

Projekt EARTHONE in pilotna ploskev na Krasu: spremljanje prehoda rabe tal, talnih procesov, vegetacije in tokov ogljika v submediteranskem krasu

Nataša Šibanc¹, Gal Oblišar¹, Mitja Ferlan², David Fabjan³,
Konzorcij Projekta Earthone, Tine Grebenc¹

1 Gozdarski inštitut Slovenije, Večna pot 2, 1000 Ljubljana

2 Kmetijski inštitut Slovenije, Hacquetova ulica 17, 1000 Ljubljana

3 CEDARS, d.o.o., Linhartova 5, 1000 Ljubljana

E-naslov: tine.grebenc@gozdis.si

IZVLEČEK:

Prispevek predstavlja zasnovo pilotne lokacije na območju slovenskega krasa v projektu EARTHONE (*Environmental Analysis and Resilience for Transformative Human-Optimized Natural Environments*), ki je usmerjen v spremljanje vplivov rabe tal in sprememb rabe tal na tla, pestrost talne mikrobiote, vegetacijo, mikroklimo, fenologijo in ogljikove tokove. Slovenski pilot je umeščen na območje Črnotič oziroma Podgorskega Krasa, kjer se v isti krajini pojavljajo odprti (aktivni) pašniki in travniki, zaraščajoče se površine ter manjši gozdni sestoji s puhastim hrastom (*Quercus pubescens*). Zaradi plitvih, skeletnih in prostorsko zelo heterogenih kraških tal je območje izrazito občutljivo na sezonsko sušo, kljub razmeroma visoki letni količini padavin. Raziskava izhaja iz dveh hipotez: (i) da sukcesijski prehod od odprte rabe proti gozdu spremeni mikroklimo, talno vlažnost, organsko snov in tokove CO₂ ter da (ii) različne oblike rabe in opuščanja vplivajo na rastlinsko sestavo, talno biološko aktivnost in fenološke odzive. Predvidene meritve vključujejo talne analize, vegetacijske popise, fenokamere, mikroklimatske senzorje, meritve tokov toplogrednih plinov (CO₂) ter analize talnega mikrobioma. Pilot bo prispeval k razumevanju kompromisov med ohranjanjem odprtih kraških habitatov in dopuščanjem naravne sukcesije.

IZVLEČEK:

This contribution presents the design of the Slovenian Karst pilot within the EARTHONE project (*Environmental Analysis and Resilience for Transformative Human-Optimized Natural Environments*), which focuses on the effects of land use and land-use change on soils, soil biodiversity, vegetation, microclimate, phenology and carbon fluxes. The Slovenian pilot is located in the Črnotiče Podgorski Kras area, where open pastures and meadows, woody-encroached areas and *Quercus pubescens* forest stands occur within the same landscape. Due to shallow, stony and spatially heterogeneous karst soils, the system is highly sensitive to seasonal drought despite relatively high annual precipitation. The study is based on two hypotheses: first, that the successional transition from open grassland or pasture through woody encroachment to forest modifies microclimate, soil moisture, soil organic matter and CO₂ flux dynamics; and second, that different land-use and abandonment stages affect plant composition, soil biological activity and phenological responses. The planned monitoring includes soil analyses, vegetation surveys, phenology cameras, microclimate sensors, greenhouse-gas flux measurements and soil microbiome analysis. The pilot will support the assessment of trade-offs between conserving open karst habitats and allowing natural succession.

UVOD:

Spremembe rabe tal in pokrovnosti pomembno vplivajo na podnebni sistem, delovanje ekosistemov, biotsko raznovrstnost, zaloge ogljika, vodni režim, kroženje hranil ter emisije in ponore toplogrednih plinov (Foley et al., 2005; IPCC, 2019; Marques et al., 2019). V Evropi so ti procesi izrazito heterogeni: poleg intenziviranja kmetijske rabe so pogosti tudi opuščanje tradicionalne rabe, zaraščanje pašnikov, razvoj sekundarnih gozdov in uvajanje agrogozdarskih sistemov (Schulp et al., 2008; Hempel et al., 2025). Projekt EARTHONE (*Environmental Analysis and Resilience for Transformative Human-Optimized Natural Environments*) obravnava te povezave v sektorju LULUCF ter razvija harmoniziran metodološki okvir, ki združuje terenske meritve, senzorska omrežja, daljinsko zaznavanje, podatkovne platforme, modeliranje scenarijev in podporo odločanju (earthone-project.eu).

Projekt vključuje pilotna območja v Španiji, Grčiji, Italiji, Hrvaški, Sloveniji in Severni Makedoniji, ki zajemajo agrogozdarske sisteme, sadovnjake, mokrotne travnike in pašnike, kraške površine v zaraščanju ter intenzivno sadjarsko pridelavo. Skupni raziskovalni okvir pilotov predstavljajo izboljšani ukrepi rabe tal oziroma ILUMs

(*Improved Land Use Measures*), kot so pogozdovanje, kmetijsko-gozdarski sistemi, učinkovitejša raba gnojil ter trajnostno upravljanje pašnikov in kmetijskih površin. Slovenski pilot obravnava dolgoročen proces opuščanja tradicionalne rabe in naravnega zaraščanja v submediteranskem kraškem prostoru, kjer se na območju Črnotič oziroma Podgorskega Krasa prepletajo odprti pašniki in travišča, zaraščajoče se površine, grmiščne faze ter gozdni sestoji s puhastim hrastom (*Quercus pubescens*; Ferlan et al., 2011; Mrak et al., 2021). Zaradi plitvih, skeletnih in prostorsko heterogenih tal ter izrazite občutljivosti na poletno sušo je območje primerno za preučevanje povezav med sukcesijo, mikroklimo, talnimi razmerami, biološko aktivnostjo tal in tokovi ogljika (Ferlan et al., 2011; Ferlan, 2013; Mrak et al., 2025a).

Raziskava temelji na dveh hipotezah. Prva predpostavlja, da prehod od odprtega kraškega travišča prek faze zaraščanja do gozda s puhastim hrastom povzroči merljive spremembe v mikroklimi, talni vodni dinamiki, talni organski snovi, tokovih CO₂ ter talnem mikrobiomu. Druga predpostavlja, da različne oblike sedanje rabe, opuščanja rabe in naravnega zaraščanja vplivajo na

Slika 1: Razporeditev raziskovalnih ploskev slovenskega pilota EARTHONE na območju Črnotič. Ploskve predstavljajo gradient rabe tal in sukcesije od pašnika in travnika prek zaraščanja do gozda; oranžni krog označuje položaj eddy covariance stolpa.



rastlinsko sestavo, strukturo vegetacije, biološko aktivnost tal in fenološko dinamiko vegetacije. Pričakovane razlike med odprtimi, zaraščajočimi se in gozdnimi ploskvami bodo preverjene z vegetacijskimi indeksi, meritvami talne vlage in temperature, popisi vegetacije, analizami tal, spremljanjem tokov toplogrednih plinov ter analizami talnega mikrobioma.

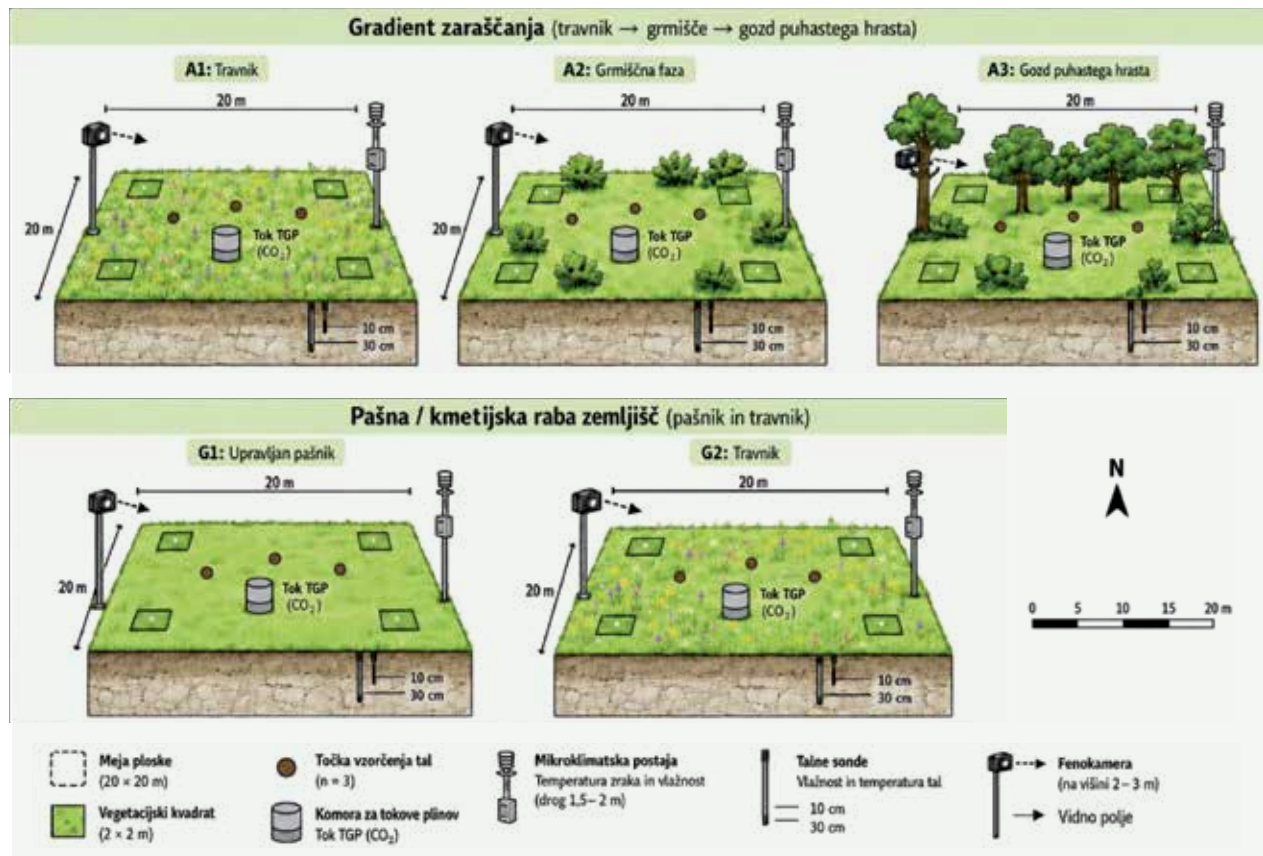
MATERIAL IN METODEDE:

Slovenski pilot je umeščen na območje Podgorskega Krasa v neposredni bližini vasi Črnotiče v jugozahodni Sloveniji (45°32'36.5"N 13°55'00.2"E; slika 1), na nadmorski višini 400–430 m. Območje je razvito pretežno na paleocensko-eocenskem apnencu, z lokalnimi flišnimi vključki. Podnebje je submediteransko do submediteransko-kontinentalno, z vplivom burje, sezonsko vodno omejitvijo in vegetacijsko dobo od pomladi do jeseni. Povprečna letna temperatura znaša približno 10,5–11,8 °C, letna količina padavin pa približno 1.300–1.370 mm (Ferlan et al., 2011; Ferlan, 2013; Mrak et al., 2021). Kljub razmeroma visoki količini padavin je sistem občutljiv na poletno sušo, predvsem zaradi plitvih, skeletnih in hidrološko heterogenih tal ter neenakomerne

celoletne razporeditve padavin. Na apnencu prevladujejo rendzični leptosoli, na flišnih vključkih pa globlja evtrična kambična tla (Ferlan et al., 2011; Mrak et al., 2021). Pretekla in mestoma še prisotna čezmerna paša in opuščanje tradicionalne rabe sta oblikovala današnji mozaik odprtih travišč, zaraščajočih se površin in sekundarnih gozdnih sestojev (Ferlan et al., 2011; earthone-project.eu).

Zasnova pilota temelji na primerjavi glavnih tipov rabe tal in sukcesijskih stopenj. V raziskovalnem protokolu so opredeljene naslednje ploskve (Slika 2) A1 – kraško travišče kot odprta referenčna površina, A2 – zaraščajoča se površina oziroma grmiščna faza, A3 – gozd s prevladujočim puhastim hrastom (gozd), G1 – upravljani pašnik in G2 – travnik. Prve tri kategorije tvorijo sukcesijski gradient, namenjen predvsem preverjanju vpliva zaraščanja na mikroklimo, tla in ogljikove tokove, primerjava pašnika in travnika pa omogoča presojo vpliva sedanje oziroma nedavne rabe tal. Ploskve so zasnovane kot standardizirane raziskovalne enote s stalnimi mesti za vegetacijske popise, vzorčenje tal, meritve tokov toplogrednih plinov, mikroklimatsko spremljanje, talne sonde in fenološko opazovanje.

Slika 2: Shema vzorčenja na slovenskih kraških ploskvah. Prikazani so vegetacijski kvadrati, talna vzorčna mesta, komore za meritve tokov toplogrednih plinov, mikroklimatski senzorji, talne sonde in fenokamere (slika: ChatGPT).



Talne analize bodo obsegale fizikalne, kemijske in biološke kazalnike, vključno s talno organsko snovjo oziroma organskim ogljikom, pH, električno prevodnostjo, teksturo, volumensko gostoto, skupnim dušikom, dostopnim fosforjem, kationsko izmenjalno kapaciteto in vsebnostjo karbonatov. Posebna pozornost bo namenjena talni vlagi in temperaturi, saj sta ključni za razumevanje sezonske aktivnosti vegetacije, mikrobnih procesov, razgradnje organske snovi in ogljikovih tokov.

Vegetacijsko spremljanje bo temeljilo na popisih vaskularnih rastlin na stalnih kvadratih (slika 2). Beleženi bodo vrstna sestava, skupna pokrovnost vegetacije, deleža golih tal in opada, grmovna plast ter obnova drevesnih vrst. Takšen pristop bo omogočil primerjavo odprtih, zaraščajočih se in gozdnih ploskev ter presojo, ali se spremembe rabe tal odražajo predvsem v vrstni sestavi, strukturi vegetacije ali v razvoju lesne komponente. Fenološko spremljanje bo potekalo z uporabo fenokamer. Te bodo nameščene na stalnih mestih in usmerjene nad osrednji del ploskve, kar bo omogočilo izračun vegetacijskih oziroma zelenostnih indeksov ter spremljanje sezonske dinamike vegetacije.

Meritve toplogrednih plinov bodo usmerjene predvsem v tokove CO₂. Ob meritvah bodo zabeleženi temperatura tal in zraka, talna vlaga ter stanje vegetacije, kar bo omogočilo povezovanje plinskih tokov z mikroklimatskimi in vegetacijskimi razmerami. Mikroklimatsko spremljanje bo zajemalo zvezne meritve temperature zraka, relativne vlage ter temperature in vlage tal.

Z analizami talnega mikrobioma bomo ovrednotili spremembe v biološki aktivnosti tal vzdolž gradienta rabe in zaraščanja. Te bodo temeljile na visokozmogljivem sekvenciranju (HTS/metabarkodiranje) talnih vzorcev in rizosfere. Za glivne združbe bo uporabljen marker ITS2, ki omogoča oceno celotne glivne diverzitete ter ugotavljanje dominantnih ekoloških skupin, kot so saprotrofne, patogene, arbuskularno mikorizne in ektomikorizne glive. Poseben poudarek bo namenjen mikoriznim združbam, saj ektomikorizne glive pri puhastem hrastu (*Quercus pubescens*) pomembno prispevajo k privzemu vode in hranil, zunajkoreninski micelij pa je lahko pomemben za delovanje dreves v plitvih in sušnih kraških tleh (Mrak et al., 2021; Mrak et al., 2025b). Arbuskularno mikorizne glive bodo posebej pomembne za odprte travniške in pašne ploskve, kjer prevladuje zeliščna vegetacija, medtem ko bodo ektomikorizne glive ključne za razumevanje zaraščajočih se in gozdnih ploskev. Vzporedno bodo analize bakterijskih in glivnih združb, predvidoma na osnovi

ribosomalnih markerjev, omogočile oceno bakterijskih in glivnih skupin, povezanih z razgradnjo organske snovi, kroženjem dušika, mineralizacijo hranil in odzivi na sušo. Primerjava glivnih, mikoriznih in bakterijskih združb med pašnikom, travnikom, zaraščanjem in gozdom bo omogočila vzpostavitev povezav med rabo tal, sukcesijsko stopnjo, talnimi lastnostmi, vodno dostopnostjo in biološko aktivnostjo tal.

REZULTATI IN DISKUSIJA:

Ker je slovenski pilot v zgodnji fazi izvajanja, v prispevku ne predstavljamo končnih rezultatov, temveč raziskovalno zasnovano, izhodiščno stanje in pričakovani interpretacijski okvir. Pomembna prednost območja Podgorskega Krasa je obstoječa raziskovalna podlaga, ki vključuje mikrometeorološke meritve ogljikovih tokov z metodo eddy covariance na odprtem travišču in zaraščajoči se oziroma gozdni površini. Dosedanje raziskave so pokazale, da se odprti in zaraščajoči se kraški sistemi razlikujejo v bruto primarni produkciji, ekosistemski respiraciji in neto izmenjavi CO₂, pri čemer imajo sezonska porazdelitev padavin, poletna suša, temperatura in fenološki razvoj vegetacije pomembno vlogo pri letni ogljikovi bilanci (Ferlan et al., 2011; Ferlan, 2013).

Pričakujemo, da bo primerjava ploskev vzdolž gradienta pašnik oziroma travišče – zaraščanje – gozd (slika 3) omogočila boljše razumevanje, kako naravna sukcesija spreminja mikroklimo, dinamiko talne vode, organsko snov v tleh, strukturo vegetacije, tokove toplogrednih plinov ter talni mikrobiom. Zaraščanje lahko poveča nadzemno lesno biomaso, količino opada in senčenje tal, vendar njegov vpliv na talni ogljik in izmenjavo CO₂ verjetno ne bo enoznačen. V plitvih, skeletnih in prostorsko heterogenih kraških tleh so odzivi močno odvisni od globine tal, kamnitosti, vodne dostopnosti in mikrorastiščnih razmer. Pri razlagi tokov CO₂ bo potrebna dodatna previdnost zaradi karbonatnega ozadja, saj lahko k izmerjenemu CO₂ poleg koreninske in mikrobne respiracije prispevajo tudi anorganski karbonatni procesi (Plestenjak et al., 2012).

Pomemben prispevek slovenskega pilota bo vzpostavitev povezave nadzemnih in podzemnih kazalnikov ekosistemskega delovanja. Vegetacijski popisi, fenološko spremljanje, meritve talne vlage in temperature ter analize talnega mikrobioma bodo omogočili presojo, ali so spremembe v rabi tal povezane predvsem s spremembami rastlinske sestave, strukture vegetacije, talne biološke aktivnosti ali z njihovo kombinacijo. Posebej pomembne bodo analize glivnih in bakterijskih združb, vključno z arbuskularno mikoriznimi glivami na odprtih travniških in

Slika 3: Sukcesijske stopnje slovenskega kraškega pilota: pašnik (levo zgoraj), travnik (desno zgoraj), zaraščanje (levo spodaj) in gozd (desno spodaj). *Slika N. Šibanc*



pašnih ploskvah ter ektomikoriznimi glivami v zaraščajočih se in gozdnih stadijih. Predhodne raziskave na območju so pokazale, da so ektomikorizne združbe puhastih hrastov občutljive na sušo in da se njihova vitalnost, vrstna sestava in zunajkoreninski micelij lahko spreminjajo glede na okoljske razmere (Mrak et al., 2021; Mrak et al., 2025a; Mrak et al., 2025b).

Podatki slovenskega pilota bodo vključeni v širši podatkovni okvir projekta EARTHONE, ki povezuje terenske meritve, senzorske podatke, daljinsko zaznavanje in modeliranje scenarijev rabe tal. Takšna zasnova omogoča primerjavo slovenskega kraškega sistema z drugimi evropskimi piloti, čeprav se ti razlikujejo po podnebjju, zgodovini rabe in načinu upravljanja. Primerljivost ne temelji na enakosti ploskev, temveč na harmoniziranem merilnem okviru, skupnih kazalnikov in standardiziranih protokolih (earthone-project.eu). Pričakovani rezultati bodo pomembni za presojo kompromisov med ohranjanjem odprtih kraških habitatov in dopuščanjem prostora naravni sukcesiji. Odprta travišča in pašniki so pomembni za biotsko raznovrstnost in krajinsko pestrost, zaraščajoče se površine pa lahko prispevajo k večji lesni biomasi, spremenjeni mikroklimi in potencialno

večji vezavi ogljika. Slovenski pilot bo s ponovljivimi meritvami omogočil na aktualnih podatkih utemeljeno presojo teh procesov ter prispeval k oblikovanju kazalnikov za spremljanje tal, vegetacije, mikrobioma in ogljikovih tokov v submediteranskih kraških ekosistemih. Rezultati bodo uporabni za gozdarstvo, naravovarstveno načrtovanje, upravljanje kraških zemljišč ter širše razumevanje odpornosti sredozemskih in submediteranskih krajin na podnebne spremembe.

LITERATURA IN VIRI:

Ferlan, M., 2013. The use of micro-meteorological methods for the monitoring of the carbon fluxes in karst ecosystems. Doktorska disertacija, Univerza v Ljubljani.

Ferlan, M., Alberti, G., Eler, K., Batič, F., Miglietta, F., Zaldej, A., Simončič, P., 2011. Comparing carbon fluxes between different stages of secondary succession of a karst grassland. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 140, 199–207.

Foley, J.A., DeFries, R., Asner, G.P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S.R., Snyder, P.K., 2005. Global consequences of land use. *Science* 309, 570–574.

Hempel, S., Herzog, F., Batáry, P., Öckinger, E., Knop, E., 2025. The impact of abandonment and intensification on the biodiversity of agriculturally marginal grasslands – a systematic review. *Basic and Applied Ecology*, 9-18.

IPCC, 2019. *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*.

Marques, A., et al., 2019. Increasing impacts of land-use on biodiversity and carbon-sequestration driven by population and economic growth. *Nature Ecology & Evolution* 3, 628–637.

Mrak, T., Šibanc, N., Brailey-Jones, P., Štraus, I., Gričar, J., Kraigher, H., 2021. Extramatrical mycelium and ectomycorrhizal community composition of *Quercus pubescens* in a Sub-Mediterranean stress-prone environment. *Frontiers in Forests and Global Change* 4, 599946.

Mrak, T., Unuk Nahberger, T., Maksimović, O., Kraigher, H., Ferlan, M., 2025a. Experimental drought results in a decline of ectomycorrhizae of *Quercus pubescens* Willd. *Trees* 39, 4.

Mrak, T., Brailey-Crane, P.A., Šibanc, N., Martinović, T., Gričar, J., Kraigher, H., 2025b. Mycelial communities associated with *Ostrya carpinifolia*, *Quercus pubescens* and *Pinus nigra* in a patchy Sub-Mediterranean Karst woodland. *Mycorrhiza* 35, 46.

Plestenjak, G., Eler, K., Vodnik, D., Ferlan, M., Čater, M., Kanduč, T., Simončič, P., Ogrinc, N., 2012. Sources of soil CO₂ in calcareous grassland with woody plant encroachment. *Journal of Soils and Sediments* 12, 1327–1338.

Schulp, C.J.E., et al., 2008. Impacts of land-use change on biodiversity: an assessment of agricultural biodiversity in the European Union. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 124, 68–82.

KLJUČNE BESEDE:

Quercus pubescens, talni ogljik, toplogredni plini, fenologija, pilotna študija

KEY WORDS:

Quercus pubescens, soil carbon, greenhouse gases, phenology, pilot plot

ZAHVALE:

Prispevek je nastal v okviru projekta EARTHONE, ki je financiran iz programa Evropske unije Horizon Europe, št. pogodbe 101181825, ARIS P4-0107, J4-10171 in IO-0012. Avtorji se zahvaljujejo partnerjem konzorcija EARTHONE (<https://earthone-project.eu/partners/>), sodelavcem Gozdarskega inštituta Slovenije, lastnikom oziroma upravljavcem zemljišč ter terenskim sodelavcem za podporo pri zasnovi in izvajanju slovenskega pilotnega območja.

CC BY SA · DOI 10.20315/SFS.191.06