

Raziskovanje potopljenih rudnikov v Evropi s podvodnim robotom – projekt *Unexmin*

Timotej Verbovšek

Problematika evropskih držav s surovinami in namen projekta

Evropa ima dolgo zgodovino izkoriščanja mineralnih surovin in je bila nekoč pri tem vodilna celina, danes pa se je to precej spremenilo. Rudniki v Evropi so večinoma že izkoriščeni, čeprav je treba opozoriti, da jih je bilo ogromno zaprtih zaradi ekonomskih razlogov in ne zato, ker bi zmanjkalo rude. Redke kovine, ki jih potrebujemo v elektroniki, se nahajajo večinoma na Kitajskem, v Rusiji in na drugih celinah. Zato smo v Evropi zelo odvisni od tujega trga, kar strateško ni dobro. Leta 2017 je Evropska komisija objavila posodobljeni seznam kritičnih surovin (Critical Raw Materials, CRM), med katerimi je prepoznala 27 surovin kot kritičnih za razvoj evropske ekonomije, med temi so večinoma kovine in elementi redkih zemelj. Poseben status ima danes litij, ki ga potrebujemo pri izdelavi litij-ionskih baterij, poleg njega pa tudi kobalt, nikelj in grafit. Predvsem niklja in litija na evropskih tleh precej primanjkuje.

V današnjih časih so se spremenile metode izkoriščanja, saj lahko na okoljsko prijaznejši način pridobimo predvsem takšno rudo, ki ima nizko vsebnost elementov in ki je včasih niso mogli izkoristiti. Ogromno neizkoriščenih potencialnih zalog je tudi še v starih opustelih rudnikih. Ocenjujemo, da je v Evropi približno 30.000 opuščenih kovinskih rudnikov in približno 20.000 premogovnikov, zato je tudi z ekonomskega vidika čedalje bolj aktualno vprašanje, kako bi lahko te vire izkoristili.

Precej rudnikov je torej perspektivnih, a ne-

dostopnih, nevarnih in tudi radioaktivnih, zato niso primerni za raziskovanje. Delo v rudnikih je bilo za ljudi vedno nevarno, saj v njih prihaja do plinskih vdorov (ogljikovega dioksida, metana) in eksplozij, porušitev, vdorov podzemne vode, požarov, pa tudi do dogodkov, ko so rudarji ujeti pod površino. Zapuščeni rudniki so še bolj problematični, ker so v zelo slabem stanju, vseh rogov pa tudi ne poznamo, ker jih pred nekaj sto leti sploh niso evidentirali. V starih rovih tudi ni električne napeljave in svetlobe, zato je lahko vidljivost zelo slaba, ni ventilacije in podobno. Kljub vsem naštetim težavam lahko rove raziskujemo s posebej usposobljenim osebjem. Velika večina raziskovalnih metod pa odpove, če je rudnik zalit s podzemno vodo, saj se ljudje ne moremo potapljati do nekaj sto metrov globoko v zapuščene rove. Te težave pa lahko odpravimo, če raziskujemo rudnike z robotom.

O projektu *Unexmin*

Glavna ideja projekta je bila razviti podvodnega robota, ki bi avtonomno raziskoval zalite podzemne rudnike. Projekt je poimenovan *UNEXMIN*, kar je kratica za »UNderwater EXplorer for flooded MINes« in kar lahko prevedemo kot »Podvodni robot za raziskovanje potopljenih rudnikov«. V projektu je sodelovalo trinajst partnerjev iz sedmih držav, med katerimi so bile tri organizacije iz Slovenije – Geološki zavod Slovenije, Center za upravljanje z dediščino živega srebra ter posredno tudi Slovensko geološko društvo preko Evropske zveze geologov (EFG), ki je kot partnerska organizacija zbiranje podatkov

in predstavitve rezultatov prepustila nacionalnim geološkim društvom po Evropi. Projekt je potekal 45 mesecev (od 1. februarja leta 2016 do 31. oktobra leta 2019) v okviru financiranja krovnega programa Evropske unije za raziskave in inovacije (Research and Innovation Action RIA) *Obzorji 2020*.

Vloge treh slovenskih organizacij pri projektu so bile različne. Geološki zavod Slovenije je imel vlogo pri testiranju robota (za ta delovni paket je bil tudi vodilni partner), pri geoloških raziskavah, posredovanju oziroma obveščanju in širjenju informacij o projektu, preverjanju funkcij robota, razvoju inštrumentov, analizi podatkov in tudi ostalih aktivnostih. Center za upravljanje z dediščino živega srebra je bil pristojen za izvedbo testiranja robota v rudniku živega srebra v Idriji (ena od štirih predvidenih lokacij testiranja, kot bo opisano v nadaljevanju), Slovensko geološko društvo pa za zbiranje podatkov in izdelavo baze o potopljenih rudnikih ter za posredovanje oziroma obveščanje in širjenje informacij o projektu.

Poleg izdelave robota je bil stranski cilj projekta tudi izdelava baze opuščeni in aktivnih rudnikov v Evropi, da bi robot tudi po koncu projekta lahko raziskoval potencialno zanimive rudnike, ki bi jih bilo morebiti smiselno ponovno odpreti.

O robotu

Izdelava robota je bilo tehnično zahtevno delo, saj je šlo za pionirski razvoj robota, v sklopu trajanja projekta pa so bili izdelani celo trije prototipi (UX-1a, UX-1b in UX-1c). Zagotoviti je bilo treba avtonomno kartiranje v tridimenzionalnem okolju pri največji predvideni globini potopa 500 metrov, torej bistveno globlje, kot je rudnike mogoče raziskovati s potapljači. Za obliko robota so izbrali kroglo, ki je najbolj mobilna, se lahko obrača in se najmanj verjetno zatika. Robot ima premer približno 60 centimetrov, tehta 112 kilogramov, je nevtralen plovec in se premika s hitrostjo največ pol metra na sekundo. Opremljen je s šte-

vilnimi senzorji (tipali) za kamnine in tudi za vodo, saj je ta v zalitih rudnikih lahko precej korozivna ter tako nevarna za ohišje in senzorje. Opremo robota lahko razdelimo v navigacijsko in znanstveno.

Navigacijska oprema zajema natančne senzorje za premikanje in zaznavanje ovir:

- *Sonar* za zaznavanje tal oziroma sten, da ne pride do trka.
- *Pet digitalnih kamer*, ki zaznavajo vidno svetlobo. Kamera je zelo primerna za vidno opazovanje kamnin, saj se z njo vidijo same kamnine ter tudi vpadi razpok in prelomov, ki jih je treba poznati za razumevanje nastanka rudišč. Težave kamere pa so predvsem, da je vidnost v kalni vodi slaba in je za interpretacijo potreben strokovnjak, ki prepozna ter oceni kamnine in razpoke.
- *Luči* za osvetljevanje.
- *Dopplerjev senzor* za meritve hitrosti vodnega toka.
- *Inercijski navigacijski sistem (INS)* za meritve premikanja.
- *Skenerji in laserji*, ki podobno kot sonar zaznavajo bližino sten, stropa in tal.

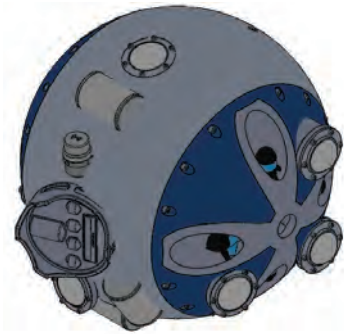
Znanstvena oprema zajema vse potrebno za vsebinsko zajemanje podatkov:

- *Meritve fizikalno-kemičnih lastnosti vode*, med katere spadajo temperatura vode, pH, elektroprevodnost vode ter vodni tlak.
- *Zajemanje manjših količin vode z vzorčevalnikom*, ki ji nato kasneje v laboratoriju določimo kemično sestavo ter mesta temperaturnih oziroma hidrotermalnih anomalij, korozivne vode in uhajanja oziroma koncentracij plinov. Potencialne težave povzročata zahtevana kalibracija oziroma umerjanje sonde, da ta pravilno meri parametre, in včasih premajhna količina vode za vse potrebne analize.
- *Merilec magnetnega polja*, ki ga potrebujemo za prepoznavanje magnetnih minera-

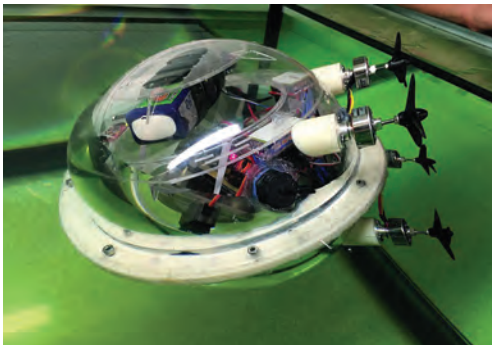
lov (ti vsebujejo na primer železo).

- *Ultravijolična fluorescenčna kamera* za določanje mineralov, ki imajo fluorescenčne lastnosti.
- *Multispektralna kamera*, ki meri elektromagnetno valovanje na štirinajstih različnih frekvencah oziroma kanalih, kar potrebujemo za zaznavanje posebnih mine-

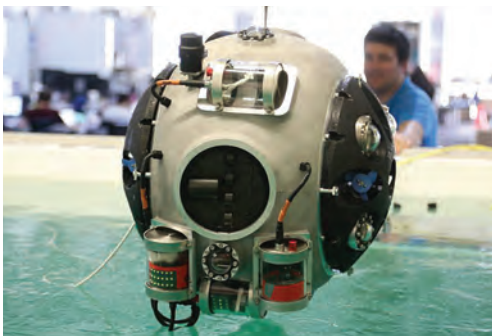
IDEJNA SKICA ROBOTA UX-1,



PROTOTIP



ROBOT



ralov. Težave so lahko s preveliko količino podatkov, poleg tega pa zaradi premikanja robota in njegovega obračanja zajeti podatki niso nujno povsem z istega mesta.

- *Gama števec* za meritve naravne radioaktivnosti (gama žarkov). To metodo uporabljamo za določanje radioaktivnih mineralov. Naravna radioaktivnost se pojavlja v mineralih, ki vsebujejo predvsem radioaktivne izotope urana in kalija, ti pa so prisotni v magmatskih kamninah (predvsem v granitih in pegmatitih).
- *Podpovršinski sonar* (angleško *subbottom profiler*), ki skenira tla pod dnom oziroma površino tal.



Prikaz osnovnih informacij za rudnik Sovodenj v Sloveniji v bazi podatkov.

Čeprav je obstoječa oprema robota precej bogata, bi jo lahko še nadgradili z:

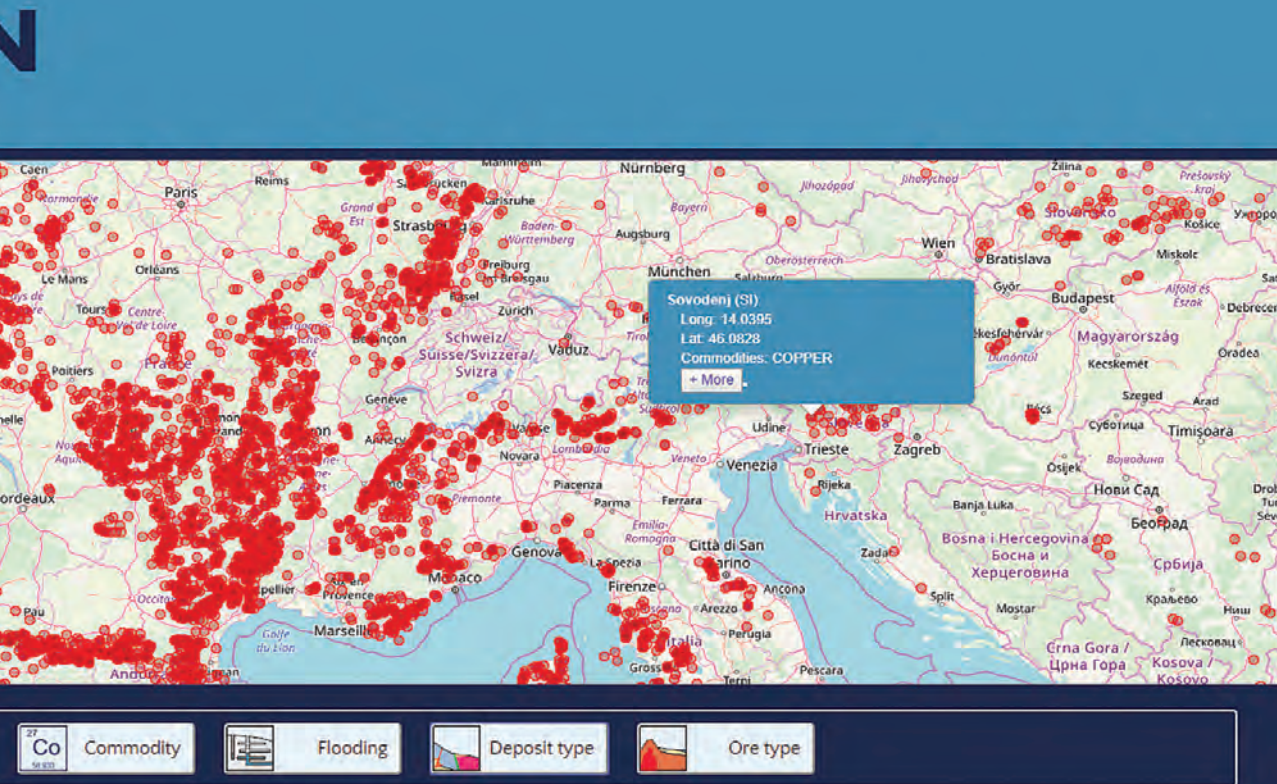
- meritvami za ugotavljanje mineralne (XRD) in kemične sestave (XRF),
- opremo za vzorčenje kamnin, ki bi jih lahko nato preučili na kopnem,
- bolj avtomatiziranim zajemom podatkov.

Zanimivo je, da je danes posebna težava prevelika količina zajetih podatkov, saj robot zabeleži približno 200 gigabajtov podatkov vsako uro. Med štirimi testiranjmi je bilo na primer izdelanih več kot 8 terabajtov podatkov.

Baza zapuščenih rudnikov

V sklopu projekta smo naredili seznam rudnikov različnih surovin, vendar nato v

analizo in predstavitev nismo vključili premogovnikov, tako zaradi večjega potenciala in varnosti uporabe robota pri potapljanju kot tudi zaradi ekonomskega vidika, saj bo v prihodnosti potreba po kovinah, nekovinskih surovinah, redkih elementih in podobnem večja kot po premogu. Zbiranje podatkov je bilo precej zahtevno, saj evidence opuščanih rudnikov uradno ne opravlja nihče, popisani pa so predvsem tisti s koncesijo za izkoriščanje in starejši, za katere obstajajo različna poročila. Podatki so zato razpršeni po ustanovah, občinah, objavljenih člankih in poročilih ali pa imamo o njih le ustne informacije. Baza je v času projekta obsegala 8.174 rudnikov, sedaj pa je še posodobljena in vsebuje 11.678 rudnikov. Največ jih je bilo popisanih v Združenem kraljestvu (5.843),



Franciji (3.468) in Italiji (1.183). Čeprav je bilo pridobivanje podatkov zapleteno, smo za območje Slovenije popisali 96 rudnikov in premogovnikov, kar je v primerjavi z ostalimi evropskimi državami v Evropi precej.

Zajeti podatki so vsebovali lokacijo rudnika, izkoriščane rude, vrsto dostopa do rudnika, status poplavljenosti rudnika, višino podzemne vode, geološke lastnosti kamnin, tip orudjenja, velikost rudišča, status aktivnosti rudnika, razloge za morebitno zaprtje, omejitve pri dostopu, podatke o podjetju, ki je lastnik oziroma ki upravlja z rudnikom, in morebitne opombe. Z obsežno bazo smo predvsem želeli določiti lokacije potencialnih rudnikov, kamor bi se robot lahko potopil, poleg tega pa tudi dobiti nove podatke o svoji kulturni dediščini, saj so marsikateri rudniki zaščiteni kot kulturni spomeniki. Karta rudnikov je dostopna tudi na spletnem naslovu:

www.unexmin.eu/the-european-inventory-of-flooded-mines-is-now-online/

Lokacije testiranj

Med projektom je bilo za testiranje robota sprva uporabljene več manjših lokacij v bazenih in jezerih, predvsem pa so bile pomembne lokacije v naravi, kjer se je robot dejansko potopil v opuščene rudnike. Predvidene so bile štiri lokacije, po opravljenih testih pa so na koncu dodali še peto.

Kaatiala – rudnik kremenca na Finskem (11. junij – 21. junij 2018)

Kaatiala je rudnik v pegmatitih, ki so jih izkoriščali za pridobivanje kremenca v devetnajstem stoletju. Pozneje je bil rudnik Kaatiala v uporabi med letoma 1942 in 1968, izkoriščali pa so ortoklaz. Proizvodnja je obsegala približno 160.000 ton glincev in 30.000 ton kremenca. Poleg tega so izkoriščali tudi muskovit (700 ton), kolumbit (5 ton), löllingit (FeAs_2) (5 ton) in 18 ton berila. Rudnik je v primerjavi z ostalimi

Testiranje robota v Kaatiali na Finskem.



lokacijami lažje dostopen, saj gre za odprti kop, zato so ga izbrali za prvo testiranje komponent robota v bolj varnem okolju.

Idrija – rudnik živega srebra v Sloveniji (10. september – 21. september 2018)

Rudnik, ki ga Slovenci dobro poznamo, je deloval petsto let, vse do leta 1995. Za Almadenom v Španiji je bil drugi največji rudnik živega srebra na svetu. V njem so pridobili približno 107.700 ton živega srebra. Od leta 2012 dalje je rudnik skupaj z Almadenom uvrščen na seznam Unescove svetovne dediščine. Izziv pri testiranju robota so bili zelo ozki jaški in omenjena vidljivost v vodi.



Testiranje robota v Idriji.

Urgeiriça – rudnik urana na Portugalskem (6. marec – 7. april 2019)

Rudnik je deloval med letoma 1913 in 1992, zaprt pa je bil leta 2001. Posebnost rudnika je njegova globina, saj je šest jaškov segalo



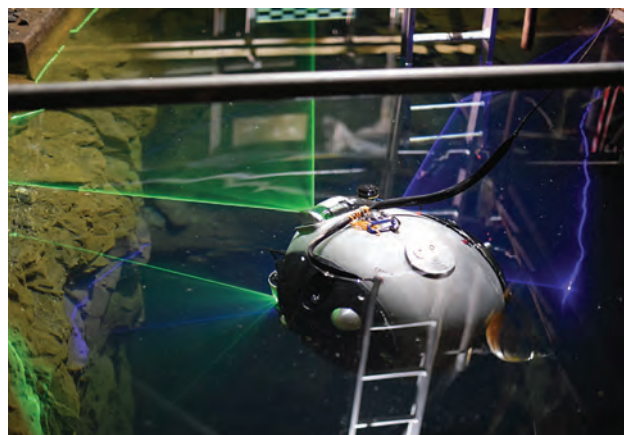
Testiranje robota v Urgeiriçi na Portugalskem.

do največje globine približno 450 metrov. Robot je bil testiran v 18 potopih do globine 106,5 metra, kamnine pa so tudi radioaktivne, saj gre za rudnik urana v pegmatitih.

Deep Ecton – rudnik bakra v Združenem kraljestvu (9. maj – 31. maj 2019)

Rudo so tam kopali vse od bronaste dobe do leta 1890. Največja proizvodnja je bila leta 1786, ko so izkopali 4.000 ton bakra. Poleg tega so kopali tudi svinec in cink. Jaški segajo tudi več kot 400 metrov globoko pod gladino reke. Rudnik približno 150 let ni bil obiskan oziroma natančno raziskan,

Testiranje robota v Deep Ectonu v Združenem kraljestvu.



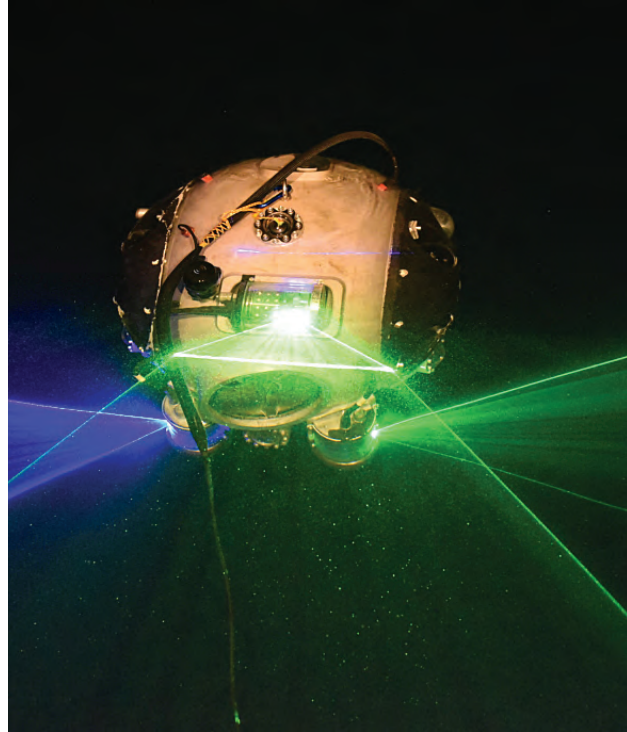
zato je bilo njegovo raziskovanje poseben izziv. Rezultat projekta je bil posredno tudi dokumentiranje kulturne dediščine.

Jama Molnár János v Budimpešti na Madžarskem (24. junij – 5. julij 2019)

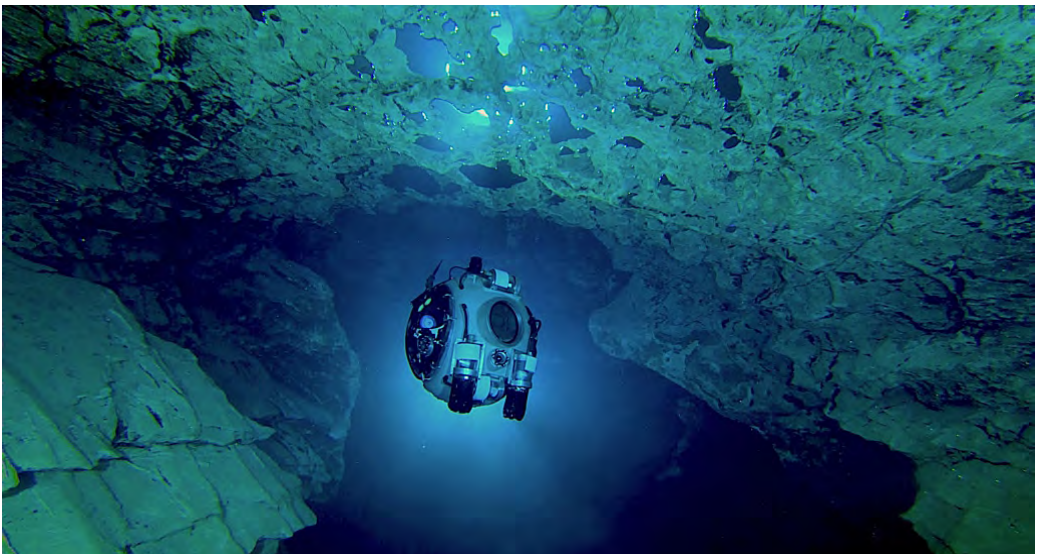
Jamo z več termalnimi izviri v karbonatih v središču Budimpešte so se poleg omenjenih prvotnih štirih lokacij odločili raziskati kasneje, da bi izboljšali avtonomno obnašanje robota. Termalna voda v njej ima temperaturo od 20 do 28 stopinj Celzija, globina vode je tudi več kot 100 metrov, dolžina jamskih rogov pa več kot 6 kilometrov.

Zaključna predstavitev

26. septembra leta 2019 so med predstavitvijo končnih rezultatov v Bruslju prikazali tudi delovanje robota v živo, in sicer v izredno globokem plavalnem bazenu Nemo 33, ki je s številko poimenovan, ker je temperatura vode v njem 33 stopinj Celzija, globina pa 33 metrov. Okoli bazena so bila številna steklena okna, tako da je bilo mogoče videti delovanje robota. S predstavitvijo in številnimi predavanji o projektu in politiki Evropske unije glede izrabe mineralnih surovin se je projekt zaključil.



Testiranje robota v jami Molnár János na Madžarskem.





Predstavitve delovanja robota v bazenu Nemo 33 v Bruslju.

Kako naprej?

Robot oziroma trije prototipi so bili uspešno izdelani in testirani, zato jih bodo lahko uporabljali pri raziskovanju podzemnih rudnikov ali ostalih lokacij tudi po koncu projekta. Odobreno pa je tudi že zanimivo nadaljevanje raziskovanja v okviru projekta *Robominers* (začel se je 1. junija 2019 in bo trajal do 31. maja 2023), ki ga v višini 7,4 milijona evrov prav tako financira Evropska unija s programom *Obzorje 2020*. Izdelali bodo robota, ki bo modularen (sestavljen iz posameznih sklopov) in bo lahko raziskoval manjše, ljudem nedostopne rove, saj ga bodo lahko na primer spustili pod zemljo na dno globoke vrtine, kjer naj bi se sam sestavil v delujočega robota in začel kopati, vzorčiti in raziskovati kamnine. Smo torej šele na začetku nove zanimive zgodbe, ki jo bomo spremljali tudi v prihodnje.

Viri:

Spletna stran projekta UNEXMIN:

<https://www.unexmin.eu/>.

Youtube kanal: https://www.youtube.com/channel/UCU1azd5LxBBaa6_6C-nsbEQ/videos.

Evropski seznam kritičnih surovin:

<https://rmis.jrc.ec.europa.eu/?page=crm-list-2017-09abb4>.

Članek o robotu s kratkimi predstavitevami štirih testiranih lokacij:

<http://www.unexmin.eu/wp-content/uploads/2018/07/lopes2017.pdf>.

Prispevka na RTV SLO o potapljanju v Idriji:

<http://www.rtvlo.si/znanost-in-tehnologija/potopljen-jasek-v-idrijskem-rudniku-raziskuje-avtonomni-robot/465971>.

<https://4d.rtvlo.si/arhiv/odmevi/174562356>.

Predstavitve projekta v reviji *European Geologist* (maj 2019, št. 47):

https://eurogeologists.eu/wp-content/uploads/2019/05/EGJ47_web.pdf.

Končna brošura projekta:

<https://www.unexmin.eu/download/unexmin-final-project-booklet-september-2019/>.

Timotej Verbovšek, rojen leta 1976, je univerzitetni diplomirani geolog in doktor znanosti, ki je leta 2008 doktoriral s področja podzemnih vod in uporabe fraktalov v geologiji. Je izredni profesor na Oddelku za geologijo na Naravoslovnotehniški fakulteti v Ljubljani, kjer predava na Katedri za aplikativno geologijo. Področje njegovega raziskovanja zajema delo na področju inženirske geologije, GIS-a, krasa in fraktalov. Je član Mednarodnega združenja hidrogeologov (*International Association of Hydrogeologists, IAH*), Mednarodnega združenja za inženirsko geologijo in okolje (*International Association for Engineering Geology and the Environment, IAEG*) in Mednarodnega društva za mehaniko kamnin (*International Society for Rock Mechanics, ISRM*). V sklopu projekta UNEXMIN je bil zadolžen predvsem za zbiranje podatkov za bazo rudnikov in predstavitev rezultatov. Kontakt in ostale informacije najdete na njegovi osebni spletni strani www.ntf.uni-lj.si/og/timotej-verbovsek/.