidt munkatársaival. Számításai szerint 320%-kal



3. ábra. Modellezett PM_{2,5} koncentráció különböző gondolat kísérletek mentén: **A:** kontrollfutás, a 2003 és 2005 évek éves átlaga; **B:** modellfutás a Laki-kitörés emissziójával; **C:** az előző két eset abszolút változása; **D:** a kitörést követő 3 hónap átlagos PM_{2,5} koncentráció abszolút változása. (Forrás: Schmidt et al., 2011)

nőne Észak-Európában és 60%-kal nőne Dél-Európában az aeroszol koncentráció a kitörést követő három hónapban, és a jellemző 38 napról 74 napra nőne azoknak a napoknak a száma, amikor meghaladta a levegőminőségi határértéket a szennyezőanyag koncentráció a kitörést követő nyolc hónapban (*Schmidt et al.*, 2011). A 3/A. ábrán a kontrollfutás látható, amelyet a 2003 és 2005-ös évek $PM_{2,5}$ koncentrációk átlagából tevődik össze. A 3/B. ábrán a kontroll modellfuttatást megperturbálták a Laki-kitörés emissziójával. A 3/C. ábra az előző két eset abszolút változását mutatja átlagosan a kitörést követő 12 hónapban, a 3/D. ábrán pedig a kitörést követő 3 hónap átlagos $PM_{2,5}$ koncentráció abszolút változása látható.

Nem váratott sokat magára a következő kiemelt jelentőségű vulkáni esemény. Az izlandi Laki-hasadék után mintegy 32 évvel az indonéz Tambora vulkán következett 1815-ben. Ezt az esetet a történeti idők egyik legnagyobb kitöréseként tartják számon. Az indonéz sziget 4000 méteres tűzhányójának magassága negyedével lecsökkent a robbanások során. Ez az esemény sem maradt éghajlatra gyakorolt hatások nélkül. A rákövetkező 1816-os évet nyár nélküli évként említik, de még további évekre volt szükség, hogy lecsendesedjen a vulkán hatása. Európán belül is a Kárpát-medence volt a legsúlyosabban érintett terület. Az elhúzódó zord tél hirtelen hóviharakkal, a különösen hűvös nyár pedig folyamatos csapadékkal, jégesőkkel pusztított. Árvizek, belvizek, egerinvázió és terméspusztulás tetézte az éhínséget. Horvátországban tifusz szedte áldozatait. Németországban és Angliában éhséglázadások törtek ki (*Harangi*, 2015).

A modern társadalom sem tud védőhálót nyújtani a természeti folyamatok, változások ellen, bizonyította ezt a vulkánoktól hangos Izland 2010-es kitörései. A vulkánt az amerikai sajtó E-15-ként rövidítette, Nagy-Britanniában Eyjafjalla-joghurtként híresült el, de az izlandi vulkán becsületes neve Eyjafjallajökull. Ha itt elakadt az olvasó szeme, megnyugtatóként elárulom, hogy a helyiek is csak Eyjafjall-ként becézik. Az Eyjafjallajökull viszonylag szerénynek mondható kitörésével lehetetlenítette el Európa és az Atlanti-óceán északi részének légi közlekedését

(*Harangi*, 2017). Az aktív vulkán érdekessége, hogy jégtakaró alatt helyezkedik el. A jég alóli kitörés sajátossága, hogy a levegőbe repített vulkáni hamu üvegszemcséket is tartalmaz, ami a repülőgépek hajtóművében könnyen katasztrófához vezető kárt tett volna. Szeizmikus aktivitást már 2009 végén észleltek a környéken, majd egy első kisebb kitörés 2010. március 20-án következett be. Ezt április 14-én követte az erősebb, emlékezetes kitörés. Ilyen mértékű légiforgalom korlátozásra a második világháború óta nem volt példa. A légtérzár Európa szerte egy héten keresztül fennállt, melynek feloldása szakaszos volt, és országonként változott a vulkáni hamu jelenlététől függően. A kitörés 2010 októberében ért hivatalosan véget.

Egy másik kiugró példa az elmúlt időszak legnagyobb kén-dioxid kibocsátójaként számon tartott Mt. Marum Ambrym szupervulkánja, mely a Csendes-óceánban található a Vanuatu-sziget-csoportban Ausztrália és a Fidzsi-szigetek között. A vulkánok a kén-dioxid mellett szén-dioxidot, különböző klór- és fluorvegyületeket is kibocsátanak, mely nemcsak az aktív periódusra jellemző, hanem többségük esetében szunnyadó állapotban is. A csendesen füstölgő Mt. Marum is így jelentett fokozott veszélyt környezetére. A kráterben található látatóból kén-dioxid áramlott ki, amelynek következtében savas eső képződött. Ez tönkretette a növényzetet, és megfertőzte a vizet is, teljesen ellehetetlenítve az életet. A látató a vulkán legutóbbi, 2018. december 16-i aktivitása során megsemmisült.

Mérések, információk

A CAMS (Copernicus Atmosphere Monitoring Service) az ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) által vezetett konzorcium szolgáltatása, amelynek tevékenységei közé tartozik a levegő összetételére vonatkozó értékelések készítése világszerte napi szinten. A CAMS továbbá elemzi az elmúlt évek adatait és előrejelzést is készít az elkövetkezendő négy napra vonatkozóan. Ehhez műholdas és földhá- zisú megfigyelési adatokat kombinálnak numerikus időjárás-előrejelzési és levegőminőségi modellekkel. Ezekkel a módszerekkel a lehető

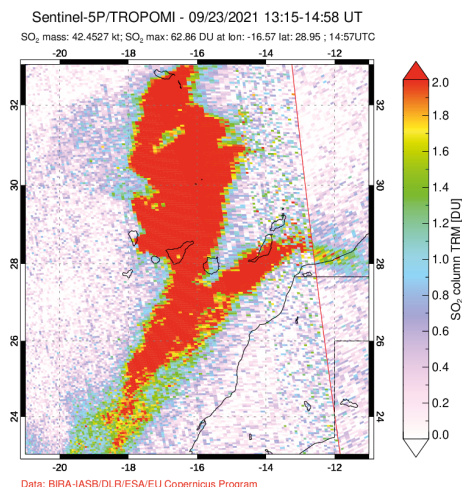
legpontosabban nyomon lehet követni és mérni a szennyezőanyag koncentrációk alakulását és lehetséges következményeit. A rendelkezésre álló adatok és módszerek segítségével részletes képet kaphatunk a globális levegőminőségről és annak számos alakító tényezőjéről, megérthetjük a természeti jelenségek (vulkánkitörések, erdőtüzek vagy a sivatagi por) különböző méretskálájú hatásait (CAM5, 2022).

A légkörmonitoring szolgáltatás része az ózon (O₃), az aeroszolok (PM), az üvegházhatást okozó gázok, mint a szén-dioxid (CO₂) és a metán (CH₄), valamint a reaktív gázok, mint a szén-monoxid (CO), nitrogénvegyületek (NO_x) és a kén-dioxid (SO₂) elemzése.

A CAM5 vulkánkitörésekkel kapcsolatos legfőbb mutatói:

- a teljes légszlopra vonatkozó SO₂ koncentráció elemzések és annak 5 napos előrejelzése,
- 3D-s SO₂ koncentrációmezők – a műholdas megfigyelések alapján –, valamint
- a kén-monoxid (SO) gázfázisából kén-sav-aeroszollá történő átalakulását jelző információk – a levegőkémiai modellezésnek köszönhetően (CAM5, 2022).

Minderre azért van szükség, mert a kén-dioxid kibocsátás, hasonlóképpen számos szennyezőanyaghoz, nem csupán helyi probléma, hiszen a légköri transzport folyamatok révén elszállítódnak, ezzel rontva más területek levegőminőségét.

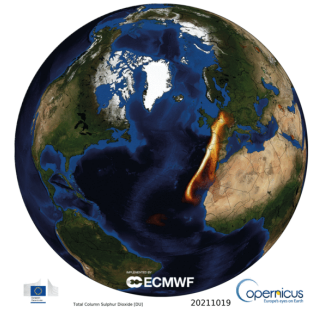


4. ábra. A kén-dioxid mennyisége 2021. szeptember 23-án a La Palma sziget környezetében, Sentinel-5P/TROPOMI műholdas adatok alapján. (Forrás: NASA)

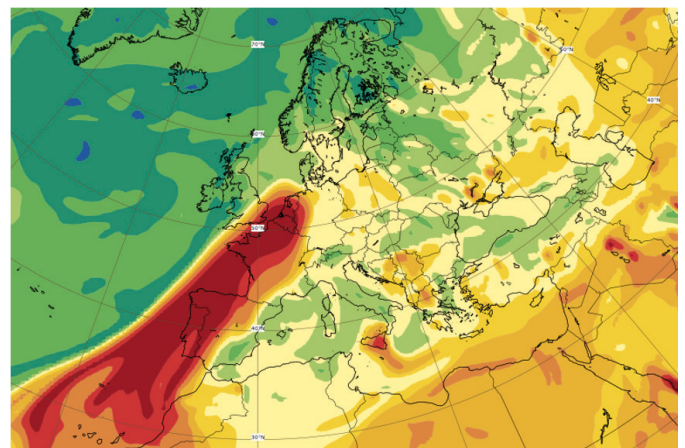
La Palma

A közelmúltban két figyelemreméltó kitörési eseménynek is a tanúi lehettünk. Az egyik a tavaly év végi La Palma, a másik az idén év eleji Tonga-i vulkánkitörések.

2021. szeptember 19-én felébredt fél évszázados álmából a Kanári-szigetek La Palma szigetén található Cumbre Vieja vulkánja. Többszörös lávafolyások, folyamatos morajlások, robbanásszerű kitörések kíséretében nagy mennyiségű kén-dioxid került a légkörbe (CAM5, 2021).



5. ábra: A teljes légszlopra vonatkozó SO₂ koncentráció 2021. szeptember 20. és október 19. között. (Forrás: CAM5, 2021)



6. ábra: A CAM5 SO₂ koncentráció előrejelzése a teljes légszlopra vonatkozó október 19. 12 UTC-s a 00 UTC-s futtatásból. (Forrás: CAM5, 2021)

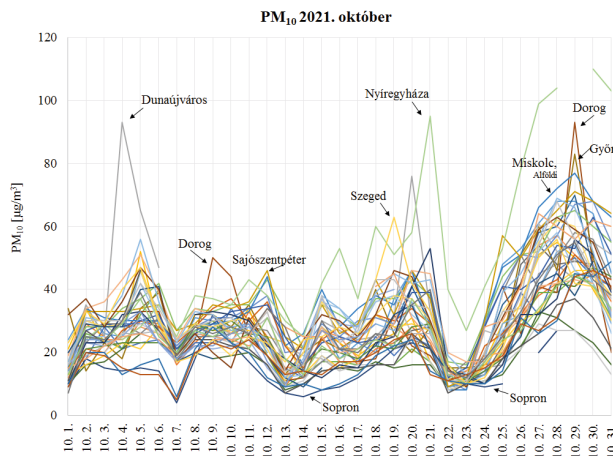
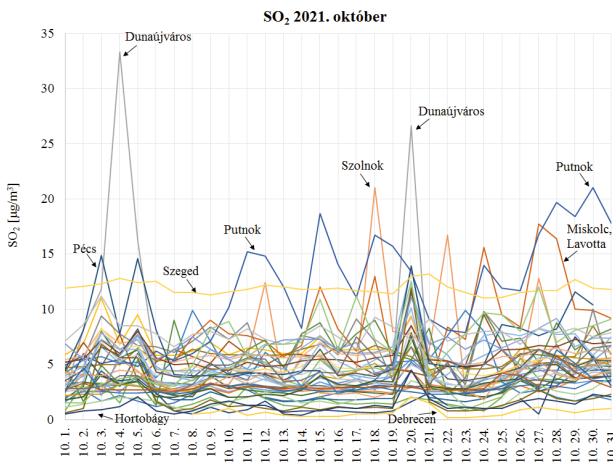
A kezdeti kitöréskor légkörbe jutó vulkáni gázok először Észak-Afrika és Dél-Európa felé vették az irányt (4. ábra), majd elérték az Észak- és Nyugat-Európa feletti légteret (5. és 6. ábrák). A GOME-2 (Global Ozone Monitoring Experiment-2) és a TROPOMI (TROPOspheric Monitoring Instrument) megfigyeléseinek segítségével a kibocsátott kén-dioxid nagy részét az 500 hPa nyomásra (kb. 5 km-rel a tengerszint feletti lég rétegre) lokalizálják. „Amikor a kén-dioxid felhő ekkora magasságban van, ahogyan azt eleinte Európa felett láttuk, a levegőminőség romlásának

kockázata nagyon kicsi” – számolt be róla Mark Parrington, a CAMS vezető tudósa. A magasban áthaladó szennyezőanyag ugyanis nem feltétlen keveredik le a felszínre (CAMS, 2021).

Az 5. és 6. ábrán az egységnyi területre jutó kén-dioxid-molekulák száma látható a teljes légoszlopra vonatkozóan a felszíntől a légkör tetejéig. Az 5. ábra CAMS analízis 2021. szeptember 20. és október 19. közötti időszakra vonatkozóan, a 6. ábra pedig CAMS előrejelzés október 19. 00:00 UTC-ről 12:00 UTC-re vonatkozik (CAMS, 2021). A felszíni mérőállomások mégsem rögzítettek ilyen szintű kilengést, mint ahogy azt a fenti ábrákról első látásra feltételezhetnénk. A 7. ábrán látható minden olyan magyarországi mérőállomás 2021 októberére vonatkozó mért napi SO_2 átlagai, ahol a rendelkezésre álló

Légszennyező anyag	Órás határérték [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	24 órás határérték [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Éves határérték [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
Kén-dioxid (SO_2)	250 (a naptári év alatt 24-nél többször nem léphető túl)	125 (a naptári év alatt 3-nál többször nem léphető túl)	50
Nitrogén-dioxid (NO_2)	100 (a naptári év alatt 18-nál többször nem léphető túl)	85	40
Szén-monoxid (CO)	10000	5000 (napi 8 órás mozgó átlag-koncentrációk maximuma)	3000
Szálló por (PM_{10})		50 (a naptári év alatt 35-nél többször nem léphető túl)	40
Szálló por ($PM_{2.5}$)			25

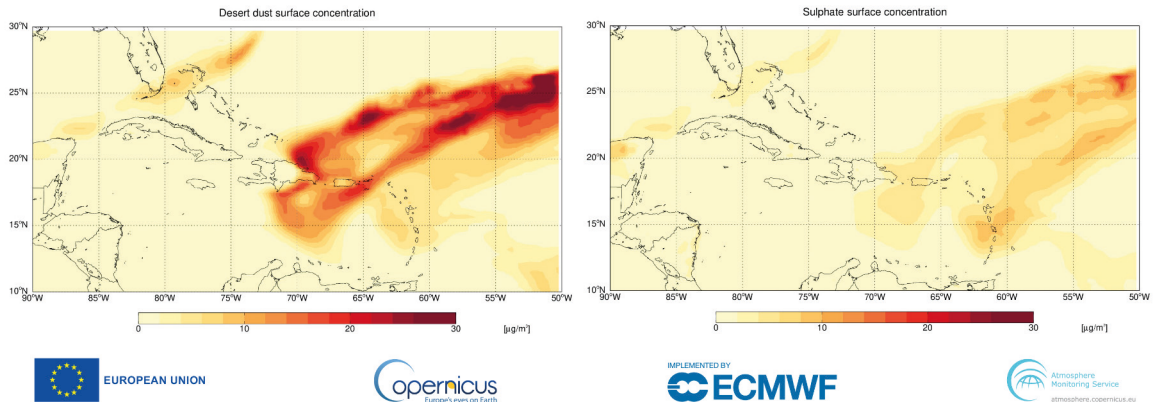
1. táblázat: Főbb légszennyező anyagok egészségügyi határértékei a 4/2011 (I. 14.) VM rendelet 1. melléklet alapján. (Forrás: OLM)



7. ábra. Magyarországi mérőállomások SO_2 és PM_{10} koncentráció mérései 2021 októberében. (OMSZ adatok alapján)

adatmennyiség elérte a 70%-ot. Az október 20-i napi átlag koncentrációk a mérőállomások többségénél átlagosan $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ -rel magasabbnak adódtak, de másnapról újra visszaálltak a korábbi értékek. A 24 órás egészségügyi határértéket, ami $125 \mu\text{g}/\text{m}^3$, sehol nem közelítették meg a mérések. Mindez azt bizonyítja, hogy a kén-dioxid döntő többsége a magasban haladt tovább. A főbb légszennyező anyagok egészségügyi határértékeit az 1. táblázat tartalmazza.

Október elején, amikor a vulkán továbbra is aktív volt, a szélirány változásával a vulkáni gázok az Atlanti-óceánon keresztül elérték a Karib-térséget. Puerto Ricóban a látási viszonyok a légszennyezés következtében 5 mérföldre csökkentek 2021. október 8–10-én. A levegőtisztaság nagymértékű romlásáért két légszennyező együttes jelenléte is felelős. Az egyik a Szaharából származó sivatagi por, a másik pedig a vulkáni eredetű kén-dioxidból kémiai reakciók révén képződött kénsav-aeroszol. Mindkettő a magassági szelek szárnyán nagy távolságokra képes eljutni a légkörben, amit a jelen eseményhez kapcsolódó aeroszol optikai mélységre vonatkozó CAMS elemzések is alátámasztanak. A kénsav-aeroszol kémiai kémiája a CAMS modellbe is be vannak építve, így a mérések és a modelleredmények igazolták egymást (CAMS, 2021).



8. ábra: A szaharai por CAMS-elemzése, amely október 9-én egybeesett a vulkanikus eredetű SO_2 Karib-térségbe érkezésével. (Forrás: CAMS, 2021)

A 8. ábra bal oldalán a szaharai por CAMS-elemzése látható, amely október 9-én egybeesett a Karib-tenger térségébe érkező kén-dioxiddal is (8. ábra jobb oldal).

A kitörés 2021. december 13. estére nyugodott teljesen, így a kitörés 85 napig és 18 óráig tartott. Halálos áldozatot az esemény nem követelt, de 7000 lakost kellett evakuálni az 1000 °C-os láva és hamu elől, ami elpusztított 1345 otthont, továbbá iskolákat, templomokat, egészségügyi központokat és mezőgazdasági területeket. Csaknem 1200 hektárt borított be az 1 méter vastag lávaréteg, aminek nagy része a tengerbe nyúlik. Ezzel két új szárazföldi nyúlvány alakult ki a szigeten, az egyik 44 hektáros, a másik 5 hektáros.



9. ábra. Lávaflowás 2021. szeptember 30-án a La Palma szigeten, Copernicus Sentinel-2 műhold képe. (Forrás: ESA, 2021)

Az 9. ábrán a lávaflowás látható La Palma szigetén, amely szeptember 28-án 6 km-t megtéve elérte az Atlanti-óceánt a sziget nyugati partján. A „láva-delta” a kép készültekor 20 hektárt borított. A valós színes képen az infravörös csatorna segítségével emelték ki a lávaflowamot (ESA, 2021). A 10. ábrán pedig egy életkép látható a szigetről az eseményhez kapcsolódóan.

Tonga

Nem csupán a tavalyi év végződött jelentős vulkánkitöréssel, de az idei év is azzal kezdődött. Ezúttal a Csendes-óceánon található Tonga-szigetek formálódtak át jelentősen egy többszörös kitörés

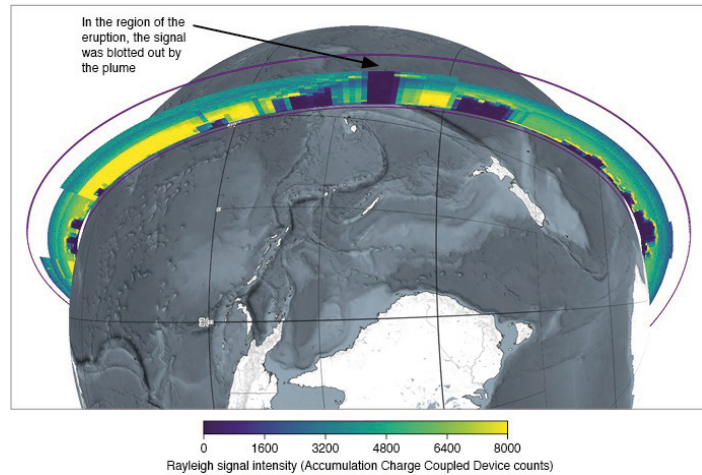


10. ábra. Életkép La Palma szigetéről a Cumbre Vieja vulkán 2021. év végi kitörésekor.

következtében. A meglehetősen aktív szeizmikus zóna felett elhelyezkedő vulkánoknak ugyanis éppen csak a kalderájának a pereme emelkedik néhol az óceán fölé. Nevezetesen Hunga Tonga és a Hunga Ha’apai szigetek a kaldera északi pereméről. Ezek a szigetek többször összekapcsolódtak, illetve különváltak az elmúlt évek kitörési eseményei során (Hérincs, 2022). Az utólagosan előkitörésekként elkönyvelt események is jelentősek voltak, ezek 2021. december 20-án és 2022. január 14-én következtek be. A Wellingtoni Vulkanológiai Tanácsadó Központ ekkor már közleményt adott ki a légitársaságoknak. A decemberi kitörés növelte az összekapcsolódott szigetek méretét, de a január 14-i kitörés következtében a kaldera részleges beomlása miatt ismét különvált a két sziget. A január 15-i főkitörés következtében tovább csökkent a már különvált szigetek mérete.

A január 15-én bekövetkezett főkitörés körülbelül hétszer erősebb volt a 2021. december 20-i előkitörésnél. A főkitörés körszimmetrikus lökéshulláma az egész Földet többszörösen körbefutotta. Ezt mérések támasztják alá szerte a világban. A robbanás mértékéhez hozzájárult, hogy a vulkán az óceán alatt található, így minden kitörés vízzel érintkezett. A magma és a víz pedig nem keveredik, ez felerősítheti az amúgy is robbanásszerű kitörést. Számos jelentés érkezett hangos robbanásról Tongán és a Fidzsi-szigetokről, ami még olyan messzire is elhallatszódott, mint Új-Zéland, Ausztrália és Alaszka (> 9300 km) is. Az USA Nemzeti Meteorológiai Szolgálat megerősítette a hang forrását (Severe Weather Europe, 2022).

A kitörés következménye, a lökéshullámon és a hanghatáson túl, többek közt a nagy magasságba feljuttatott hamufelhő, a jelentős mennyiségű vilámlás és a cunami, illetve ezek további következményei: a hamuhullás, a légiforgalom elterelése és az evakuálás. A vulkáni anyag a sztratoszférába is berobbant, a felhőtető a hőmérséklete alapján elérte a 30 km-es magasságot. Mivel ez már jóval a sztratoszférán belül található, a felhőtető hőmérséklete az emelkedése során a magassággal a tropopauzáig csökkent, a tropopauza felett pedig emelkedett. A hamufelhő sztratoszférikus jelenlétét továbbá az is megerősítette, hogy idővel a felhő magasba tört része nyugatra sodródott

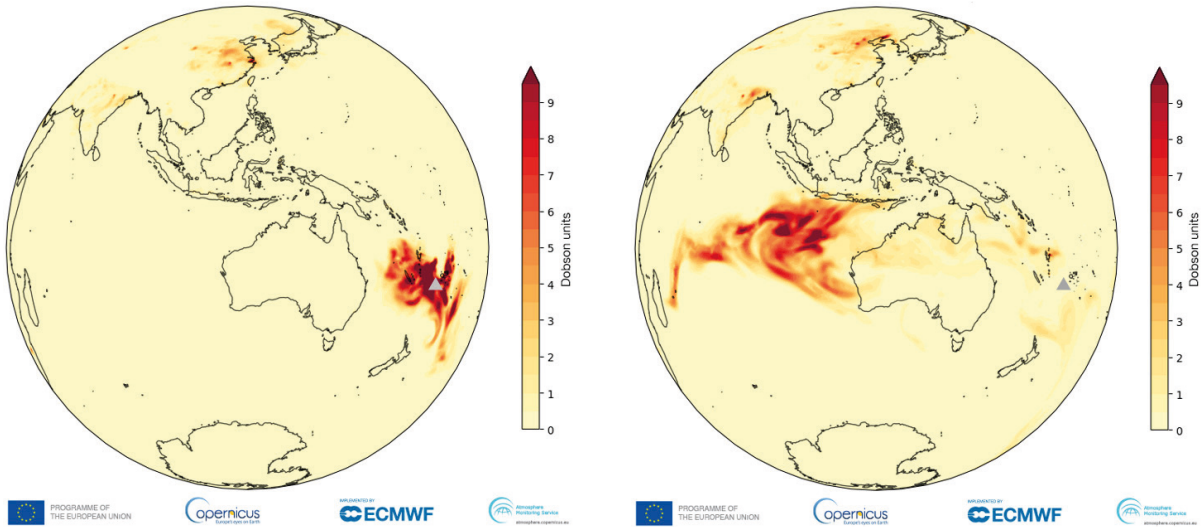


11. ábra. Az Aeolus-jelben látható teljes leárményekolás képe 2022. január 15-én, 06:00 UTC-kor a tongai vulkánkitörés következtében. (Forrás: ECMWF, 2022)

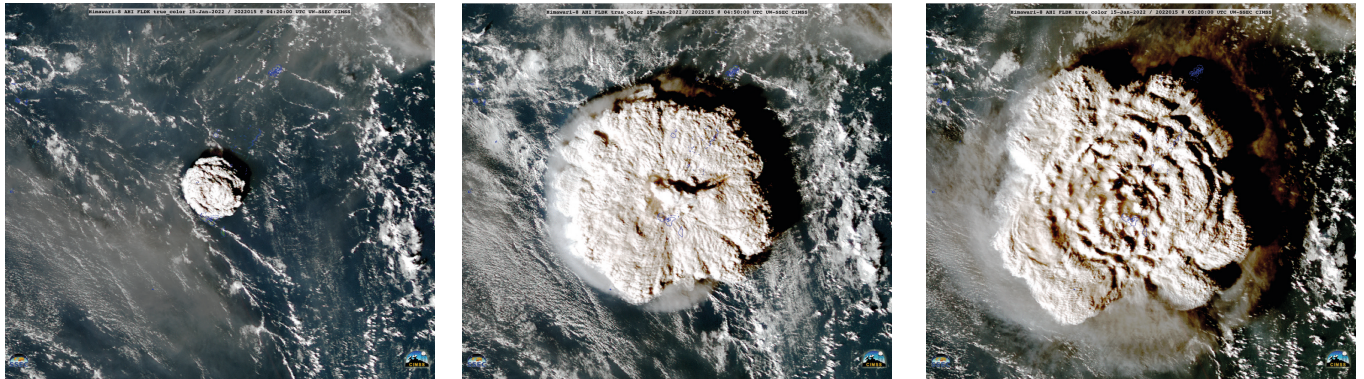
a sztratoszférában uralkodó keleti szelek szárnyán. Később a felhőtető hőmérsékletének csökkenéséből arra következtethetünk, hogy vesztett a magasságából (Severe Weather Europe, 2022). A 11. ábrán az Európai hírügynökség VirES online eszközével készített Aeolus műhold szélprofil megfigyelése látható. A tongai vulkánkitörés következtében az Aeolus-jel teljes gyengülése látható. Ez a vulkáni hamufelhőnek volt köszönhető, amely minden bizonnyal a 20 km magasra beállított Aeolus mérési tartomány teteje fölé ért. A 12. ábrán a hamufelhő helyzete látható 2022. január 16-án és 22-én. Utóbbi időpontra a vulkáni eredetű csóva nyugat felé sodródott és valamelyest szétszóródott (ECMWF, 2022).

Az észlelt villámcsapások száma a kitörés első órájában meghaladta a 190 ezret. A hamufelhő ugyanis sok finom részecskét tartalmazott, amelyek a viharfelhőkhöz hasonlóan töltést hoztak létre. A tongai Meteorológiai Szolgálat riasztást adott ki cunamira. 1,2 méteres cunamit figyeltek meg a tongai Nuku’alofában és 0,6 méteres cunamit az amerikai Szamoán. 1 méteres hullámmagasságot rögzítettek Alaszkaiban és 1,31 méterest Kaliforniában.

A 13. ábrán a Geo2Grid segítségével készített JMA Himawari-8 True Color RGB képek a vulkáni felhő gyors kiterjedését mutatják.



12. ábra. CAMS analízis a SO_2 teljes légoszlopban lévő koncentrációjáról 2022. január 16-án (bal oldal) és január 22-én (jobb oldal). (Forrás: ECMWF, 2022; Parrington et al, 2022)



13. ábra. Geo2Grid segítségével készített JMA Himawari-8 True Color RGB képek a Hunga Tonga 2022. január 15-i kitörését követően 04:20 UTC (bal oldal), 04:50 UTC (középső) és 5:20 UTC-kor (jobb oldal). (Forrás: CIMSS Satellite Blog, 2022)

A képek 30 perces időközönként készültek el. A képeken a sugárirányban szétterjedő lökeshullám is megfigyelhető.

Bár a Hunga Tonga 2022. januári kitörésének hatásait az egész világon érezni lehetett és az ekkora kitörések egyáltalán nem számítanak gyakorinak, valószínűleg nem elég jelentős ahhoz, hogy befolyásolja a globális hőmérsékletet, mivel csak rövid időn át tartott az erupció.

Érdekesség

Végezetül egy aktív vulkán által nyújtott rendkívüli lehetőség. Sebastián Álvarez olyat álmódott, amit még talán soha senki. Szárnyruhájában bere-

pült a chilei aktív Villarrica vulkán kráterébe. Tette mindezt tapasztalt szárnyas öltönyös és ejtőernyős múltjával. Ruhájának optimalizálásával ő lett az első ember, aki szárnyruhában berepült egy aktív vulkánba, majd ki is repült onnan. A 14. ábrán látható Sebastián Álvarez szárnyruhájában repülés közben, háttérben a vulkánnal. A teljes esemény megtekinthető a YouTube-on (Álvarez, 2021).

Összefoglalás

Kutatások alátámasztják a vulkánkitörések éghajlatot módosító hatását. A kén-sav-aeroszol felhő sztratoszférikus jelenlétének eddig ismert következményei egyrészt a naptól érkező sugárzás



14. ábra. Sebastián Álvarez aktív vulkánba repülése.
(Forrás: Álvarez, 2021)

szórása, ezzel csökkentve a földfelszíni hőmérsékletet. Másrészt elnyeli a fölfelszín irányából érkező infravörös sugarakat, ezáltal melegszik a sztratoszféra, ami kihatással van a nagytérségű légáramlásra. Harmadrészt nagymértékben hozzájárul a sztratoszférikus ózon bontásához, ami a föld védőpajzsaként szolgál a káros sugarak ellen.

A vulkáni aktivitás során kén-dioxidban gazdag gázfelhő és nagy mennyiségű vulkáni hamu is kerül a felszínre, melyek következtében kiugróan, akár többszörösére, megemelkedik a talajközeli légszennyezés. Belélegezve mindkét légszennyezőnek kifejezetten magas az egészségügyi kockázata és a globális légkörzessel nagy területen szétterjedhetnek.

Ezen hatások és további messzemenő, drasztikus következményeik a társadalmat is erőteljes mértékben érintik.

Irodalom

- Álvarez, S., 2021: Flying Into An Active Volcano (Letöltés 2022.07.08.) <https://www.youtube.com/watch?v=dG-FPi5sZUGg&t=132s>
- CAMS, 2021: CAMS monitors transport of SO₂ from La Palma volcano. *Copernicus Atmosphere Monitoring Service*. (Letöltés 2022. 07.08.) <https://atmosphere.copernicus.eu/cams-monitors-transport-so2-la-palma-volcano>
- CAMS, 2022: Volcano Q&As. *Copernicus Atmosphere Monitoring Service*. (Letöltés: 2022.07.08.) <https://atmosphere.copernicus.eu/volcano-qas>
- CIMSS Satellite Blog, 2022: Explosive eruption of the Hunga Tonga volcano. (Letöltés 2022.07.08.) <https://cimss.ssec.wisc.edu/satellite-blog/archives/44252>
- ECMWF, 2022: The Hunga Tonga eruption as seen by ECMWF. (Letöltés 2022.07.08.) <https://www.ecmwf.int/en/about/media-centre/news/2022/hunga-tonga-eruption-seen-ecmwf>
- ESA, 2021: La Palma lava flows into the sea. *The European Space Agency*. (Letöltés 2022.07.08.) <https://www.esa.int/eseach?q=la+palma>
- Harangi Sz., 2013a: Laki kitörés 230 éve... (Letöltés: 2022.07.08.) https://tuzhanyo.blog.hu/2013/06/12/laki_kitores_230_eve
- Harangi Sz., 2013b: Merre tovább, vulkanológia? A 21. század kihívásai. *Magyar Tudomány* 174, 959-979. <http://www.matud.iif.hu/2013/08/09.htm>
- Harangi Sz., 2015: Egy vulkán, amely megrengette a világot, 200 éve tört ki a Tambora. *Magyar Tudomány* 176, 875-883. <http://www.matud.iif.hu/2015/07/18.htm>
- Harangi Sz., 2017: A vulkánkitörések klímaváltoztató hatása: A kicsi is számít! *Magyar Tudomány* 178, 664-679. <http://www.matud.iif.hu/2017/06/05.htm>
- Hérincs D., 2022: A tongai vulkánkitörés, és nyomáshullámai. (Letöltés 2022.07.08.) <http://zivipotty.hu/vulkan202201.html>
- Lázár K., 2018: Az ózon által okozott környezeti terhelés meghatározása. Eötvös Loránd Tudományegyetem, Szakdolgozat.
- OMSZ, 2012: Aktivitást észleltek az izlandi Katla vulkánánál. *Meteorológiai hírek*. (Letöltés: 2022.07.08.) https://www.met.hu/ismeret-tar/meteorologiai_hirek/index.php?id=191&hir=Ujabb_vulkankitores_veszelyeztet_i_a_kozeljovoben_Izlandot
- Parrington, M., Rennie, M., Inness, A., és Duncan, D., 2022: Monitoring the atmospheric impacts of the Hunga-Tonga eruption. *ECMWF Newsletter* 171, (Spring), 12-13. <https://www.ecmwf.int/sites/default/files/elibrary/2022/20361-newsletter-no-171-spring-2022.pdf>
- Schmidt A., Ostro B., Carslaw K. S., Wilson M., Thordarson T., Mann G. W., és Simmons A. J., 2011: Excess Mortality in Europe Following a Future Laki-style Icelandic Eruption. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA* 108, 15710-15715. <https://www.pnas.org/doi/epdf/10.1073/pnas.1108569108>
- Severe Weather Europe, 2022: Massive volcanic explosion sends shockwaves across the entire Earth, tsunamis towards the United States, and erupts high into the stratosphere. (Letöltés 2022.07.08.) <https://www.severe-weather.eu/news/tonga-volcano-massive-eruption-explosion-stratosphere-usa-tsunami-shockwave-fa/>

Weboldalak:

- Global Volcanism Program: https://volcano.si.edu/gvp_currenteruptions.cfm (Letöltés: 2022.03.17.)
- NASA, Global Sulfur Dioxide Monitoring Home Page. (Letöltés: 2022.07.08.) <https://so2.gsfc.nasa.gov/index.html>
- OLM. Országos Légszennyezettségi Mérőhálózat. (Letöltés 2022.07.08.) <http://www.levegominoseg.hu/hatarerek>
- OMSZ, Légszennyezettségi weboldal. (Letöltés: 2022.07.08.) <https://legszenyezettseg.met.hu/levegominoseg/meresi-adatok/automata-merohalozat>