

**TÖBRÖK KIALAKULÁSA TALAJJEGES KÖRNYEZETBEN
DEVELOPMENT OF DOLINES IN GROUND ICE ENVIRONMENT**

VERESS MÁRTON – PÉNTEK KÁLMÁN – NÉMETH ISTVÁN –
ALMÁSI ISTVÁN

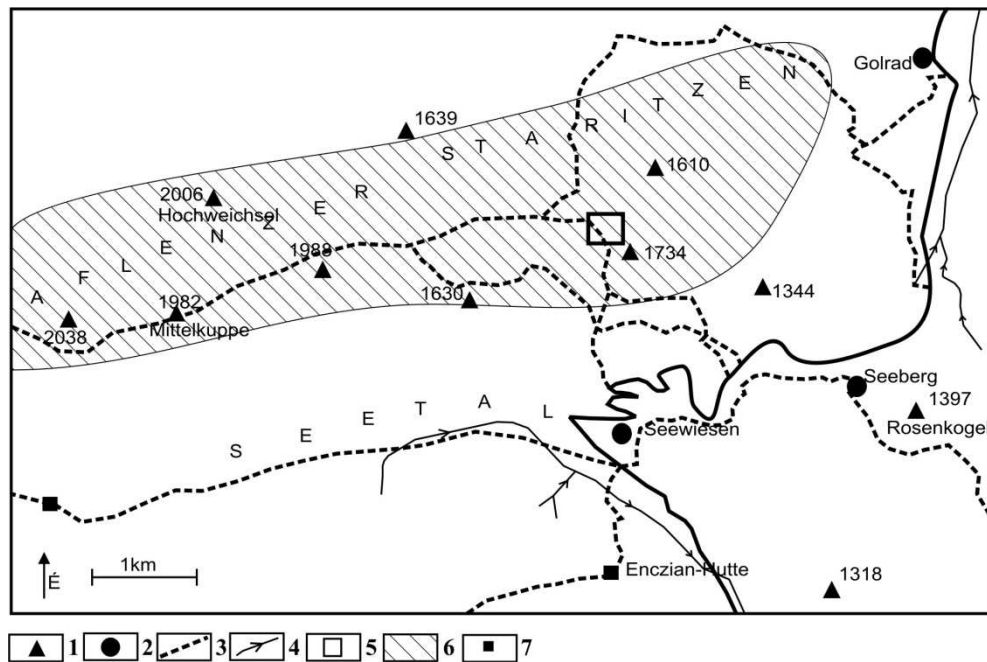
Nyugat-magyarországi Egyetem, Természettudományi Kar, 9700 Szombathely, Károlyi Gáspár tér 4. vmarton@ttk.nyme.hu

Abstract: We studied the evolution of dolines in ground ice environment, in a paleovalley of the Hochschwab Mts. (Northern Calcareous Alps, Austria) as well as in laboratory conditions. We measured the ground ice thickness of the exploration area by geophysical methods. We estimated the melting (thinning) speed and the pertinent parameters for ground ice samples at different temperatures in laboratory conditions. After simulating the process we were able to determine the physical conditions generating the ground ice melting phenomena, and based on this we calculated its melting speed. Due to the air circulation in the karst, the lower level of the ground ice starts to melt and the covering sediment particles fall down. Thus the thinned covering sediments will fall-in and dropout dolines will mould the ground, or the surface may sink by the progress of the melting, entailing suffosion dolines to be generated.

1. Bevezetés

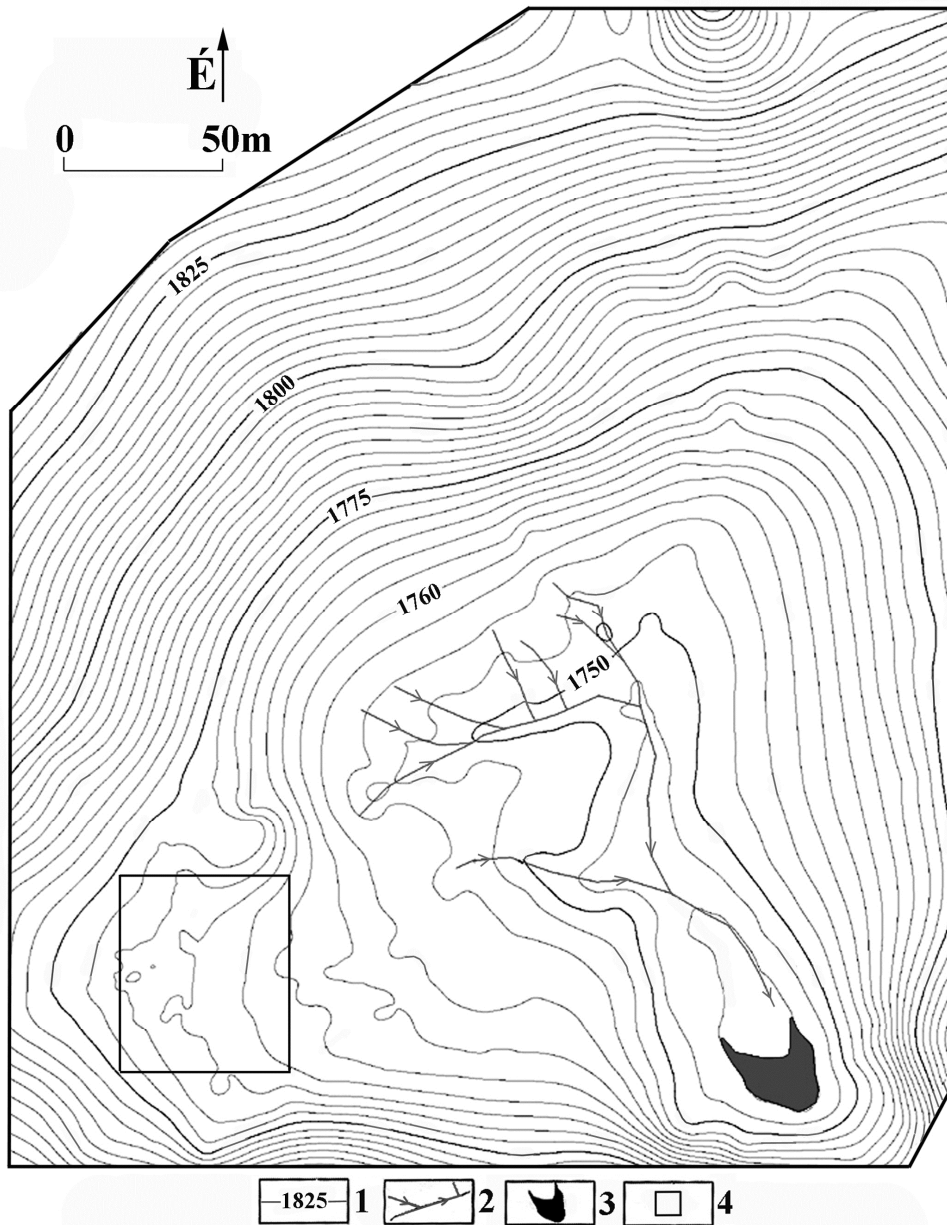
A töbrök kialakulásuk és környezetük szerint lehetnek oldódásos-, átöröklődéses-, szakadék-, szuffóziós-, és lezökkenéses töbrök (WILLIAMS 2003). Utóbbi két töbrőtípus fedett karsztos környezetben alakul ki úgy, hogy a fedő süllyed (szuffóziós töbör), vagy leomlik (lezökkenéses töbör). A süllyedést a fedő szemcséinek a karsztba mosódása, míg az omlást a fedő nagyobb összeállósága, vagy az anyagihiány hirtelen megnövekedése okozza (DRUMM et al. 1990, THARP 1999, WALTHAM és FOOKES 2003, WALTHAM et al. 2005). A lezökkenéses töbrök kialakulása előtt a fedőben üregek jönnek létre (WALTHAM et al. 2005). E folyamatok oka, a karsztosodó kőzeten létrejövő anyagihiány. Kősó, gipsz, mészkő fedett karsztjain, (de magashegységi területek fedetlen karsztjain is) a fekűn kürtök képződnek (JAMMAL 1984, KLIMCHOUK-ANDREJCHUK 1996, COOPER 1998, TOULEMONT 1987, VERESS 2009, 2010).

KLIMCHOUK (1995) szerint az epikarszt járataiban és a vakkürtökben kondenzvíz képződhet. Ez oldódással kivékonyítja a vakkürtő mennyezetét alkotó mészkövet. A jelenség addig folytatódhat, amíg a mennyezet beomlik. A vakkürtő a felszínre nyílik.

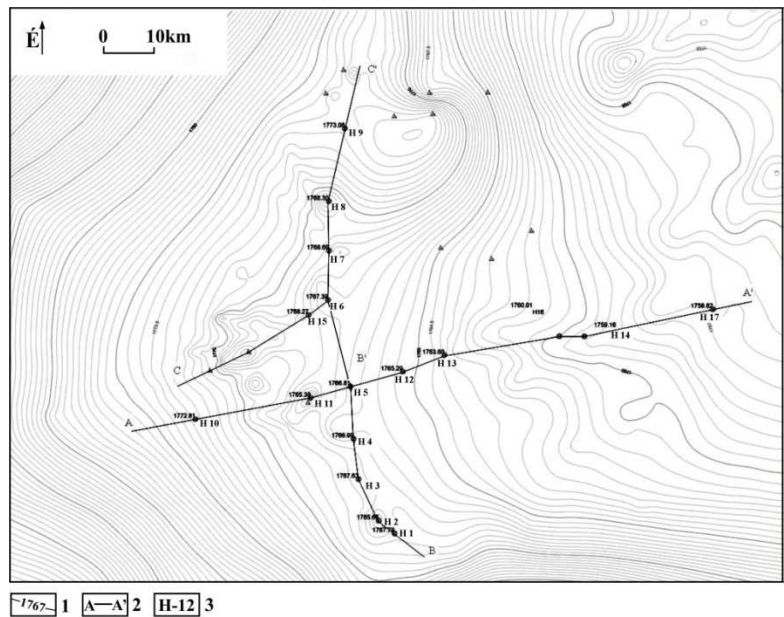


1. ábra: A kutatási terület a Hochschwabon
 Jelmagyarzat: 1. csúcs, 2. település, 3. turistaút, 4. vízfolyás, 5. kutatási terület, 6. fennsík, 7. turistaház
 Fig. 1: The research area on the Hochschwab
 Legend: 1. peak, 2. settlement, 3. hiker's track, 4. stream, 5. research area, 6. plateau, 7. hiker's hut

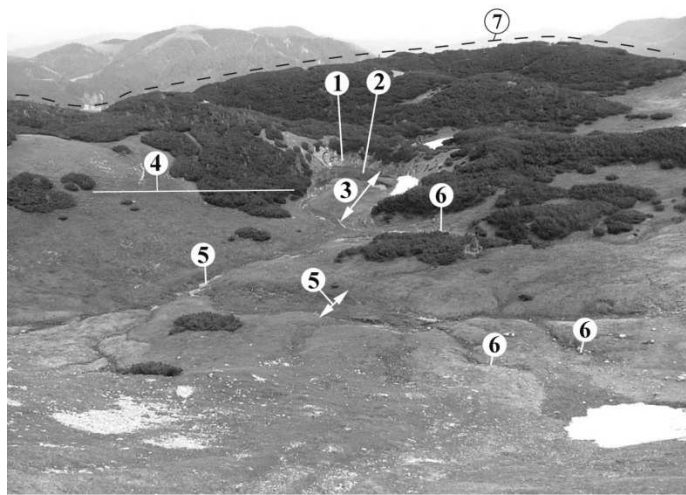
Vizsgálatainkat (ld. alább) egy hochschwabi (Ausztria) kutatási területen és laboratóriumban folytattuk. A Hochschwab fennsíkja a Keleti-Alpok egy takaróroncsa, amelyet triász végi mészkő épít fel. Ennek K-i pereméhez közel mintegy 500 m-es átmérőjű összetett depresszió (paleouvala) található (1, 2. ábra). A paleouvala pereme 1800 m magasságú, aljzata 1780-1750 m magasságok közt helyezkedik el. Ennek D-i része, amely rejtett karszt (a fedő vízáteresztő), volt a kutatási terület, ahol a geofizikai mérések történtek (3. ábra, 1. kép). Itt több tucat szuffóziós és lezökkenéses töbrő található (3. ábra). A töbrők a geoelektromos - földtani szelvények tanúsága szerint a fekü magaslatai felett helyezkednek el a fedőben. A paleouvala É-i része – amely vízfolyás – árok-, ill. völgyrendszerrel rendelkezik – eltemetett fedettkarsztos térszín (a fedőüledék vízzáró) alakult ki. Itt az aljzatról hiányoznak a töbrők. ÉK-i peremén viszont egy víznyelő van. E víznyelő gyűjti össze az eltemetett fedett karsztos felszín vizeit (2. ábra). A paleouvalát egy egykori gleccser átalakította. Kitöltése áthalmozott moréna. Ennek szintje a mai elborítás szintjénél magasabban húzódott, de mára a kitöltő üledék egy része a víznyelőn keresztül a karszt járatrendszerébe halmozódott át.



2. ábra: A paleouvala domborzatrajzi térképe
 Jelmagyarázat: 1. szintvonal, 2. vízfolyás, 3. tó, 4. kutatási terület
 Fig. 2: The research area in the paleouvala
 Legend: 1. contour, 2. stream, 3. lake, 4. research area



3. ábra: A vizsgált térszín és a geoelektromos-földtani szelvények nyomvonalai
 Jelmagyarázat: 1. szintvonal, 2. a geoelektromos földtani szelvény nyomvonala, 3. a VESZ mérés helye
 Fig. 3: The surface topography of the investigated area showing the position of the geoelectrical profile and geological cross-section position
 Legend: 1. contour-line, 2. position of the geoelectrical-geological cross-sections, 3. location of the vertical electrical sounding (VES) measurements



1. kép: A paleovalva É-i része
 Jelmagyarázat: 1. víznyelő, 2. tó, 3. feltöltött, idősebb víznyelő, 4. a kitöltés egykori szintje, 5. völgy, 6. eróziós árok, 7. paleovalva pereme
 Picture 1: The northern part of the paleovalva
 Legend: 1. ponor, 2. lake, 3. former filled ponor, 3. former level of filling, 5. valley, 6. gully, 7. margin of the paleovalva

2. Módszerek

- 2008. június 23-án geofizikai módszerrel (VESZ) mértük a fedő vastagságát, összetételét. A VESZ mérés módszerét részletesen ismertettük már egy korábbi tanulmányban (Veress 2009). A mérési adatok felhasználásával nyomvonalak mentén (3. ábra) geoelektromos-földtani metszeteket szerkesztettünk (4. ábra). A szelvény készítéséhez a geofizikai mérési helyek magasságát meghatároztuk. Ehhez a kutatási helyszínt térképeztük. Meghatároztuk az egyes mérési helyeken az elektromos ellenállások figyelembevételével a talajjeges fedő vastagságát is (I. táblázat).

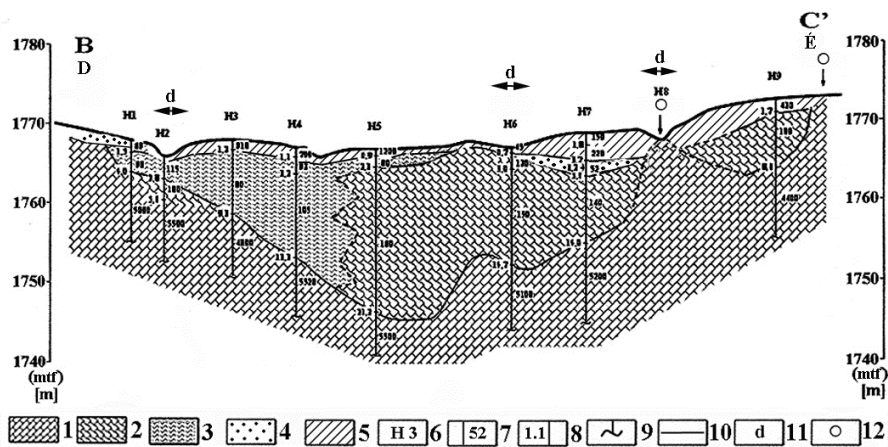
I. táblázat
Table I.

A fedő felnyílásának időtartama a fedő felharapódzásának $w = 6 \frac{\text{mm}}{\text{h}}$ sebessége esetén 11°C hőmérséklet különbségnél
The development time of the opening of the superficial deposit if the velocity of the melting of ground ice is $w = 6 \frac{\text{mm}}{\text{h}}$ and the temperature difference is 11°C

VESZ jele	Az átfagyott összlet (2008. június 23)			A nem fagyott összlet			Az átfagyott összlet felnyílásának időtartama [h]
	Geoelektromos ellenállása [Ω]	Vastagsága [m]	Anyaga	Geoelektromos ellenállása [Ω]	Vastagsága [m]	Anyaga	
H-3	910	0,0-1,2	homok-agyag	80	1,2-9,3	homok-agyag	200 h
H-4	700	0,0-1,1	homok-mészktörmelék	93	1,1-3,2	homok-mészktörmelék	183,3 h
H-5	1200	0,0-0,9	homok-agyag	80	0,9-2,3	homok-agyag	150 h
H-7	202	0,0-0,5	mészktörmelék	150	0,5-1,8	mészktörmelék	83,3 h
H-9	430	0,0-1,7	mészktörmelék	180	1,7-8,6	mészktörmelék	283,3 h
H-10	1000	0,0-1,0	mészktörmelék	140	1,0-15,1	mészktörmelék	166,6 h
H-12	890	0,0-1,3	mészktörmelék	155	1,3-22,3	mészktörmelék	216,6 h
H-13	420	0,0-1,0	mészktörmelék	190	1,0-7,0	mészktörmelék	166,6 h
H-14	180	0,0-0,5	mészktörmelék	100	0,5-2,4	mészktörmelék	83,3 h
H-15	990	0,0-0,9	mészktörmelék	115	0,9-6,5	mészktörmelék	150 h

- Egy, a jelenséget vizsgáló kísérleti berendezést fejlesztettünk ki, amely laboratóriumi körülmények között teszi lehetővé a jelenség vizsgálatát. Különböző szemcseméretű kifagyasztott minták helyezhetők el a készülékben. A mintákra alulról levegőt fújattunk be, amelynek változtattuk a hőmérsékletét és az áramlás sebességét. A mintákon olvadás kezdődött meg. Emiatt a mintákról darabok váltak le. Egy érzékeny mérleggel a mennyezetről leomladozott anyag tömegét az idő függvényében mérhetjük. A berendezés vázlatát az 5. ábra szemlélteti, a 2. 3. kép az eszköz a képeit mutatja be.

- A megalkotott elméleti modell felhasználásával számításokat végeztünk.

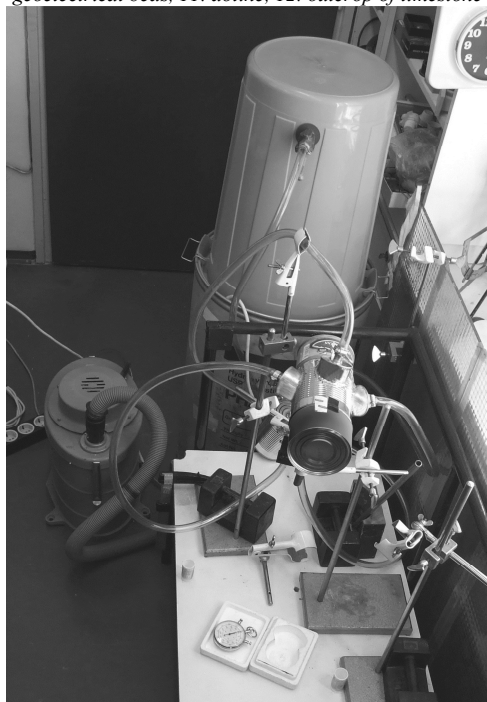


4. ábra: Geoelektromos-földtani szelvények a kutatási területen

Jelmagyarázat: 1. mészkő, 2. mészkő (repedezett, töredezett), 3. mészkőtörmelék (agyagos), 4. iszap-homok-mészkőtörmelék, 5. iszap-homok-mészkőtörmelék talajjéggel, 6. VESZ mérés száma, 7. az összlet geoelektromos ellenállása, 8. az összlet talpmélysége, 9. a VESZ mérés kb. behatolása, 10. geoelektromos összlethatár, 11. töbör, 12. kőzet kibúvás

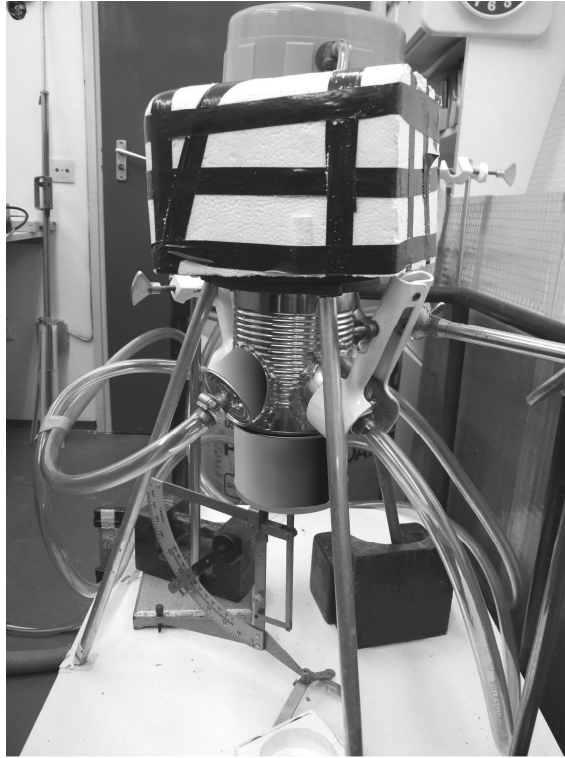
Fig. 4: Geoelectrical-geological cross-sections across the research area

Legend: 1. limestone, 2. limestone (fractured), 3. limestone debris (with clay), 4. silt-sand, limestone debris with ground ice, 5. silt-sand, limestone debris, 6. number of VES measuring, 7. the geoelectrical resistance of beds (Ohm), 8. depth of the beds (m), 9. the approximate penetration depth of the VES measurement, 10. boundary of geoelectrical beds, 11. doline, 12. outcrop of limestone

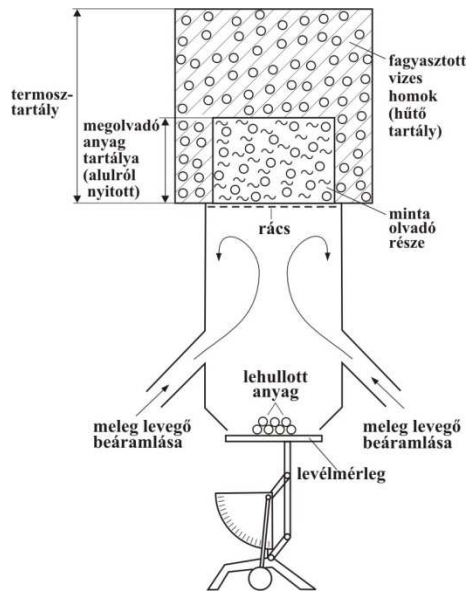


2. kép: A kísérleti eszköz áttekintő képe

Picture 2: An overview photo showing the experimental device



3. kép: A kísérleti eszköz közeli képe
 Picture 3: A detail photo showing the experimental device



5. ábra: A kísérleti eszköz elvi ábrája
 Fig. 5: Scheme of the experimental device

3. A geomorfológiai modell

A modellt fedettkarsztos környezetre fejlesztettük ki, arra az esetre, amikor a fedőn talajjég jön létre.

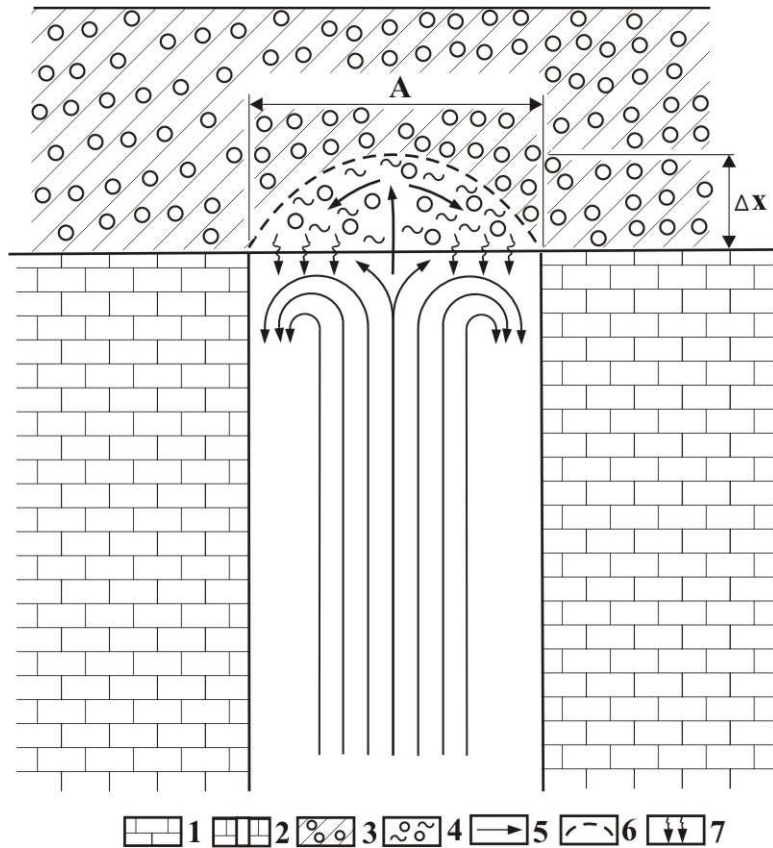
A karsztban a levegő kétféle áramlási rendszere alakulhat ki. Akkor, ha a járatrendszer jól fejlett, a melegebb levegő kitágul, nyomása lecsökken. Ezért a nagyméretű barlangokból a barlangi levegő nyáron kifelé áramlik a felmelegedő és így kisebb nyomású felszíni levegő irányába (BÉLL 1945, BALÁZS 1969, FODOR 1976). Télen az áramlási irány megfordul és a felszínről a barlangba áramlik a levegő. Akkor, ha nincsenek a felszín közelében nagyméretű barlangok, hanem csak az epikarszt részrendszere és e zóna alatti kürtők, az áramlás ellentétes lesz. Ez esetben a kicsi járatok zárt rendszerként viselkednek. Emiatt a levegő kevésbé képes a felmelegedése során kitágulni. Nyomása emiatt megnő. Ezért a magasabb hőmérsékletű levegő áramlik az alacsonyabb irányába. Nyáron a levegő a karszt járatrendszerére felé mozog, míg télen a felszín irányába (KLIMCHOUK 1995). Modellünkben kisméretű kürtőkkel és résekkel átjárt epikarszttal számolunk. Ugyanis fedett karsztos töbrök ilyen környezetben képződnek (COOPER 1988, VERESS 2009).

Így amikor a felszíni levegő hőmérséklete alacsonyabb, mint a karsztban lévőé, a mészkő kürtőiből a levegő a felszín irányába áramlik. A feláramló levegő megolvastja a fedő jégét. A fedőből a laboratóriumi kísérlet szerint darabok válnak le, amelyek a kürtőbe hullnak. A darabok lehullása miatt a fedő alsó felületén felboltozódás jön létre. Ilyen boltozatos üregeket mutattak ki a Kentucky-karszt kürtői felett geofizikai vizsgálatokkal (CRAWFORD 2001). Akkor, ha a maradék fedő még mindig elég vastag nem omlik be, hanem teljes szélességében megolvad. Emiatt a felszínen sekély mélyedés alakul ki (szuffóziós töbrök). Ha a fedő elegendően vékony, akkor leomlik, a felszínen lezökkenéses töbrök képződnek.

4. A jelenség elméleti modellje

Az áramlási modellt a következőképpen vázoljuk. Függőleges tengelyű körhenger alakú járatot feltételezünk, amelyet a jég által összecementált laza üledék fed. A hengeres üregben alulról felfelé hatoló levegő a fedőbe ütközve hőátadás révén melegíti a mennyezetet, ezáltal kiolvastja annak legalsó rétegét. A hőátadás közben a fedővel érintkező felső levegőrétteg lehül, így süllyedni kezd, s átadja helyét konvekciós áramlást kialakítva az alulról felfelé nyomuló melegebb levegőnek. Így az alulról folyamatosan melegített

fedő a jégkomponens kiolvadása során darabokban le hull. A folyamat eredményeként a fedőben boltozatos tetejű üreg keletkezik (6. ábra).



6. ábra: A feláramlás által létrejött olvadási modell

Jelmagyarázat: 1. mészkő, 2. kürtő a mészkőben, 3. talajjeges fedőkőzet, 4. részlegesen megolvadó jég a fedőkőzetben, 5. cirkuláló levegő, 6. levegő által átjárt (részlegesen megolvadt) fedő határa, 7. a megolvadó fedőből kiszivárgó víz

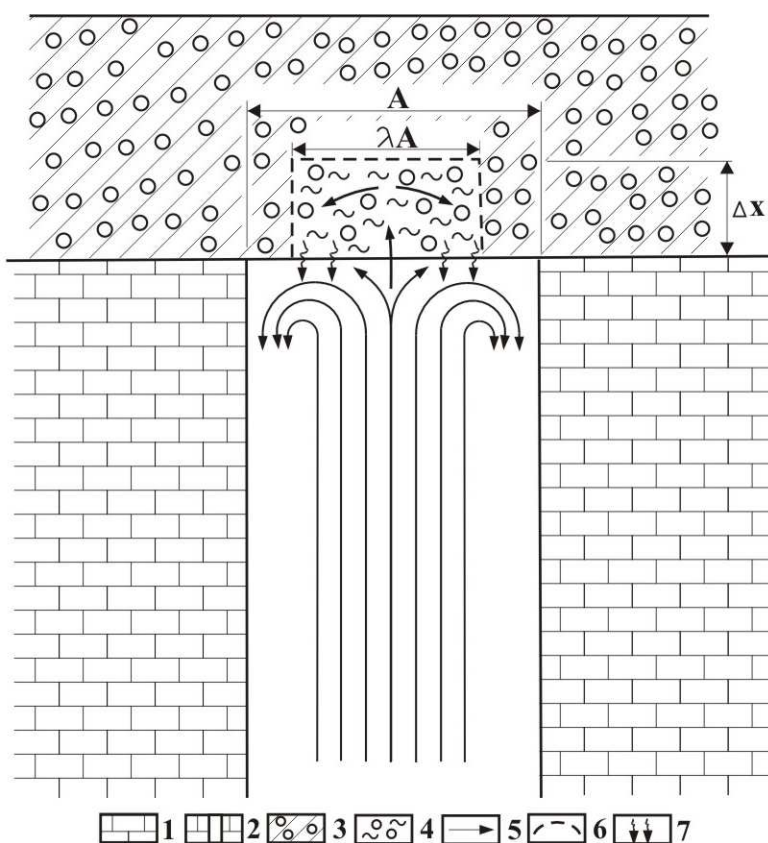
Fig. 6: The melting model about the upwelling air

Legend: 1. limestone, 2. shaft in the limestone, 3. the covering sediment with ground ice, 4. partially melted ground ice in the covering sediment, 5. upwelling air, 6. boundary of the partly melted covering sediment where air circulate, 7. water leaving the melted covering sediment

Jelölje A a körhenger alakú kürtő keresztmetszetének területét és Δx a kiolvadó fedő azon vastagságát, amely már saját súlyától leomlik. (A leomlás a valóságban nem egységesen, hanem a laboratóriumi kísérlet szerint darabokban történik.) Tegyük fel, hogy a lezáró fedő egy jég által összecegmentált apró szemcséjű kőzettörmelék. Ha κ a jég hézagterfogata, akkor a Δx vastagságú leomló réteg teljes tömege:

$$(1) \quad m = m_{jég} + m_{kő} = \rho_{jég} \cdot \kappa \cdot \lambda A \cdot \Delta x + \rho_{kő} \cdot (1 - \kappa) \cdot \lambda A \cdot \Delta x = \\ [\rho_{jég} \cdot \kappa + \rho_{kő} \cdot (1 - \kappa)] \cdot \lambda A \cdot \Delta x ,$$

ahol $\rho_{jég}$ a jég, $\rho_{kő}$ pedig a közettörmelék komponensének sűrűsége. A $0 < \lambda < 1$ arányossági tényező azt fejezi ki, hogy a kör alakú fedő területének középső tartományának hányadrésze fog a feláramló levegő hatására leomlani (7. ábra).



7. ábra: A számításhoz módosított megolvadási modell

Jelmagyarázat: 1. mészkő, 2. kúrtó a mészkőben, 3. talajjeges fedőkőzet, 4. részlegesen megolvadó jég a fedőkőzetben, 5. cirkuláló levegő, 6. levegő által átjárt (részlegesen megolvadt) fedő határa, 7. a megolvadó fedőből kiszivárgó víz

Fig. 7: The melting model adjusted for calculation purposes

Legend: 1. limestone, 2. shaft in the limestone, 3. covering sediment with ground ice, 4. partially melted ice in the covering sediment, 5. upwelling air, 6. boundary of partly melted covering sediment where air circulate (and its partially melted), 7. water leaving the melted covering sediment

Az első olvasztási szakaszban megvizsgáljuk, hogy mekkora Q_1^{fel} hőmennyiséget kell a felfelé áramló levegőnek a fedő számára átadni, hogy annak $T_2 (< 0^\circ C)$ hőmérsékletű Δx vastagságú rétege $T_0 (= 0^\circ C)$ hőmérsékletre melegedjen, de itt még a nem kőzet komponense jég formájában van jelen. A szükséges hőmennyiség az (1) alapján

$$(2) \quad \begin{aligned} Q_1^{fel} &= c_{jég} \cdot m_{jég} \cdot (T_0 - T_2) + c_{kő} \cdot m_{kő} \cdot (T_0 - T_2) = \\ &= c_{jég} \cdot \rho_{jég} \cdot \kappa \cdot \lambda A \cdot \Delta x \cdot (T_0 - T_2) + c_{kő} \cdot \rho_{kő} \cdot (1 - \kappa) \cdot \lambda A \cdot \Delta x \cdot \\ &(T_0 - T_2) = \\ &= [c_{jég} \cdot \rho_{jég} \cdot \kappa + c_{kő} \cdot \rho_{kő} \cdot (1 - \kappa)] \cdot \lambda A \cdot (T_0 - T_2) \cdot \Delta x, \end{aligned}$$

ahol $c_{jég}$ a jég, $c_{kő}$ a kőzet fajhője.

A második olvasztási szakaszban meghatározzuk, hogy a $T_0 (= 0^\circ C)$ hőmérsékletű, de még fagyott Δx vastagságú kürtő mennyezetén levő jég $T_0 (= 0^\circ C)$ hőmérsékletű vízzé történő felolvasztásához mekkora Q_2^{fel} hőmennyiség szükséges. Ennek nagysága az (1) alapján

$$(3) \quad Q_2^{fel} = L_{olv} \cdot m_{jég} = L_{olv} \cdot \rho_{jég} \cdot \kappa \cdot \lambda A \cdot \Delta x,$$

ahol L_{olv} a jég olvadáshője, vagy latens hője.

Ekkor a Δx vastagságú fedő kiolvasztásához szükséges teljes hőmennyiség (2) és (3) felhasználásával

$$(4) \quad \begin{aligned} Q^{fel} &= Q_1^{fel} + Q_2^{fel} = [c_{jég} \cdot \rho_{jég} \cdot \kappa + c_{kő} \cdot \rho_{kő} \cdot (1 - \kappa)] \cdot \lambda A \cdot \\ &(T_0 - T_2) \cdot \Delta x + \\ &+ L_{olv} \cdot \rho_{jég} \cdot \kappa \cdot \lambda A \cdot \Delta x = \\ &= \{ [c_{jég} \cdot \rho_{jég} \cdot \kappa + c_{kő} \cdot \rho_{kő} \cdot (1 - \kappa)] \cdot (T_0 - T_2) + L_{olv} \cdot \rho_{jég} \cdot \kappa \} \cdot \\ &\lambda A \cdot \Delta x. \end{aligned}$$

Ezután meghatározzuk, hogy az alulról érkező levegőáram mekkora hőmennyiséget képes a fedőhöz szállítani.

Az első olvasztási szakaszhoz szükséges Q_1^{le} hőmennyiség közlésével a $T_1 (> 0^\circ C)$ hőmérsékletű levegő $T_0 (= 0^\circ C)$ hőmérsékletűre hűl le. Ennek értéke:

$$(5) \quad \begin{aligned} Q_1^{le} &= c_{p \text{ levegő}} \cdot m_{1 \text{ levegő}} \cdot (T_1 - T_0) = c_{p \text{ levegő}} \cdot \rho_{\text{levegő}} \cdot A \cdot l_1 \cdot \\ &(T_1 - T_0) = \end{aligned}$$

$$c_{p \text{ levegő}} \cdot \rho_{\text{levegő}} \cdot A \cdot v \cdot t_1 \cdot (T_1 - T_0),$$

ahol $c_{p \text{ levegő}}$ a levegő állandó nyomáson vett fajhője, $\rho_{\text{levegő}}$ a levegő sűrűsége, l_1 a felfelé áramló levegőoszlop magassága, v a felfelé áramló levegő sebessége, t_1 a levegő áramlásának időtartama.

Most azt a Q_2^{le} hőmennyiséget határozzuk meg, amennyi ahhoz szükséges, hogy a $T_1 (> 0^\circ C)$ hőmérsékletű levegő lehűljön $T_0 (= 0^\circ C)$ hőmérsékletűre, miközben kiolvasztja a Δx vastagságú fedőt. Ennek nagysága

$$(6) \quad Q_2^{le} = c_{p \text{ levegő}} \cdot m_2 \text{ levegő} \cdot (T_1 - T_0) = c_{p \text{ levegő}} \cdot \rho_{\text{levegő}} \cdot A \cdot l_2 \cdot (T_1 - T_0) = c_{p \text{ levegő}} \cdot \rho_{\text{levegő}} \cdot A \cdot v \cdot t_2 \cdot (T_1 - T_0),$$

ahol l_2 a felfelé áramló levegőoszlop magassága, t_2 a levegő áramlásának időtartama.

Az energia megmaradásának tétele szerint, ha az egyéb hővesztésegektől eltekintünk, akkor

$$(7) \quad Q_1^{fel} = Q_1^{le} \quad \text{és} \quad Q_2^{fel} = Q_2^{le},$$

részletezve

$$(8) \quad [c_{jég} \cdot \rho_{jég} \cdot \kappa + c_{kő} \cdot \rho_{kő} \cdot (1 - \kappa)] \cdot \lambda A \cdot (T_0 - T_2) \cdot \Delta x = c_{p \text{ levegő}} \cdot \rho_{\text{levegő}} \cdot A \cdot v \cdot t_1 \cdot (T_1 - T_0)$$

és

$$L_{olv} \cdot \rho_{jég} \cdot \kappa \cdot \lambda A \cdot \Delta x = c_{p \text{ levegő}} \cdot \rho_{\text{levegő}} \cdot A \cdot v \cdot t_2 \cdot (T_1 - T_0),$$

ahonnan az A keresztmetszettel egyszerűsítve, majd a t_1 , illetve t_2 időtartamokat kifejezve

$$(9) \quad t_1 = \frac{[c_{jég} \cdot \rho_{jég} \cdot \kappa + c_{kő} \cdot \rho_{kő} \cdot (1 - \kappa)] \cdot \lambda \cdot (T_0 - T_2) \cdot \Delta x}{c_{p \text{ levegő}} \cdot \rho_{\text{levegő}} \cdot v \cdot (T_1 - T_0)}$$

és

$$t_2 = \frac{L_{olv} \cdot \rho_{jég} \cdot \kappa \cdot \lambda \cdot \Delta x}{c_{p \text{ levegő}} \cdot \rho_{\text{levegő}} \cdot v \cdot (T_1 - T_0)}.$$

Ekkor a folyamat teljes időtartama a (9) felhasználásával

$$(10) \quad \Delta t = t_1 + t_2 = \frac{[c_{jég} \cdot \rho_{jég} \cdot \kappa + c_{kő} \cdot \rho_{kő} \cdot (1 - \kappa)] \cdot \lambda \cdot (T_0 - T_2) \cdot \Delta x}{c_{p \text{ levegő}} \cdot \rho_{\text{levegő}} \cdot v \cdot (T_1 - T_0)} + \frac{L_{olv} \cdot \rho_{jég} \cdot \kappa \cdot \lambda \cdot \Delta x}{c_{p \text{ levegő}} \cdot \rho_{\text{levegő}} \cdot v \cdot (T_1 - T_0)} = \frac{\{[c_{jég} \cdot \rho_{jég} \cdot \kappa + c_{kő} \cdot \rho_{kő} \cdot (1 - \kappa)] \cdot (T_0 - T_2) + L_{olv} \cdot \rho_{jég} \cdot \kappa\} \cdot \lambda \cdot \Delta x}{c_{p \text{ levegő}} \cdot \rho_{\text{levegő}} \cdot v \cdot (T_1 - T_0)}.$$

Ezen összefüggés felhasználásával a fedő beomladozásának (s ezáltal a mennyezet emelkedésének) sebessége:

$$(11) \quad w = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{c_{p \text{ levegő}} \cdot \rho_{\text{levegő}} \cdot v \cdot (T_1 - T_0)}{\lambda \{ [c_{jég} \cdot \rho_{jég} \cdot \kappa + c_{kő} \cdot \rho_{kő} \cdot (1 - \kappa)] \cdot (T_0 - T_2) + L_{olv} \cdot \rho_{jég} \cdot \kappa \}}.$$

5. A folyamat számítása elméleti megfontolások és laboratóriumi adatok felhasználásával

Ismert, a levegő áramlási sebessége elsősorban a nyomáskülönbségtől (hőmérsékletkülönbség) függ. FODOR (1976) szerint az áramlási sebesség és hőmérsékletkülönbség kapcsolatát egy gyökös függvény írja le. A függvény meredeksége (tehát hogy adott hőmérsékletkülönbséghez mekkora áramlási sebesség tartozik) más tényezőktől is függ (pl. az üregrendszer méretétől,

morfológiájától, a szél irányától, erősségétől). Az Abaligeti-barlang (Magyarország) huzatát leíró függvényből (FODOR 1976) megállapítható, hogy 10°C hőkülönbséghez mintegy $0,2\text{ m/s}$ áramlási sebesség tartozik.

A (11) formula alapján lehetőségünk van konkrét számítások elvégzésére. Számpéldánkban tegyük fel, hogy $T_1 = 1^{\circ}\text{C}$ hőmérsékletű, $v = 10\frac{\text{cm}}{\text{s}} = 0,1\frac{\text{m}}{\text{s}}$ huzatból származó légáramlás melegíti a $T_2 = -10^{\circ}\text{C}$ hőmérsékletű mennyezetet, amelynek anyaga jéggel összecementált kis szemcséjű mészkőtörmelékéből épül fel. E kétfázisú fedőben a jég hézagterfogata legyen $\kappa = 0,2$, továbbá $\lambda = 0,9$.

A levegő állandó nyomáson mért fajhője $c_{p\text{ levegő}} = 997\frac{\text{J}}{\text{kg}^{\circ}\text{C}}$, a jég fajhője $c_{jég} = 2093,5\frac{\text{J}}{\text{kg}^{\circ}\text{C}}$, a fedő közet komponensének fajhője $c_{kő} = 879,3\frac{\text{J}}{\text{kg}^{\circ}\text{C}}$. A levegő sűrűsége $\rho_{\text{levegő}} = 1,2928\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$, a jég sűrűsége $\rho_{jég} = 920\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$, végül a fedő közetkomponensének sűrűsége $\rho_{kő} = 2720\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$, a jég olvadáshője pedig $L_{olv} = 334960\frac{\text{J}}{\text{kg}}$.

Ekkor a (11) formula felhasználásával a fedő beomladozásból származó emelkedésének sebessége: $w = 1,692 \cdot 10^{-6}\frac{\text{m}}{\text{s}} \approx 6\frac{\text{mm}}{\text{h}}$.

A fedő felharapódzásának w sebességére vonatkozó további részletes számítások eredményét a II. táblázat tartalmazza.

A tapasztalat szerint a mérések azt mutatják, hogy a kifagyasztott minták anyagi minőségétől függően a leomlott anyagmennyiség tömege az idő lineáris függvénye. A mérési eredményeket a regressziószámítás módszerével feldolgozva az illetett egyenes meredekségéből a mennyezet emelkedésének sebessége meghatározható.

Ha ugyanis $y = ax + b$ a regressziós egyenes egyenlete és itt $a = \frac{\Delta m_{kő}}{\Delta t}$ az egyenes meredeksége, akkor a mennyezet emelkedésének sebessége az (1) felhasználásával

$$(12) \quad a = \frac{\Delta m_{kő}}{\Delta t} = \frac{(1-\kappa) \cdot \rho_{kő} \cdot \lambda A \cdot \Delta x}{\Delta t},$$

ahonnan

$$(13) \quad w = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{1}{(1-\kappa) \cdot \rho_{kő} \cdot \lambda A} \cdot \frac{\Delta m_{kő}}{\Delta t}$$

adódik. A numerikus számpéldában látott értékadással legyen $\kappa = 0,2$, $\lambda = 0,9$, $\rho_{kő} = 2720\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ és $A = 7,85 \cdot 10^{-6}\text{m}^2$. Ekkor a mennyezet beomladozásából számított emelkedés sebessége: $w = 6,5 \cdot 10^{-6}\frac{\text{m}}{\text{s}} = 2,34\frac{\text{cm}}{\text{h}}$, mivel a regressziós egyenesről leolvasott meredekség $\frac{\Delta m_{kő}}{\Delta t} = 10^{-4}\frac{\text{kg}}{\text{s}}$.

II. táblázat

Table II.

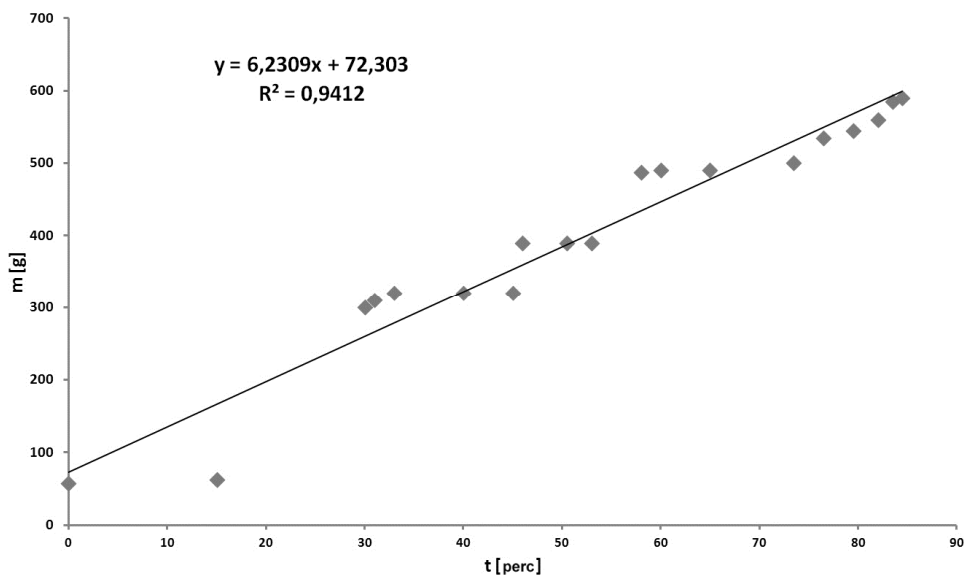
A fedő felharapódzásának sebessége a fagyott öszlet $\kappa = 0,2$ hézagterfogata és $\lambda = 0,9$ arány esetén
 The melting velocity of the frozen superficial deposit in case of $\kappa = 0,2$ porosity and $\lambda = 0,9$ proportion

T_1 [°C]	T_2 [°C]	v [$\frac{cm}{s}$]	w [$\frac{mm}{h}$]
1°C	-10°C	10	6
		20	12
		30	18
	-20°C	10	4,8
		20	9,6
		30	14,4
	-30°C	10	3,9
		20	7,9
		30	11,8
2°C	-10°C	10	12
		20	24
		30	36
	-20°C	10	9,6
		20	19,2
		30	28,8
	-30°C	10	7,9
		20	15,8
		30	23,7
3°C	-10°C	10	18
		20	36
		30	54
	-20°C	10	14,4
		20	28,8
		30	43,2
	-30°C	10	11,8
		20	23,7
		30	35,6
4°C	-10°C	10	24
		20	48
		30	72
	-20°C	10	19,2
		20	38,4
		30	57,6
	-30°C	10	15,8
		20	31,6
		30	47,4
5°C	-10°C	10	30
		20	60
		30	90
	-20°C	10	24
		20	48
		30	72
	-30°C	10	19,7
		20	39,5
		30	59,3

Jelmagyarázat:

T_1 [°C] = a kiirtó levegőjének hőmérséklete; T_2 [°C] = az átfagyott fedő hőmérséklete

v [$\frac{cm}{s}$] = az áramló barlangi levegő sebessége; w [$\frac{mm}{h}$] = a fedő felharapódzásának sebessége



8. ábra: A melegítés során lehulló darabok mennyisége az idő függvényében
 Jelmagyarázat: m : a lehullott anyag tömege
 Fig. 8: The graphic showing the quantity of the fallen particles versus time due to heating
 Legend: m - the mass of the fallen pieces

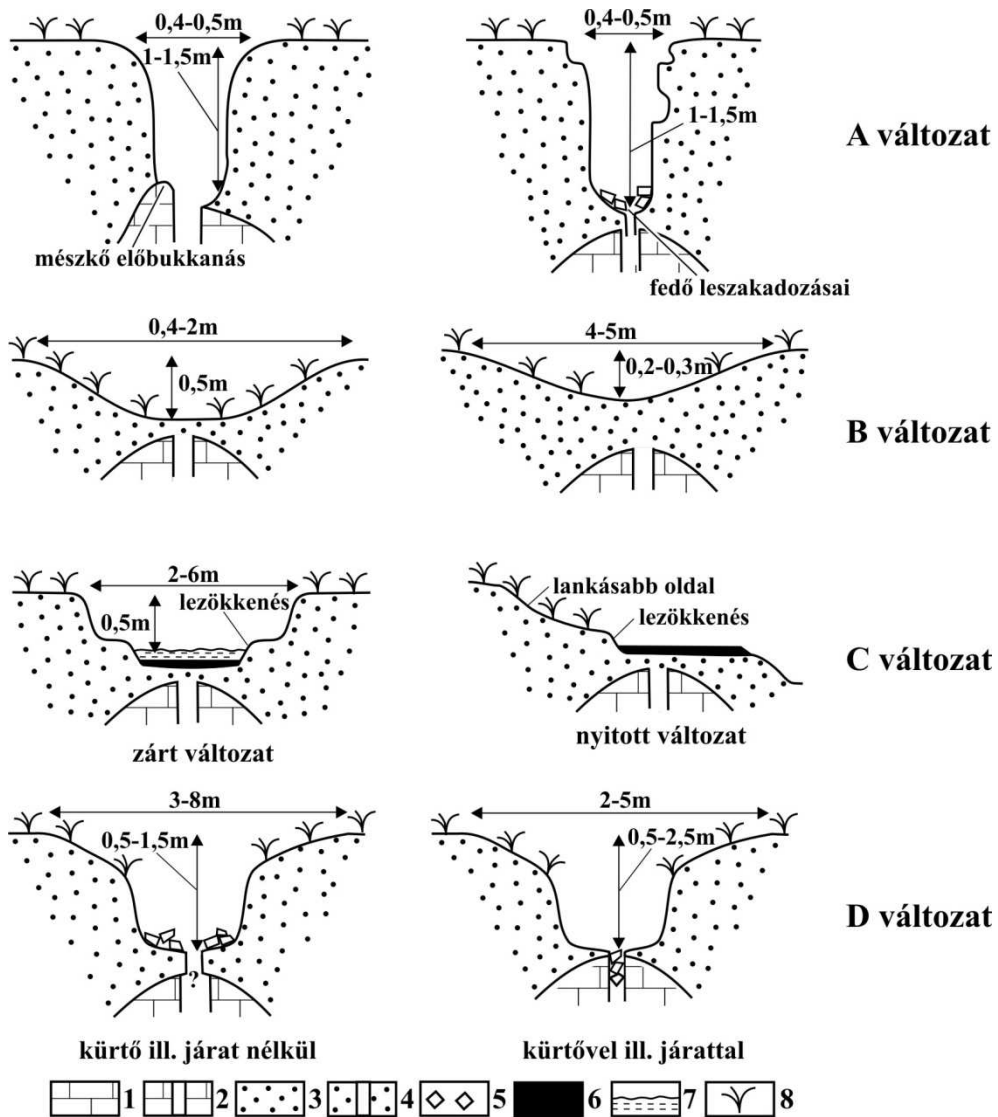
Megjegyezzük, hogy a fizikai modell alapján számított mintapélda eredménye különbözik az előző részben bemutatott számpéldáétól. Ez természetes is, hiszen a laboratóriumi mintánál alkalmazott levegő áramoltatási sebesség $v_1 = 10 \frac{m}{s}$ és $v_2 = 20 \frac{m}{s}$, míg az áramló levegő hőmérséklete $T_1 = 20^\circ C$, illetve $T'_1 = 40^\circ C$ volt.

A laboratóriumi kísérlet egyik legfontosabb eredménye az volt, hogy időben lineáris mennyiségemelkedést eredményezett, akárcsak a számításos matematikai modell (8. ábra). Ez bizonyítja az elméleti számításainkat, de a geomorfológiai modell megalapozottságát is.

6. A töbrök kialakulása

Magashegységekben azon felszíneken, ahol a fedő finomszemcséjű (pl. áthalmozott moréna), alak szerint az alábbi töbör változatok különíthetők el (9. ábra).

- Kis mélységű (legfeljebb 1-2 m-es), meredek oldalú, nagyon kicsi átmérőjű (0,5 m-nél kisebb átmérőjű) töbör (A változat, 4. kép).



9. ábra: Magashegységi fedett karsztos töbörváltozatok

Jelmagyarázat: 1. mészkö, 2. kürtő, 3. fedőüledék, 4. járat, 5. omlás során kialakult talaj-, fedőüledék- és növényfoltok, 6. áthalmazott talaj, 7. tó, 8. gyepek (a jelek sűrűsége jelzi, hogy folytonos, vagy hiányos kifejlődésű-e)

Fig. 9: Covered karst dolines versions in high mountain environment

Legend: 1. limestone, 2. shaft, 3. covering sediment, 4. burrow, 5. soil-, covering sediment - and plant patches developed during collapses, 6. redeposited soil, 7. lake, 8. grass (density of the signs shows whether it has a continuous or fragmented development)



4. kép: Az „A” töbörváltozat
Picture 4: The doline type “A”

- Kis mélységű (néhány dm-es), lankás oldalú, kis átmérőjű (0,5-2 m), vagy közepes (4-5 m) átmérőjű töbrök (B változat).
- Kis mélységű (néhány dm-es), meredek oldalú, közepes átmérőjű (4-5 m-es) töbör, amelynek az oldallejtőin és aljzatán feltárul a talaj alatti növényzettel nem fedett fedőüledék. Aljzata azonban lehet vizenyős. A töbör aljzatán, ekkor áthalmozott talaj is van. Ugyanott sekély vizű tó is előfordulhat (C változat, 5. kép).



5. kép: A „C” töbörváltozat
Picture 5: The doline type ‘C’

- Nagyobb, de változatos mélységű (több m-es), meredek oldalú, közepes átmérőjű (2-5 m-es), vagy nagyobb átmérőjű (3-8 m) tóbör, amelynek az aljzatán többnyire járat (a fedőben), vagy kürtő (a mészkőben) van (D változat, 6. kép).



6. kép: A „D” tóbörváltozat
Picture 6: The doline type 'D'

Véleményünk szerint e változatok a geomorfológiai modellben felvázolt módon alakulhattak ki, mert:

- a geofizikai mérések talajjeget mutattak ki,
- a kísérleti eszközben elhelyezett anyag kiolvadó részének szemcséi lehullottak,
- az elméleti számítások összhangban vannak a laboratóriumi kísérlet során végbemenő folyamattal.

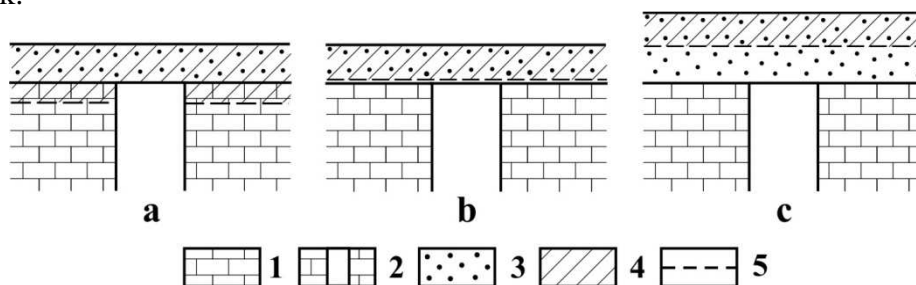
A fedőben a felmelegedés hatására az alábbi folyamatok következhetnek be:

- A fagyott fedő alsó felületéről, ahol a jég megolvad, kisebb-nagyobb darabok válnak el és potyognak le. Emiatt a fedő vékonyodik.
- A kivékonyodott fedőmaradványon a további fűtés hatására más jelenségek is lejátszódhatnak. Így, ha a fedőmaradvány még elég vastag, nem omlik be, hanem olvad. Az olvadása eredményként lecsökken a vastagsága,

miáltal a felszínen süllyedés megy végbe. Ha a fedő kellően kivékonyodik, akkor viszont leomlik.

Valószínűsíthetjük a két folyamat kombinációját is. Ekkor a fedő a vékonyodása során lezökkenések sorozatát szenved el, de ezzel párhuzamosan az összes jég megolvadása miatt annak a felszíne meg is süllyed.

A már említett változatok nem lehetnek ugyanannak a töbörfejlődési sornak a különböző fázisai. E változatok kialakulása az alábbi módon történik.



10. ábra: A különböző vastagságú fedőnél a talajjég vastagsága

Jelmagyarázat: 1. mészkő, 2. kürtő, 3. fedő, 4. talajjég a fedőben, 5. talajjég alsó határa, a. a fedő vastagsága kisebb, mint amilyen vastagságú talajjég kialakulhat, b. a fedő vastagsága akkora, mint a létrejövő talajjég, c. a fedő nagyobb vastagságú, mint amilyen vastagságú talajjég létrejön.

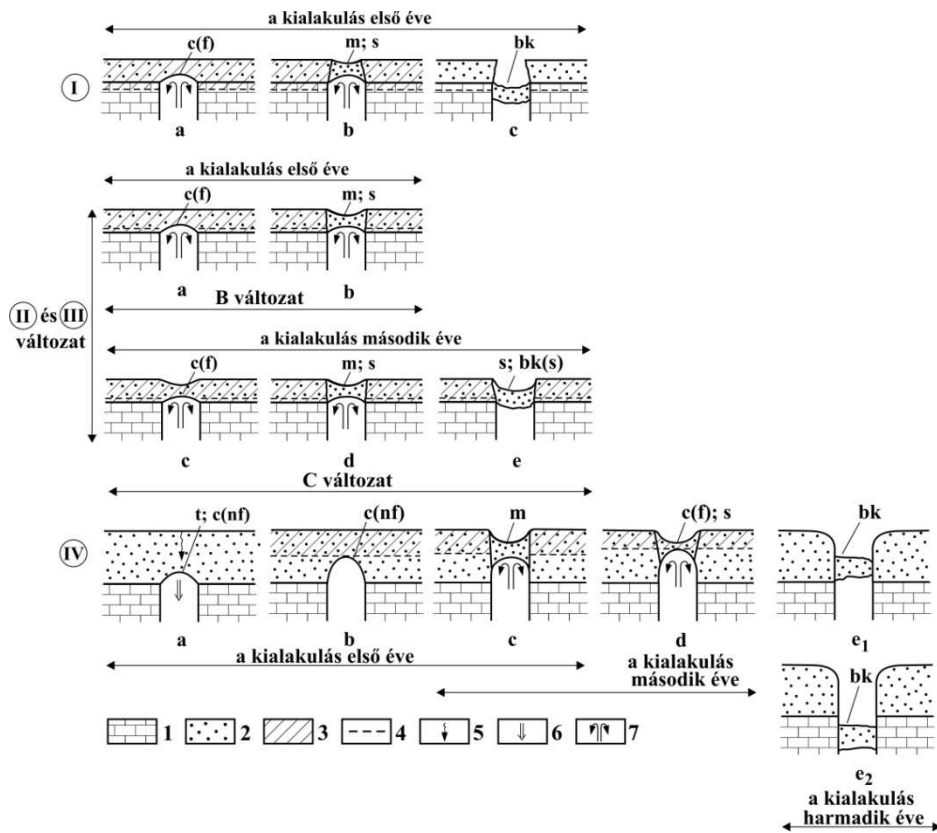
Fig. 10: The thickness of the ground ice at various covering sediment

Legend: 1. limestone, 2. shaft, 3. covering sediment, 4. ground ice in covering sediment, 5. lower boundary of the ground ice a. the thickness of covering sediment is smaller than the thickness of the developing ground ice, b. the thickness of the covering sediment is similar as the thickness of the developing ground ice, c. the thickness of covering sediment is larger than the thickness of the developing ground ice

- Az A változatú töbör akkor alakul ki, ha a fedő vastagsága kisebb, mint amilyen vastagságban abban a talajjég kialakulhatna (10. ábra). A kis vastagságú talajjég, amely télen kialakult, még ugyanazon év telén megolvadhat. A lokálisan átolvadt fedő vagy egységesen leomlik, vagy darabonként a kürtőbe potyog. A folyamat során a mészkő kürtőjénél nem szélesebb, kis mélységű, meredek oldalú forma alakul ki a fedőben (11 I. ábra).

- Akkor, ha a fedő vastagabb, az abban létrejött talajjég vastagsága is nagyobb lesz. (10. b ábra). Az átfagyott rész alulról a melegítés hatására részlegesen megolvad, miáltal alsó felületéről darabok hullanak le, ezért kivékonyodik. Ha elég vastag rész marad meg a fedőből ahhoz, hogy ne omoljon le, a talajjég később megolvad. Emiatt a felszín megsüllyed, szuffóziós töbör alakul ki (B változat, 11 II. ábra).

- A következő évben a szuffóziós töbör talpi részének a kőzetanyaga (miután télen talajjéggel összecementálódott) ismét olvad alulról, tehát vékonyodik. Emiatt a fedő annyira kivékonyodik, hogy lezökkenhet (omlik) a potyogással kialakult részbe (C változat, 11 III. ábra).



11. ábra: Töbrök kialakulása különböző fedővastagságok esetén

Jelmagyarázat: I. A változatú töbrök kialakulása, a. a fedő alsó részéből darabok válnak le, b. a maradék fedő jége megolvad, ezért a fedő megsüllyed, c. a vékonyabb fedő leomlik, II. B változatú töbrök kialakulása B változatú töbrök továbbfejlődésével, a. a fedő alsó részéből darabok hullanak le, b. a maradék fedő jége megolvad, ezért a fedő megsüllyed, c. a megsüllyedt fedőben a következő évben ismét talajjég jön létre, a fedő alulról olvadva vékonyodik, d. a fedő ismét megolvad, majd süllyed, e. fedő lezökken (több kicsi omlás), IV. D változatú töbrök kialakulása, a. fedő alulról kivékonyodik a beszivárgó vizek hatására, b. a fedőben ezért üreg alakul ki, amely mennyezete eléri a talajjeges fedőt, c. a fedő megolvad és megsüllyed, d. a fedő maradékában talajjég képződik, amely tovább vékonyodik, e. ennek megolvadását követően az beomlik, c(f): felboltozódás a fagyott fedőben, m: olvadás, s: süllyedés, bk(s): szakadozás (kicsi omlás), bk: omlás, t: anyag áthalmozódás a beszivárgó vizek által, c(nf) felboltozódás a nem fagyott fedőben. 1. mészkő, 2. fedőkőzet, 3. talajjeges fedőkőzet, 4. talajjeges összlet alsó határa, 5. csapadékvíz beszivárgása a fedőbe, 6. anyagáthalmozás, 7. levegő cirkuláció

Fig. 11: The development of the dolines in covering sediment with various thickness values

Legend: I. the development of the version A doline, a. pieces fall from the lower part of the covering sediment, b. the ground ice of the residual covering sediment melts therefore it sinks, c. the thinner covering sediment collapse, II. the development of version B doline, III. the development of version C doline with the further development of version B doline, a. pieces fall from the lower part of the covering sediment, b. the ground ice of the residual covering sediment melts therefore it sinks, c. ground ice is created in the residual of the sank covering sediment and it becomes thinner because of the melting from downwards, d. the covering sediment melts again, and sinks again, e. the covering sediment suffers several small breakdown, D. the development of version D doline, a. the covering sediment becomes thin from downwards due to percolating water, b. cavity develops in the covering sediment, its ceiling reaches the covering sediment with ground ice, c. the covering sediment melts, and sinks, d. ground ice develops in the residual of the covering sediment, the sediment breakdowns as it melts, e. after it melts it down breaks. c(f) caving in the covering sediment with ground ice, m: melting, s: sinking, bk(s): small breakdown, bk: break down, due to percolating water, c(nf): caving in the non-frozen covering sediment 1. limestone, 2. covering sediment, 3. covering sediment with ground ice, 4. lower boundary of covering sediment with ground ice, 5. infiltration of the rain water into the covering sediment, 6. redeposition of sediment, 7. air circulation

- Előfordulhat, hogy a fedő vastagabb (több m). Ilyenkor annak csak a felső részén alakul ki talajjég (10. c ábra). A kürtő felett nyáron (amikor a talajjég a fedő felsőrészén is megolvad) a beszivárgó csapadékvizek hatására anyag áthalmozódás megy végbe a fedő alsó részéről a kürtőbe. Akkortól, amikortól a kürtő mennyezete felett már nincs talajjég nélküli fedőrész, hanem csak a talajjeges fedő, elkezdődhet annak az alsó részéről a jég kiolvadása (első év). A következő év nyarán, miután a maradék fedőben a télen kialakult talajjég megolvad a fedő megsüllyed. A megsüllyedt rész tovább vékonyodhat, miután alsó részéről darabok hullanak le (második év). Akkor, amikor kellően kivékonyodik, a maradék fedő leomlik (harmadik év). Kialakul a D változatú töbör, amely lehet kisebb mélységű, ha a leomlott anyag nem jut a kürtőbe, vagy nagyobb, ha igen (11 IV. ábra).

7. Következtetések

A talajjeges fedő töbrei két szakaszban jönnek létre: az elsőben a fedő kivékonyodik a jég megolvadása miatt, a másodikban a fedő maradék részének talajjege vagy szintén megolvad és szuffóziós töbör jön létre, vagy beomlik, miáltal lezökkenéses töbör képződik. A töbröknek (főleg a lezökkenéseseknek) alak szerint több változata jöhet létre, amelyet elsősorban az határoz meg, hogy a fedő milyen vastagságú a talajjeges fedő teljes vastagságához képest.

A talajjég megolvadása gyors folyamat. Ezáltal a fedőn a töbröképződés is gyorsan (gyorsabban, mint nem talajjeges fedőn) megy végbe. Pl. néhány nap alatt átolvadhat a talajjég teljes vastagságban számításaink szerint (I. táblázat). A talajjég megolvadásának (tehát a fedő beomlatozása és így a fedőn kialakult forma) sebessége függ a szállított hőmennyiségtől, és a talajjeges fedő szemcseeloszlásától.

A fedő megolvadása akkor következik be, amikor a felszín hőmérséklete alacsonyabb mint a karszté. Magashegységi környezetben a nyári félévben a megolvadt fedő a beszivárgó vizek által vékonyodhat. A téli félévben viszont a talajjég olvadásával vékonyodhat úgy, hogy a megolvadt fedő alsó felületéről darabok válnak le. A talajjég megolvadása ott lesz jelentős, ahol a hőkülönbségek nagyok.

IRODALOM

BALÁZS D. (1969): Adalékok a barlangi légáramlás tanulmányozásához – Karszt és Barlang I. pp. 15-24.

- BÉLL B.* (1945): A levegő áramlása bányákban és barlangokban – Időjárás 21. pp. 1-13.
- COOPER, A. H.* (1998): Subsidence hazards caused by the dissolution of Permian gypsum in England: geology, investigation and remediation – Geological Society Engineering Group Special Publication 15, pp. 265-275.
- CRAWFORD, N. C.* (2001): Environmental problems associated with urban development up on karst, Bowling Green, Kentucky – In: Beck, B. F. and Herring, J. G. (eds.): Geotechnical and Environmental Applications of Karst Geology and Hidrology pp. 397-424, Balkema: Lisse
- DRUMM E. C.-KANE W. F.-YOON C. J.* (1990): Application of limit plasticity to the stability of sinkholes. – Engineering Geology 29 pp. 213-225.
- FODOR I.* (1976): Újabb adatok a barlangi légáramlásról – Karszt és Barlang, I-II. pp. 21-24.
- JAMMAL, S. E.* (1984): Maturation of the Winter Park sinkhole. – In: Beck, B. F. (ed.), Sinkholes: Their Geology, Engineering and Environmental Impact, pp. 363-369. Balkema: Rotterdam
- KLIMCHOUK, A.* (1995): Karst Morphogenesis in the Epikarstic Zone – Cave and Karst Science, 21 (2) pp. 45-50.
- KLIMCHOUK, A.-ANDREJCHUK, V.* (1996): Breakdown development in cover beds and landscape features induced by interstratal gypsum karst – International Journal Speleology, 24 (3-4), pp. 127-144.
- THARP T. M.* (1999): Mechanics of upward propagation of cover-collapse sinkholes. - Engineering Geology 52 pp. 23-33.
- TOULEMONT, M.* (1987): Les risques d'instabilité liés au karst gypseux lutétien de la région parisienne – Bulletin liaison Laboratoires Ponts et Chaussées 150/151, pp. 109-116.
- VERESS M.* (2009): Investigation of covered karst form development using geophysical measurements – Zeits. für Geomorph. 53. (4). pp. 469-486.
- VERESS M.* (2010): Karst Environments – Karren Formation in High Mountains – Springer Dordrecht Heidelberg London New York, 230 p.
- WALTHAM, A. C.-FOOKES, P. G.* (2003): Engineering classification of karst ground conditions – Quaterly Journal of Engineering Geology and Hidrology, 36 pp. 101-118.
- WALTHAM, T.-BELL, F.-CULSHAW, A.* (2005): Sinkholes and subsidence, Karst and Coverous Rock sin Engineering and construction – Springer, 382 p.
- WILLIAMS, P. W.* (2003): Dolines. – In: Gunn J. (ed.): Encyclopedia of caves and karst science, Fitzroy Dearborn New York, London, pp. 304-310.