

KEMIJSKE ZNAČAJKE POVRŠINSKOG DIJELA TLA U ODNOSU NA LITOLOGIJU I GEOMORFOLOGIJU VISOKOG KRŠA

CHEMICAL PROPERTIES OF TOPSOIL IN RELATION TO LITHOLOGY AND GEOMORPHOLOGY OF HIGH KARST

Nikola PERNAR¹, Darko BAKŠIĆ¹, Mario ANČIĆ², Ivan PERKOVIĆ¹

SAŽETAK

Visokogorsko područje dinarskog krša obilježeno je raznolikošću reljefnih formi, koje su u kombinaciji s humidnom klimom i različitim odnosima dolomita i vapnenaca, posebice u pogledu brzine i načina trošenja, dodatni izvor varijabilnosti fiziografije tla. U Nacionalnom parku Risnjak dimenzijama se ističu dvije ponikve (Viljska ponikva - VIP i Velika ponikva - VP) gdje smo testirali hipotezu o postojanju značajnih razlika u fiziografiji površinskog dijela tla. Cilj je bio istražiti u kojoj se mjeri uzduž osojne i prisojne padine ponikve mijenjaju kemijske značajke površinskog dijela tla i očituje li se pri tomu i razlika između dviju ponikvi, s obzirom na postojanje razlike u njihovoj litološkoj građi i poziciji unutar gorskog masiva. Istraživanja su provedena tako da je u svakoj ponikvi postavljen transekt u pravcu ~sjever-jug preko dna ponikve, na komu je obavljeno uzorkovanje tla do dubine od 15 cm (ili do stijene, ako je tlo pliće). Pokazalo se da je u VIP izraženija diferencijacija prirode humusa u organskom horizontu i da ona dobro korespondira s diferencijacijom vegetacije. U VP se fizička trošivost stijena (dolomitični supstrat) odražava na fiziografiji tla u obliku karbonatnosti i više pH-vrijednosti, koja u VIP raste od dna prema rubu ponikve, dok se u VP pH-vrijednost značajno ne mijenja uzduž padina. Na osojnoj ekspoziciji u VIP je udio organskog ugljika u tlu značajno veći (377 g kg^{-1}) od udjela na prisojnoj ekspoziciji (97 g kg^{-1}), pri čemu na osojnoj ekspoziciji udio organskog ugljika opada od dna prema rubu ponikve, a na prisojnoj ekspoziciji se očituje blagi rast. Za razliku od navedenoga, u VP udjel organskog ugljika ima obrnuti trend. Slične odnose i trendove pokazuje i udjel ukupnog dušika, osim pri dnu osojne padine u VIP, gdje je N_{tot} relativno nizak, a C_{org} relativno visok.

Zaključno, fiziografija tla dubokih gorskih ponikvi krša pod snažnim je utjecajem prirode stijena u pogledu dolomitičnosti. Tlo povrh dolomita i dolomitičnih vapnenaca obilježeno je karbonatnošću. U ponikvama u masivima čvrstih vapnenaca može se očekivati na njihovim osojnim padinama karakteristične trendove pH-vrijednosti tla te udjela organskog ugljika i ukupnog dušika zbog vrlo izraženog hidrotermičkog, odnosno bioklimatskog trenda. Na prisojnim ekspozicijama takvih ponikvi analogni trendovi s karakterističnim gradijentima izostaju, što korespondira i s izostankom prepoznatljivog vegetacijskog slijeda.

KLJUČNE RIJEČI: tlo, organski ugljik tla, dušik tla, ponikve, krš, Nacionalni park Risnjak

UVOD INTRODUCTION

Posebnost tla krša je da ono nastaje vrlo sporom akumulacijom mineralnih čestica, koje su pak produkt trošenja vapnenaca i dolomita. Ove mineralne čestice mogu predstavljati

isključivo nekarbonatni ostatak iz procesa dominantno kemijskog trošenja spomenutih stijena, a mogu uključivati i karbonatni detritus stijena, u slučaju kad su one i fizički trošive. U prvom slučaju radi se o tlu na vapnencima, rijeđe na dolomitima koji su fizički postojani, a dominantna forma

¹ prof. dr. sc. Nikola Pernar, prof. dr.sc. Darko Bakšić, doc. dr. sc. Ivan Perković, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet šumarstva i drvne tehnologije, Zavod za ekologiju i uzgajanje šuma, Svetošimunska cesta 23, HR-10000 Zagreb, npernar@sumfak.hr

² doc. dr. sc. Mario Ančić, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet šumarstva i drvne tehnologije, Zavod za izmjeru i uređivanje šuma, Svetošimunska cesta 23, HR-10000 Zagreb

trošenja je otapanje karbonata (Schaeztl i Anderson 2015). U drugom slučaju radi se također o visokokarbonatnim stijenama, ali dolomitne prirode (dolomiti, kalcitični dolomiti, dolomitični vapnenci), koje su podložne fizičkom trošenju. Stoga u građi tla sudjeluje i karbonatni detritus stijene (od krupnijih fragmenata pa sve do čestica koloidnih dimenzija) koji daje poseban pečat fizičkim i kemijskim značajkama tla (ilovastopjeskovita tekstura, $\text{pH} > 7$). Jedno od dominantnih obilježja tla krša je velika varijabilnost njegove fiziografije, posebice dubine i skeletnosti te stjenovitosti i kamenitosti zemljišta (Bautista i dr. 2005, Wang i dr. 2020).

Karakteristično obilježje krškog reljefa su i ponikve ili vrtače. To su tanjurasta, kotlasta, ljevkasta ili bunarasta udubljenja nastala procesima korozije i mehaničkog djelovanja vode na vapnence i dolomite (Ford i Williams 2007). Promjer i dubina im se kreće u rasponu od 10-ak do nekoliko 100-tina metara. One su tipičan krški fenomen, a ponekad se jako ističu svojom brojnošću (Pahernik 2012). Tada se na aerosnimkama očituju u gustoj točkastoj (pjevastoj) formi pa se takav krš naziva „boginjavi krš“ (Bočić i dr. 2010). U različitim uvjetima pojavljuju se u navedenim karakterističnim oblicima; u visokogorskim područjima posebno su zastupljene ljevkaste ponikve (Maras, 2009) s relativno plitkim tlom, a na pogrebenom kršu prepoznatljivim oblikom ističu se plitkotanjuraste fosilne (pogrebene) ponikve (Ford i Williams 2007) s izrazito dubokim tlom.

Duboke ponikve visokogorskog krša snažno modificiraju lokalnu klimu – topoklimu (Antonić i dr. 1997; Vilović i dr. 2019). To se očituje u obliku termičke i vegetacijske inverzije (Horvat, 1962; Hrašovec i dr. 1994; Whiteman i dr. 2004b; Vilović i dr. 2019) te u vidu hidrotermičkog kontrasta između osojne (sjeveru izložene, *zasjenjene*) i prisojne (jugu izložene, *osunčane*) padine (Whiteman i dr. 2004a, 2004b, Pospichal i dr. 2004; Steinacker i dr. 2007).

Ponikve gorskih područja snažno doprinose prostornom diverzitetu tla, kako u pogledu njegovih fizičkih značajki

(dubina, skeletnost, granulometrijski sastav), tako i u pogledu kemijskih i bioloških značajki. Najlakše uočljivo ektomorfološko obilježje je stjenovitost dijela ruba ponikve i u tom rubnom dijelu tlo je najmanje dubine. Ovisno o obliku ponikve (njenoj dubini, nagibu padina i njihovoj duljini), prirodi stijena (u rasponu od vapnenaca, preko dolomitičnih vapnenaca, kalcitičnih dolomita do dolomita) i bioklimatskim značajkama područja, za očekivati je relativno široki raspon utjecaja na značajke tla.

S obzirom na vegetacijsku inverziju koja se u velikim ponikvama očituje karakterističnim vegetacijskim slijedom (različitim na osojnoj i prisojnoj ekspoziciji ili padini), reflektirajući njihove reljefne i hidrotermičke posebnosti, za očekivati je i specifični odraz na fiziografiju tla, posebice u njegovom površinskom dijelu.

U svezi s navedenim, postavili smo hipotezu o postojanju značajnih razlika u fiziografiji površinskog dijela tla koje su u prostoru krša svojstvene ponikvama, posebice velikim ponikvama.

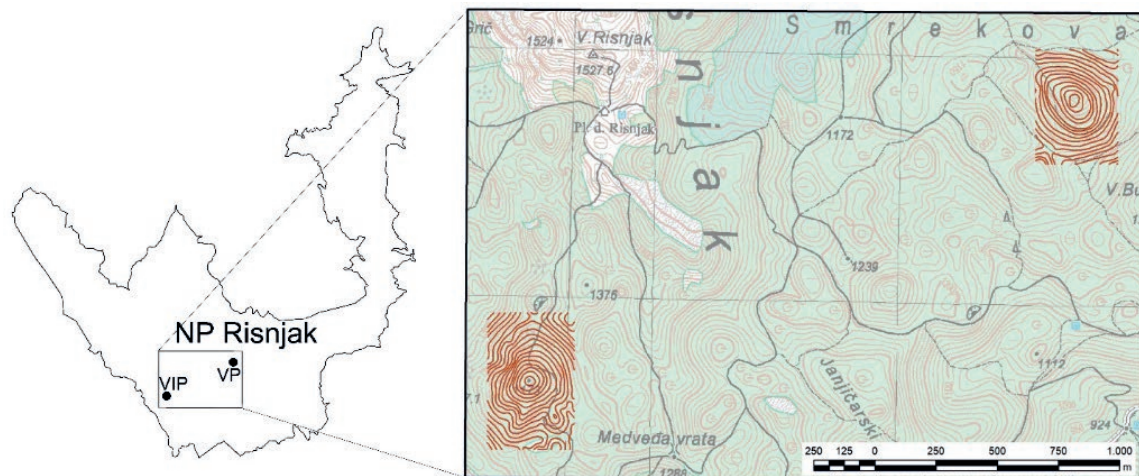
Ovu hipotezu testirali smo na dvije velike krške ponikve, slične po veličini, a različite prema poziciji unutar gorskog masiva, kao i prema litološkoj građi.

Postavljen je cilj: istražiti u kojoj se mjeri uzduž osojne i prisojne padine ponikve mijenjaju kemijske značajke površinskog dijela tla (pH -vrijednost, udjel organskog ugljika, udjel ukupnog dušika, C:N) i očituje li se pri tomu i razlika između dviju ponikvi, s obzirom na postojanje razlike u litološkoj građi i poziciji unutar gorskog masiva.

MATERIJAL I METODE MATERIAL AND METHODS

Područje istraživanja – *Research area*

Terenski dio istraživanja proveden je u Nacionalnom parku „Risnjak“ u Gorskom Kotaru – visokogorsko područje za-



Slika 1. Područje istraživanja.
Figure 1. Study area.

padnog dijela Hrvatske (Slika 1). Radi se o središnjem dijelu Nacionalnog parka s karakterističnim krškim reljefom; isponima dominiraju goli vapnenci srednje- i gornjejurske (Doger, Malm) starosti, a u nižim dijelovima parka značajnije su zastupljeni donjejurski (Lijas) vapnenci i dolomiti i gornjetrijaski dolomiti (Savić i Dozet 1985).

U istraživanju su uključene dvije ponikve:

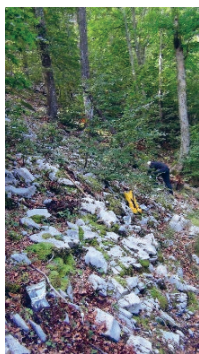
1. Viljska ponikva (VIP) koja je smještena između južnog produžetku glavnog vapnenačkog grebena Risnjaka i Viljskih stijena, dnom 1345 m južno od Velikog Risnjaka (1528 m n.v.), „uronjena“ u jurske vapnence između Južnog Malog Risnjaka (1425 m n.v.) na sjeveroistočnoj strani i Viljskih stijena (najviši vrh 1380 m n.v.) na jugozapadnoj strani;
2. Velika ponikva (VP) koja je smještena neposredno sjeverozapadno od masiva Velikog (1266 m n.v.) i zapadno od Malog Bukovca (1263 m n.v.), dnom 1990 m istočno od vrha Velikog Risnjaka, 2520 m istočno-sjeveroistočno od dna VIP i 535 m sjeverozapadno od vrha Velikog Bukovca.

Ponikve su ljevkastog oblika s blago eliptičnom devijacijom, s padinama bez lomova, tj. s tek blagim promjenama stupnja nagiba.

Najniži dio ruba VIP je na njoj jugoistočnoj strani i nalazi se na nadmorskoj visini 1283 m (Slika 6). Iznad ove nadmorske visine ponikva gubi ljevkasti oblik pa joj se tako rub većim dijelom (posebno jugozapadni, zapadni i sjeverozapadni greben, poznat pod nazivom „Viljske stijene“) nalazi iznad 1300 m n.v. Dno ponikve je na 1175 m n. v. pa je tako njena minimalna dubina (u odnosu na najniži dio ruba) 108 m. Srednji promjer na razini najnižeg ruba iznosi

~400 m, a na razini najviših točaka uzorkovanja tla ~470 m. Prosječni nagib osojne padine u VIP na istraživačkom transektu je 25° (46,5 %), a prisojne padine 27° (51 %). Ova ponikva nalazi se u masivu čvrstih, dobro uslojenih i gromadastih donjojurskih (srednji Lijas) vapnenaca, što se očituje u stjenovitošću i kamenitošću njenih padina (Slika 2), prisutnošću vapnenačkog sipara u donjoj polovici osojne padine (osobito razvijenom u pravcu jug-jugozapad) i grubo skeletnim koluvijem u dnu ponikve (Slika 3).

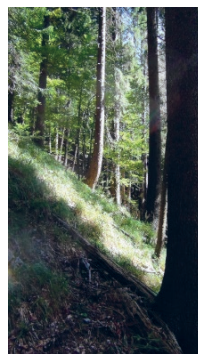
VP svojim dnom je udaljena 2,52 km od dna VIP u pravcu sjeveroistoka (Slika 1). Najniži dio ruba ove ponikve je na njoj jugozapadnoj i zapadnoj strani i nalazi se na 1115 m n. v., a dno joj je na 1000 m n.v., što je niže od VIP za 175 m (7 i 8). Iznad 1090 m n.v. ponikva gubi pravilan ljevkasti oblik. Prosječni nagib osojne padine u VP na istraživačkom transektu je 27° (51 %), a prisojne padine 33,5° (66,4 %). Padine su obilježene sporadičnim humkama kao posljedica izvaljivanja stabala. Minimalna dubina VP (u odnosu na najniži dio ruba) je 115 m. Srednji promjer na razini najnižeg ruba je 400 m, a na razini najviših točaka uzorkovanja 370 m. Za razliku od VIP, koja se nalazi u donjojurskim (srednji Lijas) vapnencima, litološku građu VP obilježavaju donjojurski dolomitični vapnenci i kalcitični dolomiti. To su stijene veće fizičke trošivosti od čvrstih vapnenaca, koji se u građi VP pojavljuju tek u njenom rubnom (najvišem) dijelu (~iznad 1110 m n.v.)¹. Posljedica takve litološke građe je vrlo niska stjenovitost i kamenitost (Slika 4), izuzev dna ponikve u kojoj je akumuliran grubi koluvijalni skelet (većim dijelom potječe od vapnenaca koji izgrađuju najviše dijelove ponikve, posebno na njoj jugoistočnoj, istočnoj i sjevernoj strani) s maksimalnim promjerom i više od 1 m (Slika 5).



Slika 2. Stjenovita i kamenita padina u VIP.
Figure 2. Rocky and stony slope in VIP.



Slika 3. Dno u VIP sa skeletnim koluvijem.
Figure 3. Bottom of VIP with skeletal colluvium.



Slika 4. Padina u VP.
Figure 4. Slope in VP.



Slika 5. Dno VP s koluvijem i mahovinom.
Figure 5. Bottom of VP with colluvium and moss.

¹ U osnovni geološkoj karti područje obiju ponikvi izdvaja se kao geološkilitološka cjelina (srednji Lijas), u kojoj su vapnenci i dolomiti u alteraciji. Pri tomu se ukazuje da je donji dio ovog srednjolijaskog slijeda karakteriziran lateralnom i vertikalnom izmjenom vapnenaca i dolomita, a u središnjem i vršnom dijelu prevladavaju vapnenci „s mjestimičnim i vrlo uskim pojasevima dolomita“ (Savić i Dozet 1985). Kako se VP nalazi 200 m niže od VIP, evidentno je da se ona nalazi u dominantno dolomitnom dijelu masiva, a VIP u dominantno vapnenačkom dijelu masiva.

Tablica 1. Mjesečne i godišnje srednje temperature zraka i količine oborina na gorskim vrhovima u blizini istraživanih ponikvi – razdoblje 1931–1960. (Bertović 1994).

Table 1. Monthly and annual mean air temperatures and precipitation on mountain peaks near the investigated sinkholes – period 1931–1960. (Bertović 1994).

Gorski vrh / Mount. peak		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	ann.
Veliki Risnjak	temp.	-5,6	-5,1	-4,3	1,5	3,1	9,8	14,9	11,0	9,3	4,4	-0,2	-3,2	3,0
	obor./precip.	302	328	264	235	291	238	190	168	367	376	427	393	3579
Veliki Bukovac	temp.	-4,8	-4,1	-2,4	3,1	5,5	11,4	15,7	12,6	10,3	5,4	0,8	-2,4	4,3
	obor./precip.	297	301	242	218	254	211	173	154	304	358	399	377	3288

Klima šireg područja istraživanja iskazana je srednjim mjesečnim i godišnjim temperaturama zraka i količinama oborina za vrh Velikog Risnjaka i Velikog Bukovca, (tab. 1) dobivenih na temelju temperaturnih i oborinskih gradijenata za razdoblje 1930-1960 (Bertović 1994).

Prema navedenim podacima evidentno je da se radi o perhumidnoj klimi koju obilježava godišnja količina oborina iznad 3000 mm i srednja godišnja temperatura zraka između 3 i 5 °C (ponikve su niže od navedenih referentnih gorskih vrhova, pa je za očekivati da imaju nešto više temperaturne srednjake, česte i dugotrajne mrazeve, kratko vegetacijsko razdoblje i dugotrajni snježni pokrivač). Srednja temperatura najhladnijeg mjeseca (siječanj) u području ponikava je između -4 i -5 °C, a najtoplijeg (srpanj) je između 15 i 16 °C. Najveća količina oborina je u jesenskom i zimskom razdoblju (rujan-veljača), kada je mjesečni srednjak iznad 300 mm, a najmanja u kolovozu (150-170 mm).

Specifični, precizniji i noviji podaci raspoloživi su za VIP, a odnose se isključivo na mikroklimatska mjerenja (temperatura zraka, relativna vlažnost zraka i temperatura tla) tijekom 28., 29. i 30. srpnja 1984. god. (Hrašovec i dr. 1994). Isti ukazuju na postojanje vrlo izraženu temperaturnu inverziju u najhladnijem dijelu dana (u 5.00 sati na dnu ponikve u odnosu na njen rub bilo je hladnije za 9,4 °C, a u 14.00 sati na dnu ponikve bilo je za 4,5 °C toplije u odnosu na rub ponikve).

U svjetlu bioklimatološke interpretacije šireg područja (Bertović 1994) istraživane ponikve imaju klimu nižeg predplaninskog pojasa, odnosno višega gorskog pojasa.

VIP je „uronjena“ u bioklimat predplaninske bukove šume koji je obilježen zajednicom predplaninske bukove šume s planinskim žabljakom (*Ranunculo platanifoliae-Fagetum* (Horvat 1938) Marinček i dr. 1993) i zajednicom predplaninske smrekove šume s modrom kozokrvinom (*Lonicero caeruleae-Piceetum* Zupančić (1976) 1994 corr. 1999). Vrlo izražena temperaturna inverzija u VIP manifestira se i u vidu inverzije vegetacije, posebice na osojnoj ekspoziciji – ispod pojasa predplaninske bukove šume s planinskim žabljakom slijedi predplaninska smrekova šuma s modrom kozokrvinom, a zatim klekovina bora krivulja s planinskom pluskavicom (*Hyperico grisebachii-Pinetum mugii* (Horvat 1938) T. Wraber, Zupančić et Žagar 2004). Na samom dnu

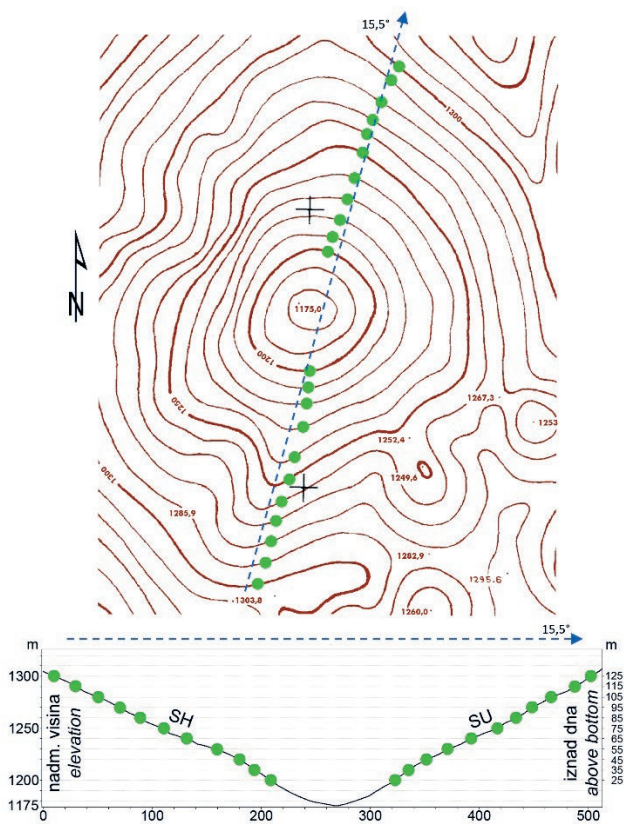
VIP grubo skeletni koluvij obrasta zajednica velelisne vrbe (*Salicetum appendiculate* Horvat (1962) 1974). Prisojne padine u VIP u potpunosti (izuzev manjih enklava na sjevernom rubu Ponikve) su obrasle šumom predplaninske bukve (Vukelić i dr. 2020).

VP je na nižoj nadmorskoj visini i u okruženju je dinarske bukovo-jelove šume (*Omphalodo vernaie-Fagetum* (Tregubov 1957) Marinček i dr. 1993), glavnog vegetacijskog reprezentanta višega gorskog bioklimatskog pojasa. Ova šuma obrasta gornju polovicu padina VP, a donju polovicu obrasta predplaninska smrekova šuma s modrom kozokrvinom (Vukelić i dr. 2020), što je također primjer vegetacijske odnosno bioklimatske inverzije. Sjeveroistočni i istočni stjenoviti rub VP obrastao je predplaninskom smrekovom šumom i jelovom šumom s milavom (*Calamagrostio-Abietetum* albae (Horvat 1950) Horvat in Cestar 1967). Dno VP je bez šumske vegetacije - radi se o grubo skeletnom koluviju prekrivenom mahovinom (Slika 6).

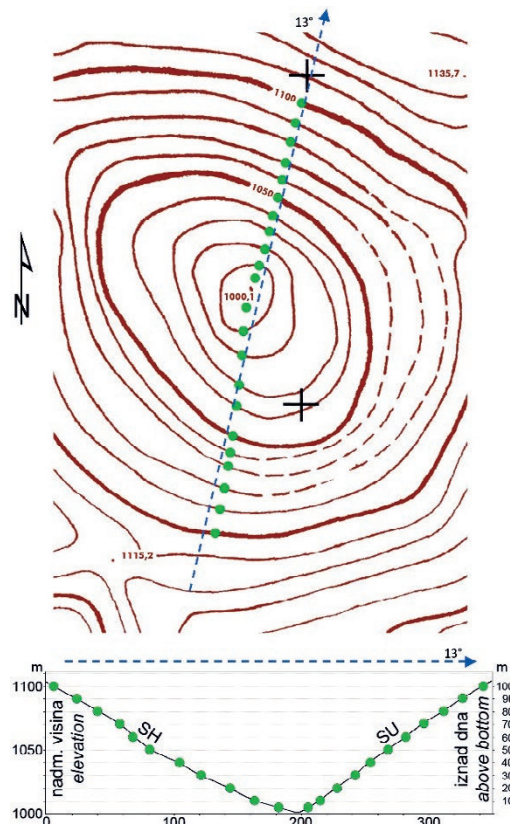
Uzorkovanje tla – Soil sampling

Uzorkovanje je provedeno na transektima postavljenim preko dna ponikvi, u skladu s idejom da se obuhvati hidrotermički kontrast ponikvi (osojna i prisojna padina), pri čemu se vodilo računa da se izbjegne žljebasta anomalija osojne padine VIP (Slika 6). Stoga je postavljen transekt s azimutom od 15,5° od jednog do drugog ruba preko dna ponikve. Sličan transekt (s azimutom od 13°) postavljen je i u VP (Slika 7). Uzduž transekata projektirani su nizovi s visinskim razlikama od 10 m (u VP visinska razlika između dva najniža niza je 5 m zbog prekrivenosti dna ponikve skeletnim (stijene) koluvijem), na kojima se uzorkovalo tlo na 5 točaka (ponavljanja) s međusobnim razmakom 1-1,5 m (Slika 6, 7 i 8). U nastavku na slikama, osojna padina se označava sa „SH“ (*shaded*, zasjenjeno), a prisojna sa „SU“ (*sunny*, osunčano).

U svakoj ponikvi realizirano je uzorkovanje na 22 niza - po 11 nizova na prisojnoj, odnosno na osojnoj padini. Nizovi na prisojnoj i osojnoj ekspoziciji (padini) postavljeni su na istim nadmorskim visinama, odnosno relativnim visinama iznad dna svake ponikve. Tako je u VIP najniži niz postavljen na 1200 m n.v., odnosno 25 m iznad dna ponikve, jer se na osojnoj ekspoziciji ispod ove visine radi o skeletnom koluviju (sipar, Slika 3) i nije bilo moguće uzorkovati tlo.



Slika 6. Transekt kroz VIP (gore) i vertikalni profil uzduž transekta (dolje).
Figure 6. Transect through VIP (above) and vertical profile along the transect (below).



Slika 7. Transekt kroz VP (gore) i vertikalni profil uzduž transekta (dolje).
Figure 7. Transect through VIP (above) and vertical profile along the transect (below).

Stoga je i na prisojnoj ekspoziciji uzorkovanje započeto na visini od 25 m iznad dna ponikve. Na gornjim dijelovima padina najviši niz postavljen je na 1300 m n.v., odnosno 125 m iznad dna ponikve (Slika 6). U VP najniži niz postavljen je na 1005 m n.v., odnosno 5 m iznad dna, jer je do ove visine dno ponikve prekriveno grubim skeletom prekrivenim mahovinom (Slika 5). Na gornjim dijelovima padina najviši niz postavljen je na 1100 m n.v., odnosno 100 m iznad dna ponikve (Slika 7).

Tlo je uzorkovano 19. i 20. rujna 2019. god. U svakoj ponikvi prikupljeno je po 110 uzoraka tla – po 55 na osojnoj, odnosno prisojnoj ekspoziciji. Uzorkovalo se do dubine od 15 cm (ili do stijene, ako je tlo pliće) od površine A- horizonta ili Oa-podhorizonta (ukoliko postoji), na plitkim profilima kopanim do cca. 40 cm (ili do stijene, ako je tlo bilo pliće).

Za terensku determinaciju i iskazivanje formi koji je 80-ih i 90-ih godina prošloga stoljeća razvijen i testiran u šumskim ekosustavima Europe i Sjeverne Amerike (Klinka i dr. 1981, Green i dr. 1993, Klinka i dr. 1997).

Analize tla i podataka – Soil and data analysis

Na uzorcima tla određena je pH-vrijednost u vodi i u otopini $0,01 \text{ mol dm}^{-3} \text{ CaCl}_2$ (ISO-10390 2005), udjel dušika



Slika 8. Horizontalni niz od 5 uzoraka tla na transektu kroz ponikvu.
Figure 8. A horizontal series of 5 soil samples on the transect through the sinkhole.

(N_{tot} – ISO-13878 1998) i udjel organskog ugljika (C_{org} – ISO-10694 1995) suhim spaljivanjem u Flash 2000® Combustion NC Soil Analyzer (Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA, USA) te udjel karbonata (volumetrijska metoda – ISO-10693 1995). Udjel karbonata korišten je za redukciju ukupnog ugljika na organski ugljik. Uzorci su pripremljeni za analize u skladu s normom ISO 11464 1994.

Za svaku analiziranu varijablu provedena je detaljna deskriptivna analiza za pojedinu ponikvu. Za testiranje odnosa promjene udjela organske tvari i dušika u tlu s pro-

mjenom relativne visine u odnosu na dno ponikve, za svaku padinu zasebno, te za testiranje odnosa udjela organskog ugljika u tlu i pH-vrijednost primjenjen je model jednostavne regresije. Za testiranje odnosa mjerenih parametara na osojnoj i prisojnoj ekspoziciji primjenjen je Tukey HSD test (ANOVA s ponovljenim mjerenjem).

REZULTATI I RASPRAVA RESULTS AND DISCUSSION

Jedno od polazišta u ovom istraživanju bila je činjenica da se radi o dvije morfološki vrlo slične i relativno bliske ponikve u istom gorskom masivu (dnom udaljene ~2,5 km) i da su nastale u sličnim uvjetima endogenih (urušne ponikve) i egzogenih procesa (oblikovanje padina, koluvijalno zatrpavanje dna), što omogućuje usporedbu istovjetnih istraživanja ovih dviju ponikvi. Pri tomu se mora imati na umu i činjenica da se ponikve razlikuju prema bioklimatskim i litološkim značajkama, pa je za pretpostaviti da se to odražava na fiziografske značajke tla.

Pretpostavljene razlike se očituju već kroz ektomorfološke značajke tla. U vapnenačkom prostoru VIP stjenovitost je od 1 % do 30 %, a kamenitost do 5 %, izuzev na donjoj polovici blago žljebaste osojne (prema sjeveru orjentirane) padine na kojoj je formiran vapnenački sipar, pa je u tom dijelu kamenitost 100 % (Slika 3). Dno ponikve je zatrpano gromadama stijena i kamenjem pa je stjenovitost i kamenitost sveukupno 100%. S druge strane, u VP stjenovitost je ograničena samo na njen obrub (cjelokupno područje oko VP obilježavaju čvrsti vapnenci) i na dno (uključujući i prstenasti pridanak njenih padina, Slika 5) koje je zatrpano stijenama i krupnim kamenjem, analogno VIP. Na osojnoj padini VP mjestimice ima kamenitosti i preko 20 %. Ona je posljedica fizičkog trošenja dolomitičnog vapnenca i dolomita (u ovom dijelu ponikve jače se ističe dolomitiziranost karbonatnih sedimenata u odnosu na njenu prisojnu padinu), a kamenje je u potpunosti prekriveno mahovinom (također i na njenom dnu, Slika 5).

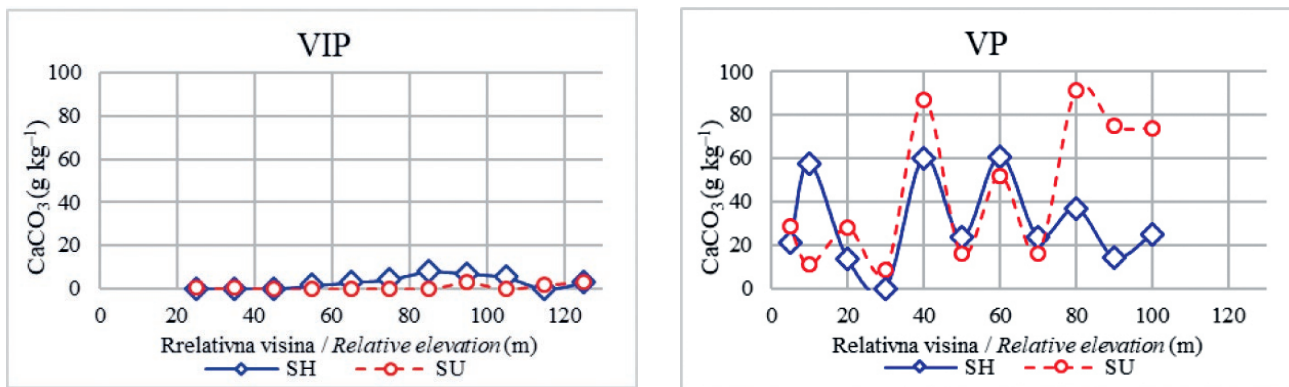
U konstelaciji mikroklimе i kamenito-stjenovite osojne padine VIP markantno se doima uski pojas subalpske smrekove šume s modrom kozokrvinom (*Lonicero caeruleae-Piceetum*) i relativno velik fragment klekovine bora krivulja s alpskom pljuskavicom (*Hyperico grisebachii-Pinetum mugii*). U odnosu na subalpsku smrekovu šumu koja je u VP daleko boljeg uzrasta i gdje obrasta donju polovicu padine (izuzev dna ponikve i pridanka padina do visine od ~15 m), u navedenim zajednicama VIP na osojnoj ekspoziciji ističu se naslage sirovog humusa (hemimor, modernor, sphagnomor) koje su genezom snažno obilježene karakterističnim acidofilnim vrstama u sloju prizemnog rašća kao što su *Vaccinium myrtillus*, *Lycopodium annotinum* i *Vaccinium vitis-idaea*, a dijelu padine unutar borove klekovine ističe se facijes maha tresetara

(*Sphagnum sp.*). *Vaccinium myrtillus* i *Vaccinium vitis-idaea* te *Lycopodium annotinum*, iako imaju različite ekeološke zahtjeve u pogledu vlažnosti staništa (Olleck i dr. 2020) u VIP dolaze zajedno u uskom visinskom pojasu iznad sipara na njenoj osojnoj padini.

U VP, unutar zajednice *Lonicero caeruleae-Piceetum* izostaju navedene acidofilne vrste, a pri dnu ponikve je vrlo razvijen sloj mahovina, koje u potpunosti prekrivaju skeletni koluvij u dnu ponikve i njegovom okruženju. Na osojnoj padini VP također je izražena akumulacija sirovog humusa, a izostaje sphagnomor, iako je pri dnu padine, koja je intenzivno obrasla mahovinama, isključivo mahovinski humus (bez vrsta roda *Sphagnum*). U pogledu formi humusa u gornjem dijelu osojne padine, kao i u VIP, u zajednici *Ranunculo platanifoliae-Fagetum*, podjednako su zastupljeni polusirovi (mormoder, leptomoder, mullmoder) i sirovi (hemimor, modernor) humus. Za istaknuti je da na prisojnim padinama obadviju ponikvi dominiraju navedeni oblici polusirovog humusa, rjeđe je prisutan sirovi humus (pretežno hemimor); u tomu nema većih razlika između ovih dviju ponikvi, iako se radi o različitim biljnim zajednicama (u VIP to je *Ranunculo platanifoliae-Fagetum*, a u VP *Lonicero caeruleae-Piceetum* odnosno *Omphalodo vernae-Fagetum* u gornjoj polovici padine).

Primarni čimbenik koji predisponira pedofiziografske razlike između ovih dviju ponikvi je trošivost stijena. Dolomitična priroda krških stijena (izuzev onih nastalih ranodijagenetskom dolomitizacijom) u pravilu je obilježena njihovim fizičkim trošenjem, pri čemu nastaje karbonatni regolit koji sudjeluje u građi sklopa profila tla kao C- horizont. Takvo trošenje odražava se na fiziografiju tla, ali i na prirodu reljefa (zaobljene forme, izostanak kanjonskih usjeka). Iako između kasnodijagenetskih dolomita i okolnih vapnenaca mogu postojati različiti prijelazi i diskordantni odnosi vapnenaca (Tišljar, 2001), na širem području istraživanih ponikvi u NP Risnjak dolomitični vapnenci i dolomiti gotovo redovito su konkordantno položeni u vidu trijaskе i donjejurjske podine donjejurjskim i srednjejurjskim vapnencima. U tom svjetlu je i razumljiva razlika u litološkoj prirodi između VIP i VP. Dno VIP više je od ruba VP koji je građen od vapnenaca, a ispod su dolomitični vapnenci i dolomiti. VIP izgrađuju čvrsti vapnenci koji se ne troše fizički, dok VP izgrađuju dolomiti u izmjeni s dolomitičnim vapnencima. Stoga je tlo u VIP karbonatno tek sporadično, redovito ispod 1 g kg⁻¹ (Slika 9), dok je u VP tlo karbonatno u 21 od 22 niza (srednje vrijednosti su između 10 i 90 g CaCO₃ kg⁻¹). Maksimalna pojedinačna vrijednost karbonatnosti u VIP je 13,2 g kg⁻¹, a u VP 210 g kg⁻¹. Velika varijabilnost karbonatnosti tla u VP može se pripisati fitopedoturbaciji kao posljedici izvaljivanja stabala (slika 6).

Fiziografski parametar koji očekivano dobro korespondira s prirodom trošenja supstrata, odnosno s karbonatnošću



Slika 9. Udio karbonata u tlu na transektu kroz VIP i VP na osojnoj (SH) i prisojnoj (SU) padini.
Figure 9. Carbonate content in soil on transect through VIP and VP at shaded (SH) and sunny (SU) slope.

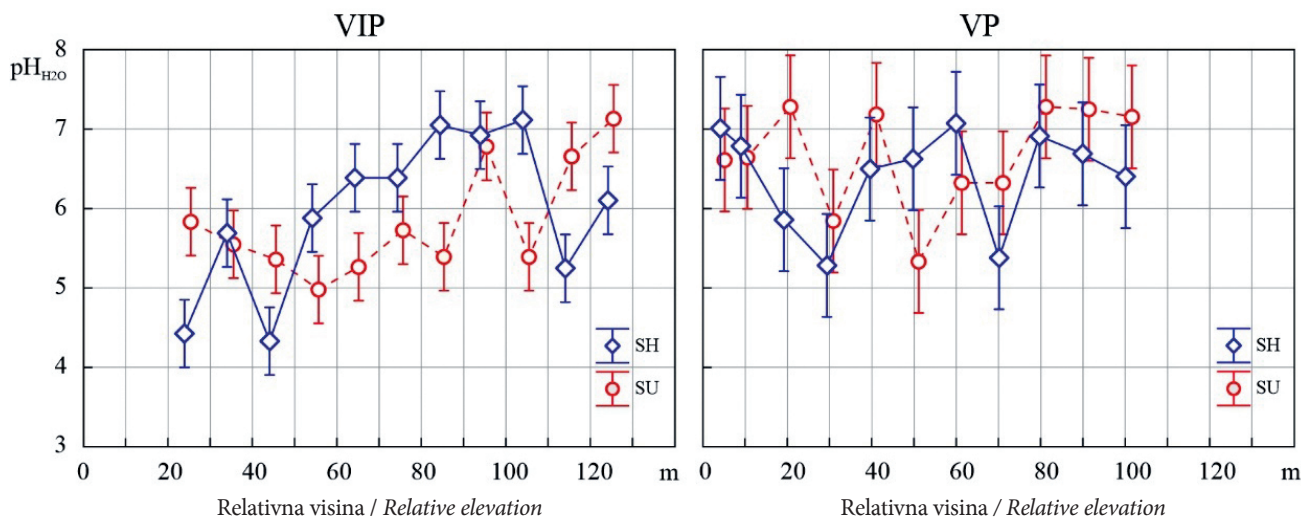
tla je njegova pH-vrijednost (Gruba i Socha, 2016). Dakako ona ovisi i o bioklimatskim čimbenicima (Brady i Weil 2008), odnosno o specifičnim hidrotermičkim uvjetima pojedine ponikve. Prema tome, pH-vrijednost je rezultanta više, pojedinačno složenih, čimbenika, a nerijetko odražava utjecaj dominantnog čimbenika (npr. matični supstrat, vegetacija ili klima).

Srednja vrijednost pH tla (mjerena u vodenoj suspenziji) na osojnoj ekspoziciji u VIP je 5,96, a na prisojnoj 5,81. U VP na osojnoj ekspoziciji srednja vrijednost pH tla je 6,41, a na prisojnoj 6,64; pri tomu je njena varijabilnost najveća na osojnoj ekspoziciji u VP (Slika 10). Zanimljivo je da u VIP pH raste od dna prema rubu ponikve, kako na osojnoj tako i na prisojnoj ekspoziciji (statistički značajna regresija - R^2 shaded = 0,24; R^2 sunny = 0,29), dok se u VP pH-vrijednost značajno ne mijenja, kako uzduž osojne tako i uzduž prisojne padine. Evidentno je da je u uvjetima čvrstih vapnenaca VIP pH tla pod posrednom kontrolom bioklimatskog čimbenika, a u uvjetima dolomita i dolomitičnih

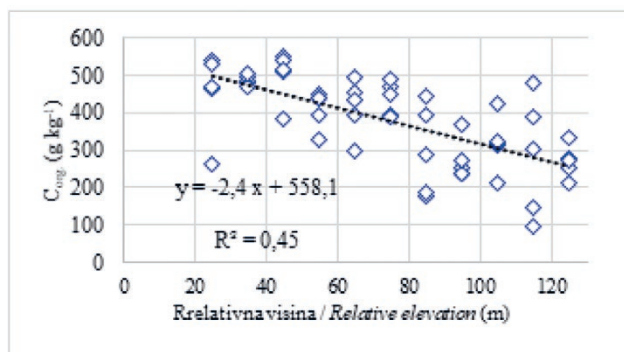
vapnenaca VP pod kontrolom karbonatnog detritusa i fitopedoturbacije.

Udio organskog ugljika (Corg) u tlu korespondira s hidrotermičkim, odnosno bioklimatskim uvjetima staništa (Chen i dr. 2016). On je također i rezultat kakvoće i količine izvorne organske tvari i uvjeta (osobito hidrotermičkih) u kojima se odvija njena transformacija (Davidson i Janssens 2006, Yang i dr. 2008, Craine i dr. 2010, Conant i dr. 2011).

Na osojnoj ekspoziciji VIP je udio organskog ugljika u tlu značajno veći od udjela na prisojnoj ekspoziciji, što je podudarno s nalazima i u drugim gorskim područjima gdje se ekspozicija (aspect) pokazala najvažnijim čimbenikom distribucije organskog ugljika u površinskom dijelu tla (Bennie i dr. 2008; Zhang i dr. 2008, Chen i dr. 2016). Srednja vrijednost na osojnoj ekspoziciji je 377 g kg^{-1} , a na prisojnoj ekspoziciji samo 97 g kg^{-1} . Pri tomu na osojnoj ekspoziciji udio organskog ugljika značajno opada od dna prema rubu ponikve (Slika 11 i 12), a na prisojnoj ekspoziciji se očituje



Slika 10. pH-vrijednosti tla (aritmetička sredina s intervalom pouzdanosti 0,95) u VIP i VP.
Figure 10. pH value of the soil (arithmetic mean with reliability interval 0.95) in VIP and VP.

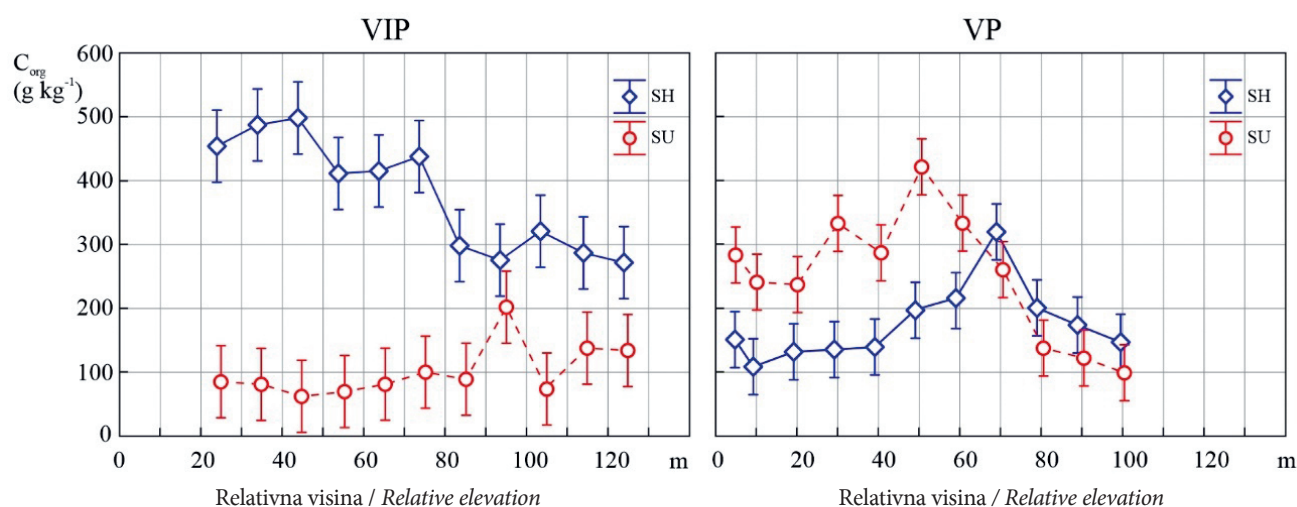


Slika 11. Linearno izjednačenje trenda udjela C_{org} na osojnoj padini u VIP.

Figure 11. Linear equation of the trend of the C_{org} on shaded slope of VIP.

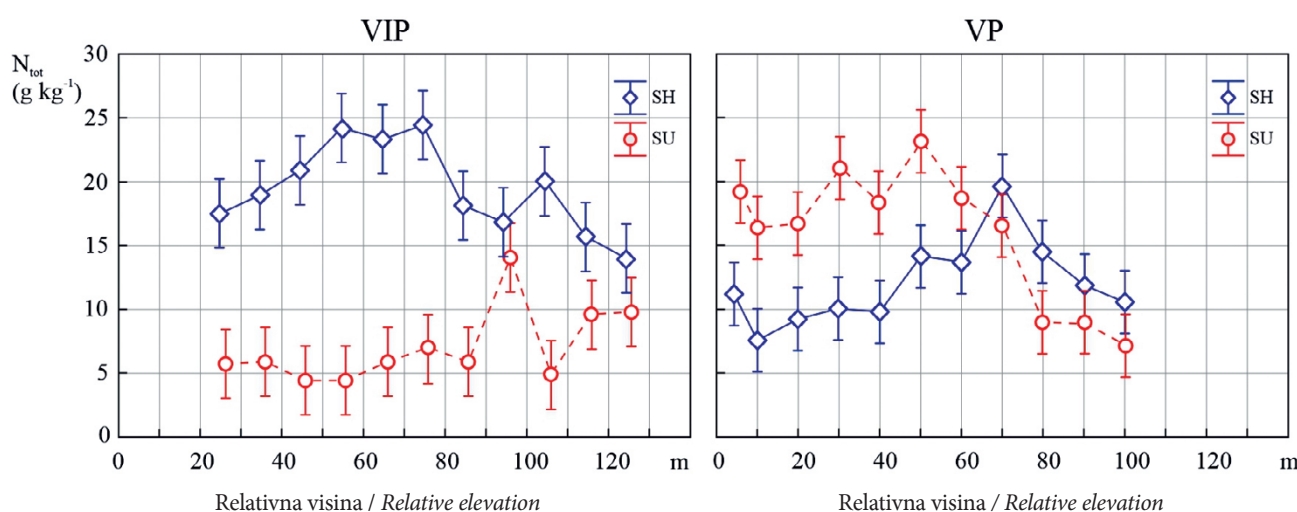
blagi rast (Slika 12)². Za razliku od navedonoga, u VP udjel organskog ugljika ima obrnuti trend (Slika 12). Na osojnoj padini udio mu lagano raste od dna prema rubu ponikve, na prisojnoj ekspoziciji udio mu opada prema rubu ponikve, a srednja vrijednost udjela značajno je manja na osojnoj ekspoziciji (174 g kg^{-1}) od one na prisojnoj (248 g kg^{-1}).

Sasvim očekivano, vrlo sličan trend udjelu organskog ugljika pokazuje udio ukupnog dušika, ali je razlika između osojne i prisojne ekspozicije nešto manja (Slika 13) - u VIP je kod organskog ugljika odnos prosječnog udjela 3,90:1, a kod ukupnog dušika to je $\sim 2,8:1$; u VP je kod organskog ugljika odnos prosječnog udjela 1:1,4, a kod ukupnog dušika 1:1,3. Značajnije odstupanje od navedenog trenda



Slika 12. Udio organskog ugljika (C_{org}) u tlu na osojnoj (SH) i prisojnoj (SU) padini u VIP i VP.

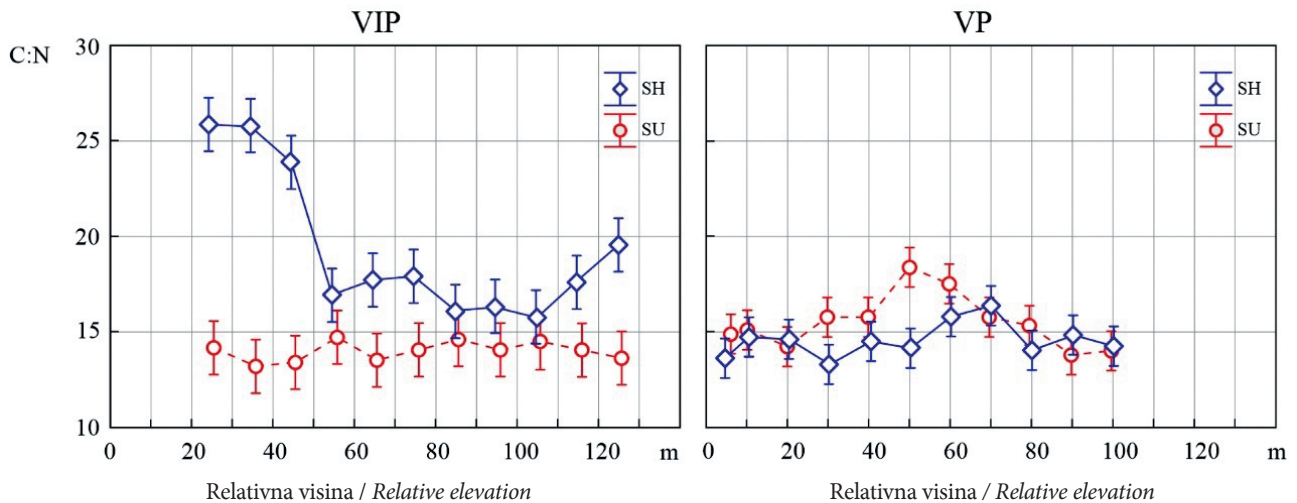
Figure 12. The content of C_{org} in the soil on shaded (SH) and sunny (SU) slope of VIP and VP.



Slika 13. Udio ukupnog dušika (N_{tot}) u tlu na osojnoj (SH) i prisojnoj (SU) padini u VIP i VP.

Figure 13. The content of N_{tot} in the soil on shaded (SH) and sunny (SU) slope of VIP and VP.

² Iako se pretežno radi o niskom stupnju korelacije, sve regresije odnosa relativne visine i OC te relativne visine i TN su statistički značajne.



Slika 14. Odnos C_{org} i N_{tot} u tlu na osojnoj (SH) i prisojnoj (SU) padini u VIP i VP.

Figure 14. The relationship between C_{org} and N_{tot} in the soil on shaded (SH) and sunny (SU) slope of VIP and VP.

organskog ugljika je u donjem dijelu osojne ekspozicije u VIP. Tu je stoga i vrijednost odnosa organskog ugljika i ukupnog dušika vrlo visoka (Slika 14), što se može objasniti prirodom humusa - sirovi humus (hemimor, modermor, sphagnomor) na donjoj trećini osojne padine. Radi se o dijelu padine koji je većinom obrastao klekovinom bora krivulja s alpskom pljuskavicom (*Hyperico grisebachii-Pinetum mugii*), a u sloju mahovina ističe se facijes maha tresetara (*Sphagnum sp.*).

Odnos organskog ugljika i ukupnog dušika ($C_{org}:N_{tot}$) u površinskom dijelu šumskog tla obično se kreće između 10 i 30. Ovaj parametar dobar je pokazatelj mikrobne aktivnosti ovisno o kakvoći organskih ostataka (Carrera i dr. 2005, Wang i dr. 2013), načinu korištenja zemljišta (Kanokporn, 2015) i klimatskim značajkama (Callesen i dr. 2007, Follett i dr. 2012, Marty i dr. 2017). Srednja vrijednost C:N na osojnoj padini u VIP je 19,43. Ova relativno visoka vrijednost obilježena je doprinosom sirovog humusa u donjoj trećini padine (Slika 14). Za ova tri niza točaka srednja vrijednost je 25,2, a za gornji, veći dio padine srednja vrijednost je značajno manja – 17,27. Na prisojnoj padini srednja vrijednost C:N je 13,98, ne mijenja se značajno uzduž padine, a varijabilnost joj je relativno niska (Slika 14).

Srednja vrijednost C:N na osojnoj padini VP je 14,48, ne mijenja se značajno uzduž padine, ali joj je varijabilnost izrazito visoka (Slika 14). Na prisojnoj padini srednja vrijednost C:N je 15,40, pri čemu do polovice padine raste od ~14,5 na 18,3, a zatim prema rubu ponikve opada na ~14. Karakteristični trend vrijednosti C:N prepoznatljiv je u donjoj trećini osojne padine VIP, koja je obilježena ponajprije trendom organskog ugljika, ali i trendom pH-vrijednosti.

Analiza vrijednosti parametara tla i njihovih promjena na osojnim i prisojnim padinama dviju gorskih ponikvi pokazala je da se u uvjetima homogene litološke građe VIP man-

ifestira efekt inverznosti trendova pH-vrijednosti, organskog ugljika i odnosa C i N na osojnoj ekspoziciji. Na prisojnoj ekspoziciji ove ponikve inverznost je prepoznatljiva samo na pH-vrijednosti tla.

Karbonatnost tla u VP pokazuje vrlo visoku varijabilnost, što je razumljivo kad se ima u vidu njen rubni položaj u odnosu na čvrste vapnenice i "uronjenost" u kompleks dolomitičnih vapnenaca i dolomita. Nadalje, u ovoj ponikvi ne manifestira se inverznost trendova mjerenih parametara; ističe se jedino lagani rast udjela C_{org} i N_{tot} od dna prema rubu ponikve na prisojnoj ekspoziciji.

ZAKLJUČCI CONCLUSIONS

U području visokogorskog krša susreću se specifične kombinacije klimatskih i litoloških uvjeta koji na relativno malom prostoru predisponiraju prostornu varijabilnost fizografije tla. Ove kombinacije posebno su karakteristične za ekstremno duboke ponikve s bioklimatskom inverzijom i/ili s "uronjenošću" u sedimente koji su obilježeni izmjenom karbonatnih slojeva različitog stupnja dolomitizacije. U ponikvi s bioklimatskom inverzijom gradijent promjena parametara površinskog dijela tla relativno je sličan gradijentu promjena ovih parametara unutar megareljefa gorskog krša zapadnih Dinarida.

U odnosu na prisojnu ekspoziciju, na osojnoj ekspoziciji dubokih gorskih ponikvi, posebice na nižim dijelovima padina, prisutne su deblje naslage sirovog humusa, koje na prisojnoj ekspoziciji izostaju.

Tlo povrhl dolomita i dolomitičnih vapnenaca obilježeno je karbonatnošću. Prepoznatljiv čimbenik prostorne varijabilnosti karbonatnosti i pH-vrijednosti tog tla je fitopedoturbacija u vidu izvaljivanja stabala i izbacivanja karbonatnih

čestica na površinu padine ponikve, gdje su izložene gravitacijskoj i vodnoj eroziji i daljnjoj redistribuciji niz padinu.

U dubokim gorskim ponikvama u masivima čvrstih vapnenaca može se uvijek očekivati na osojnim padinama karakteristične trendove pH-vrijednosti tla te udjela organskog ugljika i ukupnog dušika zbog vrlo izraženog hidrotermičkog, odnosno bioklimatskog trenda. Na prisojnim ekspozicijama takvih ponikvi analogni trendovi s karakterističnim gradijentima izostaju, što korespondira i s izostankom prepoznatljivog vegetacijskog slijeda.

Zahvala – Acknowledgements

Autori zahvaljuju Nacionalnom parku „Risnjak” na potpori ovom istraživanju.

LITERATURA REFERENCES

- Antonić, A., V. Kušan, B. Hrašovec, 1997: Mikroklimatske i topoklimatske razlike između fitocenoza u Viljskoj ponikvi, Risnjak, Hrvatska. *Hrvatski meteorološki časopis*, 32:37–49.
- Bautista, F., S. Díaz-Garrido, M. Castillo-González, J. A. Zinck, 2005: Spatial Heterogeneity of the Soil Cover in the Yucatán Karst, 2005: Comparison of Mayan, WRB, and Numerical Classifications. *Eurasian Soil Science*, 38(1):581–588.
- Bennie, J., B. Huntley, A. Wiltshire, M.O. Hill, R. Baxter, 2008. Slope, aspect and climate: spatially explicit and implicit models of topographic microclimate in chalk grassland. *Ecol. Model.*, 216(1):47–59.
- Bertović, S., 1994: Prilog ekološki-prostornom tumačenju i značajkama reljefa i podneblja u Gorskom Kotaru. Zbornik radova 40 godina Nacionalnog parka „Risnjak” 1953-1993, 115-120.
- Bočić, N., M. Pahernik, A. Bogner, 2010: Geomorfološka obilježja Slunjske zaravni. *Hrvatski geografski glasnik*, 72(2):5 – 26.
- Brady N.C., R.R. Weil, 2008. The Nature and Properties of Soils. The, 15th Edition, Prentice-Hall Press, 740 p
- Callesen, I., K. Raulund-Rasmussen, C.J. Westman, L. Tau-Strand, 2007: Nitrogen pools and C:N ratios in well-drained nordic forest soils related to climate and soil texture. *Boreal Environ. Res.* 12(6):681–692.
- Carrera, A.L., D.N. Vargas, M. V. Campanella, M.B. Bertiller, C.L. Sain, M.J. Mazzarino, 2005: Soil nitrogen in relation to quality and decomposability of plant litter in the Patagonian Monte, Argentina. *Plant Ecology*, 181:139-151.
- Chen, L.F., He, Z.B., Du, J., Yang, J.J., X. Zhu, 2016: Patterns and environmental controls of soil organic carbon and total nitrogen in alpine ecosystems of northwestern China. *Catena*, 137:37–43.
- Conant, R.T., M.G. Ryan, G.I. Ågren, H.E. Birge, E.A. Davidson, P.E. Eliasson, M.A. Bradford, 2011. Temperature and soil organic matter decomposition rates—synthesis of current knowledge and a way forward. *Glob. Chang. Biol.*, 17 (11), 3392–3404.
- Craine, J.M., N. Fierer, K.K. McLauchlan, 2010. Widespread coupling between the rate and temperature sensitivity of organic matter decay. *Nat. Geosci.*, 3 (12), 854–857.
- Davidson, E.A., I.A. Janssens, 2006. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature*, 440 (7081), 165–173.
- Follett, R.F., C.E. Stewart, E.G. Pruessner, J.M. Kimble, 2012: Effects of climate change on soil carbon and nitrogen storage in the US Great Plains. *J. Soil Water Conserv.*, 67:331–342.
- Ford, D.C., P. Williams, 2007: Karst Hydrogeology and Geomorphology, John Wiley & Sons, 562 p.
- Green, R. N., R. L. Trowbridge, K. Klinka, 1993: Towards a Taxonomic Classification of Humus Forms. Forest Science, Monograph 29, 49 p.
- Gruba P., J. Socha, 2016: Effect of parent material on soil acidity and carbon content in soils under silver fir (*Abies alba* Mill.) stands in Poland [J]. *Catena*, 140:90–95.
- Horvat, I., 1962: Vegetacija planina zapadne Hrvatske. *Priručnik za istraživanje ser. Acta Biologica II*, 30:5–173, Zagreb.
- Hrašovec B., M. Ivkov, V. Kušan, 1994: Mikroklima Viljske ponikve - kompjutorski model. Zbornik radova 40 godina Nacionalnog parka „Risnjak” 1953-1993, 123-128.
- ISO 10390, 2005: Soil quality – Determination of pH. ISO, Genève.
- ISO 10693, 1995: Soil quality – Determination of carbonate content – Volumetric method, ISO, Genève.
- ISO 10694, 1995: Soil quality – Determination of organic and total carbon after dry combustion (elementary analysis). ISO, Genève.
- ISO 11464, 1994: Soil quality - Pretreatment of samples for physico-chemical analyses. ISO, Genève.
- ISO 13878, 1998: Soil quality – Determination of total nitrogen content by dry combustion (elemental analysis). ISO, Genève.
- Kanokporn S., 2015: Soil Carbon and Nitrogen Ratio in Different Land Use. International Conference on Advances in Environment Research. Vol. 87 of IPCBEE, p 36-40. DOI: 10.7763/IPCBEE.2015.V87.7
- Klinka, K., R.N. Green, R.L. Trowbridge, L.E. Lowe, 1981: Taxonomic classification of humus forms in ecosystems of British Columbia: first approximation. Land management, Report number 8, 54 p.
- Klinka, K, P. Krestov, J. Fons, 1997: Towards a Taxonomic Classification of Humus Forms: Third Approximation. Scientia Silvica, Extension Series, Number 9, 4 p.
- Maras, M., 2009: Krš Hrvatske – geografski pregled i značenje. Hrvatsko geografsko društvo, Split, 264 p.
- Marty, C., D. Houle, C. Gagnon, F. Courchesne, 2017: The relationships of soil total nitrogen concentrations, pools and C:N ratios with climate, vegetation types and nitrate deposition in temperate and boreal forests of eastern Canada. *Catena*, 152:163–172.
- Olleck, M., B. Reger, J. Ewald, 2020: Verbreitung und Vorkommen von Alpenhumus – Regionalisierung auf Landschaftsebene (Teilprojekt Makroskala). In: Ewald et al.: Alpenhumus als klimasensitiver C-Speicher und entscheidender Standortfaktor im Bergwald. *Forstliche Forschungsberichte*, 220:21-60.
- Pahernik, M., 2012: Prostorna gustoća ponikava na području Republike Hrvatske. *Hrvatski geografski glasnik*, 74(2):5 – 26.
- Pospichal, B., S. Eisenbach, P. Weihs, C. B. Clements, R. Steinacker, E. Mursch-Radlgruber, M. Dorninger, 2004: Inversion breakup in small Rocky Mountain and Alpine basins. *J. Appl. Meteor.*, 43:1069–1082.
- Savić, D., S. Dozet, 1985: Osnovna geološka karta SFRJ 1:100.000. Karta i tumač za list Delnice. SGZ Beograd, 66 p.
- Schaetzl, R., S. Anderson, 2015: Soils; Genesis and Geomorphology. Third printing. Cambridge University Press. 817 p.
- Steinacker, R., C. D. Whiteman, M. Dorninger, B. Pospichal, S. Eisenbach, A. M. Holzer, P. Weihs, E. Mursch-Radlgruber, K. Baumann, 2007: A sinkhole field experiment in the eastern alps. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 88(5):701-716.

- Tišljar, J., 2001. Sedimentologija karbonata i evaporita. Institut za geološka istraživanja, Zagreb, str. 375.
- Vilović, T., S. Buzjak, N. Buzjak, 2019: Floristic and microclimatic features of the Sovljak doline (Mt. Velika Kapela, Croatia). *Šumarski list*, 1–2:35–43.
- Vukelić, J., I. Šapić, M. Baneković, M. Orešković, 2020: Ekološko-fitocenološke značajke i vegetacijska karta šumskih zajednica Nacionalnoga parka „Risnjak“. NP Risnjak, Crni Lug, 60 p.
- Wang, M., L.Y. Qu, K.M. Ma, X. Yuan, 2013: Soil microbial properties under different vegetation types on Mountain Han. *Sci. China Life Sci.*, 56:561–570.
- Wang X., X. Huang, H. Jiwei, Z. Zhenming, 2020: The Spatial Distribution Characteristics of Soil Organic Carbon and Its Effects on Topsoil under Dierent Karst Landforms. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 17(8), 2889; doi:10.3390/ijerph17082889.
- Whiteman, C. D., S. Eisenbach, B. Pospichal, R. Steinacke, 2004a: Comparison of Vertical Soundings and Sidewall Air Temperature Measurements in a Small Alpine Basin. *J. Appl. Meteor.*, 43:1635–1647.
- Whiteman, C. D., T. Haiden, B. Pospichal, S. Eisenbach, 2004b: Minimum temperatures, diurnal temperature ranges and temperature inversions in limestone sinkholes of different size and shape. *J. Appl. Meteor.*, 43:1224–1236.
- Yang, Y.H., J. Fang, Y. Tang, C. Ji, C. Zheng, J. He, B. Zhu, 2008: Storage, patterns and controls of soil organic carbon in the Tibetan grasslands. *Glob. Chang. Biol.*, 14(7):1592–1599.
- Zhang, Y., Y.C. Zhao, X.Z. Shi, X.X. Lu, D.S. Yu, H.J. Wang, W.X. Sun, J.L. Darilek, 2008. Variation of soil organic carbon estimates in mountain regions: a case study from Southwest China. *Geoderma*, 146:449–456.

SUMMARY

The high mountain area of the Dinaric karst is characterized by a variety of relief forms, which in combination with humid climate and different relationships of dolomite and limestone, especially in terms of rate and nature of weathering, are an additional source of variability of soil physiography. In the Risnjak National Park, two sinkholes stand out in terms of dimensions (Viljska ponikva - VIP and Velika ponikva - VP), where we tested the hypothesis of the existence of significant differences in the physiography of the surface part of the soil. The aim was to investigate the extent to which the chemical characteristics of the surface part of the soil change along the shady and sunny slopes of the sinkhole and whether the difference between the two sinkholes is evident, given the difference in their lithological structure (VIP is sinkhole in limestone and VP is sinkhole in dolomitic limestones and calcite dolomites) and positions within the mountain massif. The research was carried out in such a way that in each sinkhole a transect was placed in the direction north-south over the bottom of the sinkhole, on which soil sampling was performed to a depth of 15 cm (or to the rock, if the soil is shallower). Sampling was performed on rows of profiles in 5 replicates, which were placed perpendicular to the transect with a height difference of 10 m (Fig. 1). In each sinkhole, 22 rows of profiles were set up, on which 110 soil samples were collected, and the pH value, carbonate content, organic carbon content and total nitrogen content were measured on them. The research showed that on the shady slope in VIP, in addition to vertical vegetation differentiation, there is also a differentiation of the nature of humus in the organic horizon (hemimor, modermor, sphagnomor). This differentiation is much less pronounced in the VP, and on the sunny slope in both sinkholes it is almost absent. In VP, the physical weathering of rocks (dolomitic substrate) is reflected in the physiography of the soil in the form of free carbonate and higher pH values (Figs. 9 and 10). In VIP the pH rises from the bottom towards the edge of the sinkhole, both on the shady and sunny slope, while in VP the pH value does not change significantly, both along the shady and along the sunny slope. A recognizable factor in the spatial variability of carbonate content and pH value of this soil is phytopedoturbation in the form of tree felling and ejection of carbonate particles on the surface of the sinkhole slope, where they are exposed to gravitational and water erosion and further redistribution down the slope.

At the shady slope in VIP, the share of organic carbon in the soil is significantly higher (377 g kg⁻¹) than the share at sunny slope (97 g kg⁻¹). At the shady slope the share of organic carbon decreases from the bottom to the edge of the sinkhole (Fig. 11), and a slight increase is evident on the sunny slope. In VP, the mean values on the slopes and the trends of these shares on the slopes in relation to VIP have the opposite relationship (Fig. 12). Similar relations and trends are shown by the share of total nitrogen (Fig. 13), except at the bottom of the shady slope in VIP. Here, the share of N_{tot} is relatively low, and the share of C_{org} is relatively high, so only in this part within both transects does C/N differ significantly from the remaining parts of the transects (Fig. 14).

In conclusion, the soil physiography of deep karst sinkholes is strongly influenced by the nature of the rocks in terms of dolomiticity. The soil above the dolomite and dolomitic limestones is marked by carbonates. In deep sinkholes in solid limestone massifs, characteristic trends of soil pH and the content of organic carbon and total nitrogen can be expected on their shady slopes due to a very pronounced hydrothermal and bioclimatic trend. Analogous trends with characteristic gradients are absent on the sunny slopes of such sinkholes, which corresponds to the absence of a recognizable vegetation sequence.

KEY WORDS: soil, soil organic carbon, soil nitrogen, sinkholes, karst, Risnjak National Park