

Hivatalos bírálói vélemény Dr. *Kern Zoltán* (MTA Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont Földtani és Geokémiai Intézet) MTA Doktora címért benyújtott **Barlangi jégüledékből nyert koradatok és geokémiai paraméterek értelmezése európai példákon**

című (2023-ban benyújtott, 2024 január 2-án bírálatra átvett) dolgozatról  
Készítette: Dr. Sümegi Pál tanszékvezető egyetemi tanár, SZTE TTIK Földtani és Őslénytani Tanszék, MTA Doktora

Kern Zoltán szerző (továbbiakban szerző) teljesen jól látta meg, hogy napjainkban a felmelegedés hatására folyamatosan megsemmisülő földi jégvilág (krioszféra) egy fontos szegmensét alkotják a barlangi jégüledékek (szerzői szavaival élve jeges barlangi üledékek), amelyek rendkívül fontos geológiai, geokronológiai, geokémiai adatokat tartalmaznak a közelmúlt (késő holocén) történeiről. Bölcs döntést hozott, hogy erről írta az MTA Doktori címért benyújtott dolgozatát. A szerző a jégbarlangok, barlangi jégüledékek kialakulását, kifejlődését saját vizsgálatainak eredményei, nemzetközi publikációk velemzése nyomán kiválóan ismertette dolgozatában és ebben a részben (is) bemutatta, hogy miért is tartjuk a szerzőt a jégbarlangok legjobb magyarországi ismerőjének. A jégbarlangok közül kiemelte a vizsgálatokban úttörő jellegű erdélyi aranyosfői (*Ghețarul de la Scărișoara*, Románia) jégbarlang adatsorát, amelynek *Angela Feurdean* kolozsvári kutató vezette, nemzetközi teamben végzett teljes körű újra vizsgálatát, elemzését, geokronológiai és paleoökológiai alapadatsorait már 2011-ben közzölték. Hivatkozásokon keresztül ugyancsak kiemelte a szerző dolgozatában a pireneusi és északi kárpáti jégbarlangokat is. Ezeknek a teljes körű paleoökológiai elemzésével a fahatár változásait, sőt alapvető paleoklimatológiai következtetéseket is levontak. Ezen jégbarlangok közé tartozott a dobsinai jeges barlangi üledéksorozat, amelynek kialakulását éppen a szerző foglalta össze egy (egyébként a munkásságnak összefoglalását jelentő dolgozatában nem szereplő) könyvrészletében 2018-ban, az Elsevier kiadásában. A szerző témaválasztását teljes mértékben elfogadom!

A szerző ezt követően *A barlangi jégfelhalmozódások kialakulása* című fejezetben a barlangi jég kialakulásának lehetőségeit taglalta, első lépésként a barlangok átszellőzöttségének, vagy átszellőzetlenségének kérdéskörét taglalva. A fejezethez kapcsolt 1. ábra („*A barlangi tér lehűlését eredményező jellegzetes évszakos légáramlások*”) kiválóan bemutatta az adott kérdéskör alapvető voltát, a hidegcsapda működési sémáját a barlangi jég kialakulásában (7. oldalon). A szerző *A jégbarlangok folyamat alapú osztályozása* fejezetben „*A jégbarlangok cirkulációs és glaciológiai jellemzőket szintetizáló osztályozása*” című nemzetközi szerzőpárostól átvett 2. ábrájában foglalta össze azt a tudást, amely jelenleg rendelkezésünkre áll ezen a területen természettudományi oldalról (10. oldal).

Teljesen egyet tudok érteni „*A mérsékelt övezet egy kiaknázatlan öskörnyezeti archívumának közelgő elvesztése*”, 3. fejezetben, 12-13. oldalon leírtakkal. A teljes fejezetet és megállapításait teljes mértékben elfogadom! Ugyanis tudomásul kell vennünk, hogy a jelenlegi felmelegedési hullámban nem csak ezek az információk vesznek majd el. Kutatóként nem lehet más a feladatunk, hogy amit meg tudnak finanszírozni kutatás területén, és meg tudunk kutatni azt, megteesszük, de ennél többet nem tehetünk! Nagy kérdés, hogy ennyivel megússzuk-e ezt a jelentős időtartamú (az előrejelzések alapján több tízezer éves) felmelegedési hullámot? A kutató elkeseredése érthető, mivel a nemzetközi elemzések az elmúlt 50 év során mintegy 150 évnyi jégvesztéséget rekonstruáltak például csak az erdélyi aranyosfői (*Ghețarul de la Scărișoara*, Románia) jégbarlang felszínközeli rétegsorán. A szerző megállapította, hogy ez a 150 évnyi felszíni jégvesztés, a jégüledékének hiányában következtében lehetetlen a jégben rögzített geokémiai/glaciokémiai jelek kalibrálása a műszeres adatokkal. Az irodalmi adatok alapján hasonló helyzettel szembesültek a *Svarthammarhola* (Norvégia) jégbarlang esetében is. Félő, hogy ez az aranyosfői (*Ghețarul de la Scărișoara*, Románia) jégbarlang jégtömegének jelenleg csak 3,4 %-át kitevő (bár műszeres kalibráláshoz alapvető) információinak az elvesztése csak a nagyon korai kezdete egy sokkal jelentősebb információ veszteségnek, és a formálódó (valószínűleg jégmentes, krioszféra nélküli) új globális világnak. Ezt jelzi a szerző által is bemutatott jégmentesség vált jégbarlangok sora. Nem nagyon tehetünk mást, hogy amilyen információkat még kinyerhetünk a krioszférából azokat kinyerjük, tudomásul véve, hogy maga az általunk vizsgált objektum meg fog semmisülni. Hasonlóan, ahogy a társadalmi és természeti változások nyomán megsemmisültek a negyedidőszaki éghajlati és környezeti változásokat őrző, negyedidőszaki paleoökológiával foglalkozó kutatók által (jelentős munkával és igen jelentős munkaórákban) feldolgozott és az adott korban alapvetőnek gondolt homokbányákban, téglagyári gödrökben kialakított löszös szelvények, vagy láposodott területeken található tőzegrétegek. Az időben zajló változások és sokszor mérési alapot jelentő információ veszteségek ellen (kutatóként) nagyon keveset tehetünk, ha csak ezt nem, hogy minél több szelvényt dolgozzunk fel és közzéjük (persze, ha ezt a folyamatot hagyják a bírálóink). Ugyanakkor tudomásul kell vennünk, hogy generációról – generációra újabb és újabb feldolgozások történnek majd, az új technikai innovációk, megközelítések, vagy pont a belőlünk sarjadó, másképpen gondolkodó generációk képviselőinek újításai, új, a korábbinál pontosabb, de mindenképpen mást mutató (vagy kiemelő) szelvényeik nyomán. Így generációról – generációra átformálódik majd a tudásunk és elképzelésünk többek között a krioszféráról, vagy annak részét alkotó jégbarlangokról, barlangi jégről is. Azért is írtam le ezeket a gondolatokat, mivel a szerző a 15. oldalon pontosította az addig leírt gondolatait és a

nemzetközi elemzések nyomán leírta, hogy az elmúlt mintegy 120 évben a jégbarlangokban világszerte megfigyelt drasztikus jégtömegvesztés sarkallta a kutatói közösséget (inkább közösségeket), hogy élénkebb erőfeszítéseket tegyenek a barlangi jégben tárolt környezettörténeti adatok feltárására. Ehhez a fejezethez kapcsolta a szerző „*A barlangi jégtest térfogatváltozása 19 északi félgömbi jégbarlangban 1910 és 2010 között*” című rendkívül jelentőségű, 3. összefoglaló jellegű kiváló ábráját is, amelyen egyértelműen láthatóak a krioszférához tartozó jégbarlangokban kifejlődött jégtestben az elmúlt 120 évben történt változások az északi féltéken. Ehhez a gondolatkörhöz kapcsolta a következő ábrát (4. ábra a 16. oldalon), amelyen bemutatja a 2020. december 31. napja előtt publikált jégfuratokat, amelyek döntően Európában koncentrálnak. A szerző megállapítása szerint „*figyelembe véve az elméletileg lehetséges és igazolt földrajzi elterjedését a jégbarlangoknak ez a helyzet felülreprezentált, mert nem tükrözi a világon ismert jégbarlangok területi eloszlását.*” Így, ahogy a szerző is megállapította: „*a barlangi jég kutatásában, beleértve a barlangi jégösszletek fúrásos mintavételezését is, Európán kívül is nagy lehetőségek rejlenek.*” A témakörhöz kapcsolódóan a szerző kialakította az 1. táblázatot, a 17. oldalon. Az ábrán „*Az elmúlt 25 évben publikált barlangi jégfúrás projektek célterületei és a kiemelt jégfuratok hossza*” anyagát mutatta be, majd leírta, hogy az elmúlt 25 év során 23 zavartalan magkihozatalú jégfúrásra került sor és a világban lemélyített jégfuratok összes hossza mintegy 141 méter volt. A szerző megállapította, hogy 23 db zavartalan magkihozatalú jégfúrásban, közülük 13 projektben gépi működtetésű fúrófejet használtak fel. Érdekességként a szerző megemlítette, hogy a 2020-ban publikált hat barlangi jégfúrás projektből hármát Európán kívüli jégbarlangokban végeztek (Cave 29, Új-Mexikó, USA, valamint Kinderlinszkaja és Aszkinszkaja barlangok, Oroszország). Ezek az új adatok mintegy alátámasztják a szerző fejtegetését az Európán kívüli barlangi jégterületek jövőbeli vizsgálatairól. Ezt követően a szerző a 18. oldal végén és a 19. oldal kezdetén a speciális barlangi környezetben végrehajtott gépi fúrások technikai lehetőségeit taglalta - külön kitérve az aggregátoros és napenergiával hajtott gépi fúrások, a sötét barlangi szűk járatokban történő használatának korlátaira. A teljes fejezetet és megállapításait teljes mértékben elfogadom!

A szerző a dolgozatának 4.2 fejezetében „*A jégmagfúrások során tapasztalt főbb technikai kihívások és megoldási javaslatok*” részt mutatja be, amelyben döntően saját publikációja (Kern és Perşoiu, 2022) nyomán ismerteti a barlangi jég megfúrásának technikai problémáit, a fúrás kivitelezésétől a magkihozatal javításáig. A barlangi jégbe hullott és belefagyott, a fúrások kivitelezésénél mechanikai gondokat okozó kőzet- és/vagy fatörmelék miatt előzetes talajradar (*Ground Penetrating Radar - GPR*) elektromágneses (EM) sugárzáson

alapuló, sekély földtani kutatásokra alkalmazható, roncsolásmentes geofizikai műszer használatát javasolta (20. oldal), amellyel teljes mértékben egyetértek. Ugyanis a talajradar (*Ground Penetrating Radar = GPR*) igen jelentős felbontású képet alkot a felszín alatti képződmények, közte a barlangi jég szerkezeti felépítéséről és ennek nyomán a jégbe fagyott törmelék térbeli helyzetéről. Így, ahogy a szerző is megállapította: „*a jégtömb GPR-felmérése nemcsak a barlangi jégbe ágyazott kőtömböket tartalmazó szektorok elkerülését segíti, hanem információt nyújt a jégbarlangi üledékek vastagságáról is, ezzel támogatja a barlangi jégüledékből kinyerhető leghosszabb jégfurat kiemelésére legalkalmasabb fúrési hely kijelölését.*” A teljes fejezetet és megállapításait teljes mértékben elfogadom!

Az ötödik fejezetben a szerző dolgozatában „*Esettanulmányokat*” mutatott be, és azokra a jégbarlangokra koncentrált, amelyekből a minták elemzése nyomán a jégfuratokból adatokat nyerhetett. Az öt ország kilenc jégbarlangját átfogó esettanulmányok a szerző PhD dolgozatának védeése után eltelt 20 évének munkásságát is keretbe foglalják. A szerző külön kiemelte a legfontosabb célt a fejezet kezdetén, amely a kor lehető legpontosabb lehatárolása jelentette és jelenti. Saját munkája alapján (Kern, 2018) a kor meghatározását a jéggrétegekbe zárt szerves maradványok radiokarbon elemzésére alapozta. Ugyanakkor kiemelte, hogy számos geokronológiai módszer alkalmazható a jégbarlangokban a kor pontos meghatározásához. Például a radiokarbon módszer felhasználásának gátot szabhat a magashegységi karsztos területeken a bejárattól távolabbi jégtest felhalmozódása, ahol a szerves maradványok viszonylagos hiánya jelentkezhethet (a dolgozat 21. oldala).

A szerző az 5.1. fejezetben az „*Eredmények a Velebit (Horvátország) barlangi jégüledékeinek kutatásából fejezetben a horvátországi Velebit jégbarlangjaiban*” című fejezetben a kialakított kutatásainak bevezető részét ismertette. Bár a dél-délkelet európai régióban rengeteg karsztos üreg, barlang ismeretes mégis a jeges barlangi üledékek előfordulása szempontjából a régió belül is kitűnik a horvátországi Velebit. Ugyanis a szakirodalomból is ismeretes, hogy a Velebit területén jelenleg 230 db tartósan jeget és/vagy havat őrző barlang (túlnyomórészt aknabarlang) található. A szerző által megadott adatok, hogy a jégbarlangok területi sűrűsége a Velebit északi részén a legnagyobb (akár 20-25 jégbarlang/km<sup>2</sup>) is ezt támasztják alá saját adatai is (a dolgozat 22. oldalán). A szerző dolgozatának 23. oldalán a Velebit karsztos hegység földrajzi, klimatológiai paramétereit taglalta, mintegy bemutatva az aknabarlangokban kifejlődött jégüledék jelenlegi környezeti hátterét. Az 5. ábrán (a 24. oldalon) a Velebit-hegységben a vizsgálata alá vont jégbarlangok elhelyezkedését mutatta be a szerző egy kiváló minőségű kettős térképen. A kettős térkép egyik részén a Dinári-hegységben belüli helyzetét mutatja be a Velebit-hegységnek: Majd a Velebit digitális domborzati

modelljén a vizsgált barlangok elhelyezkedését vizsgálta meg. Ezt követően saját megközelítései és nemzetközi irodalom nyomán tisztázta a velebiti jégbarlang, jégréteg felhalmozódások okát és menetét. Ennek okát a szerző a jelentősebb mennyiségű, 3000 mm/év szintet meghaladó téli félévben lehullott csapadékban, azon belül is a hó, valamint az alacsony hőmérsékletű (téli) időszakok jelentősebb hosszában látta meg azok a fő éghajlati tényezőket, „*amelyek a velebiti barlangokban az állandó jég felhalmozódásának elsődleges előfeltételeit jelentik.*” Ezen tényezők nyomán a velebiti barlangok átlagos hőmérséklete 0 °C alá süllyed. A nemzetközi szakirodalom alapján a szerző megállapította, hogy a velebiti barlangok áthült falain kialakuló hólepel és jégkéreg a nyári időszakban a felszínről érkező melegebb levegő és víz hatására a falakról leválhatott, és a mélyebb zónákba hullhatott. A szerző is egyetért azzal, hogy ez az egyik mechanizmus, amellyel a jég nagy mélységben, akár 550 m-en (vajon tengerszint feletti magasságban megadva?), megfigyelt előfordulását magyarázzák (25. oldal).

A szerző az 5.1.2. számú „*Növényi makromaradványok radiokarbon-kora és a jégfelhalmozódási időszakok a Velebitben*” című fejezetben a Velebit-hegységben kialakult jeges barlangokban végzett konkrét kutatásait összegzi. A jégösszletek rétegeiből kinyert falevelek és fatörzs maradványok geokronológiai elemzéseit radiokarbon vizsgálatokkal oldotta meg. A Kugina-jégbarlang és a Ledena-akna barlang keresztmetszeteit és a jégüledékeit, jégrétegeit, valamint a bennük található szerves maradványokat bemutató reprezentatív, kiváló és szemléletes képeket a szerző a 6. ábrában közölte. Egy elhagyott gleccservölgye nyíló, 536 elemzéshez vettek mintákat és a lokális csapadék <sup>3</sup>H aktivitási görbe alapján egy kor modellt alakított ki a szerző: Ennek nyomán az 1963-as referencia szintet az 1995-ben kifejlődött felszín alatt 3,75 méterrel húzta meg a szerző – első szerzős közleményeiben (Kern et al. 2008). A jégbarlangban található, mintegy 40 méter mély jégréteg (szerző által közölt 6. ábra nyomán egy kicsit hosszabbnak látszik, inkább 50 méter, ahogy a szerző is írja a 47 oldalon) kifejlődését a horvátorszáig kutatás 450 +/- 100 évben adta meg. Vagyis a horvátországi modellek nyomán a Ledena aknabarlangban található jég képződése visszanyúlik a késő középkorra, a Kis Jégkor (Little Ice Age = LIA) idejére. A 27. oldalon és 28. oldalon található meghatározásokhoz kapcsolódnak az első kérdéseim is: Milyen dendrológiai tényezők nyomán határozta meg KG3 jelzésű mintát jegenyefenyőnek (*Abies*), illetve a KG4 mintát bükknek (*Fagus*)? Pontosítaná (pontosítani lehet egyáltalán) fajra (közönséges jegenyefenyő - *Abies alba* és európai bükk - *Fagus sylvatica* taxonok talán?) a nemzetségre megadott meghatározását a szerzőnek? A 28. oldalon európai bükk (*Fagus sylvatica*), illetve *Abies alba* (közönséges jegenyefenyő) taxonokat határozott meg a szerző – Tisztelettel kérdezném: Ki lehet terjeszteni ezt a faji szintű

meghatározásokat a 27. oldalon található csak bükknek és jegenyefenyőnek meghatározott mintákra is?

A szerző 5.1.2.1.1. pontban „*Vukušić-jégbarlangban végzett munkákat, kutatások eredménye*”-it összegezte. A Vukušić-jégbarlang keresztmetszetét, alaprajzát és a jégüledékből történt mintavételek helyszíneit a szerző a 29. oldalon található kiválóan elkészített és szemléletes 7. ábrán közölte. Vukušić-jégbarlangban a szerző több mintavételi expedíciót is szervezett, amelynek geokronológiai eredményeit és a korábbi jégbarlangokban vett minták radiokarbon eredményeit a 2. táblázatban, a 33. oldalon közölte. A korrekt módon kalibrációs betűkkel és számokkal közölt radiokarbon uncal adatoknál kalibrálásának menete és módszertana teljes mértékben megfelelt a nemzetközi, és korrekt módon hivatkozott publikációkban közölt standard módszereknek, ezért a kalibrálást itt és a későbbiekben is elfogadom! A kalibrált radiokarbon adatokat felhasználva a szerző a 8. ábrán, és a 32.-33. oldalon „*A velebiti barlangi jégészvényekre számított kor-mélység modellek és becsült üledékfelhalmozódási ráták*”-at mutatott be jól érthető és értelmezhető módon. A fatörzsek rétegtani helyzetének és geokronológiai adatainak összehasonlító elemzésével a szerző jól szűrte ki a jégrétegben keletkezett résekbe becsúszó, másodlagos helyzetű, áthalmozódott fatörzseket, illetve modern fatörmeléket (32. oldal). Vukušić-jégbarlangban a szerző Krisztus előtti 17. század (3700 cal BP) és Krisztus utáni 16. század közötti jégképződést modellezett. Ugyanakkor a geokronológiai - rétegtani szűrések nyomán a szerző a 8. ábrán teljesen korrekt adatokat tudott közölni és ezekkel modellezni a velebiti jég képződését. Ennek nyomán ki tudta mutatni annak eróziókkal, jégolvadási szakaszokkal megszakított szakaszos voltát (34. oldal). Ezt követően a szerző a nemzetközi irodalomra hivatkozva több példát mutat be arra, hogy a barlangi jégblokk megbillenésével vagy részleges eróziójával megváltozott a jégrétegek komplex rétegtana. Egyértelműen leszögezi, hogy a szükséges részletes rétegtani felméréshez az általa is feldolgozott Vukušić-jégbarlang jégtömbjének megközelítési körülményei lényegesen kedvezőtlenebbek, mint azok a jégbarlangok, amelyeket a nemzetközi irodalomban, ebben a kérdéskörben hivatkoznak (35. oldal). Ugyanakkor az új adatok (a 2. táblára történt hivatkozás nyomán valószínűleg radiokarbon adatokra gondol a szerző) a Vukušić-jégbarlang termeiben található jégblokk alsó szakaszán akár középső holocén, a Kugina-jégbarlangban pedig ezer évnél idősebb jeges üledék megőrződését mutatják. A gondolatkörrel a táblázatban megadott adatok alapján teljesen egyetértek. A szerző ezt követően a különböző Dinári-hegységben és az Alpokban és Dolimitokban, Ibériai-félszigeten található jégbarlangok, jeges üregekből származó radiokarbon korokat taglalta. Megállapította, hogy a mediterrán térségben a legidősebb jégfel-halmozódás a Krisztus előtti 4256/4043 és 3637/3496 évek között (azaz a

magyarországi rézkornak megfelelő szintben) – lokálisan, az Ibériai-félszigetre vonatkozóan a kőrézkor (kalkolitikus) kultúra szintjében történhetett meg az A492 jelzésű jégbarlangban. A szerző által megadott korrelációkkal teljesen egyetértek a nemzetközi irodalomban megadott radiokarbon adatok nyomán.

A 36. oldalon a szerző az 5.1.3. pontban „*A Vukušić-jégbarlang padozati jegének stabilizotópos összetétele és glaciokémiai vizsgálata*” fejezetben a jégfúrástól kezdődően, amelyről kiváló képeket közölt a 38. oldalon, a teljes jégbarlangi mintavételezést, a mintavételezés problémáit, és a 10. ábra alapján a 2,4 méter összhosszúságú jégfurat kiemelését és a geokémiai mintavételezés előkészítését mutatta be. Kifejezetten hasznos volt ez a fejezetrész, mivel a szerző részletesen taglalva bemutatta, hogyan lesz a mintavételből mérési adat. A mintákon végzett izotópelemzést és annak peremfeltételeit mutatta be rendkívül részletesen és az által publikált nemzetközi anyag segítségével. A jégfurat mintáiból kinyert geokémiai adatokból statisztikai elemzést és annak statisztikai elemzés előpróbáját végezte el, hogy a minták adatai megfelelők-e. Ugyanakkor a Zavižan és Crikvena recens csapadék-mintavételi állomások havi adatainak összevonásával nyert adathalmazt használta fel a helyi és jelenlegi csapadékvíz stabilizotóp-összetételét jellemző referenciaként, de ezeknek az adatain is statisztikai előpróbát végzett és a korábbi értékelésben kiugró értéknek mutatkozott Zavižan állomás adatsorában a 2001. augusztusi és szeptemberi adatokat (Kern et al., 2008) kivette az elemzéséből. Elfogadom a döntését, amelyet nemzetközi szinten, lektorált konferencia kiadványban is publikált már. Kiváló megközelítéssel a barlangi jégminták stabilizotóp-adatainak értelmezéséhez a Zavižan és Crikvena állomások havi adatainak összevonásával nyert adathalmazt használta fel a helyi csapadékvíz stabilizotóp-összetételét jellemző referenciaként.

Geokémiai szempontból negyvenöt kémiai elemet vizsgáltak a jégmintákból, és a korrigált koncentráció 23 geokémiai elem esetében volt kimutatási határt meghaladó koncentráció legalább egy esetben a 36 elemzett minta közül. Viszont csak 12 elemet lehetett kimutatni minden egyes jégmintában. Ez a 12 geokémiai elem koncentráció, valamint a  $\delta\text{H}$  és  $\delta^{18}\text{O}$  mérési sorozat alkotta a geokémiai összehasonlításának adatbázisát. Ezeket az adatokat egyrészt a havi átlagosnak vett, Na, K, Ca, Mg tartalomra vonatkozó 1981 és 2001 között megmért recens csapadékadatokkal (velebiti, szlovéniai és Dolomit-hegységbeli mérő-állomásokon vett mintákkal), másrészt az észak-olaszországi Alpokból az *Alto dell'Ortle* jégsapkán kiemelt jégfuratból a 2006–2009 időszak hófelhalmozódását reprezentáló hó- és firnmintákból származó jégkémiai adatokat a fő- és nyomelemekre vonatkozóan hasonlította össze.

Az 5.1.3.3.1. pontban, „*A jég stabilizotóp-összetételében mutatkozó különbségek két velebiti jégbarlang példáján*” fejezetben a Vukušić-jégbarlangból kiemelt jégfurat 36 mintájában kialakult deutérium többlet okait járta körül, majd Vukušić-jégbarlangból kiemelt jégfurat.

Az 5.1.3.1.2. pontban, „*A minták laboratóriumi kezelése*” fejezetben a Vukušić-jégbarlangból kiemelt jégfurat 36 mintáján végzett méréseket taglalta a szerző.

Az 5.1.3.1.3. pontban, „*A vízminták stabilizotópos összetétele – mérés és kiértékelés*”, a 40 oldalon kezdődő fejezetben, amely a dolgozat egészének leglényegesebb része, a Vukušić-jégbarlangból kiemelt minták mérési eredményeinek bemutatását és értelmezését mutatta be a szerző. Ugyanis ebben a fejezetben már kiemelten foglalkozott a saját vizsgálati eredményeinek pontos bemutatásával. A deutérium-többlet (d-többlet) kialakulásának és értelmezésének lehetőségeit taglalta ez utóbbi fejezetben, és megállapította, hogy a felszíni glaciális és periglaciális környezetben a fagyás folyamatának rekonstrukciója szempontjából diagnosztikus erejűnek bizonyult a  $\delta^2\text{H}$  (vagy  $\delta^{18}\text{O}$ ) és a d-többlet közötti kapcsolat elemzésénél. Ezzel megerősítette a korábbi nemzetközi vizsgálatok eredményeit, amelyek a hidrogénizotóp - összetétel vonatkozásában tárgyalták a kapcsolat alakulását, a barlangi jégminták genetikájának értékeléséhez a  $\delta^2\text{H}$  és d-többlet paraméterek közti kapcsolatot mutatták ki.

Az 5.1.3.1.4. pontban, „*A barlangi jég kémiai összetétele*” fejezetben mutatta be a szerző a geokémiai vizsgálatainak eredményeit, a fejezetben leírta, de a fejezetben ábrán nem mutatta be a főkomponens vizsgálatának eredményeit. Kérem, az előadásában feltétlenül pótolja ezt!

A szerző a 44. oldalon kezdődő az 5.1.3.3. pontban, „*Eredmények és következtetések*” fejezetben, az 5.1.3.3.1. pontban, „*A jég stabilizotóp-összetételében mutatkozó különbségek két velebiti jégbarlang példáján*” fejezetben részletezte a vizsgálatainak és összehasonlító elemzéseinek eredményeit. A szerző megállapította, hogy a deutérium többlet a legkisebb értékkel, mind átlagértékét, mind szélsőértékeit tekintve a Ledena-akna jegében jelentkezett (45. oldal) a Vukušić-jégbarlangból kiemelt mintákkal összehasonlítva. Ugyancsak megállapította, hogy Vukušić-jégbarlang mintáiból származó átlagosan negatívabb összetételű izotóppozíció nem származhat a két jégbarlang közötti, mindössze 235 méter tengerszint feletti magasságkülönbségből, mivel ebben az esetben a  $\delta^{18}\text{O}$  átlagértékek 1,6‰-es különbségéből csupán 0,3‰, ill. 0,6‰ eltérés jelentkezne (44. és 45. oldal). Ehhez a fejezethez kapcsolódik a dolgozat (számomra) egyik legértékesebb, három (A, B, C) részből álló ábrája is, a 11. ábra (a 46. oldalon), amely „*A  $\delta^{18}\text{O}$ – $\delta^2\text{H}$  lineáris kapcsolata a két velebiti barlangi jégüledékben és a helyi csapadékvízben*” címet viseli. Az ábra rendkívül szemléletesen mutatja



be a Ledena-aknából és a Vukušić-jégbarlangból származó minták téli és nyári csapadékában, barlangi jégében mutatkozó különbségeket és a két barlang mintáinak vízvonalaiból származó genetikai különbségeket.

A szerző véleménye szerint  $\delta^{18}\text{O}$ – $\delta^2\text{H}$  lineáris kapcsolatát megjelenítő vízvonalak is szembeötlő különbséget mutatnak. A szerző megállapította, hogy a Vukušić-jégmag vízvonala,  $\delta^2\text{H} = 7,80 \times \delta^{18}\text{O} + 11,56$ , figyelemre méltóan jól egyezik a helyi csapadék [ $\delta^2\text{H} = 8,02 (\pm 0,04) \times \delta^{18}\text{O} + 15,72 (\pm 2,61)$ ] származtatott vízvonalaival. Ugyanakkor a Ledena-aknából származó barlangi jég vízvonala ( $\delta^2\text{H} = 5,48 \times \delta^{18}\text{O} - 11,79$ ) jelentősen eltér a Vukušić-jégmagból származó vízvonalától, és a helyi csapadékvíztől is (11A és B. ábrarészek). A szerző, a nemzetközi irodalom alapján is, valószínűsítette, hogy a Ledena-akna fagyott üledéksora összetett genetikájú; hóból, firnből és beszivárgó víz megfagyásával képződött réteg egymásra településéből épült fel. A szerző véleménye szerint a felszínről származó olvadékvíz és folyékony halmazállapotban érkező csapadék is könnyen vándorolhatott a Ledena-akna firn jégének a szivacszerű szerkezetében, ahol a folyékony fázis részlegesen újrafagyhatott. Az olvadási/fagyási ciklusok nagy valószínűséggel ismétlődően zajlottak. Az olvadásnál nem kell izotóp-frakcionálódással számolni, de fagyáskor a keletkező jégben a nehéz izotópokat tartalmazó vízmolekulák dúsulhattak és ekkor izotóp-frakcionálódás játszódhatott le. Ugyanis a szerző véleménye szerint a Ledena-akna porózus firnben szivárgó víz esetében vékony vízréteggel számolhatunk, akár a hóolvadékot, akár a folyékony halmazállapotú csapadék átlagos izotópos-összetételét tekintjük kiindulásnak. A fagyási ráta és a frakcionálódási együtthatóra vonatkozó becslésektől függően, az izotópos-egyensúlyban zajló fagyási folyamat eredményeképpen a  $\delta^{18}\text{O}$ – $\delta^2\text{H}$  kapcsolat meredeksége 5,5 és 6,5 közöttinek adódott, ahogy a 45. oldalon található 3. táblázatban és a 11. ábrán is látható módon megadta a szerző. A Ledena-akna jégmintái alapján meghatározott értékek mindkét összefüggés esetében a fent említett tartományban alakultak. A Ledena-akna és a Vukušić-barlang jégmintáinak összehasonlítása alapján a Vukušić-jégbarlang egy sokkal egyszerűbb eljegesedési rendszert alkot, és alkotott a jégképződés, jeges üledékképződés szempontjából a szerző véleménye szerint. Ezt támasztják alá a többek között a szerző megfigyelései is, mivel Vukušić-barlang jégtömb felszínét érintő olvadás nyomán keletkező olvadékvíz elfolyik a Vukušić-barlang jégtömb felszínéről, nincs lehetősége a vízzáró réteggént értelmezhető, sűrű kongelációs jégbe való beszivárgásra. Az a tény, hogy a Vukušić-jégtömb felszínén soha nem figyeltek meg tóyszerűen felgyülemlt olvadékvizet, mint más barlangokban. Ugyanakkor Ledena-akna barlangi jég vízvonala és a  $\delta^2\text{H}$  – d-többség kapcsolata is arról tanúskodik, hogy a firnösszletben ismétlődően lejároló olvadási–fagyási ciklusok során lejárolódó frakcionálódás módosította a firnösszletben a

kiindulási (jelen esetben) hóra jellemző stabilizotóp-összetételt. A felhalmozódó firn (Cholnoky Jenő hazai földtudományi szakember megnevezése nyomán csonthó) izotóposan dúsult, ráadásul a dúsulás mértéke változhat a fagyási körülményektől függően. A porózus firnben a jégkristályok felszínét szublimáció is érintheti. Ez is hasonlóképp a szilárd fázisban visszamaradó frakció izotópos összetételének bedúsulását eredményezi, bár, ahogy a szerző is megállapította a nedves firn rendszerben a szublimáció által érintet anyagmennyiség jóval csekélyebb az olvadás által érintett anyagmennyiséghez képest. Ezek alapján a Ledena-aknabeli vagy más hasonló genetikájú barlangi jégösszlet esetében a jég  $\delta^{18}\text{O}$  és  $\delta^2\text{H}$  értékei már nem tükrözik a kiindulási csapadékra (jelen esetben hóra vonatkozó) értékeket. A szelvény menti változások értelmezésekor a kiindulási csapadék összetételére következtetni csak korlátozottan lehetséges.

Ezt a különböző, nemzetközi szinten is publikált megfigyelésekkel alátámasztott megállapítását a szerzőnek az ábrán és a táblázatban is bemutatott bizonyítékok alapján elfogadom.

A szerző a 49 oldaltól, az 5.1.3.3.1. pontban, „*A főelemek és a nyomelemek koncentrációinak vizsgálatai*” fejezetben mutatta be a barlangi jégben végzett geokémiai vizsgálatának eredményeit. A Vukušić-jégbarlangból kiemelt jégfurat felső 2 méteres szakaszának (a finomrétegtani szabályok alapján vett) 36 barlangi jégmintára vonatkozó elemkoncentráció-adatokat a szerző az F3. táblázatban mutatta be. A 17 leggyakoribb elem koncentrációinak leíró statisztikáit a 4. táblázat összegzi. A barlangi jégben a kalcium (Ca) a legnagyobb mennyiségben előforduló elem. A további főbb elemek, amelyek koncentrációjának mediánja 60 ng/g feletti, maximális koncentrációja pedig 1  $\mu\text{g/g}$  feletti, a Na, a K és a Mg elemek jelentkeztek. A négy jelentősebb koncentrációban megjelenő elem (Ca, Na, K, Mg) mellett a kisebb koncentrációjú elemeknek a koncentrációját is kimutatott a jég mintákban. Ezeknek az elemeknek a medián koncentrációja 3 és 50 ng/g között jelentkezett, a maximális koncentrációjuk pedig megközelítőleg 40 és 400 ng/g között fordult elő (4. táblázat, 50. oldal). Ezek közé tartoztak az Al, Zn, Fe, Mn és a Sr elemek. A szerző nyomelemnek tekintette azokat az elemeket, amelyeknek a jégkéregben kimutatott medián koncentrációja 1 ng/g alatti volt, maximális koncentrációja pedig 15 ng/g alatt jelentkezett. Ezek közé sorolható a Cr, Co, Cu, As, Rb, Ce, Pb és az U elemek. A szerző az elemek kimutatása mellett elem arányok nyomán értékelte a jégben kimutatott elemeket. A szerző a Vukušić-jégbarlangból kiemelt jégfurat felső 2 méteres szakaszának elemtartalmát és annak statisztikai elemzési eredményeit egy rendkívül szemléletes ábrán is bemutatta (12. ábra, 55. oldal). Sőt a szerző ehhez az értelmezéséhez tartozott az 56. oldalon bemutatott 13. ábra is. A szerző a vízoldható

elemeknél elempárokat is megelemzett és ennek nyomán következtetéseket vont le a barlangi jég keletkezésével kapcsolatban. A Vukušić barlangi jégben a Ca/Mg arány 29 és 117 között mozgott maximálisan a mérések alapján, és ahogy a szerző is megállapította a Vukušić-barlangban, három, jégben kimutatott rétegtani egységében (4. táblázat) Ca/Mg arány átlagos értéke rendre 47,5, 36,9 és 36,6 mutatkozott. Mivel a helyi csapadékban (több mérőállomás adatai nyomán) ennél jóval kisebb arányban jelentkezett a Ca/Mg arány, ezért a szerző (teljesen elfogadható módon) arra következtetett, hogy a Ca és Mg nem a helyi légköri ülepedésből, hanem a jeges üregnek otthont adó karsztrendszerből, az epikarsztban lejátszódó víz–kőzet oldódási reakciókból keletkezett. Ebben a geokémiai kérdéskörben a szlovéniai Paradana-barlang jegével mutatkozott a legjobb egyezés, amelynek értelmezését 2021-ben publikálták a *The Cryosphere* lapban (Munroe, 2021). A kiválóan értelmezhető 12. és 13. ábra alapján a Vukušić-barlangban a jég három szintre osztását elfogadom. A Ca/Mg arány mellett a szerző vizsgálat alá vonta a Na/K arányát is és megállapította a felső rétegtani egységben a légköri ülepedés meghatározó szerepét a Na/K arányra vonatkozóan – ezt a megállapítását is elfogadom. Ugyanakkor, mivel a Na és K koncentrációja sokkal magasabb a felső és az alsó rétegtani egységben, mint a csapadékban, így talajvízből származó hozzájárulással is számolni kell a felső és alsó rétegtani egységek jegénél is. A szerző szerint a jelentős Na/K arány a talajvíz dominanciájára utal a második jég egységben. A megfigyelt glaciokémiai változások összhangban vannak a Vukušić barlangi jégben megfigyelt rétegtanával, azaz a behordott talajból álló betelepüléssel ebben az egységben (10. ábra, 39. oldal).

A talajbemosódás mellett a szerző a recens csapadék alapján összehasonlító vizsgálatokat is végzett az elemekre vonatkozóan. Ennek nyomán megállapította, hogy vélhetően a közös légköri szállítási útvonal magyarázhatja a közös változásukat. A nemzetközi publikációkból jól ismert, hogy az ólom (Pb) koncentrációjának emelkedését az elmúlt évszázadban az antropogén szennyezés (ólmozott üzemanyag) okozta, és Észak-Olaszország Európa egyik legnagyobb Pb-kibocsátó központja lehetett. Ezt gleccserkémiai bizonyítékok is dokumentálták nemzetközi irodalomban. A nyugatias légáramlatok mind az Észak-Olaszországban a légkörbe került ólmot, mind a tengeri aeroszolokat a közeli Adriai-tenger felől a Velebit-hegység területére szállíthatták. Ezt a magyarázatot támogatják az irodalmi (csapadékmérő) adatok alapján, hogy a kelet-adriai állomáson 1995 és 2000 között gyűjtött csapadékmintákból mért vízoldható ionok koncentrációi, és a kapcsolódó pályavonal közötti összefüggések alapján levont következtetések is. Az eredmények rámutattak, hogy a Na koncentrációja a Nyugat-Mediterráneum felől érkező csapadékokban a legjelentősebb, valamint, a 0,5 mm-nél nagyobb hozamú csapadékeseményeket uralkodóan a nyugat-

mediterrán és a közép-mediterrán térségből induló ciklonális cirkuláció okozza. A szerző ezt követően megállapította, hogy a vízoldható relatíve jelentős Fe és Al tartalom egyaránt származhatott geogén és ipari eredetű porból. Feltételezhető, hogy a Fe és Al tartalom a karsztvidéken kívüli területekről származó földkéreg és antropogén források jeleit egyaránt tartalmazhatja. Tisztelettel felhívnom a szerző figyelmét, hogy az általa taglalt Zn és Cu tartalom származhat növényi szervesanyag tartalomból, talajok humusztartalmából is, mivel ezek gazdagok ezekben az elemekben, lásd például itt: Veeken, A., & Hamelers, B. (2002): Sources of Cd, Cu, Pb and Zn in biowaste. Science of the Total Environment, **300**(1-3), 87-98. Mivel a területen közönséges jegenyefenyő (*Abies alba*), európai bükk (*Fagus sylvatica*) maradványokat határozott meg a szerző, nem zárható ki, hogy ezek szétesésével (dezintegrálásával), kioldódásával párhuzamosan alakultak ki a Zn, Cu anomáliák a szerző által vizsgált jégrétegekben.

A szerző az 5.2. fejezetben (58. oldalon) az Északkeleti Mészköalpokban található, Dachstein-hegységbeli, 65 kilométer összhosszúságú Mammút-barlang (Ausztria) jeges üledékeinek kutatását mutatta be. Első lépésként egy kiváló és összetett ábrán bemutatta a barlang elhelyezkedését. A jól karsztosódó felső triász korú Dachsteini Mészköben kialakult barlangi rendszernek 21 bejárata ismeretes, különböző 1828 és 1259 méter tengerszint feletti magasságban, nemzetközi irodalom alapján (15. ábra, 60. oldal). A szellőzési alrendszerek egyike a barlang nyugati részét foglalja magában, ahol átlagosan több mint félméteres falvastagságú Saalhalle barlangi teremben található. A Mammút-barlang rendszerre jellemző évszakos légáramlás télen befelé, nyáron pedig kifelé irányul. A klasszikus dinamikus fő rendszeren belül az 1350 méter tengerszint feletti magasságban elhelyezkedő Saalhalle barlangi teremben azonban egy sajátos egyedi alrendszer is kifejlődött légáramlási szempontból. Ugyanis a rendszer nyári szellőzési módra való váltása után ebben a teremben nem lehetett légmozgást észlelni, vagyis a Saalhalle barlangi terem egy meglehetősen gyenge szellőzésű (statikus) teremnek tekinthető a nemzetközi irodalmi adatok alapján. Mivel a barlangi terem tálalakú, a téli hideg a nyári légmozgás hiánya mellett elegendő a barlangi jég képződéséhez, ezért tavasszal a nagyon hideg hóolvadék bejut a Saalhalle barlangi terembe, ahol 5,28 méter vastagságú barlangi jégblokk képződött ezen ismétlődő folyamat nyomán. A szerző által vezetett többéves programban ezt a barlangi jégrendszer tárták fel, talajradarral (GPR-el). A vizsgálatot követő előkészítés kézi fúrás 2009 szeptemberében történt. Majd izotópgeokémiai, geokémiai, oldhatatlan anyagokra vonatkozó és geokronológiai elemzéseket is végzett a szerző a furaton. A terepi munkáról, a jégblokk feltárásáról a szerző kiváló képeket jelentetett meg a dolgozatában – 16. ábra, a 63. oldalon. A talajradar vizsgálatok egyértelműen réteges belső

szerkezetet mutattak. A fagyásgátló folyadék nélküli hűtő folyadék nélkül vett mintákat az ELKH Geokémiai Kutató Intézetében és az ELKH Atommagkutató Intézetében vizsgálták meg. A specifikus elektrolitikus vezetőképesség (EC) mérése az olvasztott vízmintákon történt egy LABCOR Consort C533 műszerrel mérték be. Az oldhatatlan szennyeződések a szerző binokuláris mikroszkóppal (Zeiss Discovery V20 SteREO) vizsgálta meg, és alaptípusokat különböztetett meg. A jégfurat mintáiból ötöt választott ki a mikroszkopikus méretű szerves-frakció  $^{14}\text{C}$  elemzésére. Hármát a furat 1 és 1,5 m közti szakaszán méretett meg a szerző, és kettőt a 4,5 és 5 m közötti mélységtartományából. A jégblokk talpát (5,28 méter) nem sikerült geokronológiai szempontból megvizsgálni a mintavétel helyén. A jégblokkból fúrással kiemelt mintákon a szerző trícium koncentrációjának mérését is elvégezte a  $^3\text{H} - ^3\text{He}$  módszerrel. A módszert részletesen bemutatta a szerző a 65 oldalon, az 5.2.2.5.2. jelzésű fejezetben. A helyi és regionális csapadékmérők (mindenekelőtt a hasonló tengerszint feletti magasságban található és 1973 évig visszamenő adatsorral rendelkező Feuerkogel csapadékmérő) izotóp- és geokémiai adatait összehasonlító elemzésnek vetette alá a szerző. A szerző szerint leírt oldhatatlan összetevők leggyakoribb kategóriái megjelenésükben teljes mértékben egyeztek az Eisriesenwelt-barlang (Tennengebirge, Ausztria) jégfuratának vizsgálata során nemzetközi publikációkban leírtakkal. Az analógiák alapján a szerző által megfogalmazott és a 64. oldalon leírt „*fehér/sárgás mikrolemezek és aggregátumok*” kifagyásos karbonátként, az „*okkersárga iszap*” pedig agyagként azonosítható. A szerző megállapításai alapján Saarhalle jégmag a specifikus elektronikus vezetőképesség változásainak fő oka nem a kifagyásos karbonát jelenlétéhez, hanem a vízforrás iontartalmának változásaihoz kapcsolódott. A szerző megállapításai alapján a Saarhalle jégmag egyes szakaszain mért alacsonyabb vezetőképességeket két lehetséges ok magyarázhatja. Egyrészt ezek gyors beszivárgásból származó vízre utalhatnak, amely minimálisan érintkezett a talajjal vagy a karbonátos alapkőzetekkel, így oldottanyag-tartalma kevésbé jelentős. Másrészt a vízgőz kondenzációja és megfagyása révén képződött jégréteg szintén alacsony vezetőképességi értékeket eredményezhet.

Környezet- és klímátörténeti szempontból a legértékesebb ábrának a 68. oldalon bemutatott 17. ábra bizonyult, amely „*A Saarhalle terem barlangi jégtestből kinyert, 5,28 m hosszú barlangi jégmag elemzési eredményei*” címet viseli. A radiokarbon elemzések (8. táblázat) nyomán a bronzkor idősebb (kora és középső bronzkori) szakaszáig biztosan visszamenő jégblokk mintáin izotópgeokémiai eredményeket, specifikus elektronikus vezetőképességet, a különböző oldott anyagokat nem folyamatos jelleggel mutatta be. Ezt követően a szerző a Saarhalle terem barlangi jégtestből származó jégminták stabilizotópos elemzése nyomán a jégblokk genetikáját, kialakulását taglalta. Az alpi recens csapadék összehasonlítása nyomán megállapította a szerző,

hogy a Saarlalle barlangi teremben kifejlődött jégtest mintáira kapott meredekség kétszerese a csapadék eredetű vizekre általánosan jellemző meredekségnek a szerző által mért  $\delta^{18}\text{O} - \delta^2\text{H}$  kapcsolatában (18. ábra, 72. oldal). Éppen ennek a Saarlalle barlangi teremben kifejlődött jégtestből vett mintáknak a szerző által végzett stabilizotópos jellemzőinek mérése, a modern csapadék és az idős beszivárgás kimutatása, valamint az adatok értelmezése a szerző részéről „*arra vezetett, hogy a jég stabilizotópos összetételében tapasztalható változások alapján paleoklimatológiai következtetések levonása aggályos.*” Ezt a nemzetközi és hazai szinten is alapvető (és dolgozatának megítélése szempontjából legfontosabb) megállapítását a szerzőnek, a bemutatott eredmények és modellek nyomán elfogadom. Majd a szerző a Saarlalle jégtest mintáinak trícium adatait hasonlította össze a regionálisan rendelkezésre álló szisztematikus csapadék-monitoring során gyűjtött adatokkal. Ennek nyomán megállapította, hogy Saarlalle barlangi teremben kifejlődött jégtest 0,91 méter olvadhatott le. A jégképződés és olvadás sebességét figyelembe véve, valamint a  $^3\text{H}$  csúcs nagyságát (19. ábra, 77. oldal) figyelembe véve 1978. évet jelölte meg a szerző a 2009. évben vett minták korának. Ugyanakkor a kapott eredmény 30% modern csapadék és 70% idős beszivárgás keveréke az 1960-as évek közepi csúcs idejére a jégmagban megfigyelt maximumhoz hasonló aktivitást eredményezne. A hipotézis (megközelítési modell) tesztelésére a szerző többéves keveredést szimulált, három változatban simítva a bomlással korrigált regionális havi csapadék  $^3\text{H}$  szintjét. Az eredmények azt mutatták, hogy a megközelítőleg 12 éves keveredés a  $^3\text{H}$  csúcsot a jégmagban mért szintre csökkentheti (19. ábra, B rész, 77 oldal). Az ilyen jól kevert tározóból táplált víz  $^3\text{H}$ -aktivitása azonban az 1960-as évek közepe után folyamatosan  $>10$  TU szinten lenne. Viszont, ahogy a szerző is megállapította a 0,25 és 0,65 m mélységben megközelítőleg 0 TU (in)aktivitású mintákat mutatott ki. A mintázat arra utal, hogy egy "régí" (idősebb korú) tríciummentes komponens keveredhet a "modern" meteorikus komponenssel, amely a szerző által kimért és megfigyelt köztes  $^3\text{H}$ -szinteket eredményezte. A szerző szerint a kevert vízforrás-séma megfelel a Saarlalle-jégmag stabilizotópos jellemzőire felállított magyarázatnak is. A táblázatban és ábrán is bemutatott mérési adatok nyomán elfogadom és kiemelem, hogy a szerző mutatott rá, hogy ezek a késő holocén korú barlangi jégtestek rendkívül heterogén genetikájú rendszerek. A késő holocén korú barlangi jégtestek genetikáját tovább bonyolíthatja, hogy a barlangban a jégkori periglaciális környezet idején jelentősebb mennyiségű jeges üledék képződhetett és ezek elolvadás, majd a jégkorból származó vízük visszafagyása modellezhetetlen keveredést okozhatnak a holocén jégtestekben.

A szerző rámutatott, hogy az általa bemutatott esettanulmányokban három jégösszlet stabilizotóp-összetételeinek nyomán az eddig használt barlangi jégüledékek vízigotópos jellemzői alapján javasolt nemzetközi háromkategóriás osztályozás sok szempontból megfelelő, de jelenlegi formájában kritikus hiányosságok is azonosíthatók a módszerben. A koncepció finomításához

hasznosnak mutatkozik a  $\delta^2\text{H}$  (vagy  $\delta^{18}\text{O}$ ) és a d-többslet közötti kapcsolat figyelembevétele is, ezért a szerző az dolgozatának összefoglalásában külön kitért a barlangi jég új, a szerző munkásságához köthető osztályozására.

Az összegzés és az előző fejezet határán ezen túl bemutatta a 20. ábrán a radiokarbon elemzések nyomán készített Saarhalle-jégmag kor–mélység modelljét is. Az összegzésben a szerző ismét visszatért a vizsgálatainak eredményeire, és az eredményekből levont következtetésekre.

Az összegzésében javaslatot tett, hogy barlangok firn- vagy jégpszervényéből származó  $\delta^2\text{H}$  vagy  $\delta^{18}\text{O}$  adatsorok változásait akkor lehet a csapadék stabilizotóp-összetételének időbeli változásaihoz kötni, ha a  $\delta^2\text{H}$  – d-többslet közötti kapcsolat is támogatja, hogy a kiindulási (csapadék) víz izotópos jellemzői nem módosultak a jégképződés során. Vagyis az alapadatok megmérése mellett modellezés is szükséges firn- vagy jégpszervényéből származó  $\delta^2\text{H}$  vagy  $\delta^{18}\text{O}$  adatsorok értelmezéséhez.

Az összegzései közül kiemelte a tézispontjait, amelyek mindegyikét elfogadom új, szerző munkásságához köthető eredménynek, és javaslatával, amellyel zárja az összegzését.

Gratulálok a gondosan összeállított és gépelt dolgozatához, a dolgozatban bemutatott kiváló eredményekhez, a rendkívül nehéz terepen végrehajtott szabatos mintavételhez, a teljes mértékben az anyag-vizsgálatokhoz kötődő műszeres vizsgálataihoz, az adatok nyomán kialakított modellekhez, és ahhoz, hogy sikerült rámutatnia, hogy az általa vizsgálat alá vont barlangi jég képződése olyan vegyes eredetű rendszert alkot, amelynek paleoklimatológiai – paleohidrológiai (és geokronológiai) értelmezése rendkívül vitatható. Végre valaki lemerte írni, hogy az egyes, kutatók által vizsgálat alá vont objektumoknak (geokronológiai, genetikai) korlátai vannak paleoklimatológiai szempontból. Így a kinyert paleoklimatológiai következtetések is csak korlátozottak lehetnek bármilyen modern technikát is használunk a vizsgálatánál. Külön gratulálok ahhoz, hogy be is mutatta ezeket a korlátokat a mérési eredmények értelmezései nyomán.

Szeged, 2024. április 2.

Tisztelettel:



Prof. Dr. Sümegei Pál, tanszékvezető egyetemi tanár