

AZ UTÁNSÜLLYEDÉSES DOLINÁK KÉPZŐDÉSÉT BEFOLYÁSOLÓ PARAMÉTEREK KAPCSOLATRENDSZERÉNEK VIZSGÁLATA MODELLKÍSÉRLETTEL.

ANALYSING THE RELATIONS OF THE PARAMETERS THAT INFLUENCES THE SUBSIDENCE DOLINES FORMATION USING MODEL EXPERIMENTS.

VETÉSI-FOITH SZILÁRD

PTE-TTK Földtudományok Doktori Iskola, 7624 Pécs, Ifjúság útja 6.

szilard.vetesi@gmail.com

Abstract: The subsidence dolines are the most common surface forms of the concealed karsts. One type of these dolines is the suffosion doline. In this model experiment the influential role of these kind of dolines' development factors were analyzed. The aim of the study was to determine the significance of the parameters that influenced the development of the suffosion dolines. Furthermore we wanted to determine, whether the porosity-change caused by compaction occurs because of suffosion, and if so, what kind of impact does it make to the different parameters of the depression. To answer these questions numerous experiments were made with different parameters, in a manner that during the experiments we changed only one parameter, so the effects of it would be detectable from the final solution. These measurements were made with the use of a special tool, designed and built for this purpose. According to the data we gained from the model experiment, the development of a suffusion doline is influenced by many parameters. If these parameters are in an optimal connection to each other, a suffusion doline may appear on the surface. Depression may occur even if the chimney's diameter is small, but only in the case when both the cover's thickness is thin, and the grain size is small. If the chimney's diameter is bigger, a depression appears even with the use of bigger cover thickness and a larger grain size. Knowing these parameters of the covered karstic depressions lets us estimate other parameters that may influence the development of the subsidence dolines.

Keywords: model experiment, subsidence doline, chimney's diameter, cover thickness, grain size, estimating, development of the doline in the experiment

Bevezetés

Vizsgálatunk célja, hogy meghatározzuk azokat a paramétereket (kürtőátmérő és méret, fedővastagság, fedőt felépítő szemcse mérete) laboratóriumi körülmények között, amelyek a szuffúziós dolinák kialakulására hatással vannak, továbbá az általunk szimulált folyamatok e tényezőktől hogyan függnék. E célból számos – különböző paraméter mellett végzett – mérést kivitelezünk, úgy, hogy a mérések alkalmával csak egy paraméter értékét változtattuk meg, így annak a végállapotra kifejtett hatása detektálható volt. Az így kapott adatokból becslést tettünk a fedett karsztos depressziók egy-

egy paraméterének ismeretében, más, a kialakulást meghatározó tényező értékére.

A múlt század '70-es éveinek közepétől a karsztkutatásban is elterjedtek a különböző modellkísérletek. Számos tanulmányban található adatokat a karszterületek, karsztrendszer modellek kísérletekkel történő tanulmányozására (*CURL* 1966, *QUINIF* 1973, *FABRE*, *NICOD* 1982). E karsztos modellkísérletekben a mészkő helyett a kutatók gipszet használtak. Ennek oka, hogy gipszen az oldódási folyamatok és így a formaképződés is gyorsabban történik, mint a karbonátos kőzeteken. Az ezredforduló előtt a karsztos modellkísérletek főként a fedetlen kőzetfelszín mikroformáira, a karrokra koncentráltak. A rillenkarok kialakulását *GLEW*, *FORD* (1980), a hasadékarok kialakulását *DZULINSKY* et al. (1988) tanulmányozta. Ugyancsak gipszből felépített modellen a karros formaképződést *VERESS* et al. (1998) vizsgálta.

Az alább tárgyalt modellkísérlet két korábbi tanulmányban bemutatott eljárás továbbfejlesztése. *VERESS* et al. (2014) tanulmányukban bemutatott kísérletben különböző szemcseméretű fedőréteget helyeztek gipsztáblákra és a vízadagolási módok változtatásával vizsgálták a fedőn létrejött formákat. Megállapították, hogy a fedőn kialakult forma méretét a vízmozgás jellege, illetve a fekében keletkezett anyagihiány nagysága határozza meg. *VETÉSI-FOITH* (2018) vizsgálta, hogy a porozitás-változás indukálja-e a fedett karsztos depressziók létrejöttét.

Modellkísérletünkhöz hasonló vizsgálatot végzett, de nem karsztos folyamatra *AREVALO*, *ZURIGUEL* (2015), gabonasilók esetében. A gravitáció általi süllyedés mértékét, a kivezető járat méretét és a gabonaszemek méretét hasonlították össze egymással, azt vizsgálva, hogy ezen paraméterek kapcsolata hogyan segíti elő a kivezető járat eltömődését. Megállapították, hogy a járat eltömődésében legnagyobb szerepe a kivezető járat nagyságának és a gabonaszemek méretének van, ezzel szemben a gravitációs süllyedés nem játszik nagy szerepet ebben a folyamatban.

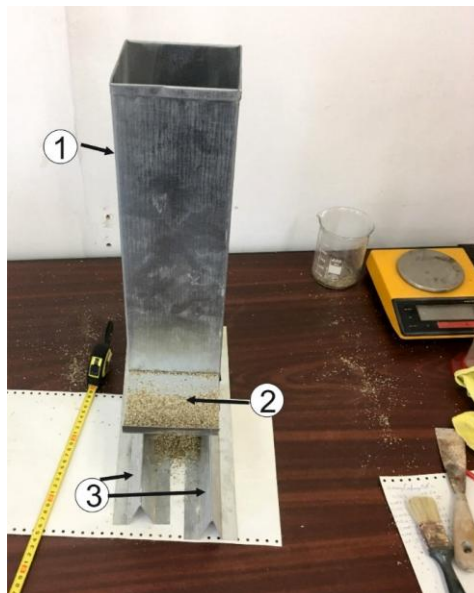
Fedett (rejtett) karszton utánsüllyedéssel alakulnak ki (*WALTHAM*, *FOOKES* 2003, *WILLIAMS* 2004, *WALTHAM* et al. 2005). A rejtett karsztok esetében a fedő vízáteresztő, ezért a fedőn átszivárgó csapadékvíz a fekéközeten különböző, főként vertikális oldásos formákat (kürtő, akna) hoz létre. A feké oldásos formáiba a fedő anyaga szuffúzióval, vagy szemcsehullással fokozatosan, vagy omlással beszállítódik. A fedőben keletkezett anyagihiány (anyagvesztés) a felszínen zárt depresszió kialakulását okozza. Előbbi esetben szuffúziós-, utóbbi esetben lezökkenéssel dolina képződik.

A kísérleti körülmények során (laboratóriumi fedett karsztos környezet és szimulált folyamatok) a következő kérdésekre keressük a választ:

- A fedőben kialakult anyagveszteség nagysága (térfogata) megegyezik-e a felszínen kialakult depresszió térfogatával?
- Ha nem, mi okozza az eltérést?
- A fedő felszínén kialakult depresszió paramétereit hogyan befolyásolja a fedőréteg vastagsága, a kürtő átmérője, a kürtő alatti tér nagysága, illetve a fedő szemcsemérete?
- Hogyan lehet definiálni a depresszió képződésben részt vevő ún. aktív zónát (ld. alább), és milyen tényezők befolyásolják annak nagyságát?
- Hogyan lehet leírni a depresszió képződésének folyamatát?
- Van-e kapcsolat a fedő szemcsemérete, illetve a depresszió alakja (hossz/mélység) között?
- Megbecsülhető-e a kísérlet során kialakult depresszió jellemzőinek ismeretében, a természetes körülmények között létrejött dolinák kialakításában szerepet játszó, de nem ismert paraméter mérete?

Módszerek

A szemcsehullatási eszköz



1. ábra: A kísérleti eszköz és annak részei, 1 a fém hasáb, 2. az átfúrt gipsztömböt és a fedőt elválasztó fémlemez, 3. a megemlést biztosító fém sínek

Fig. 1.: The experimental tool and its parts, 1. the metal column, 2. the metal plate what separates the drilled gypsum block and the cover, 3. metal lines what guarantee the lift

A kísérleti eszköz egy fémleppal határolt téglalap alapú hasáb, amelybe a fedőt halmoztuk fel (továbbiakban üledékbe fogadó fémhasáb). Ennek alsó részén helyezkedtek el a feközetet reprezentáló könnyen formálható anyagból (gipsz) készült téglatestek, melyeken különböző átmérőjű csöveket (továbbiakban kürtő) hoztunk létre. Ezekre helyeztük a fémhasába a különböző vastagságú és szemcseméretű légszáraz állapotig szárított és frakcionált fedőüledéket, oly módon, hogy a két szilárd fázis egymástól elszeparálható legyen. Ezt az üledéktároló fémhasáb oldalán becsúsztatott fémlemez segítségével értük el. E fémlemez hirtelen eltávolításával a fedőt ráengedtük a kürtőre, létrehozva a szemcsehullási folyamatot, amely bár nem szuffózió, de ahhoz hasonló jelenség (1. ábra). Azért csak hasonló, mert nem történt víz általi szemcsemozgatás, annyiban viszont hasonlít a szuffózióra, hogy a létrejött anyagihiányos térbe a szemcsék lehullanak. Ezért a felépített rendszert szemcsehullatási eszköznek nevezzük. A szemcsehullatási eszköz oly módon építettük fel, hogy a természetben fellelhető méreteknél kb. százszoros kicsinyítésének feleljen meg.

A szemcsehullatási eszközön az alábbi paraméter értékek mellett folytattuk a szemcsehullatási kísérleteket:

- A kürtő átmérője: 0,5 cm, 1 cm, 1,5 cm.
- A fedő vastagsága: 5 cm, 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm, 30 cm.
- A fedő szemcsemérete: 0,250-0,500 mm, 0,500-1,000 mm, 1,000-2,000 mm.
- A szemcsehullatási eszközt nem emeltük meg (0 cm), majd megemeléssel (2,5 cm és 5 cm) teret alakítottunk ki.

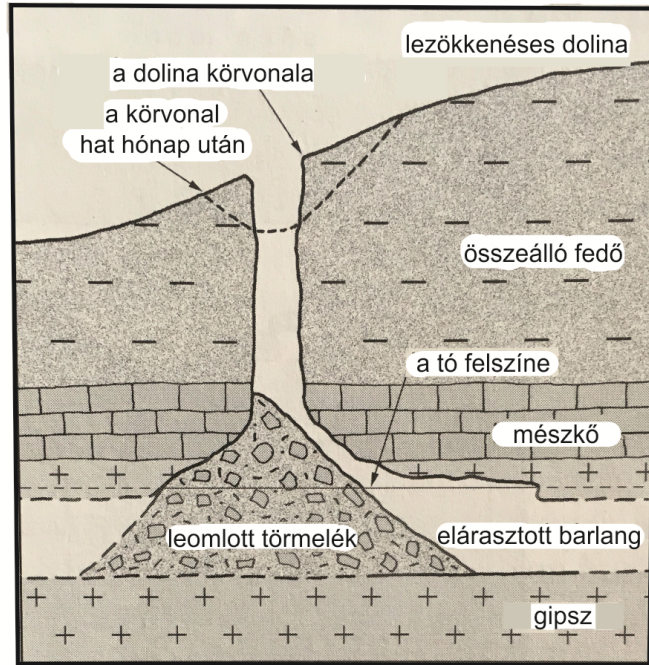
A tér kialakítására azért volt szükség, mivel a természetben is gyakran találkozhatunk olyan karsztos kőzetbe mélyült kürtőkkel, melyek alatt horizontális barlangok vannak (2. ábra).

E négy paraméter különböző nagyságú értékeinek kombinálásával összesen 162 kísérletben tanulmányoztuk a szemcsehullás jelenségét. Mindegyik esetben mértük a fedőréteg felszínének általános süllyedését, a kialakult depresszió átmérőjét és mélységét valamint a kürtőn áthullott anyag térfogatát. A mérések adataiból további paramétereket számoltunk. Ezek az alábbiak:

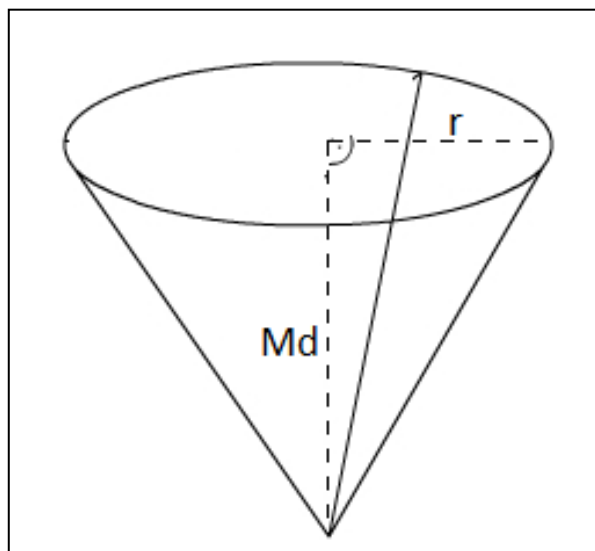
- Depresszió térfogat (cm^3)

$$V_d = \frac{1}{3} * \pi * r^2 * M_d$$

ahol V_d a depresszió térfogata (cm^3), r a depresszió sugara (cm), M_d a depresszió mélysége (cm). A kialakult depressziókat forgáskúp alakúnak tekintettük, így a térfogat kiszámítása a forgáskúp térfogatának kiszámítására használatos képlettel történt (3. ábra).



2. ábra: Horizontális barlangrendszer egy lezökkenéses dolina alatt (Waltham et al. 2005 nyomán)
 Fig. 2.: Horizontal cave system under a dropout doline (Waltham et al. 2005)



3. ábra: A létrejött depresszió elvi ábrája, r . a depresszió sugara, Md . a depresszió mélysége
 Fig. 3.: Theoretical figure of the created depression, r . radius of the depression, Md . depth of the depression

- Depresszió alakja (O):

$$O = \frac{2r}{M_d},$$

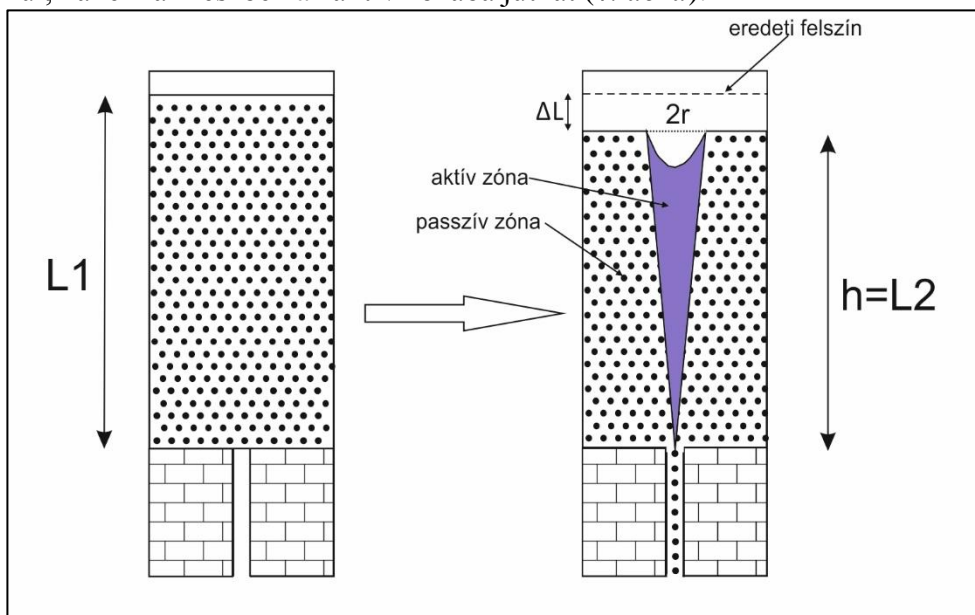
ahol r a depresszió sugara (cm), M_d a depresszió mélysége (cm) (3. ábra).

- A depresszió képződésében részt vevő aktív zóna ($V_{aktív\ zóna}$) nagysága:

$$V_{aktív\ zóna} = \frac{1}{3} \pi * r^2 * h,$$

ahol r a létrejött depresszió sugara (cm), h a kísérlet végén mért fedővastagság nagysága cm-ben (4. ábra).

A modellezés során megállapítottuk, hogy a depressziók képződésekor a fedőben létrejön egy ún. aktív- és egy passzív zóna. Az aktív zóna a fedő azon része, ahonnan anyag távozik el közvetlenül a kürtőbe, a passzív zóna pedig az a tartomány, ahonnan az anyag nem kerül a kürtőbe közvetlenül, hanem az részben az aktív zónába juthat (4. ábra).



4. ábra: Az aktív zóna értelmezése, $L1$. a fedő vastagsága a kísérlet kezdetén, $h=L2$. a fedő vastagsága a kísérlet befejeztével, $2r$. a depresszió átmérője, ΔL a fedő felszínének süllyedése

Fig. 4.: Interpretation of the active zone, $L1$. thickness of the cover before the experiment, $h=L2$. thickness of the cover after the experiment, $2r$. diameter of the depression, ΔL subsidence of the cover's surface

- Az aktív zóna nagysága az eredeti térfogathoz viszonyítva ($V_{az\%}$):

$$V_{az\%} = \frac{V_{az}}{V_1} * 100,$$

ahol V_{az} az aktív zóna térfogatának nagysága (cm^3), V_1 a fedő eredeti térfogata (cm^3), melyet úgy kaptunk, hogy a kísérleti eszközbe helyezett fedő térfogatát számítottuk.

- A fedett karsztos depressziók egyéb, nem ismert paramétereinek becslése:

A becsléshez hányadosokat képeztünk a következő módon:

- A modellkísérletben kialakult depresszió mélységét elosztottuk a modellkísérletben szereplő fedővastagság értékével. A hányados, a kicsinyítés mértéke és a természetes depressziók mélységének ismeretében számítható a kialakulásban szerepet játszó fedővastagság.
- a modellkísérletben kialakult depresszió átmérőjét elosztottuk a modellkísérletben szereplő fedővastagság értékével. A hányados, a kicsinyítés mértéke és a természetes depressziók átmérőjének ismeretében számítható a kialakulásban szerepet játszó fedővastagság.

Eredmények

I. táblázat
Table I.

A mérések adataiból létrehozott adathalmaz egy részlete (1).
A part of the data set, made by the data of the experiments (1).

Emelés (cm)	Dk (cm)	Dsz (mm)	L1 (cm)	ΔL (cm)	ΔV (cm ³)	2r (cm)	Md (cm)	Végbement?	A depresszió térfogata (cm ³)
2,5	0,5	0,250-0,500	5	0,4	44	7,5	2,5	igen	36,8
			10	0,8	43	5	2	igen	13,1
			15	1	42	3	1,5	igen	3,5
			20	1	42	1	0,5	igen	0,1
			25	1,2	43	n.a.	n.a.	igen	0
			30	1,3	44	n.a.	n.a.	igen	0
		0,500-1,000	5	0,4	14	1	0,5	igen	0,1
			10	0,3	10	n.a.	n.a.	nem	0
			15	0,4	11	n.a.	n.a.	nem	0
			20	0,3	11	n.a.	n.a.	nem	0
			25	0,2	10	n.a.	n.a.	nem	0
			30	0,2	10	n.a.	n.a.	nem	0
		1,000-2,000	5	0	0	n.a.	n.a.	nem	0
			10	0	0	n.a.	n.a.	nem	0
			15	0	0	n.a.	n.a.	nem	0
			20	0	0	n.a.	n.a.	nem	0
			25	0	0	n.a.	n.a.	nem	0
			30	0	0	n.a.	n.a.	nem	0

.Dk. kürtőátmérő, Dsz. szemcsefrakciók, L1. a fedő vastagsága a kísérlet kezdetén, ΔL . a fedő vastagságának csökkenése, ΔV . az áthullott anyag mennyisége, 2r. a depresszió átmérője, Md. a depresszió mélysége
Dk. diameter of the chimney, Dsz. soil fractions, L1. thickness of the cover at the beginning of the experiment, ΔL . the amount of the decrease of the cover's thickness, ΔV . the amount of the passed soil, Md. depth of the depression

II. táblázat
Table II.

A mérések adataiból létrehozott adathalmaz egy részlete (2).
A part of the data set, made by the data of the experiments (2).

Emelés (cm)	Dk (cm)	Dsz (cm)	L1 (cm)	ΔL (cm)	ΔV (cm ³)	2r (cm)	Md (cm)	Végbement?	A depresszió térfogata (cm ³)
2,5	1	0,250-0,500	5	0,4	61	9	2,8	igen	59,3
			10	0,5	63	8	2,2	igen	36,8
			15	0,5	63	7	2	igen	25,6
			20	0,9	55	2,5	1	igen	1,6
			25	1	55	1	0,5	igen	0,1
			30	1,2	62	n.a.	n.a.	igen	0
		0,500-1,000	5	0,8	54	5	2,5	igen	16,3
			10	1	56	2	1,5	igen	1,5
			15	1,3	54	n.a.	n.a.	igen	0
			20	1,2	55	n.a.	n.a.	igen	0
			25	1,2	55	n.a.	n.a.	igen	0
			30	1	55	n.a.	n.a.	igen	0
		1,000-2,000	5	0,5	8	1	0,5	nem	0,1
			10	0,3	4	n.a.	n.a.	nem	0
			15	0,1	2	n.a.	n.a.	nem	0
			20	0,2	4	n.a.	n.a.	nem	0
			25	0,1	2	n.a.	n.a.	nem	0
			30	0,1	2	n.a.	n.a.	nem	0

Dk. kürtőátmérő, Dsz. szemcsefrakciók, L1. a fedő vastagsága a kísérlet kezdetén, ΔL . a fedő vastagságának csökkenése, ΔV . az áthullott anyag mennyisége, 2r. a depresszió átmérője, Md. a depresszió mélysége
Dk. diameter of the chimney, Dsz. soil fractions, L1. thickness of the cover at the beginning of the experiment, ΔL . the amount of the decrease of the cover's thickness, ΔV . the amount of the passed soil, Md. depth of the depression

A feküben kialakított anyagiány és a fedő felszínén keletkezett depresszió térfogatának kapcsolata

A szemcsehullatások során a fedő felszínén két jelenség játszódik le: a felszín teljes kiterjedésben megsüllyed, valamint annak egy részén depresszió képződik. A mérések adatai alapján azt tapasztaltuk, hogy a fedőn kialakult depresszió térfogata nem egyezik az áthullott anyag térfogatával (I., II., III. táblázatok). Az áthullott anyag térfogata minden esetben nagyobb, mint a fedő felszínén kialakult depresszió térfogata. A fedő vastagságának csökkenésével a depresszió térfogata egyre inkább megközelíti az áthullott anyag térfogatát, viszont soha el nem éri annak nagyságát. Így 20 cm-es fedővastagságnál, 0,5 cm-es kürtőátmérőnél a legkisebb szemcseméretet használva

a lehullott anyag mennyisége 42 cm^3 a depresszió térfogata $0,1 \text{ cm}^3$. Míg a fedővastagságot változtatva az adatok a következőképpen alakulnak: 15 cm esetében az áthullott anyag mennyisége 42 cm^3 , a depresszió térfogata $3,5 \text{ cm}^3$. 10 cm esetében az áthullott anyag mennyisége 43 cm^3 , a depresszió térfogata $13,1 \text{ cm}^3$. 5 cm-es fedővastagság érték mellett az áthullott anyag térfogata 44 cm^3 , a depresszió térfogata $36,8 \text{ cm}^3$ (I. táblázat).

III. táblázat
Table III.

A mérések adataiból létrehozott adathalmaz egy részlete (3).
A part of the data set, made by the data of the experiments (3).

Emelés (cm)	Dk (cm)	Dsz. (mm)	L1 (cm)	ΔL (cm)	ΔV (cm ³)	2r (cm)	Md	Végbement?	A depresszió térfogata (cm ³)
2,5	1,5	0,250-0,500	5	0,2	84	9,5	2,8	igen	66,1
			10	0,4	83	8	3	igen	50,2
			15	0,4	84	8	2,5	igen	41,8
			20	0,6	88	7	3	igen	38,4
			25	0,8	85	4,5	2,8	igen	14,8
			30	0,9	86	3	1,5	igen	3,5
		0,500-1,000	5	0,6	78	7	2,8	igen	35,9
			10	0,8	78	6	2,5	igen	23,5
			15	0,8	77	4	2,2	igen	9,2
			20	0,9	78	3,8	0,5	igen	1,8
			25	1,1	78	n.a.	n.a.	igen	0
			30	1	78	n.a.	n.a.	igen	0
		1,000-2,000	5	0,4	68	7	3	igen	38,4
			10	0,6	67	2,5	2	igen	3,2
			15	1,3	67	n.a.	n.a.	igen	0
			20	1,2	68	n.a.	n.a.	igen	0
			25	1	68	n.a.	n.a.	igen	0
			30	0,8	68	n.a.	n.a.	igen	0

Dk. kürtőátmérő, Dsz. szemcsefrakciók, L1. a fedő vastagsága a kísérlet kezdetén, ΔL . a fedő vastagságának csökkenése, ΔV . az áthullott anyag mennyisége, 2r. a depresszió átmérője, Md. a depresszió mélysége
Dk. diameter of the chimney, Dsz. soil fractions, L1. thickness of the cover at the beginning of the experiment, ΔL . the amount of the decrease of the cover's thickness, ΔV . the amount of the passed soil, Md. depth of the depression

A különböző paraméterek értékeinek hatása a depresszió képződésére

A 0,5 cm-es kürtőátmérő esetében csak a kisebb szemcsékből felépített fedőnél ment végbe az anyaghullás. 1 cm-es kürtőátmérőnél már a közepes szemcsékből felépített fedő esetében is tapasztalható volt e folyamat. 1,5

cm-es kürtőátmérővel felépített modellnél már a legnagyobb szemcseméretet használva is végbement az anyag hullás folyamata. Tehát a kürtő átmérőjének növekedése lehetővé teszi a nagyobb szemcséből felépülő fedő esetében is az anyag hullást és így a depresszió kialakulását. Néhány mérésnél olyat is tapasztaltunk, hogy az anyag hullásra együttesen hatással van a kürtőátmérő és a fedővastagság. Így pl. 0,5 cm-es kürtőátmérőnél és 5 cm-es fedővastagságnál lejátszódott az anyag hullás folyamata, viszont 10 cm-es és ennél nagyobb fedővastagság értékeknél nem. Tehát ugyanakkora kürtőátmérőnél a kis fedővastagság esetében az anyag hullás végbement, nagy fedővastagság esetében pedig vagy be sem indult, vagy a kürtő az anyag hullás során eltömődött (*I. táblázat*).

Ha a kürtőátmérő 1,5 cm-es a fedő pedig 5 cm vastag, akkor $66,1 \text{ cm}^3$ -es térfogatú depresszió alakul ki. Ugyanilyen kürtőátmérőnél 10 cm-es fedővastagság esetében $50,2 \text{ cm}^3$ -es depresszió képződik. Az előbbivel ellentétben (ahol a kürtő 1 cm-es volt) 1,5 cm-es kürtőátmérő esetében már a 30 cm-es fedővastagsággal felépített modellen is alakult ki depresszió (*III. táblázat*).

Ha a szemcseméret hatását vesszük figyelembe, 1,5 cm-es kürtőnél és 5 cm vastag fedőnél $38,4 \text{ cm}^3$ -es térfogatú depresszió alakul ki, ha a legnagyobb (1,0-2,0 mm) szemcsét használjuk. Ha a fedőréteg vastagsága ugyanilyen paraméterek mellett 10 cm, akkor $3,2 \text{ cm}^3$ -es térfogatú depresszió képződik. Ha a fedővastagság ugyanilyen paraméterek mellett 10 cm-nél nagyobb, akkor a nagy szemcsét használva nem alakul ki depresszió. Ha a modellkísérletben ugyanilyen paraméterek mellett a legkisebb szemcséjű fedő vesz részt, akkor a 30 cm-es fedővastagságnál is alakult ki egy $3,5 \text{ cm}^3$ -es térfogatú depresszió (*III. táblázat*).

A szemcsehullatási eszköz megemelése nélkül csak abban az esetben képződtek depressziók, ha a modellkísérletben a fedővastagság szerepe a lehető legkisebb volt. A szemcsehullatási eszköz megemelésével teret alakítottunk ki, megnövelve így a maximálisan áthullni képes anyag mennyiségét. Így már bizonyos esetekben nem csak a legkisebb fedővastagság esetében képződtek depressziók, hanem akár a maximális fedővastagság értéket használva is (*III. táblázat*).

Akkor, ha az összes paramétert együtt vizsgáljuk, akkor pl. ha a kürtőátmérő 1,5 cm, a szemcseméret 0,250-0,500 mm, a fedővastagság 30 cm, akkor $3,5 \text{ cm}^3$ térfogatú méretű depresszió alakul ki. Ha viszont a kürtő 1 cm átmérőjű a többi paraméter pedig változatlan akkor nem alakul ki depresszió a fedő felszínén. Hasonlóképpen akkor sem alakul ki, ha a kürtő 1,5 cm átmérőjű, de a szemcseméret nagyobb (1,0-2,0 mm) (*II, III. táblázatok*).

Az aktív zóna és annak befolyásoló tényezői

Aktív zónáról csak abban az esetben beszélhetünk, amikor a kísérlet során depresszió képződött a fedőn. Ha nem képződött, akkor a fedő egész térfogata a passzív zónába tartozik. Az aktív zóna térfogatának nagysága önmagában nem ad pontos képet arról, hogy az milyen mértékben növekedik a fedővastagság függvényében, ezért az aktív zóna nagyságát az adott fedővastagsághoz viszonyítottuk és annak százalékos értékét vettük alapul.

IV. táblázat
Table IV.

*A mérések eredményeiből létrehozott adathalmaz egy részlete (4).
A part of the data set, made by the data of the experiments.(4)*

Emelés (cm)	Dk (cm)	Dsz (cm)	L1 (cm)	ΔL (cm)	ΔV (cm ³)	2r	Md	Vaktív zóna (cm ³)	Vd (cm ³)	%-os viszonyítás
2,5	0,5	0,250-0,500	5	0,4	44	7,5	2,5	67,7	36,8	11,1
			10	0,8	43	5	2	60,2	13,1	4,9
			15	1	42	3	1,5	32,9	3,5	1,7
			20	1	42	1	0,5	4,9	0,1	0,2
			25	1,2	43	n.a.	n.a.	0	0	0
			30	1,3	44	n.a.	n.a.	0	0	0
		0,500-1,000	5	0,4	14	1	0,5	1,2	0,1	0,1
			10	0,3	10	n.a.	n.a.	0	0	0
			15	0,4	11	n.a.	n.a.	0	0	0
			20	0,3	11	n.a.	n.a.	0	0	0
			25	0,2	10	n.a.	n.a.	0	0	0
			30	0,2	10	n.a.	n.a.	0	0	0
		1,000-2,000	5	0	0	n.a.	n.a.	0	0	0
			10	0	0	n.a.	n.a.	0	0	0
			15	0	0	n.a.	n.a.	0	0	0
			20	0	0	n.a.	n.a.	0	0	0
			25	0	0	n.a.	n.a.	0	0	0
			30	0	0	n.a.	n.a.	0	0	0

Dk. a kürtő átmérője, Dsz. a szemcsefrakciók, L1. a fedő vastagsága a kísérlet kezdetén, ΔL . a fedő vastagságának csökkenése, ΔV . az áthullott anyag térfogata, 2r. a depresszió sugara, Md. a depresszió mélysége. Vd. a depresszió térfogata.

Dk. the diameter of the chimney, Dsz. soil fractions, L1. thickness of the cover at the beginning of the experiment, ΔL . the amount of the decrease of the cover's thickness, ΔV . the amount of the passed soil, 2r the diameter of the depression, Md. depth of the depression, Vd. volume of the depression.

A mérések eredményei alapján az aktív zóna nagyságára mind a fedővastagság, mind a kürtőátmérő, mind a fedő szemcsemérete, mind a kürtő

alatti tér nagysága hatással van. A fedővastagság, a kürtőátmérő és a fedő szemcseméretének csökkenése az aktív zóna nagysága növeli, míg a kürtő alatti tér csökkenése azt kisebbíti.

Az aktív zóna térfogatának nagysága 0,5 cm-es kürtőátmérő esetében a legkisebb szemcseméretet használva a fedő vastagságának csökkenésével folyamatosan növekszik (IV. táblázat). 1 és 1,5 cm-es kürtőátmérő esetében ugyancsak a legkisebb szemcseméretet használva az aktív zóna térfogatának nagysága a fedő vastagságának csökkentésével egy bizonyos értékig növekszik, utána csökkenni kezd. E csökkenés ellenére a fajlagos aktív zóna nagysága a fedő vastagságának csökkentésével folyamatosan növekszik (V, VI. táblázatok).

V.táblázat:
Table V.

A mérések eredményeiből létrehozott adathalmaz egy részlete (5).
A part of the data set, made by the data of the experiments (5).

Emelés (cm)	Dk (cm)	Dsz (cm)	L1 (cm)	ΔL (cm)	ΔV (cm ³)	2r (cm)	Md (cm)	V aktív zóna (cm ³)	Vd (cm ³)	%-os viszonyítás
2,5	1	0,250-0,500	5	0,4	61	9	2,8	97,5	59,3	15,9
			10	0,5	63	8	2,2	159,1	36,8	13,1
			15	0,5	63	7	2	186,0	25,6	10,1
			20	0,9	55	2,5	1	31,2	1,6	1,2
			25	1	55	1	0,5	6,2	0,1	0,2
			30	1,2	62	n.a.	n.a.	0	0	0
		0,500-1,000	5	0,8	54	5	2,5	27,4	16,3	4,4
			10	1	56	2	1,5	9,4	1,5	0,7
			15	1,3	54	n.a.	n.a.	0	0	0
			20	1,2	55	n.a.	n.a.	0	0	0
			25	1,2	55	n.a.	n.a.	0	0	0
			30	1	55	n.a.	n.a.	0	0	0
		1,000-2,000	5	0,5	8	1	0,5	1,1	0,1	0,1
			10	0,3	4	n.a.	n.a.	0	0	0
			15	0,1	2	n.a.	n.a.	0	0	0
			20	0,2	4	n.a.	n.a.	0	0	0
			25	0,1	2	n.a.	n.a.	0	0	0
			30	0,1	2	n.a.	n.a.	0	0	0

Dk. a kürtő átmérője, Dsz. a szemcsefrakciók, L1. a fedő vastagsága a kísérlet kezdetén, ΔL . a fedő vastagságának csökkenése, ΔV . az áthullott anyag térfogata, 2r. a depresszió sugara, Md. a depresszió mélysége. Vd. a depresszió térfogata.

Dk. the diameter of the chimney, Dsz. soil fractions., L1. thickness of the cover at the beginning of the experiment, ΔL . the amount of the decrease of the cover's thickness, ΔV . the amount of the passed soil, 2r the diameter of the depression, Md. depth of the depression, Vd. volume of the depression.

A mérések eredményeiből létrehozott adathalmaz egy részlete (6).
A part of the data set, made by the data of the experiments (6).

Emelés (cm)	Dk (cm)	Dsz (cm)	L1 (cm)	ΔL (cm)	ΔV (cm ³)	2r (cm)	Md (cm)	V aktív zóna (cm ³)	Vd (cm ³)	%-os viszonyítás
2,5	1,5	0,250-0,500	5	0,2	84	9,5	2,8	113,4	66,1	18,5
			10	0,4	83	8	3	160,8	50,2	13,1
			15	0,4	84	8	2,5	244,6	41,8	13,3
			20	0,6	88	7	3	248,8	38,4	10,1
			25	0,8	85	4,5	2,8	128,2	14,8	4,1
			30	0,9	86	3	1,5	68,5	3,5	1,8
		0,500-1,000	5	0,6	78	7	2,8	56,4	35,9	9,2
			10	0,8	78	6	2,5	86,7	23,5	7,1
			15	0,8	77	4	2,2	59,4	9,2	3,2
			20	0,9	78	3,8	0,5	72,2	1,8	2,9
			25	1,1	78	n.a.	n.a.	0	0	0
			30	1	78	n.a.	n.a.	0	0	0
		1,000-2,000	5	0,4	68	7	3	59,0	38,4	9,6
			10	0,6	67	2,5	2	15,3	3,2	1,2
			15	1,3	67	n.a.	n.a.	0	0	0
			20	1,2	68	n.a.	n.a.	0	0	0
			25	1	68	n.a.	n.a.	0	0	0
			30	0,8	68	n.a.	n.a.	0	0	0

Dk. a kürtő átmérője, Dsz. a szemcsefrakciók, L1. a fedő vastagsága a kísérlet kezdetén, ΔL . a fedő vastagságának csökkenése, ΔV . az áthullott anyag térfogata, 2r. a depresszió sugara, Md. a depresszió mélysége. Vd. a depresszió térfogata.

Dk. the diameter of the chimney, Dsz. soil fractions., L1. thickness of the cover at the beginning of the experiment, ΔL . the amount of the decrease of the cover's thickness, ΔV . the amount of the passed soil, 2r the diameter of the depression, Md. depth of the depression, Vd. volume of the depression.

Megvitatás

A feküben kialakított anyagihiány és a fedő felszínén keletkezett depresszió térfogatának kapcsolata

Mivel a feküben kialakított anyagihiány nagysága és a depresszió térfogatának nagysága nem egyezik egymással, ezért azt feltételezzük, hogy a fedőben más folyamatok is lejátszódnak a depresszió képződésekor, pl. a fedő anyagának tömörödése. Ez azért lehetséges, mert a szemcselehullás miatt a szemcsék közelebb kerülnek egymáshoz.

A lehullott anyag térfogatának mennyisége és a depresszió térfogatának nagysága közötti eltérést az is okozza, hogy az lehullás kezdetén a fedő hézagterfogata nő, mert onnan anyag kerül az aktív zónába, amit tömörödés követ (4. ábra). E tömörödés által a szemcsék közelebb kerülnek egymáshoz, ami a fedő areális süllyedését eredményezi. A fedő tömörödésének mértéke a szemcseméret növelésével növekszik, mivel nagy szemcse esetében a szemcsék egymástól távolabb helyezkednek el, mint a kis szemcséből felépült fedő esetében. A fedő tömörödésének mértéke a fedővastagság növelésével is nő, ugyanis vastagabb fedő esetében nagyobb a fedő térfogata, ennél fogva nagyobb a szemcsék közötti tér nagysága. Ezt bizonyítja, hogy a fedő csökkentésével csökken az areális süllyedés. Azért csökken az areális süllyedés, mert a kevesebb anyag kevésbé képes tömörödni.

Az egyes paraméterek nagyságának hatása a depresszió méretére

A depresszió méretére, illetve kialakulásának lehetőségére hatással van a kürtő átmérője, a fedő vastagsága és szemcsemérete, valamint a kürtő alatti tér nagysága. A depresszió kialakulására legnagyobb hatása az anyagihiányos tér nagyságának van. A másik kialakulást befolyásoló tényező a kürtő átmérője. E paraméter minél nagyobb annál nagyobb eséllyel képződhet depresszió. A harmadik befolyásoló tényező a fedőt felépítő szemcsék nagysága. A kis szemcsék könnyebben hullanak át a kürtőn és kisebb eséllyel tömítik el azt, lehetővé téve így az anyaghullást. A depresszió kialakulásának lehetőségét tekintve a fedő vastagsága is jelentős kialakító tényező. Minél nagyobb a fedő vastagsága, annál kisebb valószínűséggel képződhet depresszió. E tényezők önmagukban is és egymással kapcsolatban lévő hatásrendszerben együttesen hatnak a depresszió képződésére. Egyik paraméter hatása sem vizsgálható elkülönítve önmagában. Ugyanis ha a kürtő alatti tér nagysága kicsi, de a kürtő átmérője nagy, a fedőt felépítő szemcse nagysága kicsi és mindezen paraméterek kis fedővastagsággal párosulnak, még alakulhat ki depresszió. Ebben az esetben a kürtő anyaggal való kitöltődése akkora anyagihiányt generál, ami elég egy kisméretű forma kialakulásához. A kürtő alatti tér megnövelésével viszont akkor is létrejöhet, ha a többi paraméter értéke kevésbé kedvező a kialakulásához (I, II, III. táblázatok). A kürtő átmérőjének nagysága a fedő szemcseméretével áll szoros kapcsolatban. Ugyanis, ha előbbi kicsi, utóbbi pedig nagy, akkor lehet bármekkora a kürtő alatti tér, az anyaghullás be sem fog indulni, mert a nagy szemcsék eltömítik a kürtőt, meggátolva így az anyaghullást.

A depresszió méretét egyértelműen meghatározza a lehetséges anyagvesztés nagysága. Ez főként a kürtő alatti tér nagyságától függ. A

depresszió térfogatára legnagyobb befolyással a fedővastagság van. A depressziók mérete a fedő vastagságának csökkenésével egyenes arányban növekszik. Ez arra vezethető vissza, hogy ugyanakkora térfogatú anyagvesztés kisebb fedővastagságnál egyre kisebb térfogatú fedőre terjed át, tehát az anyagvesztés relatíve nagyobb lesz, miután vékonyabb fedőnél kevesebb anyag kerülhet a passzív zónából az aktívba. A nagyobb relatív anyagvesztésre a rendszer nagyobb hézagterfogat-növekedéssel reagál, ami relatíve nagyobb mértékű tömörödést és így nagyobb mértékű süllyedést eredményez.

Az aktív zóna és annak befolyásoló tényezői

Az aktív zóna térfogatának nagysága a fedővastagság csökkentésével folyamatosan csökken (IV, V, VI. táblázatok). Ugyanis az anyagelszállítás következtében nő a fedő hézagterfogata, amit tömörödés követ. A hézagterfogat növekedése nagyobb lesz, mint az áthullott anyag mennyisége. Minél kisebb a fedő vastagsága, ez a jelenség annál inkább érvényesül, vagyis a hézagterfogat növekedését nagyobb arányú tömörödés követi.

A depresszióképződés folyamata

Az aktív zóna területén végbemenő süllyedés okozza a depresszió kialakulását. A depresszió képződésének folyamatát két részre különíthetjük: a szélesedés és a mélyülés. A folyamat elején egy általános süllyedés játszódik le, majd az anyaghiány egyre kisebb részre lokalizálódik. Itt először mélyülés történik. A mélyülés (süllyedés) okozója az anyagelszállítás, valamint a hézagterfogat-növekedést követő tömörödés. A mélyülést gátolja, a passzív zónából az aktív zónába kerülő anyag. Mélységének növekedése által a háttároló oldallejtőinek meredeksége fokozatosan növekszik. Amikor az oldallejtők meredeksége egy bizonyos értéket meghalad, akkor az eddig kis kiterjedésű depresszió szélesedni kezd azáltal, hogy a pereméről az anyag a depresszió talpának irányába elmozdul. Ilyenkor a mélyülése megáll, sőt mélysége akár csökkenhet is. A különböző szemcseméreteknek más és más rézsűszögük van. Így a kisebb szemcséből felépülő fedő esetében a mélyülés és a szélesedés mértéke nagyjából megegyező. Ebben az esetben alakulnak ki a szinte tökéletes tölcser alakú depressziók. A nagy szemcséből felépülő fedő esetében a szemcsék nehezebben mozdulnak el egymáson, így mélységéhez képest kevésbé széles depresszió is kialakulhat.

Az általunk vizsgált folyamatot módosíthatja pl. a szemcsék közé került víz mennyisége, a szemcsék alakja, minősége, stb. Ezek azonban nem képezték a vizsgálatunk tárgyát.

Becslés az utánsüllyedéssel dolinák méretét és a kialakulást okozó paraméterek mérete közötti kapcsolatra

A modellkísérletnél a depresszió méreteiből (mélység és átmérő) és a fedő vastagságából hányados számítható. A modellkísérlet depresszióinak mérete mintegy százszor kisebb, mint a természetben előforduló dolináké. A hányados értékéből megállapítható a természetes dolináknál (méretük ismeretében) várható fedővastagság, ha azt tekintjük, hogy a modellkísérlet depressziója ahány cm-es nagyságú, a természetes dolina annyi m-es méretű. A hányados értékeket 1,5 cm-es kürtőátmérőre számítottuk, amelynek így a természetes dolináknál 1,5 m-es átmérő felel meg. A következő kapcsolatokat vizsgáltuk:

- a depresszió mélysége és környezetében a fedő vastagsága,
- a depresszió átmérője és környezetében a fedő vastagsága.

A depresszió mélységhez tartozó becsült fedővastagság adatokat a VII táblázatban közöljük.

VII. táblázat
Table VII.

*A depresszió mélységéből következtetett becslések a fedő vastagságára.
Estimating the cover's thickness suggested to the depth of the depression.*

A természetben mért depresszió mélység (m)	A modellkísérlet depressziójának mélysége (cm)	A fedővastagság a modellkísérletben (cm)	A fedő vastagságának és a depresszió mélységének hányadosa a modellkísérlet alapján	Számított fedővastagság a természetes depresszióknál a megadott értékek esetén (m)
2,5-3	2,5-3	5	1,78	4,5-5,5
2-2,5	2-2,5	10	3,3	6,6-8,3
1,5-2	1,5-2	15	6	9-12
1-1,5	1-1,5	20	10	10-15
kisebb mint 1	kisebb mint 1	nagyobb mint 20	20	nagyobb mint 20

A depresszió átmérője alapján a fedővastagságra vonatkozó becsült adatokat a VIII táblázatban közöljük.

A fentebb bemutatott értékek (VII, VIII. táblázatok) csupán az előbbieken bemutatott modellkísérlet eredményeiből következnek. Ezért ennek során nem számoltunk olyan – a természetben meglévő – módosító tényezőkkel, melyek az utánsüllyedéssel dolinák méretére hatással vannak. Ilyen pl. a fedett karsztos depressziók kora, a területre jellemző csapadékmennyi-

ség, a fekézőzet jellege, a talajlevegő CO₂ mennyisége stb. Mindazonáltal ezek az adatok jó iránymutatásként szolgálhatnak a fedő vastagságának megbecslésére, geofizikai mérések alkalmazása nélkül.

VIII. táblázat
Table VIII.

*A depresszió átmérőjéből következtetett becslések a fedő vastagságára
Estimating the cover's thickness suggested to the diameter of the depression.*

A természetben mért depresszió átmérő (m)	A modellkísérlet depressziójának átmérője (cm)	A fedővastagsága modellkísérletben (cm)	A fedő vastagságának és a depresszió átmérőjének hányadosa a modellkísérlet alapján	Számított fedővastagság a természetes depresszióknál a megadott értékek esetén (m)
7-8	7-8	5	0,5	3,5-4
6-7	6-7	10	1,25	7,25-7,5
5-6	5-6	15	1,9	9,5-11,4
4-5	4-5	20	2,8	11,2-14
kisebb mint 4	kisebb mint 4	nagyobb mint 20	5,5	nagyobb mint 22

Következtetés

A modellkísérletben a depresszióképződést befolyásoló tényezők a kürtő átmérőjének és hosszának értéke, a fedő vastagsága, a fedőt felépítő szemcsék mérete. E paraméterek nem csak külön-külön, hanem együttesen is hatnak a depresszió kialakulására és a létrejövő forma méretére. Modellkísérleteink szerint a depresszióképződésnek több feltétele van. Depresszió csak akkor alakul ki, ha ezek mindegyike egy bizonyos küszöbértéket elér. Ezért, a depresszióképződés szempontjából kedvezőtlen paraméter lehet a kicsi kürtőátmérő, a nagy szemcseméret és a nagy fedővastagság. A modellkísérlet depressziója az aktív zóna területén alakul ki süllyedéssel. A süllyedést az anyagvesztés és az ezzel együtt járó hézagterefogat-növekedést követő tömörödés okozza. A modellkísérletben vizsgált paraméterek arányainak ismeretében a természetes utánsüllyedéssel dolinak méretének a figyelembevételével becsülhető a fedővastagság vagy a kürtőátmérő, ha figyelembe vesszük, hogy modellünk százszoros kicsinyítésű.

IRODALOM

- AREVALO, R., ZIRUGIEL, I. (2015): Clogging of granular materials in silos: effect of gravity and outlet size. - *Soft Matter*, 12. pp. 123-130.
- CURL, R. L. (1966): Scallop and flutes – *Transactions Cave Research Group Great Britain*, 7. pp. 121-160.

- DEÁK GY., PÉNTEK K., FÜZES I., VETÉSI-FOITH SZ., VERESS M.* (2017): A karsztosodás során kialakult törmelékzóna modellezése. – *Karsztfejlődés XXII.* pp. 61-75. DOI:10.17701/17.61-75.
- DEÁK GY., SZEMES M., VERESS M.* (2015): A gipsz fedőjének vízmozgásai fizikai analógmodelleken – *Karsztfejlődés XX.* pp.215-229. DOI: 10.17701/15.215-229.
- DEÁK GY., VETÉSI-FOITH SZ., PÉNTEK K.* (2018): A telítődési szint helyzete és a felszínfejlődés vizsgálata modellkísérlettel. – *Karsztfejlődés XXIII.* pp. 31-43. DOI:10.17701/18.31-43.
- DZULINSKY, S., GIL, E., RUDNICKI, J.* (1988): Experiments on kluftkarren and related lapis forms. *Zeitschrift für Geomorphology*, 32 (1), pp. 1-16.
- FABRE, G., NICOD, J.* (1982): Lapiés, modalités et rôle de la corrosion, crypto- karstique – *Phénomèn karstique III, Mémoires et documents de géographie*, 3 pp.115–131.
- GLEW J. R., FORD D. C.* (1980): Simulation study of the development of rillenkarren. – *Earth Surf. Proc.* 5 pp. 25-36.
- QUINIF, Y.* (1973): Contribution a l'étude morphologique des coupoles – *Annales de spéléologie* 28 (4) pp. 565-573.
- VERESS M., PÉNTEK K.* (1996): Theoretical model of surface karstic processes – *Zeitschrift für Geomorphologie* 40. 4. pp. 461-476.
- VERESS M., PIDL K., MANTLER M.* (1998): A gipsz karsztosodásának modellezése laboratóriumi körülmények között. *Szombathelyi Berzsenyi Tanárképző Főiskola Tudományos Közleményei XI. Természettudományok* 6. Szombathely, pp. 147-166.
- VERESS M., GÁRDONYI I., DEÁK GY.* (2014): Fedett karsztosodás vizsgálata fedővel borított gipsztáblán. – *Karsztfejlődés XIX.* pp. 159-171.
- VETÉSI-FOITH SZ.* (2018): Az utánsüllyedéses dolinák kialakulásának vizsgálata modellkísérlettel. – *Karsztfejlődés XXIII.* pp. 85-93.
- WALTHAM, A. C., FOOKES, P. G.* (2003): Engineering classification of karst ground conditions. – *Quarterly Journal Engineering Geology Hydrogeology* 36 pp. 101-118.
- WALTHAM, T., BELL, F., CULSHAW, M.* (2005): *Sinkholes and Subsidence.* Springer, Berlin – Heidelberg, 382 p.
- WILLIAMS, P. W.* (2004): Dolines. – In: GUNN, J. (ed.): *Encyclopedia of Caves and Karst Science.* Taylor and Fitzroy Dearborn, London, New York, pp. 304-310.