

# PAKS2

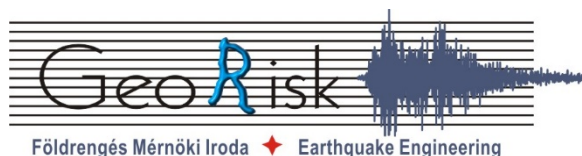
## SZEIZMOLÓGIAI KUTATÁSI PROGRAM

### SZEIZMOTEKTONIKAI MODELL PALEO / SPELEO-SZEIZMOLÓGIAI VIZSGÁLATOK A PAKSI ATOMERŐMŰ TELEPHELY TÁGABB KÖRNYEZETÉBEN FELADATKÓD: 7.2.

Dokumentum azonosító: **GR-P2-010/1 (V011)**

Megrendelő: ÁKMI Kft.  
Megrendelő szerződés száma: P2-001/2015  
Vállalkozó szerződés száma: 0617/2015

Budapest, 2016. január 31.



#### GeoRisk Földrengés Mérnöki Iroda

1221 Budapest, Ringló út 101/B. \* Tel.: (+36 1) 226 4573 (+36 30) 940 4737 \* Fax: (+36 1) 700 2529  
info@georisk.hu \* www.georisk.hu \* Cégj. szám: 01-09-073663 \* Adószám: 10495098-2-43  
Általános felelősségbiztosítás: 95590901343793500 (GENERALI Biztosító)  
BANK: 11722003-20160302 \* IBAN: HU94 1172 2003 2016 0302 0000 0000 \* OTP Bank SWIFT: OTPVHUB

Projekt koordinátor:

Mónus Péter

Szerzők:

Dr. Bokelmann, Götz

Dr. Gribovszki Katalin

Marótiné Dr. Kiszely Márta

Dr. Szeidovitz Győző

Ellenőrizte:



**Dr. Győri Erzsébet, szeizmológus**

Jóváhagyta:



**Mónus Péter, szeizmológus**

© *GeoRisk*

A tanulmány és az abban szereplő adatok, ábrák, térképek a **Szerzők** és a **GeoRisk Földrengés Mérnöki Iroda Kft.** tulajdonát képezik és szerzői jogvédelem alatt állnak.

A tárgyi szerződésben meghatározott célok túlmenő felhasználás csak a tulajdonos előzetes, írásbeli engedélyével lehetséges.

A mű bármilyen átszerkesztése, megcsonkítása vagy megváltoztatása a szerzői jogról szóló törvény 13. § alapján tilos.

A szerzők kifejezetten ragaszkodnak a szerzői jogról szóló törvény 12. § alapján ahhoz, hogy a művön és a műre vonatkozó közleményen szerzőként feltüntetésre kerüljenek.



## TARTALOM

<b>1.</b>	<b>BEVEZETÉS.....</b>	<b>7</b>
<b>2.</b>	<b>CÉLKITŰZÉS ÉS MÓDSZER .....</b>	<b>11</b>
<b>3.</b>	<b>KORÁBBI EREDMÉNYEK BEMUTATÁSA: HAJNÓCZY-, BARADLA- ÉS DOMICA-BARLANGOK.....</b>	<b>13</b>
<b>4.</b>	<b>ÚJ VIZSGÁLATI EREDMÉNYEK: DETREKŐI-ZSOMBOLY.....</b>	<b>17</b>
4.1.	A BARLANG LEÍRÁSA .....	17
4.2.	A VIZSGÁLT SÉRÜLÉKENY, DE SÉRTETLEN ÁLLÓCSEPPKŐ .....	18
4.3.	RONCSOLÁS MENTES <i>IN SITU</i> MÉRÉSEK .....	19
4.4.	AZ ELMÉLETI SZÁMÍTÁSOK ÉS A GEO-MECHANIKAI ÉS RUGALMASSÁGTANI LABORATÓRIUMI MÉRÉSEK EREDMÉNYEI .....	21
4.5.	CSEPPKŐ-KORMEGHATÁROZÁS .....	24
4.6.	A NÖVEKEDŐ CSEPPKŐ ALAKJÁNAK VÁLTOZÁSA AZ IDŐBEN VISSZAFELÉ HALADVA .....	25
4.7.	A FÖLDRENGÉSHULLÁMOK MÉLYSÉG SZERINTI CSILLAPODÁSA.....	26
<b>5.</b>	<b>ÚJ VIZSGÁLATI EREDMÉNYEK: KATERLOCH-BARLANG.....</b>	<b>29</b>
<b>6.</b>	<b>ÚJ, KORÁBBAN NEM ISMERT, VIZSGÁLATI CÉLJAINKRA ALKALMAS CSEPPKÖVEK FELKUTATÁSA: CSODABOGYÓS-BARLANG.....</b>	<b>33</b>
<b>7.</b>	<b>ÚJ, KORÁBBAN NEM ISMERT, VIZSGÁLATI CÉLJAINKRA ALKALMAS CSEPPKÖVEK FELKUTATÁSA: VACSKA- BARLANG A PILISBEN, A MECSEK BARLANGJAI .....</b>	<b>35</b>
<b>8.</b>	<b>ÖSSZEFOGLALÁS .....</b>	<b>37</b>
<b>9.</b>	<b>HIVATKOZÁSOK .....</b>	<b>39</b>



## ÁBRÁK JEGYZÉKE

<b>1.1. ábra:</b> Sérülékeny állócseppkő Grác mellett a Katerloch (Bagolylyuk) barlangban. a) a Katerloch barlang elhelyezkedése, b) a sérülékeny állócseppkő a barlang Fantasy Hall-jában (magassága: 6.5 m, átlagos átmérője: 0.12 m).....	8
<b>1.2. ábra:</b> Vizsgálatainkra alkalmas cseppkő a Kis-Kárpátokban Bécs/Pozsony környezete a) a Detrekői-zsomboly (Plavecka Priepast) elhelyezkedése, b) az állócseppkő (magassága: 4 m, átlagos átmérője: 0.08 m).....	8
<b>1.3. ábra:</b> Vizsgált barlangok Paks 270 km-es környezetén belül. (A piros csillag a paksi NPP helyét mutatja, az ellipszisek pedig a vizsgált barlangokat.).....	9
<b>3.1. ábra:</b> Korábban kutatott sérülékeny álló cseppköveket tartalmazó barlangok Magyarországon. (BC: Baradla-barlang, HC: Hajnóczy-barlang) A térképen található körök a területen kipattant, ismert rengések elhelyezkedését mutatják, a vonalak pedig az aktív törésvonalakat Horváth és szerzőtársai szerint. ....	14
<b>3.2. ábra:</b> A korábban kutatott sérülékeny álló cseppköveket tartalmazó Domicabarlang, és annak Ördöglik barlangterme Szlovákiában.....	14
<b>3.3. ábra:</b> Sérülékeny állócseppkő a Baradla-barlang Olimposz termében. Magassága: 5.1 m, átlagos átmérője: 8.5 cm. (A létra legtetején Surányi Gergely látható.).....	15
<b>3.4. ábra:</b> Sérülékeny állócseppkő a Hajnóczy-barlangban. Magassága: 3.6 m, átlagos átmérője: 5.0 cm. (A fotón a cseppkő mellett Szeidovitz Győző látható.).....	15
<b>3.5. ábra:</b> Sérülékeny állócseppkő A Domicabarlang Ördöglik termében. Magassága: 5.0 m, átlagos átmérője: 5 cm. ....	16
<b>4.1. ábra:</b> A vizsgált barlang, a Detrekői-zsomboly (Plavecká priepast) elhelyezkedése a Kis-Kárpátokban, Szlovákiában (piros háromszög), és az ismert, aktív törésvonalak, továbbá a történelmi és a műszeres földrengések epicentrumai. A fekete vonalakon található különböző jelek a törésvonalak típusára utalnak. A fekete háromszög feltolódást; a fekete négyszög normál vetőt; a fekete nyíl pedig oldaleltolódást jelöl. A két amorf alakú piros vonallal körbehatárolt terület Bécs (Vienna) és Pozsony (Bratislava) fővárosokat szemlélteti. A bal felső sarokban lévő átnézeti térkép az ábrán szereplő terület pozícióját mutatja annak tágabb környezetében. A fekete négyzetek a környező településeket mutatják, míg a fehér négyzetek a környéken található fontosabb objektumokat szemléltetik. ....	18
<b>4.2. ábra:</b> a) A Detrekői-zsomboly északi terme (chamber of dripstones) (Šmída, 2010); b) az északi terem egy másik része a vizsgált állócseppkövel; c) a vizsgált sérülékeny állócseppkő az északi teremben (a fotón Gribovszki Katalin látható a cseppkő sajátfrekvenciájának mérése közben).....	19
<b>4.3. ábra:</b> A vizsgált sérülékeny állócseppkő oszcillációja és spektrális teljesítmény-sűrűsége a gerjesztett cseppkő vibrációjának idősorán ábrázolva.....	20
<b>4.4. ábra:</b> Egyszerű szakítószilárdság teszt egy szabályos mintatestté alakított, Detrekői-zsombolyból származó cseppkődarabon.....	22
<b>4.5. ábra:</b> Computer tomográfias kép egy letört álló cseppkőről a Detrekői-zsombolyból. Kamil Soucek felvétele.....	22

- 4.6. ábra:** Az 1.95 m magas in situ cseppkő oszlop, amit kormeghatározásra használtuk (balra) és a fotó a barlang-teremről az oszlop elhelyezkedésével (Az oszlopcseppkő alsó és felső részén van a fűrt minta elhelyezkedése 0.03 és 1.84 m magasságban.) ..... 24
- 4.7. ábra:** A cseppkő magassága visszamenőleg a múltban (a vízszintes tengelyen az évek növekszenek visszafelé a múltba, a 0 év a jelent jelenti, a függőleges tengelyen pedig a cseppkő aktuális magasságát olvashatjuk le) ..... 25
- 4.8. ábra:** A cseppkő segítségével megállapított kritikus horizontális gyorsulás-érték (CHGA) a múltba visszamenőlegesen kiszámítva, a cseppkő változó magasságát figyelembe véve. A CHGA értékek csökkennek a cseppkő magasságának növekedésével, azaz a jelenhez közelítve egyre sérülékenyebbé válik a cseppkő (a vízszintes tengelyen az évek csökkennek közelítve a jelenhez, a 0 év a jelent jelenti, a függőleges tengelyen pedig az adott cseppkőhöz tartozó aktuális kritikus horizontális gyorsulásértékeket olvashatjuk le) ..... 26
- 4.9. ábra:** A Detrekői-zsomboly térképe (Butáš, 2003), a) Juraj Halama által javított alaprajz (a vastag törött vonal a metszet elhelyezkedését mutatja az alaprajzon) b) keresztmetszet ..... 26
- 4.10. ábra:** A sértetlen, de sérülékeny 4 m magas Detrekői-zsombolyban álló gyertyaszál alakú cseppkő részletes vizsgálatával megkonstruált küszöb-értékek a kritikus horizontális talajgyorsulásra vonatkozóan. A két görbe a felszíni (piros) és a barlangbeli (kék) kritikus értékeket mutatja. A horizontális skála a cseppkő múltbeli magasságait és a múltba visszamenőleges időt jelöli. A 0 idő a jelent szimbolizálja. A kék sáv a mélységi csillapodás bizonytalanságát jelzi. A vertikális tengelyen a gyorsulás-értékek mérhetőek le. A piros görbe feletti terület reprezentálja azokat a gyorsulásértékeket, amiknek hatására a cseppkő már biztosan eltört volna. 100, 1500 és 2500 éveknél olyan valós és feltételezett földrengés-eseményeket jelöltünk, melyek a Detrekői-zsomboly környezetében pattantak ki. .... 27
- 5.1. ábra:** Sérülékeny állócseppkő Grác mellett a Katerloch (Bagolylyuk) barlangban. A sérülékeny állócseppkő a barlang Zauber Reich (A varázsló birodalma) termében található. Magassága: 8.7 m, átlagos átmérője: 7.5 cm. .... 30
- 5.2. ábra:** A 8.7 m magas gyertyaszál alakú cseppkő egy jellemző, gerjesztés hatására mutatott horizontális irányú vibrációja és az abból meghatározott sajátfrekvenciának a felharmónikusai. .... 31
- 6.1. ábra:** A Csodabogyós-barlang Függőkert termének állócseppkövei (forrás: <https://www.bfnp.hu/hu/csodabogyos-barlang-balatonederics>). .... 33
- 6.2. ábra:** A legnyúlánkabb álló cseppkő a balatonedericsi Csodabogyós-barlang Függőkert termében. Magassága: 0.85 m, átlagos átmérője: 5.5 cm. .... 34
- 6.3. ábra:** A Csodabogyós-barlang hosszmetsete (kiterített keresztmetset) (forrás: [.termeszetvedelem.hu](http://termeszetvedelem.hu)) ..... 34
- 8.1. ábra:** A vizsgált álló cseppkövek által meghatározott kritikus horizontális talajgyorsulás értékek a barlangok helyére vonatkozólag a SHARE Modellen 475 éves visszatérési időre és alapközetre meghatározva számtani középértéket figyelembe véve..... 38
- 8.2. ábra:** A vizsgált álló cseppkövek által meghatározott kritikus horizontális talajgyorsulás értékek a barlangok helyére vonatkozólag Tóth et al. (2006) térképen. .... 38

## TÁBLÁZATOK JEGYZÉKE

4.1. Táblázat	A roncsolásmentes <i>in situ</i> mérés eredményei (méretek, sajátfrekvencia) .....	20
4.2. Táblázat	A mechanikai laboratóriumi teszt eredményei.....	23
4.3. Táblázat	A 4.1. táblázat kiegészítve a természetes frekvenciával és a törést okozó horizontális talajgyorsulás eredménnyel az elméleti számítások alapján .....	23
5.1. Táblázat	Az <i>in situ</i> mérések eredményei .....	30
5.2. Táblázat	Az 5.1 táblázat kiegészítve az elméleti sajátfrekvencia és az elméleti kritikus horizontális talajgyorsulás értékekkel .....	31
8.1. Táblázat	Sérülékeny álló cseppkövek segítségével meghatározott kritikus horizontális talajgyorsulások értékei és a valószínűségi földrengés-veszélyeztetettségi számításokból megállapított, 475 éves visszatérési időintervallumra számított várható maximális horizontális gyorsulásértékek .....	37





# 1. BEVEZETÉS

---

A földrengésveszély meghatározása a kis gyakoriságok ( $< 10^{-4}$  /év) tartományában nem könnyű feladat, hiszen hiányzik az ehhez szükséges hosszú időtávra vonatkozó visszamenőleges szeizmicitás információ. Ennek oka, hogy a műszeresen rögzített szeizmicitás mindössze kb. 100 évre visszamenőleg áll a rendelkezésünkre, és a történeti földrengés-katalógus feljegyzései is mindössze néhány 100 évre visszamenőleg tekinthetőek teljesnek.

Mindezekből kifolyólag a szükséges információt (a jelenlegi katalógusoknál hosszabb időtávra visszamenőleg érvényes) paleo-rengésekre utaló árulkodó nyomok felkutatásából, vagy éppen ellenkezőleg, nagy erejű rengések hiányára utaló jelekből nyerhetjük. Kutatásainkban mi ezen utóbbi esettel foglalkozunk, mégpedig olyan formában, hogy sértetlen álló cseppköveket vizsgálunk. Ezen cseppkövek időben folyamatos sértetlensége bizonyítja a hiányát mindazon nagy erejű rengésnek, amely rengések már elég nagyon lettek volna ahhoz, hogy eltörjék ezeket a cseppköveket.

Ebből a célból kutatómunkánkban sértetlen, de sérülékeny álló cseppkövekre fókuszáltunk a Paksi Atomerőmű 270 km-es környezetében. Vizsgálatainkat a következő három csoportba soroljuk:

## A) Korábbi tanulmányok eredményeinek összegyűjtése

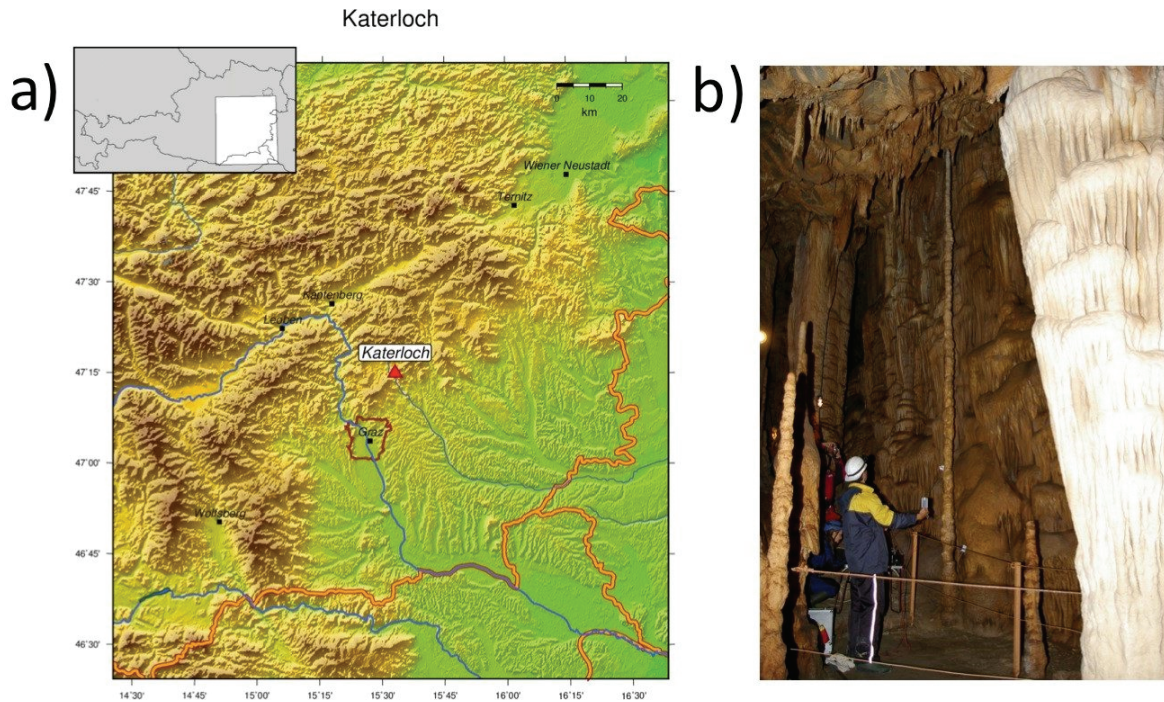
Léteznek korábbi tanulmányok, amelyekben sértetlen álló cseppköveket vizsgáltak paleo-rengések nyomainak felkutatására a közép-európai régióban. Ezek a kutatások 2000-ben, egy nyertes OTKA pályázattal kezdődtek Magyarországon, melynek címe „A Kárpát-medencében keletkezett jelenkori és paleorengések átfogó vizsgálata” volt (Szeidovitz et al. 2005, 2007, 2008). Majd több mint 10 évvel később bilaterális, tudományos akadémiák közötti együttműködés keretében folytatódtak Szlovákiában 2012-2013-ban (Gribovszki et al. 2013) a Gömör-Tornai karszt területén.

A magyar és a szlovák cseppkő-vizsgálatok során számos gyertyaszál alakú, sértetlen, alacsony sajtófrekvenciával rendelkező álló cseppkővet sikerült azonosítanunk és részletesen tanulmányoznunk. A cseppkövek paramétereit alapján (mechanikai, rugalmassági és méretadatok) kiszámítottuk a „kritikus” horizontális talajgyorsulás-értéket. A „kritikus” horizontális talajgyorsulás-érték azt a legkisebb értéket jelenti, ami már eltörné a vizsgált cseppkövet. A megvizsgált álló cseppkövek között voltak olyanok is, amelyek „kritikus” horizontális talajgyorsulás-értéke alacsonyabb volt, mint a vizsgált területre korábban probablisztikus (valószínűségi) földrengés-veszélyeztetettség-számítási módszerrel megállapított gyorsulásérték. Ezek az eredmények új és a korábbiaknál szigorúbb (alacsonyabb) horizontális talajgyorsulás-értékeket eredményeztek az észak-magyarországi területre vonatkozóan. Ezek a vizsgálatok hatással vannak a közép-európai régió földrengés-veszélyeztetettségi értékelésére ugyanúgy, mint a környező régiókéra egyaránt.

A paleo-szeizmológiai tanulmányunkban bemutatjuk ezen korábbi tanulmányok rövid összefoglalását, hiszen azok a munkák Paks 270 km-en belüli környezetében található barlangokban álló sérülékeny cseppkövekkel foglalkoznak.

## B) Ismert, de korábban még nem kutatott sérülékeny álló cseppkövek részletes vizsgálata

Az elmúlt évek során már azonosítottunk néhány különösen érzékeny álló cseppkövet a Kis-Kárpátokban (Szlovákiában, Pozsonytól 30 km-re északra) és a Sattelbergben (Ausztriában, Gráctól 15 km-re keletre) (1.1 és 1.2 ábrák).

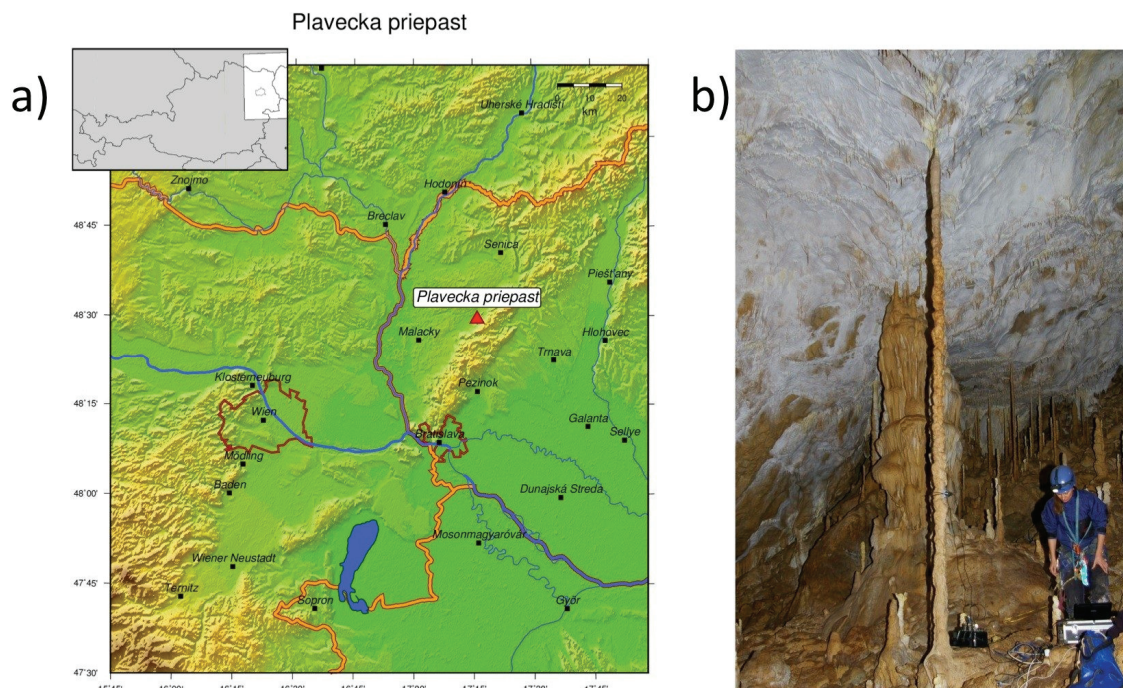


**1.1. ábra:** Sérülékeny állócseppkő Grác mellett a Katerloch (Bagolylyuk) barlangban.

a) a Katerloch barlang elhelyezkedése,

b) a sérülékeny állócseppkő a barlang Fantasy Hall-jában (magassága: 6.5 m, átlagos átmérője: 0.12 m).

Ezen cseppkövek részletes vizsgálatának eredményeképpen hasznos (korábbiaknál alacsonyabb) felső határértéket tudtunk megállapítani a horizontális talajgyorsulás-értékekre vonatkozólag akár 10 ezer évre visszamenőleg is. Ezek az információk szigorúbb következtetéseket eredményeztek a hosszútávú földrengés-veszélyeztetettségre vonatkozólag, mint ahogy azt korábban más módszerekkel megállapították. Ebből következőleg eredményeink a stratégiai tervezés szempontjából komoly jelentőséggel bírnak.



**1.2. ábra:** Vizsgálatainkra alkalmas cseppkő a Kis-Kárpátokban Bécs/Pozsony környezete

a) a Detrekői-zsomboly (Plavecka Priepast) elhelyezkedése,

b) az állócseppkő (magassága: 4 m, átlagos átmérője: 0.08 m).

### C) Új, eddig még ismeretlen, vizsgálati céljainkra alkalmas cseppkövek felkutatása

Ezen tanulmány keretében felkutattunk olyan korábban még nem ismert sérülékeny és sértetlen álló cseppköveknek, amelyek Magyarország határain belül találhatóak, és korábban még nem kerültek paleo-szeizmológiai vizsgálatokba értékelésre. Ebből a célból meglátogattuk a Csodabogyós-barlangot (Keszthelyi-hegység), és részletes információkat gyűjtöttünk a Pilisben található Ariadné-barlangrendszer Vacska-barlangjában található sérülékeny álló cseppkövekről. (1.3 ábra).

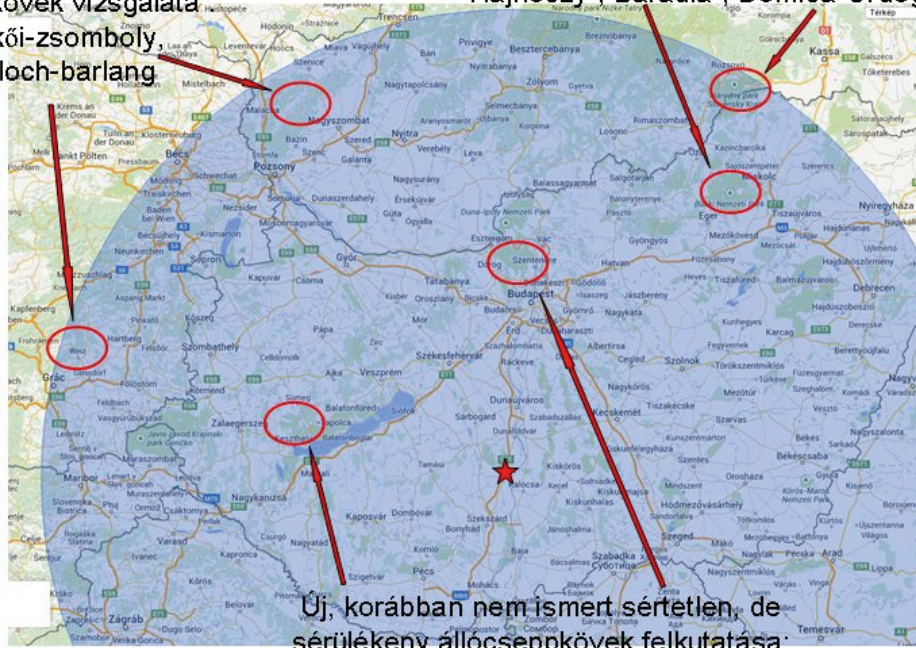
#### Paks 270 km-es környezetében

Korábban már azonosított  
kutatási céljainkra alkalmas  
állócseppkövek vizsgálata:

Detrekői-zsomboly,  
Katerloch-barlang

Korábban elkészült tanulmányok eredményeinek  
összegyűjtése:

Hajnóczy-, Baradla-, Domica-Ördöglik-barlangok



Új, korábban nem ismert sértetlen, de  
sérülékeny állócseppkövek felkutatása:

Csodabogyós-barlang, Pilis Vacska-barlang

**1.3. ábra:** Vizsgált barlangok Paks 270 km-es környezetén belül.  
(A piros csillag a paksi NPP helyét mutatja, az ellipszisek pedig a vizsgált barlangokat.)



## 2. CÉLKITŰZÉS ÉS MÓDSZER

---

Kutatásunk tárgyai a sértetlen, de sérülékeny gyertyaszál alakú álló cseppkövek. Alapfeltételezésünk az, hogy ezek a speciális alakú cseppkövek túléltek „életük” (fejlődésük és létük) során az összes addig keletkezett földrengést, ebből következőleg ezek a cseppkövek képesek arra, hogy segítségükkel felső becslést adhassunk a környezetükben előfordult földrengések által keltett maximális horizontális talajmozgás mértékére vonatkozólag akár több ezer évre visszamenőleg is. Jelen kutatómunka végső célja, hogy a korábbi vizsgálatok során meghatározott (PSHA számítások, stb.) kritikus horizontális talajgyorsulás-értékeket verifikálja, illetve a szeizmotektonikai forrásmodellek  $M_{max}$  értékeinek meghatározásához segítséget nyújtson.

Ezen sérülékeny álló cseppkövekkel kapcsolatos új megfigyelések számos fontos alkalmazási lehetőséget rejtenek magukban. Többek között lehetőséget adnak arra, hogy például a vizsgált barlang környezetében pontosítsuk a korábbi földrengés-veszélyeztetettségi eredményeinket. Mi éppen ebből a célból vizsgáljuk a sérülékeny cseppköveket, mégpedig oly módon, hogy segítségükkel a történelmi földrengések előtt kipattant paleorengések nyomait, vagy az azokat kizáró bizonyítékokat kutathassuk. Az elmúlt évtizedekben a földrengések és a cseppkövek növekedése, dőlése és törése közötti kapcsolatot számos esetben vizsgálták már minket megelőzően (Forti and Postpischl 1984, 1988; Delaby 2001; Cadorin et al. 2001; Lacave et al. 2000, 2004; Kagan et al. 2005, Becker et al. 2006, Bednárik 2009). Ezek a kutatások az általunk használt technikától eltérő módon látható, létező jeleket kutattak, mi pedig éppen a jelek hiányából következtetünk nagyrengések be nem következéské a vizsgált területen.

Konkrétan mi a kutatómunkánk során sértetlen, de sérülékeny állócseppkövek vizsgálatát végeztük el abból a célból, hogy segítségükkel felső becslést adjunk a paleorengések által keltett maximális horizontális talajmozgás értékére. Hasonló technika alkalmazásával végeztünk már kutatómunkát néhány évvel ezelőtt Magyarországon, Bulgáriában és Kelet-Szlovákiában is (Szeidovitz et al. 2005, 2007, 2008, Gribovszki et al. 2013).

Magyarországon és a környező országokban (Paks 270 km-es környezetében) felkutattunk és megvizsgáltunk sértetlen, de sérülékeny álló cseppköveket, amelyek megfelelőek a paleoszeizmológiai kutatásunkra. Természetesen már a jelen kutatómunkánk megkezdését megelőzően volt ismeretünk néhány ezen területen belül található, a vizsgálati céljainkra alkalmas cseppkövekről (1.1. és 1.2. ábrák). A vizsgálati céljainkra alkalmas álló cseppkövek fontos paramétere a nagy magasság-átmérő arány ( $H/D \geq 50$ ) és az, hogy ezen cseppkövek alakja többé-kevésbé hengeres legyen. Az ilyen alakú cseppkövek speciális neve a gyertyaszál alakú állócseppkő (candle-stick type stalagmite). Tapasztalataink szerint az ilyen típusú cseppkövek már alacsony horizontális talajgyorsulás-értékeknél is eltörnének. Ebből következőleg megfelelő jelző-eszközei lehetnek annak, hogy egy bizonyos nagyságú paleorengésnél nagyobb nem keletkezhetett egy adott területen. Az általunk alkalmazott technika során megmérjük a barlangban talált törött cseppkövek geo-mechanikai paramétereit (sűrűség, Young-modulus, törőszilárdság). Ezek felhasználásával és a helyszínen, a barlangban mért méret-adatok alapján elméleti számításokkal meghatározzuk azt a kritikus talajgyorsulás-értéket, amelynek hatására a cseppkő már eltört volna. Továbbá geofizikai módszerekkel megmérjük a helyszínen a cseppkő sajátfrekvenciáját, és azt összehasonlítjuk az geo-mechanikai paraméterekből kiszámított elméleti értékkel. A módszer része a helyszínen vett magminták kormeghatározása is, melynek segítségével információt nyerhetünk a cseppkő koráról és növekedési sebességéről is. A kormeghatározást korszerű és költséges MCICP-MS módszerrel végezzük. A cseppkő növekedési sebességének ismeretében időben több ezer évre visszamenőleg is meghatározhatjuk a cseppkő méreteit, és ennek segítségével különböző időtávra visszamenőleg különböző kritikus horizontális talajgyorsulás-értékeket állapíthatunk meg. Ezek a különböző

időtávra visszamenőleges számítások akár nagy segítségünkre lehetnek abban is, hogy a barlang környezetében korábban feltételezett nagyerejű rengések kipattanását esetleg meg is tudjuk cáfolni.

### 3. KORÁBBI EREDMÉNYEK BEMUTATÁSA: HAJNÓCZY-, BARADLA- ÉS DOMICA-BARLANGOK

---

A magyarországi sérülékeny álló cseppkövek vizsgálatával 2000 és 2004 között egy nyertes OTKA pályázat keretében („A Kárpát-medencében keletkezett jelenkori és paleorengések átfogó vizsgálata”) már foglalkoztunk korábban (Szeidovitz et al. 2005, 2007, 2008). Ekkor a Hajnóczy- és Baradla-barlang állócseppköveit vizsgáltuk meg.

Kb. 10 évvel később bilaterális, tudományos akadémiák közötti együttműködés keretében lehetőségünk nyílt Szlovákiában 2012-2013-ban a Gömör-Tornai karszt területén (tulajdonképpen a Baradla-Domica barlangrendszer szlovák oldalán) sérülékeny álló cseppkövek vizsgálatára (Gribovszki et al. 2013). A legsérülékenyebb állócseppkővet a Baradla-Domica-barlangrendszerben, a Domica-barlang turisták elől elzárt és nehezen megközelíthető Ördöglik nevű termében találtuk meg.

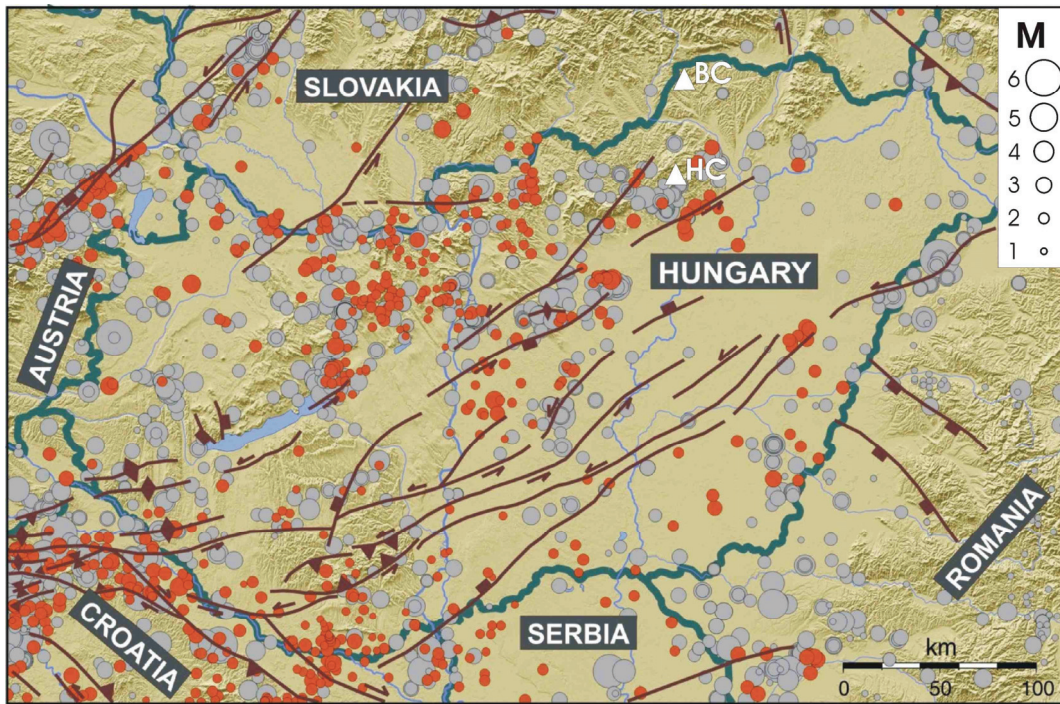
Mindkét barlangban számos gyertyaszál alakú sérülékeny álló cseppkővet találtunk, melyek közül a legsérülékenyebbeket vizsgáltuk meg részletesen. Eredményeinkről a hivatkozott tudományos cikkekben részletesen beszámoltunk. A barlangokban vizsgált legsérülékenyebb álló cseppkövekből megállapított kritikus horizontális gyorsulásértékeket itt a 8.1 táblázatban közöljük. A barlangok elhelyezkedését a 3.1. és 3.2. ábrákon mutatjuk be. Mindhárom barlang legsérülékenyebb álló cseppkővéről is bemutatunk fotót a 3.3., 3.4. és a 3.5. ábrákon.

A következő vizsgálatokat végeztük el a felsorolt barlangokban:

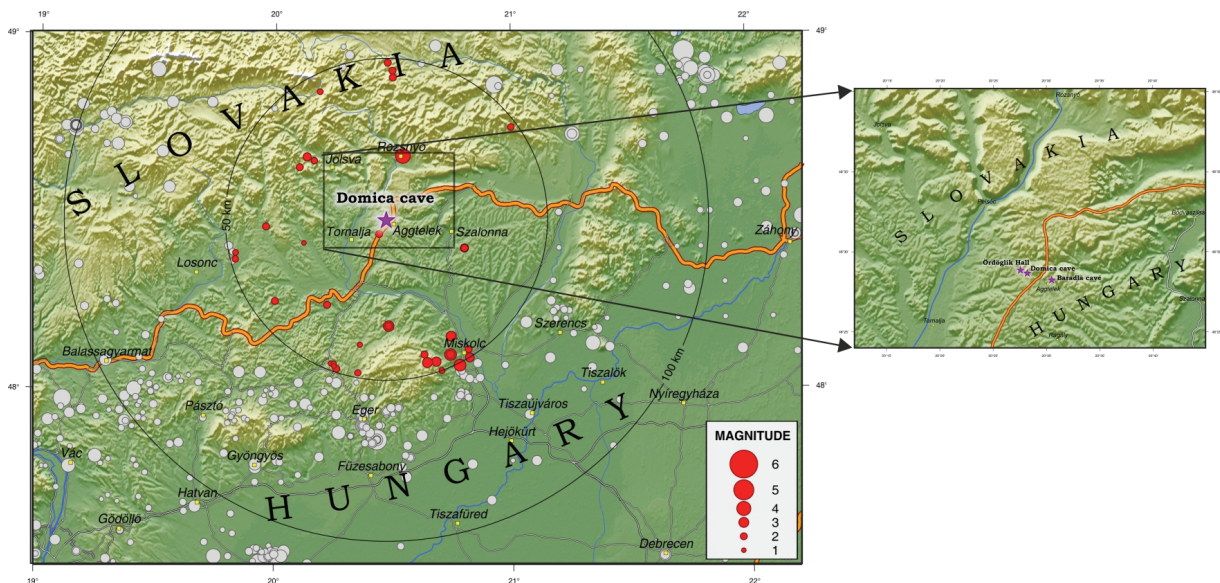
- helyszíni, in-situ méretadatok és sajátfrekvencia-mérés;
- Domica- és Baradla-barlangokban törött állócseppkő-darabok gyűjtése a helyszínen, majd ezek felhasználásával geo-mechanikai laboratóriumban törőszilárdsági és rugalmassági értékek megállapítása;
- Domica- és Baradla-barlangokban magminták fúrása és ezekből kormeghatározás;
- barlangok mélységének megállapítása.

Mindhárom barlang sekély mélységben helyezkedik el, ezért a számításaink során nem vettük figyelembe a földrengéshullámok mélység szerinti csillapítását. A kormeghatározási eredményeink alapján a Baradla vizsgált cseppkőve 70 ezer évvel ezelőtt befejezte a növekedését, ezért a 475 évvel ezelőtti kora megegyezik a jelenlegivel és ebből következőleg a cseppkő alakjából számított kritikus horizontális gyorsulásérték is azonos 475 évvel ezelőtt és a jelenleg. A Domica Ördöglik termében vizsgált állócseppkőről a kormeghatározások alapján feltételezhetjük, hogy jelenleg is növekszik, de a növekedési sebessége alapján 475 évre visszaszámított alak nem különbözik lényegesen a jelenlegitől és így a kritikus horizontális gyorsulásértékek is azonosak a két időpontra (jelenlegi és 475 évvel ezelőtti) vonatkozóan. A Hajnóczy-barlangban sajnos a barlang védettségét ellenőrző, és a barlangot kezelő Nemzeti Park sem a törött álló cseppkövek összegyűjtését, sem a kormeghatározáshoz szükséges magminták fúrását nem engedélyezte számunkra, ezért onnan részletesebb mérési eredményeink nincsenek. A kritikus horizontális gyorsulásérték meghatározásánál a baradlai törött cseppkövek geo-mechanikai adatait használtuk fel (csakúgy, mint a Katerloch-barlang esetében). Érdekes lehet még megemlíteni, hogy a Baradla és a Domica barlangokban mért növekedési sebességek és geo-mechanikai vizsgálatok eredményei nagyon jó egyezést mutattak egymással. A helyszínen mért sajátfrekvencia-értékek mindhárom cseppkő esetén igen alacsonyok voltak (Baradla: 5.1 Hz; Hajnóczy: 4.0 Hz; Domica: 2.0 Hz). A mért értékek kb. dupláját adták az elméleti (számított) sajátfrekvenciáknak mindhárom esetben. Az eltérés lehetséges okairól részletesen beszámoltunk a hivatkozott cikkekben.

Vizsgálataink eredményeképpen megállapítható, hogy minden esetben alacsonyabb kritikus horizontális talajgyorsulás-értékeket sikerült megállapítanunk sérülékeny álló cseppkövek vizsgálatával, mint a Tóth et al. (2006) térképén ábrázolt várható gyorsulás értékek. A SHARE Model esetében pedig a sérülékeny álló cseppkövek vizsgálatával kapott kritikus horizontális talajgyorsulás-értékek minden esetben jó egyezést mutatnak a SHARE Model (Danciu et al. 2013, Giardini et al. 2013) által megadott gyorsulás-értékekkel a következő 475 évre vonatkozóan.



**3.1. ábra:** Korábban kutatott sérülékeny álló cseppköveket tartalmazó barlangok Magyarországon. (BC: Baradla-barlang, HC: Hajnóczy-barlang) A térképen található körök a területen kipattant, ismert rengések elhelyezkedését mutatják, a vonalak pedig az aktív törésvonalakat Horváth és szerzőtársai szerint.



**3.2. ábra:** A korábban kutatott sérülékeny álló cseppköveket tartalmazó Domica-barlang, és annak Ördöglik barlangterme Szlovákiában.

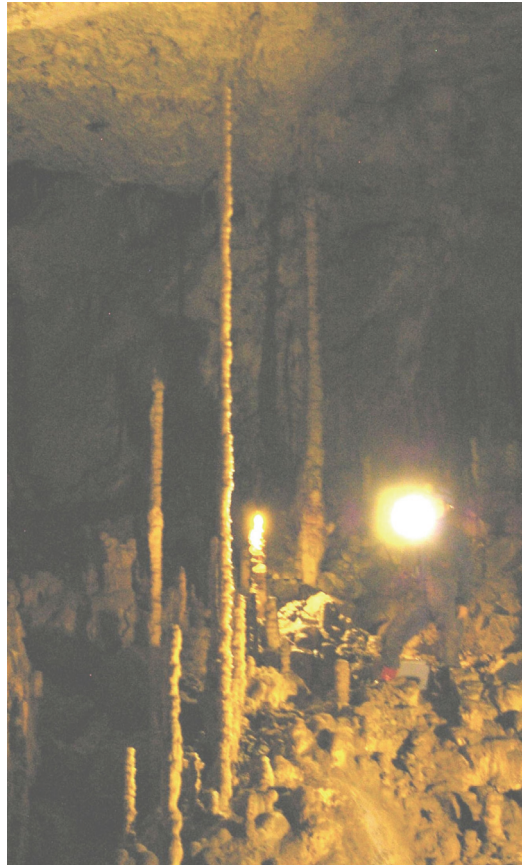




**3.3. ábra:** Sérülékeny állócseppkő a Baradla-barlang Olimposz termében.  
Magassága: 5.1 m, átlagos átmérője: 8.5 cm. (A létra legtetején Surányi Gergely látható.)



**3.4. ábra:** Sérülékeny állócseppkő a Hajnóczy-barlangban.  
Magassága: 3.6 m, átlagos átmérője: 5.0 cm. (A fotón a cseppkő mellett Szeidovitz Győző látható.)



**3.5. ábra:** Sérülékeny állócseppkő A Domicabarlang Ördöglík termében.  
Magassága: 5.0 m, átlagos átmérője: 5 cm.

## 4. ÚJ VIZSGÁLATI EREDMÉNYEK: DETREKŐI-ZSOMBOLY

Jelen fejezetben bemutatjuk a Detrekői-zsombolyban található sértetlen, de sérülékeny, gyertyaszál alakú állócseppkő (IVSTM) részletes vizsgálatát és annak eredményeit. Ezek az eredmények korábban nem kerültek még publikálásra.

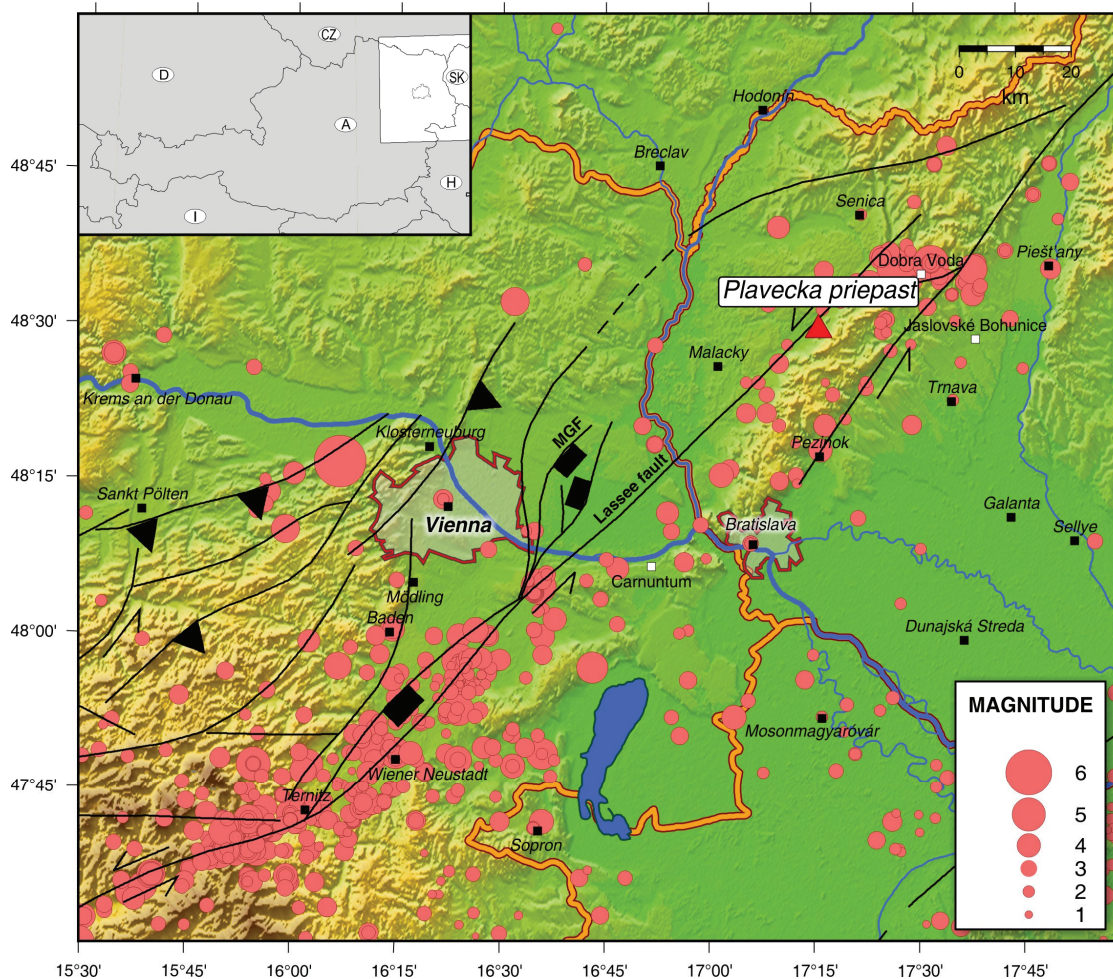
A vizsgált álló cseppkő a Detrekői-zsombolyban található a Kis-Kárpátokban, Szlovákia nyugati részén, közel a Bécsi-medencéhez és Bécs valamint Pozsony fővárosokhoz (4.1. ábra). A vizsgált IVSTM teljesen megfelelő állócseppkövek segítségével végzett földrengésvesélyeztetettség-kutatásra, mivel rendelkezik a szükséges nagyságú magasság/átmérő aránnyal, és a cseppkő felépítése hengeres. Vizsgálataink azt mutatják, hogy ez az állócseppkő jelenlegi formájában még alacsony horizontális gyorsulásnál is eltörne (a kiszámított kritikus horizontális gyorsulásérték  $<0.33 \text{ m/s}^2$  a barlangban és  $<0.99 \text{ m/s}^2$  a felszínen). Ez az alacsony érték teljesen összhangban áll a barlang környezetében kipattant jókői rengésnek (Dobra Voda, 1906. január 10.) a barlang környezetére megállapított intenzitásával. A cseppkő méretét megbecsülve az elmúlt 500 évre vonatkozólag visszamenőleg, majd abból kiszámítva a kritikus horizontális talajgyorsulás értékét megállapítható, hogy a kapott gyorsulási szint jó egyezést mutat a Detrekői-zsomboly területére a SHARE Model által megadott talajgyorsulási érték (PGA) tartományának ( $1 \text{ m/s}^2 < \text{PGA} < 1.5 \text{ m/s}^2$ ) legalacsonyabb részével. (A SHARE Model értékeit probabilisztikus földrengésvesélyeztetettség-számítási módszerrel határozták meg 475 éves visszatérési időt figyelembe véve - 50 év alatt 10% valószínűséggel keletkezik olyan földrengés, amely által keltett talajgyorsulás meghaladja az adott értéket – Danciu et al. 2013, Giardini et al. 2013). Valamint ez az érték alacsonyabb a Tóth et al. (2006) által a zsomboly környezetére szintén 475 évre vonatkozóan megállapított PGA tartomány értékeinél ( $1.60 \text{ m/s}^2 < < 1.65 \text{ m/s}^2$ ).

### 4.1. A barlang leírása

A vizsgált IVSTM a Detrekői-zsombolyban (szlovák nevén Plavecká priepast) található. A Kis-Kárpátok középső részének nyugati peremén található karszterület a Detrekői-karszt, melyben a vizsgált barlang elhelyezkedik. A barlang a Detrekői-karsztnak pontosan azon kiemelkedése alatt foglal helyet, melynek csúcsán a XIII. században épített Detrekő vára áll. A barlang humán hatástól való elzártsága, és így természeti kincseinek magas szintű megőrzöttsége szempontjából fontos megemlíteni, hogy a vár építésének idején bevett gyakorlattal ellentétben a várnak nem létezik menekülési útvonala a barlang felé. A barlang bejárata a várhegy nyugati felén található, Detrekővárálja (Plavecké Pohradie) településhez közel. A barlang Triász mészkőben fejlődött ki, ami dolomit-rétegeket is tartalmaz.

A 30 m mély, vertikális szakadékon keresztül megközelíthető barlang turisták által nem látogatható (4.9b ábra). A vizsgált állócseppkő a barlangnak a „Cseppkövek terme” elnevezésű (Chamber of dripstones) részén található (4.9a ábra), ami a barlang északi terme (Juraj Halama személyes véleménye alapján). Ez a terem kb. 300 db nyúlánk gyertyaszál alakú cseppkövet, vagy cseppköoszlopot tartalmaz. Az átlagos magassága ezen álló cseppköveknek kb. 1.5-2.5 m, az átlagos átmérőjük pedig maximum 10 cm. Két cseppkő 3 m-nél valamivel magasabb, és van egy legalább 4 m magas nyúlánk állócseppkő is a barlangban (4.2 ábra).

A barlang teljes hossza mindössze 335 m, a szélessége pedig 15-20 m. A vertikális kiterjedése 70 m. A barlangról és a cseppkőképződményekről szóló további részletes leírások Butáš (2005) és Šmída (2010) cikkeiben találhatóak.



**4.1. ábra:** A vizsgált barlang, a Detrekői-zsomboly (Plavecká priepast) elhelyezkedése a Kis-Kárpátokban, Szlovákiában (piros háromszög), és az ismert, aktív törésvonalak, továbbá a történelmi és a műszeres földrengések epicentrumai. A fekete vonalakon található különböző jelek a törésvonalak típusára utalnak. A fekete háromszög feltolódást; a fekete négyszög normál vetőt; a fekete nyíl pedig oldaleltolódást jelöl. A két amorf alakú piros vonallal körbehatárolt terület Bécs (Vienna) és Pozsony (Bratislava) fővárosokat szemlélteti. A bal felső sarokban lévő átnézet térkép az ábrán szereplő terület pozícióját mutatja annak tágabb környezetében. A fekete négyzetek a környező településeket mutatják, míg a fehér négyzetek a környéken található fontosabb objektumokat szemléltetik.

#### 4.2. A vizsgált sérülékeny, de sértetlen állócseppkő

Korábbi tapasztalataink alapján a mi vizsgálati céljainkra olyan hengeres felépítésű álló cseppkövek alkalmasak, amelyek magasság-átmérő aránya legalább 50. Ezen cseppkövek sajátfrekvenciája elegendően alacsony ahhoz, hogy az a közeli rengések frekvencia-tartományába essen (ami 20 Hz alatti) (Lacave et al. 2000). Ennek azért van jelentősége, mert ha a cseppkő sajátfrekvenciája a közeli rengések frekvenciatartományába esik, akkor a cseppkő a rezonancia hatására az általunk jelenleg csak a statikus esetre kiszámított kritikus horizontális gyorsulásértéknél kisebb gyorsulásra is már eltörne. Továbbá minél nagyobb a magasság-átmérő arány annál alacsonyabb horizontális talajgyorsulásra fog statikus esetben eltörni az állócseppkő.

A vizsgálatra alkalmas cseppkő kiválasztásánál a másik fontos tényező az, hogy a cseppkővet tartalmazó barlang-terem sekély mélységben helyezkedjen el, mivel a földrengés-hullámok a mélység növekedésével lecsillapodnak (Becker et al. 2006). A vizsgált cseppkövünk a Cseppkövek terme elnevezésű részen található (4.9a ábra), ami a barlang északi terme. Ez az északi terem nem mélyebben, mint 175 m-re található a Detrekői-várdomb tetejétől.

A vizsgált cseppkő legalább 4 m magas (4.2. ábra), átlagos átmérője kb. 8 cm, és a 30 m mély vertikális szakadék aljától kb. 40-50 m-re található. A sajátfrekvencia meghatározásához a cseppkő

vibrációját az *in situ* vizsgálatok során regisztráltuk, és megmértük a cseppkő pontos méreteit is (4.2. és 4.3. ábrák, 4.1. táblázat). Mivel a kormeghatározáshoz szükséges magminta-vétel során félő volt, hogy a sérülékeny állócseppkő eltörik, ezért a magmintákat egy, a vizsgált cseppkővel azonos barlangteremben álló, de már oszloppá összenőtt cseppkőből vettük 2 különböző magasságban és több mélységben (4.6. ábra).



a)



b)



c)

- 4.2. ábra:** a) A Detrekői-zsomboly északi terme (chamber of dripstones) (Šmída, 2010);  
 b) az északi terem egy másik része a vizsgált állócseppkővel;  
 c) a vizsgált sérülékeny állócseppkő az északi teremben (a fotón Gribovszki Katalin látható a cseppkő sajátfrekvenciájának mérése közben)

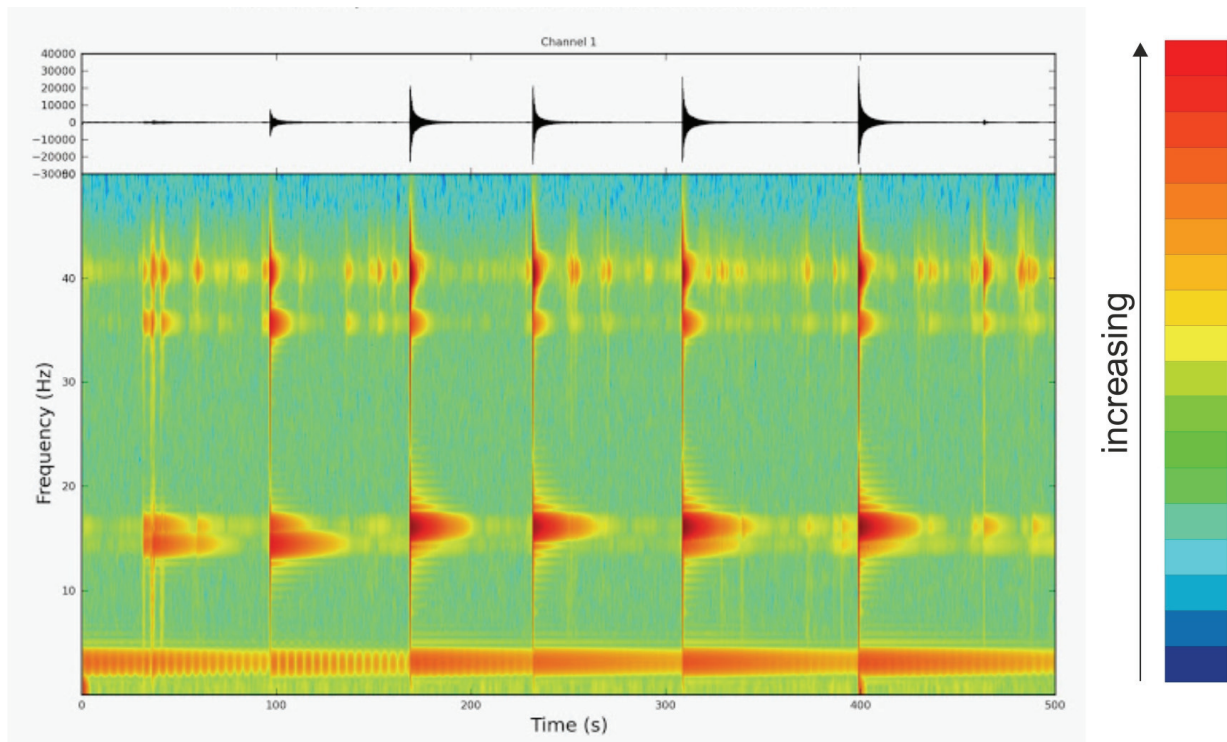
### 4.3. Roncsolás mentes *in situ* mérések

Mivel a helyben végzett mérések a sértetlen álló cseppkövek esetében kizárólag roncsolásmentes mérések lehetnek (Szlovákia teljes területén is természetvédelmi oltalom alatt állnak a cseppkövek), ezért az *in situ* vizsgálatainkban kizárólag a sajátfrekvencia és a cseppkövek méretének meghatározására szorítkozhattunk.

A sajátfrekvencia méréséhez egy speciális, alacsony frekvenciájú geofont használtunk (LF-24 típusú), amelyet a cseppkő oldalára erősítettünk. Ennek a típusnak van beépített előerősítője. A geofon sajátfrekvenciája 1 Hz. Az érzékelő által mért jelek rögzítésére Reftek 130S-01 adatgyűjtőt használtuk (24 bites AD konverterrel). Egy speciális rögzítő-eszközt készítettünk az érzékelő cseppkőre történő felszereléséhez azért, hogy biztosítsuk a tökéletes mechanikai csatolást a cseppkő és a geofon között, továbbá hogy helyesen tudjuk beállítani a geofon horizontális pozícióját. A geofon rögzítése után a vizsgált sérülékeny álló cseppkővet egy gyenge ütessel gerjesztettük. Az oszcilláció spektrális teljesítmény-sűrűsége azt mutatja (4.3 ábra), hogy a cseppkő sajátfrekvenciája ( $f_0$ ) körülbelül 3 Hz, és az első felharmónikusok oszcillációi 14.5 és 16 Hz körül vannak. Ezek az értékek mind 20 Hz alattiak, azaz azok beleesnek a közelben kipattant közepes erejű földrengések frekvencia-tartományába. Ez azt jelenti, hogy ez az állócseppkő berezonálhat egy közeli földrengés kipattanásakor.

A mi elméleti számításunk, amely az egytengelyű tartók elméletén alapul (cantilever beam theory) nem veszi figyelembe a rezonanciát, ami azt jelenti, hogy a valóságban az IVSTM eltörhetne a horizontális gyorsulás egy kisebb értékén is, mint amit mi kiszámítottunk.

Ahogy a 4.3 ábra és a 4.1. táblázat mutatja az első felharmónikusoktól kezdődően a harmonikus oszcilláció kettéválik, ennek oka az, hogy a vizsgált cseppkő nem teljesen tengelyszimmetrikus.



**4.3. ábra:** A vizsgált sérülékeny állócseppkő oszcillációja és spektrális teljesítmény-sűrűsége a gerjesztett cseppkő vibrációjának idősorán ábrázolva.

#### 4.1. Táblázat

A roncsolásmentes *in situ* mérés eredményei (méretek, sajátfrekvencia)

ID	MAGASSÁG (m)	ÁTMÉRŐ (cm)	H/D	mért $f_0$ (Hz)	mért $f_1$ (Hz)	mért $f_2$ (Hz)
IVSTM	4.03	átlag: 8 (10.5-6)	50	3	14.5; 16	36; 41

#### 4.4. Az elméleti számítások és a geo-mechanikai és rugalmasságtani laboratóriumi mérések eredményei

Abban az esetben, ha az állócseppkő ideális alakú (hengeres, azaz állandó a keresztmetszeti átmérője), a következő egyszerű egyenlet, amely az egytengelyű tartók elméletén alapul használható ahhoz, hogy kiszámítsuk a cseppkő sajátfrekvenciáját és a törését okozó horizontális talajgyorsulást (Cadorin et al. 2001; Lacave et al. 2000; Szeidovitz et al. 2008). Az állócseppkő sajátfrekvenciája:

$$f_0 \approx \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{3.1ED^2}{16\rho H^4}} \quad (1)$$

A horizontális talajgyorsulás, amely a cseppkő törését okozná kifejezhető, mint:

$$a_g = \frac{D\sigma_u}{4\rho H^2} \quad (2)$$

ahol  $D$  a cseppkő átlagos átmérője,  $H$  a cseppkő magassága,  $\rho$  a cseppkő sűrűsége,  $E$  a rugalmassági Young-modulusa és  $\sigma_u$  a törőszilárdsága.

Az egytengelyű tartó harmonikus oszcillációja a Bernoulli-Euler egyenlet szerint (41. egyenlet Kong et al. (2008) cikkében):

$$f_i = \frac{\omega_i}{2\pi} = \frac{(s_i L)^2}{2\pi} \sqrt{\frac{EI}{\rho A H^4}} \quad (3)$$

ahol  $I$  a keresztmetszet második nyomatéka,  $A$  a keresztmetszet területe, és  $\omega_i$  a körfrekvencia.

$$s_i L = 1.875, 4.694, 7.855, 10.996, 14.137, \quad i = (1, 2, 3, 4, 5)$$

$$I = \left(\frac{\pi}{64}\right) D^4$$

Hengeres alaknál, és így a (3) egyenlet megváltozik a következőképpen (45. egyenlet a Kong et al.(2008) cikkben):

$$f_i = \alpha_i \sqrt{\frac{ED^2}{16\rho H^4}} \quad (4)$$

ahol  $\alpha_i = (s_i L)^2 / 2\pi$ , és így  $\alpha_0 = 0.559$ ;  $\alpha_1 = 3.507$ ;  $\alpha_2 = 9.820$ ;  $\alpha_3 = 19.244$ ;  $\alpha_4 = 31.808$ .

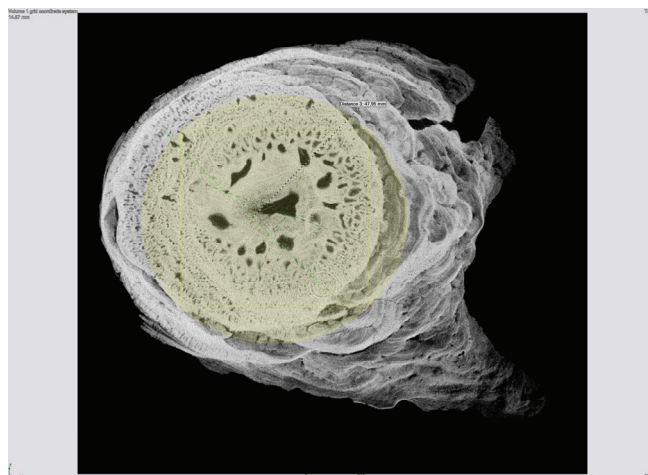
A sűrűség értéke, az ultrahangos  $V_p$ ,  $V_s$  és a törőszilárdsági értékek mind mechanikai laboratóriumi méréseken alapulnak (4.2 táblázat). A törőszilárdságot egyszerű laboratóriumi teszttel határoztuk meg (4.4. ábra).



**4.4. ábra:** Egyszerű szakítószilárdság teszt egy szabályos mintatestté alakított, Detrekői-zsombolyból származó cseppkődarabon.

A dinamikus Young-modulust az ultrahanggal meghatározott  $V_p$  és  $V_s$  értékekből számítottuk ki (Nováková et al. 2011).

A méréseket a Cseh Tudományos Akadémia Geonikai Intézetének (Institute of Geonics) mechanikai laboratóriumában végeztettük el. Az eredményeket a 4.2 táblázat tartalmazza.



**4.5. ábra:** Computer tomográfias kép egy letört álló cseppkőről a Detrekői-zsombolyból. Kamil Soucek felvétele.

Az eredményeink azt mutatják, hogy a Detrekői-zsombolyból származó eltört cseppkődarabokon mért törésszilárdsági értékek ( $\sigma_u = 0.51$  MPa) sokkal alacsonyabbak, mint a Baradla-barlang Olimposz terméből származó mintákon mért értékek ( $\sigma_u = 1.62$  MPa), és a Domica-barlang



Ördöglik terméből származó minták esetén mért értékek ( $\sigma_u = 2.75$  MPa) (Szeidovitz et al. 2008; Gribovszki et al. 2013). Ezek a törőszilárdsági értékek nagyon közel vannak a minimum értékhez (0.4 MPa), amit korábban a Hotton-barlangból (Belgium) származó törött mintákon mértek (Cadorin et al. 2001) statikus hajlítószilárdsági teszttel.

A Detrekői-zsombolyból származó törött cseppkövek tomográfiás képei (4.5 ábra) adhatnak magyarázatot az alacsony szakítószilárdság értékekre. Ezek a felvételeken a törött cseppkövek keresztmetszetén rengeteg lyuk (zárvány) látszódik a cseppkövek belsejében és ez azt jelenti, hogy a cseppkövek belső szerkezete nem homogén. Ezek a belső lyukak csökkentik cseppkő anyagának a szakítószilárdságát, valamint a lyukak miatt a cseppkő kevésbé lesz ellenálló a horizontális dinamikus hatásokkal szemben.

#### 4.2. Táblázat

A mechanikai laboratóriumi teszt eredményei

	sűrűség, $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	ultrahang, $V_p$ [km/s]	ultrahang, $V_s$ [km/s]	dinamikus Young modulus, E [MPa]	szakítószilárdság, $\sigma_u$ [MPa]
Detrekői- zsomboly	1 940.5 ± 6.4	4.40 ± 0.18	2.10 ± 0.16	25 181.0 ± 3 915.3	0.51 ± 0.13

A dinamikus Young modulus értéke (25.2 GPa) nagyobb, mint amit meghatároztunk a Baradla-barlang Olimposz terméből származó minták esetén ( $E=20.8$  GPa) és közel azonos a Domicabarlang Ördöglik terméből származó mintáknál megállapított értékkel ( $E=23.6$  GPa).

A 4.3. táblázat majdnem azonos az 4.1. táblázattal, azonban kiegészítettük az elméleti sajátfrekvencia értékkel ( $f_0$ ) és a törést okozó horizontális talajgyorsulás elméleti értékével ( $a_g$ ). Ezek az értékek egy elméleti számítások eredményei, amik az  $Eq(1)$ -n és  $Eq(2)$ -n alapulnak. A laboratóriumi tesztek eredményeit és a cseppkő méreteit felhasználtuk az elméleti számításokban.

#### 4.3. Táblázat

A 4.1. táblázat kiegészítve a természetes frekvenciával és a törést okozó horizontális talajgyorsulás eredménnyel az elméleti számítások alapján

ID	MAGASSÁG (m)	ÁTMÉRŐ (cm)	M/Á	mért $f_0$ (Hz)	elméleti $f_0$ (Hz)	elméleti $a_g$ (m/s <sup>2</sup> )
IVSTM	4.03	átlag: 8 (10.5-6)	50	3	2.5	0.34

A számított sajátfrekvencia-értékek majdnem ugyanazok, mint a mért értékek. A különbség egyrészt az alkalmazott becslés következménye lehet, illetve azzal magyarázható, hogy számításainkban elhanyagolásokkal és általánosításokkal is éltünk. Például a cseppkő valós alakja nem teljesen hengeres volt, és az anyaga sem teljesen homogén, valamint a fizikai paramétereit is azon mechanikai tesztek eredményeiből nyertük, amely tesztek más (törött) cseppköveken hajtottunk végre.

A törést okozó horizontális talajgyorsulás eredménye  $0.33$  m/s<sup>2</sup> statikus esetben. Ezeknél a számításoknál nem vettük figyelembe a rezonancia jelenséget, amely a sztalagmitban ébredhet a közeli földrengések hatására az alacsony frekvenciákon.

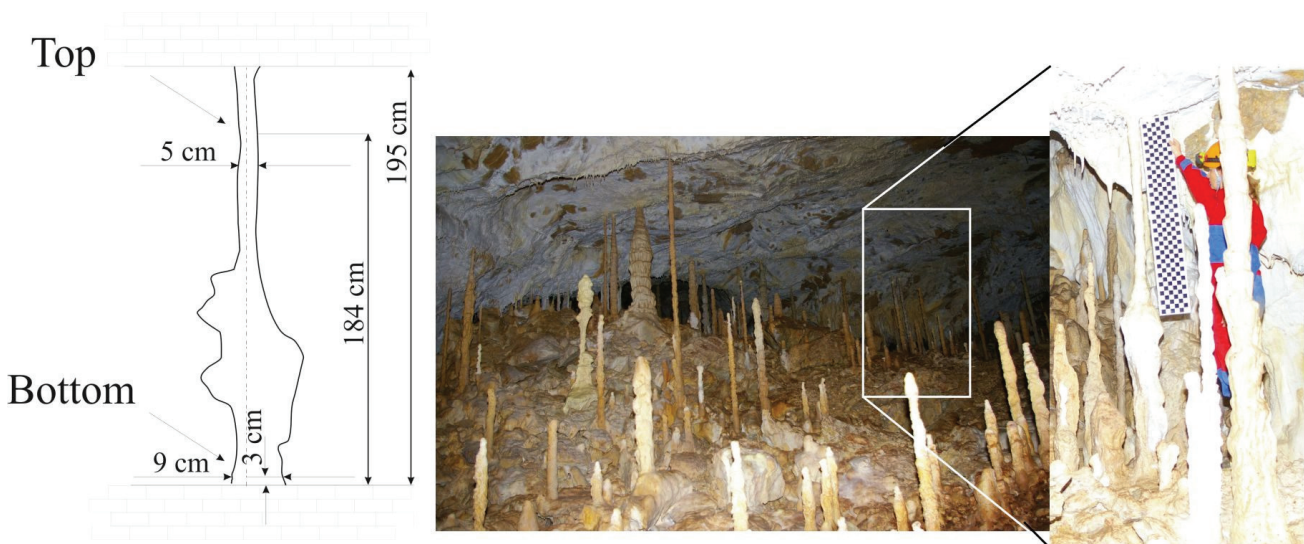
#### 4.5. Cseppkő-kormeghatározás

A cseppkövek kiválóan megőrzik a régmúlt klímájának és környezetének nyomait (Fairchild and Baker 2012), mivel ezek hosszú idők folyamán többé-kevésbé folytonosan növekszenek. Egyik legfontosabb tulajdonságuk, hogy koruk pontosan meghatározható urán-soros kormeghatározással. A cseppköveket különösen is a legjobb archívumoknak tekintik a szabályos belső növekedési struktúrájuk miatt.

Még vitatott, hogy vajon a földrengésekhez kapcsolódó deformációk szintén megállapíthatóak-e az állócseppkövekből (Forti 2001; Becker et al. 2006). Az állócseppkő geometriája függ a lecsöpögő víztől (kiválás és kémiai összetétel), és a cseppkő tetejének a mennyezettől való távolságától. A cseppkő minden rétege tároló szerepet játszik a saját növekedési történetében. A cseppkő tengelyének bármely irányváltozása, vagy az egyenestől történő eltérése hatással van a növekedési mintára. Ezek az eltolódások kapcsolódhatnak egy földrengés okozta felszín-átalakuláshoz, de lehetnek egy másféle folyamat eredményei is, mint például a lecsöpögés helyének megváltozása a mennyezeten, vagy üledék leülepedése, amelyből a cseppkő felépül.

A Detrekői-zsombolyban a kormeghatározáshoz a magmintáinkat egy 195 cm magas oszlopcseppkőből vettük *in situ* (4.6 ábra). A részletesen vizsgált IVSTM (4 m magas sztalagmit) korszerkezetét egyelőre nem tudtuk megállapítani, mivel a cseppkő nagyon törékeny, és félő volt, hogy magminta-vétel közben eltörik. A törékeny cseppkövet helyettesítendő egy oszlop cseppkövet választottunk (ez a már említett 1.95 m magas *in situ* oszlop cseppkő), amely a cseppkőbarlangnak az általunk részletesen vizsgált cseppkővével azonos termében áll. A kormeghatározáshoz a cseppkő aljáról és 1.84 m magasságából vettünk mintát (4.6 ábra).

Az urán és tórium koncentráció, izotóp-arány és kor adatok (alapkor = 1950 K.u.) a Minnesota Egyetemen kerültek meghatározásra egy többdetektoros induktív csatolású plazma tömegspektrometriai eljárást (Thermo Fisher Neptune), és a Shen et al. (2012) és a Cheng et al. (2013) protokollokat használva.



**4.6. ábra:** Az 1.95 m magas *in situ* cseppkő oszlop, amit kormeghatározásra használtunk (balra) és a fotó a barlang-teremről az oszlop elhelyezkedésével (Az oszlopcseppkő alsó és felső részén van a fűrt minta elhelyezkedése 0.03 és 1.84 m magasságban.)

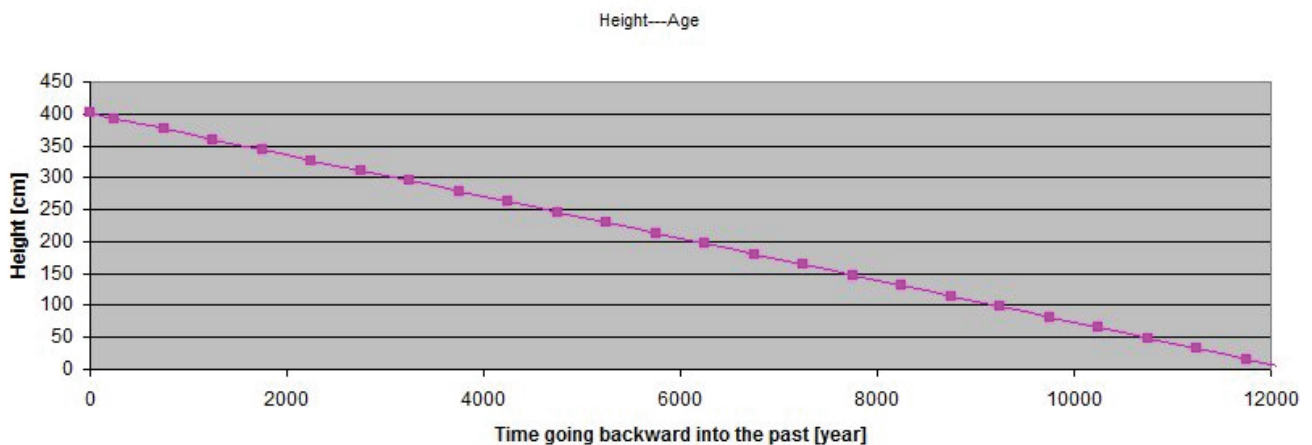
A kormeghatározási eredmény az mutatja, hogy az oszlopcseppkő kiválása a korai Holocénben körülbelül 10.5 ezer évvel ezelőtt elkezdődött, és a teteje pedig (1.84 m) körülbelül 5 ezer éves. A növekedési sebesség körülbelül 1 mm / 3 év, ami sokkal gyorsabb, mint a korábban meghatározott

más szlovák és magyar barlangokból származó cseppkövek növekedési sebessége (Baradla és Domica: 1 mm / 16 év és 1 mm / 53 év, Szeidovitz et al. 2008; Gribovszki et al. 2013)

#### 4.6. A növekedő cseppkő alakjának változása az időben visszafelé haladva

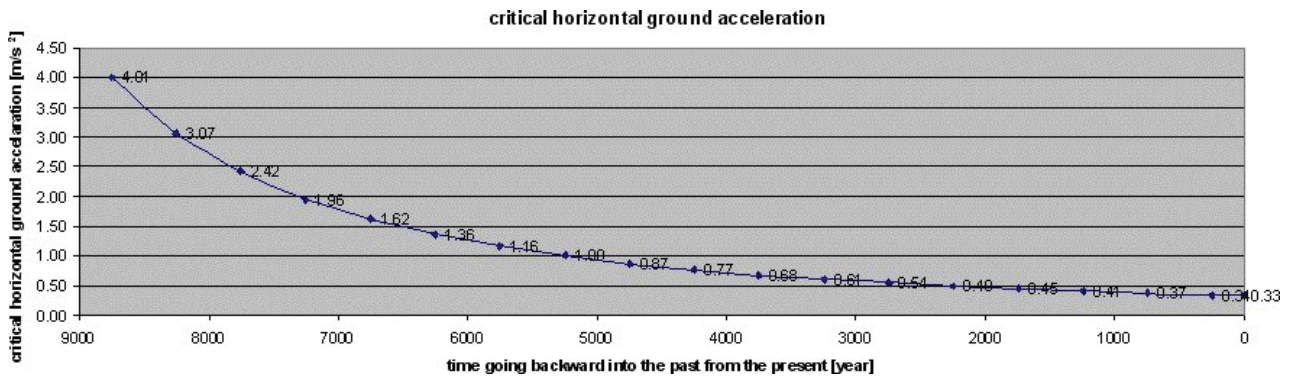
A kormeghatározási eredményekre alapozva a múltban visszafelé haladva egy egyszerűsített cseppkő-növekedési modellt lehet megkonstruálni. Tudjuk azt, hogy a cseppkő jelenleg is növekedik, mivel a felülete nedves, és emellett még feltételezünk egy állandó növekedési rátát. A növekedési ráta állandó értékét a cseppkő vertikális tengelye mentén vett magminták korának különbségéből és a 2 magminta távolsága alapján egy egyszerű hányados-képzéssel állapítjuk meg. Dreybrodt és Romanov (2008) valamint Kaufmann (2003) tanulmányaiból ismert, hogy a gyertyaszál alakú cseppkövek a horizontális metszetükben nézve többé-kevésbé állandó átmérővel növekednek. Mindezeket a tényeket és feltételezéseket figyelembe véve lineáris növekedési függvényt feltételezve kiszámítottuk a cseppkő magasságát a múltban visszamenőlegesen (4.7 ábra). A cseppkő alakját pedig a magasság ismeretén túl úgy kaptuk meg, hogy a horizontális metszetben állandó átmérőt feltételeztünk. Amennyiben ismerjük a cseppkő alakját visszamenőlegesen a múltban, akkor kiszámíthatjuk a cseppkő alakjához tartozó kritikus horizontális talajgyorsulás értékét (CHGA) is (ugyanazzal a képlettel, amivel azt a jelenre vonatkozólag kiszámítottuk, Eq(4)), amely értékek szintén a múlt 1-1 időpontjához lesznek köthetőek (4.8 ábra és 4.10 ábra 'in the cave' görbéje).

Példaképpen bemutatva az 500 (~475) évvel ezelőtti alakot és az ahhoz kapcsolódó kritikus horizontális gyorsulásértéket, a számítás a következő. A növekedési ráta alapján (1mm/3év) 500 évvel ezelőtt a cseppkő magassága kb. 3.83 m lehetett. Ehhez a magassághoz pedig  $0.36 \text{ m/s}^2$  kritikus horizontális gyorsulás-érték számítható ki. Tehát ennyi az a kritikus horizontális talajgyorsulás-érték, ami már eltörte volna a cseppkövünket 500 évvel ezelőtt.



**4.7. ábra:** A cseppkő magassága visszamenőleg a múltban (a vízszintes tengelyen az évek növekszenek visszafelé a múltba, a 0 év a jelent jelenti, a függőleges tengelyen pedig a cseppkő aktuális magasságát olvashatjuk le)

A cseppkő növekedési rátájára alapozva teljes bizonyossággal nem állíthatjuk a 4.7, 4.8 és a 4.10 ábrák helyességét, mivel a felhasznált feltételezések bizonytalansággal terheltek, hiszen nem tudhatjuk biztosan, hogy a cseppkő növekedése a vertikális tengely mentén (másképpen fogalmazva: a különböző korokban) állandó volt-e, továbbá – mint már említettük – a cseppkő-koradatok sem a részletesen megvizsgált állócseppkőből származnak, hanem egy vele azonos teremben lévő oszlopból.

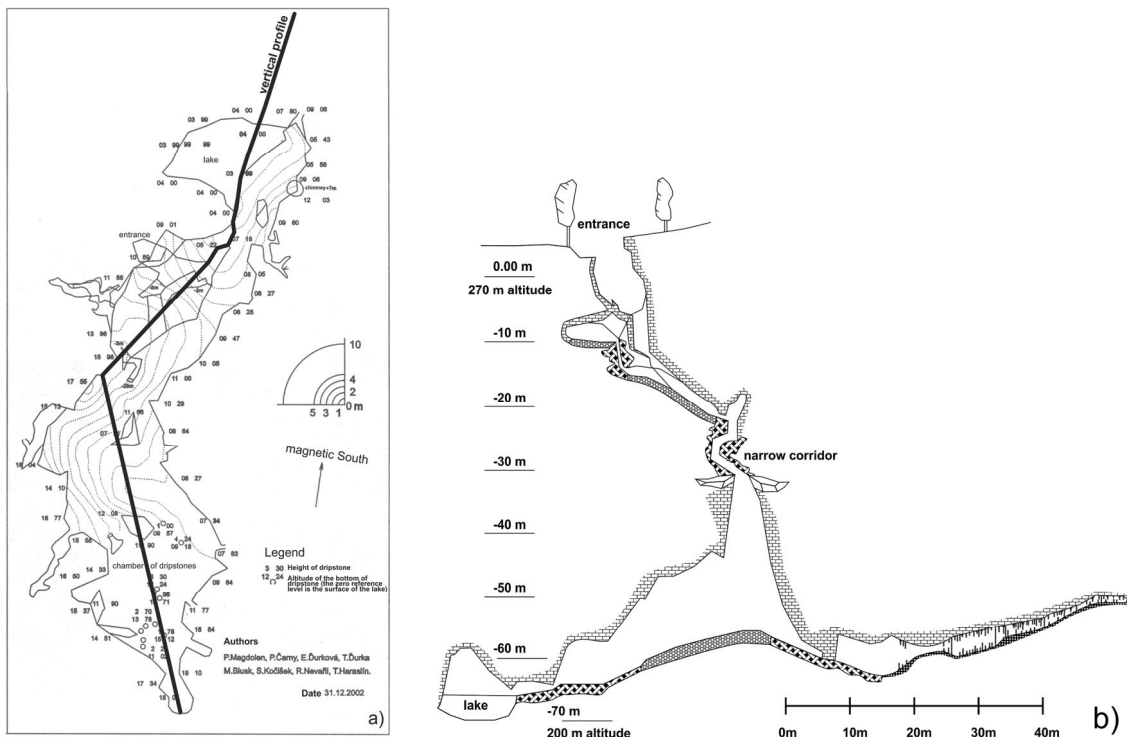


**4.8. ábra:** A cseppkő segítségével megállapított kritikus horizontális gyorsulás-érték (CHGA) a múltba visszamenőlegesen kiszámítva, a cseppkő változó magasságát figyelembe véve. A CHGA értékek csökkennek a cseppkő magasságának növekedésével, azaz a jelenhez közelítve egyre sérülékenyebbé válik a cseppkő

(a vízszintes tengelyen az évek csökkennek közelítve a jelenhez, a 0 év a jelent jelenti, a függőleges tengelyen pedig az adott cseppkőhöz tartozó aktuális kritikus horizontális gyorsulásértékeket olvashatjuk le)

#### 4.7. A földrengéshullámok mélység szerinti csillapodása

A cseppkővek földrengések hatására történő esetleges megsérülésének vizsgálatánál feltétlenül figyelembe kell venni azt a tényt, hogy a mélység növekedésével a szeizmikus hullámok nagymértékben csillapodnak (Becker et al. 2006). Ezért vizsgálatainknál ismernünk kell a barlang mélységét, ahol a vizsgált cseppkőveink találhatóak. A Detrekői-zsomboly esetén a barlang felszíntől számított mélysége biztosan nem több mint 175 m. A barlang mélységének megállapításánál nemcsak a barlang vertikális metszetét (4.9b ábra) vettük figyelembe, hanem a barlangnak az őt tartalmazó hegyben való elhelyezkedését is.



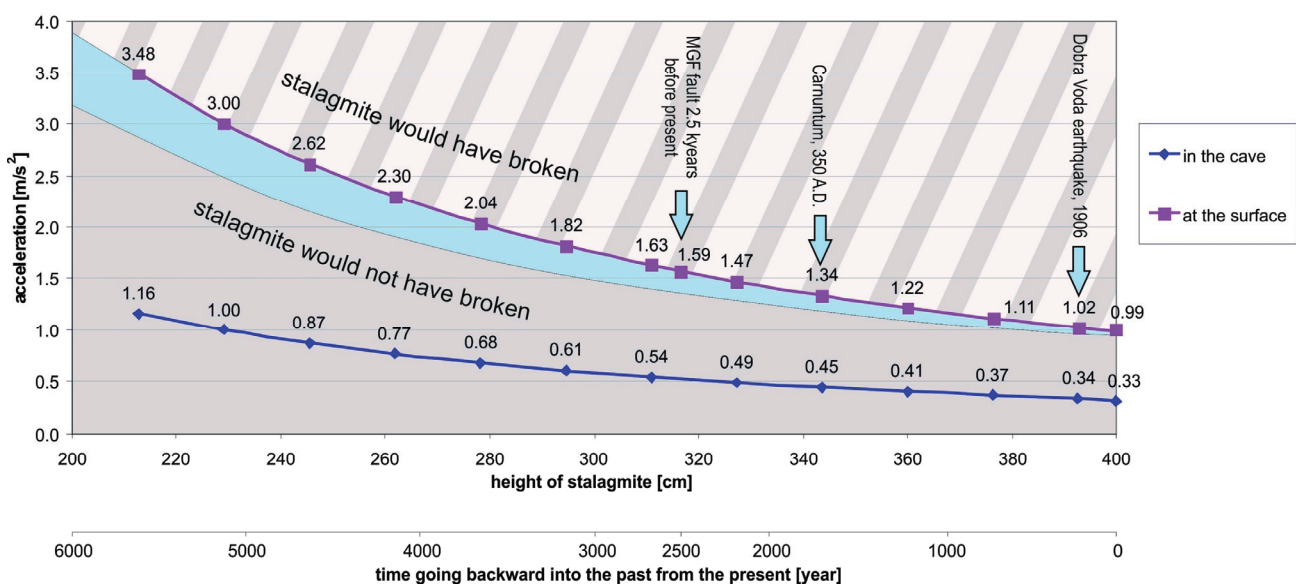
**4.9. ábra:** A Detrekői-zsomboly térképe (Butás, 2003),

- a) Juraj Halama által javított alaprajz (a vastag törött vonal a metszet elhelyezkedését mutatja az alaprajzon)  
b) keresztmetszet

Amennyiben ismerjük a barlang mélységét, akkor a következő lépés a rengéshullámok mélység szerinti csillapodásának megállapítása a szakirodalomban megtalálható mérési eredmények alapján, mivel jelenleg nem áll módunkban a csillapodás *in situ* mérése (műszer, idő és humanerőforrás-igényes feladat). Az elsődleges szakirodalom, amit a mélység szerinti csillapodás megállapítására felhasználtunk az Shimizu et al. (1996) munkája volt. Ők 7 szeizmográfot telepítettek a Kamaishi bánya négy különböző mélységében. Közülük az egyiket közel a felszínhez helyezték el, a maradék 6 műszer közül egy másikat pedig közvetlenül ezen műszer alatt 140 m mélységben. Ezek a műszerek 211 földrengést regisztráltak a 20-120 km epicentrális távolságban. Az említett cikk egyik ábrája a regisztrátumok maximális amplitúdóinak arányait mutatja be a különböző hullámkomponensek szerint. A mérések alapján az említett 2 egymás alatt elhelyezkedő szeizmográf esetén a földrengéshullámok negyed-, vagy fele részükre csillapodtak le 140m mélységben a felszíni értékekhez képest. Természetesen ez a mérési eredmény csak egy átlagos csillapodási tendenciát mutat. A csillapodási értékek megállapításához felhasználtuk még Hu and Xie (2004) és Iwasaki et al. (1977) cikkeit is, amelyekben a csillapodás értékére alapkőzetben és azonos mélységben enyhébb mértékű csillapodási értékeket jegyeztek fel, mint Shimizu és szerzőtársai (1996). Ezekben a tanulmányokban a felszíni hullám-amplitúdók átlagosan kétharmadukra, vagy fele értékükre csökkentek 150 m-es mélységben.

Mindezekből következően a barlangban megállapított kritikus horizontális gyorsulás-értékeket 2.5-3-szorosukra növeltük, ahhoz, hogy megállapítsuk, hogy mekkora kritikus horizontális talajgyorsulásra van szükségünk a felszínen ahhoz, hogy az a talajgyorsulás a mélységgel lecsökkenve a barlangban eltörje a sérülékeny állócseppkövünket. A felszínen és a barlangban szükséges kritikus horizontális talajgyorsulás-értékeket a múltba visszamenőlegesen is a 4.10. ábrán mutatjuk be.

Critical horizontal ground acceleration at the surface and in the cave



**4.10. ábra:** A sértetlen, de sérülékeny 4 m magas Detrekői-zsombolyban álló gyertyaszál alakú cseppkő részletes vizsgálatával megkonstruált küszöb-értékek a kritikus horizontális talajgyorsulásra vonatkozóan. A két görbe a felszíni (piros) és a barlangbeli (kék) kritikus értékeket mutatja. A horizontális skála a cseppkő múltbeli magasságait és a múltba visszamenőleges időt jelöli. A 0 idő a jelent szimbolizálja. A kék sáv a mélységi csillapodás bizonytalanságát jelzi. A vertikális tengelyen a gyorsulás-értékek mérhetőek le. A piros görbe feletti terület reprezentálja azokat a gyorsulásértékeket, amiknek hatására a cseppkő már biztosan eltört volna. 100, 1500 és 2500 éveknél olyan valószínűsített földrengés-eseményeket jelöltünk, melyek a Detrekői-zsomboly környezetében pattantak ki.

A 4.10 ábráról leolvasható, hogy kb. 500 évvel ezelőtt  $1.10 \text{ m/s}^2$  felszíni kritikus horizontális talajgyorsulás (ami a mélyben lecsökken kb.  $0.36 \text{ m/s}^2$  értékre) törte volna el a sérülékeny állócseppkövünket, de mivel a cseppkő jelenleg is sértetlenül áll a Detrekői-zsombolyban, így ekkora gyorsulásértéket a barlang környezetében kipattanó közepes erejű rengések nem okozhattak az elmúlt 500 évben. Ez a  $1.10 \text{ m/s}^2$  érték egy felső küszöbszámnak tekinthető az elmúlt 500 évre vonatkozólag.

## 5. ÚJ VIZSGÁLATI EREDMÉNYEK: KATERLOCH-BARLANG

---

Jelen projekt megkezdése előtt már korábbi adatgyűjtésünk során ismerté vált, hogy Grác mellett, a Katerloch-barlangban léteznek kutatási céljainkra alkalmas cseppkövek (1.1 és 5.1 ábrák). (A bécsi Természettudományi Múzeum Barlangászati Hivatala bocsátott rendelkezésünkre információkat gyertyaszál alakú cseppkövek létezéséről a Katerloch barlangban.) Jelen projekt keretében megtörtént ezek részletes *in situ* vizsgálata. Ezen vizsgálat és az elméleti számítások eredményeit írjuk le ebben a fejezetben.

A Katerloch-barlang két legsérülékenyebb gyertyaszál alakú cseppkövének méret és sajátfrekvencia-méréseit elvégeztük. Az 5.1. táblázat mutatja a méretadatokat, az 5.2. ábra pedig a 8.7 m magas cseppkő egy jellemző, enyhe gerjesztés hatására mutatott horizontális irányú vibrációját és az abból meghatározott sajátfrekvenciáját, illetve annak felharmónikusait (Power Spectral Density of oscillation). (A sajátfrekvenciát mérés útján nem tudtuk meghatározni, mivel az a műszerünk mérési tartományán kívül esett – 1 Hz alatti –, de sikerült azt a mért felharmónikusokból elméleti úton meghatároznunk Kong et al. (2008) cikkében részletezett összefüggések alapján.)

Az álló cseppkövek sajátfrekvenciájának megállapítása azért fontos, mivel ha az kb. 2 Hz és 25 Hz közé esik, akkor a cseppkő sajátfrekvenciája beleesik a nagy távoli rengések maximális jelfelerősítő tartományába. Ha pedig sajátfrekvenciája 15 Hz, 20 Hz vagy 25 Hz körüli, akkor a közeli, kis és közepes erejű földrengések által keltett vibráció okoz rezonanciát az állócseppkövön. Ezek eredményeképpen a cseppkő már eltörne jóval az általunk statikus esetre kiszámított horizontális talajgyorsulás alatti érték hatására is.

A 8.7 m magas cseppkő sajátfrekvenciája igen alacsony (0.7 Hz). Ez azt jelenti, hogy nem esik bele sem a közeli, közepes és kis erejű rengések maximális dinamikus jelfelerősítő frekvencia-tartományába, sem a nagy erejű távoli rengések maximális dinamikus jelfelerősítő frekvencia-tartományába (Lacave et al. 2004). A cseppkő sajátfrekvenciájának felharmónikusai (4.1; 11.5; 22.5 Hz) már jól illeszkednek az előbbieken említett földrengések által gerjesztett hullámok frekvencia-tartományához, azonban ezek a felharmónikusok már kevesebb energiamentiség akkumulálására képesek. Kutatásunk jelenlegi szintjén azonban a felharmónikusok által keltett cseppkővibrációt nem tudjuk még figyelembe venni, ezért az alkalmazott, általunk használt megközelítés – statikus eset – konzervatív. A későbbiekben, kutatómódszerünk továbbfejlesztése során ezt a hatást sem fogjuk elhanyagolni, és így várható, hogy a kritikus horizontális talajgyorsulás-értéknél alacsonyabb gyorsulást is meg tudunk majd állapítani.

Geo-mechanikai laborvizsgálati mérés nem történt a Katerloch-barlangban található törött cseppkövek felhasználásával, mivel a barlangok Ausztriában saját tulajdonban vannak és a tulajdonos nem járult hozzá ahhoz, hogy törött darabokat vigyünk ki a barlangból. A törött cseppkődarabok szemrevételezése alapján úgy döntöttünk, hogy mivel a cseppkövek inkább kristályos, mint porózus szerkezetűek, ezért az elméleti számításainkhoz a Baradla- és a Domica-barlangoknál megállapított geo-mechanikai paramétereket fogjuk felhasználni. Ez konzervatív megközelítést jelent a problémának, mivel a porózus szerkezetű cseppkövek sokkal kisebb erőhatásra törnek.

A barlangban több állócseppkőből is készültek már néhány évvel korábban kormeghatározások (Boch et al. 2006, 2010). Ezekből a kormeghatározási értékekből megállapított átlagos növekedési sebességeket használtuk fel a cseppkőalak 475 évvel (~500 év) ezelőtti alakjának megállapításához.

5.1. Táblázat  
Az *in situ* mérések eredményei

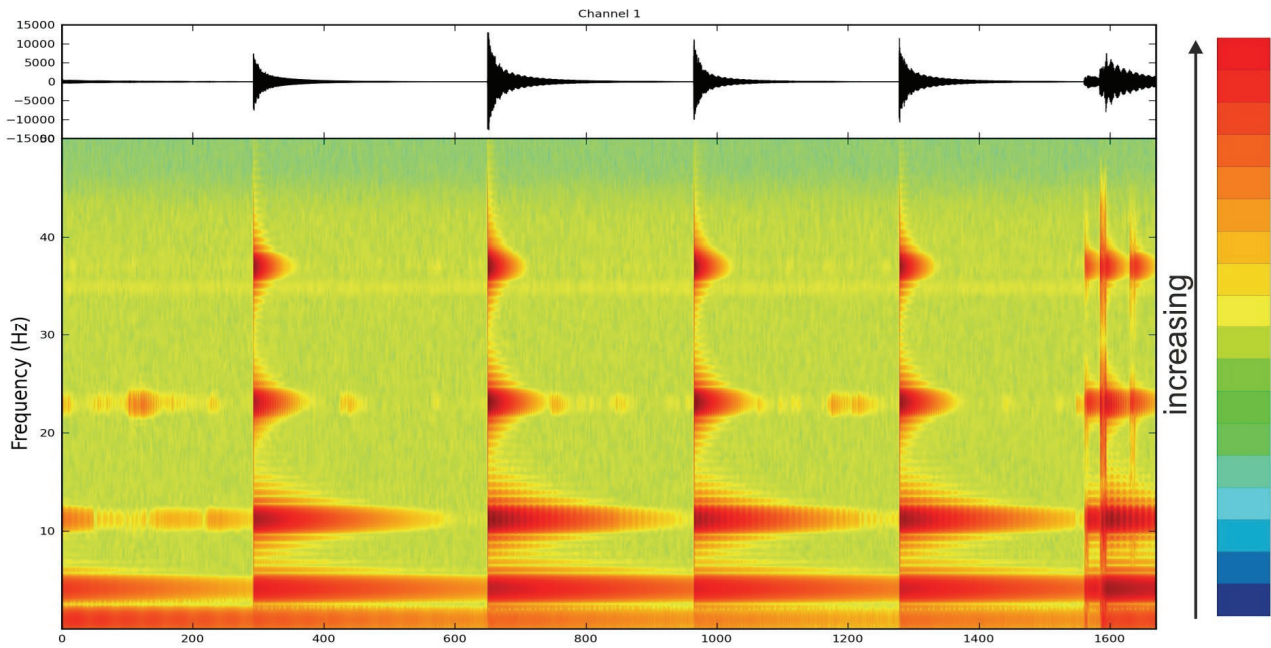
ID	HELY	MAGASSÁG (m)	ÁTMÉRŐ (cm)	H/D	mért $f_0$ (Hz)	mért $f_1$ (Hz)	mért $f_2$ (Hz)
STM (6.5m)	Katerloch barlang, Fantasy Halle	6.5	average: 12	54	2.5	14	32; 33
STM (8.7m)	Katerloch barlang, Zauber Reich	8.7	average: 7.5	116	0.7*	4.1	11.5; $f_3 = 22.5$ ; $f_4 = 37.2$

\*a mért, magasabb felharmónikusok alapján meghatározva



**5.1. ábra:** Sérülékeny állócseppkő Grác mellett a Katerloch (Bagolylyuk) barlangban. A sérülékeny állócseppkő a barlang Zauber Reich (A varázsló birodalma) termében található. Magassága: 8.7 m, átlagos átmérője: 7.5 cm.





**5.2. ábra:** A 8.7 m magas gyertyaszál alakú cseppkő egy jellemző, gerjesztés hatására mutatott horizontális irányú vibrációja és az abból meghatározott sajátfrekvenciának a felharmónikusai.

Az elméleti sajátfrekvenciát és az elméleti kritikus horizontális talajgyorsulást, ami a növekvő gyorsulásértékek közül az első legalacsonyabb érték, ami már eltörné a vizsgált álló cseppkövet a korábban használt módon (lásd 5. fejezet, konzolos tartók elmélete) számítottuk ki (Szeidovitz et al. 2008, Gribovszki et al. 2013). A számításokban a Baradla-barlang törött cseppköveinek felhasználásával megmért geo-mechanikai paraméter-értékek átlagértékeit használtuk fel (sűrűség,  $\rho = 2\,394 \text{ kg/m}^3$ ; dinamikus Young-modulus,  $E = 20\,813 \text{ MPa}$ ; törőszilárdság,  $\sigma_u = 1.62 \text{ MPa}$ ). A számításainkat csak a 8.7 m magas cseppkőre végeztük el, mivel az a sérülékenyebb a két in situ megvizsgált állócseppkő közül. A számítási eredményeket az 5.2. táblázat tartalmazza.

#### 5.2. Táblázat

Az 5.1 táblázat kiegészítve az elméleti sajátfrekvencia és az elméleti kritikus horizontális talajgyorsulás értékekkel

ID	HELY	MAGASSÁG (m)	ÁTMÉRŐ (cm)	H/D	mért $f_0$ (Hz)	elméleti $f_0$ (Hz)	elméleti $a_g$ (m/s <sup>2</sup> )
STM (8.7m)	Katerloch barlang, Zauber Reich	8.7	average: 7.5	116	0.7	0.4	0.167

A mért és az elméletileg kiszámított sajátfrekvencia-értékek közötti különbség (közel duplája egyik érték a másikkal) az korábbi méréseinknél is megfigyelhető volt. Ez a különbség számos tényezőtől adódhat, melyet a korábbi fejezetek egyikében részletesebben kifejtettünk.

Boch et al. (2006, 2010) Katerloch-barlangból származó 8 állócseppkőből nyert magmintákat vizsgálva U/Th kormeghatározási mérésekkel megállapította a vizsgált cseppkövek korát és azok növekedési sebességét. A cseppkövek növekedés sebessége 0.2-0.7 mm/év értékek között mozog.

(Ez az érték jó egyezést mutat az általunk a Detrekői-zsomboly cseppkővére megállapított 0.3 mm/év növekedési sebességgel.) Amennyiben 0.4 mm/év átlagos növekedést feltételezünk a Katerloch-barlang jelenleg 8.7 m magas általunk vizsgált cseppkővére, továbbá feltételezzük azt is, hogy a cseppkő teteje jelenkorú, akkor ~500 évvel ezelőtt a cseppkő kb. 8.5 m magas lehetett. Konzervatív becslés szerint (worst case scenárió, melynek során a nehezebben eltörő cseppkőalakot feltételezzük) a cseppkő 500 évvel ezelőtt sem volt keskenyebb, mint most. Ezért 500 évvel ezelőtt a 8.5 m magas és 7.5 cm átmérőjű álló cseppkövet kb.  $0.176 \text{ m/s}^2$  kritikus horizontális gyorsulású talajmozgás törte volna el az (1) egyenletet alkalmazva úgy, hogy a geo-mechanikai paraméterek ugyanazok, mint korábban.

Mivel a Katerloch barlang, Zauber Reich (Varázsló Birodalma) terme kb. 130 m mélyen található, ezért a Detrekő-zsombolyról szóló fejezet 4.6 alfejezetében részletezett mélység szerinti 2.5-es csillapodást feltételezve a mélyben  $0.176 \text{ m/s}^2$  kritikus horizontális gyorsulású talajmozgás-érték akkor keletkezik, ha a felszínen kb.  $2.5 \times 0.176 \text{ m/s}^2 = 0.439 \text{ m/s}^2$  horizontális talajgyorsulás lép fel.

Ezt a  $0.439 \text{ m/s}^2$  kritikus felszíni horizontális gyorsulás-értéket hasonlítjuk össze a valószínűségi földrengés-veszélyeztetettségi számítások útján nyert SHARE térkép (Danciu et al. 2013, Giardini 2013, Giardini et al. 2013) Katerloch-barlang környezetére megállapított értékével, ami átlagos értéket véve figyelembe (arithmetic mean) a 0.1 g - 0.125 g és a 0.05 g - 0.075 g intervallumok között helyezkedik el (a SHARE Model színskálája nem tüntet fel minden értékközt), azaz 0.075 g - 0.1 g alapkőzetre ("rock" típus) vonatkozólag (475 éves visszatérési időintervallumra számítva) 50 évre 10%-os meghaladási valószínűséggel. Az általunk a speciális, gyertyaszál alakú cseppkővel megállapított kritikus horizontális gyorsulásérték ennél alacsonyabb. Mindezekből következőleg konklúzióként megállapíthatjuk, hogy a vizsgált barlang környezetére vonatkozóan a SHARE Model alapján számított földrengésveszélyeztetettség-érték erősen konzervatív.

## 6. ÚJ, KORÁBBAN NEM ISMERT, VIZSGÁLATI CÉLJAINKRA ALKALMAS CSEPPKÖVEK FELKUTATÁSA: CSODABOGYÓS-BARLANG

Jelen kutatás (projekt-megbízási munka) során vált ismertté számunkra, hogy a Keszthelyi-hegységben, ott pedig az Edericsi-fennsík alatt létezhetnek kutatási céljainkra alkalmas cseppkövek (6.1 ábra). Jelen projekt keretében helyismerettel rendelkező barlangi túravezető társaságában ellátogattunk a barlangba. A barlangi vizsgálatokhoz kutatási engedély beszerzésére volt szükségünk. Az engedély beszerzését úgy oldottuk meg, hogy a már a helyszínen kutató Polacsek Zsolt korábban beszerzett barlangkutatói engedélyéhez kapcsolódtunk, és ilyen módon a Közép-Dunántúli Környezetvédelmi, Természetvédelmi és Vízügyi Felügyelőségtől kapott, a barlang geológiai kutatására vonatkozó engedélye ránk is érvényes volt.



**6.1. ábra:** A Csodabogyós-barlang Függőkert termének állócseppkövei  
(forrás: <https://www.bfnp.hu/hu/csodabogyos-barlang-balatonederics>)

A helyszíni vizsgálataink során megállapítottuk a Függőkert elnevezésű terem cseppköveinek pontos méreteit. (A Csodabogyós-barlang más termeiben nem voltak vizsgálatainkra alkalmas cseppkőképződmények.) A 6.2 ábrán látható cseppkő bizonyult a legnyúlánkabbnak a Függőkert teremben található álló cseppkövek közül (és így az egész barlangban is). Ennek a cseppkőnek a magassága kb. 0.85 m, átlagos átmérője pedig kb. 5.5 cm jelenleg. Ebből következőleg a cseppkő magasság/átmérő aránya jóval az általunk keresett érték (20) alatti ( $H/D \sim 15$ ). Ilyen alacsony cseppkő magasság/átmérő arány esetén nem láttuk értelmét a további vizsgálatoknak, mivel az 20-as arányszám alatti cseppkövek nem tekinthetők valóban sérülékenyeknek a földrengéshullámok keltette horizontális talajmozgás hatására statikus esetben (a rezonancia hatását pedig jelenleg még nem tudjuk vizsgálni). További vizsgálatoknak az előző érvek mellett jelenleg azért nem láttuk értelmét, mivel a Csodabogyós-barlang, Függőkert terme kb. 40-50 m mélyen található a felszín

alatt (6.3 ábra), ezért feltételezhetjük, hogy a felszínhez képest a Fügőkert terembe jutó földrengéshullámok csillapodása is jelentős lehet (legalább 1.5-szeres) a konzervatívabb (worst case) forgatókönyv szerint (Lednická és Kaláb 2016) is.



**6.2. ábra:** A legnyúlánkabb álló cseppkő a balatonedericsi Csodabogyós-barlang Fügőkert termében. Magassága: 0.85 m, átlagos átmérője: 5.5 cm.



**6.3. ábra:** A Csodabogyós-barlang hosszmeteszete (kiterített keresztmeteszete) (forrás: .termeszetvedelem.hu)

## 7. ÚJ, KORÁBBAN NEM ISMERT, VIZSGÁLATI CÉLJAINKRA ALKALMAS CSEPPKÖVEK FELKUTATÁSA: VACSKA-BARLANG A PILISBEN, A MECSEK BARLANGJAI

---

Utánajártunk annak, hogy a Vacska-barlangban, a Pilisben, a néhány évvel ezelőtt feltárt barlangszakaszban léteznek-e vizsgálati céljainkra alkalmas álló cseppkövek ([www.youtube.com/watch?v=\\_wsmiMfa7T4](http://www.youtube.com/watch?v=_wsmiMfa7T4)). Azonban ezek részletes vizsgálatára a projekt végének befejezése előtt sajnos nem nyílt módunk.

Jelenlegi ismereteink alapján a Mecsek egyetlen barlangjában sincs vizsgálatainkra alkalmas, megfelelő mértékben sérülékeny (megfelelően nyúlánk) állócseppkö.



## 8. ÖSSZEFOGLALÁS

A 8.1 táblázatban közöljük a speleo-szeizmológiai kutatási eredményeinket a Paksi atomerőmű 270 km-es környezetére vonatkozólag. A táblázat feltünteti a vizsgált barlangot, a vizsgált barlang legsérülékenyebb cseppkővének azonosítóját, a barlangban talált sérülékeny állócseppkő segítségével meghatározott kritikus horizontális talajgyorsulás értékét a felszínen a cseppkő 475 évvel ezelőtti alakjára vonatkozólag (elméleti  $a_g$  oszlop) továbbá a SHARE Model (Danciu et al. 2013, Giardini 2013, Giardini et al. 2013) és a hazai valószínűségi földrengés-veszélyeztetettségi térkép barlang környezetére megállapított értékeit (Tóth et al. 2006). Az összehasonlításhoz használt térképek 475 éves visszatérési időintervallumra számítva (50 évre 10%-os meghaladási valószínűséggel) ábrázolják a várható horizontális talajgyorsulás maximális értékét. A SHARE térképnél az alapkőzetre ("rock" típus) vonatkozó átlagértékeket vettük figyelembe.

### 8.1. Táblázat

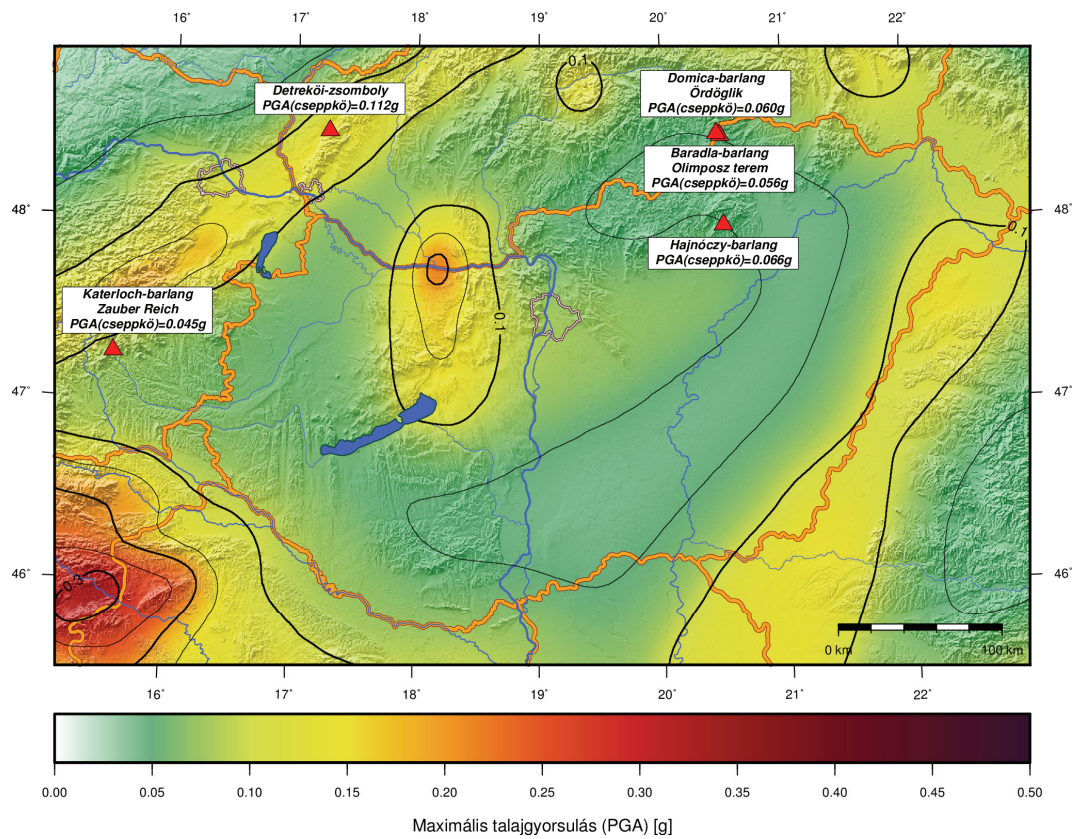
Sérülékeny álló cseppkövek segítségével meghatározott kritikus horizontális talajgyorsulások értékei és a valószínűségi földrengés-veszélyeztetettségi számításokból megállapított, 475 éves visszatérési időintervallumra számított várható maximális horizontális gyorsulásértékek

HELY	koordináták	ID	elméleti 475 évvel ezelőtt $a_g$ ( $m/s^2$ ) (g)	SHARE (g)	PGA Tóth et al. 2006 ( $m/s^2$ )
Detrekői- zsomboly	48.4954279; 17.2663851	STM (4.0m)	1.10 $m/s^2$ 0.112 g	0.125 - 0.150g	1.60 - 1.65 $m/s^2$
Katerloch- barlang, Zauber Reich	47.252753; 15.549550	STM (8.7m)	0.44 $m/s^2$ 0.045 g	0.075 - 0.100g	-----
Hajnóczy- barlang	47.98279; 20.51194	STM (3.6m)	0.65 $m/s^2$ 0.066 g	0.050 - 0.075g	0.85 - 0.90 $m/s^2$
Baradla-barlang, Olimposz terem,	48.4734186; 20.4930433	STM (5.1m)	0.55 $m/s^2$ 0.056 g	0.050 - 0.075g	0.65 - 0.70 $m/s^2$
Domica-barlang, Ördöglik	48.4849038; 20.4640482	STM (5.0m)	0.59 $m/s^2$ 0.060 g	0.050 - 0.075g	0.65 - 0.70 $m/s^2$

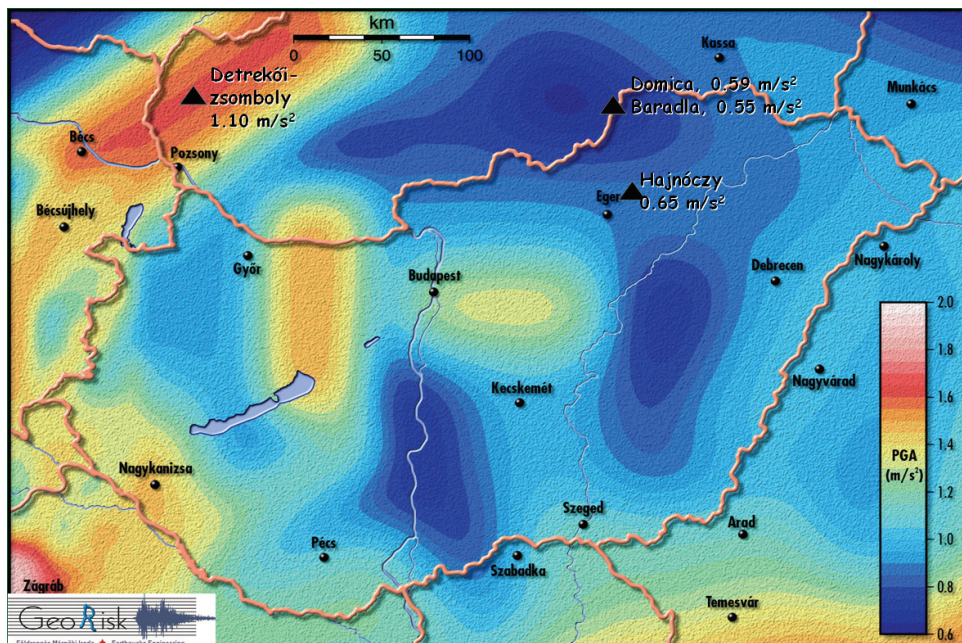
Vizsgálataink eredményeképpen megállapítható, hogy minden esetben (kivételem a Katerloch, aminek a környezetére nincsenek Tóth és szerzőtársainak (2006) számítási eredményei) alacsonyabb kritikus horizontális talajgyorsulás-értékeket sikerült megállapítanunk sérülékeny álló cseppkövek vizsgálatával, mint a Tóth et al. (2006) térképén ábrázolt értékek. A SHARE Modell esetében pedig a Detrekői-zsomboly és a Katerloch-barlang területére sikerült alacsonyabb kritikus horizontális talajgyorsulás-értékeket megállapítanunk a cseppkövek segítségével, mint amit a SHARE Modell előre jelez a következő 475 évre vonatkozóan. A magyar barlangokra (Hajnóczy és Baradla) és a Domica-barlangra a sérülékeny álló cseppkövek vizsgálatával kapott kritikus horizontális talajgyorsulás-értékek pedig minden esetben jó egyezést mutatnak a SHARE Modell által megadott gyorsulás-értékekkel. A 8.1-es ábra a vizsgált álló cseppkövek által meghatározott kritikus horizontális talajgyorsulás-értékeket mutatják a vizsgált barlangok helyén a SHARE Modellen, mint alaptérképen ábrázolva eredményeinket. A 8.2-es ábra pedig a cseppkövek által meghatározott

kritikus horizontális talajgyorsulás-értékeket mutatja a vizsgált barlangok helyén a Tóth et al. (2006) térképen, mint alaptérképen ábrázolva eredményeinket.

## SHARE (10% 50 years)



**8.1. ábra:** A vizsgált álló cseppkövek által meghatározott kritikus horizontális talajgyorsulás értékek a barlangok helyére vonatkozólag a SHARE Modellen 475 éves visszatérési időre és alapközetre meghatározva számtani középértéket figyelembe véve.



**8.2. ábra:** A vizsgált álló cseppkövek által meghatározott kritikus horizontális talajgyorsulás értékek a barlangok helyére vonatkozólag Tóth et al. (2006) térképen.



## 9. HIVATKOZÁSOK

- Becker, A., Davenport, CA., Eichenberger, U., Gilli, E., Jeannin, P-Y., Lacave, C., 2006, Speleoseismology: a critical perspective, *J Seismol*, 10, 371–388
- Bednárík, M., 2009, Seismometric portrayal of calcite tubular stalactites, 146p
- Boch, R., Spötl, C., Kramers, J., 2006, Das Alter der Stalagmiten im Katerloch (2833/59): Erste Ergebnisse der Uran/Thorium Datierung, *Die Höhle* / 57. Jg. / Heft 1-4
- Boch, R., Spötl, C., Kramers, J., 2010, Wachstumsphasen von Stalagmiten im Katerloch (2833/59), *Die Höhle* / 61. Jg. / Heft 1-4
- Butáš, J., 2003, Plavecká priepasť PP-2. Spravodaj Slovenskej speleologickej spoločnosti (Bulletin of Slovak Speleological Society), 34, 1, 35-38 (in Slovak)
- Butáš, J., 2005, Plavecká Abyss PP-2. Bulletin of Slovak Speleological Society, special edition, Proceedings of 14th Speleological Congress UIS in Greece, 48-50
- Cadorin, JF., Jongmans, D., Plumier, A., Camelbeeck, T., Delaby, S., Quinif, Y., 2001, Modelling of speleothems failure in the Hotton cave (Belgium). Is the failure earthquake induced?, *Netherlands J Geosci*, 80, 3–4, 315–321
- Cheng, H., Edwards, RL, Shen, C-C, Polyak, VJ, Asmerom, Y., Woodhead, J., Hellstrom, J., Wang, YJ, Kong, XG, Spötl, C., Wang, XF, Alexander EC, 2013, Improvements in Th-230 dating, Th-230 and U-234 half-life values, and U-Th isotopic measurements by multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 371, 82-91
- Danciu, L., Woessner, J., Giardini, D., and the SHARE consortium, 2013, A community-based probabilistic seismic hazard model for the European region. Proceedings of the Vienna Congress on Recent Advanced in Earthquake Engineering and Structural Dynamics & 13. D-A-CH Tagung, Vienna, No. 496
- Delaby, S., 2001, Paleoseismic investigations in Belgian caves, *Netherlands J Geosci*, 80, 3-4, 323–332
- Dreybrodt, W., Romanov, D., 2008, Regular stalagmites: Theory behind their shape. *Acta Carsologica*, 37, 2-3, 175-184
- Fairchild, J., Baker, A., 2012, *Speleothem Science: From Process to Past Environments*. Wiley-Blackwell, 416p
- Forti, P., Postpischl, D., 1984, Seismotectonic and paleoseismic analyses using karst sediments, *Mar Geol*, 55, 145–161
- Forti, P., Postpischl, D., 1988, Seismotectonics and radiometric dating of karst sediments. *Proc Hist Seismol of Central-eastern Mediterranean Region*, ENEAIAEA Roma, 312–322
- Forti, P., 2001, Biogenic speleothems: An overview. *International Journal of Speleology*, 30A, 1, 39-56
- Giardini, D., 2013, Seismic Hazard Harmonization in Europe (SHARE): Online Data Resource, <http://portal.share-eu.org:8080/jetspeed/portal/>, doi: 10.12686/SED-00000001-SHARE
- Giardini, D., Woessner, J., Danciu, L., Valensise, G., Grünthal, G., Cotton, F., Akkar, S., Basili, R., Stucchi, M., Rovida, A., Stromeyer, D., Arvidsson, R., Meletti, F., Musson, R., Sesetyan, R., K., Demircioglu, M. B., Crowley, H., Pinho, R., Ptilakis, K., Douglas, J., Fonseca, J., Erdik, M., Campos-Costa, A., Glavatic, B., Makropoulos, K., Lindholm, C., Cameelbeeck, T., 2013, Seismic Hazard Harmonization in Europe (SHARE): Online Data Resource, doi: 10.12686/SED-00000001-SHARE.
- Gribovszki, K., Kovács, K., Mónus, P., Chuan-Chou Shen, Török, Á., Brimich, L., 2013, Estimation of an upper limit on prehistoric peak ground acceleration using the parameters of intact stalagmites and the mechanical properties of broken stalagmites in Domicava cave, Slovakia, *Slovensky kras (Slovak Karst)* 51, 1-2, 5-14
- Hu, J., Xie, L., 2004, Variation of earthquake ground motion with depth. *Acta Seismologica Sinica*, 18, 1, 72-81
- Iwasaki, T., Wakabayashi, S., Tatsuoka, F., 1977, Characteristics of underground seismic motions at four sites around Tokyo Bay. In: Lew, HS (ed.), *Wind and seismic effects*, Proceedings of the Eighth Joint Panel Conference of the U. S. – Japan Cooperative Program in Natural Resources, Nat. Bur. Stand. (U.S.), Spec. Publ. 477, U.S. Government Printing Office, Washington, III-41 – III-56.
- Kagan, EJ., Agnon, A., Bar-Matthews, M., Ayalon, A., 2005, Dating large infrequent earthquakes by damaged cave deposits, *Geology*, 33, 4, 261–264
- Kaufmann, G., 2003, Stalagmite growth and palaeo-climate: the numerical perspective. *EPSL*, 214, 251-266

- Kong, S., Zhou, S., Nie, Z., Wang, K., 2008, The size-dependent natural frequency of Bernoulli-Euler micro-beams. *International Journal of Engineering Science*, 46, 5, 427-437
- Lacave, C., Koller, MG., Egozcue, JJ., 2004, What can be concluded about seismic history from broken and unbroken speleothems?, *J Earthq Eng*, 8, 3, 431-455
- Lacave, C., Levret, A., Koller, MG., 2000, Measurements of natural frequencies and damping of speleothems, *Proc. of the 12th World Conference on Earthquake Engineering*, Auckland, New-Zealand, paper No. 2118
- Lednická, M., Kaláb, Z., 2016, Vibration effect at different depth in shallow underground mine caused by earthquakes. *Acta Geophysica*, under review
- Nováková, L., Sosna, K., Broz, M., Najser, J., Novak, P., 2011, Geomechanical parameters of the podlesi granites and their relationship to seismic velocities, *Acta Geodyn. Geomater.*, 8, 163, 353-369
- Shen, C-C, Wu, C-C, Cheng, H., Edwards RL, Hsieh, Y-T, Gallet, S., Chang, C-C, Li, T-Y, Lam, DD, Kano, A., Hori, M., Spötl, C., 2012, High-precision and high-resolution carbonate <sup>230</sup>Th dating by MC-ICP-MS with SEM protocols. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 99, 71-86.
- Shimizu, I., Osawa, H., Seo, T., Yasuike, S., Sasaki, S., 1996, Earthquake-related ground motion and groundwater pressure change at the Kamaishi Mine. *Engineering Geology*, 43, 107-118
- Šmída, B., 2010, Geomorfológia a genéza Plaveckého krasu ako modelového územia tzv. kontaktného krasu Západných Karpát s nižšou energiou reliéfovotvorby. (Geomorphology and formation of Detrekő karst) Dizertačná práca, Katedra fyzickej geografie a geokológie, Prírodovedecká fakulta Univerzity Komenského v Bratislave, 220p (in Slovak)
- Szeidovitz, Gy., Leél-Őssy, Sz., Surányi, G., Czifra, T., Gribovszki, K., 2005, Calculating the peak ground horizontal acceleration generated by paleoearthquakes from failure tensile stress of speleothems, *Hungarian Geophysics*, 46, 3, 91-101 (in Hungarian)
- Szeidovitz, Gy., Gribovszki, K., Bus, Z., Surányi, G., Győri, E., Leél-Őssy, Sz., Scharek, P., 2007, A Kárpát-medencében keletkezett jelenkori és paleorengések átfogó vizsgálata, *Hungarian Geophysics*, 47, 4, 155-159
- Szeidovitz, Gy., Surányi, G., Gribovszki, K., Bus, Z., Leél-Őssy, Sz., Varga, Zs., 2008, Estimation of an upper limit on prehistoric peak ground acceleration using the parameters of intact speleothems in Hungarian caves, *Journal of Seismology*, 12, 1, 21-33
- Tóth L , Győri E , Mónus P , Zsiros T., 2006, Seismic Hazard in the Pannonian Region. In: Pinter N , Grenerczy GY , Wéber J , Stein S , Medak D (szerk.) *Adria Microplate: GPS Geodesy, Tectonics and Hazards: proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on the Adria Microplate: GPS Geodesy, Tectonics and Hazards*, Veszprem, Hungary, April 4-7, 2004 . 412 p. Dordrecht: Springer, 2006. pp. 369-384. ( NATO Science Series IV: Earth and Environmental Sciences; 61. ) (ISBN:9781402042331)