

# Magnetski susceptibilitet u Slovačkoj jami i Jamskom sustavu Kita Gaćešina-Draženova puhaljka na Velebitu

---

**Kamenski, Ana**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2018**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:693990>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-23**



*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET**

Diplomski studiji geologije

**MAGNETSKI SUSCEPTIBILITET U SLOVAČKOJ JAMI I JAMSKOM SUSTAVU**  
**KITA GAĆEŠINA-DRAŽENOVA PUHALJKA NA VELEBITU**

Diplomski rad

Ana Kamenski

G 312

Zagreb, 2018.

*Zahvaljujem...*

*mentoru doc.dr.sc. Urošu Barudžiji na strpljenju i pomoći oko izrade ovog rada,*

*doc.dr.sc. Daliboru Paaru na predloženoj temi, pomoći pri terenskim istraživanjima i savjetima,*

*akademiku prof.dr.sc. Igoru Vlahoviću na podršci i literaturi,*

*gospodi Tomaszu Werneru i Mareku Lewandowskom na savjetima,*

*Hrvatskom geološkom institutu i dr.sc. Ozrenu Hasanu na korištenju laboratorija, uređaja Bartington MS2 System te nesebičnoj pomoći pri radu u laboratoriju,*

*Speleološkom odsjeku PDS Velebit na posudbi uređaja Kappameter KM-7 i literaturi,*

*Nevenu Tadeju, dipl.ing.geol. na pomoći pri radu metodom rendgenske difrakcije u prahu,*

*gospođi Branki Prši i gospodinu Vinku Baranašiću na pomoći pri radu u laboratoriju,*

*kolegama Filipu Šarcu i Karlu Lisici na pomoći pri transportu uzoraka iz jama,*

*obitelji na svesrdnoj podršci za vrijeme istraživanja i pisanja ovog rada, kao i za vrijeme cjelokupnog studiranja.*

**MAGNETSKI SUSCEPTIBILITET U SLOVAČKOJ JAMI I JAMSKOM SUSTAVU KITA  
GAĆEŠINA-DRAŽENOVA PUHALJKA NA VELEBITU**

**ANA KAMENSKI**

Diplomski rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu  
Rudarsko-geološko-naftni fakultet  
Zavod za mineralogiju, petrologiju i mineralne sirovine  
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Sažetak

Magnetizam u speleološkim objektima u Republici Hrvatskoj izuzetno je slabo istražen iako je dobro poznato da su špiljski sedimenti veoma dobro očuvani. Za područja istraživanja odabrana su dva značajna hrvatska speleološka objekta, najdulji objekt Jamski sustav Kita Gaćešina-Draženova puhaljka i Slovačka jama, druga po dubini iza Jamskog sustava Lukina jama-Trojama. Mjera magnetičnosti materijala, odnosno magnetski susceptibilitet mjeren je u speleološkim objektima uređajem *Kappameter KM-7* i u laboratoriju na Hrvatskom geološkom institutu pomoću uređaja *Bartington MS2B System*. Na svim lokacijama mjeren je i uzorkovan isključivo meki sediment. Lokacije profila izabrane su isključivo prema dostupnosti uzorkovanja. U laboratoriju Zavoda za mineralogiju, petrologiju i mineralne sirovine analiziran je sa svakog profila jedan karakterističan uzorak metodom rendgenske difrakcije u prahu (XRD), te je jedan od njih separiran na magnetske frakcije Frantzovim magnetskim izodinamskim separatorom nakon čega je analiziran stereoskopskom lupom. Analizom magnetskog susceptibiliteta utvrđena je njegova mjerljivost u speleološkim sedimentima. Na nekoliko profila uočena je značajna promjena u vrijednostima magnetskog susceptibiliteta te su objašnjene razlikama u mineraloškom sastavu. Primjećena je povezanost viših vrijednosti magnetskog susceptibiliteta s većom količinom minerala koji u sebi sadrže metale. Također se ustanovilo da dva korištena uređaja u ovom radu nisu kompatibilna, odnosno ne registriraju na istim uzorcima jednake niti usporedive vrijednosti. S obzirom na preciznost *Bartington MS2B* uređaja, pretpostavlja se da *Kappameter KM-7* nije adekvatno korišten ili da nije prilagođen uvjetima niske temperature i visoke vlažnosti.

Ključne riječi: magnetski susceptibilitet, Slovačka jama, Jamski sustav Kita Gaćešina-Draženova puhaljka.

Diplomski rad sadrži: 49 stranica, 12 tablica, 19 slika i 15 referenca.

Jezik izvornika: hrvatski

Diplomski rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta  
Pierottijeva 6, Zagreb

Voditelj: Dr. sc. Uroš Barudžija, docent RGNF

Ocjenjivači: Dr. sc. Uroš Barudžija, docent RGNF  
Akademik dr. sc. Igor Vlahović, redoviti profesor RGNF  
Dr. sc. Dalibor Paar, docent PMF

Datum obrane: 28. rujna 2018.

MAGNETIC SUSCEPTIBILITY IN PIT "SLOVAČKA JAMA" AND PIT SYSTEM "KITA  
GAČEŠINA-DRAŽENOVA PUHALJKA" ON VELEBIT

ANA KAMENSKI

Thesis completed in: University of Zagreb  
Faculty of Mining, Geology and Petroleum engineering  
Institute of Mineralogy, Petrology and Mineral deposits,  
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Abstract

Magnetism in speleological sites in the Republic of Croatia is extremely poorly researched although it is well known that cave sediments are well preserved. Two important Croatian speleological sites were selected for the research area, the longest site the Pit system „Kita Gaćešina-Draženova puhaljka“ and the pit „Slovačka jama“, the second in depth after the Pit system „Lukina jama-Trojama“. Measurement of material magnetism, i.e. magnetic susceptibility was measured in speleological sites with the Kappameter KM-7 and in the laboratory at the Croatian Geological Survey using Bartington MS2B System. Only soft sediment was measured and sampled at all locations. Profile locations were selected solely according to the availability of sampling. In the laboratory of the Department of mineralogy, petrology and mineral resources a characteristic sample was analyzed from each profile by X-ray powder diffraction method and one of them is separated into magnetic fractions by Frantz's magnetic isodynamic separator after which it was analyzed by stereoscopic lens. Analyzing magnetic susceptibility determined its measurability in speleological sediments. Significant changes in the values of magnetic susceptibility were observed on several profiles and explained by the differences in the mineral composition. The correlation of higher values of magnetic susceptibility with higher amounts of minerals containing metals is noticed. It has also been established that the two devices used in this paper are not compatible, they don't registre on the same samples equal or comparable values. Given the precision of the Bartington MS2B, it is assumed that the KM-7 Kappameter is not used properly or is not adapted to low temperature and high humidity conditions.

Keywords: magnetic susceptibility, pit "Slovačka jama", Pit system "Kita Gaćešina-Draženova puhaljka".

Thesis contains: 49 pages, 12 tables, 19 figures and 15 references.

Original in: Croatian

Thesis deposited in: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering,  
Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: PhD Uroš Barudžija, Assistant Professor

Reviewers: PhD Uroš Barudžija, Assistant Professor  
Academician PhD Igor Vlahović, Full Professor  
PhD Dalibor Paar, Assistant Professor

Date of defense: September 28, 2018.

## SADRŽAJ

|   |    |
|---|----|
| 1. UVOD .....   | 1  |
| 2. GEOLOGIJA PODRUČJA ISTRAŽIVANJA.....   | 2  |
| 2.1. Slovačka jama.....   | 2  |
| 2.2. Jamski sustav Kita Gaćešina-Draženova puhaljka .....   | 5  |
| 3. MAGNETSKI SUSCEPTIBILITET I PRIRODA MATERIJALA.....  | 8  |
| 4. METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA .....  | 11 |
| 4.1. Speleološka oprema, kretanje u podzemlju i speleološke tehnike.....  | 11 |
| 4.2. Mjerenje magnetskog susceptibiliteta uređajem <i>Kappameter KM-7</i> u speleološkim objektima.....               | 14 |
| 4.3. Mjerenje magnetskog susceptibiliteta uređajem <i>Bartington MS2 System</i> u laboratoriju                        | 16 |
| 4.4. Metoda rendgenske difrakcije u prahu (XRD) .....   | 20 |
| 4.5. Magnetska separacija Frantzovim magnetskim izodinamskim separatorom i analiza frakcija stereoskopskom lupom..... | 21 |
| 5. REZULTATI.....   | 24 |
| 5.1. Rezultati terenskih mjerenja .....   | 24 |
| 5.1.1. Rezultati mjerenja uređajem <i>Kappameter KM-7</i> : Slovačka jama.....  | 24 |
| 5.1.2. Rezultati mjerenja uređajem <i>Kappameter KM-7</i> : Jamski sustav Kita Gaćešina-Draženova puhaljka.....       | 28 |
| 5.2. Rezultati laboratorijskih mjerenja i analiza .....   | 31 |
| 5.2.1. Rezultati mjerenja uređajem <i>Bartington MS2B System</i> .....  | 31 |
| 5.2.2. Rezultati analize rendgenskom difrakcijom u prahu (XRD).....   | 35 |
| 5.2.3. Rezultati separacije minerala i analize stereoskopskom lupom.....  | 37 |
| 6. RASPRAVA REZULTATA .....   | 40 |
| 7. ZAKLJUČAK .....  | 46 |
| LITERATURA.....   | 48 |

## POPIS TABLICA

|   |    |
|---|----|
| Tablica 5-1. Vrijednosti magnetskog susceptibiliteta i njihov razmak na profilu SL1.....  | 27 |
| Tablica 5-2. Vrijednosti magnetskog susceptibiliteta i njihov razmak na profilu SL4.....  | 28 |
| Tablica 5-3. Vrijednosti magnetskog susceptibiliteta i njihov razmak na profilu SL5.....  | 28 |
| Tablica 5-4. Vrijednosti magnetskog susceptibiliteta i njihov razmak na profilu KG1.....  | 30 |
| Tablica 5-5. Vrijednosti magnetskog susceptibiliteta i njihov razmak na profilu KG2.....  | 31 |
| Tablica 5-6. Vrijednosti magnetskog susceptibiliteta dobivene dvojnomo frekvencijom na profilu SL1. ....  | 32 |
| Tablica 5-7. Vrijednosti magnetskog susceptibiliteta dobivene dvojnomo frekvencijom na profilu SL4. ....  | 33 |
| Tablica 5-8. Vrijednosti magnetskog susceptibiliteta dobivene dvojnomo frekvencijom na profilu SL5. ....  | 33 |
| Tablica 5-9. Vrijednosti magnetskog susceptibiliteta dobivene dvojnomo frekvencijom na profilu KG1. ....  | 34 |
| Tablica 5-10. Vrijednosti magnetskog susceptibiliteta dobivene dvojnomo frekvencijom na profilu KG2. ....   | 35 |
| Tablica 5-11. Popis minerala i njihova zastupljenost u uzorcima KG2-8 (6586), KG1-14 (6587), SL1-3 (6588), SL5-3 (6589) i SL4-2 (6590) određenih XRD-om. Minus (-) predstavlja izostanak, upitnik (?) moguću pojavu, plus (+) malu količinu, dva plusa (++) znatnu količinu, a tri plusa (+++) dominaciju minerala. Navedene znake odijeljene kosom crtom (/) označavaju količine koje su između količina predstavljenih dvjema odijeljenim oznakama..... | 36 |
| Tablica 5-12. Popis determiniranih zrna u svakoj frakciji dobivenoj magnetskom separacijom. ....  | 38 |

## POPIS SLIKA

|   |    |
|---|----|
| Slika 2-1. Pogled na Mali kuk. Strelica pokazuje ulaz Slovačke jame (foto: Darko Bakšić). ..  | 2  |
| Slika 2-2. Lokacija Slovačke jame na geološkoj karti (Preuzeto iz Mamužić et al., 1969; Velić et al., 1974; Mamužić et al., 1970; Sokač et al., 1974). .... | 3  |
| Slika 2-3. Lokacija Jamskog sustava Kita Gaćešina-Draženova puhaljka (KG-DP) na geološkoj karti (Preuzeto iz Ivanović et al., 1973). ....                   | 6  |
| 3-1. Rasponi magnetskog susceptibiliteta prirodnih materijala i minerala pri sobnoj temperaturi (Preuzeto iz Dearing, 1999). ....                           | 10 |

|   |    |
|---|----|
| Slika 4-1. Spuštanje speleologa niz vertikalnu stijenu speleološkim tehnikama (foto: Dalibor Paar). .....   | 14 |
| Slika 4-2. Uređaj Kappameter KM-7 mjeri magnetski susceptibilitet u Jamskom sustavu Kita Gaćešina-Draženova puhaljka (foto: Dalibor Paar). .....  | 15 |
| Slika 4-3. Uzorkovanje na SL1 profilu u Slovačkoj jami (foto: Dalibor Paar). .....  | 16 |
| Slika 4-4. Shematski prikazana veza između magnetizacije i magnetskog polja za različita magnetska ponašanja pri slabom magnetskom polju ( $80 \text{ Am}^{-1}$ ) kod kojeg MS2 uređaj računa susceptibilitet (Dearing, 1999). .....  | 17 |
| Slika 4-5. Drobljenje osušenog uzorka u laboratoriju Hrvatskog geološkog instituta (foto: Ozren Hasan). .....   | 18 |
| Slika 4-6. Frantzov magnetski izodinamski separator u laboratoriju Zavoda za mineralogiju, petrologiju i mineralne sirovine (foto: Ana Kamenski). .....   | 22 |
| Slika 5-1. Speleološki nacrt (profil i tlocrt) Slovačke jame s označenim lokacijama uzorkovanja (Preuzeto iz Bakšić, 2016). .....   | 25 |
| Slika 5-2. Lokacije uzorkovanja u Slovačkoj jami (Bakšić, 2016). .....  | 26 |
| Slika 5-3. Registriranje magnetskog susceptibiliteta na profilu SL1 u Slovačkoj jami (foto: Dalibor Paar). .....  | 26 |
| Slika 5-4. Speleološki nacrt (profil i tlocrt) prve etaže Jamskog sustava Kita Gaćešina - Draženova puhaljka s označenim lokacijama uzorkovanja (Preuzeto iz Barišić, 2016). .....  | 29 |
| Slika 5-5. Lokacije uzorkovanja na prvoj etaži Jamskog sustava Kita Gaćešina-Draženova puhaljka (Preuzeto iz Barišić, 2016). .....  | 30 |
| Slika 5-6. Magnetska frakcija izdvojena iz uzorka na struji od 0,4 A (foto: Ana Kamenski). .....  | 39 |
| Slika 6-1. Prikaz vrijednosti magnetskog susceptibiliteta na profilima u Slovačkoj jami dobivenih u laboratoriju radom <i>Bartington MS2B</i> uređaja na frekvenciji od 0,46 kHz. ....  | 41 |
| Slika 6-2. Prikaz vrijednosti magnetskog susceptibiliteta na profilima u Jamskom sustavu Kita Gaćešina-Draženova puhaljka dobivenih u laboratoriju radom <i>Bartington MS2B</i> uređaja na frekvenciji od 0,46 kHz. ....  | 42 |
| Slika 6-3. Graf s prikazom visina magnetskog susceptibiliteta za sve mjerne točke profila KG1. Os apscise na profilima predstavlja duljinu profila s označenim mjernim točkama, a os ordinate visinu vrijednosti magnetskog susceptibiliteta u SI jedinicama, reda veličine $10^{-5}$ . Plava linija odnosi se na vrijednosti izmjerene na terenu, crvena na niskoj, a zelena na visokoj frekvenciji u laboratoriju. .... | 43 |
| Slika 6-4. Prikaz visine magnetskog susceptibiliteta za sve mjerne točke profila SL1. Os apscise na profilima predstavlja duljinu profila s označenim mjernim točkama, a os ordinate  |    |



visinu vrijednosti magnetskog susceptibiliteta u SI jedinicama, reda veličine  $10^{-5}$ . Plava se linija odnosi na vrijednosti izmjerene na terenu, crvena na niskoj, a zelena na visokoj frekvenciji u laboratoriju.....44

## 1. UVOD

Magnetizam u speleološkim objektima u Republici Hrvatskoj izuzetno je slabo istražen iako je dobro poznato da su špiljski sedimenti veoma dobro očuvani. Klimatski uvjeti su puno stabilniji u takvim objektima nego na površini Zemlje te samim time špilje i jame predstavljaju interesantna područja terenskih istraživanja, kako s geološkog aspekta (strukturna geologija, stratigrafska geologija, geološko kartiranje, hidrogeologija), tako i s fizikalnog i biološkog.

Mjerenjem magnetskog susceptibiliteta u speleološkim objektima na Velebitu željelo se utvrditi nekoliko teza vezanih za stratigrafsku geologiju i fiziku. Tema istraživanja bio je magnetski susceptibilitet. Htjelo se odrediti je li magnetski susceptibilitet mjerljiv u podzemlju te ukoliko je, pokazuje li značajne promjene u vrijednostima na jednom ili više profila koji se nalaze na različitim dubinama u podzemlju. Ukoliko ima značajnih promjena, jesu li te promjene popraćene razlikama u mineraloškom sastavu. Također je napravljena usporedba dobivenih *in situ* vrijednosti s onima dobivenim u laboratoriju na Hrvatskom geološkom institutu kako bi se ustanovilo jesu li dva korištena uređaja kompatibilni, odnosno registriraju li na istim uzorcima jednake ili usporedive vrijednosti.

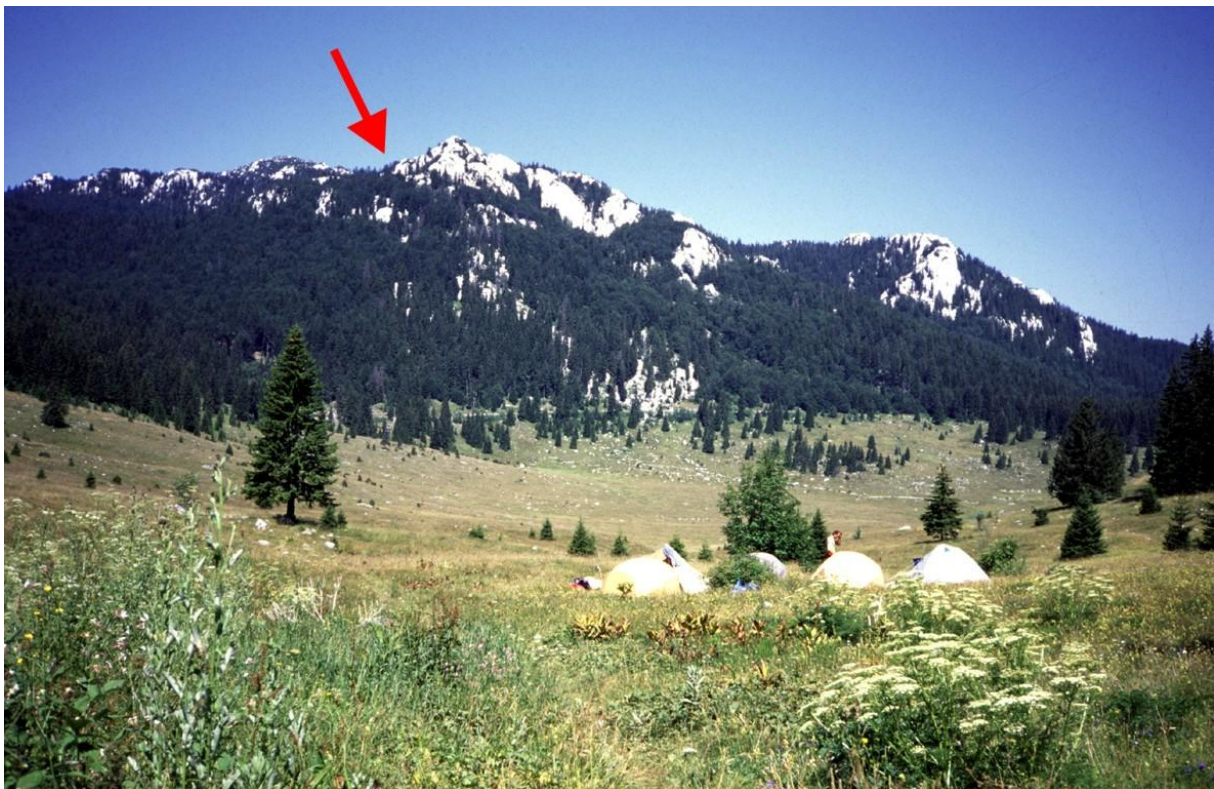
Vrijednosti mjerene u speleološkim objektima, *in situ*, dobivene su pomoću uređaja *Kappameter KM-7*, tvrtke SatisGeo s.r.o. Vrijednosti mjerene na istim uzorcima u laboratoriju na Hrvatskom geološkom institutu dobivene su pomoću uređaja *Bartington MS2B System*. Na svim lokacijama uzorkovan je isključivo meki sediment. Lokacije profila izabrane su isključivo prema dostupnosti uzorkovanja.

## 2. GEOLOGIJA PODRUČJA ISTRAŽIVANJA

Istraživanje u svrhu ovog diplomskog rada provelo se na planini Velebit, odnosno u dva speleološka objekta. Prva istraživanja napravljena su u Slovačkoj jami na sjevernoj strani Velebita, a druga u Jamskom sustavu Kita Gaćešina-Draženova puhaljka koji se nalazi na južnoj strani planine.

### 2.1. Slovačka jama

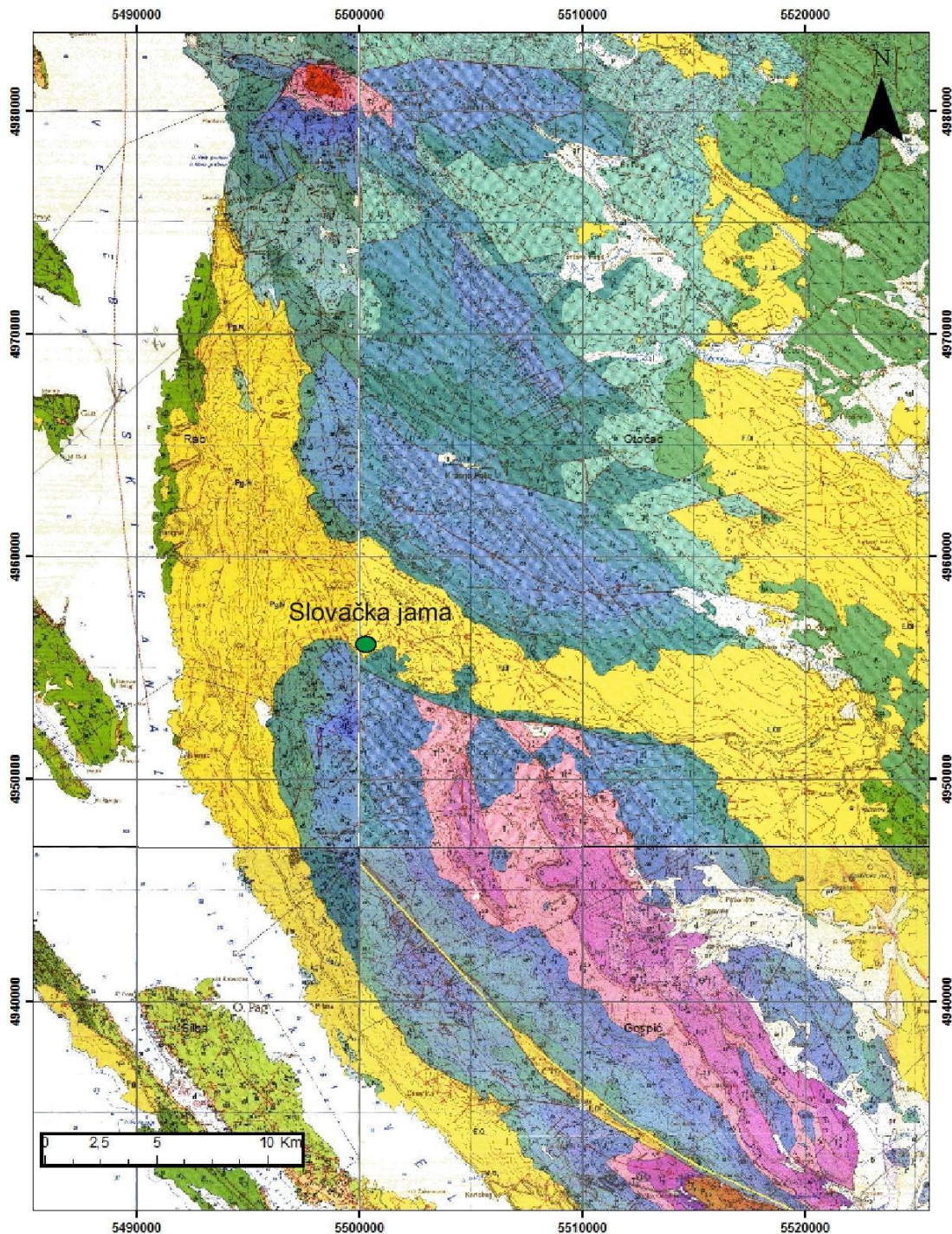
Slovačka jama nalazi se u podnožju Maloga kuka, na području Nacionalnog parka Sjeverni Velebit (Slika 2-1). Ulaz u Slovačku jamu nalazi se na nadmorskoj visini od 1520 metara na sjeveroistočnom dijelu velike vrtače, iza kote 1565 metara Maloga kuka, u smjeru sjeverozapada. Uspon do ulaza u jamu od Velikog Lubenovca traje 45 minuta. Slovačka jama je jedna od tri jame u Republici Hrvatskoj čija je dubina veća od 1000 metara. Do sada je istražena do dubine od 1324 metara i duljine 6426 metara.



Slika 2-1. Pogled na Mali kuk. Strelica pokazuje ulaz Slovačke jame (foto: Darko Bakšić).

Slovačka jama nalazi se uz donji lijevi rub Osnovne geološke karte (OGK) lista Otočac, blizu kontakta s listom OGK Rab (Slika 2-2). U Tumaču za list Otočac Sokač i dr. (1976) opisuju geološke karakteristike ovog područja. Zapadnom stranom lista proteže se

planinski masiv Velebita koji je izgrađen od mnogo stjenovitih vrhova. Čitavo područje koje obuhvaća list Otočac, izuzev krških polja, ima planinsku morfologiju. Istraživani speleološki objekt nalazi se jugoistočno od Hajdučkih i Rožanskih kukova.



Slika 2-2. Lokacija Slovačke jame na geološkoj karti (Preuzeto iz Mamužić et al., 1969; Velić et al., 1974; Mamužić et al., 1970; Sokač et al., 1974).

Najstarije stijene na ovom području su srednjotrijaske starosti (kat ladinik), a izgrađene su od vapnenaca i dolomita te tufova i tufitičnih klastita. Ove stijene nalaze se u razlomljenoj antiklinali Štirovače i predstavljaju antiklinalno zatvaranje naslaga trijasa uz rasjed u području Bakovca. U ladiniku dominira karbonatna sedimentacija u kojoj je nađen i fosilni sadržaj, od kojeg valja istaknuti vapnenačku algu *Diplopora annulata*, pomoću koje se odredila starost naslaga. Na prijelazu iz srednjeg u kasni trijas značajna emerzija je mjestimično erodirala ladiničke naslage, što je dovelo do razvoja paleoreljefa na koji su kasnije taloženi gornjotrijaski klastiti. Početak njihovog taloženja karakterizira i mjestimični transgresivni brečokonglomerati. Pojava dolomita (norik-ret) obilježava početak dugotrajne karbonatne sedimentacije mezozoika.

Na području Velebita i u njegovom podnožju pojava vapnenaca u ranoj juri predstavlja postupni prijelaz iz trijaskih naslaga. Rana jura obilježena je izmjenom dolomita i vapnenaca, prvom pojavom litotida i mrljastih vapnenaca. Pripadnost stijena ranoj juri pretpostavljena je njihovim superpozicijskim položajem, a mjestimično i vapnenim algama *Petrascula heraki* i *P. illyrica*. Na pločastim vapnencima leže deblje uslojeni srednjojurski vapnenci. Mlađi dio srednjojurskih naslaga bilježi fosilna zajednica u kojoj se nalazi i *Selliporella donzellii* koja određuje sigurnu pripadnost srednjoj juri. Na području OGK Otočac mogu se razlikovati dva gornjojurska karbonatna facijesa – pretežito vapnenički i dolomitni. Na području istraživanja ovog rada prisutan je vapnenički karbonatni facijes. Litološki gledano, gornjojurski sedimenti nisu puno drugačiji od srednjojurskih. Razlikuju se po fosilima koji određuju starost sedimenata. Na dijelovima gdje tercijarni sedimenti transgresivno naliježu na gornjojurske razvijene su vapnenačke breče.

Karbonatna sedimentacija kontinuirano se nastavlja i u ranoj kredi. U blizini Velebita, na južnoj polovici lista OGK Otočac, razvijene su vapnenačke breče i kalkareniti u kojima ima proslojaka finožrnatih vapnenaca. Donjokredna starost naslaga dokazana je s nekoliko provodnih fosila: *Salpingoporella dinarica*, *Munieria baconica*, *Orbitolina (Palorbirolina) lenticularis* i dr. Prijelaz iz rane u kasnu kedu obilježen je taloženjem krupnokristalastih i vapnenačkih dolomita te vapnenačkih i dolomitnih breča. Gornjokredne naslage čine finožrnasti vapnenci i raznovrsni kalkareniti sa znatnim primjesama organskog materijala te su determinirani makrofosili – radiolitidi.

Nakon već spomenutih tercijarnih vapnenačkih breča, taložene su kvartarne naslage. One su izgrađene od valutica, ulomaka i čestica starijih stijena, koje su djelovanjem leda i

vode, nošene i taložene u nižim predjelima terena. Stoga su glaciofluvijalni, proluvijalni i deluvijalni sedimentni taloženi za vrijeme pleistocena, a organogeno-barski sedimenti i aluvij čine recentne (holocenske) naslage.

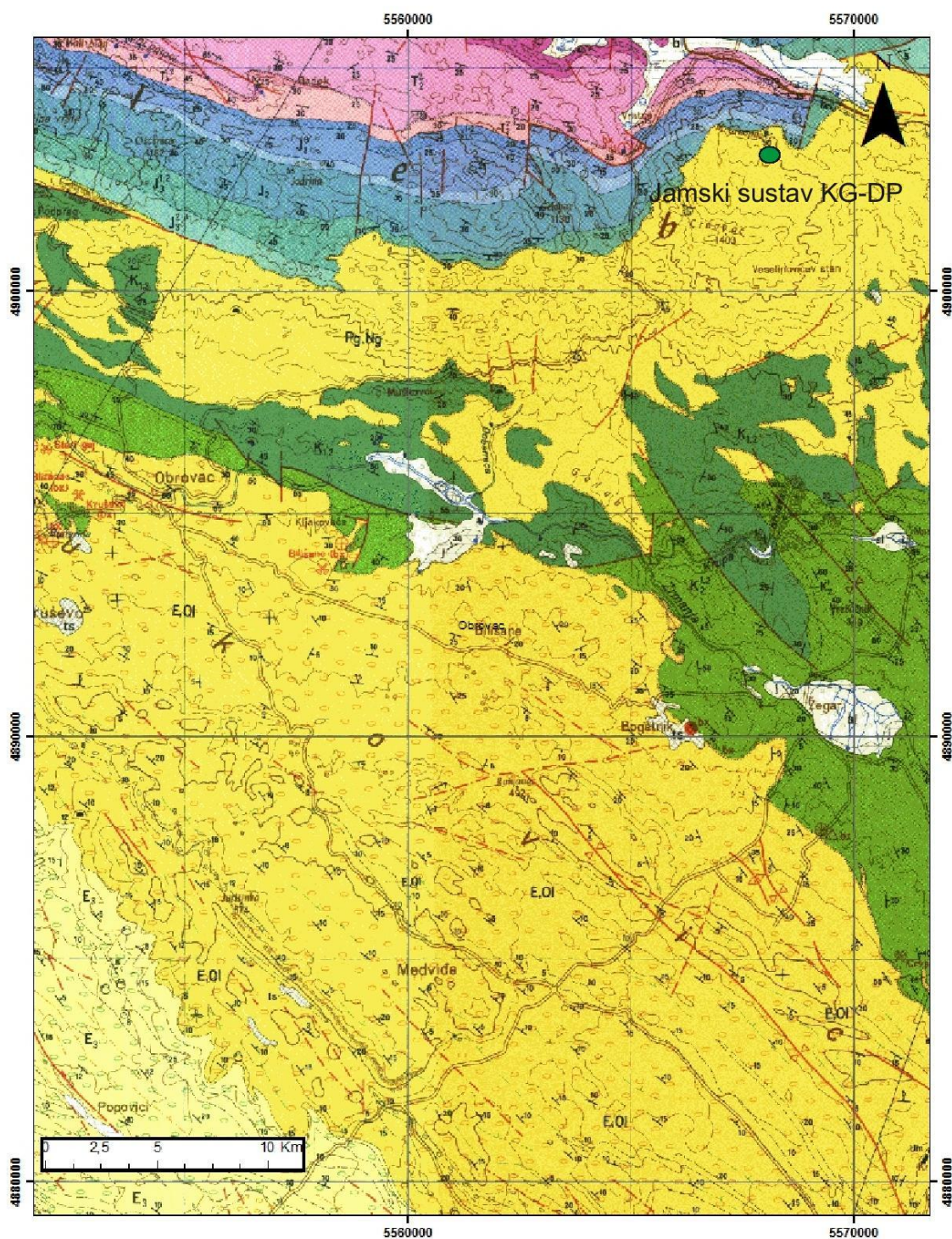
Velebit, kao jedna od četiri tektonske jedinice područja OGK Otočac, predstavlja tektonsko suženje s poremećenom antiklinalnom formom, koje je zadržano i na njegovom sjeverozapadnom dijelu, na području lista OGK Gospić (Sokač, 1976). Jezgra antiklinale izgrađena je od naslaga lanizika, a nalazi se uz rasjed Bakovac-Velika Plana, koji je nastavak Ličkog rasjeda. Zapadnije se razvila sekundarna antiklinala Štirovače. Stvaranje antiklinalnih struktura uz uzdužne rasjede uzrokovalo je relativno izdizanje zapadnog krila. Istočnije uz rasjed Bakovac-Velika Plana, istočno krilo antiklinale intenzivnije je poremećeno utjecajem poprečnog rasjeda Kosinj Bakovac-Veliki Kozjak. Rasjedi malog intenziteta i različite orijentacije mjestimično stvaraju dojam mozaične građe.

## **2.2. Jamski sustav Kita Gaćešina-Draženova puhaljka**

Na području Parka prirode Južni Velebit, ispod vrha Crnopac i iznad Gračaca, na 915 metara nadmorske visine nalazi se najdulji speleološki objekt u Republici Hrvatskoj (do sada istražen) ukupne duljine 35345 metara i dubine 737 metara.

Litološke, stratigrafske i tektonske karakteristike područja istraživanja opisali su Ivanović i dr. (1967) u Tumaču OGK za list Obrovac L33-140. Planina Velebit, tj. njezin jugoistočni dio, zauzima veći dio sjeveroistočne strane lista Obrovac. Visina stjenovitih vrhova na Velebitu, pružanja ZSZ-JJI, postupno se snižava prema jugoistoku.

Najstarije stijene taložene na području lista Obrovac (Slika 2-3) su karbonske starosti. Nalaze se u Lici zapadno od Štikade, nedaleko ulaza u Jamski sustav Kita Gaćešina–Draženova puhaljka. Ove su naslage nastale za vrijeme intenzivnog zapunjavanja bazena, stoga se sastoje od klastičnih naslaga, glinenih šejlova, kvarcnih grauvaka i bioklastičnih vapnenaca. Na kraju karbona došlo je do prekida u sedimentaciji, stoga su na ovim prostorima taložene naslage samo srednjeg i kasnog perma. Na temelju superpozicije i paleontoloških podataka, permske su naslage podijeljene na dvije jedinice – konglomerate i pješčenjake (srednji i donji dio gornjeg perma) i dolomite (gornji perm). Taloženje dolomita uslijedilo je nakon zaravnavanja kopna i prestanka donosa terigenog materijala. Permske naslage nalaze se na području zapadno od Štikade, u Maloj Paklenici.



Slika 2-3. Lokacija Jamskog sustava Kita Gačešina-Draženova pihaljka (KG-DP) na geološkoj karti (Preuzeto iz Ivanović et al., 1973).

U okolici Štikade nema naslaga ranog trijasa jer je na tom području došlo do izdizanja kopna i prekida u sedimentaciji. U aniziku se sedimentacijski prostor proširuje pa su na

jednom dijelu terena srednjotrijaske naslage transgresivne na karbonske i permske naslage. S obzirom na izrazitu karbonatnu sedimentaciju, u aniziku dominiraju kalkareniti i biokalkareniti. Starije klastične stijene čini mješavina sedimentnog i vulkanskog materijala. Starost anizičkih naslaga potvrdile su vapnenačke alge *Oligoporella* i *Diplopora*. Za vrijeme ladinika taložene su isključivo karbonatne stijene. Na prijelazu iz srednjeg u kasni trijas čitavo područje zahvatila je emerzija, što je omogućilo stvaranje ležišta boksita. Transgresija i početak marinske sedimentacije karakteriziraju kasni trijas u kojem su taloženi brečokonglomerati i pretaloženi boksiti. Nakon toga, jaki terestrički utjecaj omogućuje taloženje klastita. Kraj trijaske sedimentacije obilježavaju karbonati.

Veći dio jurskih naslaga taložen je u plitkovodnim uvjetima bez donosa terigenog materijala, zbog čega su jedino taloženi karbonati. Krajem jure područje Velebita zahvatila je emerzija koja je prekinuta taloženjem donjokrednih vapnenaca i vapnenačkih breča. Za vrijeme kasne krede taloženi su dolomiti i rudistni vapnenci. Sedimentacija gornjokrednih naslaga prekinuta je laramijskom fazom alpske orogeneze.

U vrijeme ranog eocena taložene su dvije vrste naslaga – slatkovodni kozinski vapnenci te marinski foraminiferski vapnenci i laporoviti vapnenci. Starost im je pretpostavljena superpozicijom. Srednjo- i gornjoeocenske naslage kontinuirano naliježu na rani eocen, a izgrađene su od foraminiferskih vapnenaca. U razdoblju od srednjeg eocena do oligocena taloženi su klastiti i karbonati poznati pod nazivom Promina naslage, a nalaze se na središnjem dijelu lista Obrovac. Na području Velebita za vrijeme oligocena i neogena nastavlja se taloženje vapnenačkih breča uz jake orogenetske pokrete koji su uslijedili nakon taloženja terciarnih breča, što je uzrokovalo emerziju. Snižavanjem erozijske baze došlo je do pražnjenja pleistocenskih slatkovodnih bazena te nastanka fluvijalnih, aluvijalnih i organogeno-barskih sedimenata.

Područje Velebita čini jednu tektonsku jedinicu OGK lista Obrovac. U strukturnom pogledu, ova tektonska jedinica predstavlja dio jugozapadnog krila velike antiklinale južne Like. Lički rasjed odvaja Velebit od ostalih dijelova antiklinale. Kao posljedica izdizanja tektonske jedinice Velebit uz Lički rasjed otkrivene su naslage paleozoika na području Štikade i Ričica. U smjeru jugozapada na paleozojske naslage slijede trijaske, jurske pa kredne. Paleozojske i mezozojske naslage nagnute su prema jugozapadu i imaju zonarno pružanje SZ-JI. Zadnja, jača tektonska faza oblikovala je recentni tektonski sklop u razdoblju od taloženja paleogensko-neogenskih breča do srednjopleistocenskih naslaga.



### 3. MAGNETSKI SUSCEPTIBILITET I PRIRODA MATERIJALA

Svi materijali u prirodi su magnetični: jako, slabo, pozitivno ili negativno, pod utjecajem su magnetskog polja. Tako i stijene imaju magnetizam koji se vrlo lako može mjeriti.

Magnetski susceptibilitet pokazuje magnetičnost mjerenog materijala. Mjerenje magnetskog susceptibiliteta omogućuje: prepoznavanje minerala bogatih željezom u uzorku, određivanje njihove koncentracije ili ukupnog volumena pomoću visoke rezolucije, klasificiranje različitih tipova materijala, određivanje procesa njihovog nastanka ili transporta te stvaranje „okolišnog otiska“ (engl. *environmental fingerprint*) za odgovarajuće (engl. *matching*) materijale (Dearing, 1999).

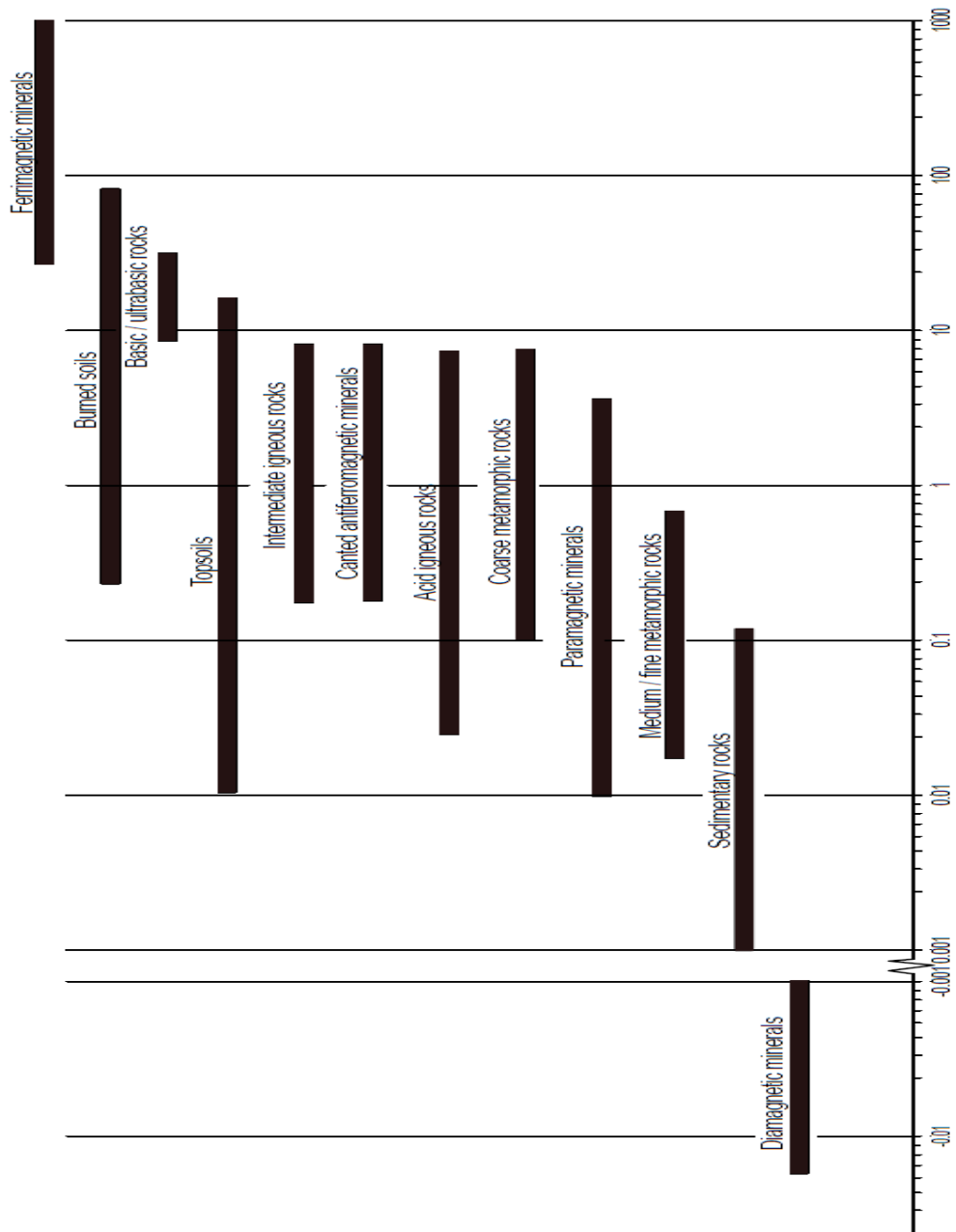
Skoro da i nema prirodoslovog područja u kojem nije korištena metoda mjerenja magnetskog susceptibiliteta. Magnetska mineralogija primjenjiva je u svim vrstama prirodnih istraživanja. Osim toga, mjerenje magnetskog susceptibiliteta je izuzetno jednostavno i pogodno. Pogodno je iz više praktičnih razloga: mjerenja se mogu izvesti na svim materijalima; mjerenja su brza, jednostavna i nedestruktivna; mjerenja se mogu izvesti u laboratoriju ili na terenu s minimalnom pripremom; mjerenja upotpunjuju mnoga druga istraživanja. Veliki broj uzoraka može biti izmjeren na vrlo ekonomičan način bez limitiranja naknadnih istraživanja na tim uzorcima. Mjerenja *in situ* na terenu ubrzavaju povezivanje izmjerenih podataka s opažanjima na terenu, što je od izuzetne važnosti ljudima na područjima koja su udaljena od laboratorija. Stoga, mjerenje magnetskog susceptibiliteta je jedna od mnogih okolišnih analitičkih tehnika koja se često koristi uz kemijske analize, određivanja radioizotopa, mikrofosila i remanentnih magnetskih obilježja (Dearing, 1999).

Magnetski susceptibilitet, općenito, je mjera magnetičnosti materijala. Stijene su na primjer, izgrađene od raznih minerala koji mogu različitom jačinom biti privučeni magnetu. Minerali poput željeznog oksida – magnetita su visoko magnetični te su vrlo brzo privučeni magnetom. Drugi minerali su vrlo slabo magnetični, a privučeni su magnetom samo ako su dovedeni u izravni kontakt s njime. Ostali minerali, kao što je npr. kvarc u pijesku, ne pokazuju nikakvu sposobnost privlačenja magnetom. Magnetski susceptibilitet je mjera ukupne privučenosti prve dvije skupine minerala k magnetu, tzv. stijenska magnetičnost. Stijene s velikim koncentracijama magnetita (npr. bazalt) imaju mnogo više vrijednosti

magnetskog susceptibiliteta nego stijene (npr. vapnenci) koje uobičajeno uopće ne sadrže magnetske minerale (Dearing, 1999).

Ukupno magnetsko ponašanje minerala definirano je konfiguracijom i interakcijom svih elektronskih pokreta u svim atomima određenog minerala. Postoji pet tipova (skupina) magnetskog ponašanja: feromagnetizam, ferimagnetizam, nagnuti (engl. *canted*) antiferomagnetizam, paramagnetizam i dijamagnetizam. Najmagnetičnije tvari, poput čistog željeza, su feromagnetične i ne nalaze se često u prirodi. Najvažnija kategorija magnetskog ponašanja u prirodnim materijalima je ferimagnetizam. U ovoj se kategoriji nalaze magnetit i drugi željezoviti minerali s visokim vrijednostima magnetskog susceptibiliteta. Magnetit je čest mineral, a nalazi se u svim magmatskim stijenama, većini sedimentnih stijena i u većini tala. Prisustvo ferimagnetičnih materijala često dominira mjerenjima magnetskog susceptibiliteta. Niže vrijednosti magnetskog susceptibiliteta karakteriziraju *canted* antiferomagnetične željezne minerale, kao što je npr. hematit. U ovoj skupini ima vrlo malo minerala, a hematit je svakako najčešći u prirodi te često uzrokuje crveno obojenje minerala. Svi metali i minerali iz spomentih triju skupina sposobni su zadržati magnetizaciju i u odsutnosti magnetnog polja te mogu biti identificirani pomoću remanentnih mjerenja. U skupini paramagnetičnih materijala nalaze se oni materijali koji imaju slične ili slabije vrijednosti (u odnosu na prethodne) magnetskog susceptibiliteta. Vrijednosti su mjerljive samo u prisutnosti magnetskog polja, a uzrokovane su željeznim i manganskim ionima u mineralima. Paramagnetični minerali često se nalaze u stijenama i tlu (npr. biotit i pirit). U zadnjoj se skupini nalaze dijamagnetični materijali koji stvaraju slabe ili negativne vrijednosti magnetskog susceptibilitet, kao što su: kvarc, kalcijev karbonat, organska tvar i voda. S obzirom na sve navedeno, magnetski susceptibilitet je suma svih magnetskih susceptibiliteta od feromagnetičnih, ferimagnetičnih, *canted* antiferomagnetičnih, paramagnetičnih i dijamagnetičnih komponenata. Uglavnom, dijamagnetične komponente koje su negativne ili jako slabe mogu se zanemariti s obzirom na sumu ostale četiri skupine. Izuzetak ovome jest kada se uzorak sastoji uglavnom od vode, kvarca ili organske tvari (Dearing, 1999).

Rasponi magnetskog susceptibiliteta za prirodne materijale i minerale prikazani su Slikom 3-1.



3-1. Rasponi magnetskog susceptibiliteta prirodnih materijala i minerala pri sobnoj temperaturi (Preuzeto iz Dearing, 1999).

## 4. METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA

Osnovan uvjet za kvalitetno istraživanje u speleološkim objektima je savladano sigurno kretanje u podzemlju te pravilno korištenje speleoloških tehnika. Istraživanje je započeto mjerenjem magnetskog susceptibiliteta pomoću uređaja *Kappameter KM-7* na pet profila u Slovačkoj jami i Jamskom sustavu Kita Gaćešina-Draženova puhaljka. Drugo mjerenje magnetskog susceptibiliteta na istim uzorcima napravljeno je u laboratoriju Hrvatskog geološkog instituta uređajem *Bartington MS2 System*. Na odabrana pet uzorka, svaki s jednog profila, napravljena je metoda rendgenske difrakcije u prahu (XRD). Jedan od navedenih pet uzoraka separiran je Frantzovim magnetskim izodinamskim separatorom te su dobivene frakcije proučene pod stereoskopskom lupom. Metoda rendgenske difrakcije u prahu (XRD) i magnetska separacija napravljene su u laboratoriju Zavoda za mineralogiju, petrologiju i mineralne sirovine Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta. Metode istraživanja opisane su kronološki redom kako su se koristile za izradu rada.

### 4.1. Speleološka oprema, kretanje u podzemlju i speleološke tehnike

S obzirom da su lokacije istraživanja u speleološkim objektima, tj. u Slovačkoj jami i Jamskom sustavu Kita Gaćešina-Draženova puhaljka, prijeko je bilo potrebno prethodno savladati kretanje u podzemlju i speleološke tehnike te znati koristiti speleološku opremu.

Speleološka oprema je ona oprema koja speleolozima omogućuje sigurno kretanje po speleološkim objektima te ih čuva i štiti od hladnoće, vlage, vode, vlažnih, oštih i skliskih stijena, blata i ostalih uvjeta koji vladaju u podzemlju. Morfologija i uvjeti u speleološkim objektima, kao što su na primjer uski meandri, oštre stijene, blato, voda, visoka vlažnost i slično, zahtjevni su za kretanje što se onda manifestira kroz intenzivnije habanje i trošenje opreme. Stoga su osobine čvrstoće i izdržljivosti (trajnosti) poželjne. Standardnu speleološku opremu čine: kaciga, potkapa, rasvjeta, rezervna rasvjeta, kombinezon, rukavice, prsni navez, prsna penjalica, centralni karabiner, speleološki pojas, pupčana vrpca, ručna penjalica, stremen, *stop descender*, krabiner za nošenje transportne vreće, gumene žizme, nožna penjalica, zamka, dodatni karabineri, kolotura te astrofolija (Rnjak, 2017).

Dio standardne speleološke opreme čini i tehnička oprema. Kaciga je obavezni dio speleološke tehničke opreme, namijenjena zaštititi od izravnih udaraca glavom o stijenu, od

padajućeg kamenja, leda, ispuštenih komada opreme i slično. Osim toga, ona u speleologiji služi za nošenje rasvjete. Prsni navez drži prsnu penjalicu uz tijelo za vrijeme penjanja po užetu. Zbog toga se on mora postaviti što bliže uz tijelo kako bi se omogućilo da gornji dio tijela stoji u vertikalnom položaju i tako oslobađa ruke od nepotrebnog naprezanja. Prsna penjalica, tzv. *croll*, koristi se za penjanje po užetu i stavlja se izravno u centralni karabiner s krajnje desne strane. Gornji dio prsne penjalice pridržava prsni navez, koji mora biti pri penjanju dobro zategnut kako bi speleologa približio užetu i time olakšao penjanje. *Croll* u jednom smjeru slobodno klizi po užetu (prema gore prilikom penjanja), a u drugom se blokira. Centralni karabiner služi za zatvaranje speleološkog pojasa koji se koristi isključivo za penjanje i spuštanje po užetu. Iz tog razloga težište je smješteno nisko. Osim udobnosti, nisko težište pojasa omogućuje veliki hod prsne penjalice prilikom penjanja te znatno lakše prekopčavanje. Pupčana vrpca služi za samoosiguranje prilikom prekopčavanja preko sidrišta, na priječnicama i slično. Sastoji se od dva nejednaka kraka – kraći krak služi za ukopčanje u sidrište prilikom njegovog prelaska, a dulji je krak ukopčan u karabiner ručne penjalice (kao osiguranje) ili se koristi prilikom prelaska priječnica i gelendera te za potrebe osiguravanja. Ručna penjalica, tzv. *bloker*, koristi se za penjanje po užetu i radi na istom principu kao i prsna penjalica. Pri penjanju ručnom penjalicom obavezno se koristi stremen koji može biti izrađen od gurtne. U ručnu penjalicu mora biti ukopčan dulji krak pupčane vrpce koji je spojen s centralnim karabinerom u pojasu. *Stop descender* koristi se za spuštanje po užetima. Nožna penjalica, tzv. *pantin* je penjalica koja se sustavom gurtne pričvršćuje na gležanj noge. Koristi se prilikom penjanja kao treća penjalica koja ubrzava i olakšava napredovanje po užetu. Nožna penjalica je pomoćna sprava, a ne sprava za osobnu sigurnost, za razliku od ručne i prsne penjalice. Zamka je pomoćno uže duljine pet metara koje se upotrebljava za razne improvizacije i samospašavanje. Karabineri su obavezni dijelovi osobne opreme, a služe za spajanje pojedinih sprava ili dijelova opreme sa speleološkim pojansom i prsnim navezom speleologa. Kolotura nosivosti iznad 20 kN koristi se za potrebe podizanja tereta (transportnih vreća), kod izrade nekih sustava samospašavanja i spašavanja. Astrofolija je tanka plastična folija presvučena metalnim (aluminij) slojem koji služi da bi reflektirao zračenu toplinu. Koristi se za utopljavanje pa je također obavezni dio osobne opreme (Rnjak, 2017).

Početak 20. stoljeća Umberto Girometa (1911) definirao je istraživanje špilja kao sport i znanost. Speleologiju se može promatrati kao interdisciplinarno znanstveno područje u kojem se ne mogu razdijeliti misaone aktivnosti od tjelesnih, jer jedno bez drugog nije svrhovito ni moguće. Pred speleologa su stavljeni zahtjevni elementi tjelesne pripremljenosti,

koji su jasno izraženi kod speleologa koji više dana provodi u podzemlju na velikoj dubini u nepovoljnim mikroklimatskim uvjetima (niska temperatura, visoka vlaga, nedostatak prirodnog svjetla, rad u teškim „rudarskim“ uvjetima i sl.). Valja naglasiti i činjenicu da se sva potrebna oprema za rad i boravak na velikim dubinama transportira isključivo tjelesnom snagom, a dodatno opterećenje čini i zahtjevan rad na užetu. Bez obzira bavi li se netko speleologijom povremeno ili stalno, radi li se o zahtjevnim istraživanjima kompleksnijih dubokih podzemnim objekata ili je riječ o radu na jednostavnijim i plićim podzemnim objektima, kod speleologa je potrebna određena razina tjelesnih sposobnosti odnosno psihofizičke spremnosti. To potrebu za trenažnim i kineziološki strukturiranim procesom čini ne samo opravdanom, nego i nužnom (Rnjak, 2017).

U vertikalnim dijelovima speleoloških objekata ne može se kretati bez upotrebe speleološke tehničke opreme (Slika 4-1). Sva tehnika je vezana za užu, koje je osnovno sredstvo savladavanja vertikala. Za spuštanje po užetu koristi se sprava *stop descender*. Kontrola spuštanja ostvaruje se trenjem između dva fiksna koloturnika na spravi i užeta. Prilikom zaustavljanja ispušta se ručica na spravi te se aktivira samokočioni sustav *stop descender*-a. Za penjanje po užetu koriste se tehnike zasnovane na upotrebi sprava koje rade na osnovu „zagriža“ užeta pod opterećenjem. Pod opterećenjem pokretni, konusni dio pritišće užu o nepokretni dio sprave, čime se sprječava povratna kretnja sprave po užetu. Za kretanje su potrebne najmanje dvije sprave – prsna i ručna penjalica. Kretanje olakšava pomoćna treća, nožna penjalica.



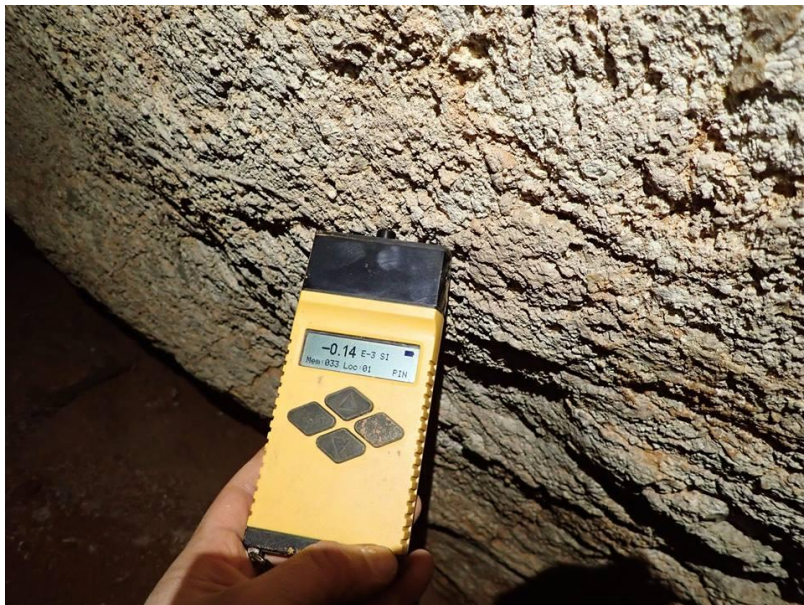
Slika 4-1. Spuštanje speleologa niz vertikalnu stijenu speleološkim tehnikama (foto: Dalibor Paar).

Upotreba tehničke opreme nije uvijek potrebna za kretanje po speleološkim objektima. Ukoliko se speleolog nalazi u širokim, horizontalnim kanalima, niskim kanalima, uskim kanalima i suženjima, meandrima ili u kanalima gdje je moguće slobodno penjanje i spuštanje, ne koristi dodatnu opremu za svoje kretanje po objektu. Iako nije potrebna tehnička oprema, prilikom kretanja je potrebna dodatna pozornost na podlogu kojom se kreće. Naime, voda u kombinaciji sa sedimentom tvori blato koje značajno smanjuje koeficijent trenja i povećava mogućnost poskliznuća.

#### **4.2. Mjerenje magnetskog susceptibiliteta uređajem *Kappameter KM-7* u speleološkim objektima**

Vrijednosti mjerene *in situ* u speleološkim objektima dobivene su džepnim uređajem *Kappameter KM-7*, tvrtke SatisGeo s.r.o (Slika 4-2). Najviše se koristi u istraživanjima mineralnih ležišta, bušotinskih jezgara te arheologiji. Značajke uređaja su: visoka rezolucija, izvrsna preciznost, širok raspon mjerenja, dugotrajna neizbrisiva memorija, pojedinačni i

skenirajući način mjerenja, mjerna igla te povezanost s GPS-om preko *bluetooth*-a. Specifikacije uređaja su: osjetljivost uređaja je  $1 \times 10^{-6}$  SI jedinica, tj.  $1 \times 10^{-5}$  SI jedinica u skenirajućem načinu mjerenja, raspon mjerenja je  $\pm 999 \times 10^{-3}$  SI jedinica s automatski uključenom preciznošću, radna frekvencija iznosi 10 kHz, memorija ima kapacitet od 999 očitavanja bez GPS podataka, potrošnja struje iznosi 8 mA (bez *bluetooth*-a i pozadinskog svjetla), koriste se dvije AAA baterije, radna temperatura je od  $-20$  °C do  $+60$  °C, dimenzije uređaja su 165x68x28 mm, a težina uređaja je 250 g s baterijama (SatisGeo, s. r. o. Instruments for geophysics and environment).



**Slika 4-2. Uređaj Kappameter KM-7 mjeri magnetski susceptibilitet u Jamskom sustavu Kita Gačešina-Draženova puhaljka (foto: Dalibor Paar).**

*Kappameter KM-7* može mjeriti magnetski susceptibilitet na tri načina – pojedinačni, skenirajući i daljinski. Pojedinačni način služi za registriranje individualnih očitavanja. Mjerenje se izvodi u dva koraka. Prvi pritisak na gumb ENT postavlja instrument na nulu, a drugi mjeri magnetski susceptibilitet uzroka. Kako bi se instrument adekvatno „očistio“ mora se udaljiti od mjerene stijene i ostalih magnetnih ili vodljivih materijala najmanje 30 cm. Mjerenje se može izvesti s ravnim zaglavljem uređaja KM-7 (primjenjivo za stijene glatke površine) ili s mjerenom iglom koja daje pouzdanije rezultate na neravnim površinama. Drugi, skenirajući način pruža brze informacije o distribuciji magnetskog susceptibiliteta na određenoj stijenskoj masi. Ovim načinom mjerenja se automatski ponavljaju tri puta u sekundi. Svako mjerenje se prikaže na zaslonu, ali nije sačuvano u memoriji. Zadnji način je daljinski koji omogućava neposredno prenošenje mjerenih vrijednosti na osobno računalo pomoću *bluetooth*-a ili *USB*-a. Ovim se načinom mjerenja automatski ponavljaju pet puta u sekundi. Svaka vrijednost



prikazana je na osobnom računalu te ostaje sačuvana u unutarnjoj memoriji uređaja (SatisGeo, s. r. o. Instruments for geophysics and environment).

Na terenskom istraživanju korišten je pojedinačni način mjerenja. Mjerna igla predstavljala je senzor. Ovakvo mjerenje izvodi se u tri koraka. Prvo se mjeri uređajem najmanje 30 cm udaljeno od stijene (tzv. AIR1). Zatim se prislanja mjerna igla paralelno stijeni, dobiva se vrijednost tzv. SAMPLE. Završno mjerenje se izvodi najmanje 30 cm udaljeno od stijene (tzv. AIR2) te se prema mjerena vrijednosti SAMPLE kao vrijednost mjenog magnetskog susceptibiliteta. Mjerena su tri profila u Slovačkoj jami (Slika 4-3) te dva u Jamskom sustavu Kita Gaćešina-Draženova puhaljka. Lokacije i duljina profila odabrani su prema dostupnosti uzorkovanja u spomenutim speleološkim objektima.



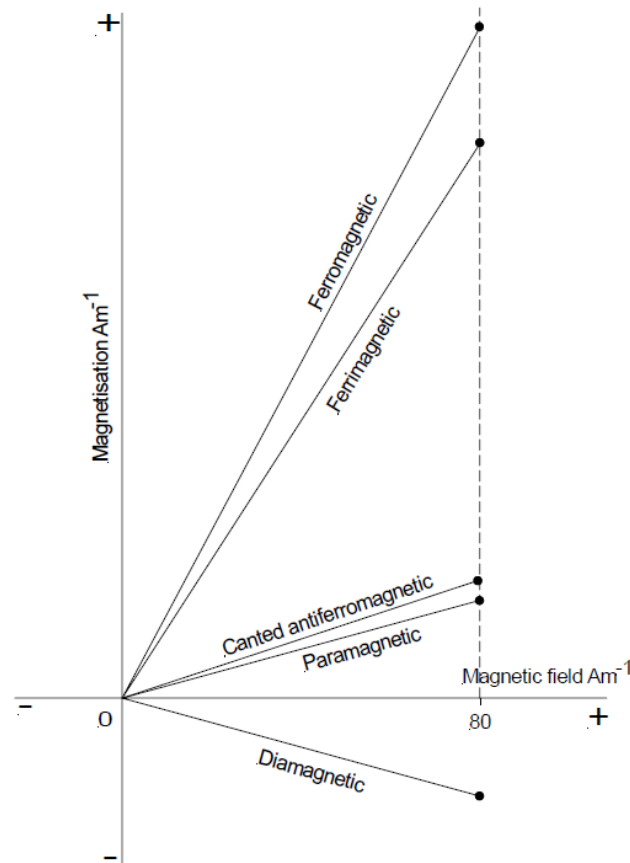
Slika 4-3. Uzorkovanje na SL1 profilu u Slovačkoj jami (foto: Dalibor Paar).

#### **4.3. Mjerenje magnetskog susceptibiliteta uređajem *Bartington MS2 System* u laboratoriju**

Tijekom 1970-ih i 1980-ih među znanstvenicima koji su mjerili magnetizam u prirodi (na terenu i u laboratoriju) postao je popularan uređaj *Bartington Instruments MS2 Magnetic Susceptibility System*. *Bartington MS2* sustav susceptibiliteta sastoji se od mjerača koji se može spojiti na jedan od deset senzora (MS2B, MS2C, MS2D, MS2E, MS2F, MS2G, MS2H, MS2K, MS2  $\kappa/T$  i MS2W). Svaki senzor konstruiran je za određenu svrhu. Uređaj prikazuje

vrijednosti magnetskog susceptibiliteta u cgs (centimetar, gram, sekunda) jedinicama ili u SI jedinicama. U ovom radu korištene su isključivo SI jedinice, a kada bi ih se željelo pretvoriti u cgs jedinice, potrebno ih je podijeliti s 0,4. Ova pretvorba vrijedi samo za vrijednosti prikazane na zaslonu MS2 uređaja, ali ne i za vrijednosti koje su kasnije korigirane za gustoću (Dearing, 1999).

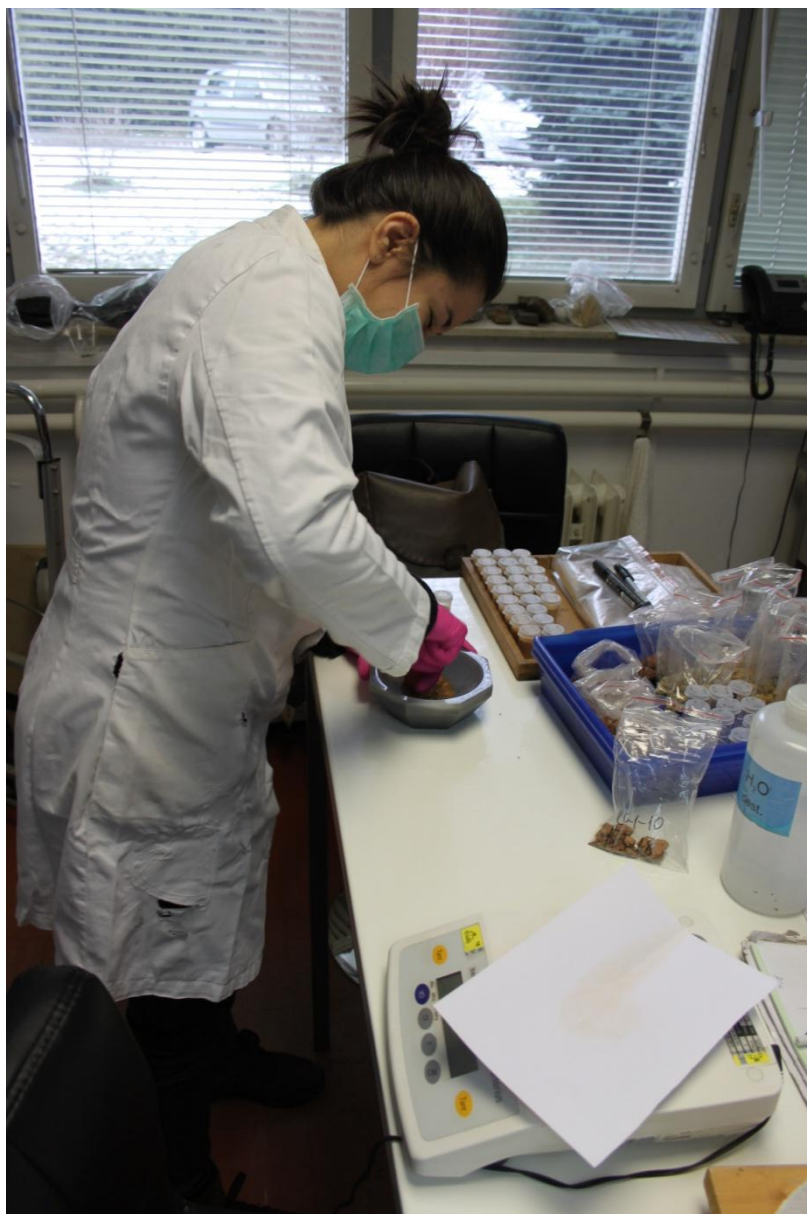
U slabim magnetskim poljima veza između samog magnetskog polja i magnetizacije je linearna i definirana je omjerom snage magnetizacije ( $\text{Am}^{-1}$ ) i magnetskog polja (cca.  $80 \text{ Am}^{-1}$ ). Ovaj omjer predstavlja magnetski susceptibilitet i prikazan je Slikom 4-4 za sve tipove magnetskog ponašanja. Kod samog mjerenja magnetskog susceptibiliteta, *Bartington* senzor stvara slabo magnetsko polje iz izmjenične električne struje i detektira magnetizaciju materijala koji se nalazi u njemu. Preračunata vrijednost magnetskog susceptibiliteta prikazana je na digitalnom ekranu. Svi senzori *Bartington*-a mjere magnetski susceptibilitet relativno u odnosu na zrak, koji služi za kalibriranje mjerača (Dearing, 1999).



Slika 4-4. Shematski prikazana veza između magnetizacije i magnetskog polja za različita magnetska ponašanja pri slabom magnetskom polju ( $80 \text{ Am}^{-1}$ ) kod kojeg MS2 uređaj računa susceptibilitet (Dearing, 1999).

Za laboratorijsko istraživanje u ovom diplomskom radu korišten je MS2B senzor, a dobivene vrijednosti magnetskog susceptibiliteta izražene su u SI jedinicama. Ovaj senzor

mjeri uzorke pripremljene na određeni propisani način. Za uzorkovanje korištene su plastične lopatice i plastične vrećice kako bi se izbjegla kontaminacija s metalnim materijalom. U laboratoriju su uzorci sušeni tri dana u sušioniku, a zatim su se drobili u tarioniku (Slika 4-5). Potom su se tako pripremljenim uzorcima punile plastične bočice od 10 cm<sup>3</sup>, kojima se izmjerila masa. Naposljetku su plastične bočice, jedna po jedna, stavljene u senzor na mjerenje. MS2B senzor je prenosivi laboratorijski senzor koji obavlja mjerenja na dvije različite frekvencije. Ova dvojna frekvencija omogućava registriranje važne kategorije vrlo finih ferimagnetičnih minerala, opisanih kao superparamagnetični koji se često nalaze u tlima i nekim stijenama.



Slika 4-5. Drobljenje osušenog uzorka u laboratoriju Hrvatskog geološkog instituta (foto: Ozren Hasan).

Redosljed postupaka na samom MS2B senzoru je nešto kompliciraniji od onog na KM-7 uređaju. Uređaj se namještava za prikazivanje vrijednosti magnetskog susceptibiliteta u bezdimenzionalnim SI jedinicama ( $10^{-5}$ ). Prije početka mjerenja svih uzoraka, mjeri se kalibracijska plastična bočica volumena  $10 \text{ cm}^3$  dobivena od proizvođača. Ovim postupkom provjerava se dugotrajna kalibracija MS2B uređaja. Sve uzorke se prvo mjeri na 0,1 doseg multiplikatora i na niskoj frekvenciji na 0,46 kHz (LF – *low frequency*). Pri svakom mjerenju, uređaj mjeri redom: zrak, uzorak pa zrak. Idealna razlika prvog i trećeg mjerenja je nula, ukoliko je veća, mjerenja se ponavljaju. Do ovog koraka, uređaj je napravio tri stvari: stvorio je magnetsko polje, registrirao je magnetizaciju uzorka te je izračunao omjer toga dvoje, tj. magnetski susceptibilitet. Na ekranu uređaja ova vrijednost naziva se volumni susceptibilitet, a označava s  $\kappa$  (kappa). Volumni susceptibilitet označava omjer magnetizacije i polja ( $80 \text{ A m}^{-1}$ ) u SI sustavu. Magnetsko polje i magnetizacija u volumenu dobivene su u istim jedinicama ( $\text{A m}^{-1}$ ) u SI sustavu. Stoga,  $\kappa$  nema jedinice i smatra se bezdimenzionalnom. Vrijednosti  $\kappa$  na MS2B uređaju dobivaju se u redu veličine  $10^{-5}$ . Nakon mjerenja svih uzoraka na niskoj, mjere se na visokoj frekvenciji na 4,65 kHz (HF - *high frequency*). Plastične bočice su kod oba mjerenja isto orijentirane kako bi se smanjila potencijalna greška u mjerenju (Dearing, 1999).

Nakon mjerenja računa se nekoliko važnih parametara. Specifični maseni susceptibilitet dobiva se dijeljenjem  $\kappa$  vrijednosti s ukupnom gustoćom uzorka (4-1). Gustoća je dobivena dijeljenjem mase s volumenom. Specifični maseni susceptibilitet označava se sa  $\chi$  (chi), a jedinice su u  $\text{m}^3/\text{kg}$ . Alternativno specifični maseni susceptibilitet dvojne frekvencije može se dobiti iz formule

$$\chi_{fd} = \frac{(\kappa_{lf} - \kappa_{hf})}{\rho}, \quad (4-1)$$

gdje je  $\chi_{fd}$  specifični maseni susceptibilitet dvojne frekvencije izržen u jedinicama  $\text{m}^3/\text{kg}$ .

Razlika u magnetskom susceptibilitetu dvojne frekvencije računa se pomoću formule (4-2)

$$\chi_{fd}\% = \left( \kappa_{lf} - \frac{\kappa_{hf}}{\kappa_{lf}} \right) \times 100, \quad (4-2)$$

a izražava se u postocima (%). Sve navedene parametre računa *Multisus softver* tvrtke *Bartington* te ih prikazuje i sprema na računalu na kojem je instaliran (Dearing, 1999).

MS2B senzor ima široku primjenu. U geologiji općenito, kao i u analizama tla, koristi se za pojedinačne uzorke. U arheologiji se koristi za lociranje bivših naseljenih mjesta, stratografska istraživanja te za prepoznavanje magnetskih materijala. Također se koristi u istraživanjima zagađenja okoliša analizirajući njime uzorke kamena, tla i vegetacije te za testiranje građevinskih materijala – određivanje geološkog podrijetla te otkrivanje ukupne propusnosti materijala (Dearing, 1999).

#### **4.4. Metoda rendgenske difrakcije u prahu (XRD)**

Analizirano je pet uzoraka metodom rendgenske difrakcije u prahu, pri čemu se željelo odrediti njihov mineralni sastav. Uzorci SL1-3, SL4-2, SL5-3, KG1-14 i KG2-8 odabrani su na temelju njihovih vrijednosti magnetskog susceptibiliteta na pripadajućim profilima. Za obradu podataka korišten je program *X'PertHighScore*. Difrakcijske slike praha snimljene su pomoću Philipsovog difraktometra s brojačem,  $\text{CuK}\alpha$  zračenjem ( $U= 40 \text{ kV}$ ,  $I= 35 \text{ mA}$ ). Snimljene su difrakcijske slike originalnih uzoraka.

Rendgenske zrake su elektromagnetski valovi reda veličine  $1 \text{ \AA}$  ( $0,1 \text{ nm}$ ), a dobivaju se rendgenskom cijevi. Ubrzani elektroni velikom razlikom potencijala (naponom) izlaze iz užarene katode i udaraju u anodu velikom brzinom. Elektroni rijetko gube svoju energiju odjednom, češće ju gube postupno – uzastopnim sudaranjem s nekoliko atoma. Tako nastaje zračenje raznih valnih duljina, tzv. bijelo zračenje. Zapravo se radi o kontinuiranom spektru koji ima oštru granicu u kratkovalnom području te se postepeno gubi u smjeru većih valnih duljina. Osim kontinuiranog, mogu se dobiti i linijski spektri koji predstavljaju karakteristično zračenje materijala anode. U većini metoda rendgenske difrakcijske analize koristi se monokromatsko  $\text{CuK}\alpha$  zračenje ( $\lambda\text{K}\alpha = 1,5418 \text{ \AA}$ ) koje se dobiva pomoću grafitnog monokromatora (iz Baniček, 2016).

Pojavu difrakcije omogućava osnovna periodičnost kristalne rešetke koja je reda veličine rendgenskih zraka. Difrakcijom se smatra mala energija raspršenja, koncentrirana u određenim smjerovima u kojima je intenzitet zraka znatno veći, a difrakcijskom slikom nazivamo raspored tih difrakcijskih maksimuma po smjerovima u prostoru registriranih na brojaču. Na trodimenzionalnoj rešetki, odnosno mineralu doći će do difrakcije kod određenih valnih duljina ili kod monokromatskog zračenja, samo kod određenih orijentacija rešetke prema upadnom snopu. Intenziteti refleksa registriraju se pomoću scintilacijskog brojača. Uzorak praha oblikuje se u tanku pločicu površine  $1 \text{ cm}^2$  u nosaču, postavlja se simetrično u odnosu na upadni i difraktirani snop, čime tangira os goniometra. Goniometar osigurava da se

u ravnini okomitoj na os goniometra pokreće brojač i uzorak, pri čemu je njegovna kutna brzina dva puta veća od kutne brzine uzorka. Grafitni monokromator, koji se nalazi ispred pukotine brojača, osigurava da u brojač dospije samo monokromatsko difraktirano  $K\alpha$  zračenje, čime se smanjuje šum na difrakcijskoj slici. Brojač postepeno nailazi na pojedine refleksije koji se registriraju na računalu (iz Baniček, 2016).

#### **4.5. Magnetska separacija Frantzovim magnetskim izodinamskim separatorom i analiza frakcija stereoskopskom lupom**

Za magnetsku separaciju korišten je instrument koji se prema konstruktoru zove „Frantzov magnetski izodinamski separator“ (Slika 4-6), a koji za separaciju minerala koristi fizikalno svojstvo magnetskog susceptibiliteta. Od pet uzoraka uzetih za XRD analizu, jedan je odabran za magnetsku separaciju (KG2-8).

Magnetni separator sastoji se od elektromagneta čiji su polovi tako određeni da je između njih otvoren dugačak prostor koji se postupno proširuje. Prva separacija minerala na osnovi specifičnog magnetskog susceptibiliteta događa se za vrijeme vertikalnog pada zrna iz lijevka u koji se usipa rasuti uzorak. Lijevak se pritom potresa tresalicom kako bi se ostvario stalni pad čestica. Prilikom slobodnog vertikalnog pada zrna se nalaze u polju magneta te se odjeljuju tako da se ona s jačim specifičnim magnetskim susceptibilitetom jače magnetiziraju, a ona s manjim slabije. Ona se i fizički odijele prilikom pada u žlijeb. Žlijeb je dugačak oko 30 cm i prolaskom duž njega zrna će se dalje odjeljivati na osnovi specifičnog magnetskog susceptibiliteta, sve dok ne završe u dva odijeljena spremnika – jednom crne boje za dijamagnetičnu frakciju zrna i drugom, svijetle boje za nemagnetičnu frakciju zrna. Na različitim uzdužnim stranama žlijeba u kojem se zrna nađu nakon vertikalnog pada nalazi se magnet te se tijekom prolaska duž žlijeba zrna dalje magnetiziraju i razdvajaju zahvaljujući specifičnom magnetskom susceptibilitetu, tj. zahvaljujući mogućnosti da se jače ili slabije magnetiziraju (prema Kralj, 2015).



Slika 4-6. Frantzov magnetski izodinamski separator u laboratoriju Zavoda za mineralogiju, petrologiju i mineralne sirovine (foto: Ana Kamenski).

Žlijeb je konstrukcijski izveden tako da nakon otprilike prve trećine njegove dužine postoji usko izbočenje kojim se on dalje dijeli u dva uzdužna kanala. Elektromagnet se, zajedno sa žlijebom, može oko uzdužne osi nagibati za točno određeni kut, a jednako tako i oko poprečne osi postavljati od horizontalnog do kosog položaja. Biranjem toga poprečnog, postranog nagiba žlijeba i brzinom vibracija regulira se brzina kretanja mineralnih zrna duž kanala, a promjenom uzdužnog nagiba kanala i promjenom intenziteta magnetskog polja u ovisnosti o promjeni jakosti struje regulira se privlačenje magnetičnih minerala prema odabranoj magnetskoj susceptibilnosti. Na taj način mineralna zrna, pri putovanju duž nagnutog žlijeba, nailaze na magnetsko polje pa ona s nižom susceptibilnošću nastavljaju putovati nepromijenjenom putanjom, tj. donjim kanalom, a ona s višom susceptibilnošću budu privučena prema magnetu i skreću svoj tok kretanja u gornji kanal. Na kraju kanala postavljene su dvije posudice u koje se nasipaju magnetični, odnosno nemagnetični minerali (prema Kralj, 2015).

Budući da se promjenom uzdužnog kuta nagiba kanala i promjenom jačine magnetskoga polja može po volji mijenjati susceptibilnost, za već male razlike vrijednosti susceptibilnosti minerala moći će se obaviti njihova magnetska separacija. S obzirom na kut uzdužnog i poprečnog nagiba kanala, intenzitet magnetskog polja u ovisnosti o promjeni jakosti struje te vrijednosti magnetske susceptibilnosti svakoga pojedinog minerala, gotovo svi minerali mogu se odijeliti u manje magnetičnu i više magnetičnu frakciju. Jačina

magnetiziranje ovisi i o jačini struje stoga se na svakom izodinamskom separatoru moraju podesiti, jačina struje, uzdužni – prednji nagib, postrani nagib, te jačina trešnje (prema Kralj, 2015).

Separacijom su dobivene ukupno četiri frakcije, tri magnetske i jedna nemagnetska. Magnetske frakcije dobivene su na strujama jakosti 0,4 A, 0,8 A i 1,2 A, a nemagnetska na struji jakosti 1,2 A. Dobivene frakcije proučavane su stereoskopskom lupom te su napravljene njihove mikrofotografije pri različitim povećanjima.



## 5. REZULTATI

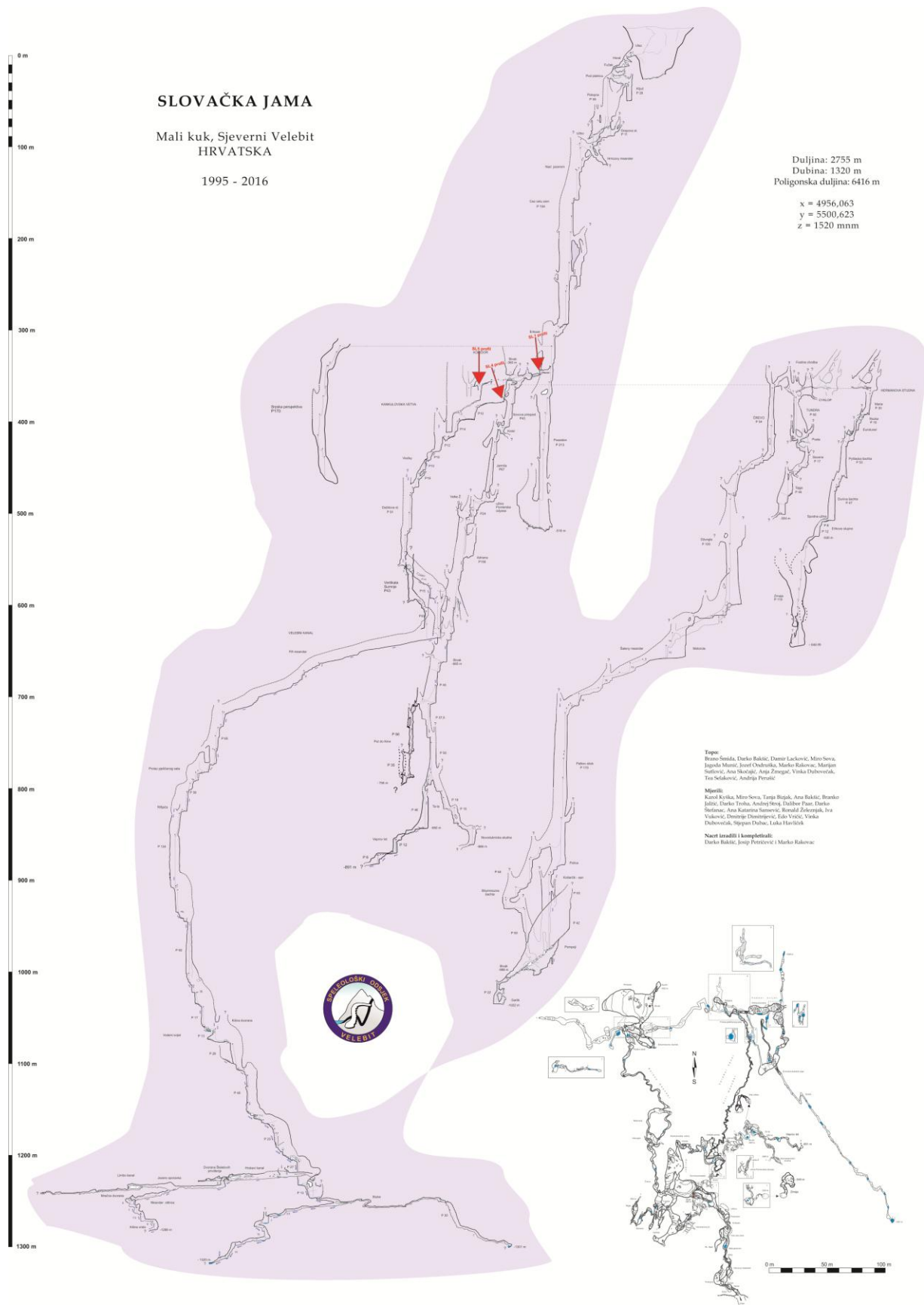
Rezultati stečeni *in situ* mjerenjima uređajem *Kappameter KM-7* u speleološkim objektima navedeni su unutar potpoglavlja Rezultati terenskih mjerenja, a Rezultati laboratorijskih mjerenja obuhvaćaju sve rezultate istraživanja dobivene u laboratorijima Hrvatskog geološkog instituta i Zavoda za mineralogiju, petrologiju i mineralne sirovine Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta.

### 5.1. Rezultati terenskih mjerenja

Terenska mjerenja čine vrijednosti magnetskog susceptibiliteta registrirane uređajem *Kappameter KM-7* na tri profila u Slovačkoj jami na sjeveru Velebita i dva profila u Jamskom sustavu Kita Gaćešina-Draženova puhaljka na južnom Velebitu.

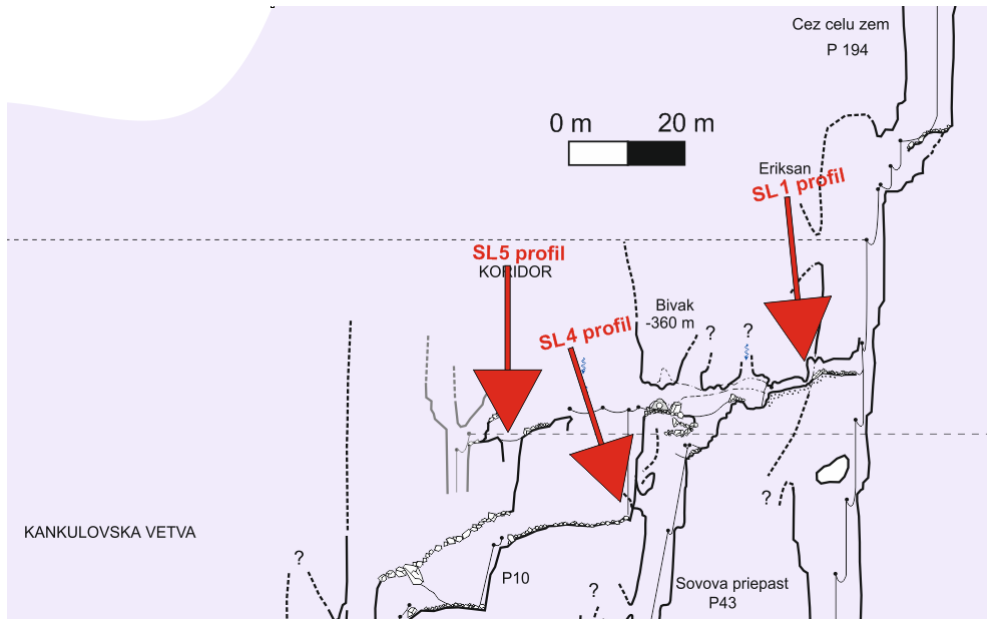
#### 5.1.1. Rezultati mjerenja uređajem *Kappameter KM-7*: Slovačka jama

U razdoblju od 29. 7.-2. 8. 2017. provedena su terenska istraživanja na području Malog Kuka na Sjevernom Velebitu. Četveročlana ekipa provela je tri dana u podzemlju. Za potrebe ovoga diplomskog rada izmjeren je magnetski susceptibilitet na tri profila te su uzeti uzorci za analize u laboratoriju. Magnetski susceptibilitet mjeren je uređajem *Kappameter KM-7* na profilima u okolici bivka, koji se nalazi na -360 metara od ulaza jame. Svi profili su snimljeni vertikalno odozgo prema dolje. Cijeli speleološki nacrt Slovačke jame prikazan je Slikom 5-1, a profili SL1, SL4 i SL5 prikazani su Slikom 5-2.



Slika 5-1. Speleološki nacrt (profil i tlocrt) Slovačke jame s označenim lokacijama uzorkovanja (Preuzeto iz Bakšić, 2016).

Profil SL1 je najduži, jer je iznad njega bilo moguće napraviti privremeno sidrište, čime je uzorkovanje bilo jednostavno i sigurno (Slika 5-3).



Slika 5-2. Lokacije uzorkovanja u Slovačkoj jami (Bakšić, 2016).

Na 27 mjesta duž profila od 2,85 metara, dobivene su vrijednosti magnetskog susceptibiliteta koje su prikazane Tablicom 5-1. S profila je uzeto istih 27 uzoraka na kojima je mjeran magnetski susceptibilitet za analize na površini.



Slika 5-3. Registriranje magnetskog susceptibiliteta na profilu SL1 u Slovačkoj jami (foto: Dalibor Paar).

**Tablica 5-1. Vrijednosti magnetskog susceptibiliteta i njihov razmak na profilu SL1.**

| Broj mjerne točke | Vrijednost magnetskog susceptibiliteta ( $10^{-5}$ SI) | Razmak na profilu (m) |
|-------------------|--|-----------------------|
| SL1-1             | 85,00  | 0,00                  |
| SL1-2             | 91,00  | 0,05                  |
| SL1-3             | 62,00  | 0,10                  |
| SL1-4             | 80,00  | 0,15                  |
| SL1-5             | 120,00   | 0,20                  |
| SL1-6             | 83,00  | 0,25                  |
| SL1-7             | 84,00  | 0,30                  |
| SL1-8             | 85,00  | 0,35                  |
| SL1-9             | 81,00  | 0,40                  |
| SL1-10            | 106,00   | 0,45                  |
| SL1-11            | 88,00  | 0,55                  |
| SL1-12            | 31,00  | 0,65                  |
| SL1-13            | 39,00  | 0,75                  |
| SL1-14            | 51,00  | 0,85                  |
| SL1-15            | 8,00   | 0,95                  |
| SL1-16            | 15,00  | 1,05                  |
| SL1-17            | 7,00   | 1,15                  |
| SL1-18            | 19,00  | 1,25                  |
| SL1-19            | 19,00  | 1,35                  |
| SL1-20            | 22,00  | 1,45                  |
| SL1-21            | -16,00   | 1,65                  |
| SL1-22            | -3,00  | 1,85                  |
| SL1-23            | -45,00   | 2,05                  |
| SL1-24            | 21,00  | 2,25                  |
| SL1-25            | 19,00  | 2,45                  |
| SL1-26            | -3,00  | 2,65                  |
| SL1-27            | 13,00  | 2,85                  |

Na SL1 profilu od nultog metra do 0,45 metara mjereno je i uzorkovano 10 uzoraka kojima je međusobni razmak 0,05 metara. Raspon njihovog magnetskog susceptibiliteta je od 65,00  $10^{-5}$  SI do 120,00  $10^{-5}$  SI. Na duljini od 0,45 do 1,45 metara određeno je također 10 mjernih točaka kojima je raspon magnetskog susceptibiliteta 7,00-88,00  $10^{-5}$  SI. Od 1,45 metara do kraja profila postavljeno je sedam mjernih točaka na razmaku od 20 centimetara. Najniži magnetski susceptibilitet na ovom dijelu profila je -45,00  $10^{-5}$  SI, a najviši 21,00  $10^{-5}$  SI. Mjerne točke SL1-21, SL1-23 i SL1-26 imaju negativne vrijednosti.

Profil SL4 nalazi se najdublje u odnosu na druga dva profila (Slika 5-2). S obzirom da je ovaj profil bilo teže snimiti, a i kasnije uzorkovati, odabrani su veći razmaci između mjernih točaka. Iz tog razloga na duljini profila od 2,5 metra registrirane su samo četiri vrijednosti magnetskog susceptibiliteta. U Tablici 5-2 može se uočiti kako su mjerene

vrijednosti najviše u SL4-1 točki, a najniže u SL4-3 te da je magnetski susceptibilitet znatno viši u SL4-1 točki nego u ostale tri.

**Tablica 5-2. Vrijednosti magnetskog susceptibiliteta i njihov razmak na profilu SL4.**

| Broj mjerne točke | Vrijednost magnetskog susceptibiliteta ( $10^{-5}$ SI) | Razmak na profilu (m) |
|-------------------|--|-----------------------|
| SL4-1             | 52,00  | 0,00                  |
| SL4-2             | 22,00  | 0,50                  |
| SL4-3             | 14,00  | 1,50                  |
| SL4-4             | 23,00  | 2,50                  |

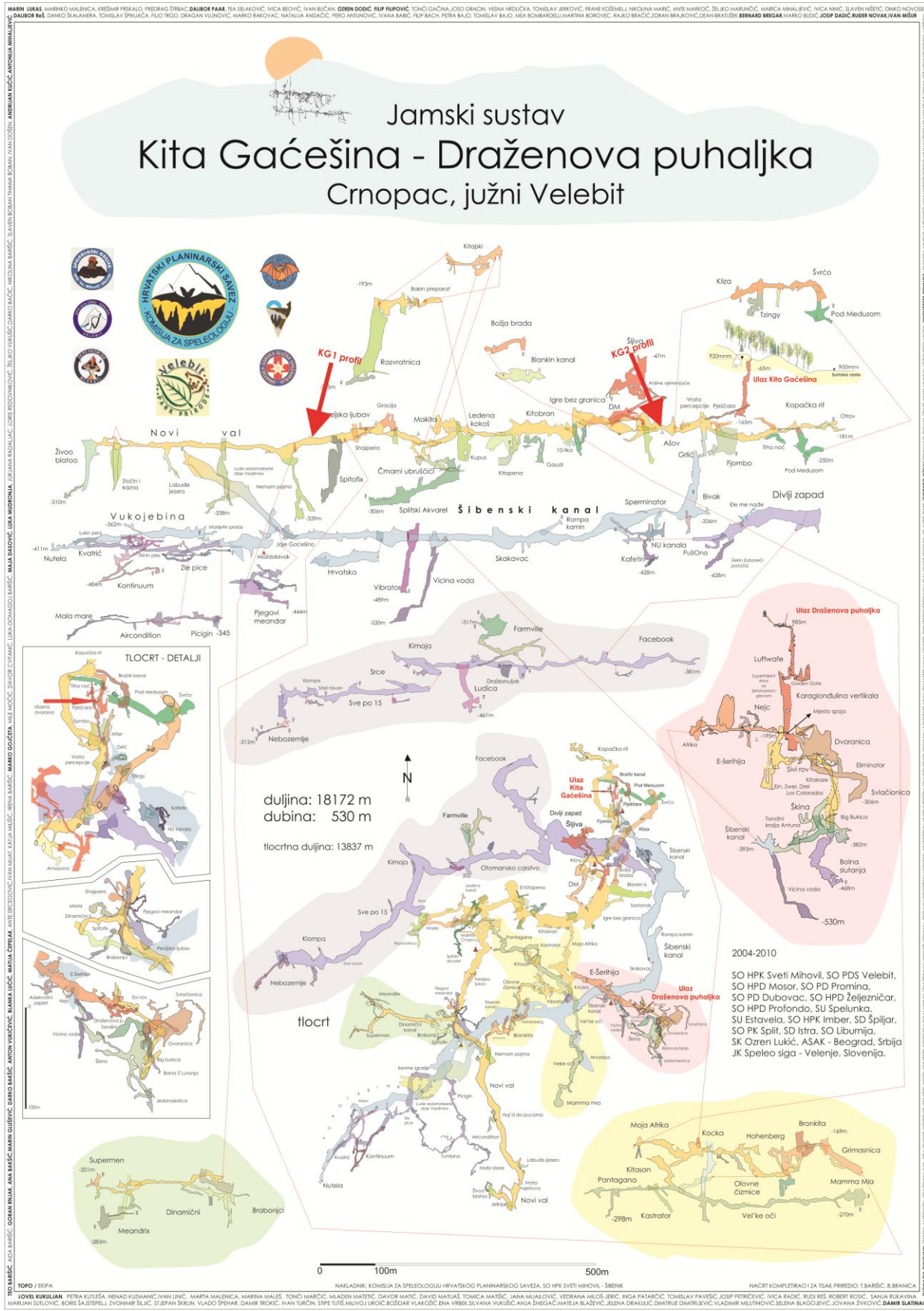
Profil SL5 također se nalazi na zahtjevnom dijelu jame pa stoga nije bilo moguće registrirati magnetski susceptibilitet niti uzorkovati sediment na manjim razmacima. Registrirane vrijednosti te razmak na profilu SL5 prikazan je Tablicom 5-3, gdje se jasno može uočiti da su u točki SL5-1 mjerene vrijednosti znatno više nego u ostalim mjernim točkama.

**Tablica 5-3. Vrijednosti magnetskog susceptibiliteta i njihov razmak na profilu SL5.**

| Broj mjerne točke | Vrijednost magnetskog susceptibiliteta ( $10^{-5}$ SI) | Razmak na profilu (m) |
|-------------------|--|-----------------------|
| SL5-1             | 80,00  | 0,00                  |
| SL5-2             | 36,00  | 1,80                  |
| SL5-3             | 34,00  | 4,30                  |

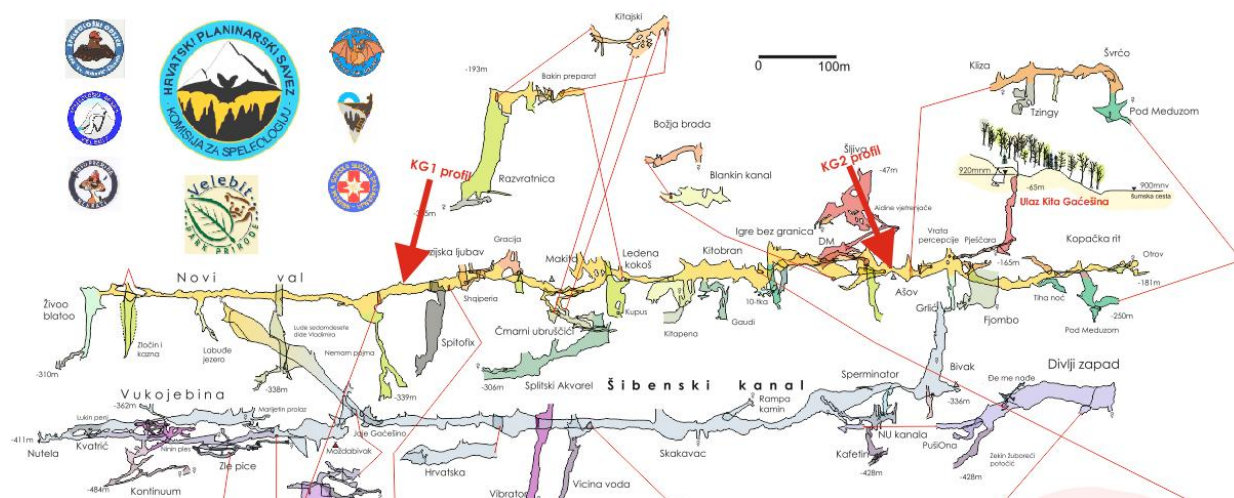
### **5.1.2. Rezultati mjerenja uređajem Kappameter KM-7: Jamski sustav Kita Gaćešina-Draženova puhaljka**

Dana 14. i 15. 10. 2017. provedena su terenska istraživanja u Jamskom sustavu Kita Gaćešina – Draženova puhaljka (KG-DP) na Crnopcu. U podzemlje je išla ista četveročlana ekipa uz pratnju nekoliko speleologa-pripravnika. Snimljena su i izmjerena dva profila, također odozgo prema dolje, iz kojih su uzorkovani meki sedimenti s mjernih točaka, a radi analize u laboratoriju. Oba profila nalaze se na prvoj etaži Jamskog sustava KG-DP te je Slikom 5-4 prikazan njen speleološki nacrt, dok Slika 5-5 predstavlja uvećani dio nacrtu na kojem se jasno uočavaju profili KG1 i KG2.



Slika 5-4. Speleološki nacrt (profil i tlocrt) prve etaže Jamskog sustava Kita Gaćešina - Draženova puhaljka s označenim lokacijama uzorkovanja (Preuzeto iz Barišić, 2016).

Profil KG1, duljine sedam metara, smješten je na kraju kanala „Perzijska ljubav“ (Slika 5-5).



Slika 5-5. Lokacije uzorkovanja na prvoj etaži Jamskog sustava Kita Gačešina-Draženova puhaljka (Preuzeto iz Barišić, 2016).

Duž cijelog profila KG1 mjerne točke međusobno su udaljene pola metra. Sve vrijednosti magnetskog susceptibiliteta kreću se između  $36,00 \cdot 10^{-5}$  SI i  $95,00 \cdot 10^{-5}$  SI (Tablica 5-4). Mjerna točka KG1-6 ima najnižu vrijednost i nalazi se na 2,50 metra profila. Zadnja mjerna točka na profilu, KG1-15, koja je ujedno i najniža u prostoru, ima najvišu vrijednost magnetskog susceptibiliteta.

Tablica 5-4. Vrijednosti magnetskog susceptibiliteta i njihov razmak na profilu KG1.

| Broj mjerne točke | Vrijednost magnetskog susceptibiliteta ( $10^{-5}$ SI) | Razmak na profilu (m) |
|-------------------|--|-----------------------|
| KG1-1             | 74,00  | 0,00                  |
| KG1-2             | 76,00  | 0,50                  |
| KG1-3             | 67,00  | 1,00                  |
| KG1-4             | 89,00  | 1,50                  |
| KG1-5             | 72,00  | 2,00                  |
| KG1-6             | 36,00  | 2,50                  |
| KG1-7             | 61,00  | 3,00                  |
| KG1-8             | 108,00   | 3,50                  |
| KG1-9             | 60,00  | 4,00                  |
| KG1-10            | 91,00  | 4,50                  |
| KG1-11            | 84,00  | 5,00                  |
| KG1-12            | 69,00  | 5,50                  |
| KG1-13            | 89,00  | 6,00                  |
| KG1-14            | 103,00   | 6,50                  |
| KG1-15            | 95,00  | 7,00                  |

Profil KG2 nalazi se neposredno uz bivak „Ašov“ (Slika 5-5). Duljina profila iznosi dva metra, a mjerne točke na njemu su međusobno udaljene 20 centimetara. Najviša registrirana vrijednost magnetskog susceptibiliteta iznosi  $34,00 \cdot 10^{-5}$  SI, a najmanja  $-14,00 \cdot 10^{-5}$  SI (Tablica 5-5). Mjerne točke KG2-6 i KG2-9 imaju negativne vrijednosti.

**Tablica 5-5. Vrijednosti magnetskog susceptibiliteta i njihov razmak na profilu KG2.**

| Broj mjerne točke | Vrijednost magnetskog susceptibiliteta ( $10^{-5}$ SI) | Razmak na profilu (m) |
|-------------------|--|-----------------------|
| KG2-1             | 34,00  | 0,00                  |
| KG2-2             | 17,00  | 0,20                  |
| KG2-3             | 12,00  | 0,40                  |
| KG2-4             | 3,00   | 0,60                  |
| KG2-5             | 0,00   | 0,80                  |
| KG2-6             | -14,00   | 1,00                  |
| KG2-7             | 11,00  | 1,20                  |
| KG2-8             | 15,00  | 1,40                  |
| KG2-9             | -12,00   | 1,60                  |
| KG2-10            | 8,00   | 1,80                  |
| KG2-11            | 5,00   | 2,00                  |

## 5.2. Rezultati laboratorijskih mjerenja i analiza

U laboratoriju Hrvatskog geološkog instituta napravljena su mjerenja magnetskog susceptibiliteta uređajem *Bartington MS2B System* na istim uzorcima na kojima je mjeren magnetski susceptibilitet u speleološkim objektima drugim uređajem. Mineraloške analize napravljene su u laboratoriju Zavoda za mineralogiju, petrologiju i mineralne sirovine Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta.

### 5.2.1. Rezultati mjerenja uređajem *Bartington MS2B System*

Na svim točkama mjerenja na profilima SL1, SL4, SL5, KG1 i KG2 uzorkovan je meki sediment, nakon što je na njemu snimljen magnetski susceptibilitet uređajem *Kappametar KM-7*. Uzorci su u laboratoriju Hrvatskog geološkog instituta sušeni i zatim mrvljeni (detaljan postupak opisan u poglavlju 4. Metododolija istraživanja). Potom je na njima mjeren magnetski susceptibilitet uređajem *Bartington MS2B*. Na svim uzorcima magnetski susceptibilitet mjeren je na dvije frekvencije, nižoj (0,465 kHz) i višoj (4,65 kHz).



Na prvom profilu iz Slovačke jame (SL1) nema registriranih negativnih vrijednosti magnetskog susceptibiliteta (Tablica 5-6).

**Tablica 5-6. Vrijednosti magnetskog susceptibiliteta dobivene dvojnomo frekvencijom na profilu SL1.**

| Broj uzorka | Vrijednost magnetskog susceptibiliteta na niskoj frekvenciji ( $10^{-5}$ SI) | Vrijednost magnetskog susceptibiliteta na visokoj frekvenciji ( $10^{-5}$ SI) |
|-------------|--|---|
| SL1-1       | 60,20  | 54,10   |
| SL1-2       | 80,50  | 71,00   |
| SL1-3       | 90,50  | 79,00   |
| SL1-4       | 84,70  | 74,00   |
| SL1-5       | 74,10  | 65,40   |
| SL1-6       | 85,50  | 75,00   |
| SL1-7       | 99,40  | 86,40   |
| SL1-8       | 83,90  | 75,40   |
| SL1-9       | 78,90  | 69,90   |
| SL1-10      | 71,60  | 65,60   |
| SL1-11      | 34,20  | 31,20   |
| SL1-12      | 21,80  | 20,70   |
| SL1-13      | 28,30  | 26,80   |
| SL1-14      | 19,10  | 18,40   |
| SL1-15      | 8,70   | 8,40  |
| SL1-16      | 12,30  | 12,00   |
| SL1-17      | 7,60   | 7,30  |
| SL1-18      | 8,40   | 8,10  |
| SL1-19      | 8,50   | 8,40  |
| SL1-20      | 12,80  | 12,60   |
| SL1-21      | 13,00  | 12,60   |
| SL1-22      | 13,20  | 13,00   |
| SL1-23      | 11,70  | 11,30   |
| SL1-24      | 11,70  | 10,70   |
| SL1-25      | 9,10   | 8,80  |
| SL1-26      | 8,90   | 8,80  |
| SL1-27      | 6,60   | 6,50  |

Na niskoj frekvenciji vrijednosti se nalaze u rasponu 6,60-99,40  $10^{-5}$  SI. Najniža vrijednost registrirana je na uzorku SL1-27 koji se nalazi najniže na profilu. Najviša vrijednost magnetskog susceptibiliteta odgovara uzorku SL1-7. Na višoj frekvenciji vrijednosti rastu, od 6,50  $10^{-5}$  SI na uzorku SL1-27 do 86,40  $10^{-5}$  SI na uzorku SL1-7.

Tablicom 5-7 prikazane su vrijednosti magnetskog susceptibiliteta mjerene na dvije različite frekvencije na profilu SL4. Vrijednosti registrirane na nižoj frekvenciji (0,465 kHz) nalaze se u rasponu 29,00-36,20  $10^{-5}$  SI, a one dobivene višom frekvencijom (4,65 kHz) su u rasponu 28,10-35,30  $10^{-5}$  SI. Uzorak SL4-3 na obje frekvencije ima najnižu vrijednost magnetskog susceptibiliteta, a uzorak SL4-1 najvišu.

**Tablica 5-7. Vrijednosti magnetskog susceptibiliteta dobivene dvojnomo frekvencijom na profilu SL4.**

| Broj uzorka | Vrijednost magnetskog susceptibiliteta na niskoj frekvenciji ( $10^{-5}$ SI) | Vrijednost magnetskog susceptibiliteta na visokoj frekvenciji ( $10^{-5}$ SI) |
|-------------|--|---|
| SL4-1       | 36,20  | 35,30   |
| SL4-2       | 31,80  | 30,80   |
| SL4-3       | 29,00  | 28,10   |
| SL4-4       | 31,70  | 30,60   |

Vrijednosti magnetskog susceptibiliteta dobivene dvojnomo frekvencijom na profilu SL5 prikazane su Tablicom 5-8. Registrirane vrijednosti na nižoj frekvenciji nalaze se u rasponu 46,00-98,80  $10^{-5}$  SI, a na višoj 40,40-83,70  $10^{-5}$  SI. Na ovom se profilu nalaze također i najviše i najniže vrijednosti magnetskog susceptibiliteta izmjerene na istim uzorcima na obje frekvencije.

**Tablica 5-8. Vrijednosti magnetskog susceptibiliteta dobivene dvojnomo frekvencijom na profilu SL5.**

| Broj uzorka | Vrijednost magnetskog susceptibiliteta na niskoj frekvenciji ( $10^{-5}$ SI) | Vrijednost magnetskog susceptibiliteta na visokoj frekvenciji ( $10^{-5}$ SI) |
|-------------|--|---|
| SL5-1       | 85,80  | 74,70   |
| SL5-2       | 46,00  | 40,40   |
| SL5-3       | 98,80  | 83,70   |

Izmjerene vrijednosti magnetskog susceptibiliteta na dvije različite frekvencije na profilu KG1 u Jamskom sustavu Kita Gaćešina-Draženova puhaljka prikazane su u Tablici 5-9. Frekvencijom od 0,465 kHz dobiven je raspon vrijednosti 51,00-77,20  $10^{-5}$  SI. Najniža vrijednost registrirana je na uzorku KG1-4, a najviša na uzorcima KG1-6 i KG1-7. Višom frekvencijom dobivene su vrijednosti od 44,80  $10^{-5}$  SI do 69,30  $10^{-5}$  SI. Najniža vrijednost magnetskog susceptibiliteta registrirana je na uzorku KG1-4, a najviša na uzorku KG1-7.

**Tablica 5-9. Vrijednosti magnetskog susceptibiliteta dobivene dvojnomo frekvencijom na profilu KG1.**

| Broj uzorka | Vrijednost magnetskog susceptibiliteta na niskoj frekvenciji ( $10^{-5}$ SI) | Vrijednost magnetskog susceptibiliteta na visokoj frekvenciji ( $10^{-5}$ SI) |
|-------------|--|---|
| KG1-1       | 55,50  | 48,30   |
| KG1-2       | 57,90  | 50,30   |
| KG1-3       | 68,50  | 59,70   |
| KG1-4       | 51,00  | 44,80   |
| KG1-5       | 71,70  | 63,60   |
| KG1-6       | 77,20  | 68,80   |
| KG1-7       | 77,20  | 69,30   |
| KG1-8       | 62,90  | 55,60   |
| KG1-9       | 65,50  | 58,10   |
| KG1-10      | 67,90  | 60,60   |
| KG1-11      | 75,10  | 66,60   |
| KG1-12      | 70,20  | 62,50   |
| KG1-13      | 72,60  | 63,50   |
| KG1-14      | 53,30  | 46,90   |
| KG1-15      | 67,00  | 60,50   |

Vrijednosti magnetskog susceptibiliteta dobivenog dvojnomo frekvencijom na uzorcima profila KG2 prikazane su Tablicom 5-10. Registrirane vrijednosti na nižoj frekvenciji nalaze se u rasponu 4,50-21,40  $10^{-5}$  SI, a na višoj frekvenciji 4,00-19,00  $10^{-5}$  SI. Na obje frekvencije uzorak KG2-4 ima najnižu, a uzorak KG2-1 najvišu vrijednost.

**Tablica 5-10. Vrijednosti magnetskog susceptibiliteta dobivene dvojnomo frekvencijom na profilu KG2.**

| Broj uzorka | Vrijednost magnetskog susceptibiliteta na niskoj frekvenciji ( $10^{-5}$ SI) | Vrijednost magnetskog susceptibiliteta na visokoj frekvenciji ( $10^{-5}$ SI) |
|-------------|--|---|
| KG2-1       | 21,40  | 19,00   |
| KG2-2       | 13,10  | 11,60   |
| KG2-3       | 9,80   | 8,90  |
| KG2-4       | 4,50   | 4,00  |
| KG2-5       | 8,30   | 8,00  |
| KG2-6       | 7,90   | 7,60  |
| KG2-7       | 4,80   | 4,60  |
| KG2-8       | 5,90   | 5,40  |
| KG2-9       | 6,30   | 5,80  |
| KG2-10      | 7,00   | 6,50  |
| KG2-11      | 7,00   | 6,40  |

### **5.2.2. Rezultati analize rendgenskom difrakcijom u prahu (XRD)**

Analizom difrakcijskih slika praha (XRD) određen je kvalitativni mineraloški sastav uzoraka SL1-3, SL4-2, SL5-3 KG1-14 i KG2-8 prikazan Tablicom 5-11. Zastupljenost minerala određena je semikvantitativno.

U uzorku SL1-3 uzetog s prvog profila u Slovačkoj jami najviše se nalazi 14 angstromskih ( $\text{Å}$ ) filosilikata. Također su u znatnoj količini prisutni kaolinit, kvarc, kalcit, goethit i tinjčasti minerali. Gibbsit i amorfna komponenta su vrlo malo zastupljeni u uzorku. Osim navedenih minerala, pretpostavlja se da su prisutni i hematit, anatas, klorit, kalijski feldspati i nepravilni miješanoslojni minerali. Njihovi udjeli su jako mali te nije moguće sa sigurnošću potvrditi njihovu prisutnost.

**Tablica 5-11. Popis minerala i njihova zastupljenost u uzorcima KG2-8 (6586), KG1-14 (6587), SL1-3 (6588), SL5-3 (6589) i SL4-2 (6590) određenih XRD-om. Minus (-) predstavlja izostanak, upitnik (?) moguću pojavu, plus (+) malu količinu, dva plusa (++) znatnu količinu, a tri plusa (+++) dominaciju minerala. Navedene znake odijeljene kosom crtom (/) označavaju količine koje su između količina predstavljenih dvjema odijeljenim oznakama.**

| Laboratorijski uzorak                      | 6586<br>(KG2-8) | 6587<br>(KG1-14) | 6588<br>(SL1-3) | 6589<br>(SL5-3) | 6590<br>(SL4-2) |
|--|-----------------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Kalcit (Cal)                               | -               | ++/+++           | +/++            | ++              | +++             |
| Siderit (Sd)                               | -               | ?                | -               | -               | -               |
| Kvarc (Qtz)                                | +++             | +/++             | ++              | +/?             | +               |
| Plagioklas (Pl)                            | ?               | -                | -               | -               | -               |
| Kalijski feldspat (Kfs)                    | ?               | ?                | ?               | ?               | -               |
| Goethit (Gt)                               | +               | +                | +/++            | +/++            | ?               |
| Hematit (Hem)                              | Gt i/iliHem     | ?                | ?               | +               |                 |
| Gibbsit (Gbs)                              | -               | +                | +               | ++              | -               |
| Anatas (Ant)                               | -               | ?                | ?               | -/?             | -               |
| Magnetit (Mgt)                             | -               | ?                | -               | -               | -               |
| Neidentificirani mineral (X <sub>1</sub> ) | +               | -                | -               | -               | -               |
| Neidentificirani mineral (X <sub>2</sub> ) | -               | +                | -               | -               | -               |
| Minerali iz grupe tinjaca                  | ?               | ++               | +/++            | +               | ?/+             |
| Mješanoslojni/Nepravilni minerali (MM/NM)  |                 | ?                | ?               | +               | -               |
| Kaolinit (Kln)                             | ?               | ++               | ++              | ++              | ?               |
| Klorit (Chl)                               |                 | Kln i/ili<br>Chl | ?               | ?               |                 |
| 14 angstromski minerali (14 Å)             | -               | ++<br>Vrm,S,MM   | ++/+++          | ++/+++          | -               |
| Amorfna komponenta (AC)                    | ?               | +                | +               | +               | ?               |

Uzorak SL4-2 dominantno je dominatno izgrađen od kalcita. U znatno manjoj količini nalaze se kvarc i tinjčasti minerali. Također je moguće da se u uzorku nalaze i hematit, goethit, kaolinit, klorit te amorfna komponenta. Na difrakcijskoj slici praha svih pet komponenata jasno se vidi jedna linija, no s obzirom da se ostale linije ne uočavaju jasno, nije ispravno tvrditi kako su prisutne u uzorku.

U uzorku iz posljednjeg mjenog profila u Slovačkoj jami, SL5-3, najviše se nalazi 14 angstromskih (Å) filosilikata. U znatnoj količini također se nalaze minerali kaolinit, kalcit, gibbsit te goethit. Najmanje zastupljeni minerali u uzorku su hematit, amorfna komponenta, kvarc, minerali tinjaca i miješanoslojni minerali. U ovom uzorku su također dvojbena prisutni klorit, anatas i kalijski feldspati.

S prvog mjenog profila u Jamskom sustavu Kita Gaćešina-Draženova puhaljka za metodu rendgenske difrakcije u prahu odabran je uzorak KG1-14. U njegovom sastavu dominira kalcit. Uočene su i znatne količine 14 angstromskih (Å) filosilikata (vermikulit, smektit, miješanoslojni minerali), kaolinita i/ili klorita, tinjčevih minerala i kvarca. U sastavu ovoga uzorka malu količinu čine goethit, gibbsit, amorfna komponenta i neidentificirani mineral X<sub>2</sub>. Također se i na ovoj difrakcijskoj slici praha uočavaju potencijalni minerali, koji ne mogu biti određeni sa sigurnošću samo ovom metodom. Siderit, kalijski feldspati, hematit, anatas, magnetit i nepravilni minerali smatraju se mogućim mineralima u ovom uzorku.

Na drugom profilu u Jamskom sustavu KG-DP uzorak KG2-8 analiziran je ovom metodom. Mineral kvarc je dominantan u sastavu ovoga uzorka. Znatno manje prisutni minerali su goethit i/ili hematit te neidentificirani mineral X<sub>1</sub>. Za plagioklase, kalijske feldspate, tinjce, miješanoslojne minerale, kaolinit i/ili klorit te za amorfnu komponentu smatra se da se nalaze u mineralnom sastavu uzorka KG2-8, ali se bez dodatnih analiza ne može se pouzdano tvrditi da su uistinu prisutni.

### ***5.2.3. Rezultati separacije minerala i analize stereoskopskom lupom***

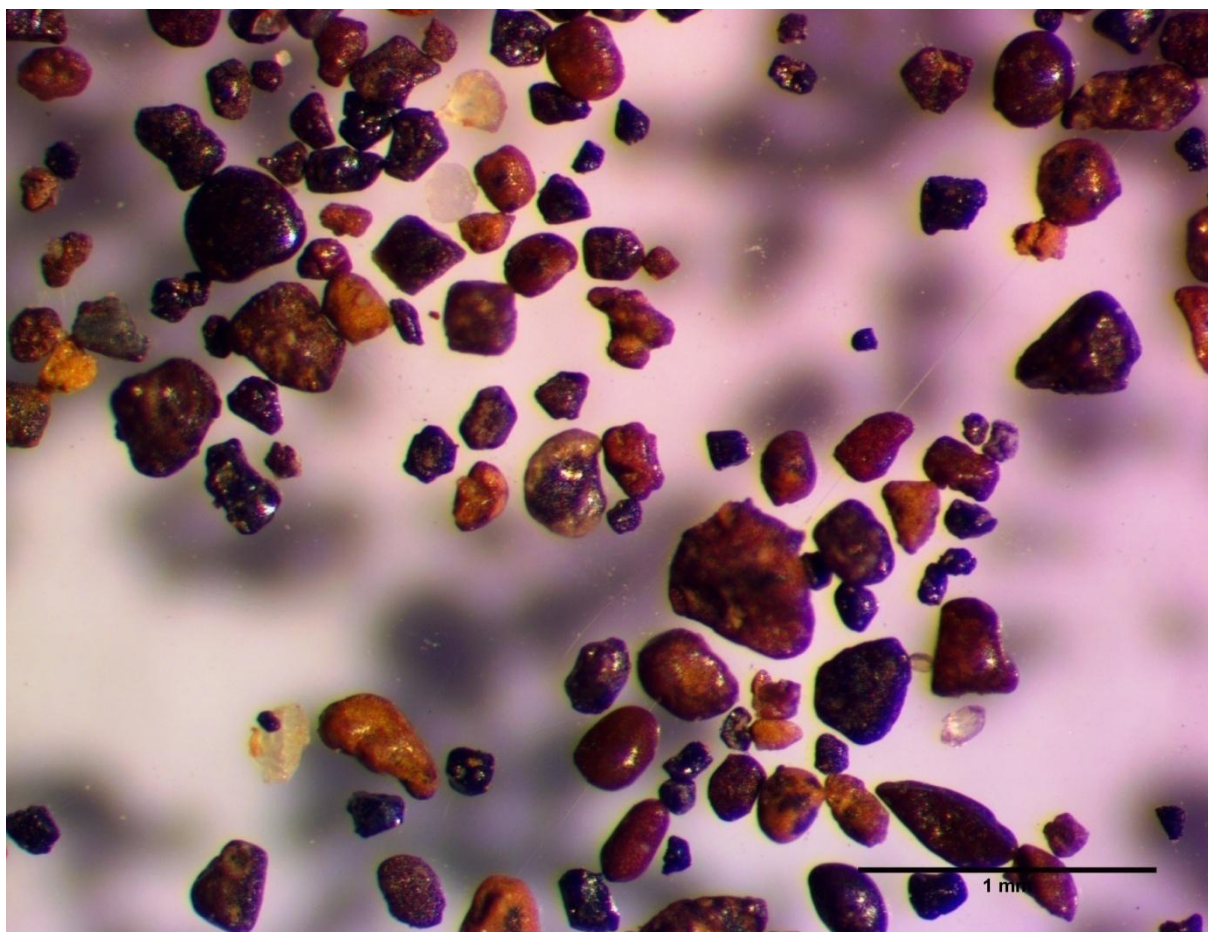
Uzorak KG2-8 separiran je na Frantzovom magnetskom izodinamskom separatoru u laboratoriju Zavoda za mineralogiju, petrologiju i mineralne sirovine RGNF-a. Uzorak KG2-8 jedini je od pet uzoraka odabranih za XRD analizu, koji je bio dovoljno rastresit za magnetsku separaciju. Magnetska frakcija izdvojena je pri jačinama električne struje od 0,4, 0,8 i 1,2 A. Minerali svih frakcija dobivenih separacijom prikazane su u Tablici 5-12.

**Tablica 5-12. Popis determiniranih zrna u svakoj frakciji dobivenoj magnetskom separacijom.**

| Frakcija          | Dominantno                      | Podređeno                     | U tragovima           |
|-------------------|---------------------------------|-------------------------------|-----------------------|
| Magnetska 0,4 A   | Litični fragmenti               | Ilmenit?<br>Crvenkasta zrna?  | Kvarc (prozirna zrna) |
| Magnetska 0,8 A   | Litični fragmenti               | Klorit?<br>Crvenkasta zrna?   | Kvarc (prozirna zrna) |
| Magnetska 1,2 A   | Litični fragmenti               | Crvenkasta i tamnoplava zrna? | Kvarc (prozirna zrna) |
| Nemagnetska 1,2 A | Kvarc (prozirna zrna)<br>Kalcit | /                             | Crna zrna?            |

Svakako je najzanimljivija činjenica da su se pri najmanjoj jačini struje odvojila zrna kvarca (Slika 5-6). U magnetskoj frakciji izdvojenoj na struji od 0,4 A dominiraju litični fragmenti, podređeno su pretpostavljena zrna ilmenita, a u tragovima nalazimo mineral kvarc. U preostale dvije magnetske frakcije (pri 0,8 i 1,2 A) dominantno su prisutni također litični fragmenti te se u njoj kvarc pojavljuje u tragovima. Crvenkasta zrna u svim magnetskim frakcijama nisu determinirana ovom metodom, ali mogu biti uspoređena s analizama rendgenske difrakcije u prahu za iste uzorke. U nemagnetskoj frakciji na struji od 1,2 A kao dominantni minerali izdvojili su se kvarc i kalcit, a u tragovima se nalaze nedeterminirana crna zrna.

Smatra se da je pojava kvarca u magnetskim frakcijama uzrokovana slučajnim kotrljanjem kvarca zajedno s magnetnim zrnima, koja su ga „povukla“ za sobom. Također se pretpostavlja da su se rijetka crna zrna nađena u nemagnetskoj frakciji istim principom separirala u spremnik s nemagnetičnim zrnima.



Slika 5-6. Magnetska frakcija izdvojena iz uzorka na struji od 0,4 A (foto: Ana Kamenski).

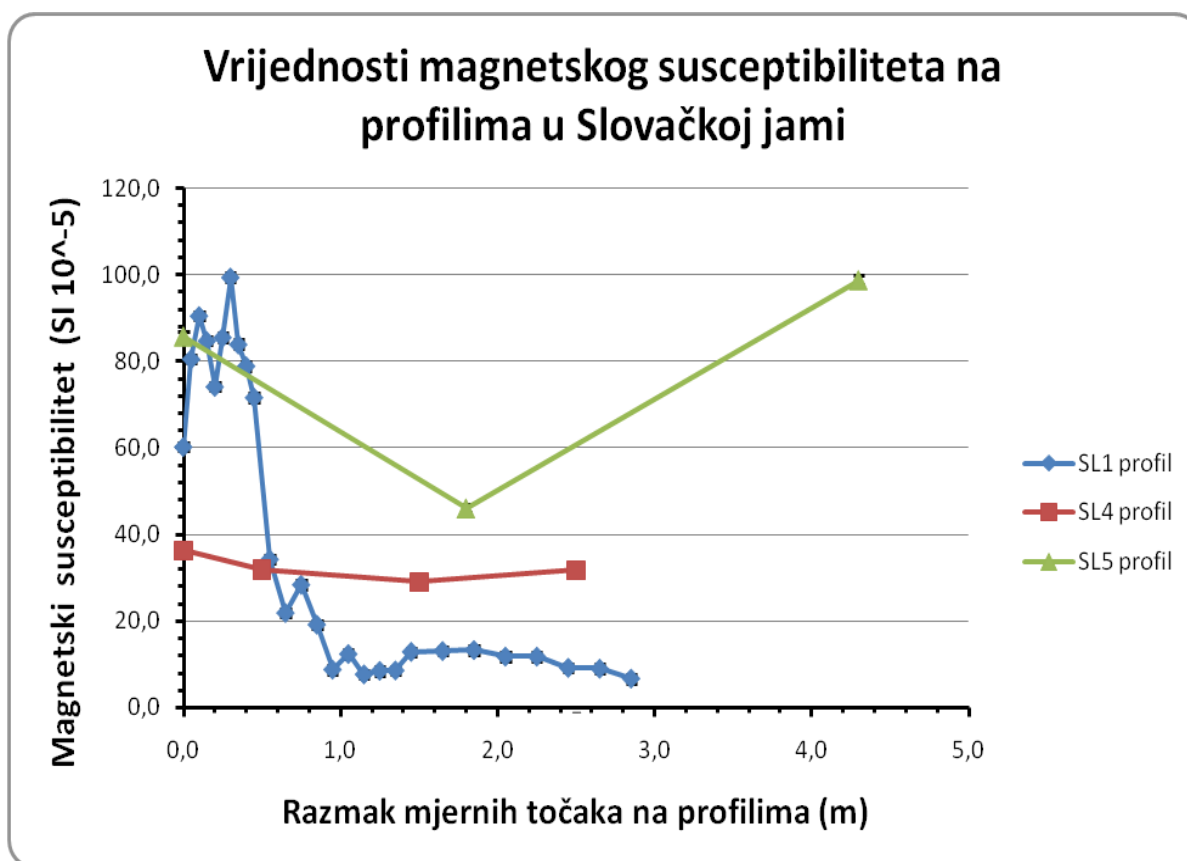


## 6. RASPRAVA REZULTATA

Vrijednosti magnetskog susceptibiliteta mjerene uređajem *Kappameter KM-7 (KM-7)* u speleološkim objektima nisu jednake kao vrijednosti mjerene uređajem *Bartington MS2B* u laboratorijskim uvjetima. Vrijednosti mjerene *in situ* u nekontroliranim uvjetima s manje preciznim uređajem nisu relevantne za interpretaciju podataka. Pretpostavlja se da *KM-7* nije dovoljno precizan i točan za dijamagnetične sedimente. U ovome poglavlju bit će interpretirani svi ostali podaci koji su dobiveni u laboratoriju pod kontroliranim uvjetima.

Standardno mjerenje magnetskog susceptibiliteta izvodi se pri niskim frekvencijama, stoga su na Slikama 6-1 i 6-2 prikazane dobivene vrijednosti magnetskog susceptibiliteta uređajem *Bartington MS2B* pri frekvenciji od 0,46 kHz. Na svakom profilu stavljene su pogreške mjerenja uređaja kako bi se promjene u vrijednostima mogle kvalitetnije interpretirati. S obzirom da su pogreške mjerenja  $1 \times 10^{-5}$  SI jedinica na grafovima su vrlo teško uočljive. Iz navedenog se može zaključiti da promjene vrijednosti na profilima nisu uzrokovane pogreškom uređaja već promjenama u sastavu sedimenta.

Profil SL1 nalazi se najbliže ulazu u jamu u odnosu na ostale profile mjerene u Slovačkoj jami (Slika 5-2). Ovaj profil je najgušće mjereno te pokazuje značajne varijacije u magnetskom susceptibilitetu. U prvih pola metara profila registrirane su najviše vrijednosti, koje idu do  $99,40 \times 10^{-5}$  SI. Potom vrijednosti padaju do prvoga metra profila SL1, nakon čega su vrijednosti konstantne, odnosno nisu više od  $20 \times 10^{-5}$  SI. Uzorak SL1-3, koji ima jednu od najviših vrijednosti na ovom profilu, sadrži minerale goethit, gibbsit, kaolinit, filosilikate te minerale tinjaca. Svi navedeni minerali sadrže u sebi metale koji sediment u kojem se nalaze čine paramagnetičnim ili čak ferimagnetičnim i antiferomagnetičnim. Stratigrafski gledano, ispod uzorka SL1-10 na kojem je izmjerena najviša vrijednost magnetskog susceptibiliteta, nalaze se sedimenti znatno različitog sastava. Na temelju grafa na Slici 6-1 može se pretpostaviti kako su niže vrijednosti na uzorcima od SL1-11 pa do kraja profila uzrokovane drugačijim sastavom sedimenta. Vjerojatno im sastav čine u potpunosti kalciti i ostali karbonatni minerali koji sediment čine dijamagnetičnim, odnosno nemagnetičnim.



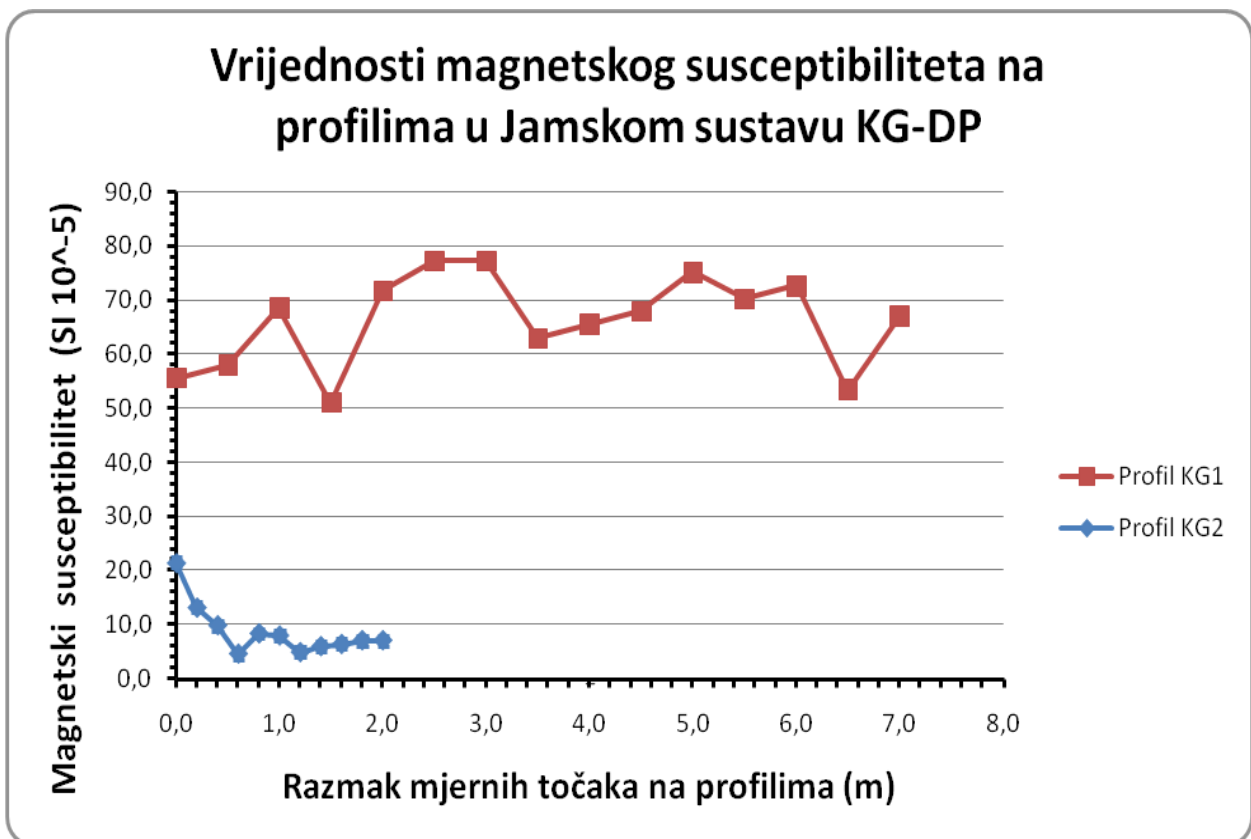
Slika 6-1. Prikaz vrijednosti magnetskog susceptibiliteta na profilima u Slovačkoj jami dobivenih u laboratoriju radom *Bartington MS2B* uređaja na frekvenciji od 0,46 kHz.

Na profilu SL4 nalaze se četiri mjerne točke koje su međusobno udaljene 0,5-1,0 metar. Neovisno o udaljenosti mjernih točaka, vrijednosti koje su registrirane nalaze se u malom rasponu od  $29,00-36,20 \times 10^{-5}$  SI. Navedeno upućuje da se sedimenti na ovome profilu od 2,5 metra litološki ni magnetično znatno ne razlikuju. S obzirom da su izmjerene niske vrijednosti magnetskog susceptibiliteta pretpostavlja se da je sediment na ovoj lokaciji izgrađen samo od dijamagnetičnih minerala. Ovoj pretpostavci idu u prilog rezultati rendgenske difrakcije u prahu, koja je pokazala da se u uzorku SL4-2 nalaze gotovo isključivo kalcit i kvarc.

Profil SL5 ima velike promjene vrijednosti magnetskog susceptibiliteta na svoje tri mjerne točke koje su udaljene 1,8-2,5 metra na udaljenosti od 4,3 metra. Na prvoj i zadnjoj mjerenoj točki registrirane su vrijednosti iznad  $85,50 \times 10^{-5}$  SI, dok je na SL5-2 izmjereno samo  $46 \times 10^{-5}$  SI. Izuzetno visoka vrijednost magnetskog susceptibiliteta ( $98,80 \times 10^{-5}$  SI) u uzorku SL5-3 vjerojatno je posljedica metalnih elemenata koji se nalaze u mineralima goethita,

hematita, gibbsita, kaolinita, filosilikata i tinjaca, determiniranih metodom rendgenske difrakcije u prahu (XRD).

Graf na slici 6-2 prikazuje profile mjerene u Jamskom sustavu Kita Gaćešina-Draženova puhaljka. Vrijednosti magnetskog susceptibiliteta na profilu KG1 duljine sedam metara nalaze se u rasponu od 50,00-80,00  $\times 10^{-5}$  SI. Minerali pouzdano determinirani u uzorku KG1-14 su kalcit, kvarc, goethit, gibbsit, kaolinit i/ili klorit, filosilikati i minerali tinjaca. Iako je u ovoj mjernoj točki na ovom profilu izmjerena jedna od najnižih vrijednosti magnetskog susceptibiliteta ( $53,30 \times 10^{-5}$  SI), uzorak sadrži minerale izgrađene od metala.

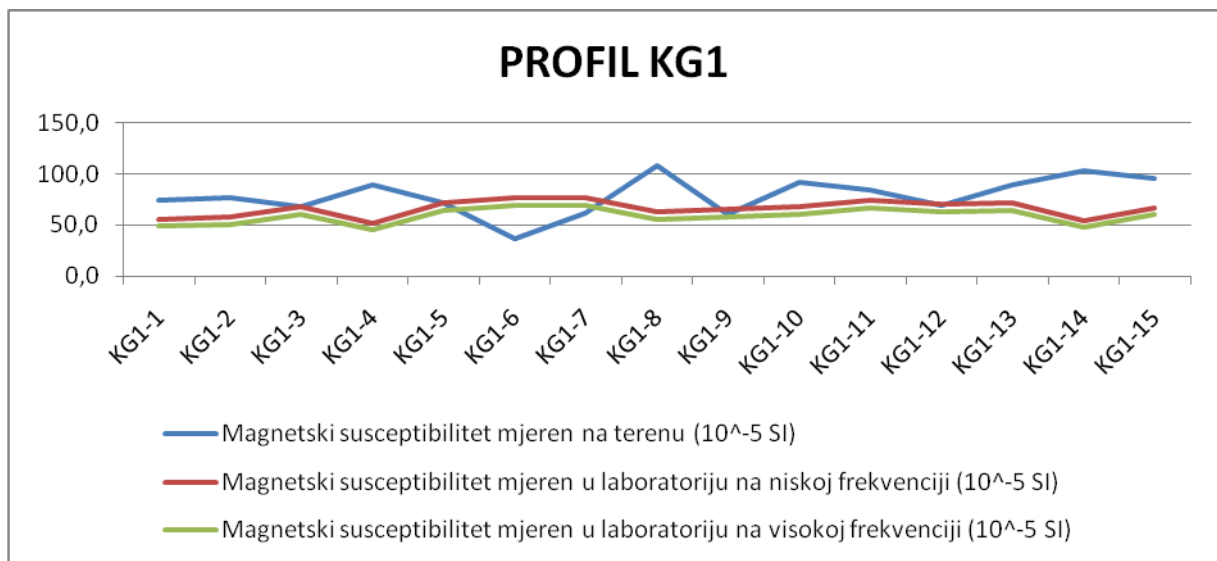


Slika 6-2. Prikaz vrijednosti magnetskog susceptibiliteta na profilima u Jamskom sustavu Kita Gaćešina-Draženova puhaljka dobivenih u laboratoriju radom *Bartington MS2B* uređaja na frekvenciji od 0,46 kHz.

Drugi profil mjerjen u Jamskom sustavu KG-DP nalazi se, u odnosu na prvi, bliže ulazu u jamu (Slika 5-5). Profil KG2 je duljine dva metra te su mjerne točke međusobno udaljene samo 20 centimetara. Izuzev prve dvije mjerne točke, ostale točke na profilu pokazuju veoma slične vrijednosti magnetskog susceptibiliteta – sve su niže od  $10 \times 10^{-5}$  SI. Dijamagnetičnost sedimenata na ovom profilu potvrđuje i rezultat rendgenske difrakcije u prahu uzorka KG2-8, za koji je ustanovljeno da je izgrađen gotovo samo od kvarca.

Na temelju interpretacije profila SL1 može se zaključiti da su prva trećina profila i ostale dvije nastale, gledano s mineraloško-petrološkog aspekta, iz potpuno različitih stijena. Profili SL4 i SL5 ne daju mnogo informacija jer imaju malo mjernih točaka na velikim udaljenostima. Na temelju vrijednosti magnetskog susceptibiliteta na profilima KG1 i KG2 može se sa sigurnošću tvrditi da su njihovi sedimenti pretaloženi iz litološki različitih izvorišnih stijena, a možda i u potpuno drugačijim klimatskim uvjetima.

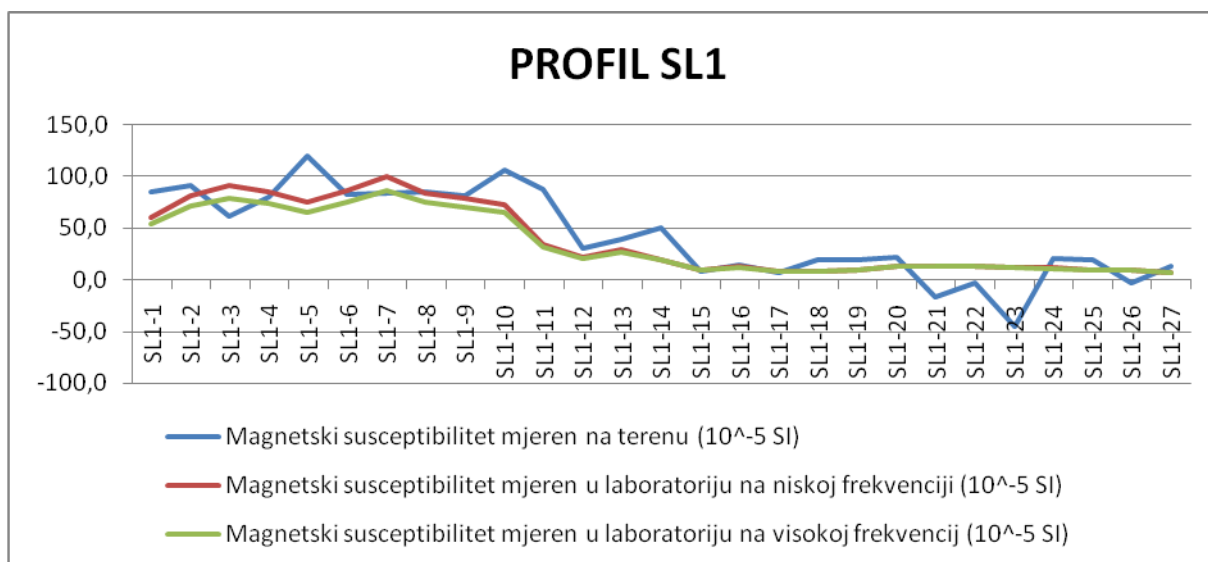
Točnost uređaja *Bartington MS2B* gotovo je 100%-tna jer se kalibracija uređaja obavlja učestalo s obzirom da je standard s kojim se kalibrira unesen elektronički. Vrijednosti dobivene pomoću uređaja *Bartington MS2B* izgledaju vrlo stabilno i nema velike razlike između vrijednosti mjerenih na nižoj i višoj frekvenciji (Slika 6-3). *Bartington MS2B* mjeri na frekvencijama od 0,46 kHz i 4,65 kHz, dok *Kappameter KM-7* mjeri na gotovo dvostruko većoj frekvenciji (10 kHz). Stoga se može pretpostaviti da sediment ima drugačiji odziv na različite frekvencije.



Slika 6-3. Graf s prikazom visina magnetskog susceptibiliteta za sve mjerne točke profila KG1. Os apscise na profilima predstavlja duljinu profila s označenim mjernim točkama, a os ordinate visinu vrijednosti magnetskog susceptibiliteta u SI jedinicama, reda veličine 10<sup>-5</sup>. Plava linija odnosi se na vrijednosti izmjerene na terenu, crvena na niskoj, a zelena na visokoj frekvenciji u laboratoriju.

Na dobivene nepravilne vrijednosti, mjerene uređajem *Kappameter KM-7*, moglo je osim visine frekvencije utjecati još nekoliko faktora. Signal je registriran s puno manjeg područja (mjernom iglom) u odnosu na snimljen signal u laboratoriju na uzorku volumena 10 cm<sup>3</sup>. *KM-7* mjeri magnetski susceptibilitet samo na veoma tankom površinskom sloju. Nejednoliko postavljanje vrha uređaja (mjerne igle) na neravan izdanak, pa čak i mala promjena kuta mjerenja može imati utjecaj na očitavanje. Temperaturna nestabilnost između

mjerne igle i izdanka, kao i mineralne varijacije nekoliko milimetara udaljene od područja mjerenja mogu snažno utjecati na očitavanja. Rijetka gustoća mjerenja također negativno utječe na registriranje promjena u signalu. Na profilu SL1 može se uočiti dobra korelacija između terenskih i laboratorijskih vrijednosti jer su mjerne točke gušće raspoređene (Slika 6-4). Također je moguće da uređaj KM-7 ne radi adekvatno u uvjetima niske temperature i visoke vlažnosti koje vladaju u podzemlju.



**Slika 6-4. Prikaz visine magnetskog susceptibiliteta za sve mjerne točke profila SL1. Os apscise na profilima predstavlja duljinu profila s označenim mjernim točkama, a os ordinate visinu vrijednosti magnetskog susceptibiliteta u SI jedinicama, reda veličine  $10^{-5}$ . Plava se linija odnosi na vrijednosti izmjerene na terenu, crvena na niskoj, a zelena na visokoj frekvenciji u laboratoriju.**

Svi navedeni faktori mogli su utjecati na ishod registriranih vrijednosti magnetskog susceptibiliteta u speleološkim objektima. Koji faktori utječu više, a koji manje te utječu li uopće na mjerenje, može se saznati samo nastavkom istraživanja. Kada bi se mjerenja ponovila u speleološkim objektima radi boljeg registriranja vrijednosti magnetskog susceptibiliteta, pri mjerenju bi se trebalo obratiti pozornost na dva važna faktora – ponovljivost i gustoću mjerenja. Ukoliko bi se mjerilo nekoliko puta u točno istoj poziciji (što je teško postići) onda bi se mogla izračunati pogreška mjerenja. Pomoću pogreške mjerenja utvrđuje se točnost registrirane vrijednosti u pojedinoj mjernoj točki i raspršenje podataka na svakom profilu. U interpretaciji ovako stečenih podataka može se procijeniti postoje li stvarno značajne promjene magnetskog susceptibiliteta duž profila ili je na prividne promjene utjecala pogreška mjerenja. Pri određivanju gustoće mjerenja treba osobito obratiti veliku pozornost. Stopa mjerenja od jedan ili dva metra, kao na profilima SL4 i SL5, stvara relativno veliku skalu za traženje promjena u magnetskom susceptibilitetu duž profila, posebice za mjerenja koja detektiraju signal s područja veličine od nekoliko milimetara. Prepostavlja se da nije

moгуće pratiti potpunu varijaciju signala duž profila s međusobno jako udaljenim mjernim točkama iz razloga što se signal može promijeniti nekoliko puta između tako udaljenih mjernih točaka.

Na originalnim uzorcima uzetim iz speleoloških objekata napravljena je metoda rendgenske difrakcije praha, bez prethodno apliciranih kemijskih metoda tretiranja uzoraka. Stoga neke minerale nije bilo moguće u potpunosti prepoznati. Dvojba između determinacije goethita i hematita riješena je proučavanjem boje uzorka, pri čemu su uzorci s intenzivnijom crvenom bojom određeni kao hematiti. U nekoliko uzoraka nije bilo moguće jasno raspoznati radi li se o kaolinitu ili kloritu. Za preciznije određivanje mineralnog sastava uzoraka prije analize metodom rendgenske difrakcije u prahu potrebno je napraviti različite tretmane uzoraka, kao što su otapanje karbonata, tretman s klorovodičnom kiselinom te žarenje uzorka na 650 °C. Za potrebe ovog diplomskog rada nisu rađeni spomenuti tretmani, što ostaje kao zadatak za buduća istraživanja.

## 7. ZAKLJUČAK

Magnetizam u speleološkim objektima nije sustavno istraživao na području Republike Hrvatske niti je bilo poznato je li uopće mjerljiv u špiljskim sedimentima. Speleološki objekti, posebice jame koje sadrže dug vertikalni presjek u podzemlju, predstavljaju zanimljiva područja za geološka istraživanja. S obzirom da nije uopće jednostavno i sigurno se kretati po takvim objektima bez prethodne obuke, sasvim je razumljivo i zašto nisu sustavno istraživani.

Ovim preliminarnim istraživanjem pokazano je da je magnetski susceptibilitet svakako mjerljiv u podzemlju te da mjerenja duž nekih profila pokazuju značajne promjene vrijednosti. Promjene vrijednosti magnetskog susceptibiliteta mogu ukazivati na promjene u mineraloškom sastavu, izvorišnom materijalu te klimatskim uvjetima za vrijeme taloženja istraživanih sedimenata.

U sklopu ovoga istraživanja na tri profila u Slovačkoj jami na sjevernom Velebitu i na dva profila u Jamskom sustavu Kita Gaćešina-Draženova puhaljka mjenen je magnetski susceptibilitet. Usporedbom vrijednosti magnetskog susceptibiliteta i rezultata dobivenih rendgenskom difrakcijom u prahu (XRD) ustanovljeno je da uzorci s vrijednošću višom od  $50 \times 10^{-5}$  SI u sebi sadrže minerale koji su izgrađeni od metala (npr. željezo, aluminij i dr.). Što su metali više zastupljeni u mineralima, to je viša i izmjerena vrijednost magnetskog susceptibiliteta. Takvi minerali čine sediment više magnetskim, u odnosu na sedimente izgrađene od karbonatnih minerala i kvarca, koji su potpuno dijamagnetični. U takvim je sedimentima registrirana vrijednost magnetskog susceptibiliteta manja od  $40 \times 10^{-5}$  SI. Bez obzira što u ovom radu metodom rendgenske difrakcije u prahu nisu mogli biti određeni svi minerali prisutni u uzorcima, može se uočiti razlika u mineralnom sastavu između uzoraka s velikom razlikom u magnetskom susceptibilitetu.

Za potpuno razumijevanje procesa taloženja sedimenata u speleološkim objektima potrebna su mjerenja magnetskog susceptibiliteta duž cijelih špilja, odnosno jama. U svrhu analize sedimenta, na terenu je poželjno proučiti registrirane vrijednosti te uzorkovati sedimente na onim mjernim točkama na kojima su uočene velike varijacije. Metoda rendgenske difrakcije i metoda separacije Frantzovim magnetskim izodinamskim separatorom pokazali su se kao dobre za analizu sedimenata koji sadrže metalne kemijske elemente. Radi kvalitetnije obrade sedimenata i točnijeg determiniranja takvih elemenata, poželjne su dodatne obrade i pripreme uzoraka, poput otapanja karbonata jer su oni sastavni dio građe

speleoloških objekata u kršu te svojom obilnošću smanjuju mogućnost uočavanja drugih minerala.

Za potrebe ovoga diplomskog rada uređaj *Bartington MS2B* pokazao se preciznim i točnim u mjerenju magnetskog susceptibiliteta. S druge strane, uređaj *Kappameter KM-7* nije registrirao vrijednosti kompatibilne onima snimljenima na *Bartington*-u. Uređaj *KM-7* svojom je izvedbom vrlo praktičan za zahtjevnije terenske uvjete pa ukoliko ga se želi koristiti u daljnim istraživanjima potrebno je naučiti ispravno ga koristiti prilikom mjerenja. No, ukoliko u ovome radu nije došlo do pogrešnog načina mjerenja, već uređaj jednostavno nije operativan u uvjetima visoke vlage i niske temperature, bilo bi bolje isprobati druge terenski prihvatljive uređaje.



## LITERATURA

- Bakšić, D., Petričević, J., Rakovac, M., 2016. *Slovačka jama: Mali Kuk, Sjeverni Velebit*. Speleološki nacrt. Zagreb: Speleološki odsjek Velebit.
- Baniček, I., 2016. *Mineraloške, geokemijske, pedofizikalne i mikromorfološke značajke paleotla smještenog na dnu les-paleotlo sekvence na Savudriji, Istra*. Diplomski rad. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.
- Barišić, T., Branica, B., 2010. *Jamski sustav Kita Gaćešina – Draženova puhaljka: Crnopac, južni Velebit*. Speleološki nacrt. Zagreb: Speleološki odsjek Velebit.
- Bakšić, D., Jalžić, B., Šmida, B., Lacković, D., Paar, D., Speleološka istraživanja Slovačke jame. URL: <http://speleologija.eu/slovacka/>. (26.8.2018.)
- Dearing, J. A., 1999. *Environmental Magnetic Susceptibility: Using the Bartington MS2 System*, British Library Cataloguing in Publication Data.
- Ivanović, A., Sakač, K., Marković, S., Sokač, B., Šušnjar, M., Nikler, L., Šušnjara, A., 1973. *Osnovna geološka karta SFRJ Obrovac 1:100000, List L 33-140*, Beograd, Savezni geološki zavod.
- Ivanović, A., Sakač, Sokač, B., Vrsalović-Carević, I., Zupanić, J., 1976., *Tumač za list Obrovac L 33-140*, Beograd, Savezni geološki zavod.
- Kralj, I. 2015. *Petrološke i geokemijske značajke izvorišta potoka Šiškinovca na Plješevici*. Diplomski rad. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.
- Mamužić, P., Milan, A., Korolija, B., Borović, I., Majcen, Ž., 1969. *Osnovna geološka karta SFRJ Rab 1:100000, List 33-114*, Beograd, Savezni geološki zavod.
- Mamužić, P., Sokač, B., Velić, I., 1970. *Osnovna geološka karta SFRJ Silba 1:10000, List 33-126*, Beograd, Savezni geološki zavod.
- SatisGeo, s. r. o. *Instruments for geophysics and environment: Kappameter KM-7 Magnetic susceptibility meter*.

Rnjak, G., Bakšić, D., Paar, D., Novak, R., Glušević, M., Božić, V., Buzjak, N., Barišić, T., Aleraj, B., Bočić, N., Malinar, H., Novosel, D., Rnjak, D., Josipović, Č., Surić, M., Bach, F., Bajo, P., Barišić, A., Basara, D., Cucančić, D., Čuković, T., Čukušić, A., Cukušić, I., Đonlagić, L., Filipović, F., Grgić, H., Jelinić, I., Josipović, Lj., Kovačević, A., Kušić, D., Lacković, D., Matišić, T., Miculinić, K., Mišur, I., Mudronja, L., Mustapić, M., Raguž, K., Redovniković, L., Rosić, R., Stopić, D., Stroj, A., Talaja, M., Vrbanec, Z., Železnjak, J., Železnjak, R. 2017. *Speleologija*, Planinarsko društvo sveučilišta Velebit, Hrvatski planinarski savez, Hrvatska gorska služba spašavanja, Speleološko društvo Velebit.

Sokač, B., Bahun, S., Velić, I., Galović, I., 1976. *Tumač za list Otočac L 33-115*, Beograd, Savezni geološki zavod.

Sokač, B., Nikler, I., Velić, I., Mamužić, P., 1974. *Osnovna geološka karta SFRJ Gospić 1:100000, List 33-127*, Beograd, Savezni geološki zavod.

Velić, I., Bahun, S., Sokač, B., Galović, I., 1974. *Osnovna geološka karta SFRJ Otočac 1:100000, List L 33-115*, Beograd, Savezni geološki zavod.