

## **ABRÁZIÓS BARLANGOK KIALAKULÁSA ÉS FORMAKINCSE KÜLÖNBÖZŐ KÖZETSZERKEZETŰ BAZALT-LÁVÁKBAN ÉS PIROKLASZTITOKBAN**

GADÁNYI PÉTER<sup>1</sup>

DEVELOPMENT AND MORPHOLOGY OF SEA CAVES IN BASALTIC LAVAS  
AND PYROCLASTICS OF DIFFERENT STRUCTURE

### **Abstract**

The aim of this study to demonstrate that how, and in which form sea caves develop in structurally different basaltic lavas and pyroclastites of these kinds.

Also influenced by marine erosion, the dimensions and morphology of sea caves principally depend on the structural behaviour of the enclosing basaltic lavas and pyroclastics. In basalt volcanic areas sea caves can form in columnar and irregularly jointed basaltic lava; through opening up and further shaping of primarily existing caverns; in lava deltas; by the excavation of embedded volcanic agglomerate or slack structured aa lava from between thick and primarily existing caverns; in pillow lava; in basaltic dyke; along the border of a basaltic dyke and thick hydrovolcanic tuff and in basaltic tuff. The aim of this study is to demonstrate that how and in which form sea caves develop in structurally different basaltic lavas and pyroclastics.

**Keywords:** sea cave, basaltic lava, basaltic pyroclastics, structure, development, morphology

### **Bevezetés**

A Föld különös, varázslatos formakincsű és gyakran megdöbbentő méretű energiákat kioltó szegleteinek, az óceánok, tengerek, tavak hullámai által ostromolt sziklás partoknak érdekes jelenségei az abráziós barlangok. Különlegesen szép és gyakran veszélyes környezetük miatt a kutatók számára igen izgalmas és érdekes a tanulmányozásuk. Képződésükhöz több különböző, döntően a tengervízhez kötődő eróziós hatótényező és folyamat, valamint a sziklás tengerpartok bizonyos anyagi és közetszerkezeti tulajdonságainak együttes megléte szükséges. Adott eróziós feltételek mellett az abráziós barlangok mérete és formakincse a sziklás tengerpartok anyagától és közetszerkezeti viszonyaitól függően formálódik ki, amelyek következtében formakincsük igen változatos lesz.

E tanulmány célja annak bemutatása, hogy a bazaltvulkáni területeken a sziklás tengerpartok anyagát felépítő, különböző környezeti feltételek között és különböző módon képződött – ezáltal eltérő közetszerkezetű – bazaltlávákban és piroklasztitokban hogyan alakítanak ki barlangokat a tengeri abráziós folyamatok, és hogy a közetszerkezeti viszonyoktól függően milyen formakincs jön létre, milyen barlangtípusok alakulnak ki. E téma jelentőségét növeli az a tény, hogy Földünk legnagyobb méretű abráziós barlangjai is e köztípusokban képződnek (BUNNELL, D. 2004).

A szerző a terepi megfigyeléseit és felméréseit Izlandon és a Koreai-félszigettől délre fekvő Jeju (Csedzsü)-szigeten végezte.

<sup>1</sup> Főiskolai adjunktus, Nyugat-magyarországi Egyetem, Savaria Egyetemi Központ, Földrajz- és Környezettudományi Intézet, Természetföldrajz Tanszék, 9700 Szombathely, Károli Gáspár tér 4. (gpetar@ttmk.nyme.hu)

## Az abráziós barlangok kialakulásának általános feltételei

A sziklás tengerpartokat pusztító folyamatok – együttes hatásukat a továbbiakban nevezzük „*tengeri erózió*nak” – közül a tengerek és óceánok *hullámozása* a legfontosabb. Az abráziós barlangok növekedése különösen viharok, vihardagályok idején gyors, amikor a nagy energiájú viharhullámok viszonylag rövid idő alatt nagy mennyiségű anyagot bontanak ki a partfalakból (MOORE, D. G. 1954). A Skócia sziklás partjainak csapódó, Mendelssohn, a híres zeneszerzőt a „Hebridák” című nyitány megírására ihlető hullámok KUENEN, H. (1950) dinamométeres mérései szerint  $30 \text{ t/m}^2$  lökészerű nyomóerőt is kifejtenek a sziklafalakra. A sziklafalaknak csapódó hullámok a kőzetrepedésekbe, hasadékokba és a törmelékes kőzetek pórusaiba lökészerűen levegőt préselnek, ill. ezzel egyidejűleg a már korábban bent levőt is összesűrítik. A hirtelen nagy nyomással bepréselt levegő mintegy ékként feszíti szét a repedések közti kőzetanyagot. A visszahúzó hullám szívó hatására azonban a repedésekbe préselt levegő robbanásszerűen újra kiterjed és a hullám–levegő–ékfeszítés hatására is fellazított kőzetanyagot mintegy lerobbantja a sziklafalról (KUENEN, H. 1950, MOORE, D. G. 1954, RAMPINO, M. R. 1982). Az ily módon vízbe omlasztott kőzetanyagot a hullámok görgetve és lebegtetve továbbmozgatják, melynek során a hullámok által újra és újra a falnak lökött nagyobb – akár 50–70 cm átmérőjű – sziklatömbök és görgetegek mintegy faltörő kosként vesznek részt a tenger pusztító munkájában. A sorozatosan a sziklás partoknak csapódó hullámok és kőzetek szüntelenül meg-megrázkódtatják a parti kőzeteket, melynek következtében azok repedésekkel elválasztott tömbjeit szétrázzák. Az így kialakult hasadékokba szorult kisebb-nagyobb szikladarabok egyre lejjebb és lejjebb csúsznak, ékként feszítve szét az ennél fogva bezáródni képtelen hasadékokat. Így az egyre jobban szétnyílik, míg nem a leválasztott, tenger felőli kötőm leomlik (CHOLNOKY J. 1930).

Az adott tengerreszen uralkodó *sélirány* is lényeges, amely meghatározza a sziklafalat ostromló hullámok irányát. A barlangképződés szempontjából ennél még fontosabb a nagyobb hullámokat korbácsoló viharos szelek iránya, amely annál kedvezőbb, minél közelebb van a sziklás partok irányára mért merőlegeshez.

Fontos eróziós tényező még a sziklás tengerpartok környezetében a *tengerjárás* és annak mértéke is. Apály idején a hullámok gyakran nem, vagy csak részben érik el a sziklafalakat és a fejlődő abráziós barlangot. Dagály idején viszont előfordul, hogy a formálódó üreg teljesen a víz alá kerül. Ideális esetben a vihar és a nagyobb hullámok pont akkor alakulnak ki, amikor a fejlődő barlang addig van feltöltve vízzel, hogy a benyomuló hullámok képesek egészen a mennyezetéig kitölteni a barlangot. A hullámok által a barlangba beszorított levegő ilyenkor nem, vagy alig tud kisurranni a víz és a barlang mennyezete között, így a lehető legnagyobb mértékben összepréselődik és nagy erővel nyomul be a kőzetrepedésekbe. Ekkor működik a leghatásosabban az előbbieken ismertetett hullám–levegő–ékfeszítés és vákuumhatás, amit a terepi megfigyelő számára az egyre öblösödő üregből kihallatszó, a levegőt beszorító hullámok által keltett, gyakran ágyúüdörejhez hasonló puffanásokkal tarkított robaj jelez.

A sziklás tengerpart előtti tengeralfazat mélysége, alakja, lejtésviszonyai, anyaga (homok, szikla, vagy görgeteg) meghatározza a *hullámtörés*, ill. a *hullámtárukás* helyét. Amennyiben a partfal előtt mély víz van, úgy a körpályán mozgó hullámok közvetlenül a sziklafal felszínén törnek meg, aminek következtében a hullámok mozgási energiájának nagy része lökészerűen közvetlenül a sziklafalnak adódik át (feltéve, hogy a hullám nem a falról visszaáramló víztömeggel szembetalálkozva törik meg). Amikor a sziklafal előterében laposabb akkumulációs part, vagy sekélyebb vízzel borított abráziós terasz

terül el, úgy az ott zajló hullámmorajlás következtében a hullámok eredeti mozgási energiája jóval nagyobb veszteségeket szenved, amíg a sziklafalakhoz ér. Ezeken a területeken a sziklafalak hatásosabb abráziós pusztítása időszakos, mégpedig lehet periodikus (csak dagály idején) vagy epizodikus (csak viharok, illetve vihardagályok idején), de egy idő után le is állhat (az akkumulációs part, vagy az abráziós terasz további szélesedésével).

A *tengeráramlások* irányának a sziklafalakkal bezárt szöge és sebessége igen lényeges a barlangképződés szempontjából. Az áramlásnak ugyanis a partvonallal párhuzamos irányúnak és elég erősnek kell lennie ahhoz, hogy a parti sziklafalokról letarolt és aprózódott, lebegtetett törmelékanyagot – ami különben a sziklafalak előterében lerakódva akadályozná a további hatásos abráziót – elszállítsa.

A sziklás tengerpartokon a „*sóerózió*” is jelentős. A partnak csapódó és szétfröccsenő hullámok által a sziklafalakra jutott tengervíztől váltakozóan nedves és száraz helyeken a repedésekbe szívárgott sós víz sótartalma a víz kiszáradásakor kicsapódik. Az így kiváló sókristályok, amelyek a levegő nedvességtartalmát is magukba szívják, szétfeszítik a repedések falait. A kőzetek repedései egyre tágulnak, a rések mind mélyebbre hatolnak a sziklák belsejébe, ahová ezáltal újabb vízmennyiség szívárog, majd annak sótartalma is kicsapódik, tovább feszítve és aprózva a kőzetet, miközben mindez már egyre beljebb és beljebb játszódik le (RAMPINO, M. R. 1982). A vizsgálatok szerint (RAMPINO, M. R. – WELLMANN, H. W. – WILSON, A. T. 1965) sós tengervízben a bazalt 3–14-szer gyorsabban aprózódik és mállik, mint édesvízben. Hasonló a *fagyaprózódás* hatása is: a repedésekbe szívárgó és ott megfagyó, felengedő, majd újra megfagyó víz szintén tovább tágítja a repedéseket, illetve kisebb-nagyobb kőomlásokat is okoz. Összességében a sóerózió és a fagyaprózódás nem kötődnek közvetlenül a tengeri abrázióhoz, mértékük erősen függ az éghajlati viszonyoktól, mégis fontos szerepük van például az időszakosan vagy epizodikusan aktív sziklás tengerpartok pusztulásában, mivel fel lazítják a sziklafalak anyagát és így előkészítve fokozzák a tenger eróziós munkájának a hatásfokát.

### **Az abráziós barlangok kialakulásának közhetszerkezeti feltételei**

A tenger pusztító munkájának közvetlen hatása alatt álló sziklás parti kőzetek azon részei kedvezők a barlangképződés szempontjából, amelyek a környezetükhöz képest jó állékonyaságúak (lassan hátrálnak), viszont az erózióknak kevésbé ellenálló (gyorsabban hátráló) kőzetrészeket is tartalmaznak (MOORE, D. G. 1954, DAVIES, P. – WILLIAMS, A. T. 1985, SUNAMURA, T. 1992).

A tengeri erózióval szembeni ellenálló képesség, az *állékonyosság* a kőzet anyagától és szerkezetétől függ. Bizonyos közhetszerkezetű részek gyorsabban pusztulnak, és ha az ilyen tulajdonságú kőzetrészeket állékonyabb kőzetek vesznek körül, úgy bennük a tengeri abráziós folyamatok koncentráltan nagyobb hatásfokúak, és a fentiekben ismertetett eróziós tényezők megfelelő együttállása esetén megindul az abráziós barlang képződése. Az eltérő állékonyaságbeli különbségnek több oka is lehet, így pl. a törések, repedések, réteglapok dőlésszögeinek és irányainak különbözősége, a kőzet eltérő cementáltsági foka vagy anyagi különbsége (MOORE, D. G. 1954, GUILCHER, A. 1958, ZENKOVICH, V. P. 1967, SUNAMURA, T. 1992, BUNNELL, D. 2004) stb.; attól függően, hogy mi ez az ok, más és más lesz a kialakuló barlang formakincse.

Bazaltlávákban és törmelékes bazaltokban különösen jól megfigyelhető abráziós barlangok közhetszerkezetétől függő változatos formálódása és formakincse. Az azonos anya-

gi felépítésű bazaltlávák ugyanis eltérő szerkezetűek lesznek attól függően, hogy adott időegység alatt mekkora tömegben milyen hőmérsékletű, nyomású és halmazállapotú közegbe (pl. levegőbe vagy vízbe) jutnak. Az eltérő köztetszerkezet tehát egy adott időben jellemző, akár kis helyen is eltérő kiömlési, illetve kitörési környezetre utalhat, így az abráziós barlangok tanulmányozásakor az adott barlangot befoglaló kőzetek képződésének idején egykor uralkodó ősföldrajzi viszonyokra is hasznos információkat kapunk.

### **Abráziós barlangok kialakulása különböző szerkezetű bazaltvulkáni kőzeteken**

Az alábbiakban különböző szerkezetű bazaltvulkáni kőzetekből álló sziklás partvonalakon keletkezett abráziós barlangok kialakulási és formai sajátosságairól lesz szó. Az egyes típusok taglalásának első részében a különféle bazaltos köztetszerkezetek képződése kerül bemutatásra, majd azon köztetszerkezeti jellegzetességek kiemelése, amelyek az adott morfogenezisű abráziós barlangtípus kialakulása szempontjából fontosak, ezt követően pedig a barlangtípus kialakulása, fejlődése módjának és létrejövő formakincsének az ismertetésére kerül sor.

#### *Abráziós barlangok formálódása oszlopok elválású bazaltlávában*

A felszínre ömlő és gyakran több m-esre duzzadó lávafolyások, vagy a nagyobb vastagságú szubvulkáni bazaltos kőzettestek zavartalan körülmények esetén hosszabb idő alatt kihűlésük során egymással párhuzamos, illetve enyhén ívesen hajló repedésekkel határolt *oszlopokra* tagolódnak. Az oszlopok kialakulásakor BUDKEWITSCH, P. és ROBIN, P. Y. (1994) szerint a repedések mindig a legnagyobb hőmérséklet-különbségű kőzetzónák között, a legkisebb hőmérsékletű, még nem megrepedt résztől a legforróbb rész irányába indulnak meg. A repedések sorozata szakaszosan zajlik, és egy-egy berepedés mindig a mindenkor plasztikus zónáig hatol. E folyamat során a tömör bazaltban – a valóságban persze nem létező, vagy csak azt megközelítő – ideális esetben egyenlő vastagságú szabályos hatszöges oszlopok, oszlopsorok, úgynevezett *kolonnádok* képződnek. Az oszlopsorok közötti szabálytalan, sokféle irányban repedezett zóna az *entablatura*. Az egy központból sugárirányban szétágazó hűlési repedések *rozettát*, az egy vonaltól két irányban elhajló oszlopsorok *sevron* szerkezetet formáznak (SPRY, A. 1962). Az abráziós barlangok kialakulása szempontjából különösen kedvezők azok a berepedezett kőzetzónák, amelyek függőleges vagy közel függőleges repedésekkel határolt kolonnádokat alkotnak, ill. ahol ezek felett entablatura helyezkedik el.

A tenger hullámai – egyes helyeken görgetegeket, tömböket is nekicsapva – a sziklapartnak ütődnek, melynek következtében a repedezett falak megrázkódnak, a bennük levő közel függőleges repedések egyre tágulnak és a bazaltoszlopok egyre inkább szétválasztódnak egymástól, melyhez hozzáadódik a már ismertetett hullám-levegő-ékfeszítő hatás is. Egy idő után az oszlopok eltörnek és akár több m<sup>3</sup>-es darabjaik is belezuhanhatnak vagy beledőlnek a tengerbe, különösen viharok idején. A nagyméretű oszlopok kihullásával a barlang gyorsan növekszik. A bazaltoszlopok azon részei törnek el könnyebben, ahol az oszlop hossz tengelyére merőleges repedések, vagy ilyen repedéseket előidéző kristályelrendeződések találhatók. E repedések irányát ugyanis a hűlés során a szakaszos összehúzódás eredményeként a nyírófeszültséggel párhuzamosan elrendeződött hosszabb kristályok előalakíthatják (preformálhatják), így később azok a barlang képződésekor a kettétörő és kihulló oszlopok elválási felületei lesznek. Így alakultak ki pl.

a Szent György-hegy bazaltoszlopainak „pénzoszlopszerű” elválásai is (KARÁTSÓN D. 1998). E repedéseket a fagyaprózódás vagy sóerózió is létrehozhatja.

A repedésekkel határolt közettömbök kihullása a felfelé széttartó repedésekkel elválasztott oszlopokból álló kolonnádzónában megállhat. Ezeken a helyeken az egymással közel párhuzamos repedések több m hosszan is benyúlhatnak a falakba. A barlang felharapódzása legnagyobb eséllyel azonban az entablaturában áll meg. Itt ugyanis a jóval szabálytalanabb és sűrűbb repedéshálózatú lávában az egymásba kapaszkodó közetrészek következtében nagyobb eséllyel alakulnak ki statikailag jobb megtartású – döntően felfelé széttartó repedezetségű – részek. Így az entablaturában alakul ki az abráziós barlang gyakran íves boltozata, míg közel függőleges oldalfalait a feltárukt oszlopok adják.

Az izlandi Reykjanes-félszigeten, Arnarstapi sziklás partján a folyamatosan aktív Músargjá nevű barlangban az abrázió hatására a bazalt kihullása a legnagyobb tömegben egy sevront formázó repedéshálózatú, ívesen lefelé hajló oszlopsorban zajlik (1. kép). A barlang a bejáratától 18 m-re a sevrón-szerkezet azon zónájában, ahol a repedések irányai lefelé széttartók, leomlott. Ezt követően, vagy talán ezzel egyidejűleg a leszakadt rész felett húzódó közettömeg egészen felszínig felharapódzva szintén leomlott, aminek következtében a barlang egy 7,5 m átmérőjű beszakadással felnyílt. A barlangot magában foglaló kőzet környezete már jobb megtartású, ugyanis ott a repedésirányok már olyanok, hogy a köztük levő tömbök jobban egymásnak feszülnek, bár a hullámok által keltett rázkódás következtében további kihullásuk várható még.



1. kép A Músargjá barlang Arnarstapiban (Izland, Reykjanes-félsziget). Hossza 21 m, magassága a bejáratnál 15 m.

A kép jobb szélén fehér nyíl mutatja a dagályszintet.

Photo 1 The Músargjá Cave in Arnarstapi (Iceland, Reykjanes Peninsula). It is 21 m long, and its height at the entrance is 15 m. The white arrow shows the level of the high tide.

Szintén Arnarstapiban található egy a szélességéhez képest magas, állandóan aktív abráziós barlang. Kialakulásakor döntően a függőleges oszlopos részek hullottak ki. Az oszlopok feletti repedések egy szinklináliszerű lefelé hajlás miatt lefelé széttartók, így az üreg tovább harapódzott felfelé. A barlang oldalfalai körül szabálytalanabb a bezáró közet repedéshálózata. Mivel függőleges oszlopok dőltek ki, ezért a barlang oldalfalai is közel függőlegesek.

Az Arnarstapi és Hellnar között húzódó sziklás tengerparton a fentiekén kívül még számos abráziós barlang figyelhető meg. Ezek közül az egyik a tömör bazalt rozetta szerkezetű repedéshálózatának belső, legnagyobb mértékben töredezett részének kihordódásával keletkezett. A barlang így közel kör keresztmetszetű.

Távolabb, Izland déli kiszögellésében, Reynisfjall 160 m magas sziklafalának tövében közel 50 m széles homokos-kavicsos parttal az óceántól elválasztva található a Hálsanefshellir nevű abráziós barlang. A barlangot befoglaló tömör bazaltláva repedezettségének irányultsága éppen a barlang területén vált át szabályos oszlopos elválásúból szabálytalanba. A szabályos oszlopos elválású zóna repedései legyezőszerűen, lefelé sugárirányban széttartók, amely megmagyarázza a köztük levő oszlopok kihullásának okát. Az oszlopos elválású közetrészeknél a barlang fala simább, egyenletesebb felületű, míg a szabálytalanul repedezett falrészletek jóval tagoltabbak, ívesek, hullámosak. A jelenleg inaktív barlang formálódásakor a benyomuló hullámok ütköztek a befelé összetartó irányú oldalfalakkal, amelyek a barlang összeszűkülő végpontja felé térítették a tengervizet, így a legnagyobb mértékű abráziós pusztítás a barlang középső részén történt. Ezért a Hálsanefshellir alaprajza lekerekített oldalú háromszöghöz hasonló.

#### *Abráziós barlangok formálódása szabálytalan repedéshálózatú bazaltlávában*

Azokon a sziklás partrészleteken, ahol a hullámok szabálytalanul repedezett hálózatú tömör bazaltfalakat ostromolnak, ott az előző példákhoz képest az abráziós barlang szabálytalanabb formájúvá alakul. A tömör, de szabálytalan elrendeződésben, szinte minden irányban egyenlő mértékben kialakult sűrű repedéshálózat a láva gyors lehűlésére, illetve a nagyobb víztartalmára utalhat (LYLE, P. 2000).

A tengeri eróziós hatásokra azok a repedésekkel övezett közetrészek rázódnak, peregnek, hullanak ki a sziklafalak repedései közül, amelyeknek nincs meg a kellő alátámasztása. A szabálytalan irányú repedések közti közetdarabok nem érnek el általában akkora méreteket, mint a szabályos irányban repedezett bazaltnál, és e szögletes közetdarabok nem is nyúlnak be olyan mélyen falakba. Ebből adódóan kisebb a belső alátámasztásuk, mint például egy hosszabb bazaltoszlopnak.

Az izlandi Hraunsvík-öbölben, a Reykjanes-félsziget déli részén található időszakosan aktív abráziós barlang e barlangtípus példájának tekinthető. A barlang szabálytalanul sűrűn repedezett közetkörnyezetének a barlangfalak irányába lefelé széttartó repedésirányai kedveznek a köztük levő közetdarabok kihullásának. Mivel a repedésirányok kis területen is erősen változó mértékűek, ezért a kipergés általi barlangnövekedés sebessége és annak irányai jóval esetlegesebbek, véletlenszerűbbek, mint a szabályosan repedezett láva esetében, melynek következtében e barlangok formája is szabálytalan lesz.

Egy másik, Izland déli részén, Dyrhólaey sziklafalaiban formálódó aktív abráziós barlang kialakulásának kezdeti szakaszában a sűrűn repedezett zónában viszonylag gyorsan, minden irányban (oldalra, befelé és felfelé) növekedett. A felszínig felharapódzva egy 10 m átmérőjű területen beszakadással felnyílt, melynek következtében egy abráziós ív képződött. A barlang jelenleg csak egy irányban növekszik. Az aktív üreg (ahová

rendszeresen benyomulnak a hullámok) környezetében tömör, alig repedezett a bazalt-láva és a meglevő repedések irányai is felfelé széttartók, ezért a barlang jelenleg csak lassabban tud továbbfejlődni.

A szabálytalan repedéshálózatú tömör bazaltlávában egyes helyeken a korábbi hűléses eredetű repedésrendszert átmetsző újabb (vulkano)tektonikus repedés alakulhat ki. Amennyiben az új repedés iránya a hullámozás irányával közel párhuzamos, úgy e mentén az abrázió hatékonyabban működik, és hosszú, a partra merőleges irányú barlangot hozhat létre az új repedés környezetének kihordásával.

### *Abráziós barlangok formálódása a bazaltban korábban kialakult üregek feltárulásával*

A bazaltvulkáni kőzetekből álló sziklás tengerpartok abráziós eredetű hátrálásakor a kőzetben korábban – elvileg bármely módon – már kialakult üregek és barlangok tárulhatnak fel. Ilyen üregek többféle eredetűek lehetnek. A bazaltlávák megszilárdulásával egyidejűleg (szingenetikusan) létrejöhetnek pl. *gázhólyagbarlangok*, amelyek eredete abban keresendő, hogy a láva gáztartalma nem tud kiszabadulni, egy zárt üregben felhalmozódik; *lávaalagút-* vagy *lávacsőbarlangok*, amelyek keletkezésének magyarázata abban rejlik, hogy a felszínen bekérgeződő és lassan kihűlő láva alól a még higan folyó izzó láva „kifolyik”; *tumuluszbarlangok*, amelyek létrejöttekor az izzó, folyós láva felgyülemlik és felboltozza a felette folyamatosan hűlő és vastagodó kérget, majd ezután egy üreges kéreg-kupolát maga után hagyva lecsapolódik; valamint *faöntőforma-üregek* vagy *falenymatiüregek*, amelyek a láva vagy piroklasztikum által körbezárt és elszennedett egykori fák helyén alakulnak ki (ESZTERHÁS I. 1997, GADÁNYI P. 2007, 2008, 2009).

Az izlandi Heimaey szigeten (Vestmann-szigetek) az Eldfell vulkán 1973-as kitöréséből származó lávaárak elérték a tengert. Ezekben az esetekben a folyékony láva nagyrészt lávaalagutakon keresztül nyomult a víz alá (PETERSON, D. W. et al. 1994). A folyékony láva kiürülésével létrejövő lávaalagút-barlangot a tengeri abrázió később feltárta és jelenleg is tovább formálja.

Nem messze ettől a barlangtól egy 52 m magasságú, egymásra települt pahoe-hoe-lávaárakból felépült sziklafal tetején egy tumuluszbarlang található, amely a sziklafállal párhuzamos repedés mentén történt omlással feltárult (GADÁNYI P. 2008). A kupolaformájú barlang így egy tengerre nyíló ablakot kapott. Ebben a magasságban természetesen ezt a barlangot az óceán hullámai közvetlenül nem, hanem csak közvetve, a partfal alámélyítésével és további partleszakadások előidézésével formálhatják tovább.

A Húsvét-szigetről BALÁZS D. (1985) írta le a szintén hasonló módon feltárult, Y-szerűen kettévágó Ana Kakena, illetve a hullámverés által feltárt és aktívan továbbformálódó Ana Toka Rahi Rahi lávaalagút-barlangokat, míg KEMPE, S. et al. (1993) szerint Hawaii szigetén a 206 m hosszú Refuge-barlang hat felnyílása közül az egyik egy abráziós sziklafalon ott nyílik a tengerre, ahol az abráziós alámélyítés hatására bekövetkezett kőzetomlás kettévágta a barlangot.

### *Abráziós barlangok formálódása lávadeltában*

A pahoe-hoe lávafolyások a tengerbe ömölve úgynevezett *lavadeltákat* építhetnek fel, melyekről MATTOX, T. N. – MANGAN, M. T. (1997) és SCHMIDT, R. – SCHMINCKE, H. U. (2000) írnak részletesebben. A lávadelták kialakulásakor a pahoe-hoe bazaltlávák egy adott időben a lávadelta különböző területein hol kevesebb, hol nagyobb mennyiségű

tengervízzel találkoznak. A lávadelta területén ezért a vízzel nem, vagy csak kismértékben érintkező bazaltlávák tömör rétegei és a vizes környezetben összetöredezett, lazább szerkezetű, üveges szövetű hidroklasztitos lávárétegek egymás mellett rakódtak le, azonban az idő múlásával a lávadelta egy adott területén ezek egymással váltakozva is felhalmozódhatnak.

Az izlandi Dyrhólaey 25 m magas sziklafala tövében vizsgált abrázíós barlang egy olyan lávadelta-rétegsorba mélyült, amelynek fő tömege két eltérő tulajdonságú – egy tömörebb, valamint egy lazább szerkezetű, hidroklasztitos – bazaltlávareteg váltakozásával épült fel, beborítva később rátelepült tömör lávárétegekkel. Ebben a rétegsorban a befelé kiöblösödő abrázíós barlang kialakulását több közettani előfeltétel együttes megléte tette lehetővé. Egyrészt a hűlési repedésekkel átjárt tömör, kis dőlésszögű lávárétegek elég vékonyak ahhoz, hogy abrázíós hatásra felszakadjanak. E lávárétegek az aktív abrázíós barlangba nyomuló tengervíz nyomóerejének, illetve a lávárétegek hasadékaiba bepréselt és a benyomult víz visszahúzódásával robbanásszerűen távozó levegő „ékfeszítő-robbantó” erejének együttes hatására alulról törtek fel. Másrészt a tömör lávárétegek közé települt vastagabb, de lazább szerkezetű, töredezettebb (hidroklasztitos) lávárétegekben a barlang gyorsabban, hatékonyabban tájulhatott. Harmadsorban a lávadelta tömör lávárétegei az abrázíós partfaltól befelé haladva kivékonyodnak, míg a lazább lávárétegek kivistagodnak, ezért a benyomuló tengervíz és a bepréselődő levegő a sziklafaltól távolabb, a váltakozó rétegsor belső részeiben eredményesebben tágította a barlangot, illetve a tömör lávárétegeket a barlang belsejében alulról hatékonyabban szakította fel. Ennek következtében a barlang befelé kiöblösödik. Ehhez hozzá kell még tenni, hogy a barlang mennyezetének stabilitását az alulról fel nem szakított és egyben a mennyezetet alkotó lávárétegek adják, míg az oldalfalak stabilitása az a már felszakított lávamennyezet-rétegek oldalfalakban maradt és helyenként párkányokká preparálódott részeinek köszönhető, amelyek mint „merevítő vázak” megakadályozzák az oldalfalak beomlását.

*Abrázíós barlangok formálódása bazaltvulkáni agglomerátum,  
vagy lazább szerkezetű (aa)  
láva tömör bazalt közül való kihordódásával*

A nagy területekre rövid idő alatt nagy mennyiségben kiömlő, higan folyós pahoehoe típusú bazaltlávák gyakran beborítanak, illetve magukba zárnak lazább szerkezetű, az abrázíónak kevésbé ellenálló bazaltvulkáni kitöréstermékeket. Ilyenek lehetnek például aa típusú lávafolyások, vagy kevésbé összecementált vulkáni agglomerátumok, de egyéb, nem vulkáni eredetű lazább közettörmelékek is. Az erózióknak kevésbé ellenálló lazább szerkezetű anyagok és a jóval ellenállóbb fedő láva között az állékonyságbeli különbség igen nagy lehet, ami – amennyiben ez az abrázíós sziklafal hátrálásával feltáruul – ideális körülményeket teremt az abrázíós barlangok kialakulásához.

A tömör lávába zárt törmelék, vagy az aa láva gyakran teljes mértékben kihordódik a tengeri erózió hatására. Az ilyenkor kialakuló abrázíós barlang formája – az eddigi példáktól eltérően – nem a bezáró lávatömeg repedésirányaitól, hanem a láva által körbefolyt laza törmelék eredeti alakzatától függ, a barlang alakja lényegében annak mintegy negatív lenyomatát képezi (2-3. képek). Ebből következően az így kialakult abrázíós barlangok falait az abrázíóval kihordott lazább anyag és az azt körbefolyó láva határfelülete adja. Amennyiben a kihordódott anyag rétegszerűen települt, akkor a keletkezett barlang formája lapos, gyakran téglalap keresztmetszetű lesz.



2. kép Tömör bazaltlávába ágyazódott vulkáni agglomerátum kihordódásával keletkezett barlang a dél-koreai Jeju (Csedzsu)-sziget északi részén. Magassága a bejáratnál 8,2 m, hossza 24 m.

Photo 2 Sea cave evolved by the excavation of the embedded volcanic agglomerate from thick and compact basalt lava in Jeju Island (South Korea). Its height at the entrance is 8.2 m, and the length of the cave is 24 m.



3. kép A 2. képen látható barlang a fokozatosan szűkülő végpontjából a bejárata felé fotózva.

A falakon a tömör lávához forradt agglomerátum látható.

Photo 3 The cave can be seen in Photo 2 from its gradually narrowed ending passage. Note the pieces of the agglomerate on the wall, which welded to the surrounded host compact basalt lava.

A tengerbe (vagy például Izlandon jég alatti vulkánkitörés esetén jég belseji olvadákvíz-tóba) nyomuló bazaltlávák megfelelő nagyságú víznyomás esetén kerekded párnaláva formájában halmozódnak fel. A benyomuló lávát a víznyomás minden oldalról egyenlő mértékben éri, ezért a hirtelen hűlő láva a nyomásirányokra merőleges, elméletileg tehát gömbölyű formát venne fel, azonban ezt befolyásolja a kinyomuló és gyorsan bekérgeződő *lávalebenyek* belső lávanyomása, ill. annak irányai is. Ezért a lebenyek kissé megnyúltak, kanyargósak, illetve egymásra rakódva laposabb párnaformájúak lesznek. A párnák külső oldala a vízzel való érintkezés és az ebből adódó hirtelen lehűlés miatt bekérgeződve kemény, üveges szövetű lesz, amely az aprózódásnak jobban ellenáll. A párnalebenyek egymásra rakódott tömegei az úgynevezett *rügyezéssel* (HARGREAVES, R. – AYRES, L. D. 1979) képződnek. E folyamat során a párnák belsejében felgyülemlett, még folyékony láva túlnyomásával feltöri a bekérgeződött szilárd külső héjat, és az így képződött felhasadáson kinyomulva mintegy „rügyként” kifakad a „szülő” párna oldalán, majd onnan tovább növekedve létrejön az újabb párnalebény, amelyből ismét újabb lávarügy fakadhat. A lávapárnák belső része központjukból kiindulva sugarasan, ill. a rájuk merőleges irányokban – a párna peremével párhuzamosan – hűlési elválási felületek mentén repedezett.

Az izlandi Reykjanes-félszigeten, a Valahnúkar-hegy abrázíósan pusztuló sziklás tengerpartján feltártult párnalávaösszletben egy repedés mentén növekedésnek indult, vihardagályok idején időszakosan aktív abrázíós barlang található (4. kép). Az itt végzett



4. kép Párnalávaösszletben kialakult abrázíós barlang bejárata Valahnúkar (Izland, Reykjanes-félsziget) parti szikláiban.

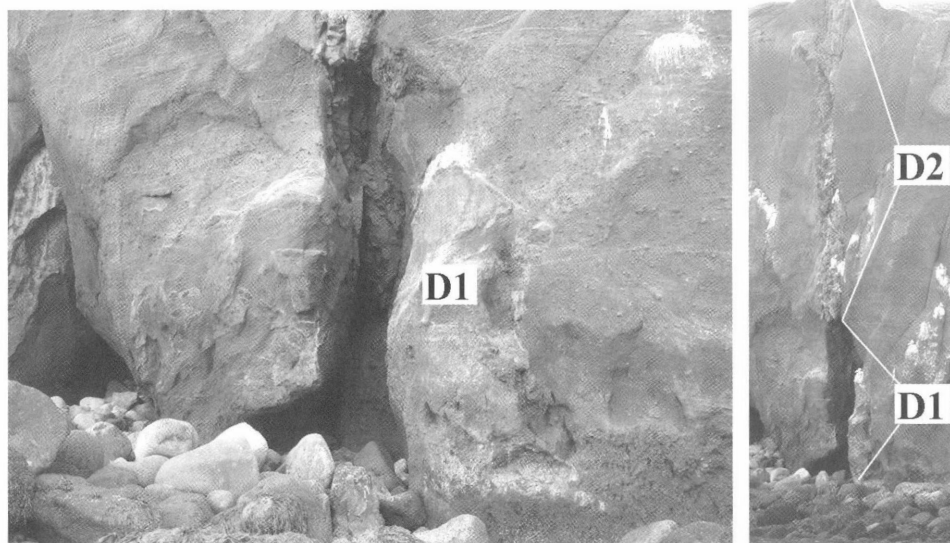
Az abrázíós görgetegek átmérője 20–60 cm. A barlang magassága a bejáratnál 4,2 m, hossza 12 m.

Photo 4 Sea cave evolved in pillow lava in Valahnúkar Hill (Iceland, Reykjanes Peninsula). The abrasion boulders are 20–60 cm in diameter. The height of the cave at the entrance is 4.2 m, its length is 12 m.

megfigyelések alapján a párnaláváknak a fentiekben ismertetett jellegzetes közhé-  
kezete meghatározó lehet a bennük kialakuló abrúziós barlangok formálódása szem-  
pontjából. Az üveges szerkezetű párnalávahéjak a párnalávaösszlet legjobb megtartású  
részei. A tengeri erúzió hatására e kerek, íves, szilárd gömbhéjak közül a párnalávalebe-  
nyek belső, sugár irányú elválási felületei mentén pereg ki a bazaltanyag. Az üveges  
részeknek ezért nagy szerepük van az abrúziós barlang falának stabilitásában, mivel  
mintegy merevítő, omlástól védő hálóként fogják össze a köztük levő repedezett, laza  
anyagot. Így adott erúziós körülmények között az üveges külső párnalávahéjak lapjainak  
az irányultsága, valamint a kipergő, töredezett párnalávabelsők repedésirányai határo-  
zák meg a kialakuló barlang alakját.

### *Abrúziós barlangok formálódása bazaltládákban*

Az izlandi Reykjanes-félszigeten, a Hraunsvík-öböl sziklás partján található abrú-  
ziós barlang egy függőleges *bazaltládák* hűlési repedések által határolt tömör bazalttömb-  
jeinek abrúziós kihordódásával keletkezett (5. kép). A barlang a K–DK-i irányból érkező  
viharhullámok által, ill. vihardagályok idején időszakosan aktív.



5. kép Bazaltládák kihordódásával kialakult 7,5 m magas, 9,6 m hosszú, befelé fokozatosan szűkülő  
abrúziós barlang (D1) a Hraunsvík-öbölben (Izland, Reykjanes-félsziget).

D2: a felszínig hatoló bazaltládák abrúzió által kisebb mértékben érintett része.

Photo 5 7.5 m high and 9.6 m long sea cave developed by excavation of the lower part of a revealed basaltic dyke (D1)  
in Hraunsvík Bay (Iceland, Reykjanes Peninsula),  
which narrows gradually inwards. D2: the part of the dyke less affected by the sea erosion.

Az öböl 20–100 m magas sziklás partjain megfigyelhető bazaltládák THORDARSON,  
T. – HÖSKULDSSON, A. (2006) szerint egy a tengerből kiemelkedő vulkanikus sziget épü-  
lésekor a vizes környezetben felhalmozódott hidrovolkáni bazaltos hidroklasztitösszlet  
meghasadásakor keletkeztek. A közel függőleges hasadékokon keresztül feláramló ba-  
zaltos magma (közvetlenül a felszínre jutás előtt „*piromagma*”) táplálta az ekkor már a  
tenger szintje fölött épülő vulkán felszíni lávafolyásait. A kitörés végeztével a felszínhez  
közeli piromagma megrekedt, majd kihűlve megszilárdult a hasadékokban.

Az 5. képen látható bazaldájk hülésekor az összehúzódás következtében a hidroklasztitban kialakult hasadék falaival párhuzamosan és arra merőlegesen is kialakultak repedések, melynek következtében a hasadékot kitöltő bazaltot a hülési hasadékok egymásra merőlegesen, hálószerűen járják át. A falakkal párhuzamos repedéseket a piromagma feláramlásakor a hasadék falaival párhuzamosan rendeződő, majd a bazaltdájk teljes anyagának kikristályosodásakor ezen irányokban beágyazódott kristályszemcsék preformálták. A magmafeláramlás, valamint a hasadékfalak irányára merőleges repedések a hidegebb hidroklasztitfalak és a bazalt érintkezési felületétől a dájk melegebb belső zónája felé kiindulóan – tehát a legnagyobb hőmérsékletkülönbség irányában – alakultak ki.

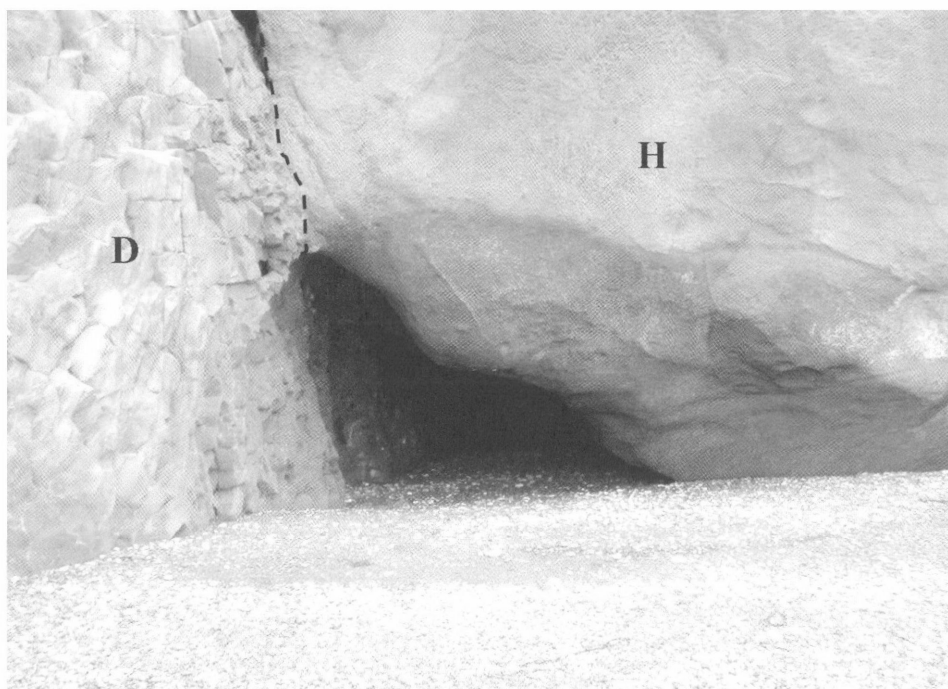
A barlang kialakulásakor a feltárt bazaltdájkban az 5. képen D1 jelzéssel ellátott alsó részét a hullámozás által a sziklafalaknak csapódó 20–70 cm átmérőjű abráziós sziklagörgetegek zúzzák, rombolják, bontják. Az így létrejövő alsó anyaghány felett a bazaltdájk felsőbb részén a hülési repedésekkel elválasztott kőzetdarabok is kirázódnak és a hasadékfalakra merőleges repedések mentén elválva behullnak a tengerbe. Így a barlang mennyezete a bazaltdájkban felfelé harapódzik. A barlangfejlődés korábbi szakaszában a még alacsonyabban elhelyezkedő mennyezetet az alulról felcsapódó és levegőt a repedésekbe préselő hullámok is bontották. Jelenleg a barlang csak viharok, illetve vihardagályok idején növekedik tovább, ilyenkor a bazaltdájk hülési repedésekkel átjárt részeiből nagy (mintegy 8x30–12x50 cm-es) darabok hullanak ki. E folyamat következtében a keményebb anyagból álló tömör, de hülési repedésekkel elválasztott tömbökből álló bazaltdájk gyorsabban hordódik ki, mint a környezetét alkotó lazább szerkezetű hidrovulkáni tufa.

Az 5. képen az is jól látszik, hogy a hülési repedésekkel átjárt bazaltdájkban csak az alsó része (D1) pusztul gyorsabban, mint a környezetét képező kevésbé repedezett, de lazább szerkezetű hidroklasztit. A fentiekben részletezett tengeri eróziós folyamatok ugyanis a feltárt bazaltdájk tengerszinthez közeli, alsó zónájában hatnak a sziklafalakra, amelyhez még hozzájárul a szétfröccsenő hullámokból és a szél által is a sziklafalakra fújt tengervíz által előidézett fokozottabb fagyaprózódás és sóerózió is. A partfal felsőbb zónájában (D2), ahol az abráziós folyamatok már nincsenek közvetlen hatással, a bazaltdájk anyaga kiemelkedik a környezetéből, ugyanis ott már a sziklafalakon lefolyó csapadékvizek és az általuk fokozott fagyaprózódással szemben a hasadékban megrekedt tömör bazalt bizonyul tartósabbnak.

#### *Abráziós barlangok formálódása bazaltdájk és bazalttufa határán*

Az izlandi Dyrhólaey hidrovulkáni tufaösszletében kialakult bazaltdájk vastagabb, kevésbé repedezett, és a környezeténél a tengeri eróziós hatásoknak nagyobb mértékben ellenáll. Itt a tengerparti sziklafalat egy kisebb szemcsenagyságú homokos-kavicsos akkumulációs terasz választja el a tengertől, így a partra kifutó hullámok eróziós ereje a sziklafalakhoz érve nagymértékben szétforgácsolódik. A dájk parti környezetében nem alakultak ki nagyobb sziklák és görgetegek, melynek következtében – a Hraunsvík-öböl menti dájkból kialakult abráziós barlanggal ellentétben – ezt a bazaltdájkkitöltést a hullámok által a falnak csapódó nagyobb tömör bazaltból álló sziklatömbök és görgetegek nem zúzzák és törik fel, nem bontják meg alulról. Így a barlang képződése a leggyengébb zónában, a dájk és a hidrovulkáni tufa között indult meg (6. kép).

A befelé fokozatosan szűkülő barlang tágulása a tufában zajlik, miközben a bazaltdájk a viszonylag gyenge, a sziklagörgetegek zúzó hatásától mentes hullámerózió hatására kipreparálódik gyorsabban hátráló tufás környezetéből. A bazaltdájk és a tufa eltérő mér-



6. kép Bazaltdák (D) és hidrovolkáni tufa (H) határán (szaggatott vonal) kialakult, időszakosan aktív abrázíós barlang (Izland, Dyrhólaey)  
*Photo 6 Temporarily active sea cave (Iceland, Dyrhólaey) developed along the border (broken line) of a basaltic dyke (D) and hydrovolcanic tuff (H)*

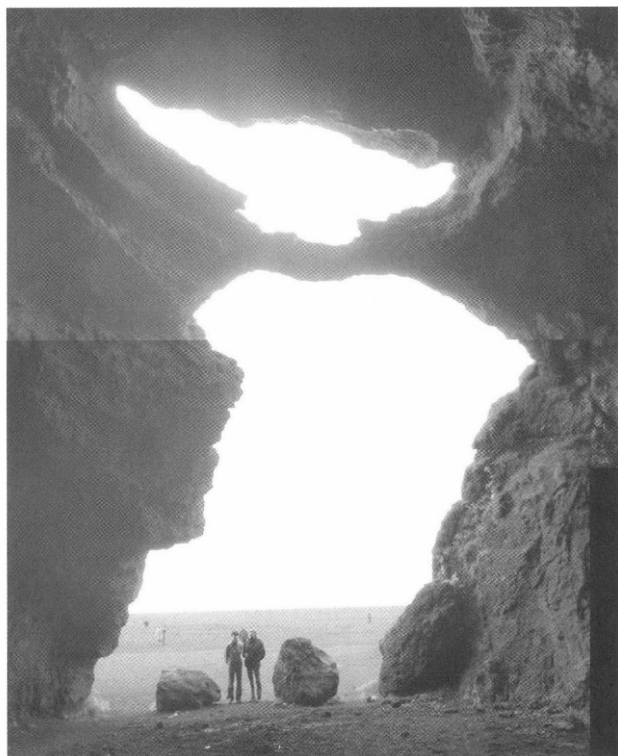
tékű állékonyságából adódóan a barlang keresztmetszete aszimmetrikus. A közel függőleges oldalfal a dák tömör bazaltjából, míg a kisebb dőlésszögű fal a gyorsabban pusztuló tufából áll. A barlangfalak felszínét a benyomuló hullámok által szállított homok és az apróbb méretű kavicsok simára csiszolják. Ez szintén a sziklatömbök és görgetegek hiányából adódó kisebb sebességű abrázíós falbontásra utal, ugyanis a falaknak csapódó zúzó görgetegek – valószínűleg a dák anyagát is megbontva – durvább sebhelyeket ejtve gyorsabban növelnék az abrázíós barlangot.

#### *Abrázíós barlangok formálódása bazalttufában*

A robbanásos vulkáni működés során lerakódott és közzé vált piroklasztitokban, illetve hidroklasztitokban kialakuló abrázíós barlangok formája adott eróziós feltételek mellett a tömör lávához hasonlóan döntően a törmelékes kőzet repedéseinek, réteglapjainak irányaitól, valamint cementáltságuk mértékétől függően alakul.

A tenger eróziójának hatékonysága nagyban függ a szemcsék közötti hézagok nagyságától és mennyiségétől (a porozitástól) is. Minél porózusabb a bazalttufa, annál gyorsabb benne az abrázíós üregképződés, ugyanis adott barlangi térfogat-növekedéshez kisebb anyagmennyiség távozása is elegendő. A gyorsabb növekedést a fel-feltáruuló pórusok biztosítják. A porózusabb partfalak vízáteresztő képessége (permeabilitása) is nagyobb, így ezeken a helyeken az abrázíós pusztítást erősítő fagyaprózódás és a sóerózió is nagyobb mértékű lesz.

A fenti kőzetszerkezeti feltételek a bazalttufákból álló sziklás partfalak anyagában kis területen is hirtelen váltakozva jelenhetnek meg, ami által a falak egyes részei a tengeri eróziós folyamatok hatására gyorsabban, míg a környező kőzetek akár nagyságrendekkel lassabban hátrálnak, lehetővé téve bennük a barlangok kialakulását (7. kép).



7. kép Hidrovulkáni tufába mélyült, 21.5 m magas abrázíós barlang az izlandi HjórlEIFshöfði egykori tengeri vulkán oldalában. Háttérben a Mýrdalssandur olvadékvízsziksága, amely a barlangot elzárta a ma már 3 km-re lévő tengertől.

*Photo 7* 21.5 m high sea cave deepened into the hydrovolcanic tuff layers of the former HjórlEIFshöfði volcanic hill (Iceland). In the background the Mýrdalssandur sandur-plain, which closed the cave from the sea (the distance is recently 3 km).

## IRODALOM

- BALÁZS D. 1985: A Húsvét-sziget barlangjai. – Karszt és Barlang I–II. pp. 33–38.
- BUDKEWITSCH, P. – ROBIN, P. Y. 1994: Modelling the evolution of columnar joints. – *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 59. pp. 219–239.
- BUNNELL, D. 2004: Littoral caves. – In: GUNN, J. (szerk.): *Encyclopaedia of caves and karst science*. Routledge, New York, 902 p.
- CHOLNOKY J. 1930: A tenger. A Föld titkai V. – Singer és Wolfner Irodalmi Intézet R.-T. Budapest, pp. 195–206.
- DAVIES, P. – WILLIAMS, A. T. 1985: Cave development in Lower Lias coastal cliffs, The Glamorgan Heritage Coast, Wales, UK. – *Proceedings of the Iceland coastal and river symposium*. Reykjavík, pp. 75–92.
- ESZTERHÁS I. 1997: Nemkarsztos kifejezések kislexikona. – Kézirat. Isztimér, 81 p.
- GADÁNYI P. 2007: Bazaltláva barlangok morfogenetikai típusai Izlandon. – *Karszt és Barlang* I–II. pp. 19–32.
- GADÁNYI P. 2008: Kéreg alatti bazaltláva barlangok. – *Karszt és Barlang* I–II. pp. 21–33.

- GADÁNYI P. 2009: Falenyomatűregek bazaltlávában. – *Karsztfejlődés* 12. Szombathely, p. 39.
- GUILCHER, A. 1958: Coastal and submarine morphology. – Methuen, London, 274 p.
- HARGREAVES, R. – AYRES, L. D. 1979: Morphology of Archean metabasalt flows, Utik Lake, Manitoba. – *Canadian Journal of Earth Sciences* 16. pp. 1452–1466.
- KARÁTSÓN D. 1998: *Vulkanológia I.* – ELTE Eötvös Kiadó, Budapest, 257 p.
- KEMPE, S. – KETZ-KEMPE, C. – HALLIDAY, W. – WERNER, M. S. 1993: The Cave of Refuge, Hakuma Horst, Kalapana, Puna District, Hawai'i. – *Pacific Studies* 16. 2. pp. 133–142.
- KUENEN, H. 1950: *Marine geology.* – John Wiley & Sons, 568 p.
- LYLE, P. 2000: The eruption environment of multi-tiered columnar basalt lava flows. – *Journal of the Geological Society* 157. pp. 715–722.
- MAITTOX, T. N. – MANGAN, M. T. 1997: Littoral hydrovolcanic explosions: a case study of lava-seawater interaction at Kilauea Volcano. – *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 75. pp. 1–17.
- MOORE, D. G. 1954: Origin and development of sea caves. – *National Speleological Society Bulletin* 16. pp. 71–76.
- PETERSON, D. W. – HOLCOMB, R. T. – TILLING, R. I. – CHRISTIANSEN, R. L. 1994: Development of lava tubes in the light of observations at Mauna Ulu, Kilauea Volcano, Hawaii. – *Bulletin of Volcanology* 56. pp. 343–360.
- RAMPINO, M. R. (1982): Weathering and erosion, mechanical. – In: SCHWARTZ, M. L. (szerk.): *The encyclopedia of beaches and coastal environments.* Hutchinson Ross Publishing Company, pp. 878–879.
- SCHMIDT, R. – SCHMINCKE, H. U. 2000: Seamounts and island building. – In: SIGURDSSON, H. (szerk.): *Encyclopedia of volcanoes.* Academic Press, New York, 1417 p.
- SPRY, A. 1962: The origin of columnar jointing, particularly in basalt flows. – *Journal of the Australian Geological Society* 8. pp. 192–216.
- SUNAMURA, T. 1992: *Geomorphology of rocky coasts.* – John Wiley & Sons, 302 p.
- THORDARSON, T. – HÖSKULDSSON, A. 2006: *Iceland (Classic geology in Europe 3).* – Terra Publishing, 200 p.
- WELLMANN, H. W. – WILSON, A. T. 1965: Salt weathering: A neglected geological erosive agent in coastal and arid environments. – *Nature* 205. pp. 1097–1098.
- ZENKOVICH, V. P. 1967: *Processes of coastal development.* – Oliver & Boyd, Edinburgh and London, 738 p.