

## Redoximorphic features as indicators of soil water regime

### Redoksimorfne značajke kao pokazatelji režima vlaženja tla

Vedran RUBINIĆ<sup>1</sup> (✉), Ivan BUBALO<sup>2</sup>, Goran DURN<sup>3</sup>

<sup>1</sup> University of Zagreb Faculty of Agriculture, Svetošimunska 25, 10000 Zagreb, Croatia

<sup>2</sup> Student at the University of Zagreb Faculty of Agriculture, Svetošimunska 25, 10000 Zagreb, Croatia

<sup>3</sup> University of Zagreb Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, Pierottijeva 6, 10000 Zagreb, Croatia

✉ Corresponding author: [vrubinic@agr.hr](mailto:vrubinic@agr.hr)

Received: April 6, 2022; accepted: August 30, 2022

#### ABSTRACT

Soil water regime, as one of the key components of soil fertility, refers to the quantity, retention, and movement of soil water. Rather than through expensive and/or time-consuming measurements, it can be assessed from the field-observable morphological properties in the soil profile. Excessively wetted soils have a specific morphology, and are therefore often referred to as hydromorphic. Their morphology is caused by various soil redoximorphic features (RMFs), resulting from the reduction, translocation, and oxidation of iron and manganese oxides. Hydromorphic soils largely comprise Gleysols and Stagnosols (along with Gleyic Fluvisols) that are excessively wetted by groundwater, precipitation and/or flooded water. Their morphology is often described/analyzed with different terms/criteria in line with their global distribution. This complicates the comparison and classification of such soils and thus their use or reclamation. This review paper describes and compares common RMFs and explains their formation. It then proposes the revised Croatian terms for these features, which are in line with the terms used in the international soil classification systems of WRB and/or Soil Taxonomy. Furthermore, the criteria/rules used for diagnosing RMFs when classifying hydromorphic soils are critically reviewed. Finally, it is shown that a methodologically sound RMFs description can provide a quick insight into the crucial soil water regime parameters, such as location and duration of soil saturation, the origin of the excess soil water, recentness of excessive soil wetting, etc. However, depending on the research objectives and/or actual soil conditions, field soil description cannot always fully replace continuous field monitoring of the soil water regime and/or laboratory and micromorphological soil analyses.

**Keywords:** soil morphology, soil classification, hydromorphic soils, Gleysols, Stagnosols

#### SAŽETAK

Režim vlaženja tla, kao jedna od ključnih komponenti njegove ukupne plodnosti, odnosi se na količinu, zadržavanje i kretanje vode u tlu. Umjesto skupim i/ili dugotrajnim mjerenjima, on se može procijeniti na terenu, i to putem opisa morfoloških svojstava tla. Prekomjerno vlažena tla imaju specifičnu morfologiju, zbog koje se nazivaju hidromorfima. Takva njihova morfologija proizlazi iz redoksimorfne značajke (RMZ), koje se stvaraju redukcijom, premještanjem i oksidacijom oksida željeza i mangana. Hidromorfna tla su uglavnom glejna i pseudoglejna tla (ali i oglejena fluvijalna tla), koja su prekomjerno vlažena podzemnim, oborinskim i/ili poplavnim vodama. U skladu s njihovom globalnom rasprostranjenosti, morfologija tih tala se često opisuje i analizira korištenjem različitih pojmova i kriterija. To otežava usporedbu i klasifikaciju hidromorfne tala, kao i njihovu upotrebu ili popravak. Ovaj pregledni rad opisuje i uspoređuje uobičajene RMZ, objašnjavajući mehanizme njihova nastanka. Zatim predlaže revidirane hrvatske pojmove za ove značajke, skovane u skladu s onima koje koriste međunarodni sustavi WRB-FAO i/ili Soil Taxonomy. Nadalje, rad se kritički osvrće na kriterije i pravila, koja se koriste za dijagnosticiranje RMZ prilikom klasifikacije hidromorfne tala.

Konačno, ovaj rad pokazuje da metodološki ispravan opis RMZ može pružiti brz uvid u ključne parametre režima vlaženja tla, kao što su mjesto i trajanje zasićenja tla vodom, podrijetlo viška vode u tlu, recentnost prekomjernog vlaženja tla, itd. Međutim, ovisno o ciljevima istraživanja i/ili prisutnim uvjetima u tlu, terenski opis profila tla možda neće uvijek moći u potpunosti zamijeniti kontinuirano terensko praćenje režima vlaženja tla i/ili laboratorijske i mikromorfološke analize tla.

**Ključne riječi:** morfologija tla, klasifikacija tla, hidromorfna tla, glejna tla, pseudoglejna tla

## DETAILED ABSTRACT

Soil water regime refers to soil water's quantity, retention, and movement. It is therefore considered one of the key components of overall soil fertility. Among others, it directly affects the redox potential of the soil, which is often used to assess soil aeration and the availability of plant nutrients. Instead of taking expensive and/or time-consuming measurements, the soil water regime may be assessed by describing and analyzing the morphological properties of the soil profile that can be observed in the field (primarily its colors, but also the abundance, structure and consistency of specific soil features). Due to the reduction and oxidation of various soil compounds (especially iron-containing minerals), excessively wet soils usually exhibit specific morphology. For this reason, they are often referred to as hydromorphic. These include mainly Gleysols and Stagnosols (together with Gleyic Fluvisols) as soils that are excessively wetted by groundwater, precipitation, and/or floodwater. In line with their globally wide distribution, the morphological features of hydromorphic soils are often described and analyzed using very different terms and criteria. This, in turn, complicates the comparison and uniform classification of such soils (and thus their use and reclamation). While in Croatia terms like "marbling", "mottling", "tonguing" or "gleying" were traditionally used to describe hydromorphic soils, globally used reference handbooks for soil description and classification (WRB, Soil Taxonomy) mainly use other terms: oximorphic/reductimorphic colors, stagnic/gleyic properties, albic material, or redoximorphic features. Herein, the term redoximorphic features (RMFs) is used to cover all the above soil formations (as well as some others). By definition, RMFs include all features formed by the reduction, translocation, and oxidation of iron (and manganese) oxides in the soil. This review paper describes and compares all common types of RMFs while explaining the mechanisms of their formation. Then, it proposes the revised terms for these features in Croatian, coined following the terms used by WRB and/or Soil Taxonomy. It also critically reviews the key criteria and rules for diagnosing RMFs in the classification of hydromorphic soils according to the WRB and Croatian systems. Finally, the review shows that a proper understanding of the formation and properties of RMF enables rapid insight into the crucial parameters of the soil water regime (location and duration of soil saturation, the origin of excess soil water, recentness of excessive soil wetting, etc.). However, when diagnosing and describing RMFs, it is necessary to adhere to the standardized, globally accepted methods and terminologies. One should also be aware that, depending on the research objectives and/or the actual soil conditions, the field description of the soil profile may not always be able to fully replace continuous monitoring of the soil water regime in the field and/or laboratory and micromorphological soil analyses.

## UVOD

Režim vlaženja tla (RVT) odnosi se na prisutnost/odsutnost podzemne ili površinske (oborinske, poplavne ili slivene) vode koja se, u čitavom profilu tla ili u pojedinim njegovim horizontima, drži silama slabijim od 1500 kPa, i to cijele godine ili tijekom njenih pojedinih razdoblja (Soil Survey Staff, 1999). Voda držana silama  $\geq 1500$  kPa je nepristupačna većini biljaka i svojstvena je suhom tlu. Obzirom da određuje količinu i snagu vezanja vode u tlu (a time i smjer njenog kretanja), RVT je jedna od ključnih komponenti ukupne plodnosti tla. O njemu će ovisiti i redoks potencijal tla, kao fizičko-kemijski parametar koji se često koristi za procjenu prozračnosti tla i dostupnosti pojedinih biljnih hranjiva (FAO, 2006).

Umjesto skupim i dugotrajnim mjerenjima, RVT se nerijetko procjenjuje temeljem morfoloških svojstava tla (prvenstveno temeljem boje, ali i građe i konzistencije pojedinih tvorevina tla). Morfologija tla se već duže vrijeme intenzivno koristi kao pokazatelj mjesta i trajanja zasićenja profila tla vodom (Daniels i sur., 1971; Simonson i Boersma, 1972; Bouma, 1983; Franzmeier i sur., 1983; Pickering i Veneman, 1984; Veneman i sur., 1998; He i sur., 2002; Hurt i sur., 2002; Jacobs i sur., 2002; D'Amore i sur., 2004; Fiedler i Sommer, 2004; Rubinić i sur., 2014; 2015a; 2018; Vepraskas, 2015; Durn i sur., 2018). Pritom je za pojavu morfoloških znakova suvišnog vlaženja ključno željezo, kao jedan od najzastupljenijih elemenata u tlu, kojeg karakteriziraju  $Fe^{2+/3+}$  redoks transformacije (Vepraskas, 2015). U mokrim (vodom zasićenim) tlima, željezo, ali i mangan (kojeg karakteriziraju  $Mn^{2+/3+/4+}$  transformacije), se nalaze primarno u svojim reduciranim (divalentnim) oblicima, u kojima su topivi i dostupni biljkama i drugim organizmima, pa u određenim uvjetima mogu doseći i toksične koncentracije (Mitsch i Gosselink, 2015). U vodom nezasićenim tlima, ta dva elementa se u pravilu nalaze u netopivim, oksidiranim (precipitiranim) oblicima, i to kao oksidi, hidroksidi i oksihidroksidi željeza i/ili mangana. Za navedene tri mineralne grupe se često, zbog pojednostavljenja, koristi jedinstven naziv *oksidi*, koji će dalje koristiti i u ovom radu. Glavni izvor željeza i mangana u vodenoj fazi tla su silikatni minerali (uglavnom

feromagnezijski), odnosno njihovo kemijsko trošenje (uglavnom oksidacijom).

Suvišno vlažena tla se, zbog specifične morfologije uvjetovane procesima redukcije i oksidacije različitih spojeva u tlu, često nazivaju hidromorfim. To su većinom glejna (Gleysols), pseudoglejna (Stagnosols) i oglejena fluvijalna tla (Gleyic Fluvisols). Uslijed velike raširenosti takvih tala po svijetu, njihove morfološke značajke obrađivale su se koristeći vrlo različite pojmove i kriterije. To je, naravno, znatno otežavalo usporedbu i ujednačenu klasifikaciju hidromorfih tala iz različitih dijelova svijeta. U Hrvatskoj su najčešće korišteni pojmovi bili mramoriranje/mramorizacija i oglejavanje (Škorić i sur., 1985; Škorić, 1986; Husnjak, 2014). Pritom se prvi pojam odnosi na morfologiju koja je rezultat povremene stagnacije površinske (uglavnom oborinske) vode u tlu te podrazumijeva „prošaranost tla hrđastim i bjeličastivim pjegama ili mazotinama“, uz nepostojanje oštre podjele na redukcijski i oksidacijski horizont. Drugi pojam - oglejavanje - odnosi se na morfologiju gleja, koja je najčešće rezultat dugotrajne prisutnosti visoke podzemne vode u tlu te podrazumijeva dominaciju sivo-zelenkastih ili plavih zona u donjem (reduciranom) dijelu profila tla, a hrđastih u gornjem, tek povremeno zasićenom i zato sekundarno oksidiranom. U referentnim međunarodno korištenim priručnicima za opis i klasifikaciju tla uvriježili su se nazivi *mottling* (FAO, 2006), *stagnic/gleyic properties* (IUSS Working Group WRB, 2015) i *redoximorphic features* (Soil Survey Staff, 1999; Schoeneberger i sur., 2002).

Četiri temeljna cilja ovog preglednog rada su redom: i) prikazati vrste morfoloških značajki povezanih sa suvišnim vlaženjem tala, istaknuti njihova ključna obilježja, te objasniti mehanizme njihovog postanka; ii) za obrađene značajke tla predložiti revidirane nazive na hrvatskom jeziku, koji bi bili u skladu s onima uvriježenima u Međunarodnoj referentnoj bazi tala (*World Reference Base for Soil Resources*; WRB; IUSS Working Group WRB, 2015) te američkoj Taksonomiji tla (*Soil Taxonomy*; ST; Soil Survey Staff, 1999), kao dva trenutno najznačajnija sustava za klasifikaciju tla, temeljena na globalno referentnim priručnicima za opis tla (redom, FAO, 2006;

te Schoeneberger i sur., 2002); iii) dati kritički pregled kriterija i pravila za dijagnosticiranje i označavanje morfoloških značajki i klasifikaciju suvišno vlaženih tala prema WRB sustavu, te ih usporediti s onima korištenima u Hrvatskoj; te iv) analizirati mogućnosti i ograničenja korištenja morfoloških značajki tla kao pokazatelja RVT.

## MORFOLOŠKE ZNAČAJKE KOJE UKAZUJU NA SUVIŠNO VLAŽENJE TLA

### *Boja suvišno vlaženih tala i njena determinacija*

Boja tla odražava njegov kemijski sastav i prošle/sadašnje oksidacijsko-redukcijske uvjete (FAO, 2006). Stoga je jasno da ima središnju ulogu pri procjeni RVT temeljem morfologije tla. Boja se nerijetko koristi i kao pokazatelj sadržaja organske tvari u tlu (npr. Rubinić i sur., 2021). Posljedično, ona se učestalo određuje u brojnim pedološkim (ali i geološkim) istraživanjima. Iako postoje i druge metode za njenu determinaciju, ona općeprihvaćena se odnosi na vizualnu procjenu korištenjem Munsellovog atlasa (Munsell Color, 2000). Navedeni atlas omogućuje standardiziranu, objektivnu i semikvantitativnu klasifikaciju boje prema tri komponente: i) osnovna boja (*hue*) - dominantna boja u odnosu na crvenu, žutu, zelenu, plavu i ljubičastu, ii) svjetlina (*value*) - stupanj svjetline/tamnoće boje u rasponu od 0 (čisto crna) do 10 (čisto bijela), te iii) intenzitet (*chroma*) - stupanj čistoće/zasićenosti boje na ljestvici od 0 (neutralna) do 8 (najintenzivnija). Autori smatraju da su gore predloženi (i dalje u tekstu korišteni) prijevodi engleskih naziva Munsell komponenti jednostavni, smisleni i informativni. Naime, sami pojmovi *hue*, *value*, i *chroma* su teško prevodivi u doslovnom smislu (zbog čega su najčešće i korišteni u izvornom obliku, odnosno na engleskom jeziku).

U Munsell Color (2000) atlasu, postoje stranice za slijedeće osnovne boje: 10R, 2.5YR, 5YR, 7.5YR, 10YR, 2.5Y, 5Y (pritom slova R i Y označavaju crvenu (*red*) i žutu (*yellow*), dok brojeke 2.5, 5, 7.5 i 10 označavaju stupnjeve osnovnih boja). Posebno su, na stranicama atlasa označenim kao GLEY1 i GLEY2, izdvojene osnovne boje gleja: N, 10Y, 5GY, 10GY, 5G, 10G, 5BG, 10BG, 5B, 10B, 5PB; pri čemu slova N, G, B i P označavaju redom

neutralnu (*neutral*), zelenu (*green*), plavu (*blue*) i ljubičastu (*purple*).

Munsell oznake za svaku komponentu kombiniraju se da bi tvorile jedinstvenu brojčano-slovnju šifru i pripadajući standardizirani opis boje tla riječima (npr., šifra 10YR 6/4 govori da je osnovna boja 100% žutosmeđa, da je njena svjetlina 6, a intenzitet 4; pri čemu je pripadajući opis ove boje - „svjetlo žučkasto-smeđa“).

### *Vrste, postanak i svojstva morfoloških značajki suvišno vlaženih tala*

U američkim sustavima za opis i klasifikaciju tla (Soil Survey Staff, 1999; Schoeneberger i sur., 2002) sve sive, plavo-zelene, žute, crvene, smeđe ili crne tvorevine tla, nastale redukcijom, pokretanjem i kasnijom oksidacijom željezovih (ili manganovih) sastojaka tla zbog gubitka ili stvaranja pigmenta u usporedbi s bojom ukupnog volumena tla (odnosno matrice tla - *soil matrix*), nazivaju se redoksimorfnim značajkama (RMZ). Engleski termin za ove značajke je *redoximorphic features* (RMFs). One tvore specifični uzorak boja u tlu, koji indicira promjenjivu vlažnost tla (Tiner, 1999). Vepraskas (2015) i Schoeneberger i sur. (2002) detaljno opisuju tri osnovne skupine RMZ: redoks koncentracije (*redox concentrations*), redoks deplecije (*redox depletions*) i reduciranu matricu (*reduced matrix*). Gore se predlažu (i dalje u tekstu koriste) prevedeni pojmovi, za koje autori smatraju da su, iako nepotpuno uvriježeni u hrvatskom jeziku, precizniji, specifičniji i usklađeniji s izvornim pojmovima, nego što bi bili npr. redoks nakupine, redoks osiromašenja i reducirano tlo. U Tablici 1 se prikazuje detaljnija podjela RMZ (s predloženim pojmovima na hrvatskom jeziku), koja se u narednim podpoglavljima dodatno pojašnjava.

### *Redoks koncentracije*

Redoks koncentracije su lokalizirane zone pojačane pigmentacije u odnosu na matricu tla, nastale nakupljanjem oksidiranih (precipitiranih) oblika Fe i/ili Mn. Boje tih tvorevina su razne nijanse crvene, narančaste, žute i smeđe, a ovisе o njihovom mineralnom sastavu (Tablica 2). Redoks koncentracije uglavnom izgrađuju Fe oksidi, od

kojih su najvažniji getit i hematit (Tablica 2), te podređeno Mn oksidi, najčešće birnesit, vernadit, litioforit ili holandit (Durn i sur., 2001). Pritom tamnije do crne koncentracije u pravilu sadrže više Mn i manje Fe, a one svjetlije više Fe i manje Mn (Zhang i Karathanasis, 1997). Vepraskas (2015) sugerira sljedeće osnovne boje redoks koncentracija u ovisnosti o dominantnom mineralu željeza: 10R - 2.5YR (hematit), 5YR (ferihidrit), 7.5YR (lepidokrokrit), 7.5YR - 10YR (getit), te 2.5Y (jarozit).

Redoks koncentracije dijele se na mase (*masses*), kao necementirane (meke) tvorevine uglavnom nepravilnih oblika, te nodule (*nodules*) i konkrecije (*concretions*), kao tvrde i uglavnom okruglaste tvorevine građene od čestica tla cementiranih spojevima Fe ili Mn (Schoeneberger i sur., 2002.; Slike 1 i 2).

Posljedično, za razliku od masa, nodule i konkrecije mogu se iz tla izvaditi nenarušene (Slika 1). Sve one u pravilu nastaju unutar matrice tla, odnosno dalje od velikih pora. Smatra se da mase nastaju kada zrak u mokro tlo ulazi sporo, postupno oksidirajući reducirane ione željeza i mangana, dok nodule i konkrecije nastaju kad on ulazi brzo, i to u dio tla koji sadrži puno Fe<sup>2+</sup> i Mn<sup>2+</sup> (Vepraskas, 2015). Posljedično, formiranje tvrdih koncentracija je obično izraženije u uvjetima oštrijih smjena mokre i suhe faze tla (Ćirić, 1984).

Slično kao i FAO (2006), Schoeneberger i sur. (2002.) razlikuju konkrecije od nodula temeljem njihove građe - na poprečnom presijeku konkrecija vide se slojevi, kojih u nodulima nema. Posljedično, konkrecije su, za razliku od nodula, većinom sferične (Slika 1). U korelaciji s drugim

**Table 1.** Species of soil redoximorphic features (RMFs)

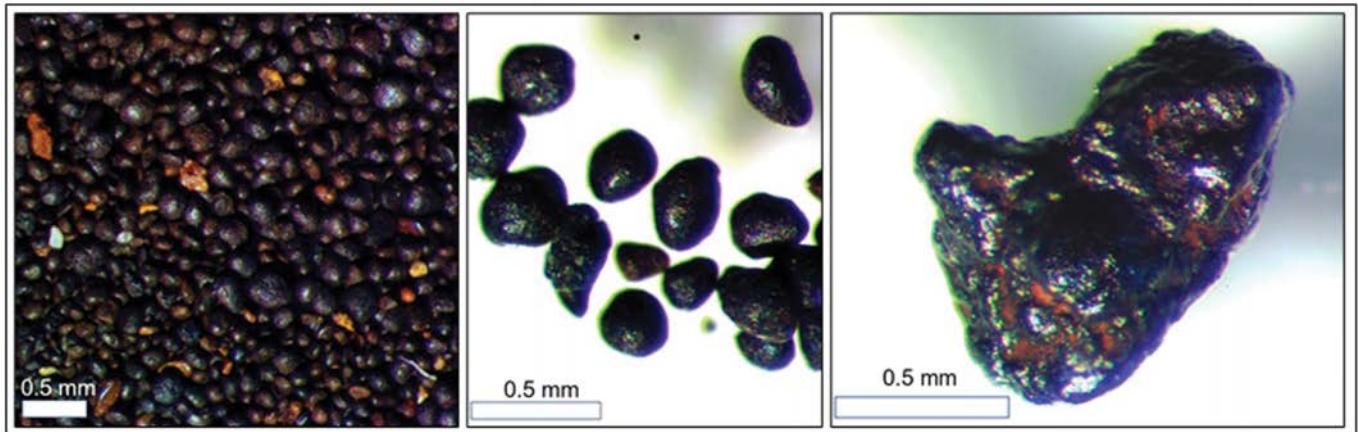
**Tablica 1.** Vrste redoksimorfni značajki (RMZ) tla

RMFs formed by Fe/Mn oxidation RMZ nastale oksidacijom Fe/Mn				RMFs formed by Fe/Mn reduction RMZ nastale redukcijom Fe/Mn	
Redox concentrations Redoks koncentracije				Redox depletions Redoks deplecije	
Non-cemented Necementirane		Cemented Cementirane		Reduced matrix Reducirana matrica	
Pore linings Obloge pora	Masses Mase	Nodules Nodule	Concretions Konkrecije	Clay depletions Deplecije gline	Iron depletions Deplecije željeza

**Table 2.** Oximorphic soil colour patterns and iron minerals that cause them

**Tablica 2.** Oksimorfni uzorci boja tla i minerali željeza koji ih uzrokuju

Soil colour Boja tla	Mineral formula (Fe=Fe <sup>3+</sup> ) Formula minerala (Fe=Fe <sup>3+</sup> )	Mineral name Naziv minerala
Reddish brown Crvenkasto smeđa	Fe <sub>10</sub> O <sub>14</sub> (OH) <sub>2</sub>	Ferrihydrite Ferihidrit
Yellowish brown Žućkasto smeđa	α-FeO(OH)	Goethite Getit
Orange Narančasta	γ-FeO(OH)	Lepidocrocite Lepidokrokrit
Dark orange Tamno narančasta	Fe <sub>16</sub> (OH,SO <sub>4</sub> ) <sub>12-13</sub> O <sub>16</sub> · 10-12H <sub>2</sub> O	Schwertmannite Švertmanit
Red Crvena	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Hematite Hematit
Light yellow Svjetlo žuta	KFe <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub>	Jarosite Jarozit



**Figure 1.** (Source: Goran Durn). **Left:** Concretion and nodule concentrate isolated from a palaeosol sample after rinsing with water, sieving (0.032 mm), and separation with a binocular (calcite and quartz grains were removed from the fraction). **Middle:** Concretions isolated from the concretion and nodule concentrate (leftmost image). **Right:** A nodule isolated from the concretion and nodule concentrate (leftmost image).

**Slika 1.** (Izvor: Goran Durn). **Lijevo:** Koncentrat konkrecija i nodula izdvojen iz uzorka paleotla nakon ispiranja vodom, prosijavanja sitom (0.032 mm) i separacije na binokularu (iz frakcije su uklonjena zrna kalcita i kvarca). **Sredina:** Konkrecije izdvojene iz koncentrata konkrecija i nodula (slika krajnje lijevo). **Desno:** Nodula izdvojena iz koncentrata konkrecija i nodula (slika krajnje lijevo).



**Figure 2.** (Source: Vedran Rubinić). **Left:** A detail (in reality, photograph is 12 cm wide) of the *in situ* morphology of a soil horizon with stagnic properties. Masses and linings (coatings) of reprecipitated iron (brown to orange) and manganese (black) represent soft redox concentrations. Albic material (grey) represents reduced matrix parts (sporadically) or local depletions of iron (mainly). **Middle:** Cross section of a core sample (in reality, photograph is 5 cm wide) taken from a soil with both stagnic and gleyic properties. One can observe fine, light brown to orange, soft masses along the larger, darker, and more cemented nodules/concretions of iron and/or manganese. Redox concentrations are mostly surrounded by greenish-gray soil matrix, which is reduced and/or iron-depleted. The white spot on the surface of the sample is a cut off concretion of calcium carbonate. **Right:** A clod from a soil profile with gleyic properties. Soil matrix is reduced (almost entirely bluish gray, probably due to the presence of vivianite), whereas along the root channels iron reprecipitates to form oxidized rhizospheres (light orange colors).

**Slika 2.** (Izvor: Vedran Rubinić). **Lijevo:** Detalj (slika je u stvarnosti široka 12 cm) *in situ* morfologije horizonta tla pod utjecajem stagnirajuće vode. Mase i obloge (prevlake) reprecipitiranih spojeva željeza (smeđe do narančaste boje) i mangana (crne boje) predstavljaju meke redoks koncentracije. Blijedi materijal (siva boja) predstavlja reducirane dijelove matrice tla (manjim dijelom) ili lokalne deplecije željeza (većim dijelom). **Sredina:** Presjek neporušenog uzorka tla (slika je u stvarnosti široka 5 cm) pod utjecajem stagnirajuće vode i oglejavanja. Vidljive su sitne, svjetlo smeđe do narančaste, meke mase te veće, tamnije i cementiranije nodule/konkrecije željeza i/ili mangana. Redoks koncentracije uglavnom su okružene zelenkasto-sivom matricom tla, koja je reducirana i/ili željezom osiromašena. Bijela boja vidljiva na površini uzorka predstavlja prerezanu konkreciju kalcijevog karbonata. **Desno:** Grumen uzet iz profila tla pod utjecajem podzemne vode. Matrica tla je reducirana (gotovo sasvim plavkasto siva, vjerojatno zbog prisutnosti vivijanita), a duž kanala korijena dolazi do reprecipitacije željeza i formiranja oksidiranih rizosfera (svjetlo narančasta boja).

korištenim terminima, redoks koncentracije odgovaraju oksimorfnim bojama i pjegama (FAO, 2006; IUSS Working Group, 2015; Tablica 2), tj. „hrđastim mazotinama“ (Škorić, 1986; Husnjak, 2014).

Vepraskas (2015) izdvaja dodatnu vrstu redoks koncentracija, koju naziva – obloge pora (pore linings). One predstavljaju necementirane slojeve Fe/Mn na površini pore ili pak slabe impregnacije neposredno oko pore (Slika 2). Dakle, razlika između Fe/Mn masa i obloga pora primarno je u mjestu njihova postanka (pa bi se ove druge mogle zapravo smatrati tek podvrstom prvih). Obloge pora nerijetko se pojavljuju uz površinu kanala korijenja, a može ih se naći i na samom korijenju (Vepraskas, 2015; Slika 2). Ponekad se za takve pojave koristi pojam oksidirana rizosfera (oxidized rhizosphere; npr. Tiner, 1999). U svakom slučaju, one se formiraju difuzijom reduciranih iona željeza i mangana iz matrice tla prema zrakom ispunjenim velikim porama, u kojima se ti ioni potom oksidiraju. Ako su u otopini tla prisutni i Fe i Mn, tada Fe reprecipitira prvo (jer oksidira pri nižoj Eh vrijednosti nego mangan), pa su željezni i manganovi oksidi u oblozi pora obično vidljivo razdvojeni, i to na način da su prvi orijentirani od pore prema matrici tla, dok su drugi na samim stjenkama makropora (Vepraskas, 2015).

### Redoks deplecije i reducirana matrica

Redoks deplecije i reducirana matrica, kao preostale dvije osnovne skupine RMZ, uočljivo se morfološki razlikuju od redoks koncentracija (Slike 2 i 4). One se, naime, formiraju u anaerobnim uvjetima, pri niskom redoks potencijalu, te su odgovorne za pojavu boja gleja (Vepraskas, 2015). Mogu se razlikovati deplecije željeza od deplecija gline (Tablica 1).

Prema Schoeneberger i sur. (2002.), sve redoks deplecije su lokalizirane zone smanjene pigmentacije tla, koje su svjetlije (više sive ili manje crvene) od matrice tla. One se mogu pojaviti duž makropora ili unutar matrice tla, u odnosu na koju ih karakterizira slijedeće: više žute, zelene ili plave osnovne boje i/ili veća svjetlina (uobičajeno  $\geq 4$ ) i manji intenzitet boje (uobičajeno  $\leq 2$ ). Lokalni gubitak pigmentacije tla je pritom rezultat potpunog gubitka Fe (i Mn), pri čemu sadržaj gline može biti jednak onome u matrici tla (deplecije željeza) ili djelomično do potpuno smanjen (deplecije gline). U korelaciji s terminima korištenim u nekim drugim izvorima, opisane značajke odgovaraju reduktimorfnim bojama (FAO, 2006; IUSS Working Group, 2015; Tablica 3), odnosno bjeličasto-sivim do plavim pjegama ili mazotinama (Škorić, 1986; Husnjak, 2014).

**Table 3.** Reductimorphic soil colour patterns and iron minerals that cause them (modified after FAO, 2006)

**Tablica 3.** Reduktimorfni uzorci boje tla i minerali željeza koji ih uzrokuju (modificirano prema FAO, 2006).

Soil colour Boja tla	Mineral formula Formula minerala	Mineral name Naziv minerala
Greyish green, light blue Sivkasto zelena, svjetlo plava	$\text{Fe}^{2+}_4\text{Fe}^{3+}_2(\text{OH})_{12}[\text{CO}_3] \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	Fugerite <sup>1</sup> Fugerit <sup>1</sup>
White to grey (brown after oxidation) Bijela do siva (nakon oksidacije smeđa)	$\text{Fe}^{2+}\text{CO}_3$	Siderite Siderit
White, blue after oxidation Bijela, nakon oksidacije plava	$\text{Fe}^{2+}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	Vivianite Vivijanit
Bluish black (after 10% HCl application; H <sub>2</sub> S smell) Plavkasto crna (iza aplikacije 10% HCl; miris H <sub>2</sub> S)	$\text{Fe}^{2+}\text{S}, \text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}_2\text{S}_4$	Various iron sulphides (e.g. pyrite, greigite) Razni sulfidi željeza (npr. pirit, grejgit)
White to grey (no change after oxidation) Bijela do siva (iza oksidacije nema promjene boje)	-	Complete disappearance of iron components from the soil Potpuni nestanak komponenti željeza iz tla

<sup>1</sup> Fugerite belongs to a group of minerals known as "green rust". It is a generic name for different mineral phases of green color, which contain Fe<sup>2+</sup> and Fe<sup>3+</sup>, as well as OH<sup>-</sup> and other anions (most often carbonates, chlorides and/or sulfates).

<sup>1</sup> Fugerit pripada skupini minerala, poznatoj pod nazivom „zelena hrđa“ (green rust). To je generički naziv za različite mineralne faze zelene boje, koje sadrže Fe<sup>2+</sup> i Fe<sup>3+</sup> te OH<sup>-</sup> i druge anione (najčešće karbonate, kloride i/ili sulfate).

Mehanizmi nastanka deplecija željeza i gline su slični te se obje tvorevine mogu pojaviti istovremeno, i to u istom ili u susjednim horizontima tla. Najuočljivije su oko korijenja, gdje rastu uz stjenke njihovih kanala, kao stabilnih makropora (Slika 3). Puno autora korijenju daje primarnu ulogu u formiranju stabilnih makropora, odnosno velikih redoks deplecija u tlu (Ćirić, 1984; Vepraskas, 2015; Resulović i sur., 2008; Rubinić i sur., 2014). Naime, kanali ili pukotine u tlu omogućuju intenzivnu tvorbu redoks deplecija jer u njima korijenje stalno iznova raste i odumire, osiguravajući izvor energije potrebne mikroorganizmima za redukciju željeza. Kada korijenje uginu i makropora se ispuni vodom, mikrobi mogu, pri temperaturama tla  $>5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , konzimirati odumrlo tkivo i reducirati kisik otopljen u vodi (Vepraskas, 2015). U pravilu, kanali ili pukotine se formiraju u zbijenijim horizontima tla sa slabom bioturbacijom. Posljedično, redoks deplecije uglavnom nalazimo u podpovršinskim horizontima sa strukturnim agregatima većih dimenzija i oštrijih rubova. U površinskim horizontima, zbog visokog sadržaja organske tvari i intenzivne bioturbacije, agregati tla su mali, brojni i zaobljeni, a kanali korijena u pravilu nepostojani.

Reducirana matrica, kao zasebna vrsta RMZ, se formira potpunom redukcijom (ne i deplecijom) spojeva željeza u tlu, što je moguće samo ako su horizonti tla bili zasićeni vodom (anaerobni) dovoljno dugo. Ovaj proces rezultira tлом/horizontom s ujednačeno niskim intenzitetom boje. Za razliku od tla s redoks deplecijama, tlo reducirane matrice reagira nakon što se na tridesetak minuta izloži zraku (ili odmah nakon što se pokapa otopinom  $\alpha,\alpha$ -dipiridila – Slika 4) tako što, zbog oksidacije reduciranog željeza, njegova boja postaje crvenija (ružičasta) i svjetlija (Huang, 2001; Schoeneberger i sur., 2002.; Vepraskas, 2015.; Richardson i Vepraskas, 2001).

#### **Opisna obilježja redoksimorfnih značajki**

U ovom poglavlju se objedinjuju i dijelom modificiraju parametri za opis „pjega“ i „mineralnih koncentracija“ prema FAO (2006) te redoksimorfnih značajki prema Schoeneberger i sur. (2002). Pritom se, u slučaju kad se pojedino obilježje kvantificira temeljem nešto drukčijih graničnih vrijednosti, autori priklanjaju onom izvoru za

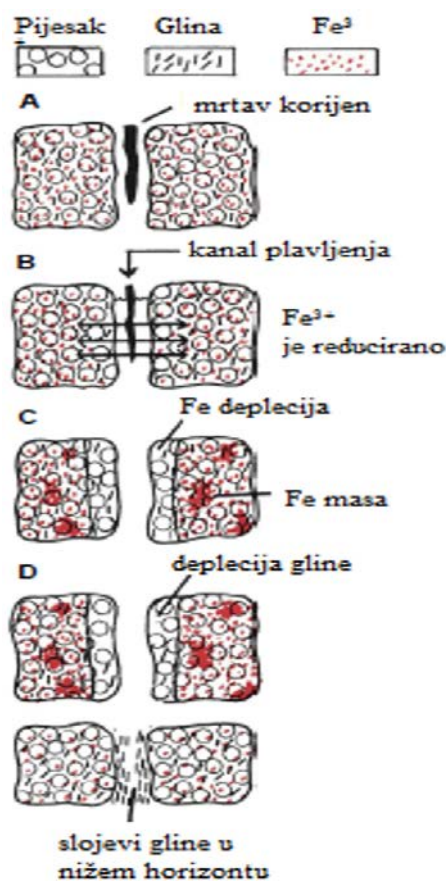
kojeg smatraju da je u specifičnom slučaju jednostavniji i/ili svrhovitiji.

U pravilu, RMZ se opisuju temeljem njihove zastupljenosti, veličine, boje i kontrasta u odnosu na matricu tla, granice u odnosu na matricu tla, oblika, sastava, tvrdoće i građe. Navedena obilježja RMZ izravno su povezana s načinom, trajanjem, učestalošću i/ili aktualnošću suvišnog vlaženja tla, pa imaju indikativnu važnost. Zastupljenost RMZ bilježi se kao postotni udio površine profila (horizonta) tla kojeg te tvorevine prekrivaju, pa ih može biti malo ( $<2\%$ ), dosta (2-20%), ili puno ( $\geq 20\%$ ). Prema njihovoj veličini (presjeku), RMZ se dijele u pet klasa, i to od vrlo sitnih ( $<2\text{ mm}$ ) do ekstremno krupnih ( $>76\text{ mm}$ ). Za brzu terensku procjenu zastupljenosti i veličine RMZ, koriste se odgovarajući grafički predloži iz referentnih priručnika za opis tla (Munsell Color, 2000; Schoeneberger i sur., 2002; FAO, 2006).

Kontrast između boja RMZ i matrice tla može biti slab, vidljiv ili izražen (Tablica 4), a granica između RMZ i matrice tla (debljina zone unutar koje se može zamijetiti promjena boje) difuzna ( $>2\text{ mm}$ ), jasna, ili oštra ( $<0.5\text{ mm}$ ). Schoeneberger i sur. (2002) sugeriraju da pri opisu RMZ treba procijeniti i njihov dominantni sastav, i to temeljem svjetline i intenziteta boje, koji mogu imati slijedeće vrijednosti:  $\leq 2$  (uglavnom mangan), 2-4 (podjednako željezo i mangan), te  $>4$  (uglavnom željezo). Smisleno sugeriraju i da se zabilježi lokacija RMZ u tlu (jednolično raspoređene u matrici, na stjenkama agregata ili pora, na površinama duž kanala korijena, itd.).

Prema obliku, RMZ mogu biti zaobljene, izdužene, plosnate, nepravilne ili uglate. Tvrdoća RMZ utvrđuje se zasebno u vlažnom i suhom tlu, i to temeljem sile potrebne da se tvorevina zdrobi pod prstima ili između dlanova, klasificirajući ju u jednu od 6 klasa (od potpuno nevezane do ekstremno tvrde, koja se ne može zdrobiti). Testiranje tvrdoće RMZ je ključno za razlikovanje mekih masa od tvrdih redoks koncentracija. Prilikom procjene građe RMZ, utvrđuje se (golim okom ili lupom - uz povećanje od 10 puta) eventualna slojevitost tvorevine, što omogućuje međusobno razlikovanje tvrdih redoks koncentracija (nodula i konkrecija).





**Figure 3. Left** (Modified after Vepraskas, 2015): Schematic representation of the formation of a redox depletion (iron and clay depletion) along the dead root channel. **Left-A:** The (sub)vertical cracks in the soil facilitate and direct the growth of the root, which in turn widens, deepens and/or stabilizes such cracks, and eventually dies within them. **Left-B:** The crack in the soil becomes a dead root channel, which in a poorly permeable soil horizon represents a stable void that enables preferential downward flow of water. Due to the above, the soil around the channel often becomes water-saturated, allowing for the intensive microbiological reduction of iron and/or manganese and the movement of water-dissolved divalent iron (and/or manganese) from the channel edges to the drier soil interior. **Left-C:** Repeated and/or prolonged saturation leads to the appearance of albic soil material - usually gray or bluish - along the edges of the channel (iron depletions) and intensely colored soil - usually reddish or orange - inside the aggregates, i.e. the matrix (masses and/or other redox concentrations of reoxidized and reprecipitated iron and/or manganese). **Left-D:** In addition to iron, the water-suspended clay particles are often vertically translocated along the channel (the process of lessivage is intensified), so that iron depletions are often also clay depletions. **Right** (Source: Vedran Rubinić): Large and fresh depletion of iron and clay along the channel of a dead root in the profile of a poorly permeable forest soil. The large depletion is S-shaped and extends throughout the bottom soil horizon. In addition, a number of smaller, older, and/or fragmented redox depletions are visible in the same soil horizon. The clearly observable depletions are generally gray (reductimorphic), friable (coarse-textured), and vertical to subvertical. They penetrate through the poorly permeable soil horizon along cracks/channels, forming tongues of albic material.

**Slika 3. Lijevo** (Modificirano prema Vepraskas, 2015): Shematski prikaz nastanka redoks deplecija (deplecija željeza i gline) duž kanala odumrlog korijena. **Lijevo-A:** (Sub)vertikalne pukotine u tlu olakšavaju i usmjeravaju rast korijena, koji te iste pukotine onda dodatno proširuje, produbljuje i/ili stabilizira, a s vremenom u njima odumire. **Lijevo-B:** Pukotina u tlu postaje kanal odumrlog korijena, koji u slabo propusnom horizontu tla predstavlja stabilnu šupljinu za preferencijalni descendentni tok vode. Zbog navedenog, dolazi do zasićenja tla oko kanala vodom, što omogućuje intenzivnu mikrobiološku redukciju spojeva željeza (i/ili mangana), te kretanje otopljenog dvovalentnog željeza (i/ili mangana) vodom od rubova kanala prema sujoj unutrašnjosti tla. **Lijevo-C:** Opetovano i/ili dugotrajno zasićenje vodom dovodi do pojave blijedih zona - najčešće sivih ili plavičastih - uz rubove kanala (deplecija željeza) te intenzivno obojanih boja - najčešće crvenkastih ili narančastih - u unutrašnjosti agregata, odnosno matrice tla (mase i/ili druge redoks koncentracije ponovo oksidiranih te reprecipitiranih spojeva željeza i/ili mangana). **Lijevo-D:** Osim željeza, iz tla duž pukotine često se vertikalno ispiru i suspendirane čestice gline (intenzivira se proces lesivaže), pa su deplecije željeza nerijetko i deplecije gline. **Desno** (Izvor: Vedran Rubinić): Velika i svježa deplecija željeza i gline duž kanala odumrlog korijena u profilu slabo propusnog šumskog tla. Velika deplecija je u obliku slova S, te se proteže cijelom dubinom najdonjeg horizonta tla. Osim nje, u istom horizontu tla vidljiv je i veći broj manjih, starijih i/ili fragmentiranih redoks deplecija. Jasno vidljive deplecije generalno imaju sivu (reduktimorfnu) boju, rahle su (teksturno lake) te vertikalne ili subvertikalne. One penetriraju kroz slabo propusni horizont tvoreći jezičice blijedog (albičnog) materijala tla.



**Figure 4** (Source: Vedran Rubinić). Pinkish color on the surface of a soil clod is the positive reaction after the application of the  $\alpha,\alpha$ -bipyridyl solution, proving that the soil matrix is reduced due to pronounced gleyic (**Left photograph**) or stagnic properties (**Right photograph**, 8 cm wide in reality). In case no reaction to the applied solution was observed, the albic material (grey soil) would be interpreted as the iron depletion, instead as the reduced matrix.

**Slika 4** (Izvor: Vedran Rubinić). Ružičasta boja na površini grumena tla je pozitivna reakcija tla na primjenu otopine  $\alpha,\alpha$ -dipiridila, odnosno dokaz je postojanja reducirane matrice tla u uvjetima dugotrajnog ogleđavanja podzemnom vodom (**Lijevo**) ili stagniranja površinske vode (**Desno**, fotografija je u stvarnosti 8 cm široka). Da je reakcija tla na otopinu izostala, blijedi materijal (sivi dio tla) bio bi interpretiran kao deplecija željeza, a ne kao reducirana matrica.

**Table 4.** Determination of the colour contrast between the redoximorphic features and the soil matrix (modified according to FAO, 2006)

**Tablica 4.** Determinacija kontrasta između boja redoksimorfne značajke (RMZ) i matrice tla (modificirano prema FAO, 2006)

Contrast Kontrast	Determination criteria Kriteriji za determinaciju
Faint Slab	RMFs are visible only on detailed soil examination - their hues, values and chromas are similar to those of the soil matrix RMZ su vidljive samo pri detaljnom pregledu tla - njihove osnovne boje, svjetlina i intenzitet boje su slični onima matrice tla
Distinct Vidljiv	Although not striking, RMFs are clearly visible - their hues, values and chromas are easily distinguished from those of the soil matrix Iako nisu upadljive, RMZ su jasno vidljive - njihove osnovne boje, svjetlina i intenzitet boje jasno se razlikuju od onih u matrici tla
Prominent Izražen	RMFs are conspicuous, as one of the dominant soil features - their hues, values and chromas (alone or in combination) are at least several units apart from those of the soil matrix RMZ su upadljive te su jedna od dominantnih značajki tla - osnovne boje, svjetlina i intenzitet boje (pojedinačno ili u kombinacijama) se razlikuju za barem nekoliko jedinica u odnosu na one u matrici tla

Schoeneberger et al. (2002) provide more detailed and precise instructions for diagnosing RMFs contrast (based on Munsell color components), which should be taken into account in case of need.

Schoeneberger i sur. (2002) daju detaljnije i preciznije upute za dijagnosticiranje kontrasta RMZ (temeljem Munsell komponenti boje) te ih se preporuča uzeti u obzir u slučaju potrebe.

## DIJAGNOSTICIRANJE I OZNAČAVANJE REDOKSIMORFNIH ZNAČAJKI U SKLADU S WRB/FAO SUSTAVOM TE NJEGOVA USPOREDBA S AMERIČKIM I HRVATSKIM SUSTAVIMA

### Pojava redukcijskih uvjeta i njihovo dokazivanje u tlu

Jedno od istaknutih dijagnostičkih svojstava u WRB sustavu, korišteno pri identificiranju tri Referentne grupe tla (*Reference Soil Groups*) i pojedinih Glavnih/Dopunskih oznaka tla (*Principal/Supplementary qualifiers*), su redukcijski uvjeti (*reducing conditions*) u tlu. Da bi se oni utvrdili, potrebno je u tlu dokazati jedno ili više od sljedećeg: i) negativni logaritam parcijalnog tlaka vodika ( $rH$ ) < 20; ii) prisutnost slobodnog reduciranog željeza ( $Fe^{2+}$ ); iii) prisutnost željezovog sulfida (najčešće pirit – Slika 5, rjeđe markazita); iv) prisutnost metana (IUSS Working Group WRB, 2015). Obzirom da željezov sulfid i metan u većini tala nisu prisutni, oni se i rjeđe koriste kao pokazatelji redukcijskih uvjeta. Najčešće se utvrđuje  $Fe^{2+}$ , i to temeljem crvene (ružičaste) boje nakon aplikacije otopine 0.2%  $\alpha, \alpha'$ -dipidrida u 10% octenoj kiselini na svježe izloženu površinu tla (Slika 4). Upotrebu slične kemikalije za potvrdu reducirajućih uvjeta preporuča i Soil Survey Staff (1999), ističući njenu važnost u tlima u kojima, unatoč zasićenju vodom, nema vidljivih morfoloških pokazatelja redukcije (npr. zbog tamne boje horizonta s puno organske tvari). Pritom treba imati na umu da ova kemikalija ne mora izazvati snažnu crvenu boju u tlima neutralne ili alkalne reakcije, kao i da mora biti svježe pripremljena te ambalažom zaštićena od svjetla (FAO, 2006). Moguće je i da, unatoč postojanju reducirajućih uvjeta u tlu, reakcija na kemikaliju bude negativna jer je razina  $Fe^{2+}$  u tlu jednostavno niska ili je tlo u trenutku testiranja u oksidiranoj fazi (Soil Survey Staff, 1999).

Za izračun  $rH$  ( $rH = 2pH + 2Eh/59$ ,  $Eh$  u mV pri 25 °C; FAO, 2006), kao jednog od pokazatelja eventualnih redukcijskih uvjeta u tlu, potrebno je izravno mjeriti redoks potencijal ( $Eh$ ) tla - najčešće platinastom elektrodom i voltmetrom. Redoks potencijal pokazuje tendenciju otopine tla da prenosi elektrone prema i od referentne elektrode, odnosno da oksidira ili reducira spojeve u tlu. On omogućuje procjenu je li tlo aerobno ili anaerobno, odnosno jesu li pojedini spojevi u tlu oksidirani ili

reducirani. Naime, kako se organska tvar u tlu razgrađuje (oksidira, tj. predaje elektrone), tako  $Eh$  postupno pada, a elementi/spojevi se reduciraju, i to sljedećim redoslijedom: i)  $O_2$  (reducira se prvi, još pri aerobnim uvjetima), ii) nitrati, iii)  $Mn^{4+}$ , iv)  $Fe^{3+}$ , v) sulfati, vi) karbonati (Vasilas i Vasilas, 2004). Pri smanjenju sadržaja vode u tlu (odnosno pri ulasku zraka u tlo), redoslijed i predznak reakcija bit će suprotan, pa će se npr. željezo oksidirati prije mangana.



**Figure 5.** (Source: Goran Durn). Yellowish pyrite concretions and nodules in a grey bauxite of Paleogene age. The shown bauxite, as a laterite soil that had formed in oxidizing conditions, was originally red due to the presence of hematite. Afterwards, due to the prolonged exposure to high water table (marine foreland and transgression), it has changed its colour under the reducing conditions. During the process, sulphate-reducing bacteria that produce  $H_2S$  reduce iron oxides and pyrite is formed. The geological hammer is shown as a scale.

**Slika 5.** (Izvor: Goran Durn). Žučkaste konkrekcije i nodule piritu u sivom paleogenskom boksitu. Prikazani boksit je, kao lateritno tlo koje je nastalo u oksidirajućim uvjetima, izvorno bio crven od hematita. Naknadno je, zbog dugotrajne izloženosti visokoj podzemnoj vodi (napredovanje mora i transgresija), u redukcijskim uvjetima promijenio boju. Pritom se, posredstvom sulfat reducirajućih bakterija koje proizvode  $H_2S$ , reduciraju željezovi oksidi i nastaje pirit. Geološki čekić je prikazan kao mjerilo.

Kako na brzinu naznačenih reakcija utječu temperatura i pH tla, Eh sam po sebi nije uvijek dovoljno precizan pokazatelj reduciranosti tla (Mitsch i Gosselink, 2015), zbog čega se i izračunava rH vrijednost.

Općenito, da bi se u tlu pojavili morfološki znakovi oksidoredukcije, četiri uvjeta moraju biti zadovoljena: i) tlo mora sadržavati organsku tvar koja se može oksidirati (izvor elektrona); ii) mikrobna populacija koja razgrađuje (oksidira) organsko tkivo mora biti aktivna pri anaerobnim uvjetima u tlu; iii) tlo mora biti zasićeno vodom dovoljno dugo da se iz njega istisne atmosferski kisik; iv) voda u tlu mora biti (gotovo) nepokretna (Collins, 2005). Prva dva uvjeta ukazuju na činjenicu da je mikrobiološka razgradnja organske tvari u tlu pokretačka sila bez koje se većina redoks reakcija ne može odvijati, makar tlo bilo zasićeno vodom. Posljednja dva uvjeta proizlaze iz činjenice da bakterije, dok razgrađuju organsku tvar u vodom zasićenom tlu, konzumiraju i kisik otopljen u vodi tla - tek kada se on potroši, voda u tlu postaje reducirana i tlo se može smatrati potpuno anaerobnim sustavom.

#### **Prošaranost tla (oksimorfne i reduktimorfne boje)**

U priručnicima FAO (2006) i IUSS Working Group WRB (2015), u sklopu morfoloških značajki koje ukazuju na zasićenje tla vodom, ističu se temeljni pojmovi *mottling*, *oximorphic colours*, *reductimorphic colours*, te specifični pojmovi *albic material*, *gleyic properties* i *stagnic properties*. Svi oni se dalje u tekstu detaljnije obrađuju, prevode, te uspoređuju s onima korištenima u hrvatskim i američkim sustavima. Dodatno se objašnjavaju načini i razlike u označavanju horizonata suvišno vlaženih tala između navedenih sustava.

Pojam *mottling* proizlazi iz engleske imenice *mottle* (pjega, šara), pa se kao odgovarajući hrvatski pojam ovdje predlaže - prošaranost (Slika 6). Pernar (2017) koristi pojmove pjega i pjegavost, napuštajući u Hrvatskoj uvriježen pojam mramoriranje/mramorizacija (kojeg Husnjak (2014), s druge strane, zadržava). Šare su posljedica lokalne akumulacije oksidiranih oblika Fe/Mn, a vidljive su na licu profila tla kao tvorevine nepravilnog oblika i boje uočljivo različite od one dominantne u matrici tla. Ovdje dakle ubrajamo slijedeće RMZ: mase, nodule i konkrecije.

Šare se u pravilu ubrajaju u oksimorfne boje (*oximorphic colours*; Tablica 2). Takve boje su posljedica oksidacije prethodno reduciranih spojeva Mn/Fe (crna boja ili osnovne boje vlažnog tla koje su barem 2.5 jedinice crvenije i barem jedinicu intenzivnije od dominantne boje matrice tla). FAO (2006) nažalost ne obrađuje sve oksimorfne tvorevine kao značajke specifično vezane za suvišno vlažena tla, već u sklopu sveukupnih mineralnih koncentracija u tlu (poput prevlaka, mekih nakupina, konkrecija i nodula). Pritom se oksimorfne koncentracije razlikuju od ostalih po tome što su građene od spojeva Fe/Mn oksida, a ne od karbonata, silicija, gline, gipsa ili soli. Kao što je u ranijim poglavljima objašnjeno, prevlake se formiraju na stjenkama agregata/pora, a ostale koncentracije unutar matrice tla (pri čemu se konkrecije i nodule razlikuju od mekih nakupina jer su tvrde i jasno izolirane od matrice tla).

Reduktimorfne boje (*reductimorphic colours*) smatraju se slijedeće osnovne boje vlažnog tla: N, 10Y, GY, G, BG, B, PB (i/ili 2.5Y ili 5Y, ali s intenzitetom  $\leq 2$ ). One su posljedica izražene redukcije i/ili potpunog ispiranja spojeva Fe/Mn, kako je ranije prikazano u Tablici 3. Radi se, dakle, o bojama onih RMZ koje nazivamo redoks deplecije (a koje su detaljno obrađene u prethodnim poglavljima).

#### **Morfološka svojstva gleja**

Prema IUSS Working Group WRB (2015), dokazivanje svojstava gleja (*gleyic properties*) nužan je preduvjet za klasifikaciju tla u skupinu Referentne grupe tla Gleysols. Svojstva gleja utvrđuju se u tlima (odnosno u pojedinim slojevima profila) s a)  $\geq 95\%$  zona s reduktimorfne boje i/ili b)  $> 5\%$  zona s oksimorfne boje dominantno duž kanala korijenja i površina agregata (ekstrovertna koncentracija Fe/Mn oksida – Pernar, 2017).

Dakle, svojstva gleja uzrokovana su u pravilu podzemnom vodom koja se kapilarno kreće sitnim (intra-agregatnim) porama prema vrhu profila tla, omogućujući nastanak dva sloja unutar oglejenog profila tla: i) „kontinuirano“ reducirani horizont, kojeg gotovo u cijelosti karakteriziraju reduktimorfne boje, a označava se prema FAO (2006) kao Cr1 (Tablica 5); ii) povremeno reducirani



**Figure 6** (Source: Vedran Rubinić). **Left:** Mottled morphology of a soil horizon with stagnic properties (pseudogleization). Oximorphic colors (mostly black, orange, and dark brown mottles) predominate over reductimorphic colors (albic material), which occur mainly as vertical tongues (albeluvic glossae). **Right:** Reductimorphic colors, formed due to high groundwater in the soil profile, point to gleyic properties.

**Slika 6** (Izvor: Vedran Rubinić). **Lijevo:** Prošarana morfologija horizonta tla pod utjecajem stagnirajuće vode (pseudooglejavanje). Oksimorfne boje (uglavnom crne, narančaste i tamno smeđe šare) dominiraju nad reduktimorfnim bojama (blijedi-albični materijal), koje uglavnom imaju oblik vertikalnih ježica. **Desno:** Reduktimorfne boje, nastale zbog visoke podzemne vode u profilu tla, upućuju na oglejavanje.

horizont, kojeg karakteriziraju reduktimorfne boje unutar strukturnih agregata tla i oksimorfne pri njihovoj površini, a označava se kao Cl (FAO, 2006; Tablica 5). Obično se Crl nalazi ispod Cl, ali se u mnogim tlima (barem do dubine od oko 1.5 m) nailazi na samo jedan od ova dva horizonta.

Prema Škoriću i sur. (1985), da bi se sloj tla označio slovom G kao glejni (Tablica 5), on mora pokazivati barem jedno od dvoga: i) plavičastu, zelenkastu ili sivu boju, kao znakove redukcije uslijed stalnih anaerobnih uvjeta (Gr pothorizont); ii) „hrđaste mazotine“ na površinama agregata, kao znakove sekundarne oksidacije uslijed povremenih anaerobnih uvjeta (Gso pothorizont). Tla često imaju oba ova pothorizonta, a njihov redosljed u profilu ovisi o porijeklu suvišne vode tla (podzemna ili gornja). Dakle, sustav Škorića i sur. (1985) je donekle kompatibilan s onim FAO (2006), ali uz bitne razlike, odnosno nedostatke. Kao prvo, Škorić i sur. (1985) nedovoljno preciziraju te gotovo uopće ne kvantificiraju morfološke značajke potrebne za dijagnosticiranje navedenih pothorizonta. To svakako olakšava i pojednostavljuje opis profila tla, ali ostavlja mogućnost neujednačene morfološke determinacije i manje pouzdane klasifikacije

tla. Posljedično, objektivne usporedbe različitih profila tla (pogotovo analiziranih od strane različitih istraživača) su često otežane ili nemoguće. Kao drugo, za razliku od FAO (2006), Škorić i sur. (1985) izdvajaju glejni horizont kao zasebni osnovni horizont. Autori ovog rada se priklanjaju stavu da redoks procesi uzrokovani suvišnim vlaženjem samo modificiraju različite osnovne horizonte (najčešće C horizont), odnosno da ne dovode do formiranja novih osnovnih horizonata tla (FAO, 2006). Naime, visoka razina podzemne vode inhibira ispiranje (prvenstveno bazičnih kationa, a potom i gline, spojeva Fe/Mn, itd.) i zakiseljavanje u tlu, a time i pedogenetske izmjene matičnog supstrata tla.

Husnjak (2014) detaljnije razrađuje oznake prema Škoriću i sur. (1985), izdvajajući tri G pothorizonta temeljem zastupljenosti hrđastih mazotina u odnosu na plavičasto zelene boje tla: i) glejni oksidirani (Go), >75%; ii) glejni sekundarno oksidirani (Gso), 50-75%; te iii) glejni redukcijski (Gr) <50%. Dakle, u odnosu na sustav Škorića i sur. (1985), ovaj sustav označavanja horizonata je znatno precizniji i bolje kvantificiran. Međutim, on je kompliciraniji i drukčiji od sustava FAO (2006).

**Table 5.** Designations and names for the horizons of excessively wetted soils**Tablica 5.** Oznake i nazivi suvišno vlaženih horizonata tla

Source Izvor	Name Naziv	Designation Oznaka
Škorić et al. (1985) Škorić i sur. (1985)	Gleyic subhorizon with secondary oxidation Sekundarno oksidirani glejni pothorizont	Gso <sup>1</sup>
	Reduced gleyic subhorizon Reducirani glejni pothorizont	Gr <sup>1</sup>
	Pseudogleyic horizon Pseudoglejni horizont	g <sup>2</sup>
FAO (2006)	Horizon with capillary fringe mottling/gleying Oglejeni horizont	l <sup>3</sup>
	Horizon with stagnic conditions Horizont sa svojstvima/uvjetima stagniranja vode	g <sup>2</sup>
	Horizon with strong reduction (Fe <sup>2+</sup> compounds) Reducirani horizont s Fe <sup>2+</sup> u svom sastavu	r <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Gso and Gr are usually one under/above the other in a profile, as the gleyic horizon (G) subhorizons

<sup>1</sup> Gso i Gr najčešće u profilu prisutni jedan ispod/iznad drugog, kao pothorizonti glejnog horizonta (G)

<sup>2</sup> Not used alone, but together with a master horizon designation, e.g. Ag, Eg, Bg, Cg

<sup>2</sup> Ne piše se samostalno, već uz oznaku za neki osnovni horizont, npr. kao Ag, Eg, Bg, Cg

<sup>3</sup> Not used alone, but together with a master horizon designation (mostly with C, as Cl or Crl, but also with some other master horizons, such as A or B)

<sup>3</sup> Ne piše se samostalno, već uz oznaku za neki osnovni horizont (najčešće uz C, kao Cl ili Crl, ali i uz druge osnovne horizonte, poput A ili B)

### Morfološka svojstva stagniranja vode

Prema IUSS Working Group WRB (2015), svojstva stagniranja vode (*stagnic properties*) nužan su preduvjet za klasifikaciju tla u Referentne grupe Planosola ili Stagnosola. Ova svojstva utvrđuju se u tlima (ili horizontima) barem privremeno zasićenima površinskom vodom, i to dokazivanjem barem jedne od sljedećih morfoloških značajki: i) prošaranost tla pri kojoj su oksimorfne zone dominantno unutar agregata (introvertna koncentracija Fe/Mn – Pernar, 2017); ii) reduktimorfne zone uglavnom duž kanala korijenja i površina agregata, i to sa svjetlinom/intenzitetom boje vlažnog tla barem jednu jedinicu većom/nnižim nego u matrici tla; iii) sloj tla s blijedim materijalom (*albic material*), izravno iznad sloja s naglim porastom udjela gline (*abrupt textural difference*) ili prošaranog sloja tla. Ovdje se napominje da pseudogleji kontinentalne Hrvatske uglavnom zadovoljavaju prva dva, a nerijetko i sva tri uvjeta (Rubinić i sur., 2015b). Blijedi materijal nastaje u sloju tla iz kojeg su uklonjeni organska tvar i/ili slobodni oksidi željeza ili u kojem su ti oksidi

toliko segregirani da je prevladavajuća boja tla određena bojom čestica pijeska i praha (Slika 4). Posljedično, blijedi materijal podrazumijeva da barem 90% matrice tla ima svjetlinu/intenzitet boje 7-8/≤3 ili 5-6/≤2 (kad je tlo suho), odnosno 6-8/≤4, 5/≤3 ili 4/≤2 (kad je tlo vlažno).

Dakle, svojstva stagnirajuće vode rezultat su redukcije Fe/Mn spojeva prisutnih oko i unutar većih šupljina. Naime, suvišno vlaženje gornjom (najčešće oborinskom) vodom odvija se uglavnom u blizini krupnih (inter-agregatnih) pora, kanala i pukotina, koje omogućuju da gravitacijska voda prolazi i kroz slabo propusni horizont tla (Rubinić i sur., 2014; Vepraskas, 2015). Husnjak (2014) piše da oborinska voda u profilu tla stagnira kako na slabo propusnom horizontu, tako i u njemu. Ćirić (1984) i Sauer i sur. (2009) naglašavaju da su redukcijski procesi ipak intenzivniji u sloju neposredno iznad slabo propusnog horizonta, a da potonjeg zahvaćaju prvenstveno u njegovom gornjem dijelu, šireći se kroz (sub)vertikalne pukotine u obliku sivkastih jezičaca (Slike 3 i 6). Posljedično, reducirani i topivi spojevi Fe/Mn mogu biti

sasvim isprani iz sloja iznad slabo propusnog horizonta, što rezultira pojavom blijedog materijala unutar čitavog tog sloja (najčešće unutar ispranog Eg horizonta). S druge strane, Fe/Mn često samo migriraju unutar sloja tla (u pravilu unutar slabo propusnog Bg horizonta) s rubova agregata u njihovu sušu unutrašnjost, gdje reprecipitiraju (što rezultira pojavom reduktimorfnih boja na površinama agregata tla i oksimorfnih u njihovoj unutrašnjosti). Dakle, svi horizonti pod očitim utjecajem stagnirajuće vode (bez obzira na intenzitet redukcije) označavaju se prema FAO (2006) dodavanjem sufiks oznake g odgovarajućem osnovnom horizontu tla (Tablica 5).

U sustavu Škorića i sur. (1985), horizont pod utjecajem isključivo stagnirajućih oborinskih voda naziva se pseudoglejni horizont. On se formira uslijed opetovanih smjenjivanja mokre i suhe faze tla, koja uzrokuju „mramoriranost tla“ - sive boje prevladavaju u pukotinama i na površinama agregata, a hrdaste u unutrašnjosti agregata. Kao i kod glejnog G horizonta, precizni (kvantitativni) kriteriji za utvrđivanje pseudoglejnog horizonta nisu dati. Za razliku od glejnog, pseudoglejni horizont nema predviđenih pothorizonta i označava se slovom g, kao jedini osnovni horizont koji se u sustavu Škorića i sur. (1985) označava malim slovom abecede. To je ujedno i jedini osnovni horizont tog sustava, koji se u pravilu ne piše kao samostalan, već s nekim drugim osnovnim horizontom, najčešće kao prijelazni Eg ili Bg horizont (Škorić i sur., 1985). Prema mišljenju autora ovog rada, ovakav način označavanja nedosljedan je i zbunjujući, te u neskladu s već ranije iznesenim stavom da procesi uzrokovani suvišnim vlaženjem samo modificiraju već postojeće osnovne horizonte, a ne dovode do formiranja novih.

Husnjak (2014) također smatra pseudoglejni horizont osnovnim horizontom tla, ali ga, potpuno smisljeno, označava velikim slovom (koristeći slovo S umjesto g). Poput Škorića i sur. (1985), on ga također ne piše kao zasebni horizont, već zajedno s nekim drugim horizontom u kojem se javlja pseudooglejavanje. Međutim, umjesto da ga piše kao prijelazni, on ga, opet opravdano, piše kao složeni horizont (najčešće kao E/S ili B/S). Pritom Husnjak

(2014) dodatno izdvaja četiri oblika pseudoglejnog horizonta, i to temeljem kvantificiranja zastupljenosti hrđastih mazotina u odnosu na one sive: i) pseudoglejni horizont kratke mokre faze (Sk), >80%; ii) pseudoglejni horizont srednje duge mokre faze (Ssd), 60-80%; iii) pseudoglejni horizont duge mokre faze (Sd), 40-60%; te iv) pseudoglejni/redukcijski horizont vrlo duge mokre faze (Sr), <40%. Iako, s jedne strane, oznake i pripadajući kriteriji koje autor predlaže predstavljaju pomak u odnosu na sustav Škorića i sur. (1985), s druge strane oni su komplicirani te opet neusklađeni s FAO (2006).

#### ***Dijagnosticiranje i označavanje morfologije suvišno vlaženih tala u američkim sustavima***

U sustavu Soil Taxonomy (ST), dijagnostičko svojstvo vezano za klasifikaciju tala koja su trajno ili povremeno zasićena vodom te reducirana ima naziv - akvatični uvjeti (*aquic conditions*). Pritom, na prisutnost takvih uvjeta upućuju mjerenja zasićenja i redukcije tla i/ili utvrđivanje odgovarajućih morfoloških značajki u tlu (prvenstveno, intenzitet boje tla  $\leq 2$ ). Slično kao i u WRB sustavu, i u ST postoje dijagnostički uzorci boja specifični za pojedine skupine tala s akvatičnim uvjetima (uglavnom unutar podredova Aqualfs, Aquolls i Aquults). Međutim, pojmovi vezani za morfologiju takvih tala se bitno razlikuju od onih korištenih u WRB sustavu. Kao prvo, u ST su sve morfološke tvorevine nastale oksidoredukcijom u tlu objedinjene pojmom redoksimorfne značajke (Soil Survey Staff, 1999; Schoeneberger i sur., 2002). One se razmatraju izdvojeno od pjega tla. Navedeni pristup prihvaćen je i u ovom radu. Zbog toga se, pored pregleda dijagnostičkih svojstava i materijala vezanih za opis/klasifikaciju hidromorfnihih tala prema FAO/WRB, u radu koriste i pojmovi u skladu s američkim sustavima. Naime, šare u tlu uključuju i one mineralne (ali i organske) koncentracije koje nisu posljedica oksidoredukcije u tlima (Vepraskas, 2015). Stoga, za razliku od FAO (2006) i IUSS Working Group WRB (2015), Soil Survey Staff (1999) te Schoeneberger i sur. (2002) opravdano izdvajaju RMZ od ostalih nakupina (npr. soli) ili prevlaka (npr. gline).

Unatoč detaljnim i kvalitetnim kriterijima za determinaciju i opis RMZ, američki referentni izvori

zaostaju po pitanju označavanja suvišno vlaženih horizonata tla. Naime, u tu svrhu se koristi samo sufix g (koji se dodaje uz slovnju oznaku za neki osnovni horizont), koji označava jako oglejeni horizont (*horizon with strong gley*). Takav horizont karakterizira intenzitet boje  $\leq 2$  te reducirano ili isprano željezo (NRCS, 2010). Kao i u FAO (2006), horizont s oznakom g podrazumijeva prvenstveno stagniranje gornje vode (unatoč pojmu *gleying* u njegovom opisu!), a posebne oznake za horizont pod utjecajem podzemne vode, začudo, nema.

## POVEZANOST REDOKSIMORFNE MORFOLOGIJE I REŽIMA VLAŽENJA TLA

### *Mogućnosti korištenja redoksimorfnih značajki za procjenu režima vlaženja tla*

Jacobs i sur. (2002) su utvrdili da se, u klima koja nisu pjeskovita, reducirana matrica pojavljuje kada je tlo zasićeno vodom kumulativno tijekom razdoblja duljeg od polovice godine, dok se deplecije i koncentracije Fe pojavljuju i kada zasićenje traje kraće od oko tri mjeseca godišnje. He i sur. (2003) su pokazali da je za potpunu redukciju Fe potrebno da tlo bude zasićeno vodom 21 dan uzastopno, kao i da zastupljenost RMZ pozitivno korelira s prosječnim brojem dana zasićenosti tla. Potonje je dokazano i ranijim istraživanjima (npr. Vepraskas, 2002). Jedno istraživanje, koje su proveli Vepraskas i sur. (2008), pokazalo je da RMZ mogu nastati već nakon 7 dana zasićenosti vodom. Pritom se, u tlu zasićenom vodom, koncentracije mangana, a potom i željeza, tipično pojavljuju već nakon nekoliko dana, dok je za formiranje deplecija potrebno više vremena.

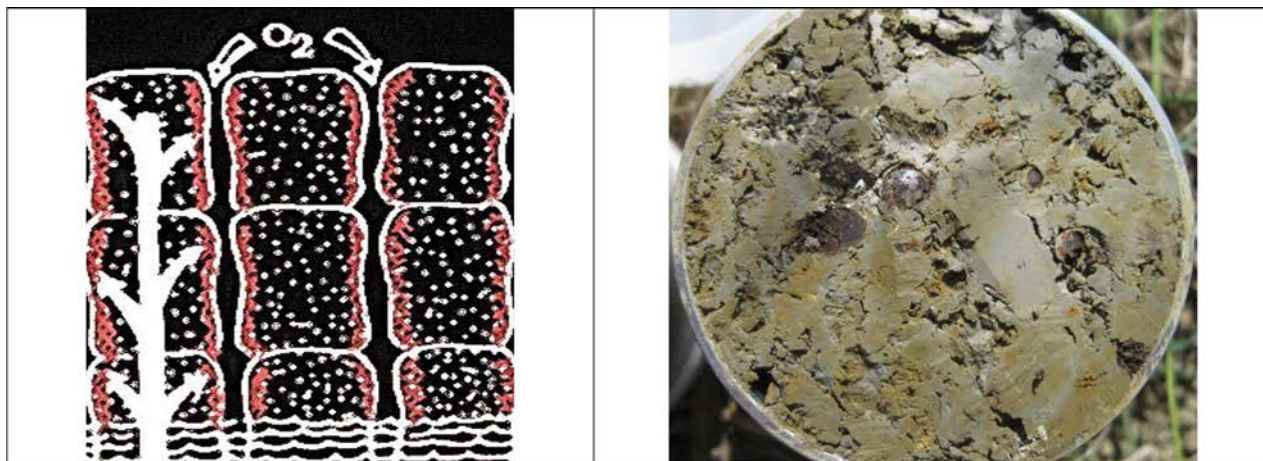
Osim što može ukazati na učestalost i dugotrajnost suvišnog vlaženja profila (ili pojedinog horizonta) tla, uzorak RMZ može ukazati i na porijeklo vode koja takvo vlaženje uzrokuje. Kako je već ranije u radu prikazano, stagnirajuća površinska voda uzrokovat će morfologiju (Slika 3) različitu od one koju bi uzrokovala visoka podzemna voda u tlu (Slika 7). Obzirom na navedeno, često je temeljem RMZ moguće jasno razlučiti da li je tlo suvišno vlaženo gornjom (episaturacija) i/ili donjom (endosaturacija) vodom (Vepraskas, 2015).

Razni autori (D'Amore i sur., 2004; Cobb i sur., 2008; Rubinić i sur., 2014) ističu da difuzne granice mekih RMZ ukazuju na njihov recentni postanak i kontinuirani razvoj *in situ*, a time i na aktualnost suvišnog vlaženja tla. S druge strane, nodule i konkrecije, zbog svoje tvrdoće, mogu u tlu opstati kao reliktnne, pa nisu uvijek pouzdan indikator aktualnog RVT (Stoops i Eswaran, 1985; Schoeneberger i sur.; 2002; Dear i Svensson, 2007; Vepraskas, 2015; Durn i sur., 2018). Naime, na područjima koja su hidrološki izmijenjena (bilo zbog promjena klime, odnosno smanjenja količine oborina i/ili povećanja temperature, ili zbog izravnog ljudskog utjecaja, odnosno odvodnje i/ili regulacije vodotokova), nodule i konkrecije nakon prestanka (dugotrajnog) suvišnog vlaženja tla prestaju rasti i poprimaju sve oštrije rubove (Slike 1 i 7). Na površini takvih reliktnih tvorevina mogu se naći recentne prevlake gline ili sekundarnih karbonata, predstavljajući dodatnu potvrdu prestanka njihovog rasta (Slika 7). Naravno, moguće je da se u istom profilu, pa čak i istom horizontu tla, istovremeno nalaze i reliktnne i recentne redoks koncentracije (Slika 7). Potonje je uobičajen slučaj u ocrvenjenim materijalima (npr. Durn i sur., 2018).

### *Mogući problemi pri korištenju redoksimorfnih značajki za procjenu režima vlaženja tla*

Uz prikazane mogućnosti korištenja RMZ za brzu procjenu suvišnog vlaženja tla, postoje i određena ograničenja, koja u pojedinim tlima/horizontima mogu otežati ili potpuno onemogućiti takvu procjenu. Kao što je ranije istaknuto, ako tlo nije zasićeno vodom dovoljno dugo da bi se iz njega istisnuo sav atmosferski kisik (Collins, 2005) ili ako je sama voda u tlu još svježja i bogata kisikom (Dear i Svensson, 2007), RMZ se neće razviti unatoč zasićenosti tla vodom (jer ne postoje redukcijski uvjeti u tlu). Nadalje, redukcija željeza i tvorba povezanih RMZ se nerijetko odgađa u tlima s visokim udjelom mangana, obzirom da se on reducira prije željeza (Vasilas i Vasilas, 2004). Naravno, u tlima s niskom razinom Fe (i Mn), RMZ se niti neće moći razviti (Huang, 2001; Dear i Svensson, 2007). Poznato je da mikrobna populacija treba organsko tkivo (ugljik), kako bi ga oksidirala i time omogućila redukciju drugih spojeva u tlu (Huang, 2001;





**Figure 7. Left** (Modified after Vepraskas, 2015): Simplified representation of a redoximorphic features pattern formed due to excessive wetting by groundwater. Redox concentrations (oxidized forms of Fe and Mn compounds - colored red) precipitate along the edges of the soil aggregates, i.e. of the air( $O_2$ )-filled macropores. At the same time, the soil matrix inside the aggregates is reduced due to excessive capillary wetting (white arrows). Below the groundwater level, the soil is completely reduced, so redox concentrations do not form. **Right** (Source: Vedran Rubinić): The cross-section of an undisturbed soil sample (in reality, the image is 5 cm wide). Light brown to orange, irregular masses are soft redox concentrations, which indicate actual excessive soil wetting. Notably darker and rounded nodules/concretions with sharp edges are harder (cemented) redox concentrations, in some places coated with secondary carbonates (white color), representing the relics of the past soil moisture regime.

**Slika 7. Lijevo** (Modificirano prema Vepraskas, 2015): Pojednostavljeni prikaz uzorka redoksimorfne značajke nastalih suvišnim vlaženjem donjom (podzemnom) vodom tla. Redoks koncentracije (oksidirani oblici Fe i Mn spojeva - obojani crveno) precipitiraju uz rubove agregata tla, odnosno zrakom (kisikom) ispunjenih makropora. Istovremeno, matrica tla je unutar agregata reducirana, i to zbog suvišnog kapilarnog vlaženja vodom (bijele strelice). Ispod razine podzemne vode, tlo je u potpunosti reducirano, pa se redoks koncentracije ne formiraju. **Desno** (Izvor: Vedran Rubinić): Presjek neporušenog uzorka tla (slika je u stvarnosti široka 5 cm). Svjetlo smeđe do narančaste, nepravilne mase su meke redoks koncentracije, koje upućuju na aktualno suvišno vlaženje tla. Uočljivo tamnije i zaobljenije nodule/konkrete oštrog ruba su tvrde (cementirane) redoks koncentracije, koje su ponegdje prevučene sekundarnim karbonatima (bijela boja), te predstavljaju relikte nekadašnjeg režima vlaženja tla.

Collins, 2005). Međutim, čak i u slučaju postojanja dovoljne količine organske tvari, mikroorganizmi moraju biti potpuno aktivni, što u pravilu nije slučaj u alkalnim, hladnim i/ili zaslanjenim tlima (Huang, 2001; Dear i Svensson, 2007). Gore su, dakle, istaknuti najčešći slučajevi pri kojima se RMZ ne formiraju, iako je tlo zasićeno vodom.

Postoji i obrnuta mogućnost, pri kojoj se RMZ pojavljuju u profilu tla ili horizontu, koji zapravo nije zasićen vodom. Tako Jacobs i sur. (2002) upozoravaju da redoks koncentracije u nezasićenoj zoni profila tla mogu biti tek odraz kapilarnog uspona podzemne vode iz zasićene zone ili pak suvišnog vlaženja gornjom vodom koje se događa samo iznimno (npr. tijekom ekstremnih kiša). Treba imati na umu i da redoks koncentracije ukazuju isključivo na oksidaciju koja se dogodila nekad u prošlosti, nakon redukcije (Vepraskas, 2015). Reducirana matrica, s druge strane, jest čvrsti dokaz trenutne prisutnosti

reducirajućih uvjeta u tlu. Međutim, taj se dokaz odnosi isključivo na mjesto njene pojave, a ne nužno na cijeli horizont tla (Vepraskas, 2015).

Što se tiče mogućnosti postojanja reliktnih RMZ, ona je već obrađena u prethodnom poglavlju. Ovdje se, kao poseban problem, ističu slučajevi u kojima nije sa sigurnošću moguće utvrditi da li su RMZ u pojedinom tlu/horizontu recentne ili nisu. Naime, malo oštrije granice i povećana cementiranost redoks koncentracija ne moraju nužno značiti da su one reliktna. Utvrđeno je da su već i meke koncentracije Fe/Mn (mase) manje propusne za vodu od okolne matrice tla, pa su kao takve, tijekom kasnijih sezonskih saturacija, manje podložne ispiranju željeza i mangana, zbog čega njihove granice s vremenom postaju oštrije, a građa nerijetko koncentrična (PiPujol i Buurman, 1998). Do navedenog nerijetko dolazi u pseudogleju, kao tlu povremeno saturiranom tijekom godine (Rubinić i sur., 2014; 2015b).

Na kraju, treba spomenuti i vrlo čest slučaj, pri kojem se u fino strukturiranom tlu (obično u A horizontu) redoks deplecije na terenu vrlo teško ili nikako ne uočavaju (npr. Rubinić i sur., 2014). Naime, u takvim tlima uslijed intenzivne bioturbacije dolazi do fizičkog narušavanja (fragmentiranja) deplecija (Vepraskas, 2015). Osim toga, obzirom na njihove boje, deplecije su u horizontima s puno humificirane organske tvari gotovo potpuno maskirane (Stoops, 2003; Vepraskas, 2015). Nadalje, u crven(kast)im tlima također može biti vrlo teško uočiti pojedine RMZ, prvenstveno redoks koncentracije nastale precipitacijom željeza (Dear i Svensson, 2007; Durn i sur., 2018). Međutim, obzirom da crvenična tla na području Mediterana tipično nastaju na propusnoj karbonatnoj stijeni te da sadrže visok udio željeza (kao poznatog strukturoformatora), njihova je struktura i poroznost dobro razvijena, a značajnijeg suvišnog vlaženja u profilu nema (Husnjak, 2014).

Unatoč navedenim ograničenjima, može se zaključiti da su RMZ iznimno vrijedan indikator suvišnog vlaženja tla. Dobro poznavanje njihove morfologije, odnosno načina i uvjeta njihovog formiranja, omogućuje brzu inicijalnu procjenu RVT. Ovisno o ciljevima istraživanjima i/ili uvjetima u tlu, ponekad će biti nužno napraviti i naknadne laboratorijske i/ili mikromorfološke analize (ili čak osigurati kontinuirano praćenje režima vlaženja tla na terenu). Međutim, u velikom broju slučajeva, već i prva terenska opažanja vezana za RMZ mogu osigurati potrebne informacije o RVT. Pritom je svakako potrebno pridržavati se uvriježene i općeprihvaćene metodologije, kao i prateće standardizirane terminologije.

## ZAHVALA

Ovaj rad dijelom je financirala Hrvatska zaklada za znanost pod projektom broj IP-2019-04-8054 – WianLab (Western Istrian Anticline as an ideal natural laboratory for the study of the regional unconformities in carbonate rocks). Autori su zahvalni recenzentima rada na njihovim komentarima, ispravcima i sugestijama.

## LITERATURA

- Bouma, J. (1983) Hydrology and soil genesis of soils with aquic moisture regimes. In: Wilding, L. P., Schmeck, N. E., Hall, G. F. eds. Pedogenesis and soil taxonomy. I. Concepts and interactions. Elsevier, Amsterdam, the Netherlands. pp. 253–281. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)70604-4](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)70604-4)
- Cobb, P. R., Conta, J. F., Severson, E. D., Stull, R. L. (2008) Recommended Procedures and Standards for Conducting a Water Table Study. Blacksburg, Virginia: College of Agriculture and Life Sciences.
- Collins, N. B. (2005) Wetlands: The Basics and Some More. Republic of SA, Free State Province: Free State Department of Tourism, Environmental and Economic Affairs.
- Čirić, M. (1984) Pedologija. Sarajevo: Svjetlost.
- D'Amore, D. V., Scott, R. S., Huddleston, J. H. (2004) Saturation, Reduction, and the Formation of Iron-Manganese Concretions in the Jackson-Frazier Wetland, Oregon. *Soil Science Society of America Journal*, 68 (3), 1012-1022. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.1012>
- Daniels, R.B., E.E., Gamble, Nelson., L.A. (1971) Relations between soil morphology and water-table levels on a dissected North Carolina Coastal Plain Surface. *Soil Science Society of America Journal*, 35 (5), 781–784. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1971.03615995003500050041x>
- Dear, S., Svensson, T. (2007) Soil Indicators of Queensland Wetlands, Phase 1: Literature Review and Case Study. Queensland Au: Queensland government.
- Durn, G., Slovenec, D., Čović, M. (2001) Distribution of Iron and Manganese in Terra Rossa from Istria and its Genetic Implications. *Geologia Croatica*, 54 (1), 27-36. DOI: <https://doi.org/10.4154/GC.2001.03>
- Durn, G., Wacha, L., Bartolin, M., Rolf, C., Frechen, M., Tsukamoto, S., Tadej, N., Husnjak, S., Li, Y., Rubinić, V. (2018) Provenance and formation of the red palaeosol and lithified terra rossa-like infillings on the Island of Susak: A high-resolution and chronological approach. *Quaternary international*, 494, 105-129. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2017.11.040>
- Fiedler, S., Sommer, M. (2004) Water and Redox Conditions in Wetland Soils—Their Influence on Pedogenic Oxides and Morphology. *Soil Science Society of America Journal*, 68 (1), 326–335. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.0326>
- FAO (2006) Guidelines for soil description, Rome: FAO.
- Franzmeier, J., Yahner, E., Steinhardt, G. C., Sinclair Jr., H. R. (1983) Color patterns and water table levels in some Indiana soils. *Soil Science Society of America Journal*, 47 (6), 1196–1202. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1983.03615995004700060027x>
- He, X., Vepraskas, M. J., Lindbo, D. L., Skaggs, R., W. (2003) A Method to Predict Saturation Frequency and Duration from Soil Color. *Soil Science Society of America Journal*, 67 (3), 961-969. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2003.0961>
- He, X., M. J., Vepraskas, R. W., Skaggs, Lindbo, D. L. (2002) Adapting a drainage model to simulate water table levels in coastal plain soils. *Soil Science Society of America Journal*, 66 (5), 1722–1731. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2002.1722>
- Huang, J. (2001) Effects of Energy Source and Soil Reaction on Redox, Soil Color and Sesquioxide Transformation for the Moreland and Sharkey Soils. LSU Historical Dissertations and Theses, 345, Louisiana State University.
- Hurt, G. W., Whited, P. M., Pringle, R. F. (2002) Field indicators of hydric soils in the United States. Version 5.0. Fort Worth, TX: USDA-NRCS.
- Husnjak, S. (2014) Sistematika tala Hrvatske. Zagreb: Hrvatska Sveučilišna Naklada.

- IUSS Working Group WRB (2015). World reference base for soil resources 2014, Update 2015 - International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. Rome: FAO.
- Jacobs, P. M., West, L. T., Shaw, J. N. (2002) Redoximorphic features as indicators of seasonal saturation, Lowndes County, Georgia. *Soil Science Society of America Journal*, 66 (1), 315–323.  
DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2002.0315>
- Mitsch, W. J., Gosselink, J. G. (2015) *Wetlands*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Munsell Color (2000) *Munsell soil color charts: with genuine Munsell color chips*. Grand Rapids, MI: Munsell color.
- NRCS (2010): *Keys to Soil Taxonomy*. 11<sup>th</sup> edition. Washington: USDA.
- Pernar, N. (2017) *Tlo: nastanak, značajke, gospodarenje*. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu Šumarski fakultet.
- Pickering, E. W., Veneman, P. L. M. (1984) Moisture regimes and morphological characteristics in a hydrosquence in Central Massachusetts. *Soil Science Society of America Journal*, 48 (1), 113–118.  
DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1984.03615995004800010021x>
- PiPujol, M. D., Buurman, P. (1998) Analyzing ground-water gley and surface-water (pseudogley) effects in paleosols. *Quaternary International*, 51/52, 77–79.  
DOI: [https://doi.org/10.1016/S1040-6182\(98\)90230-0](https://doi.org/10.1016/S1040-6182(98)90230-0)
- Resulović, H., Čustović, H., Čengić, I. (2008) *Sistematika tla/zemljišta: nastanak, svojstva i plodnost*. Sarajevo: Poljoprivredno-prehrambeni fakultet Univerziteta u Sarajevu.
- Richardson, J. L., Vepraskas, M. J. (2001) *Wetland soils: genesis, hydrology, landscapes and classification*. USA: CRC Press LLC.
- Rubinić, V., Durn, G., Husnjak, S., Tadej, N. (2014) Composition, properties and formation of Pseudogley on loess along a precipitation gradient in the Pannonian region of Croatia. *Catena*, 113, 138–149.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.10.003>
- Rubinić, V., Galović, L., Husnjak, S., Durn, G. (2015a) Climate vs. parent material – Which is the key of Stagnosol diversity in Croatia? *Geoderma*, 241/242, 250–261.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.11.029>
- Rubinić, V., Lazarević, B., Husnjak, S., Durn, G. (2015b) Climate and relief influence on particle size distribution and chemical properties of Pseudogley soils in Croatia. *Catena*, 127, 340–348.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.12.024>
- Rubinić, V., Galović, L., Lazarević, B., Husnjak, S., Durn, G. (2018) Pseudogleyed loess derivatives – the most common soil parent materials in the Pannonian region of Croatia. *Quaternary International*, 494, 248–262.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2017.06.044>
- Rubinić, V., Pavlović, A., Magdić, I. (2021) Predikcija sadržaja organske tvari tla pomoću boje tla na tri lokacije s različitim načinom korištenja zemljišta u Zagrebu (Hrvatska). *Journal of Central European agriculture*, 22 (3), 646–656.  
DOI: <https://doi.org/10.5513/JCEA01/22.3.3193>
- Sauer, D., Schulli-Maurer, I., Sperstad, R., Sorensen, R., Stahr, K. (2009) Albeluvisol development with time in loamy marine sediments of southern Norway. *Quaternary International*, 209, 31–43.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2008.09.007>
- Schoeneberger, P. J., Wysocki, D. A., Benham, E. C., Broderson, W.D. (2002) *Field Book for Describing and Sampling Soils*. Lincoln: USDA-NRCS, National Soil Survey Center.
- Simonson, G.H., Boersma, L. (1972) Soil morphology and water table relations: II. Correlation between annual water table fluctuations and profile features. *Soil Science Society of America Journal*, 36 (4), 649–653.  
DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1972.03615995003600040041x>
- Soil Survey Staff, 1999. *Soil Taxonomy: A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys*. Second Edition. Agriculture Handbook, No. 436. USA: USDA-NRCS.
- Stoops, G. (2003) *Guidelines for analysis and description of soil and regolith thin sections*. Madison, Wisconsin: Soil Science Society of America, Inc.
- Stoops, G., Eswaran, H. (1985) Morphological characteristics of wet soils. In: *Wetland soils - Characterization, classification and utilization*. Proceedings. Manila: International Rice Research Institute, pp. 177–190.
- Škorić, A., Filipovski, G., Čirić, M. (1985) *Klasifikacija zemljišta Jugoslavije*. Sarajevo: Akademija nauka i umjetnosti Bosne i Hercegovine.
- Škorić, A. (1986) *Postanak, razvoj i sistematika tla*. Zagreb: Fakultet poljoprivrednih znanosti.
- Tiner, R. W. (1999) *Wetland indicators: a guide to wetland identification, delineation, classification, and mapping*. Boca Raton, Florida: CRC Press, LLC.
- Vasilas, L. M., Vasilas, B. (2004) *A Guide to Hydric Soils in the Mid-Atlantic Region*. Morgantown, West Virginia: USDA-NRCS.
- Veneman, P. L. M., Spokas, L. A., Lindbo, D. L. (1998) Soil moisture and redoximorphic features: A historical perspective. In: Rabenhorst, M. C., Bell, J. C., McDaniel, P. A., eds. *Quantifying soil hydromorphology*, 54. Madison, WI.: Soil Science Society of America Special Publications, pp. 1–23.  
DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub54.c1>
- Vepraskas, M. J. (2002) *Redox Potential Measurements*. Raleigh: North Carolina State University.
- Vepraskas, M. J. (2008) *Interpreting Morphological Features in Wetland Soils With a Hydrologic Model*. *Catena*, 73 (2), 153–165.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2007.07.005>
- Vepraskas, M. J., (2015) *Redoximorphic Features for Identifying Aquic Conditions*. Technical Bulletin 301. Raleigh: North Carolina State University.
- Zhang, M., Karathanasis, A. Z. (1997) Characterization of Iron-Manganese Concretions in Kentucky Alfisols with Perched Water Tables. *Clays and Clay Minerals*, 45, 428–439.  
DOI: <https://doi.org/10.1346/CCMN.1997.0450312>