

Izvedba in zagotavljanje kakovostnih avtomatskih meritev za znanstveno proučevanje mikrometeorologije kraških jam

Boštjan Grašič*, Primož Mlakar*, Marija Zlata Božnar*, Darko Popović*, Dragana Kokal*,
Franci Gabrovšek**

Povzetek

V prispevku je predstavljena izgradnja in delovanje jamskega informacijskega sistema v Postojnski jami. Podrobneje je opisana izgradnja osnovnih gradnikov jamskega informacijskega sistema kot je pet jamskih avtomatskih merilnih postaj s senzorji za merjenje temperature zraka, pretoka zraka, koncentracije CO₂ ter centralne enote za zbiranje, shranjevanje, obdelavo in prikaz podatkov. Sistem zagotavlja kakovostne avtomatske meritve za znanstveno proučevanje mikrometeorologije kraških jam. Izgradnja temelji na dobri praksi katere osnovo predstavljajo dolgoletne izkušnje s področja meritev v zunanji atmosferi in pet let izkušenj z meritvami v kraških jamah ter upoštevanje načela nenehnega izboljševanja na osnovi priporočil ISO 9001 standarda za zagotavljanje kakovosti.

Ključne besede: izvedba in zagotavljanje kakovostnih meritev, kraške jame, mikroklima
Key words: quality measurements implementation and assurance, carst caves, microclimate

Uvod

Za znanstveno proučevanje mikrometeorologije kraških jam potrebujemo kakovostne avtomatske meritve različnih fizikalnih veličin na različnih merilnih mestih za katere prepostavljamo, da nam lahko dovolj dobro opisujejo glavna dogajanja v jami. Za kakovostno spremljanje fizikalnih veličin v zunanji atmosferi so na voljo podrobna priporočila Svetovne meteorološke organizacije (World Meteorological Organization, 2008), medtem ko za spremljanje mikrometeorologije v kraških jamah še ni podobnih priporočil.

Podatki so kakovostni kadar izpolnjujejo vnaprej določene zahteve kot so natančnost, oziroma negotovost, ločljivost, reprezentativnost, pravočasnost in druge zahteve, ki so odvisne od namena uporabe. Kakovostne meritve lahko zagotavljamo z uporabo ustreznih senzorjev, pretvornikov, ustreznih z računalnikom podprtih obdelav pa tudi z ustreznim sistemom vodenja kakovosti. Kljub temu, da so vsi izmerjeni podatki neidealni – imajo večjo ali manjšo merilno negotovost, so za določen namen povsem uporabni, če je njihova kakovost znana (World Meteorological Organization, 2008).

Svetovna meteorološka organizacija priporoča zelo podrobno kako je potrebno meriti meteorološke spremenljivke (World Meteorological Organization, 2008). Priporočila se razlikujejo glede na namen meritev. Za sinoptične merilne postaje, ki posredujejo podatke za napovedovanje vremena, so najbolj striktna. Na primer: meritve temperature zraka se morajo izvajati v posebnih meteoroloških hišicah, ki so postavljene 2 m od tal. Okolica merilnikov mora biti pokošen travnik. V bližini ne sme biti visokih dreves in zgradb. Veter se meri na višini 10 m od tal. Sinoptične postaje morajo biti postavljene na lokacijah, ki so reprezentativne za večje področje. Veliko sinoptičnih postaj je postavljenih ob letališčih. Za okoljske postaje, ki merijo kvaliteto zraka pa so zahteve bolj ohlapne, zato jih lahko postavimo v naselja.

* MEIS storitve za okolje, d.o.o., Mali Vrh pri Šmarju 78, SI-1293 Šmarje-Sap, Slovenija

** Inštitut za raziskovanje krasi ZRC SAZU, Titov trg 2, SI-6230 Postojna, Slovenija

V okviru tega prispevka predstavljamo pridobljene izkušnje in spoznanja pri izgradnji in zagotavljanju kakovostnih avtomatskih meritev za znanstveno proučevanje mikrometeorologije kraških jam, ki temeljijo na dobri praksi in ustrezni dopolnitvi in prilagoditvi priporočil Svetovne meteorološke organizacije za meritve v zunanji atmosferi (World Meteorological Organization, 2008).

Jamski informacijski sistem

Jamski informacijski sistem je sestavljen iz poljubnega števila jamskih avtomatskih merilnih postaj in vozlišč za prenos podatkov ter jamske centralne enote. Jamske avtomatske merilne postaje na izbranih lokacijah neprekinjeno izvajajo meritve različnih okoljskih parametrov (npr. temperature zraka, koncentracijo CO₂, itd) v vnaprej predpisanih časovnih intervalih tako za vzorčenje kot za statistične obdelave in jih v digitalni obliki posredujejo centralni enoti. Podatke lahko centralna enota pridobiva direktno iz jamske merilne postaje ali preko dodatnih vozlišč za prenos podatkov.

Jamska centralna enota je sestavljena iz enega ali več strežniških računalnikov, ki opravljajo več različnih nalog: zbiranje podatkov iz avtomatskih merilnih postaj, dodatno preverjanje in obdelava zbranih podatkov, shranjevanje preverjenih in obdelanih podatkov v ustrezno strukturirano zgodovinsko bazo podatkov, zagotavljanje dostopa uporabnikom do baze podatkov (sprotnih in zgodovinskih) in dostop do prikaza zadnjih izmerjenih vrednosti na javni spletni strani.

Kakovost jamskega informacijskega sistema je odvisna tudi od njegovega namena, saj je na primer izgradnja sistema za sproti nadzor (monitoring) jame manj kompleksna in zahtevna kot pa na primer izgradnja sistema za znanstveno proučevanje, kjer je poleg bolj kompleksne zgradbe zahtevana tudi večja kakovost meritev.

Jamski informacijski sistem mora med drugim zagotavljati tudi orodja za analize in znanstveno proučevanje, kot so na primer časovni grafi, histogrami, rože vetrov, daljše časovne statistike in sončnice (Božnar et al., 2015). Dodatno mora tak sistem zagotavljati in vzdrževati popolno zgodovinsko bazo meritev. Na mesečni ravni je potrebno delovanje celotnega sistema periodično pregledovati in preverjati, da bi pravočasno ugotovili napake, odstopanja, itd. Za takšen namen je zelo primeren način izdelovanja QA/QC (Quality Assurance/Quality Control) poročil vsak mesec, kjer so vse meritve prikazane in primerjane na časovnih grafih. Dodatno se v poročilu izdelata tudi razpoložljivost, statistika in kakovost vseh merjenih spremenljivk (parametrov) ter vizualizira vse meritve na primeren način (na primer meritve vetra v obliki rož vetrov). Po pregledu poročila se po potrebi podatki v bazi ustrezno prečistijo (označijo kot neveljavni), organizira pa se tudi ustrezen ukrep za popravilo meritve, kadar je to potrebno.

Reden periodičen pregled vseh gradnikov jamskega informacijskega sistema (postaj, vozlišč, podatkovnih mul, računalnikov, itd) na terenu je potreben vsaj vsake tri mesece ne glede na dobre rezultate QA/QC poročil. Preventivno čiščenje senzorjev in filtrov ter vizualni pregled opreme sistema prepreči veliko nepotrebnih izrednih vzdrževalnih del. Včasih je glede na uporabljene gradnike potreben pregled na terenu tudi pogosteje.

Sistem bo deloval bolj kakovostno, če vsebuje tudi avtomatiko za sprotno odkrivanje napak v meritvah, pri prenosu podatkov ali pri shranjevanju na centralni enoti. opozorilo lahko sproži relativno hitro izvedbo izrednega servisa in s tem odpravo napake pred rednim periodičnim pregledovanjem.

Kakovosten jamski informacijski sistem mora zagotavljati vsaj 98% razpoložljivost podatkov.

Jamska avtomatska merilna postaja

Jamsko merilno postajo sestavljajo senzorji povezani z merilnimi vmesniki in napravami ter vgradni ali osebni računalnik. Vgradni računalnik neprekinjeno zajema, zbira in kontrolira podatke iz merilnih vmesnikov ter jih samodejno ali na zahtevo posreduje eni ali več centralnim enotam.

Pri izvedbi jamske avtomatske merilne postaje je kakovost odvisna od končnega namena jamskega informacijskega sistema. Medtem, ko so za namen varovanja zdravja in življenja ljudi v jami povsem dovolj manj natančni indikatorski merilniki (detektorji), je za znanstveno proučevanje jam potrebna uporaba znanstvene opreme, ki jo sestavljajo senzorji in naprave ter programska oprema.

Znanstvena oprema za take potrebe mora biti zelo kakovostna in prilagodljiva oziroma mora imeti možnosti dograjevanja in dopolnitev. Glavne značilnosti takšne jamske avtomatske merilne postaje so:

- uporaba kakovostnega merilnega vmesnika (data loggerja) za priklop vsaj nekaj senzorjev za merjenje različnih parametrov, ki omogoča majhno porabo električne energije, dodatno shranjevanje na lasten stalni spominski medij (na primer CF kartico), ki je prilagodljiv ter odporen na ekstremno okolje v jami in ga je možno tudi reprogramirati;
- uporaba naprednega neprekinjenega napajanja, ki temelji na mikrokontrolerju z izredno majhno porabo električne energije in mora skrbeti za: dobro kondicijo baterije, mora premostiti krajšne izpade elektrike (vsaj do 2 dni), vnaprej signalizirati operacijskemu sistemu skorajšen izklop zaradi zaščite podatkov na stalnem spominskem mediju, ki je občutljiv na nenadne izpade električne energije in mora spremljati stanje baterije vsaj tako dobro kot ostale parametre v okolju,
- poraba električne energije mora biti čim manjša in optimizirana (trenutno stanje elektronike omogoča skupno porabo pod 2W), da se v okolico postaje ne oddaja preveč energije, ki lahko omogoča rast raznih mikroorganizmov v bližnji okolici;
- tudi pri zagotavljanju energije je potrebno upoštevati lokalno onesnaževanje jame ali pa tudi direkten vpliv na meritve; aktivni viri, kot so to na primer gorivne celice ali agregati, ne pridejo v poštev, ker oddajajo CO₂ in se močno grejejo, zato pride zaenkrat v poštev samo dovod energije preko dolgih kablov (več dela pri izgradnji za neprekinjeno napajanje) ali baterij (preprostejša montaža, vendar jih je potrebno periodično polniti),
- ustrezno je potrebno zavarovati senzorje pred kondezacijo vode in padajočimi vodnimi kapljicami (na primer CO₂ senzor z lastnim gretjem ali majhnim nastreškom, itd) in priključke (konektorje), kjer je pri montaži potrebno biti pazljiv, da nikjer ne povzročimo zadrževanja vode, oziroma, da poskrbimo za njeno odtekanje;
- uporaba ustreznega dobro izoliranega ohišja in tudi silikagela, kar z odpadno toploto uporabljene elektronike onemogoča kondenzacijo vode na ohišju, ki se dogaja v jami kljub relativno nespremenljivi temperaturi zraka glede na zunanji zrak, saj je velikokrat v jamah prisotna 100% relativna vlaga;
- IoT (Internet of Things) vgradni računalnik na osnovi standardnega vgradnega operacijskega sistema (embedded Linux) z ustreznim trajnim spominskim medijem (mikroSD kartica), možnostjo Ethernet in/ali WiFi povezave ter povezave preko RS232/RS485/RS422 ali USB z merilnim vmesnikom (data loggerjem) tudi na daljše razdalje.

Za meritev posameznih fizikalnih veličin v jamah priporočamo glede na njihove značilnosti, kakovost in izkušnje sledeče senzorzje:

- temperatura zraka: pasivni PT100 uporovni senzor;
- pretok zraka: ultrasonični senzor;
- ogljikov dioksid CO₂: CO₂ sonda na osnovi NDIR (Nondispersive infrared sensor) senzorja (absorpcijska presvetlitvena metoda merjenja plinov na osnovi IR svetlobe)

Na izbiro senzorja vpliva tudi njegova časovna konstanta, ki mora biti ustrezno manjša glede na način merjenja fizikalne veličine v jami. Za znanstveno proučevanje jame morajo zadostiti senzorzji spodnjim časovnim intervalom vzorčenja, ki morajo za vsako spremljano fizikalno veličino zadostiti Nyquist–Shannon teoremu vzorčenja, ki pravi, da je potrebno vzorčiti z vsaj dvakratno frekvenco vzorčenja kot je frekvenca opazovanega signala (Shannon, 1949), v praksi pa vsaj z desetkratno za kakovostnejše rezultate:

- temperatura zraka: 10 sekund;
- pretok zraka: 1 sekunda;
- ogljikov dioksid CO₂: 10 sekund (pod 20 sekund)

Programska oprema kakovostne jamske avtomatske merilne postaje ima možnosti majših dopolnitev in prilagoditev na terenu v obliki nastavitvenih datotek in pa možnosti nadgradnje. Sestavljajo je skupina različnih programov, ki skrbijo za neprekinjeno in sprotno zajemanje podatkov iz senzorjev ter posredovanje obdelanih podatkov centralni enoti:

- program za zajem, statistično obdelavo in kontrolo signalov iz senzorjev;
- program za lokalno shranjevanje podatkov za omejen čas (do 1 meseca);
- dodaten program za lokalno vizualizacijo podatkov na mestu meritve;
- program za prenos podatkov na centralno enoto;
- ter program za nadzor delovanja vseh ostalih programov (zaustavitev in ponoven zagon ob nepravilnem delovanju katerega izmed njih).

Za dolgoročno kakovostno delovanje jamske avtomatske merilne postaje je osrednjega pomena avtomatska kontrola podatkov iz senzorjev (Mlakar et al., 1990). Osnovna naloga kontrole podatkov je neprekinjeno avtomatsko preverjanje podatkov. V primeru detekcije napake meritve se takšni podatki označijo kot neveljavni, kljub temu pa se pošljejo v centralno enoto, kjer služijo za avtomatsko opozarjanje na napako in analizo napake pred odhodom serviserjev na popravilo na terenu. Kot primer ene izmed avtomatskih kontrol predstavlja preverjanje ali je stalnost hitrosti pretoka zraka izven mej s čimer se detektira okvaro senzorja. Drug primer je preverjanje ali so vrednosti v predpisanem območju meritve in ali je standardna deviacija meritve v predpisanem območju (predpisana območja so določena za vsako fizikalno spremenljivko posebej).

Pomembna lastnost avtomatske merilne postaje, ki vpliva na kakovost merilnih podatkov, je tudi reprezentativnost meritev (World Meteorological Organization, 2008). Reprezentativnost najbolje opisujejo metapodatki merilne postaje, ki natančno opisujejo za vsako merilno okoljsko spremenljivko vrsto senzorja, njegove lastnosti, kakovost, podrobno lokacijo, datum kalibracije ter senzorjevo okolico. V jamskih merilnih sistemih se je z razvojem digitalnih fotoaparatorov kakovost metapodatkov pomembno izboljšala, saj lahko z rednim fotografiranjem avtomatske merilne postaje ob vseh spremembah iz več različnih zornih kotov vodimo zelo kakovostno bazo metapodatkov.

Jamska centralna enota

Vsi merilni podatki iz jamskih avtomatskih postaj se po različnih komunikacijskih poteh zbirajo, dodatno obdelujejo in shranjujejo na jamski centralni enoti. Število jamskih centralnih enot je za različne potrebe lahko različno.

Kakovost centralne enote se ne razlikuje bistveno glede na vrsto okoljskega informacijskega sistema, v grobem pa MEISove določajo naslednje značilnosti:

- zgrajena je na osnovi zmogljivega računalnika, po potrebi se posamezne naloge lahko razporedijo na več medsebojno povezanih osebnih računalnikov;
- mora opravljati vse osnovne naloge centralne enote kot so zbiranje podatkov iz avtomatskih merilnih postaj, shranjevanje podatkov v izvorni obliki (običajno v obliki prenosnih datotek), shranjevanje podatkov v skupno enotno bazo podatkov, obdelava in dodatna kontrola podatkov v bazi in zagotavljanje dostopa do shranjenih podatkov;
- skupna enotna ACID (Atomicity, Consistency, Isolation, Durability) baza podatkov, ki omogoča atomičnost (vsaka operacija v bazi podatkov mora biti izvedena do konca), konsistenco (baza podatkov mora ostati enovita in popolna po vsaki izvedeni operaciji), ločenost (rezultat vzporednega izvajanja operacij mora biti enak rezultatu izvajanja istih operacij zaporedno) in trajnost podatkov (po vsaki izvedeni operaciji mora ostati baza podatkov trajno obstojna) ter temelji na SQL (Structured Query Language) relacijskem urejevalnem sistemu podatkovnih baz, ki je kompatibilen vsaj SQL-92 standardu (International Organization for Standardization, 1992), ki predstavlja tretjo večjo revizijo SQL jezika za poizvedovanje v bazah podatkov;
- na voljo mora imeti širikopasoven dostop do svetovnega spleta ali lokalne mreže, ki zagotavlja možnost dostopa do podatkov več uporabnikom sočasno,
- v bazi podatkov se mora za vsako meritev posebej beležiti tako čas opravljene meritve kot čas dospelja in shranitve podatka na centralni enoti, izračunana razlika v teh časih določa zakasnitev prenosa podatkov in je pomemben podatek za vzdrževalce sistema, ki z analizo teh podatkov lahko odkrivajo težave na komunikacijskih poteh, dodatno pa je pomemben tudi za sisteme, kjer so sprotni podatki bolj pomembni od zakasnenih,
- vse shranjene podatke v izvorni obliki, bazo podatkov, programsko opremo in po potrebi tudi sliko operacijskega sistema je potrebno redno periodično varnostno shranjevati na vsaj 100 km oddaljeni lokaciji, saj je samo v takšnem primeru možno centralno enoto vzpostaviti v ponovno delovanje tudi v primeru najhujših naravnih nesreč po priporočilih standarda ISO/IEC 27040:2015 (International Organization for Standardization, 2015b);
- dologoročno kakovostno delovanje centralne enote določa tudi napredno neprekinjeno napajanje, ki lahko premošča krajše časovne izpade električne energije (do 30 minut), v primeru daljšega časovnega izpada električne energije pa računalniško opremo nadzorovano izključi, saj je večina trajnih spominskih medijev (na primer trdi diski, itd) občutljiva na nenadne izklope;
- prostor, kjer se nahaja računalniška oprema mora biti ustrezno klimatiziran, za zagotavljanje čim daljše življenske dobe računalniške opreme, ki se z izpostavljenostjo višjim temperaturam krajša;
- centralna enota je opremljena s sistemom avtomatskega opozarjanja (alarmiranjem) o izpadih prenosa podatkov iz avtomatskih postaj, podatkovnih vozlišč (komunikatorjev), o izpadu delovanja ostalih centralnih enot in o napakah na postajah, sistem opozarjanja je prilagodljiv in omogoča tudi vsakodnevno ponavljanje opozarjanja. Za opozarjanje je možnih več vrst opozoril glede na osebe, ki se jih opozarja (vzdrževalci, upravniki), opozarjanje pa poteka preko različnih medijev, ki so

trenutno na voljo (pošiljanje kratkih SMS sporočil na mobilne telefone, uporaba elektronske pošte, pošiljanje FAX sporočil preko klasičnih modemov, itd).

Kakovost okoljskega informacijskega sistema je glede na njegov namen večja za sisteme, ki so prilagojeni zahtevam za znanstveno proučevanje. Glavno razliko predstavljajo programska orodja in vmesniki za dostop do podatkov. Za sisteme za trenutni nadzor (monitoring) okolja je običajno dovolj dostop do trenutnih podatkov in kratka zgodovina v obliki časovnih grafov. Za znanstveno proučevanje pa so potrebna bolj napredna orodja za pregled in analizo dolgih časovnih vrst podatkov kot so na primer časovni grafi, histogrami, rože vetrov, daljše časovne statistike in sončnice (Božnar et al. 2015; Grašič et al. 2003; Mlakar & Božnar 1995; Božnar 2004; Lesjak et al. 2002).

Prenos podatkov v jamskem informacijskem sistemu

Prenos podatkov v jamskem informacijskem sistemu predstavlja edinstven problem, ki temelji predvsem na dejavnih ekstremnega okolja (tako za opremo kot za ljudi). V jamah vlada popolna tema, sončno sevanje pa je na voljo le na vhodih v jame. V večini primerov vlada v slovenskih jamah 100% relativna vlaga, ki ima velik vpliv na kakovost brezžičnih komunikacij (Mottola et al., 2010). V vseh treh dimenzijah prostora so jame zelo razgibane in večinoma nepravilnih geometrijskih oblik, kar skoraj povsod dodatno slabi ali onemogoča brezžične komunikacije na daljše razdalje. Zaradi vseh naštetih razlogov je tudi poraba energije za brezžične povezave večja. Okolje je v veliko točkah pravzaprav podobno vesolju, zato je tudi zelo primerno za uporabo in testiranje novih DTN tehnologij za vesolje (Gabrovšek et al., 2014).

Uporaba DTN tehnologij je zelo primerna za jamsko okolje, ker je odporna na prekinitev in motnje komunikacij ter se lahko prilagodi različnim tehnikam prenosa, vendar pa zato podatki niso povsem sprotni, kar pa za jamski informacijski sistem, ki je namenjen znanstvenemu proučevanju, ni ključno.

Dodatno je DTN tehnologija uporabna zaradi možnosti uporabe nekonvencionalne oblike za prenos podatkov (podatkovna mula na vlakcu, mobilni telefoni in tablice vodičev) (Božnar et al., 2012; Gabrovšek et al., 2014; Grašič et al., 2010; Grašič et al., 2011; Vrbinč et al., 2010).

Glavne značilnosti kakovostnega omrežja za prenos podatkov temeljijo na odpornosti na prekinitev in motnje komunikacijskih poti:

- sistem samodejno poskuša ponovno vzpostaviti komunikacijo ob motnji ali prekinitvi,
- komunikacija poteka z uporabo standardnega protokola, ki ima zmožnost odkrivanja napak,
- med prekinitvijo se podatki kopičijo in čakajo na ponovno vzpostavitev prenosa,
- ob ponovni vzpostavitvi se prenašajo samo podatki, ki še niso prenešeni, ostali se ne prenašajo po nepotrebnem ter s tem ne zapolnjujejo komunikacijskih poti, zaradi tega se tudi vodi evidenca prenosov.

Jamski informacijski sistem Postojnske jame »Jam'ca«

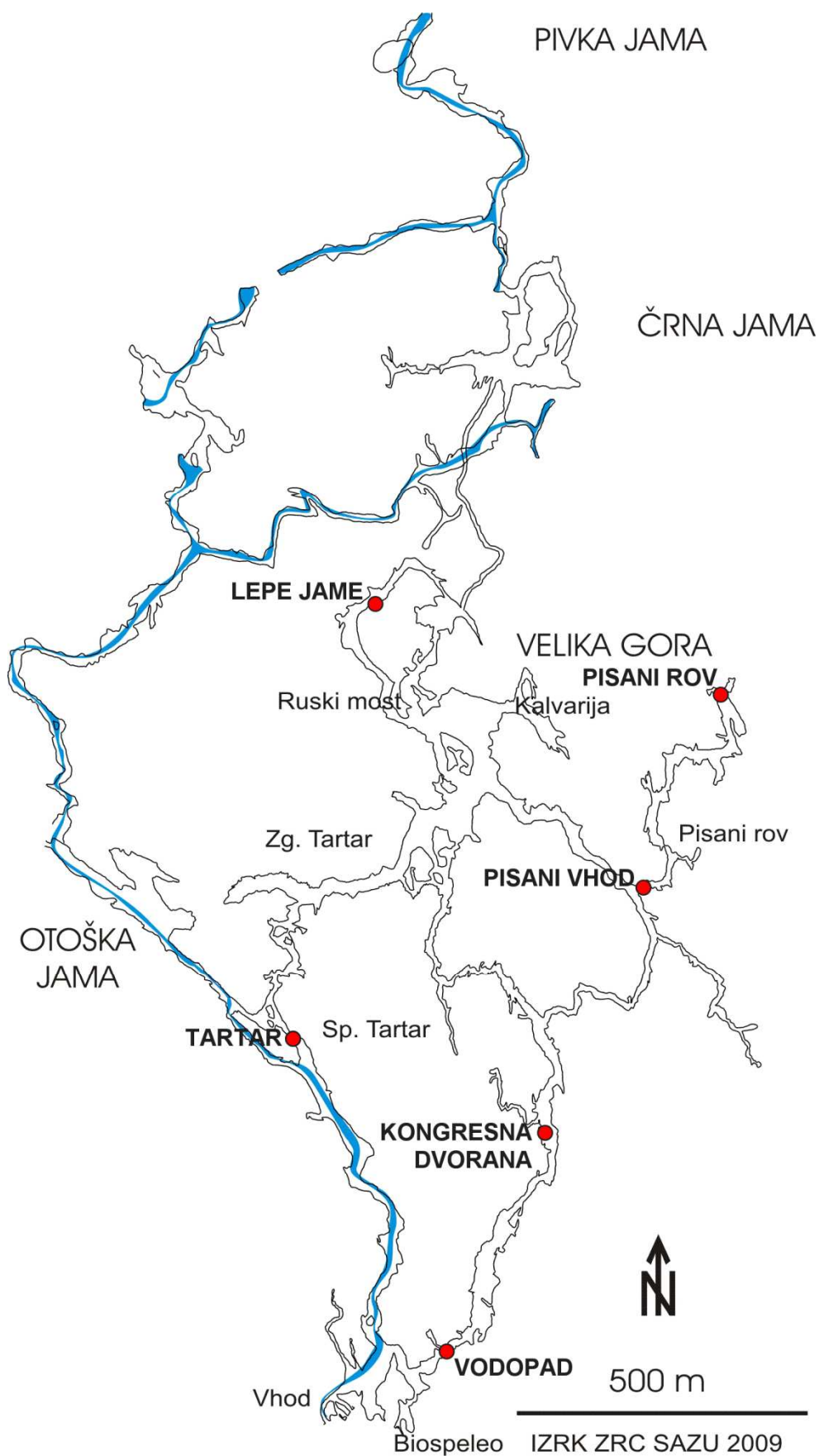
Primer izvedbe in zagostavljanja kakovostnih meritev za znanstveno proučevanje klime v kraških jamah predstavlja jamski informacijski sistem Postojnske jame z interno oznako »Jam'ca«. Postojnska jama je ena najpomembnejših turističnih jam na svetu in najbolj

obiskan turistični cilj v Sloveniji. V zadnjih letih jo vsako leto obiše preko pol milijona turistov, od leta 1819 pa jo je obiskalo že več kot 37 milijonov obiskovalcev.

Preko 20 km dolg jamski sistem s petimi znanimi vhodi, je razvit v krednem apnencu med Pivško kotlino in Planinskim poljem. V grobem lahko rečemo, da je sistem razvit v dveh nivojih: turisti obišejo zgornji nivo, ki je hidrološko neaktiven. Spodnji nivo sestavljajo kanali z aktivnim tokom ponikalnice Pivke, ki jo lahko v sistemu spremljamo slabe 4 km in odteka po še neraziskanih rovih proti Planinski jami. Postojnska jama je zibelka speleobiologije in je v vrhu jam z največjo biodiverzitetjo na svetu.

Eden glavnih izzivov upravljanja turističnih jamah je, kako razvijati jamski turizem s pripadajočo infrastrukturo in pri tem čim manj vplivati na občutljivo jamsko okolje ter zagotoviti varnost obiskovalcev in zaposlenih. Poleg neposrednega fizičnega vpliva pri gradnji jamske infrastrukture, človek s svojimi dejavnostmi in prisotnostjo najbolj vpliva na jamsko atmosfero. Jamska mikroklima je ključen dejavnik jamskega ekosistema, od katerega je odvisno preživetje številnih endemnih jamskih živalskih vrst, pomembno pa vpliva tudi na ohranitev in izločanje sige.

Na zemljevidu Postojnske jame (Slika 1) so predstavljene lokacije jamskih avtomatskih merilnih postaj v Postojnski jami, ki delujejo od leta 2010. Lokacije so bile določene glede na namen in razpoložljiva denarna sredstva. Postaja »Vodopad« opisuje razmere v bližini enega izmed vhodov v jamo, postaja »Lepe jame« razmere v turistično najbolj obiskanem delu jame, postaja »Tartar« razmere v bližini toka reke Pivke v jami, postaja »Pisani rov« pa razmere v delu jame, ki je najbolj oddaljen in neodvisen od turističnega vpliva v jami. Dodatno se nahaja v jami tudi postaja »Prehod« v »Kongresni dvorani«, kjer je na voljo optična povezava z internetom in služi predvsem kot glavno vozlišče za prenos podatkov iz jame v centralno enoto izven jame. Na diagramu (Slika 2) so prikazani glavni gradniki okoljskega informacijskega sistema »Jam'ca« v Postojnski jami.



Slika 1: Lokacije jamskih avtomatskih merilnih postaj v Postojnski jami (avtorica kartografije: Stanka Šebela, Inštitut za raziskovanje krasi ZRC SAZU, Postojna, Slovenija)



Slika 2: Diagram glavnih gradnikov okoljskega informacijskega sistema »Jam'ca« v Postojnski jami

Jamska avtomatska merilna postaja »JaMo«

Glavni gradniki jamske avtomatske merilne postaje so predstavljeni na diagramu (Slika 3) in so za vse postaje v sistemu »Jam'ca« enaki, zato v nadaljevanju sledi samo podroben opis postaje »Pisani rov«, opis pa velja tudi za vse ostale postaje.

Postaja za meritve posameznih okoljskih spremenljivk v jami je opremljena s sledečimi senzorji:

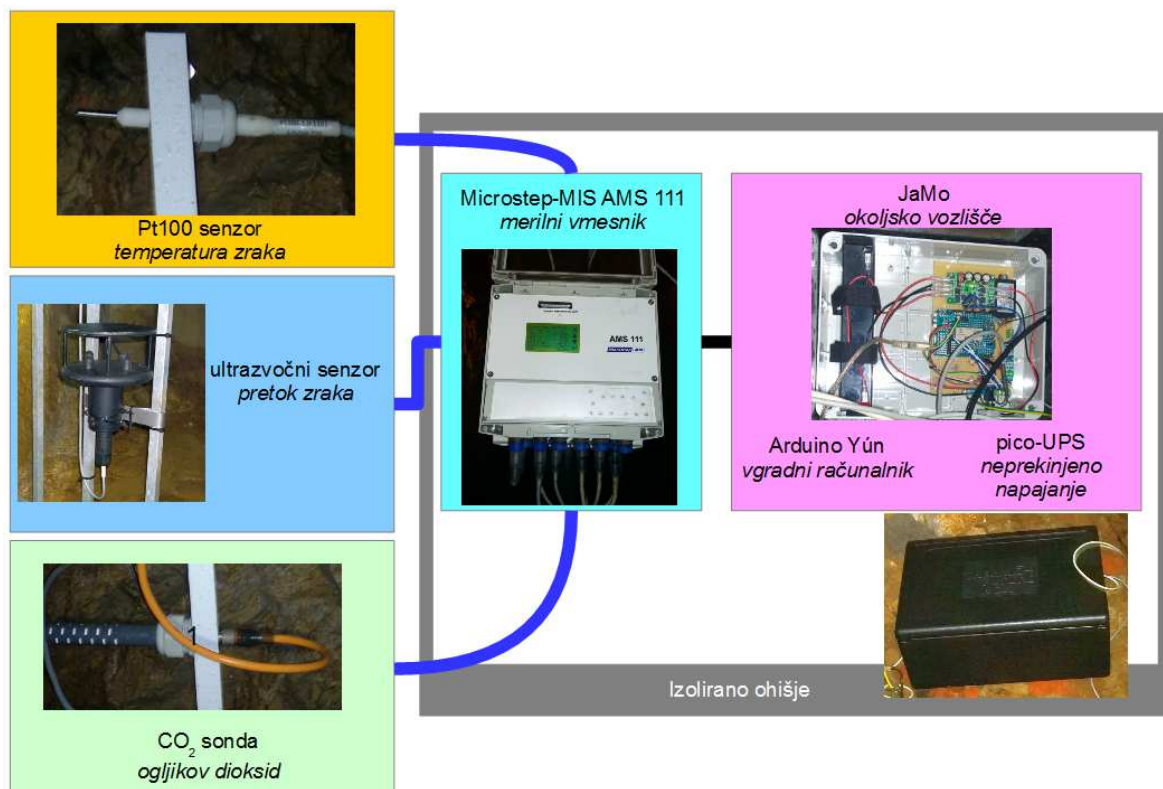
- temperatura zraka: PT100 senzor, tip »Pt100 Thermometer 1/5 DIN«, natančnost $\pm 0.10^{\circ}\text{C}$, območje od -65°C do $+70^{\circ}\text{C}$, odzivni čas < 20 sekund, dolgoročna stabilnost $0.1^{\circ}\text{C}/\text{leto}$, proizvajalec MicroStep-MIS;
- pretok zraka: ultrasonični senzor vetra, tip »WindSonic«, natančnost hitrosti vetra $\pm 2\%$ pri 12 m/s, natančnost smeri vetra $\pm 3\%$ pri 20 m/s, območje hitrosti vetra od 0 m/s do 60 m/s in smeri vetra od 0° do 359° , proizvajalec Gill Instruments Limited;
- ogljikov dioksid CO_2 : CO_2 sonda, tip »GMT 200 series«, natančnost $\pm(1.5\% \text{ od območja} + 2\% \text{ od izmerka})$, območje od 0 ppm do 10000 ppm, odzivni čas < 20 sekund, dolgoročna stabilnost $< \pm 5\% \text{ od območja} / 2 \text{ leti}$, proizvajalec Vaisala.

Zajem izmerjenih podatkov poteka iz merilnega vmesnika microStep-MIS AMS 111, preko RS485 komunikacijskega vmesnika. Za zajem, zbiranje, statistično obdelavo, kontrolo, lokalno shranjevanje in prenos v centralno enoto skrbi okoljsko vozlišče MEIS JaMo. Naprava JaMo temelji na vgradnem računalniku Arduino Yún, ki omogoča relativno dobro računalniško zmogljivost glede na porabo (manj kot 2W), kakovostno brezžično WiFi povezovanje in trajni spominski medij microSD. Dodatno je naprava JaMo

opremljena tudi s kakovostnim neprekinjenim napajanjem na osnovi 12V svinčeve baterije, ki omogoča premostitev izpada električne energije do 12 ur ali več glede na kapaciteto baterije ter dodatno omogoča tudi nadzorovan izklop naprave za zaščito podatkov na spominskem mediju. Programska oprema okoljskega vozlišča MEIS JaMo ustreza vsem lastnostim opisanim v podpoglavju »*Jamska avtomatska merilna postaja*«, podroben opis pa je na voljo v prispevku (Grašič et al., 2011).

Vsa elektronika jamske merilne postaje, razen senzorjev, je nameščena v ustrezno izolirano ohišje, ki onemogoča kondenzacijo vode na ohišju. Slika merilne postaje na lokaciji »Pisani rov« je predstavljena na slikah (Slika 4). Posebnost te postaje predstavlja relativno velika razdalja (cca. 500 m) med merilnim vmesnikom na lokaciji »Pisani rov« in okoljskim vozliščem JaMo na lokaciji »Pisani vhod«. JaMo je postavljen na to lokacijo zaradi bližine jamske železniške proge po kateri se občasno pripelje jamski turistični vlakec opremljen s podatkovno mulo za prenos podatkov na osnovi DTN tehnologije (Gabrovšek et al., 2014).

Senzorji so nameščeni glede na možnosti in potrebe na posameznih lokacijah. Medtem ko so na lokacijah »Pisani rov«, »Pisani vhod« in »Tartar« pritrjeni z uporabo steznih plastičnih vezic kar na obstoječe nosilce (Slika 6), se na lokacijah »Vodopad« in »Lepe jame« uporablja prenosni stolp (Slika 7).



Slika 3: Diagram glavnih gradnikov jamske avtomatske merilne postaje



Slika 4: Slike jamskih avtomatskih merilnih postaj za meritve na lokacijah »Pisani rov« (levo zgoraj je slika izoliranega ohišja v katerem se nahaja merilni vmesnik, levo spodaj pa slika okoljskega vozlišča »JaMo« prav tako v izoliranem ohišju) in »Vodopad« (desno)



Slika 5: Slike jamske avtomatske merilne postaje za meritve na lokaciji »Tartar«



Slika 6: Slike montaže senzorjev na lokacijah »Pisani rov - vhod« (levo) in »Tartar« (desno«).



Slika 7: Slike montaže senzorjev na prenosne merilne stolpe (levo na lokaciji »Lepe jame«, desno na lokaciji »Vodopad«).

Centralna enota jamskega okoljskega sistema »Jam'ca«

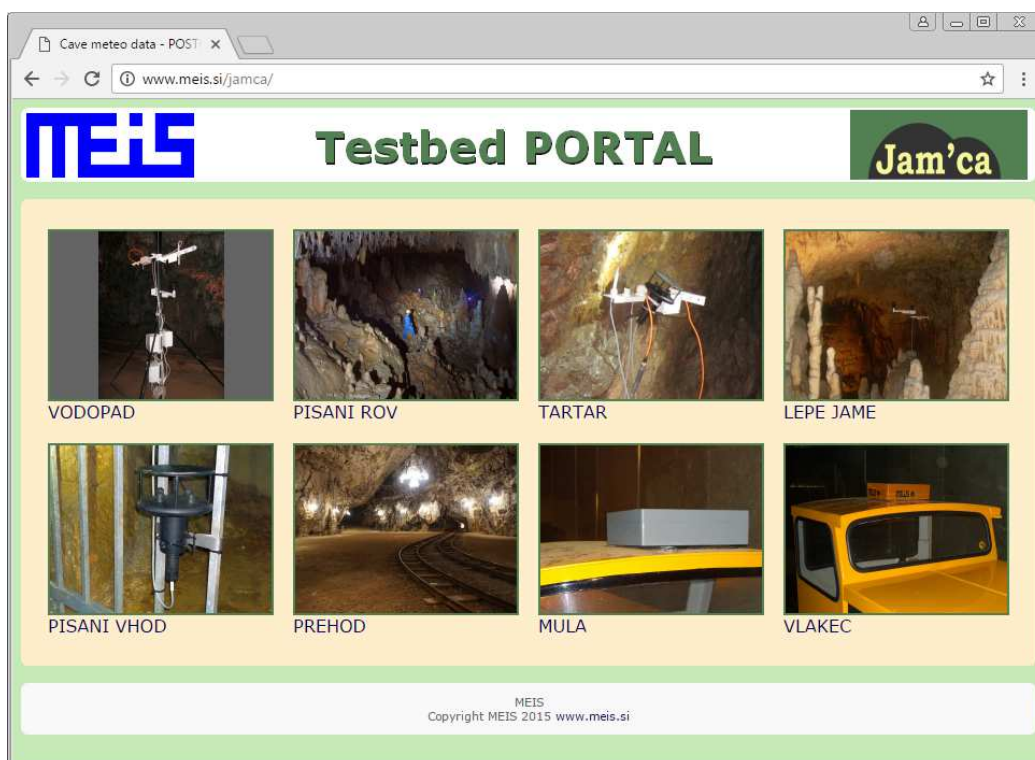
Jamska centralna enota sistema »Jam'ca« se nahaja v prostorih MEIS-a) in ustreza vsem opisanim lastnostim v podpoglavju »*Jamska centralna enota*«.

Sestavljena je iz več računalnikov primerne zmogljivosti:

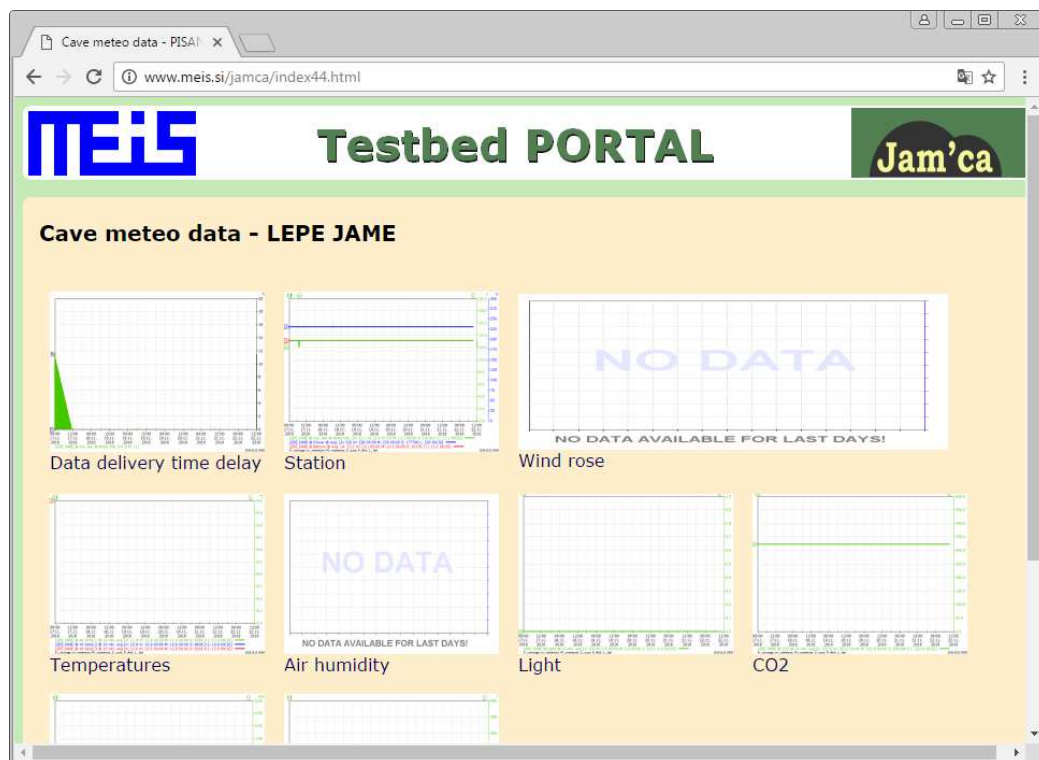
- okoljskega vozlišča JaMo z oznako »Centrala«, ki je glavno vozlišče za sprejem podatkov preko svetovnega spleta (interneta) na osnovi Arduino Yun vgradnega računalnika ali preko Ad-Hoc brezžične povezave s podatkovno mulo JaMu;
- zmogljivega strežniškega računalnika z oznako »Maid« na osnovi Intel I7 mikroprocesorja in veliko količino trajnega spomina na trdem disku (1 TB), kjer je nameščena programska oprema za dodatno kontrolo in shranjevanje prejetih podatkov iz postaj v MySQL bazo podatkov, na tem računalniku je nameščena tudi programska oprema za dostop do shranjenih podatkov ter prenos izmerjenih vrednosti za zadnjih 5 dni iz vseh postaj v obliki grafov na javno spletno stran (Slika 8 in Slika 9) (Inštitut za raziskovanje krasa ZRC SAZU & MEIS, 2015),
- najetega strežniškega prostora izven prostorov MEISa za gostovanje javne spletne strani,
- ter osebnega računalnika z oznako »CinCin« opremljenega s sistemom avtomatskega opozarjanja (alarmiranja) na detektirane izpade ali napake v sistemu »Jam'ca« prek elektronskih sporočil in kratkih SMS sporočil.

Dostop do vseh sprotnih in zgodovinskih podatkov je omogočen z uporabno namenskega prikazovalnega programa »Mungo«, ki omogoča pregled, grafično predstavitev in statistične prikaze tudi izven internega omrežja MEISa na osebnih računalnikih. Za vizualizacija in statistično obdelavo so na voljo tudi druga namenska orodja kot je na primer program »webSolarRose« za risanje sončnic (

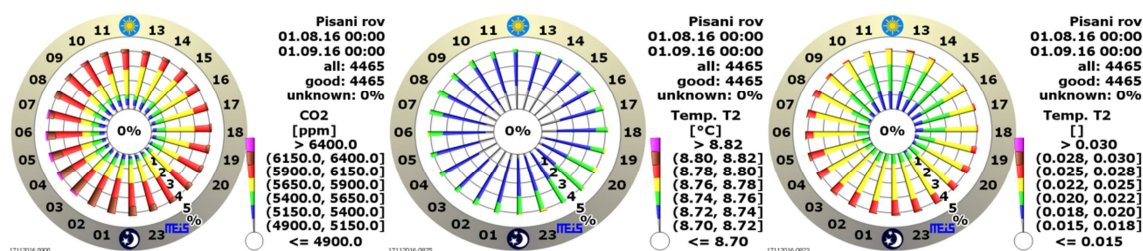
Slika 10).



Slika 8: Vstopna slika javno dostopne spletne strani jamskega okoljskega sistema »Jam'ca« na spletni strani <http://www.meis.si/jamca>



Slika 9: Primer predstavitve izmerjenih podatkov jamske merilne postaje na javno dostopni spletni strani jamskega okoljskega sistema »Jam'ca« za preteklih 5 dni



Slika 10: Analiza merilnih podatkov iz lokacije »Pisani rov« z uporabo orodja »Sončnica« (levo: povprečna koncentracija CO₂, sredina: povprečna temperatura T2, desno: standardna deviacija povprečne temperature T2) z uporabo namenskega programa »webSolarRose«

DTN prenos podatkov

Za prenos podatkov v jamskem okoljskem sistemu »Jam'ca« se uporablja DTN tehnologija prenosa podatkov, ki je predstavljena v podpoglavju »Prenos podatkov v jamskem informacijskem sistemu«. Za prenos podatkov se uporabljata dve DTN podatkovni muli JaMu (Slika 11), ki se izmenjujeta na turističnem vlakcu, ko zmanjka električne energije v baterijah. Podatkovna mulla JaMu vsebuje za varčevanje z energijo senzor vibracij, ki skrbi, da se JaMu izklopi, kadar vlak miruje. S tem je ob kapaciteti sedmih eno-celičnih LiPo baterij, ki znaša 42 Ah, zagotovljena avtonomija približno za 25 dni. Ob srečanju z jamsko postajo ima podatkovna mulla na voljo povprečno 10-15 sekund za izmenjavo podatkov.



Slika 11: Slika DTN podatkovne mule montirane na turističnem vlakcu v Postojnski jami z uporabo magnetnega nosilca

Zaključki

V okviru tega prispevka so predstavljene pridobljene izkušnje pri izgradnji in zagotavljanju kakovostnih avtomatskih meritev za znanstveno proučevanje mikrometeorologije kraških jam, ki temeljijo na dobri praksi in ustrezni dopolnitvi in prilagoditvi priporočil Svetovne meteorološke organizacije za meritve v zunanji atmosferi (World Meteorological Organization, 2008).



Slika 12: Demingov krog PDCA (planiraj – izvedi – preveri – ukrepaj) z zagozdo, ki jo predstavlja standard povzeto po standardu kakovosti ISO9001:2015 (International Organization for Standardization, 2015b)

Izgradnja in zagotavljanje kakovostnih avtomatskih meritev je v skladu z najnovejšo izdajo standarda kakovosti ISO9001:2015 (International Organization for Standardization, 2015b), ki določa sedem glavnih načel vodenja kakovosti med katerimi je bilo pri našem delu najbolj izpostavljeno načelo nenehnega izboljševanja (Slika 12), (International Organization for Standardization, 2015a). Nekatere pridobljene izkušnje in spoznanja predstavljene v tem prispevku bi bilo za izvajanje mikrometeoroloških meritev v jami

možno v prihodnosti uporabiti tudi kot standard (zagozdo Demingovega kroga PDCA, Slika 12).

Dodatno so v okviru tega prispevka opisane tudi možnosti kakovostnega prenosa podatkov v okoljskih merilnih sistemih, ki jih priporočila Svetovne meteorološke organizacije še ne pokrivajo (World Meteorological Organization, 2008) in so osnovane na podlagi uporabe sodobne DTN tehnologije, ki se razvija za komunikacije v vesolju in na področjih s slabo ali neobstoječo infomacijsko infrastrukturo.

V zadnjih časih se mnogokrat narobe predpostavlja, da je možno enako dobre meritve kot iz kakovostne merilne naprave pridobiti z večjo količino meritev iz več manj kakovostnih merilnih naprav včasih celo indikatorjev (detektorjev), kar je posledica hitrega razvoja in dostopnosti cenejših in manj kakovostnih merilnih naprav. Odgovore ali je to možno, predstavlja tudi ta prispevek, ki predstavlja potrebne pogoje za kakovostne meritve. Glede na pregled lastnosti kakovostnega avtomatskega merilnega sistema lahko zaključimo, da lahko večja količina meritev (tako v času kot prostoru) samo v nekaj lastnostih ohranja ali povečuje kakovost merilnega sistema kot je na primer razpoložljivost in sprotnost podatkov, pod določenimi pogoji tudi reprezentativnost in ločljivost, nikakor pa ne more izboljšati lastnosti kot je natančnost.

Zahvala

Za izvedbo predstavljenega jamskega informacijskega sistema »Jam'ca« smo bili sofinancirani s strani raziskovalnega projekta ARRS z oznako L2-6762.

Literatura

- Božnar, M., Mlakar, P., Grašič, B., Gabrovšek, F. (2012). "E-learning" lectures for setting up a modern DTN communications based cave micrometeorological stations, example of Postojna Cave, Slovenia. *Guide Book and Abstracts*, 16–17.
- Božnar, M. Z. (2004). Environmental information systems in Slovenia---the present and future state. *Nuovo Cimento C Geophysics Space Physics C*, 27, 307. <https://doi.org/10.1393/ncc/i2004-10022-2>
- Božnar, M. Z., Grašič, B., Mlakar, P., Soares, J., de Oliveira, A. P., Costa, T. S. (2015). Radial frequency diagram (sunflower) for the analysis of diurnal cycle parameters: Solar energy application. *Applied Energy*, 154, 592–602.
- Gabrovšek, F., Grašič, B., Božnar, M. Z., Mlakar, P., Udén, M., Davies, E. (2014). Karst show caves – how DTN technology as used in space assists automatic environmental monitoring and tourist protection – experiment in Postojna Cave. *Natural Hazards and Earth System Science*, 14(2), 443–457. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-443-2014>
- Grašič, B., Mlakar, P., Božnar, M. Z., Lesjak, M. (2003). Use of open source operating system and TCP/IP connectivity in urban environmental monitoring. In *IEEE International conference on industrial technology, Vols 1 and 2, Proceedings* (pp. 1257–1261).
- Grašič, B., Vrbinc, S., Božnar, M., Mlakar, P., Popović, D. (2010). Delay and Disruption Tolerant Networking (DTN) test bed in Slovenia. *Nova vizija tehnologij prihodnosti*, 103–114.
- Grašič, B., Vrbinc, S., Mlakar, P., Božnar, M. (2011). Software applications for environmental measurements using DTN connectivity. *Zbornik 14. Mednarodne Multikonference Informacijska Družba - IS 2011, 10.-14. Oktober 2011*, 207–210.
- Inštitut za raziskovanje krasa ZRC SAZU, MEIS. (2015). Projekt JAMCA: Ocena vpliva naravnih in antropogenih procesov na mikrometeorologijo Postojnske jame z uporabo numeričnih

- modelov ter sodobnih metod zajemanja in prenosa okoljskih podatkov. Retrieved November 21, 2016, from <http://www.meis.si/jamca/>
- International Organization for Standardization. (1992). ISO/IEC 9075:1992 Information technology - Database languages - SQL. Maynard, Massachusetts. Retrieved from http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=16663
- International Organization for Standardization. (2015a). ISO/IEC 27040:2015 Information technology - Security techniques - Storage security.
- International Organization for Standardization. (2015b). ISO 9001:2015 Quality management systems - Requirements.
- Lesjak, M., Grašič, B., Božnar, M. Z., Mlakar, P. (2002). New Internet connected air pollution monitoring network of Slovenia. *Development and Application of Computer Techniques to Environmental Studies*, 185–190.
- Mlakar, P., Božnar, M. (1995). Environmental information systems in Slovenia. *Air Pollution III. Vol. 2, Air Pollution Engineering and Management*, 259–266.
- Mlakar, P., Diallo, B., Lesjak, M., Čuhajev, I. (1990). Avtomatizirano vrednotenje kvalitete podatkov v računalniških ekoloških merilnih sistemih. *Programska merilna oprema*, 77–83.
- Mottola, L., Picco, G. Pietro, Ceriotti, M., Gună, Ș., Murphy, A. L. (2010). Not All Wireless Sensor Networks Are Created Equal: A Comparative Study on Tunnels. *ACM Trans. Sen. Netw.*, 7(2), 15:1--15:33. <https://doi.org/10.1145/1824766.1824771>
- Shannon, C. E. (1949). Communication in the presence of noise. *Proceedings of the IRE*, 37(1), 10–21.
- Vrbinc, S., Grašič, B., Božnar, M. Z., Mlakar, P. (2010). SymbioNode Data Carrier in Delay and Disruption Tolerant Networking (DTN). In *Collaboration, Software and Services in Information Society (CSS-COT 2010)* (pp. 1–6). Retrieved from http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary;jsessionid=93FAF44D8DB8208A18608CA39866C45F?doi=10.1.1.374.4830%5Cnhttp://www.n4c.eu/Download/8.4/DTN_SYMBIONODE_IJS_v5.0.pdf
- World Meteorological Organization. (2008). Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation, WMO-No. 8.