

METODE**CELOSTNI PRISTOP K PREUČEVANJU KVARTARNIH EOLSKIH KALKARENITOV ZA POZNAVANJE PRETEKLE SPREMENLJIVOSTI PODNEBJA**

AVTOR

dr. Matej Lipar

Znanstvenoraziskovalni center Slovenske akademije znanosti in umetnosti, Geografski inštitut Antona Melika, Gosposka ulica 13, SI – 1000 Ljubljana, Slovenija; matej.lipar@zrc-sazu.si

DOI: 10.3986/GV90105

UDK: 551.44:551.583.7

COBISS: 1.02

IZVLEČEK

Celostni pristop k preučevanju kvartarnih eolskih kalkarenitov za poznavanje pretekle spremenljivosti podnebja

Članek obravnava teoretski pogled na preučevanje kvartarnih eolskih kalkarenitov in njegov pomen za poznavanje pretekle spremenljivosti podnebja. Znanje o preteklem podnebnju je glavni temelj za modeliranje in napovedovanje prihodnjih podnebnih sprememb, zato je pomembno, da je na regionalni in globalni ravni čim bolj kvalitetno ter zanesljivo. Osredotočanje zgolj na en pokazatelj podnebja pomeni tveganje pri interpretaciji, saj se ta neposredno ne navezuje na ostale naravne pokazatelje v isti regiji ali pa ponuja zgolj omejen časovni okvir preteklega podnebja. Celostni pristop raziskovanja podnebnih pokazateljev eolskih kalkarenitov ponuja časovno neprekinjeno informacijo podatkov, ki s kombinacijo različnih metod poveča zanesljivost in kvaliteto znanja o pretekli spremenljivosti podnebja.

KLJUČNE BESEDE

kras, eolski kalkareniti, paleopodnebje, podnebje, metodologija

ABSTRACT

A combined approach to the study of Quaternary aeolian calcarenites for understanding the palaeoclimate

The paper deals with a theoretical view point of studying Quaternary aeolian calcarenites and its importance for knowledge of the past climate. Understanding palaeoclimate is fundamental for climate modelling and predicting future climatic changes, thus it needs to be complete, of a good quality and reliable on regional and global scales. Focussing only on one palaeoclimatic indicator brings risk with interpreting due to the lack of connective processes of the same region, or it is limited only to one limited time-frame. A combined approach to the study of palaeoclimatic indicators of aeolian calcarenites offers continual information of past climate, which, in combination with several methods, improves reliability and quality of the knowledge of the past climate.

KEY WORDS

karst, aeolian calcarenites, palaeoclimate, climate, methodology

Uredništvo je prispevek prejelo 12. aprila. 2018.

1 Uvod

Poznavanje pretekle spremenljivosti podnebja je pomembno za razumevanje razvoja trenutnih podnebnih sprememb in napovedovanje prihodnjih. Večina znanja o preteklem podnebnju in okolju v kvartarju (geološka doba, ki zajema zadnjih 2,58 milijonov let) temelji na globokomorskih sedimentih (na primer Thunell, Williams in Kennett 1977; Stokes s sodelavci 2003), ledu (na primer Jouzel s sodelavci 2007; Lemieux-Dudon s sodelavci 2010) in sigi (na primer Gascoyne 1992; Hellstrom in McCulloch 2000), dopolnjeno z modeliranjem in raziskavami drugih naravnih pojavov (na primer Marković s sodelavci 2014). Z vidika razumevanja preteklega podnebja so pomembne tudi sprijete obalne karbonatne sipine – eolski kalkareniti (izraz kalkarenit je uporabljen po definiciji v Geološkem terminološkem slovarju (Pavšič 2006) kot pretežno klastična karbonatna kamnina z velikosti zrn od 0,063 do 2 mm), ki hkrati hranijo podnebne podatke kopnega in morja (na primer Murray-Wallace s sodelavci 2010; Bateman s sodelavci 2011; Lomax, Hilgers in Radtke 2011).

Kvartarni eolski kalkareniti se pojavljajo na obalnih območjih po vsem svetu, v različnih podnebnih razmerah (Brooke 2001). Večinoma naj bi bil nanos karbonatnega sedimenta najaktivnejši ob visoki gladini morja, torej v času interglacialov oziroma medledenih dobah (Hearty in Kindler 1997; Murray-Wallace s sodelavci 2001), datacije sedimenta pa so potrdile nanose karbonata tudi v času glacialov oziroma ledenih dobah ter vmesnih obdobjih med glaciali in interglaciali (Price, Brooke in Woodroffe 2001; Brooke s sodelavci 2014). Sediment je večinoma grajen iz kalcijevega karbonata in zato podvržen topljenju. Za kraške pokrajine je značilno raztapljanje kamnine in podzemni pretok vode, kar je hkrati močno povezano s podnebjem (Ford in Williams 2007).

Današnje podnebje spremljajo različne ustanove (v Sloveniji na primer Agencija Republike Slovenije za okolje, kjer začetek najdaljšega niza meritev sega v leto 1850; Bertalanč s sodelavci 2010), na podlagi česar je mogoče slediti določenim podnebnim trendom (na primer Kovačič 2016; Tošič s sodelavci 2016; Hrvatin in Zorn 2017a; 2017b; Urban 2017; Čanjevac in Orešič 2018, Gavrilov s sodelavci 2018). Takšni neposredni podatki pa zagotavljajo dobro poznavanje spremenljivosti podnebja zgolj za približno zadnjih 150 let. Ker pa je za modeliranje podnebja pomembno tudi znanje o še starejšem podnebnju, predvsem o prehodih med glaciali in interglaciali ter starejšimi interglaciali, ko je bila temperatura še toplejša od današnje (Hoffman s sodelavci 2017), je nujno preučevanje podnebnih pokazateljev, med katere sodi tudi kras eolskih kalkarenitov. Številne raziskave se že osredotočajo na posamezne komponente krasa kot arhiva deset, tisoč in celo več milijonov let starih podnebnih podatkov (na primer Wright 1988; Ayliffe s sodelavci 1998; Kenny 2010; Lipar in Ferk 2015; Lipar in Webb 2015), kras, razvit na eolskih kalkarenitih, pa ima topogledno velik potencial (na primer Lipar in Webb 2014; 2015; Lipar s sodelavci 2015; 2017) in ponuja neposreden ter časovno neprekinjen vpogled v spremenljivost preteklega podnebja in njegovih posledic.

Namen članka, ki metodološko sloni na pregledu obstoječe literature, je prikaz uporabnosti celostnega preučevanja kraških pokrajin na eolskih kalkarenitih, s kombiniranjem različnih komponent kot pokazateljev preteklega podnebja.

2 Kakovost in izvirnost preučevanja eolskih kalkarenitov

Preučevanje eolskih kalkarenitov je pomembno, ker nam ponuja številne edinstvene pokazatelje preteklega podnebja v glacialih, interglacialih in vmesnih obdobjih, ki jih ni mogoče preučevati drugod. S tem doprinesemo k razumevanju pretekle spremenljivosti podnebja, predvsem padavin, temperatur in vetra na regionalni in globalni ravni, saj so trenutni podatki o preteklem podnebnju še vedno pomanjkljivi ali celo nasprotujoči.

Inovativni pristop, ki je kombinacija različnih medsebojno nepovezanih pokazateljev preteklega podnebja, močno izboljša kakovost interpretacije preteklega podnebja in ponuja neposreden vpogled v vsak posamezen glacial in interglacial ter s tem izboljša zanesljivost modeliranja podnebja. Takšen pristop: (1) izboljša znanje o vmesnih obdobjih med glaciali in interglaciali, (2) poveča zanesljivost posamez-

nega pokazatelja s primerjavo in združevanjem drugih pokazateljev ter (3) izboljša razumevanje vsakega glaciala in interglaciala posebej (na primer Lipar s sodelavci 2017).

Izvirni celostni pristop s kombinacijo inovativnih tehnik podpira znanost na najvišji ravni, ustvarja nadaljnje možnosti raziskav preteklega podnebja ter povezuje različne veje znanosti, ki se skupno osredotočajo na kraške in obalne pokrajine.

3 Vsebinska zasnova in opravljanje raziskav

3.1 Cilji

Preučevanje temelji na predpostavki, da so obalne karbonatne sipine (eolski kalkareniti) in v njih razvite kraške oblike rezultat gradnikov (sedimentacija, litifikacija, diagenaza) in erozijskih procesov (erozija, korozija), ki so odvisni od podnebja (padavine, temperature, veter).

Osnovni cilji preučevanja so:

- na preučevanem območju ugotoviti značilnosti karbonatnih sipin in geomorfoloških pojavov (z namenom ustvarjanja baze pomembnih okoljskih komponent),
- ugotoviti način nastanka posameznih reliefnih oblik (pri čemer dobimo gradnike in erozijske procese),
- ugotoviti vzrok nastanka posameznih reliefnih oblik (pri čemer spoznamo posledice gradnikov in erozijskih procesov, ki reagirajo s podnebjem; torej, kakšno podnebje je moralo biti, da so gradniki in procesi lahko bili aktivni),
- ugotoviti čas njihovega nastanka (z namenom ugotovitve časa posameznih dogodkov in posledično spoznanja, v katerem obdobju je bilo določeno podnebje),
- ugotoviti distribucijo in pojavljanje vseh zgoraj naštetih komponent na območjih, ki so si med seboj oddaljena, vendar ležijo v istem podnebnem pasu (pri čemer ugotovimo, ali je imel podnebni pojav regionalne ali globalne razsežnosti).

3.2 Raziskovalna območja

Za dosego ciljev je treba pazljivo izbrati raziskovalno območje, ki bo predstavljalo študijo primera. Predvsem je pomembno, da območja ležijo na podobni geografski širini in so med seboj primerljiva, ter da niso preveč degradirana (antropogeni vplivi).

Fokus raziskav na izbranih območjih lahko razdelimo na štiri večje komponente (pokazatelje preteklega podnebja; slika 1):

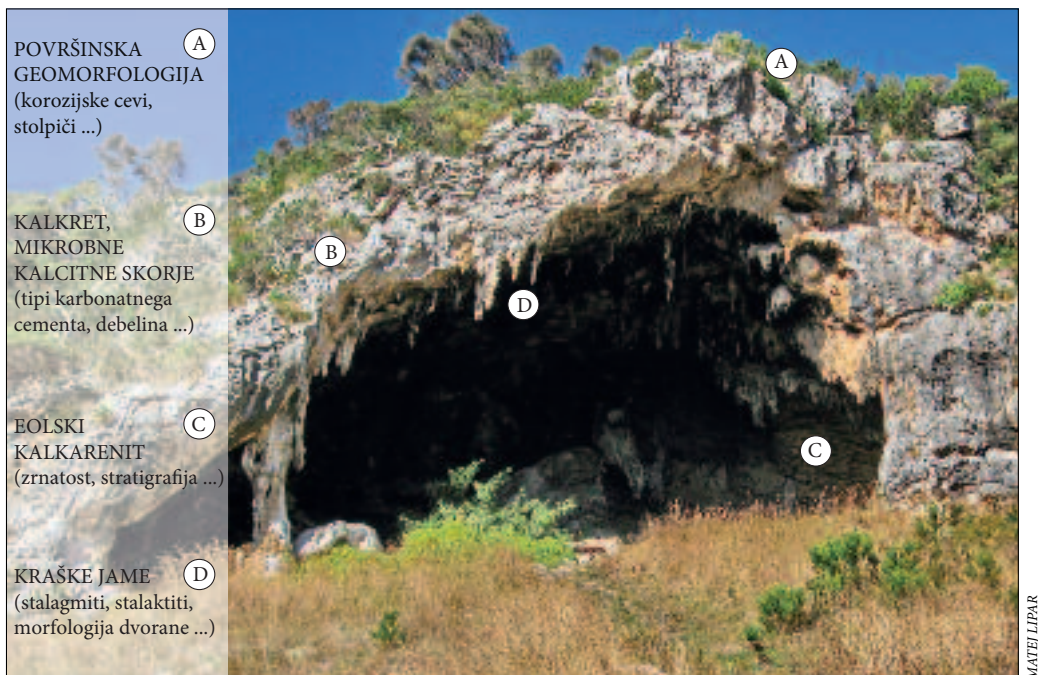
- Stratigrafija in geološke značilnosti eolskih kalkarenitov (na primer mineralogija, velikost zrn, vezi-vo, sedimentacijske strukture): Dobimo podatke o času karbonatne produkcije v morju in spreminjanje obalne pokrajine, vključno z interakcijo vodne gladine, podnebja, obalne morfologije in tektonike (na primer Hearty in O'Leary 2008; Mylroie 2008).
- Kalkret in mikrobnе kalcitne skorje na površju eolskih kalkarenitov: Tovrstni sedimenti so bili že uporabljani kot indikatorji delno sušnih in sušnih podnebij (na primer Alonso-Zarza 2003; Achyuthan s sodelavci 2007), pri čemer analize stabilnih izotopov kisika in ogljika predstavljajo pomembno orodje pri interpretaciji temperature in količine padavin v preteklosti (Cerling in Quade 1993; Dworkin, Nordt in Atchey 2005; Achyuthan s sodelavci 2012).
- Površinski kraški relief: Kraški relief temelji na količini in kemijski sestavi dežja, ki ga mora biti dovolj, da se kras lahko razvije (Ford in Williams 2007), in se zato lahko uporabi kot pokazatelj bolj deževnega podnebja (Wright 1988). Preučevanje eolskih kalkarenitov (Lipar in Webb 2015; Lipar s sodelavci 2017) je pokazalo, da se količina in sezonskost padavin odražata v različnih kraških oblikah oziroma kraški morfologiji; morfologija korozijskih cevi (Lipar 2016) je na primer posledica tako podnebnih dogodkov kot geoloških značilnosti kamnine in časa njihove izpostavljenosti.

- Kraške jame: Jame predstavljajo arhiv podatkov pretekle spremenljivosti podnebja, ki so zaščiteni pred današnjo površinsko erozijo (na primer Bar-Matthews s sodelavci 1999; Sasowsky in Mylroie 2007). Morfologija jamskih rogov in korozijske oblike so pokazatelji preteklih hidroloških razmer. Stabilni izotopi kisika in ogljika iz sige (na primer stalaktitov in stalagmitov) so najpomembnejše orodje za interpretacijo preteklih padavin in temperatur (podobno kot kalkreti, vendar je nastanek sige bolj intenziven med bolj deževnimi obdobji, takrat pa kalkret navadno ne nastaja; kombinacija obeh tako ponuja neprekinjeno informacijo podatkov pretekle spremenljivosti podnebja).

3.3 Metodološki pristop

Pri preučevanju krasi eolskih kalkarenitov obstaja širok izbor različnih metod oziroma analiz. Priporočeno je, da jih uporabimo več, saj se nekatere med seboj prepletajo oziroma dopolnjujejo, pri čemer dobimo kakovostnejše in zanesljivejše rezultate. Metodologija dela je lahko sledeča:

- Terensko delo: Ta predstavlja najpomembnejši del raziskovanja ter obsega različne naloge in pristope: dokumentacija izpostavljenih kamnin in reliefnih oblik, kartiranje, uporaba GPS, morfometrija in odvzem vzorcev. Na podlagi pravilne odločitve odvzema vzorcev, so odvisne vse nadaljnje analize.
- Geografski informacijski sistem (GIS) in prostorske analize: Podatke, kot so digitalni model reliefa, satelitske slike in topografski zemljevidi, se obdeluje in analizira z uporabo različnih računalniških programov (na primer *Global Mapper*, *ESRI ArcGIS*), pri čemer se pridobi prostorske informacije pojavljanja eolskih kalkarenitov. To nam pomaga pri ugotavljanju, kje je potrebno terensko delo, se analizira reliktnne obalne oblike, s čimer dobimo smer vetra in delovanje valov, ter ne nazadnje pri slikovni predstavitvi končane raziskave.



Slika 1: Jama v izdanku eolskega kalkarenita, kjer se na enem mestu nahajajo štiri pomembne komponente, ki se uporabljajo kot pokazatelj preteklega podnebja.

- Rentgenska praškovna difrakcija (XRD) in rentgenska fluorescenčna spektrometrija (XRF): S tema analizama se ugotovi mineraloško in kemično sestavo geoloških vzorcev. To nam pomaga pri ugotavljanju drugotnega alohtonega gradiva/peska v prvotnem morskem gradivu/pesku, stopnjo diageneze kamnine in tip karbonata, kar vse skupaj predstavlja znanje, nujno za nadaljnje analize.
- Analiza geoloških zbruskov (petrografske in vrstični elektronski mikroskop): Ta metoda se uporablja za opazovanje mikrostrukture ter mineralogije vzorcev kamnin in sedimenta, na primer določanje organizmov, ki gradijo karbonat, poroznost, velikost zrn in medsebojno povezanost mineralov.
- Granulometrična analiza: Ugotovitev količine in razmerja med nekarbonatnimi zrni v vzorcu nam pomaga prepoznati eolski prispevek kontinentalnega gradiva (na primer gline), kar je še posebej pomembno za paleo-prsti.
- Stabilni izotopi ogljika ($\delta^{13}\text{C}$) in kisika ($\delta^{18}\text{O}$): S to analizo pridobimo podatke, ki se jih uporablja pri interpretaciji pretekle spremenljivosti podnebja, predvsem količine dežja (uporaba ogljika) in temperature (uporaba kisika). Prav tako se lahko dodatno uporabi za preverjanje datacij kamnin (na primer, temperature so navadno nižje, če je bil nastanek kamnin datiran kot rezultat ledene dobe).
- Izotopi kisika ($\delta^{18}\text{O}$) ujete vode v karbonatnem gradivu: S to metodo, močno povezano z zgornjo, pridobimo podatke o vodi, ki je iste starosti kot karbonatni mineral, kar potrebujemo za natančnejšo interpretacijo preteklega podnebja.
- »Spojeni« izotopi (angl. *clumped isotopes*): S to metodo preučujemo, kako so določeni izotopi ogljika in kisika razporejeni v mreži karbonatnega kristala. Ta pristop se uporablja kot kvantitativen paleo-termometer in ne potrebuje dodatnega podatka o izotopih vode, iz katere je kristal zrasel, kar pomeni, da je to ena izmed najbolj neposrednih tehnik za ugotavljanje preteklih temperatur.
- Datacije sedimenta in kamnin: Datacije nam dajo absolutno starost kamnine ali sedimenta, na podlagi katerega lahko obnovimo podnebna dejstva. Primerni tehniki sta na primer optična stimulirana luminiscenca (OSL), ki nam pove čas sedimentacije kamnine ter koncentracija razmerja urana in torija (U/Th), ki nam pove čas sprijetja. Izbor je odvisen od značilnosti kamnine.

4 Pomen in potencialni vpliv rezultatov: doprinos k znanosti in splošna korist

Podatki, ki jih pridobimo na podlagi zgoraj naštetih metod nam pomagajo razumeti okoljske spremembe v daljšem časovnem obdobju. S tem so pomemben vir za ugotavljanje spremenljivosti podnebja in omogočajo natančnejše modeliranje okoljskih sprememb ter posledično prilagoditev moderne družbe (slika 2).

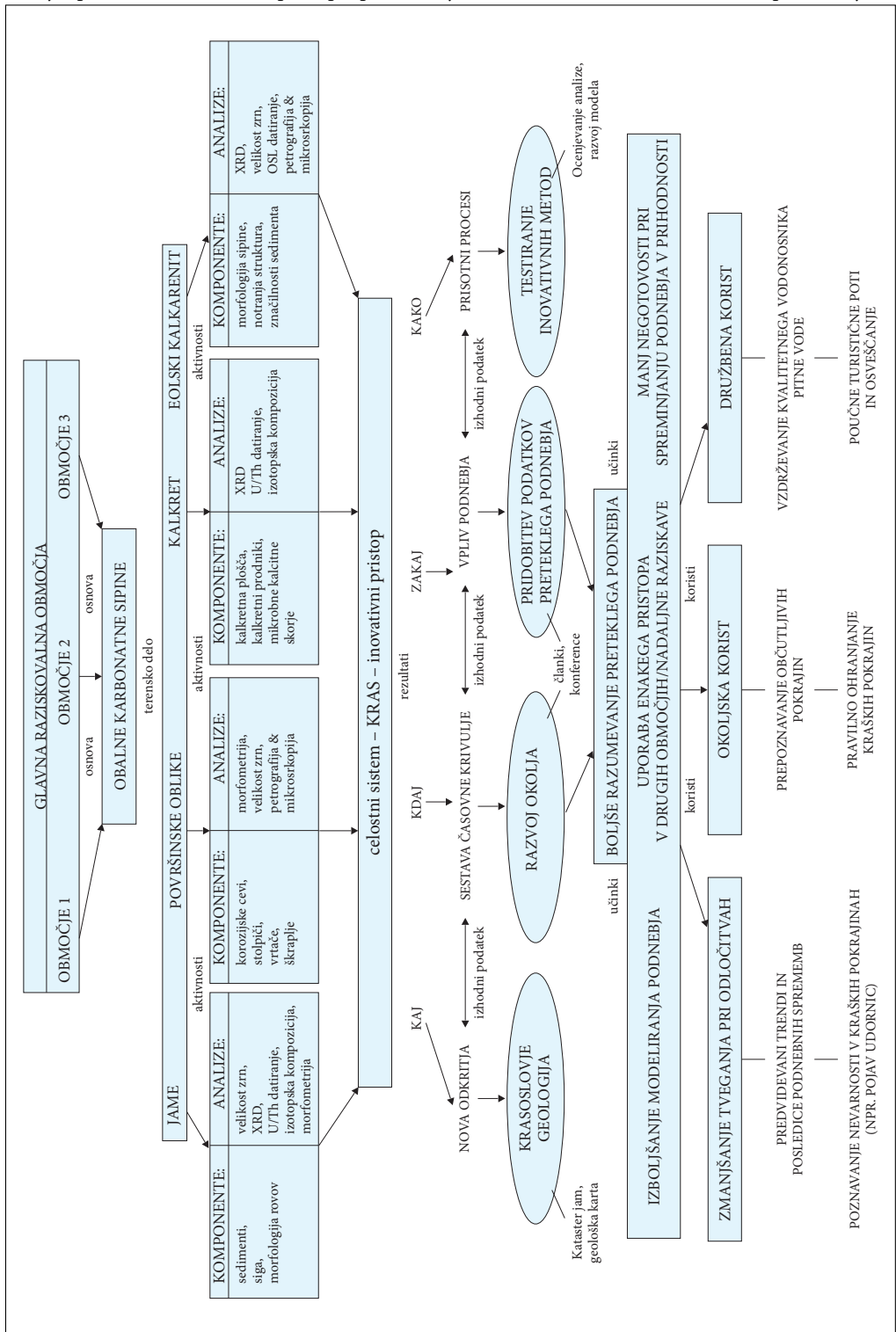
Zbrani podatki pripomorejo k razumevanju razvoja pokrajine, okoljske ranljivosti in podnebnih sprememb, ki so nepogrešljivi elementi za ohranjanje narave in načrtovanje smernic. Eden največjih prihodnjih izzivov sodobne družbe bo/je prilagajanje na podnebne spremembe, katerih napovedi temeljijo na modeliranju. Toda modeliranje podnebnih sprememb je še vedno nezanesljivo in pogosto so rezultati nasprotujoči. Uporaba znanja pridobljenega s preučevanjem krasi eolskih kalkarenitov, bo prispevala k zmanjšanju tveganja pri tovrstnih napovedih.

S celostnim pristopom takšna raziskava pripomore k:

- boljšemu znanju o pokazateljih pretekle spremenljivosti podnebja,
- zaobjemu različnih znanosti (na primer geokemije, geologije, geomorfologije, klimatologije) v enovito raziskavo, z namenom pridobiti zanesljive in natančne rezultate,
- inovativnim potem pri preučevanju preteklega podnebja in eolskih kalkarenitov kot njegovih pokazateljev,

Slika 2: Miselni vzorec celotne strukture preučevanja kvartarnih eolskih kalkarenitov in njegov pomen.

► str. 90



- povezovanju z drugimi vedami in poveča pomen geografije, ki združuje in kombinira različne medsebojno neodvisne raziskovalne metode,
- boljši povezljivosti v znanosti in učnih programih.
Rezultati raziskave so prav tako pomembni kot znanstveni dosežki v:
 - geologiji in stratigrafiji: detajlno analiziranje kamnin bo prineslo nove geološke in stratigrafske podatke, ki do sedaj še niso bili znani (na primer novo odkrite stratigrafske plasti);
 - krasoslovju in geomorfologiji: odnos med podnebnimi in drugimi dejavniki, ki imajo vpliv na sedimentacijo eolskih kalkarenitov in njihovo topografijo, potrebuje osnovno teoretsko znanje krasoslovja in geomorfologije;
 - speleologiji: raziskave na eolskih kalkarenitih so močno povezane z jamami, ki hranijo podatke tako o površinskih kot podzemeljskih naravnih procesih;
 - georaznolikosti: pokrajine eolskih kalkarenitov imajo tudi estetsko vrednost in nekatere so globalno turistično poznane (na primer Narodni park Nambung v Avstraliji, Narodni park Gargano v Italiji); takšna raziskava bo omogočila interpretacijo pokrajinskih elementov turistom in sodelovanje znanstvene sfere pri podajanju znanja;
 - naravovarstvu: kras je občutljiv sistem s svojstveno biološko raznolikostjo (Breg Valjavec, Zorn in Čarni 2018); zaradi vse večjega pritiska na kraško pokrajino je pomembno, da poznamo in razumemo njene značilnosti in procese, s čimer jo lahko zaščitimo pred degradacijskimi procesi; kraški vodonošniki so pogosto vir pitne vode, ki jo zaradi poroznosti apnenca slabo filtrirana; ne smemo pa spregledati tudi drugih faktorjev, na primer erozijo prsti, udora jam;
 - arheologiji: arheološka najdišča so pogosto tudi v jamah eolskih kalkarenitov, pri čemer preučevanje sedimentov poda značilnosti okolja, iz katerega izhajajo arheološki ostanki;
 - drugih vedah: uporaba metod, ki so navadno uporabljene v drugačnem kontekstu, pripomore k boljšemu razumevanju metod samih in njenih aplikacij za nadaljnje raziskave. Na primer, uporaba spojenih izotopov pri kalkretilih; zanesljivost OSL datiranja kremenca ali glinenca pri eolskih kalkarenitih.
Raziskava kvartarnih eolskih kalkarenitov je splošno koristna iz treh vidikov:
 - Okoljski: kraške pokrajine so že dalj časa priljubljene med raziskovalci, predvsem iz geoznanstvenega vidika. Omenjena raziskava zaobjame različne pristope in poglede (geomorfološki, hidrološki, geološki, paleontološki) in tako pripomore k vsesplošnemu razumevanju pokrajine. Uporaba novih spoznanj bo omogočila tudi boljše gospodarstvo ter naravovarstveno aktivnost različnih ustanov.
 - Kulturni: nova znanstvena spoznanja pripomorejo k zaščiti in predstavitvi naravnih vrednot.
 - Zmanjševanje tveganja pri dolgoročnem načrtovanju: zavedanje o nevarnostih in posledicah podnebnih sprememb v kraških pokrajinah, bo zaščitilo gospodarstvo in izboljšalo delovanje naravovarstvenih ustanov.

5 Uporaba podobnega pristopa v Sloveniji

V Sloveniji kvartarnih eolskih kalkarenitov, v katerih bi bil razvit kras, ni (Pleničar, Ogorelec in Novak 2009), vendar se v članku opisani celostni pristop lahko uporabi pri preučevanju kvartarnih kalciruditov (klastična kamnina, v kateri prevladujejo zrna nad 2 mm in je pretežno karbonatna; Pavšič 2006). V Sloveniji je to pretežno sproti karbonatni rečno-ledeniški prod (konglomerat). Nanosi pretežno karbonatnih pleistocenskih sedimentov, ki danes tvorijo konglomerat, so značilni za Ljubljansko kotlino, porečje srednje in spodnje Savske doline, Soško dolino in porečje Savinje (Komac in Zorn 2007; Komac 2009). Ti karbonatni konglomerati prav tako ponujajo možnosti uporabe širokega izbora sorodnih metod oziroma analiz za njihovo preučevanje. Kar nekaj dosedanjih raziskav se je že osredotočilo na posamezne komponente karbonatnih konglomeratov, kot so zakrasedanje in speleogeneza (Žlebnič 1978; Gabrovšek 2005; Lipar in Ferk 2011; Ferk in Lipar 2012) ter datacije nanesenega gradiva (Mihevc s sodelavci 2015; Čeru, Šegina in Gosar 2017), vendar je njihov potencial za raziskovanje pretekle spremenljivosti podnebja

še vedno velik in iz mnogih vidikov še ne preučen. V tem vidimo uporabnost opisanega pristopa, ki lahko ponudi temelj za njihovo celostno preučitev.

Zahvala: Avtor se zahvaljuje anonimnima recenzentoma za konstruktivne komentarje ter Robertu Susacu za pregled angleškega povzetka. Raziskavo sta finančno podprla Ministrstvo za izobraževanje, znanost in šport (operacija C3330-17-529010 z naslovom »Raziskovalci-2.0-ZRC-SAZU-529010«) ter Evropska unija iz Evropskega sklada za regionalni razvoj. Operacija se izvaja v okviru Operativnega programa za izvajanje Evropske kohezijske politike v obdobju 2014–2020.

6 Viri in literatura

- Achyuthan, H., Quade, J., Roe, L., Plazcek, C. 2007: Stable isotopic composition of pedogenic carbonates from the eastern margin of the Thar Desert, Rajasthan, India. *Quaternary International* 162-163. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2006.10.031>
- Achyuthan, H., Shankar, N., Braidia, M., Ahmad, S. M. 2012: Geochemistry of calcretes (calcic palaeosols and hardpan), Coimbatore, Southern India: Formation in Paleoenvironment. *Quaternary International* 265. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2012.01.037>
- Alonso-Zarza, A. M. 2003: Palaeoenvironmental significance of palustrine carbonates and calcretes in the geological record. *Earth-Science Reviews* 60, 3-4. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(02\)00106-X](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(02)00106-X)
- Ayliffe, L. K., Marianelli, P. C., Moriarty, K. C., Wells, R. T., McCulloch, M. T., Mortimer, G. E. 1998: 500 ka precipitation record from southeastern Australia: Evidence for interglacial relative aridity. *Geology* 26-2. DOI: [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1998\)026<0147:KPRFSA>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1998)026<0147:KPRFSA>2.3.CO;2)
- Bateman, M. D., Carr, A. S., Dunajko, A. C., Holmes, P. J., Roberts, D. L., McLaren, S., Bryant, R. G., Marker, M. E., Murray-Wallace, C. V. 2011: The evolution of coastal barrier systems: a case study of the Middle – Late Pleistocene Wilderness barriers, South Africa. *Quaternary Science Reviews* 30, 1-2. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2010.10.003>
- Bar-Matthews, M., Ayalon, A., Kaufman, A., Wasserburg, G. J. 1999: The Eastern Mediterranean paleoclimate as a reflection of regional events: Soreq cave, Israel. *Earth and Planetary Science Letters* 166, 1-2. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(98\)00275-1](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(98)00275-1)
- Bertalanč, R., Demšar, M., Dolinar, M., Dvoršek, D., Nadbath, M., Pavčič, B., Roethel-Kovač, M., Vertačnik, G., Vičar, Z. 2010: Spremenljivost podnebja v Sloveniji. Ljubljana.
- Breg Valjavec, M., Zorn, M., Čarni, A. 2018: Human-induced land degradation and biodiversity of Classical Karst landscape: on the example of enclosed karst depressions (dolines). *Land Degradation and Development* 29-10. DOI: <https://doi.org/10.1002/ldr.3116>
- Brooke, B. P. 2001: The distribution of carbonate eolianite. *Earth-Science Reviews* 55, 1-2. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(01\)00054-X](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(01)00054-X)
- Brooke, B. P., Olley, J. M., Pietsch, T., Playford, P. E., Haines, P. W., Murray-Wallace, C. V., Woodroffe, C. D. 2014: Chronology of Quaternary coastal aeolianite deposition and the drowned shorelines of southwestern Western Australia – a reappraisal. *Quaternary Science Reviews* 93. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2014.04.007>
- Cerling, T. E., Quade, J. 1993: Stable carbon and oxygen isotopes in soil carbonates. *Climate Change in Continental Isotopic Records*, American Geophysical Union Geophysical Monograph Series 78. Washington, D. C. DOI: <https://doi.org/10.1029/GM078p0217>
- Čanjevac, I., Orešić, D. 2018: Changes in discharge regimes of rivers in Croatia. *Acta geographica Slovenica* 58-2. DOI: <https://doi.org/10.3986/AGS.2004>
- Čeru, T., Šegina, E., Gosar, A. 2017: Geomorphological dating of Pleistocene conglomerates in central Slovenia based on spatial analyses of dolines using LiDAR and ground penetrating radar. *Remote Sensing* 9-12. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs9121213>

- Dworkin, S. I., Nordt, L., Atchey, S. 2005: Determining terrestrial palaeotemperatures using the oxygen isotopic composition of pedogenic carbonates. *Earth and Planetary Science Letters* 237, 1-2. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.06.054>
- Ferk, M., Lipar, M. 2012: Eogenetic caves in Pleistocene carbonate conglomerate in Slovenia. *Acta geographica Slovenica* 52-1. DOI: <https://doi.org/10.3986/AGS52101>
- Ford, D., Williams, P. 2007: *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. Chichester. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118684986>
- Gabrovšek, F. 2005: Jame v konglomeratu: primer Udin Boršta, Slovenija. *Acta Carsologica* 34-2. DOI: <https://doi.org/10.3986/ac.v34i2.274>
- Gascoyne, M. 1992: Palaeoclimate determination from cave calcite deposits. *Quaternary Science Reviews* 11-6. DOI: [https://doi.org/10.1016/0277-3791\(92\)90074-I](https://doi.org/10.1016/0277-3791(92)90074-I)
- Gavrilov, M. B., Marković, S. B., Janc, N., Nikolić, M., Valjarević, A., Komac, B., Zorn, M., Punišić, M., Bačević, N. 2018: Assessing average annual air temperature trends using the Mann-Kendall test in Kosovo. *Acta geographica Slovenica* 58-1. DOI: <https://doi.org/10.3986/AGS.1309>
- Hearty, P. J., Kindler, P. 1997: The stratigraphy and surficial geology of New Providence and surrounding islands, Bahamas. *Journal of Coastal Research* 13-3.
- Hearty, P. J., O'Leary, M. J. 2008: Carbonate aeolianites, quartz sands, and Quaternary sea-level cycles, Western Australia: A chronostratigraphic approach. *Quaternary Geochronology* 3, 1-2. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2007.10.001>
- Hellstrom, J. C., McCulloch, M. T. 2000: Multi-proxy constraints on the climatic significance of trace element records from a New Zealand speleothem. *Earth and Planetary Science Letters* 179-2. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(00\)00115-1](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(00)00115-1)
- Hoffman, J. S., Clark, P. U., Parnell, A. C., He, F. 2017: Regional in global sea-surface temperatures during the last interglaciation. *Science* 355-6322. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.aai8464>
- Hrvatín, M., Zorn, M. 2017a: Trendi temperatur in padavin ter trendi pretokov rek v Idrijskem hribovju. *Geografski vestnik* 89-1. DOI: <https://doi.org/10.3986/GV89101>
- Hrvatín, M., Zorn, M. 2017b: Trendi pretokov rek v slovenskih Alpah med letoma 1961 in 2010. *Geografski vestnik* 89-2. DOI: <https://doi.org/10.3986/GV89201>
- Jouzel, J., Masson-Delmotte, V., Cattani, O., Dreyfus, G., Falourd, S., Hoffmann, G., Minster, B., Nouet, J., Barnola, J. M., Chappellaz, J., Fischer, H., Gallet, J. C., Johnsen, S., Leuenberger, M., Loulergue, L., Luethi, D., Oerter, H., Parrenin, F., Raisbeck, G., Raynaud, D., Schilt, A., Schwander, J., Selmo, E., Souchez, R., Spahni, R., Stauffer, B., Steffensen, J. P., Stenni, B., Stocker, T. F., Tison, J. L., Werner, M., Wolff, E. W. 2007: Orbital and millennial Antarctic climate variability over the past 800,000 years. *Science* 317-5839. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1141038>
- Kenny, R. 2010: Continental palaeoclimate estimates from the late Mississippian Redwall karst event: northern and north-central Arizona (USA). *Carbonates and Evaporites* 25-297. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13146-010-0033-2>
- Komac, B. 2009: Social memory and geographical memory of natural disasters. *Acta geographica Slovenica* 49-1. DOI: <https://doi.org/10.3986/AGS49107>
- Komac, B., Zorn, M. 2007: Pobočni procesi in človek. *Geografija Slovenije* 15. Ljubljana.
- Kovačič, G. 2016: Trendi pretokov rek jadranskega povodja v Sloveniji brez Posočja. *Geografski vestnik* 88-2. DOI: <https://doi.org/10.3986/GV88201>
- Lemieux-Dudon, B., Blayo, E., Petit, J. R., Waelbroeck, C., Svensson, A., Ritz, C., Barnola, J. M., Narcisi, B. M., Parrenin, F. 2010: Consistent dating for Antarctic and Greenland ice cores. *Quaternary Science Reviews* 29, 1-2. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2009.11.010>
- Lipar, M. 2016: Prispevek k slovenski terminologiji krasa in kraških oblik na eogenetskih kvartarnih kalkarenitih. *Geografski vestnik* 88-1. DOI: <https://doi.org/10.3986/GV88105>
- Lipar, M., Ferk, M. 2011: Eogenetic caves in conglomerate: an example from Udin Boršt, Slovenia. *International Journal of Speleology* 40-1. DOI: <https://doi.org/10.5038/1827-806X.40.1.7>

- Lipar, M., Ferk, M. 2015: Karst pocket valleys in their implications on Pliocene-Quaternary hydrology in climate: Examples from the Nullarbor Plain, southern Australia. *Earth-Science Reviews* 150. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.07.002>
- Lipar, M., Webb, J. A. 2014: Middle – Late Pleistocene in Holocene chronostratigraphy in depositional history of the Tamala Limestone, Coolesgongup in Safety Bay Sands, Nambung National Park, south-western Western Australia. *The Australian Journal of Earth Sciences* 61-8. DOI: <https://doi.org/10.1080/08120099.2014.966322>
- Lipar, M., Webb, J. A. 2015: The formation of the pinnacle karst in Pleistocene aeolian calcarenites (Tamala Limestone) in southwestern Australia. *Earth-Science Reviews* 140. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.11.007>
- Lipar, M., Webb, J. A., Cupper, M. L., Wang, N. 2017: Aeolianite, calcrete/microbialite and karst in southwestern Australia as indicators of Middle to Late Quaternary palaeoclimates. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 470. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2016.12.019>
- Lipar, M., Webb, J. A., White, S. Q., Grimes, K. G. 2015: The genesis of solution pipes: Evidence from the Middle-Late Pleistocene Bridgewater Formation calcarenite, southeastern Australia. *Geomorphology* 246. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.06.013>
- Lomax, J., Hilgers, A., Radtke, U. 2011: Palaeoenvironmental change recorded in the palaeodunefields of the western Murray Basin, South Australia – New data from single OSL-dating. *Quaternary Science Reviews* 30, 5-6. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2010.12.015>
- Marković, S. B., Ruman, A., Gavrilov, M. B., Stevens, T., Zorn, M., Komac, B., Perko, D. 2014: Modelling of the Aral and Caspian seas drying out influence to climate and environmental changes. *Acta geographica Slovenica* 54-1. DOI: <https://doi.org/10.3986/AGS54304>
- Mihevč, A., Bavec, M., Häuselmann, P., Fiebig, M. 2015: Dating of the Udin Boršt conglomerate terrace and implication for tectonic uplift in the northwestern part of the Ljubljana Basin (Slovenia). *Acta Carsologica* 44-2. DOI: <https://doi.org/10.3986/ac.v44i2.2033>
- Murray-Wallace, C. V., Bourman, R. P., Prescott, J. R., Williams, F., Price, D. M., Belperio, A. P. 2010: Aminostratigraphy and thermoluminescence dating of coastal aeolianites and the later Quaternary history of a failed delta: The River Murray mouth region, South Australia. *Quaternary Geochronology* 5-1. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2009.09.011>
- Murray-Wallace, C. V., Brooke, B. P., Cann, J. H., Belperio, A. P., Bourman, R. P. 2001: Whole-rock aminostratigraphy of the Coorong Coastal Plain, South Australia: towards a 1 million year record of sea-level highstands. *Journal of the Geological Society of London* 158-1. DOI: <https://doi.org/10.1144/jgs.158.1.111>
- Myroie, J. E. 2008: Late Quaternary sea-level position: Evidence from Bahamian carbonate deposition and dissolution cycles. *Quaternary International* 183-1. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2007.06.030>
- Pavšič, J. (ur.) 2006: *Geoloski terminološki slovar*. Ljubljana.
- Pleničar, M., Ogorelec, B., Novak, M. (ur.) 2009: *Geologija Slovenije*. Ljubljana.
- Price, D. M., Brooke, B. P., Woodroffe, C. D. 2001: Thermoluminescence dating of aeolianites from Lord Howe Island and South-West Western Australian. *Quaternary Science Reviews* 20-5. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0277-3791\(00\)00039-1](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(00)00039-1)
- Sasowsky, I. D., Myroie, J. (ur.) 2007: *Studies of Cave Sediments: Physical and Chemical Records of Paleoclimate*. New York. DOI: <https://doi.org/10.1029/2007EO420014>
- Stokes, S., Ingram, S., Aitken, M. J., Sirocko, F., Anderson, R., Leuschner, D. 2003: Alternative chronologies for Late Quaternary (Last Interglacial-Holocene) deep sea sediments via optical dating of silt-sized quartz. *Quaternary Science Reviews* 22, 8-9. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0277-3791\(02\)00243-3](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(02)00243-3)
- Tošič, I., Zorn, M., Ortari, J., Unkašević, M., Gavrilov, M. B., Marković, S. B. 2016: Annual and seasonal variability of precipitation and temperatures in Slovenia from 1961 to 2011. *Atmospheric Research* 168. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.09.014>

- Thunell, R. C., Williams, D. F., Kennett, J. P. 1977: Late Quaternary paleoclimatology, stratigraphy and sapropel history in eastern Mediterranean deep-sea sediments. *Marine Micropaleontology* 2. DOI: [https://doi.org/10.1016/0377-8398\(77\)90018-4](https://doi.org/10.1016/0377-8398(77)90018-4)
- Urban, G. 2017: Air temperature trends at Mount Śnieżka (Polish Sudetes) and solar activity, 1881-2012. *Acta geographica Slovenica* 57-2. DOI: <https://doi.org/10.3986/AGS.837>
- Wright, V. P. 1988: Paleokarsts in paleosols as indicators of paleoclimate in porosity evolution: a case study from the Carboniferous of South Wales. *Paleokarst*. New York. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3748-8_16
- Žlebnik, L. 1978: Kras na konglomeratnih terasah ob Zgornji Savi in njenih pretokih. *Geologija* 21-1.

7 Summary: A combined approach to the study of Quaternary aeolian calcarenites for understanding the palaeoclimate

(translated by the author)

Studying Quaternary aeolian calcarenites can improve palaeoclimate understanding using a unique approach by extracting multiple palaeoclimate indicators from coastal carbonate sediment records and innovative techniques of geo-analyses. Aeolian calcarenites are cemented carbonate dunes (also termed aeolianites), and are characteristic of shorelines in many parts of the world. They have been interpreted as primarily deposited during high sea-level periods with evidence of their deposition also during intermediate and even low sea levels. Scientists increasingly recognise that carbonate coastal sediments (dunes) and their karst preserve some of the best continental and marine Quaternary archives and are consequently important indicators of Quaternary climates.

Aeolianites are mostly or fully comprised of calcium carbonates and therefore prone to solution, which is characteristic of karst landscapes. The defining components of karst landscapes are limestone solution and underground drainage, all strongly related to climate. The analysis of aeolianite karst environments is therefore a direct option for investigating the impacts of climate change and variability on the coastal environment. Namely, how coastal carbonate dunes and their associated features are affected by building agents (deposition, lithification and diagenesis) and erosional agents (physical, chemical and biological weathering); which are driven and dependent on climate (rainfall, temperature and wind).

The general goals of this study are to determine dune characteristics and what features occur in the area (to build a collection of important environmental components); how they were formed (to determine building and erosional agents); why they were formed (to determine response of building and erosional agents to climate, i.e. the effectual climatic conditions); when they were formed (to determine a timeline of events, i.e. in what glacial/interglacial/transitional period does the characteristic climate belong) and the distribution and occurrence of these same elements represented in other areas.

To achieve the goals, various areas designed to test the hypothesis and capture the variation must be targeted. The focus will be on four major components (palaeoclimate indicators): stratigraphy and geological characteristics, calcrete and terrestrial microbialite, surface karst geomorphology, and caves.

Some of the methodology that can be employed include: field work, remote sensing and spatial analysis, X-ray diffraction (XRD) and X-ray fluorescence (XRF), analysis of geological thin-sections, grain size analysis, $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ isotopes of the rock, $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ isotopes of fluid inclusions within calcite, clumped isotopes ($\Delta 47$), optically stimulated luminescence dating (OSL; providing us with the time of deposition) and uranium/thorium dating (U/Th; providing us with the time of cementation).

The study therefore aims to extract and explain long-term environmental changes and to assure robust palaeoclimatic record is available for improved and reliable modelling of environmental changes. That would give the decision makers tools to understand the changes our climate is undergoing and pave the way for future generations survival. The benefits are environmental, cultural and risk reduction in decision making. In addition, the outcomes can provide advanced knowledge for a wide range of sciences: geology and stratigraphy, karstology and geomorphology, speleology, geodiversity, conservation, archaeology.