

OLÁH LÁSZLÓ

# Szerkezetvizsgálat kozmikus részecskékkel

A kozmikus sugárzás létezését *Viktor Hess* igazolta híres kísérletével éppen 100 évvel ezelőtt. Hess léggalonnal juttatott fel egy elektroszkópot a légkörbe 5330 méter tengerszint feletti magasságig emelkedve, mialatt az elektroszkóp töltésveszteségének időtartamát mérte. Az elektroszkóp kisülésének időtartama folyamatosan nőtt az – 1 km-es magasság feletti – emelkedéssel. Ez bizonyította az ionizáló, töltött részecskék „égi eredetét” [1]. *Viktor Hess* e felfedezéséhez kapcsolódóan Nobel-díjat kapott 1936-ban.

Az 1950-es évekre egyre inkább ismertté vált a kozmikus sugárzás összetétele és tulajdonságai. Megmérték, hogy a Földünket folyamatosan bombázó nagyenergiás részecskék főleg protonok (90%), alfa részecskék (9%) és a vasig bezárólag a könnyebb atommagok (1%). Ezek az ún. elsődleges részecskezáporként mintegy 20–30 km-es magasságban erősen kölcsönhatnak a légkört alkotó oxigén- és nitrogénatommagokkal, amely során másodlagos részecskezáporként keletkeznek. A keletkezési folyamatok lényegében ugyanazok, mint amelyeket a CERN Nagy Hadronütköztetőjének TeV ütközési energiájú, nukleon-nukleon ütköztetéseik vizsgálatánál. A légköri folyamatok azonban ritkábbak, energiájuk 8–10 nagyságrenddel nagyobb, és a keletkező részecskék akár több ezer négyzetkilométeren terülhetnek szét a földfelszínen.

A légkörben keletkező másodlagos részecskezáporként müonokat ( $\mu^+$ ) keltenek. A müonokat az elektronok „nagytestvéreinek” tekintjük, ugyanis fizikai tulajdonságaik ugyanazok, kivéve a tömegüket, ami az elektrontömeg kétszázszorosa. Ezek a légköri eredetű, közel fénysebességgel mozgó müonok a relativisztikus idődilatáció következtében juthatnak el Földünk felszínéig. A földfelszínen mért müonhozam  $100 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{s}^{-1}$ , ami kb. 30 darab áthaladó müont jelent másodpercenként testfelületünkön. A müonoknak koszinusz négyzettel arányos zenithszög-eloszlása és az energia köbével arányos energiaeloszlása van a földfelszínen. A müonok energiájukat ionizációval adják le anyagon történő áthaladásuk vagy elnyelődésük során.

A kozmikus sugárzás felsorolt tulajdonságai már az 1950-es évek közepére ismertek voltak, és elegendőnek bizonyultak ahhoz, hogy a kozmikus részecskék hozamának mérését akár alkalmazott kutatásokra használják.

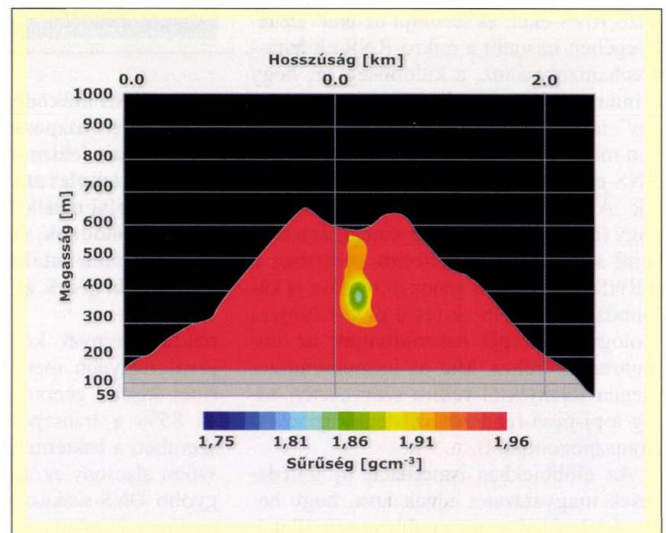
## Müontomográfia, avagy alkalmazott kutatások kozmosz részecskékkel

A müontomográfia alapja a müonhozam mérése. A kozmikus sugárzás intenzitása ismert különböző sűrűségű és vastagságú anyagvastagságok alatt. Tehát, ha megmértük a vizsgált objektumon – pl. egy piramison vagy egy vulkánon – áthaladó kozmikus müonok intenzitását, és ismerjük a vizsgált objektum sűrűségét (vastagságát), akkor meghatározhatjuk annak vastagságát (sűrűségét). Ennek az inverziós problémának a megoldása nem egyszerű a gyakorlatban. A müontomográfiai eljárás és a röntgensugaras, ill. számítógépes tomográfia (Computer Tomography, CT) eljárás között több lényeges különbség van: a „müonforrás” nem izotróp, azaz a kozmikus müonok intenzitása energia- és szögfüggő. Továbbá a vizsgált objektum mérete több nagyságrenddel nagyobb, mint egy hagyományos „célpont”. Mindezek ellenére a müontomográfia sikeres eljárásnak bizonyult számos kutatási területen, ahol a hagyományos módszerek nem elég hatékonyak vagy nem alkalmazhatók: kezdve a régészeti feltárásoktól a geofizikai kutatá-

sokon keresztül a nemzetvédelmi alkalmazásokig. Tekintsünk ezek közül néhányat az alábbiakban!

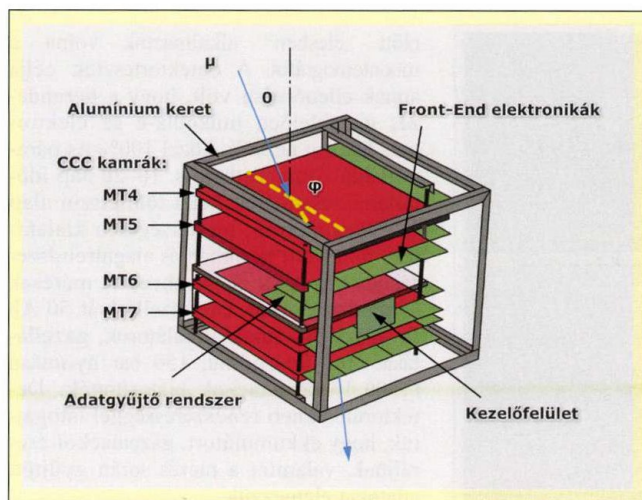
Az első ismert alkalmazás *E. P. George* nevéhez köthető, aki az ausztrál bányák feletti hegyeken található hórétegek vastagságát határozta meg a kozmikus müonok hozamának mérésével [2].

Majd egy évtizeddel később merült fel a remek ötlet, hogy használhatnának kozmikus részecskék detektálására alkalmazott berendezéseket régészeti feltárásokra is. Az első ilyen jellegű kutatás célja az egyiptomi Keftren-piramis szerkezetének vizsgálata volt. A piramis alatt található Belzoni-kamra felett – a korábban ismert Királyok kamrá-



1. ábra. A Satsuma-Iwo-jima-vulkán Iwokade csúcsának sűrűségeloszlása müonokkal mérve [5]

ja mellett – rejtett kincseskamrák jelenlétét feltételezték. A Piramis Programot *Luis W. Alvarez* és csoportja indította el 1966. június 14-én [3]. *Alvarez* ötlete nagyon egyszerű volt: elhelyeznek egy müondetektort a piramis alatt található Belzoni-kamrában, és mérik a müonhozamot. Ha valamelyik irányból több kozmikus részecskét detektálnak, mint azt a piramis geometriájából és anyagi összetételéből várnák, akkor abban az irányban



2. ábra. A REGARD-csoport által épített hordozható

egy rejtett kamrát találtak. Eljárásuk nagy előnye a korábbi régészeti módszerekkel szemben az, hogy a kozmikus sugárzás nem rontcsolja a piramis szerkezetét.

Alvarezék berendezése két egymástól 30 cm-re lévő,  $1,8 \text{ m} \times 1,8 \text{ m}$  felületű szikrakamrából és 3 darab szcintillációs – az ionizáló sugárzás hatására rövid fényimpulzust kibocsátó – számlálóból épült fel. A detektoruk segítségével  $3^\circ$  pontossággal mérték a müonok beérkezési szögét. Közel egymillió kozmikus müont detektáltak mintegy félévi adatgyűjtés után. Ekkor már látható volt a piramis négy sarka és a külső jellegzetességét adó „mészkösapka” is. További, fél évig tartó adatgyűjtés után már egyértelmű volt, hogy a piramisban található két kamrán kívül nincsenek további 2 m-nél nagyobb átmérőjű üregek.

Hasonló alkalmazási terület az aktív vulkánok belső szerkezetének megismerése. Fontos, hogy megértsük a vulkanikus működést, ill. előre jelezzük a következő kitörés jellegét és idejét. A vulkán sűrűségeloszlásának folyamatos „monitorozása” szükséges ahhoz, hogy a láva mozgását figyelemmel követhessük. A hagyományos geofizikai módszerek – mint a mélyfúrás vagy a szeizmikus tomográfia – nem alkalmazhatók az aktív vulkánok vizsgálatára, mert azok nem közelíthetők meg az ott keletkező mérgező gázok és forró környezet miatt. Ezek ismeretében jó ötletnek ígérkezik, hogy az aktív vulkánok belső szerkezetének feltérképezésére a rajtuk áthatoló kozmikus sugárzást mérő, tőlük több száz méterre elhelyezett detektorokat használjunk. A müontomográfias módszer alkalmazhatóságát K. Nagamine és munkatársai bizonyították: szcintillátorokból és fotoelektron-sokszorozókból épített müonteleszkópjuk segítségével határoz-

ták meg a Tsukuba-vulkán sűrűségeloszlását az 1990-es évek közepén [4].

Egy évtizeddel később H. Tanaka és csoportja végzett méréseket ezzel a módszerrel a Satsuma-Iwo-jima-vulkán lábánál is. Berendezésük 2 darab, egymástól 1 méter távolságra, párhuzamosan elhelyezett  $1 \text{ m}^2$  felületű szcintillációs detektor volt. Berendezésük szögfelbontása 16 mrad volt, azaz a vulkán kráterétől 1,2 km távolságra elhelyezett

detektorukkal kb. 20 méter pontossággal mérhették meg a vulkán vastagságát. 1,3 millió kozmikus müont detektáltak az egy hónapos mérés során. Az 1. ábrán látható a Satsuma-Iwo-jima-vulkán Iwokade csúcsának sűrűségeloszlása, amelyen egyértelműen elkülöníthető a kürtőben található láva sűrűsége a vulkán alkotó kőzetek sűrűségétől. A sűrűséget 3,2% pontossággal adták meg, amely egy nagyságrenddel pontosabb a korábbi geofizikai mérések eredményeinél [5].

Az előbbi alkalmazások eredményei igazolják, hogy a kozmikus müonok jól használhatók a detektor feletti anyag nagyleptékkü struktúrájának meghatározására. A gáz-töltésű detektorok kutatásával és fejlesztésével foglalkozó REGARD- (RMKI-ELTE Gaesous Research and Development) csoport kutatómunkájának célja, hogy egy, a felsoroltakhoz hasonló, ám azoknál jelentősen költséghatékonyabb, mobilisabb, infra-

terjedtebb kőzet-inhomogenitások keresésére és vizsgálatára. A továbbiakban bemutatom a REGARD-csoport által készített müontomográfot és annak első hazai alkalmazásait.

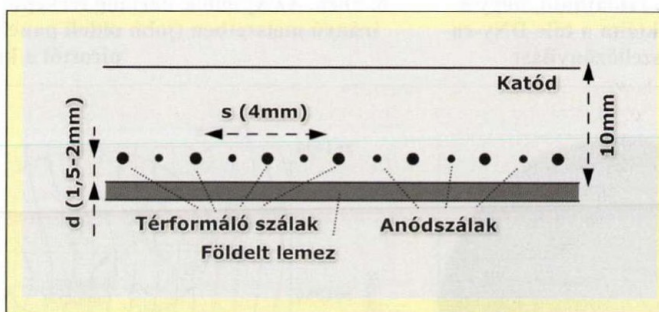
## Hordozható müondetektor környezeti alkalmazásokra

Egy kozmikusrészecske-detektor felületének a lehető legnagyobbnak kell lennie, hogy rövid idő alatt is kellő számú részecskét detektáljon, azonban pl. egy barlang belsejébe csak limitált méretű és súlyú detektort vihetünk be. A REGARD-csoport müontomográfját barlangi mérésekre optimalizáltuk: tömege 13 kg, méretei  $51 \text{ cm} \times 46 \text{ cm} \times 32 \text{ cm}$  [6,7].

A 2. ábrán látható az a berendezés, ami 4 darab egymás alatt, párhuzamosan elhelyezett közelkatódos kamrából (Close Cathode Chamber, CCC) épül fel [8,9]. A kamrák mérete  $32 \text{ cm} \times 32 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$ , szélsíkjaikban kétféle szálat alkalmazunk (3. ábra):  $100 \text{ }\mu\text{m}$  vastagságúak a térformáló szálak és  $20 \text{ }\mu\text{m}$  vastagságúak az anódszálak. A szélsíktól  $1,5 \text{ mm}$ -re elhelyezkedő alsó katódot a szálakkal egy síkban, merőlegesen,  $4 \text{ mm} \times 320 \text{ mm}$  területű vezető felületekre (továbbiakban parketta) szegmentáltuk.

A kamrák működésének alapja – az általánosan alkalmazott Geiger-Müller-számlálóhoz hasonlóan – a töltött részecskék által okozott ionizáció mérése. Az ionizáció fenntartása miatt folyamatosan argon- (Ar) és széndioxid- ( $\text{CO}_2$ ) gázok 80:20 arányú keverékét áramoltatjuk keresztül a kamrákon. A töltött részecskék kamrákon történő áthaladásuk során elektronokat szakítanak le (ionizálnak) az Ar-atomokról. A szabad elektronokat gyorsítja a szálak közelében kialakuló elektromos térerősség, így azok tovább ionizálnak, majd lavinaféktussal érzékelhető töltésmennyiség ( $10^3$ – $10^4$

darab elektron) jelenik meg, amely erősítés után mérhető jelet ad ( $10^5$ – $10^6$  darab elektron). A térformáló szálakon a pozitív ionok mozgása következtében pozitív jelek keletkeznek, majd ezen pozitív ionfelhő tükkörtöltése mérhető a parkettákon. Ennek következtében



3. ábra. A közelkatódos kamra belső szerkezete [8,9]

struktúrára, energiafelhasználásra és emberi felügyeletre nézve szerényebb igényű, a jelenlegiek precizitását meghaladó berendezést építsen, amely alkalmazható föld alatti üregek (pl. rejtett barlangi járatok) vagy ki-

a közelkatódos kamrák alkalmasak az egy időben történő, egymásra merőleges irányú digitális jelkiolvasásra a térformáló szálakon és a parkettákon is. A jelet adó szálak és parketták meghatározzák a kozmikus részecske beüté-



4. ábra. A REGARD műöntomográfal végzett mérések helyei

sének helyét az adott közelkatódos kamrán. A detektoron keresztülhaladó müonok pályáját a kamrákon mért beütések koordinátáira legjobban illeszkedő egyenes adja meg, amelyet – a mérések után – egy kiértékelő programmal illesztünk rá.

A közelkatódos kamrák tudományos előnye a hagyományos sokszálas proporcionális kamrákkal szemben az, hogy toleránsak az apró, 10–100  $\mu\text{m}$  nagyságú pontatlanságokkal szemben, ill. könnyen szerelhetők. A kamrák az LHC ALICE kísérletének új, nagyon nagy impulzusú (5–25 GeV/c) hadronok – pionok, kaonok és protonok – azonosítására

5. ábra. A mért részecskeszám (szűrkeskálás kontúrvonalak) és a detektor feletti kőzetvastagság (piros kontúrvonalak) a kőbányai alagútrendszerben. Jól látható, hogy a műöntomográf detektálta a tőle DNy-ra elhelyezkedő szellőzőnyílást

szolgáló aldetektorába (Very High Momentum Particle Identification Detector, VHMPID) triggerrendszerébe (High  $P_T$  Trigger Detector) is beépülhetnek a jövőben [8,9].

A műöntomográf integrált adatgyűjtő rendszerrel rendelkezik, amely magában foglalja a nagy- és kisfeszültség modulokat, a triggerrendszert és a kezelőfelületet is. A REGARD-csoport műöntomográfjának teljes fogyasztása 5 W, amely több nagyságrenddel kisebb, mint napjaink hasonló alkalmazásokra épített detektorainak fogyasztása!

### Barlangkutatás kozmikus müonokkal

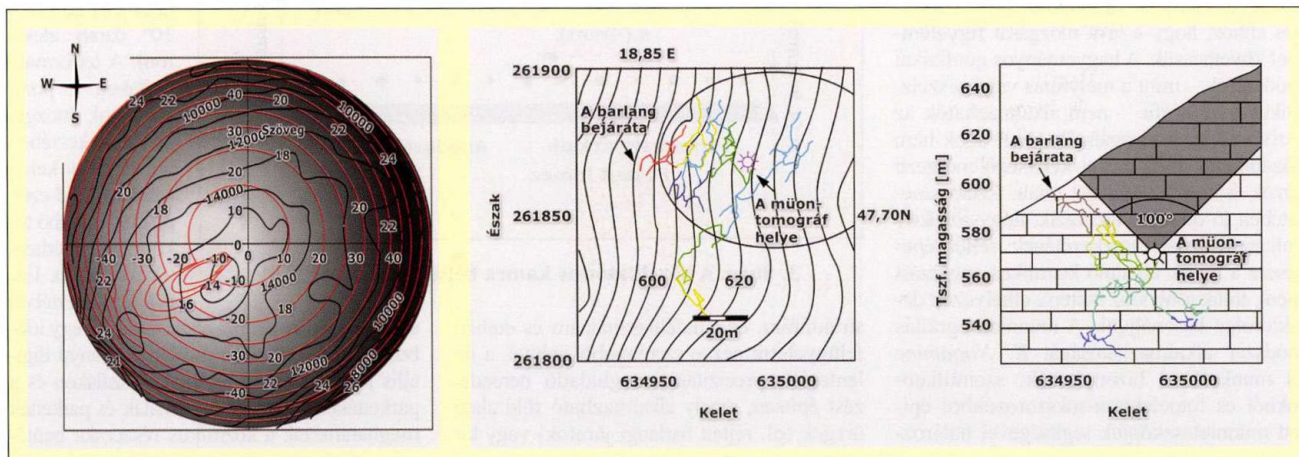
Számos tesztmérést végeztünk el, mi-

előtt „élesben” alkalmaztuk volna a műöntomográfot. A detektortesztek célja annak ellenőrzése volt, hogy a berendezés megfelelően működik-e az elektromos hálózat nélküli, közel 100%-os páratartalmú környezetben is. 10–20 nap időtartamú tesztméréseket a földfelszín alatt 10–30 m mélyen, mesterségesen kialakított, föld alatti tárokból és alagútrendszerekben végeztük el (4. ábra). A mérések során detektorunk energiaellátását 50 Ah fogyasztású autóakkumulátorok, gázellátását 10 l ürtartalmú, 150 bar nyomású (1500 l) gázpalackok biztosították. Detektorunkat heti rendszerességgel látogatuk, hogy akkumulátort, gázpalackot cseréljünk, valamint a mérés során gyűjtött adatokat elemezzük.

Az első tesztmérések eredményeit a [10] irodalomban közzétettük, jelen cikkben a kőbányai alagútrendszerben végzett méréseket ismertetem. A tesztek célja annak bizonyítása volt, hogy műöntomográfunk alkalmazható föld alatti üregek vagy kiterjedtebb talaj-inhomogenitások detektálására. Erre a célra kiváló hely a földfelszín alatt 20 m mélyen elhelyezkedő kőbányai alagútrendszer, ugyanis ott több 1 m átmérőjű, 17 m hosszú szellőzőnyílás található. Ezek detektálásával bizonyítást nyer, hogy detektorunk alkalmazható a fentebbi célokra.

Az egyik mérés során a vizsgált szellőzőnyílás detektorunktól 2,5 m távolságra, a detektorhoz képest DNy-ra helyezkedett el. Az 5. ábrán látható egy 14 napos mérés eredménye, amelyen a mért részecskeszámot szűrkeskálás kontúrvonalak, a detektor feletti kőzetvastagságot piros kontúrvonalak jelölik. Ez az eredmény azt mutatja, hogy a műöntomográf „látta” a szellőzőnyílást a megfelelő irányokban,

6. ábra. Az Ajándék-barlang térképe: felülnézetből (bal oldali panel) és Ny–K irányú metszetben (jobb oldali panel). A színezés a járatok mélyülését jelzi: pirostól a kék felé mélyül



tehát detektorunk alkalmas föld alatti üregek detektálására.

Detektorunk működésének megismerése után elkezdhattuk méréseinket a Pilisben található, részben feltérképezett Ariadne-barlangrendszerben. Ez 13,1 km hosszával és 203 m mélységével jelenleg Magyarország harmadik leghosszabb és harmadik legmélyebb barlangrendszere. A müontomográfot az Ajándék-barlangban helyeztük el. Méréseinket motiválta, hogy korábbi geoelektromos mérések sűrűséganómáliát mutattak ki a barlang ezen járatai felett, azonban a rendelkezésre álló adatok birtokában, ill. jelen analízisekkel sem dönthető el, hogy a barlang felett egy 5–10 m átmérőjű üreg vagy egy százkö van. Méréseink célja e kérdés eldöntése volt.

A 6. ábrán látható a barlang vetülete felülnézetből (*bal oldali panel*) és a barlang Ny–K irányú metszete (*jobb oldali panel*). Berendezésünket kb. 70 méterre helyeztük el a barlang bejáratától (7. ábra). A detektor felett, függőleges irányban kb. 60 m volt a kőzet vastagsága. A barlang feltérképezését Surányi Gergely geofizikus, barlangász vé-

szecskeszámot. A részecskeszám- és topológiai mérések eredményei korrelációt mutatnak egymással (a piros és szürkescálás kontúrvonalak jól követik egymást), amely azt a következtetést vonja maga után, hogy nem volt egyértelműen azonosítható föld alatti struktúra a müontomográf látószögében.

### Összefoglalás

Bemutattam a REGARD-csoport hordozható müondetektorát, amely alkalmazható föld alatti üregek és kiterjedtebb kőzet-inhomogenitások detektálására. Sikeres méréseink egyértelműen igazolják, hogy a nagyenergiás fizikában (pl. a CERN Nagy Hadron Ütköztetőjének kísérleteinél) alkalmazott detektortechnika átültethető környezeti alkalmazásokra – esetünkben barlangkutatásra – is. Jelenleg készül az újabb, 50 cm × 50 cm detektáló felülettel rendelkező müontomográf, amelyet föld alatti üregek keresése mellett vulkánok vizsgálatára is tervezünk használni.

### Irodalom

- [1] Hess, V. F.: PZ 13, 1912, 1084
- [2] George, E. P.: Commonwealth Engineer, 1955
- [3] Alvarez, L. W. és mtsai.: Science 167, 1970, 832-839
- [4] Nagamine, K. és mtsai.: NIM A 356, 1995, 585-595
- [5] Tanaka, H. és tsai.: GEOPHYS. RES. LETT., 36., L01304, 2009, 1–5.
- [6] Barnaföldi, G. G. és mtsai.: NIM A 689, 2012, 60-69
- [7] Oláh, L. és mtsai.: Geosci. Instrum. Method. Data Syst. Discuss. 2, 2012, 781-800
- [8] Varga, D. és mtsai.: NIM A 648, 2011, 163-167
- [9] Varga, D. és mtsai.: NIM A 698, 2013, 11-18
- [10] Barnaföldi, G. G. és mtsai: Fizikai Szemle, 2011, 401-407

A szerző a 2012. évi Doktorandusz cikkpályázat második helyezettje.



7. ábra. A müondetektor elhelyezése és üzemeltetése az Ajándék-barlangban (balról jobbra: Barnaföldi Gergely Gábor, Surányi Gergely, Melegh Hunor Gergely és Varga Dezső)

gezte el nagy pontosságú GPS segítségével. Majd a barlang belsejében háromszögeléssel meghatározta a detektor helyét és a detektor helyétől szolgáló üreg méretét. Ezek ismeretében kiszámolta a detektor feletti kőzetréteg vastagságát.

A közel 50 napos (1190,8 óra) mérés során a 60 méter mélyen elhelyezett detektoron mintegy 170 000 kozmikus müon haladt keresztül, amely óránként ~ 143 darab részecskét jelent. A 8. ábra mutatja méréseink eredményeit: a – domborzatnak megfelelően Ny felé toló – müonhozamot (*bal oldali panel*), valamint a részecskeszám és a detektor feletti kőzetvastagság összehasonlítását (*jobb oldali panel*), amelyen piros kontúrvonalak mutatják a detektor feletti kőzet vastagságát, a szürkescálás kontúrvonalak pedig a ré-

8. ábra. A domborzatnak megfelelően Ny felé toló müonhozam (bal oldali panel), ill. a részecskeszám (szürkescálás kontúrvonalak) és a detektor feletti kőzetvastagság (piros kontúrvonalak) összehasonlítása (jobb oldali panel), amelyek korrelációt mutatnak, tehát nincs rejtett barlangi üreg a detektor látószögében

