



## Povzetek projekta Študentski inovativni projekti za družbeno korist 2016-2020 za študijski leti 2018/2019 in 2019/2020 2. odpiranje za namen objave in predstavitve na spletni strani sklada

1. Polni naslov projekta: „Ocena poškodovanosti materialov Rupnikove linije“

- V katero področje na prvi klasifikacijski ravni KLASIUS-P-16 se uvršča projekt glede na vsebinsko zasnovano (neustrezno področje izbrišite):

7 – Tehnika, proizvodne tehnologije in gradbeništvo

2. V sodelovanju z: (navede se univerza oz. samostojni visokošolski zavod, ki je prijavil projekt in članica, ki je nosilka projekta ter partner/ja – podjetje/ji oz. organizacija, ki je/sta bilo/i vključeno/i v projekt)

Občina Žiri \_\_\_\_\_

Lafarge cement d.o.o. \_\_\_\_\_

### 3. Besedilo:

- Opredelite problem, ki se je razreševal tekom izvajanja projekta

Zaključek I. sv. vojne je na področju današnje Slovenije prinesel novo razdelitev teritorija, kjer je del slovenskega etničnega ozemlja pripadel Italiji. Obe državi sta novonastalo mejo za primer vojaških konfliktov tudi ustrezno utrdili s sistematičnim postavljanjem vojaških objektov. Jugoslovanska stran je postavila t.i. Rupnikovo obrambno linijo, ki je tekla ob črti Žirovnica, Ratitovec, Blegoš, Žirovski vrh, Ljubljanski vrh, Cerknica, Črni vrh in Plase. Rupnikova linija je bila celovit utrdbeni sistem z 12 velikimi utrdbami in cca. 4000 bunkerji od katerih je večina uničenih. Danes še ohranjeni objekti Rupnikove linije predstavljajo del kulturne dediščine in so predmet raziskovanja zgodovinarjev, arhitektov, sociologov ter seveda inženirjev različnih strok, kjer so ključna vprašanja povezana z uporabljenimi materiali. Betoni so s časom namreč podvrženi različnim kemijskim in fizikalnim spremembam, ki lahko vodijo do degradacije materiala, kar je tudi glavni problem ohranja objektov te kulturne dediščine. Med kemijskimi reakcijami vsekakor velja omeniti t.i. alkalno-agregatno reakcijo (AAR). Med AAR, ki potekajo s staranjem betonov, sta še posebej zanimivi t.i. alkalno-silikatna reakcija (ASR) in alkalno-karbonatna reakcija (ACR). ASR opisuje reakcijo med alkalijami in reaktivnim SiO<sub>2</sub> v agregatu betona ter posledično nastanek ekspanzijskega gela in sčasoma vodi do popolne fizične degradacije betona. Ker imajo agregati za pripravo betona iz lokalnega okolja zelo nizke vsebnosti SiO<sub>2</sub>, ASR navadno ne predstavlja večje grožnje za propad betona v Sloveniji. Večjo neznanko v lokalnem okolju predstavlja ACR reakcija, ki vključuje t.i. dedolomitizacijo (propadanje dolomitnega agregata v betonu) in posledično tvorbo t.i. sekundarnega CaCO<sub>3</sub> ter nekaterih novih gelskih Mg-Al-Si faz. Ker v lokalnem okolju dolomit predstavlja glavni vir agregata za pripravo betona, je ACR reakcija v starih betonskih sistemih zelo verjetna. V sled zapisanega je ključnega pomena, da se v preiskovanih objektih kulturne dediščine oceni do katere stopnje je napredovala ACR, katere nove faze so pri tem nastale, določi mikrostrukturno mesto precipitiranja novih faz ter oceni trenutno trdnost izbranih betonskih konstrukcij Rupnikove linije, kar je tudi bil glavni predmet zanimanja tekom projekta.

- Opišite potek reševanja problema oz. kratek povzetek projekta

Za doseg zastavljenega cilja smo projekt razdelili v tri aktivnostne sklope.

Aktivnost 1: V prvi fazi smo zbrali čim več informacij o virih agregata in cementa, ki so bili uporabljeni pri izgradnji objektov Rupnikove linije.

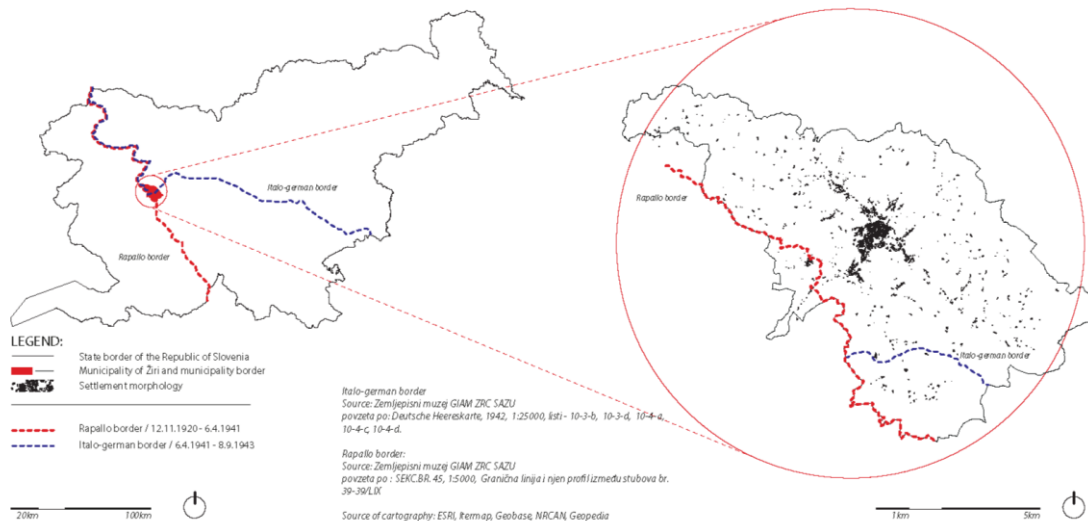
Aktivnost 2: V tem sklopu aktivnosti smo izvedli sistematično jemanje vzorcev betona iz bunkerjev Rupnikove linije iz t.i. prve obrambne črte ter tudi t.i. druge obrambne črte.

Aktivnost 3: Na pridobljenih vzorcih betonov smo izvedli popolno mikrostrukturno analizo s pomočjo optične in elektronske mikroskopije ter ocenili najverjetnejši vir surovin za pripravo betonov in stopnjo degradacije betonov posameznih bunkerjev.

- Navedite in opišite rezultate projekta ter njihov doprinos k družbeni koristnosti

Rezultatov opravljenega projekta je več.

1. Izvedli smo sistematski in poglobljen literaturni pregled pisnih virov o Rupnikovi liniji (iskanje map Rupnikove linije, na mapah označevanje objektov Rupnikove linije, na mapah markiranje tistih objektov, ki so zanimivi za raziskave v okviru opravljenega projekta – slika 1)). Izkaže se, da je na spletu na voljo relativno veliko gradiva, ki neposredno ali pa tudi posredno govori o Rupnikovi liniji. Poleg pregledovanja in prebiranja literaturnih virov smo izvedli tudi virtualni pregled bunkerjev Rupnikove linije (s pomočjo spletnih virov). Takšna aktivnost je rezultirala v poglobitvi znanj o Rupnikovi liniji vseh sodelujočih.



Slika 1: Potek Rupnikove linije

2. Evidentirali smo potencialne kamnolome kot vire agregata za gradnjo objektov Rupnikove linije. Izkaže se, da so kot vir agregata pri gradnji Rupnikove linije uporabljali različne lokalne kamnolome (ugotovitev glede na kasneje opravljeno mikrostrukturno analizo). Takšna ugotovitev je smiselna z ozirom na dejstvo, da se Rupnikova linija razteza skoraj 290 km. Torej bi bilo nesmiselno in tehnično zelo zahtevno pa tudi neekonomično uporabiti agregat iz zgolj enega samega lokalnega vira. Ugotavljamo tudi, da so kot vir agregata bili uporabljeni kamnolomi z dolomitno surovino ali kalcitno surovino. Ker je lokalno področje bogato tko z dolomitom kot tudi kalcitom je praktično nemogoče napovedati točno »mikro-področje« pridobitve agregata za gradnjo Rupnikove linije. Vseeno pa smo v okviru projekta uspeli napovedati najverjetnejše kamnolome, ki so (lahko) zagotovili agregat (slika 2). Ti viri so kamnolomi: Lajše, Vehar, Zelše, Klanci itd...

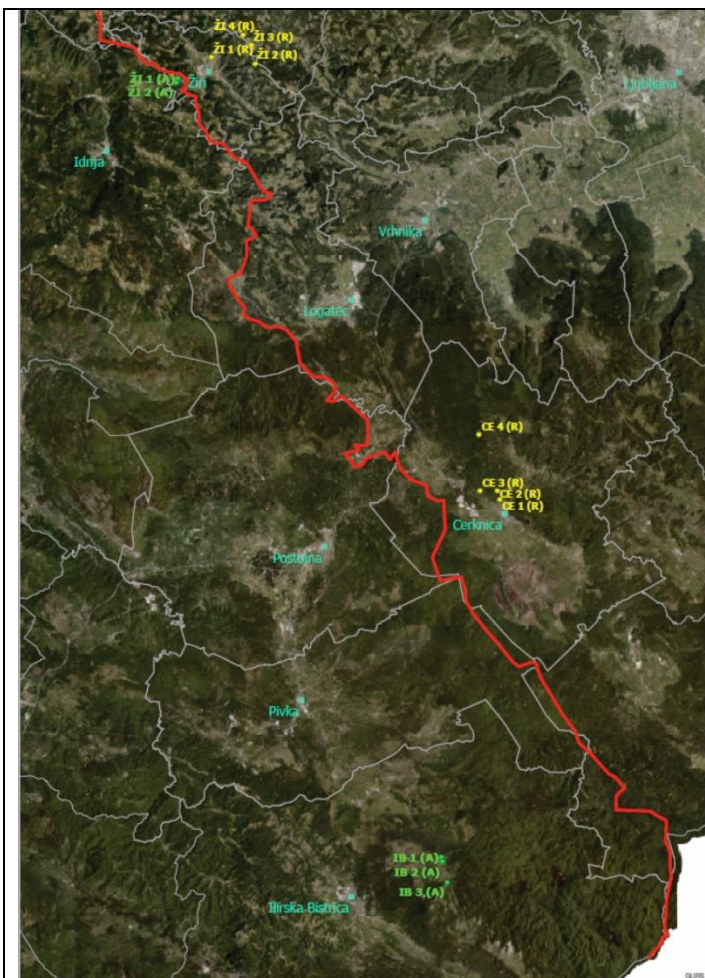


Slika 2: Najverjetnejši viri agregata za gradnjo Rupnikove linije, kjer so označena možna območja pridobivanja dolomitnega agregata. Iz slike je razvidno, da na tem območju prevladujejo karbonatne kamnine triasne (vijolična), jurske (modra) in kredne (zelena) starosti.

- Opravili smo sistematično vzorcečnje betonov iz različnih objektov Rupnikove linije (sliki 3 in 4). Glede na zbrane literaturne vire smo vzorčili na način, da smo zajeli objekte iz t.i. prve obrambne črte ter tudi t.i. druge obrambne črte. Ker je tema dotičnega projekta aktualna in s stališča reševanja problemaov povezanih s kulturno dediščino širše zanimiva, število odvzetih vzorcev presega okvire dotičnega projekta. Zato bodo nekateri vzorci betonov dobra osnova za nadaljevanje dela na isti tematiki tudi po formalnem zaključku projekta.

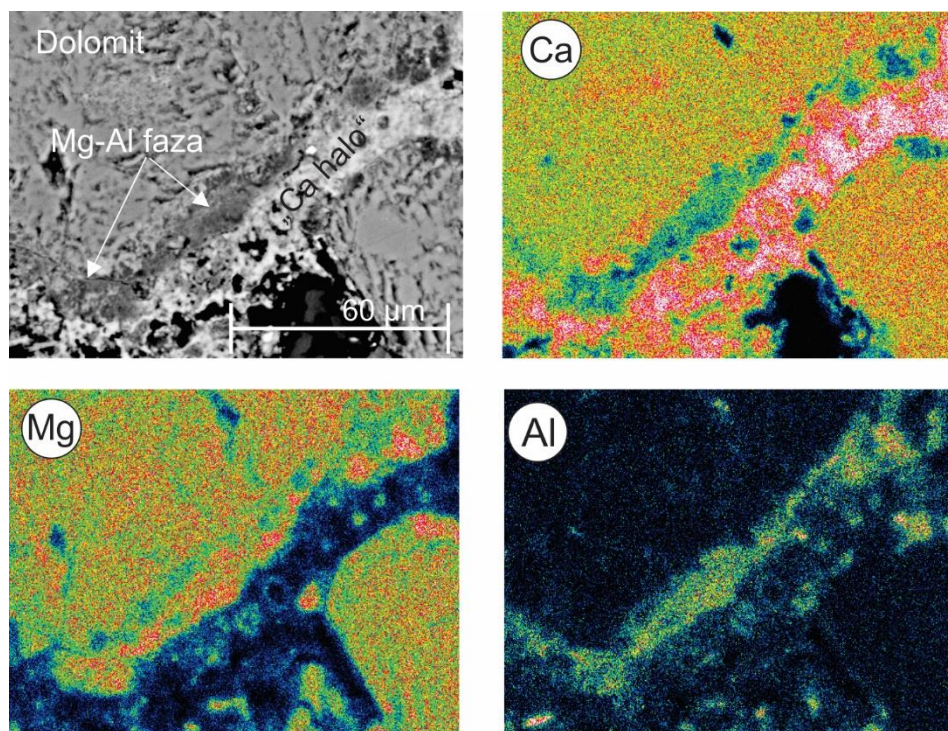


Slika 3: Terensko delo in jemanje vzorcev na objektih (ŽI 3 R) v okolici Žiri.

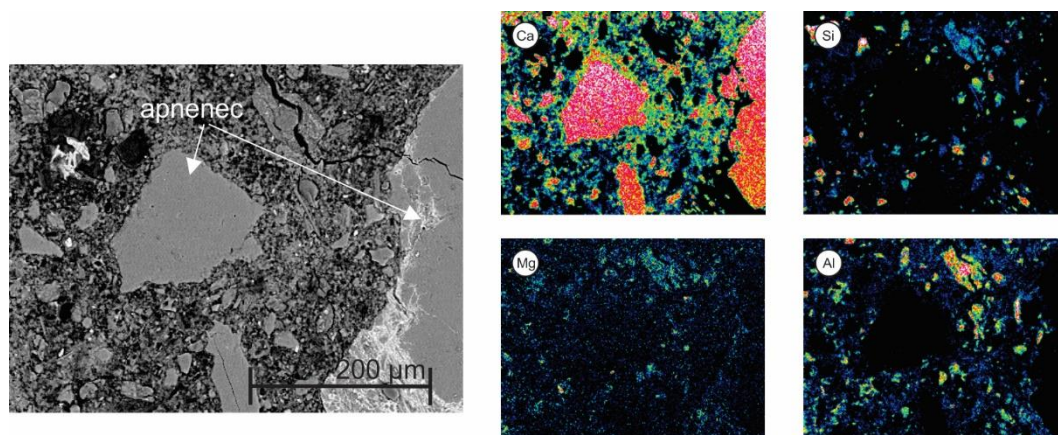


Slika 4: Objekti Rupnikove linije, iz katerih so bili odvzeti vzorci.

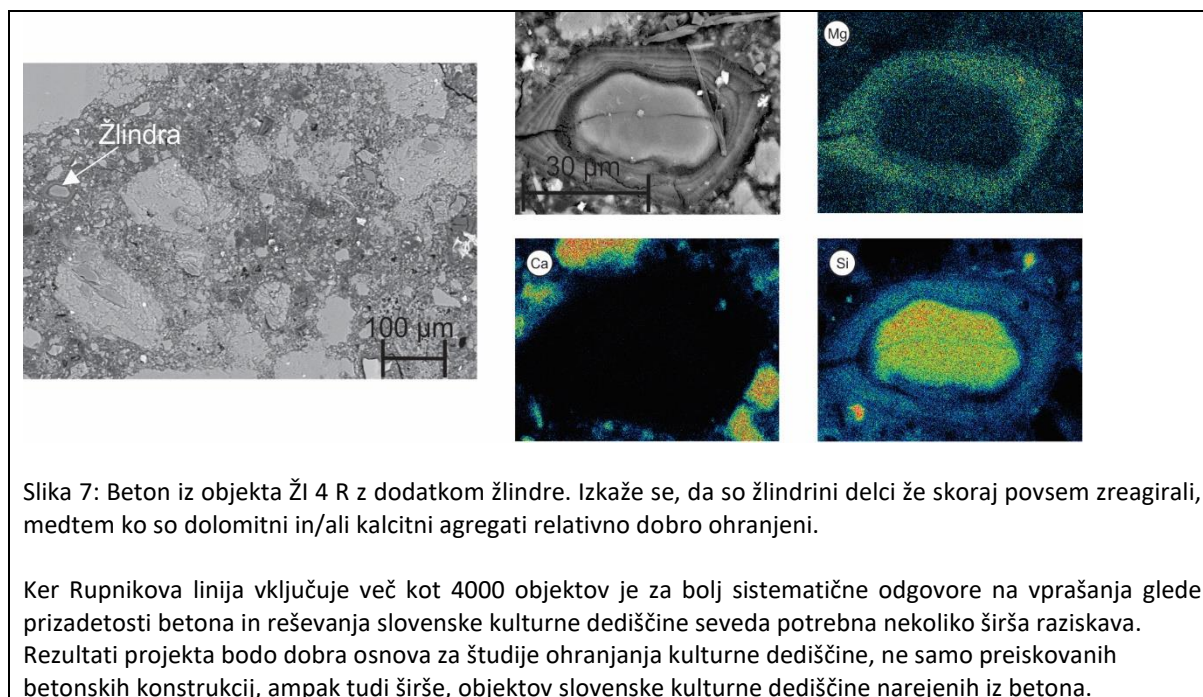
4. Opredelili smo najverjetnejši vir cementa za gradnjo objektov Rupnikove linije. Kot vir cementa se kot edina verjetna rešitev ponuja cementarna Trbovlje (danes cementarna Lafarge). V tistem času je namreč bilo logistično najenostvaneje cement za gradnjo zagotoviti prav iz tega vira. Potencialni vir bi lahko bila tudi cementarna Anhovo, ki pa se je v času gradnje Rupnikove linije nahajala v Italiji in kot takšna najverjetneje ni mogla biti vir cementa.
5. Izvedli smo sistematsko mikrostrukturno in fazno analizo vzorcev betonov iz izbranih objektov Rupnikove linije. Predvsem smo se usmerili k analizi stopnje degradacije betona v smislu prizadetosti uporabljenega agregata. Drugi fokus pa je bil na oceni, ali so pri gradnji Rupnikove linije uporabili t.i. posebne betone - to pomeni betone z različnimi dodatki (najpogosteje dodatek žlindre). Izkaže se, da so pri gradnji Rupnikove linije uporabili več vrst različnih betonov. Mnogo objektov (bunkerji) je namreč narejenih iz več betonskih plasti (največkrat dveh), ki so po sestavi razlikujejo. Vsaj ena plast mnogokrat vsebuje dodatek žlindre (torej so uporabili t.i. posebne betone). Hkrati opažamo, da je agregat (dolomitni ali kalcitni) presenetljivo malo prizadet (slika 5 in 6). To pomeni, da bi po pretečenem času pričakovali predvsem dolomitni agregat, ki bi bil povsem dedolomitiziran. Mnogokrat pa se izkaže, da je stopnja dedolomitizacije nižja od pričakovane. Takšno opažanje si lahko razlagamo predvsem zaradi dejstva, da so bili uporabljeni betoni z dodatkom žlindre (slika 7). Žlindra namreč znižuje pH vrednost betona. Ker pa je visok pH bistven za pospešeno dedolomitizacijo je relativno nizka stopnja dedolomitizacije razumljiva. Nadalje se izkaže, da je zunanji betonski sloj (izpostavljen okolici objekta) navadno precej bolj prizadet kot notranji sloj (sloj na notranji strani bunkerja). Kot splošno oceno bi lahko rekli, da so betoni objektov Rupnikove linije v zadovoljivem stanju in s kemijskega stališča prizadeti manj, kot bi to lahko pričakovali. Tudi s stališča mehanske lastnosti, beton iz preiskovanih objektov Rupnikove linije ohranja relativno visoko trdnost.



Slika 5: Mikrostruktura betona z dolomitnim agregatom iz objekta ŽI 2 A. Izkaže se, da je dolomit bil podvržen dedolomitizaciji, vendar bi glede na pretečeno časovno obdobje pričakovali, da bi bila stopnja dedolomitizacije večja.



Slika 6: Mikrostruktura betona s kalcitnim agregatom iz objekta ŽI 4 R. Izkaže se, da je kalcitni agregat zelo malo prizadet.

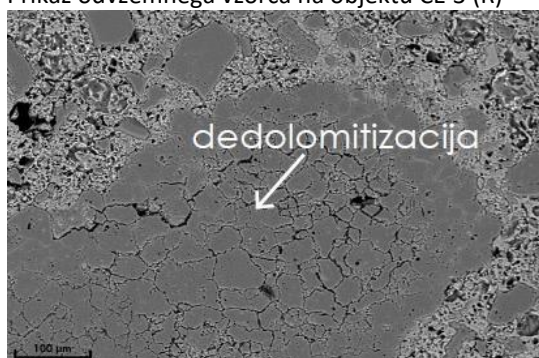


#### 4. Priloge:

- Slikovno gradivo: Priložite vsaj dve sliki npr. sliko končnega produkta, sliko študentov pri delu na projektu, sliko s sestankov ipd. Pri pošiljanju slik bodite pozorni, v kolikor gre za končni produkt, da bo zadoščeno zahtevam glede informiranja in obveščanja (ustrezni logotipi itd.).



Prikaz odvzemnega vzorca na objektu CE 3 (R)



Dedolomitizacija agregata v betonu na objektu CE 3 (R)