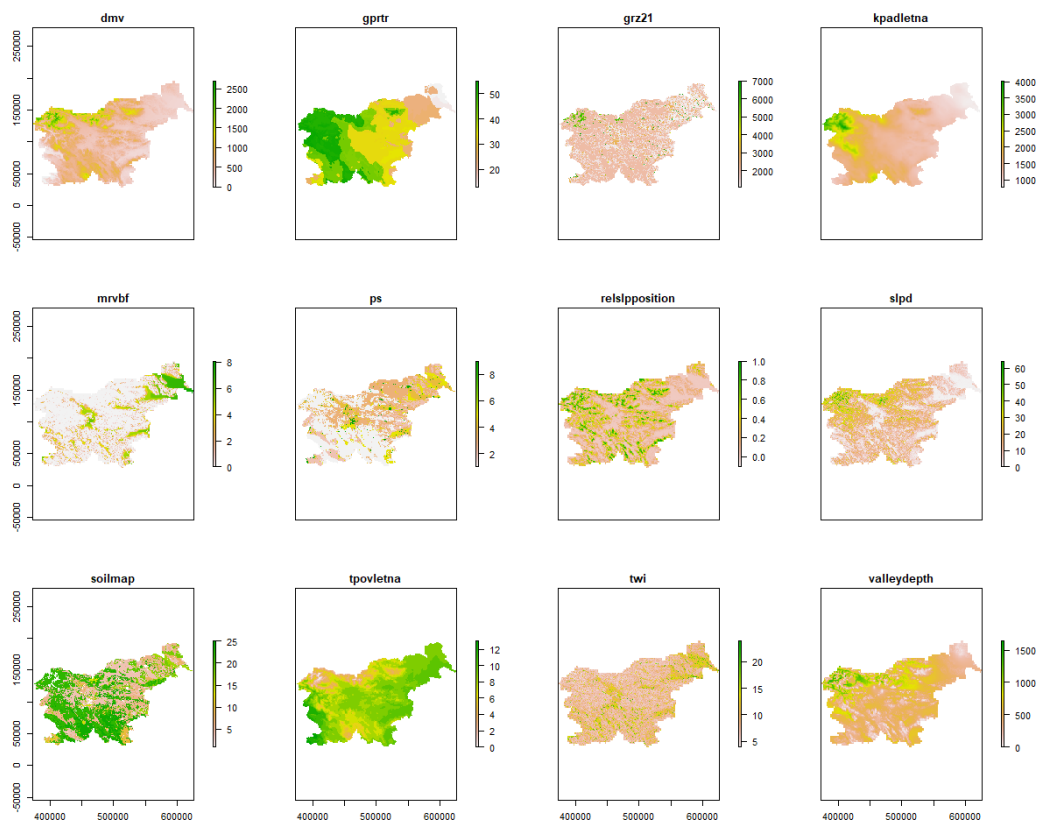

Izdelava ocene zalog talnega organskega ogljika v kmetijskih zemljiščih Slovenije

Končno poročilo

(Pogodba št. 2550-22-311048 (MOP))



Ljubljana, 28.2.2023

Izdelava ocene zalog talnega organskega ogljika v kmetijskih zemljiščih Slovenije

Končno poročilo

Naročnik

Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano (MKGP),
Direktorat za kmetijstvo,
Sektor za trajnostno kmetijstvo, Oddelek za sonaravno kmetijstvo in podnebne spremembe
Skrbnik pogodbe za naročnika: Nikolaj Grgurevič

Avtorji poročila

Janez BERGANT, Peter Kastelic, Borut VRŠČAJ

Sodelovali pri izvedbi projekta

Monika Gričnik

Izvajalci

Kmetijski inštitut Slovenije (KIS), Oddelek za kmetijsko ekologijo in naravne vire (OKENV), Center za tla in okolje

Odgovorni nosilec

Dr. Borut Vrščaj, Kmetijski inštitut Slovenije, Oddelek za kmetijsko ekologijo in naravne vire;

E: Borut.Vrscaj@kis.si; **T:** +386 (0)1 280 52 90; **http://www.kis.si/okenv/**

Vodja izvedbe projekta in dodatne informacije

Janez Bergant **E:** jani.bergant@kis.si; **T:** +386 (0)1 280 229;

Obdobje izvajanja: 30.09.2022 – 28.2.2023

dr. Borut Vrščaj
(nosilec projekta)

 2023.02.27
07:35:21
+01'00'

Janez Bergant
(vodja izvedbe projekta)

Janez
Bergant Digitalno podpisal
Janez Bergant
Datum: 2023.02.24
11:16:08 +01'00'

prof. dr. Andrej Simončič
(direktor)

Andrej Simončič Digitalno podpisal Andrej Simončič
Datum: 2023.02.28 09:55:28 +01'00'

Kazalo

Kazalo	3
Kazalo slik	5
Kazalo preglednic	6
1 Uvodna beseda	7
1.1 O pomenu povečevanja ogljika v tleh kmetijskih zemljišč	7
1.2 Ocena zalog talnega organskega ogljika v okviru FAO GSP GSOCmap	7
1.3 Ocena zalog talnega organskega ogljika v tleh kmetijskih zemljišč na podlagi novejših merjenih podatkov tal Slovenije	7
2 Namen in cilji	8
3 Pregled literature in FAO GSP metode za oceno zalog organskega ogljika v tleh kmetijskih zemljišč	9
3.1 FAO in globalno partnerstvo za tla (GSP)	9
3.1.1 Spletne strani FAO	9
3.1.2 Svetovni Posvet o zalogah ogljika v tleh	10
3.1.3 Poročila in priročniki	10
3.1.4 Brošure in zgibanke	11
3.1.5 Video vsebine	11
3.2 Vpliv rabe zemljišč, agrotehnik in talnih tipov	11
4 O metodološkem pristopu ocene zalog ogljika v tleh KZ	13
4.1 Priprava podatkov	13
4.2 Prostorski model ocene vsebnost talnega organskega ogljika	13
4.3 Izdelava kart, statistična obdelava podatkov in priprava poročila	13
5 Zbiranje, harmonizacija in priprava merjenih podatkov tal (vsebnost ogljika v tleh, gostota tal, kamnitost,...)	15
5.1 Podatki vzorčenja tal	15
5.2 Priprava merjenih podatkov tal, harmonizacija in obdelava	17
5.3 Rezultati priprave merjenih podatkov tal	19
6 Zbiranje, harmonizacija in predobdelava podatkov, ki predstavljajo vplivne dejavnike za zaloge ogljika v tleh	23
6.1 Standardni parametri za pripravo prostorskih rastrskih slojev	23
6.2 Uporabljeni podatkovni sloji kot spremenljivke (kovariate)	23

6.2.1	Digitalni model višin in njegovi derivati	23
6.2.2	Klimatski podatki.....	24
6.2.3	Podatki tal	25
6.2.4	Podatki rabe zemljišč in pokrovnosti	26
7	Gradnja prostorskega modela zalog ogljika (izbira in test metodoloških prilagajanj modela razmeram v Sloveniji).....	27
7.1	Območje proučevanja in območje ocene zalog ogljika	27
7.2	Izdelava prostorskega modela za oceno zalog ogljika v tleh z metodo regresijske interpolacije.....	27
8	Validacija rezultatov in izpopolnjevanje modela napovedi zalog ogljika v tleh kmetijskih zemljišč na globini 0 – 30 cm	29
8.1	Metoda izdelave zalog ogljika v tleh iz prvega faznega poročila	29
8.2	Metode validacije in opis izpopolnjevanja algoritma modela	29
8.3	Rezultati validacije in izpopolnjevanja modela	30
9	Rezultati projektne naloge.....	33
9.1	Rastrski sloj zalog organskega ogljika v tleh kmetijskih zemljišč Slovenije (t C/ha) na globini 0-30 cm	33
9.2	Interpretacija rezultatov in splošne ugotovitve	33
9.3	Smernice.....	41
10	Spletna predstavitev rezultatov celotne projektne naloge naročniku	42
11	Zasnova in izdelava ilustrirane elektronske brošure o zalogah ogljika v tleh.....	43
VIRI		44

Kazalo slik

Slika 1: Shematski prikaz algoritma modela SOCmapSI-RK.	14
Slika 2: Lokacije vzorčenja tal za oceno zalog ogljika v kmetijskih tleh Slovenije med leti 2016 – 2022.....	15
Slika 3: Določanje skeletnosti tal na terenu (a) ter pripomoček za objektivnejše določanje volumskega deleža skeleta v tleh (b)	16
Slika 4: Porazdelitev zalog ogljika do globine 30 cm na vzorčnih lokacijah (t/ha).....	18
Slika 5: Porazdelitev logaritmiranih vrednosti zalog ogljika.	19
Slika 6: Histogram logaritmiranih zalog talnega ogljika lokacij vzorčenja med učnim in testnim setom.	20
Slika 7: Prikaz zalog organskega ogljika v tleh 0 – 30 cm (t/ha) po rabah zemljišč.	21
Slika 8: Nazoren prikaz razlik v količini organske snovi in zalogi ogljika po globinah tal (primer ene od vzorčnih lokacij). Razlike so opazne v barvi vzorca tal kot tudi iz rezultatov laboratorijskih analiz.	22
Slika 9: Pripravljeni prostorski sloji v resoluciji 20x20, ki v model vstopajo kot neodvisne spremenljivke za oceno zalog organskega ogljika v tleh.	28
Slika 10: Razpršeni grafikon napovedanih in merjenih vrednosti validacijskega seta. Črna premica je teoretična linija 1:1 med napovedjo in merjenimi vrednostmi, modra črta pa predstavlja dejansko regresijsko premico med merjenimi in napovedanimi vrednostmi za model SOCmapSI-GM in SOCmapSI-RK.....	31
Slika 11: Ocena zalog talnega organskega ogljika po modelu SOCmapSI-GM (fazno poročilo)...	32
Slika 12: Ocena zalog talnega organskega ogljika po modelu SOCmapSI-RK (končno poročilo)..	32
Slika 13: Karta ocene zalog talnega organskega ogljika po modelu SOCmapSI-RK (končno poročilo)	38
Slika 14: Primerjava povprečnih zaloge ogljika v tleh kmetijskih zemljišč po modelu SOCmapSI-RK z izmerjenimi na lokacijah terenskih vzorčenj 2016 – 2022 (primarna os). Prikaz skupnih zalog ogljika (sekundarna os).	39
Slika 15: Površina kmetijskih zemljišč, ki jih zajamemo v model SOCmapSI-RK.	40
Slika 16: Površinska pokritost modela SOCmapSI-RK v po kmetijskih zemljiščih Slovenije.....	40
Slika 17: Vabilo na zaključno predstavitev dela na projektu za naročnika.	42
Slika 18: Izsek iz elektronske brošure o zalogah ogljika v tleh.....	43

Kazalo preglednic

Preglednica 1: Vplivni dejavniki na vsebnost organske snovi v tleh.....	12
Preglednica 2: Analizirani parametri na vzorcih tal vzorčenja za oceno zalog ogljika v tleh med leti 2016 – 2022.....	16
Preglednica 3: Povzetek napak napovedi za modela SOCmapSI-GM in SOCmap-RK.....	31
Preglednica 4: Povzetek vrednosti uporabljenih kazalcev za oceno kakovosti modela SOCmapSI-GM in SOCmap-RK.....	31
Preglednica 5: Povzetek regresijskega modela SOCmap-RK.....	36

Kazalo prilog

Priloga 1: Rastrski sloj z vrednostmi ocenjenih zalog ogljika v tleh Slovenije (SI_OCSTHA_RK.tif). Rastrski sloj je priložen temu poročilu kot ločena digitalna priloga. Več podrobnosti o tehničnih lastnostih sloja v priloženi datoteki berime.txt	46
<i>Priloga 2: Tiskana karta ocene zalog ogljika v tleh kmetijskih zemljišč Slovenije priložena kot poster A0 v dveh izvodih temu poročilu.</i>	<i>46</i>
Priloga 3: Elektronska brošura o zalogah ogljika v tleh (priložena kot datoteka 20230227_Corg2023-letak-v2.pdf).....	46
Priloga 4: Seznam uporabljenih vhodnih prostorskih slojev v modelu. Sloji ki predstavljajo potencialne vplivne dejavnike na zalogo ogljika v tleh.....	47
Priloga 5: Karta ocene zalog ogljika v tleh Slovenije v velikosti formata A2 in priložena kot digitalna priloga temu poročilu (20230225_Karta_OCS_A2v3_300DPI.tif).....	49

1 Uvodna beseda

1.1 O pomenu povečevanja ogljika v tleh kmetijskih zemljišč

Organski ogljik v tleh oziroma količina talne organske snovi v tleh (TOS) je del mnogo večjega ogljikovega cikla, ki vključuje kroženje ogljika skozi tla, vegetacijo, ocean in ozračje. Vzdrževanje in povečanje zalog TOS s pomočjo dobrih kmetijskih praks uporabe in trajnostnega upravljanja s tlemi lahko pomaga pri preprečevanju naraščanja atmosferskega CO₂. Povečanje vsebnosti TOS v tleh izboljšuje tudi kemijske in fizikalne lastnosti tal kot so predvsem zadrževanje/vezava hranil, zmogljivost zadrževanja vode, vezava organskih in anorganskih onesnaževal.

Povečevanje TOS v tleh je posledično lahko stroškovno učinkovit in okolju prijazen način shranjevanja ogljika v tla, razbremenjevanje ozračja toplogrednega CO₂ in s tem blaženje podnebnih sprememb. Lahko pa izboljša tudi druge ekosistemske storitve kot so; kmetijska proizvodnja, oskrba s čisto vodo in biotska raznovrstnost.

1.2 Ocena zalog talnega organskega ogljika v okviru FAO GSP GSOCmap

Priprava globalne in s tem nacionalnih prostorskih ocen zalog organskega ogljika v tleh (SloSOCmap) je bila pobuda FAO Global Soil Partnership (GSP) v sklopu globalne karte zalog ogljika (Global Soil Organic Carbon map - GSOCmap). Tako kot druge države je bila tudi Slovenija povabljen, da z ostalimi državami članicami OZN prispeva nacionalno karto TOS, v skladu s pristopom »od spodaj navzgor«. Prva verzija karte SloSOCmap za območje Slovenije je bila izdelana leta 2017 (Kmetijski inštitut Slovenije, 2017) v skladu z metodologijo FAO GSP v globalni ločljivosti 1 x 1 km. Karta je bila izdelana na podlagi merjenih podatkov vsebnosti talnega organskega ogljika v 1681 pedoloških profilov izvedenih pred letom 2000. Ti talni profili so bili izkopani za namen izdelave Pedološke karte Slovenije merila 1 : 25.000 (PK25). Ker parameter gostote tal pri opisu profilov ni bil merjen, smo ga morali napovedati z uporabo pedotransferne funkcije.

1.3 Ocena zalog talnega organskega ogljika v tleh kmetijskih zemljišč na podlagi novejših merjenih podatkov tal Slovenije

Med leti 2016 in 2022 smo v Sloveniji izvedli sistematično vzorčenje tal za oceno zalog ogljika na kmetijskih zemljiščih do globine 30 cm. Prednost omenjenega vzorčenja je enotna metodologija pridobivanja podatkov in vključuje sistem zbiranja podatkov o lokaciji vzorčenja, vzorčenje tal in priprava vzorcev, poenotene analitske metode. Prav zaradi enotnega sistema so podatki med leti popolnoma primerljivi in dober temelj za nadaljnje analize in obdelave kot je ocena zalog ogljika v tleh.

Med leti 2016 in 2020 so bila skupno vzorčena tla na 485 lokacijah, razporejenih enakomerno po Sloveniji po različnih kmetijskih rabah zemljišč, glede na različne vrste tal. Merjeni so bili vsi talni parametri, ki omogočajo natančnejši izračun zalog ogljika v tleh (vsebnost organskega ogljika, gostota tal in delež kamnitosti).

2 Namen in cilji

V tej nalogi je glavni cilj izdelati novo karto zalog ogljika v tleh, ki bo dobro predstavljala trenutno stanje in za katero imamo dobro osnovo v zbirki podatkov vzorčenja med leti 2016 – 2022.

Namen javnega naročila je izdelava **ocene trenutnih zalog organskega ogljika v tleh Slovenije** (SOCmapSI) iz pridobljenih podatkov vzorčenja tal med leti 2016 – 2022. Ocena predstavlja dobro evidenco oz. posnetek stanja glede zalog organskega ogljika na kmetijskih zemljiščih Slovenije in je izdelana na podlagi večjega števila novo merjenih podatkov tal in v prostorski ločljivosti, ki omogoča usmerjanje kmetijsko-okoljskih ukrepov na regionalni in lokalni ravni.

Ocena zalog ogljika bo uporabna tudi za izpolnjevanje mednarodnih obveznosti Slovenije, kot je poročanje o nacionalni bilanci ogljika LULUCF in Evropski komisiji o stanju nacionalnih zaloga ogljika v kmetijskih tleh. Prostorski sloj podatkov ocene zalog ogljika v kmetijskih zemljiščih (od tu dalje KZ) za globino 0 – 30 cm, je primeren za nadgradnjo podatkov FAO, ki v okviru svetovnega partnerstva za tla vzdržuje [svetovno karto zalog ogljika v tleh](#).

3 Pregled literature in FAO GSP metode za oceno zalog organskega ogljika v tleh kmetijskih zemljišč

Ogljik v tleh spremljamo v dveh oblikah; anorganski in organski. Organski ogljik je komponenta ogljika celotne organske snovi v tleh (TOS), ki obsega različne materiale organskega izvora vključno z drobnimi delci rastlinskega opada, stelje, korenin, talne favne, mikrobnno biomaso, produkte mikrobne razpada in drugih biotskih procesov, preproste sladkorje in polisaharide (Jansson et al., 2010).

Globalna zaloga ogljika v tleh do globine 1 m je po ocenah FAO približno 1500 – 2400 Pg C (1 Pg = 1Gt) (Lorenz and Lal, 2018; FAO, 2020; Tifafi et al., 2018; Scharlemann et al., 2014; Batjes, 2014);– povzeto po (FAO, 2020). To predstavlja večjo zalogo ogljika kot ga je skupno v ozračju in vegetaciji (Smith et al., 2020).

Ocenjevanje zalog ogljika in spremljanje dinamike ogljika je zahtevna naloga. Za oceno zalog ogljika so neizpodbitno potrebne meritve in vzorčenje (field measurements), kjer se mora zagotoviti ustreznost izbire lokacij vzorčenja, popis vzorčnih lokacij (odvzem koordinat), način odvzema vzorcev tal (npr. globina do minimalno 30 cm po slojih, število odvzemnih mest; sonda med 5 – 10 cm premera), izbor minimalnih parametrov za izračun zalog ogljika (to so; organski ogljik v tleh, volumska gostota tal, volumski delež skeleta; to so mineralne frakcije > 2 mm), zagotovitev ustreznih laboratorijskih standardov določanja in formule za izračun zalog ogljika v tleh (Lefevre, 2017).

Dobro opravljene terenske meritve in vzorčenje omogoča generiranje dodatnih informacij in prostorskih informacij tudi izven lokacij opravljenega vzorčenja, ki lahko temeljijo na različnih metodah od preprostejših kot so class-matching, geomatching, do zahtevnejših metod digitalne kartografije tal kot so metode regresijske analize, regresijske-interpolacije, random forest...(Lefevre, 2017).

3.1 FAO in globalno partnerstvo za tla (GSP)

FAO Svetovno partnerstvo za tla (GSP) deluje v okviru petih ključnih področij - stebrov:

- Upravljanje s tlemi (Soil management)
- Ozaveščanje (Awareness raising)
- Raziskave (Research)
- Informacije in podatki (Information and data)
- Harmonizacija (Harmonization)

V naslednjih poglavjih povzemamo nekaj ključnih virov kjer je opisan način in namen delovanja FAO in GSP, pomen spremljanja iz ocenjevanja zalog ogljika v tleh, metodoloških postopkov ocenjevanja zalog ter rezultatov raziskav o zalogah ogljika v tleh.

3.1.1 Spletne strani FAO

- Spletna stran [Global Soil Organic Carbon Map](#). Spletna stran je izhodiščna točka FAO kjer lahko obiskovalec pridobi osnovne informacije o zalogah ogljika v tleh, pomenu in učinkih ogljika v tleh na človeka in okolje, metodoloških postopkih in izsledkih raziskav o zalogah

ogljika v tleh ter o delovanju svetovnega partnerstva za tla (GSP) v povezavi z zalogami ogljika v tleh. Spletna stran je opremljena s številnimi povezavami na podstrani kjer so razložene podrobnosti o posameznih področjih vezanih na zaloge ogljika v tleh. Na spletni strani je ogromno vsebin vezanih na zgodovino dogodkov, simpozijev, ki so neposredno povezani s promocijo upravljanja kmetijskih tal za ohranjanje zalog ogljika v tleh in preteklih delavnic kjer so se udeleženci seznanili s postopki priprav pedoloških podatkov za izdelavo ocen zalog ogljika v tleh.

- Svetovna zaloga ogljika v tleh, 2019 ([spletni GIS pregledovalnik](#)), trenutno na voljo različica GLOSI – GSOCmao (v1.5.0). Spletni GIS pregledovalnik, ki prikazuje svetovne zaloge ogljika v tleh (t C/ha) v resoluciji 1 x 1 km. Spletni pregledovalnik je rezultat delovanja FAO in GSP kot krovne inštitucije za ozaveščanje o pomenu zalog ogljika v tleh ter njihove pobude za izdelavo nacionalnih kart zalog ogljika po principu »bottom to top« in sodelovanja držav in nacionalnih inštitucij, ki so se pridružile smernicam ter izdelale in delile nacionalne prostorske ocene zalog ogljika v tleh. Seznam držav in inštitucije, ki so prispevale h globalni karti zalog ogljika v tleh so našteje na povezavi. Prva globalna karta je bila izdelana konec leta 2017 kjer je sodelovala tudi Slovenija.

3.1.2 Svetovni Posvet o zalogah ogljika v tleh

Posvet, ki je potekal od 21. do 23. marca 2017 na sedežu FAO v Rimu se je udeležilo več kot 450 udeležencev iz 111 držav. Strokovnjaki so predstavili rezultate študij ocen zalog ogljika v tleh, problematiko zmanjševanja zalog ogljika v tleh ter potenciale in izzive upravljanja s tlemi. Na simpoziju so bile poudarjene številne koristi, povezane z vzdrževanjem in povečevanjem zalog v tleh, kot so prehranska samooskrba, zmanjšanje revščine, ublažitev podnebnih sprememb ter zmanjševanje degradacije zemljišč.

3.1.3 Poročila in priročniki

- Tehnično poročilo [Global Soil Organic Carbon Map \(GSOCmap\) Version 1.5](#). V poročilu so predstavljeni izsledki prve svetovne karte zalog ogljika v tleh, ki je nastala konec leta 2017 pod okriljem GSP in FAO. Predstavljeno je katere države so sodelovale pri izdelavi in so prispevale podatkovne sloje nacionalnih zalog ogljika v tleh do globine 30 cm. Vsebina poročila se osredotoča predvsem na metodološko zasnovo izdelave svetovne karte zalog ogljika in harmonizacijskih postopkov nacionalnih podatkov (*Global Soil Organic Carbon Map (GSOCmap) Version 1.5*, 2020).
- [Navodila GSP](#) za posredovanje nacionalnih podatkov za izdelavo svetovne karte zalog ogljika v tleh (GSOCmap), 2017. Dokument je krajše navodilo oz. povzetek ključnih metodoloških postopkov za izdelavo karte zalog ogljika v tleh. V dokumentu je opisan pomen in ozadja izdelave zalog ogljika v tleh, analitski standardi merjenja organske snovi v tleh, nujni vhodni talni parametri, postopek izračuna zalog ogljika, predstavljene so različni načini interpolacije podatkov, nekatere tehnične zahteve kot so globina ocene zalog ogljika (cm) in željena resolucija končnih prostorskih slojev za predajo FAO/GSP (FAO, 2017).
- Priročnik Soil Organic Carbon Mapping Cookbook 1st edition, 2017 in Priročnik Soil Organic Carbon Mapping Cookbook 2nd edition, 2018 (*Soil organic carbon mapping cookbook*, 2018). Priročnik za izdelavo karte zalog ogljika v tleh, ki opisuje različno

programsko opremo za izdelavo ocene zalog ogljika v tleh, možnosti in postopke priprave podatkov tal (parametri tal iz terenskih vzorčenj), postopke priprave podatkov, ki predstavljajo vplivne dejavnike za zaloge ogljika v tleh, opis metod za interpolacijo in izdelavo kart.

3.1.4 Brošure in zgibanke

[Brošura Global Soil Organic Carbon Map](#), 2017, predstavlja pomen ogljika v tleh za človeka in okolje, metodološke koncepte izdelave karte zalog ogljika v tleh na svetovni ravni.

3.1.5 Video vsebine

[Video predstavitev The Global Soil Organic Carbon Map](#) V1.0. Promocijski video na platformi Youtube o pomenu zalog ogljika v tleh in pozitivnih učinkih na človeka in okolje. Predtavi izzive s katerimi se srečujemo in prihodnje smernice upravljanja s kmetijskimi tlemi. Kratka predstavitev projekta izdelave svetovne karte zalog ogljika v tleh.

3.2 Vpliv rabe zemljišč, agrotehnik in talnih tipov

V spodnji preglednici so navedeni pokrajinski dejavniki, ki najmočnejše vplivajo na vsebnost organske snovi (TOS) in organskega ogljika v tleh. Vplivne dejavnike smo povzeli po spletnem viru »What is soil organic carbon« (Government of Western Australia, 2022) in jih dopolnili glede na lastno strokovno poznavanje vsebnosti organske snovi v kmetijskih tleh Slovenije in poznavanja pestrih pokrajinskih značilnosti Slovenije.

Preglednica 1: Vplivni dejavniki na vsebnost organske snovi v tleh.

Dejavniki	Vpliv
Pedološke značilnosti	Glina, ki je naravno prisotna v tleh, se veže na organske snovi, preprečuje njeno razgradnjo in omejuje dostop mikrobov in drugih talnih organizmov.
	Organska snov v peščenih tleh z grobo teksturo ni zaščitena pred mikrobiološkim delovanjem in se posledično hitro razgradi.
	Mikroorganizmi, zlasti bakterije, slabo rastejo v močno kislih ali alkalnih tleh, zato se organske snovi v takšnih tleh počasi razgrajujejo.
Klima	V primerljivih kmetijskih sistemih s podobno vrsto tal in upravljanjem, se organska snov v tleh s padavinami povečuje. Razlog za to je, da več padavin spodbuja večjo rast rastlin, zaradi česar se v tleh nabira več organske snovi. Hkrati bolj namočena območja botrujejo k večji vlažnosti tal, anaerobnim pogojem v tleh in počasnejše delovanje mikroorganizmov in razgradnjo organske snovi.
	Organska snov se z zmanjšanjem temperature razkraja počasneje, saj hladnejše temperature zavirajo delovanje mikroorganizmov. Obratno ga višje temperature povečujejo. Toplejša območja imajo posledično načeloma v tleh manj organske snovi.
Raba tal in upravljanje s tlemi	Povečanje biomase iz poljščin in pašnikov z boljšo učinkovitostjo rabe vode in upravljanjem zemljišč, povečuje vnos organske snovi in višjo vsebnost organske snovi v tleh.
	Ker je velik delež organske snovi prisoten v zgornjih 0-10 cm tal, je zaščita površine tal pred erozijo bistvenega pomena za tudi ohranjanje organske snovi v tleh.
	Obdelava strukturiranih tal zmanjšuje zaloge organske snovi v tleh, saj so tla z obdelavo (oranjem in prezračevanjem) bolj izpostavljena mikrobni razgradnji (aerobni pogoji).
Reliefne značilnosti	Dodajanje organskih ostankov, kot so gnoj, slama in oglje, povečuje organsko snov v tleh.
	Pokrajinske značilnosti (predvsem relief) vplivajo na razpoložljivost vode v tleh in hitrost razgradnje organske snovi.
	Premeščanje tal in organske snovi po pobočju, lahko poveča zaloge organske snovi v tleh v nižjih delih pokrajine.
	Usmerjenost pobočij posredno vpliva na vsebnost organske snovi v tleh. Prisojna pobočja so toplejša in sušnejša, kar se odraža v hitrejši razgradnji organske snovi.

4 O metodološkem pristopu ocene zalog ogljika v tleh KZ

Delo, ki smo ga tekom projektne naloge opravili in izpopolnili, lahko združimo v 3 osnovne faze in zajema postopkovne algoritme, ki jih v tem poročilu imenujemo algoritmi oz. model **SOCmapSI-RK** (Slika 1).

4.1 Priprava podatkov

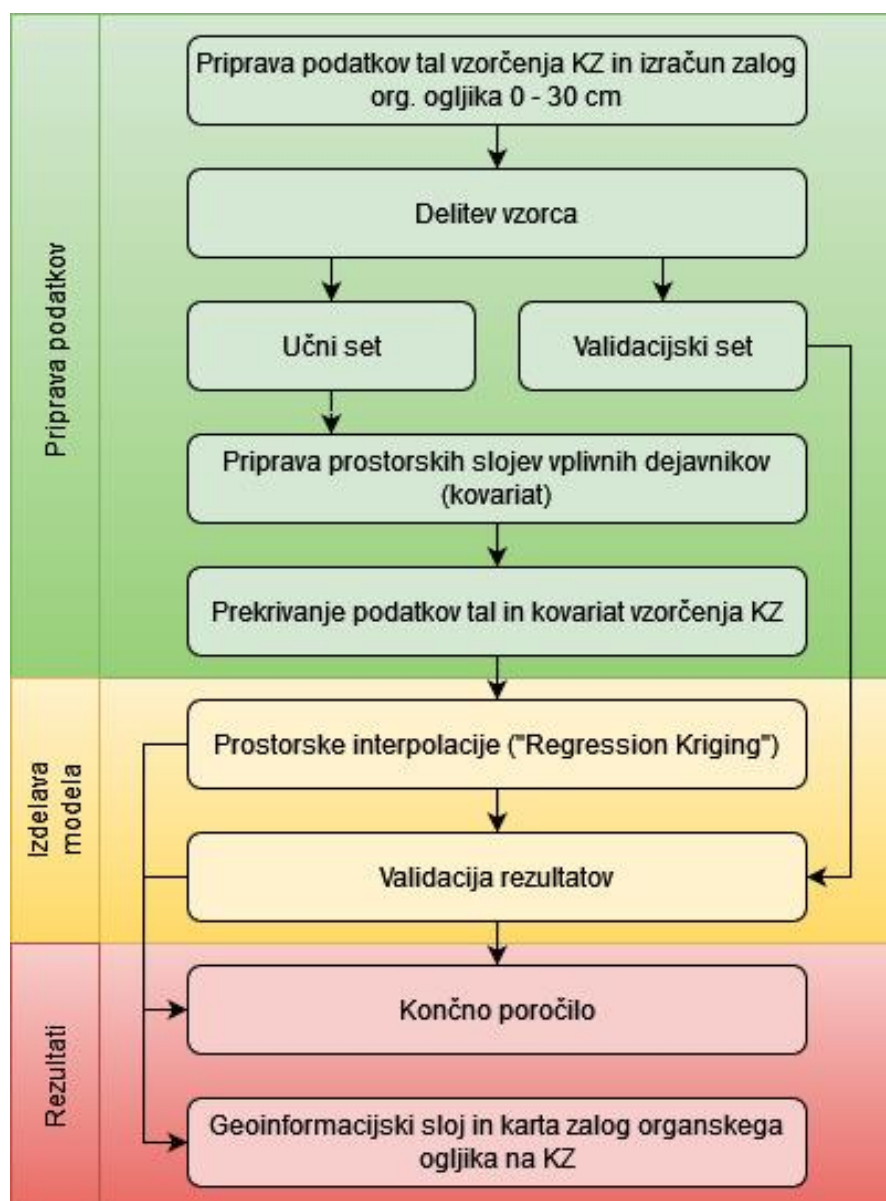
Faza priprave podatkov vključuje zbiranje in harmonizacijo merjenih podatkov tal iz vzorčenja ter izračun zalog ogljika na vzorčenih lokacijah (točkovni podatkovni nivo). Sledi delitev vzorčenih lokacij na učni in validacijski set podatkov. Vzporedno smo pripravili rastrske geoinformacijske sloje, ki so predstavljali potencialne vplivne dejavnike na zaloge ogljika v tleh, ter jih harmonizirali v skladu z dogovorjenimi standardi (resolucija, prostorski obseg, koordinatni sistem). Tuja literatura jih imenuje tudi »covariates«. Sledilo je prekrivanje prostorskih rastrskih slojev in pripis vrednosti iz rastrskih celic na učni set merjenih podatkov lokacij vzorčenja.

4.2 Prostorski model ocene vsebnost talnega organskega ogljika

V drugi fazi smo izdelali prostorski model ocene zalog ogljika v tleh. Na pripravljenih podatki učnega seta iz prve faze smo izdelali model z multiplo regresijsko analizo in ugotovili vpliv posameznih okoljskih dejavnikov na zalogo ogljika. Postopek smo ponovili s tehniko *stepwise* kjer smo ohranili le najbolj vplivne okoljske dejavnike in zgradili statistični regresijski model za napoved zalog ogljika v tleh (*regression matrix*). Sledila je implementacija modela z orodjem *autoKrige* (Rstudio). Postopek je zahteval največ procesorskih in spominskih zmogljivosti med vsemi fazami. Za izvedbo postopka interpolacije smo uporabili delovno postajo s procesorjem Intel(R) Core(TM) i9-10900 CPU in vgrajenim 128 GB RAM-a. Po končani interpolaciji je glavni rezultat modela SOCmapSI-RK rastrski geoinformacijski sloj napovedi zalog ogljika v tleh (t/ha) ter sloj standardnih deviacij zalog ogljika v tleh. Nato smo napovedane vrednosti zalog ogljika primerjali z meritvami izvedenimi na terenu. Validacijo smo izvedli na validacijskem setu podatkov lokacij vzorčenja. Za validacijo smo uporabili nekaj kvantitativnih statističnih kazalcev (povprečna napaka napovedi, povprečna absolutna napaka napovedi, kvadratni koren povprečne napake napovedi, pojasnjena varianca) ter grafični kazalec – graf napovedanih in merjenih vrednosti z deležem pojasnjene variabilnosti (R^2). Na podlagi rezultatov validacije smo ponovili algoritme priprave podatkov. Predvsem smo izpopolnjevali število vhodnih prostorskih slojev jih dopolnjevali vsebinsko (npr. raba zemljišč, talni tipi iz PK25) ali izboljševali prostorsko natančnost (resolucija).

4.3 Izdelava kart, statistična obdelava podatkov in priprava poročila

V zadnji fazi smo izdelali rezultate, ki zajemajo obdelavo geoinformacijskega sloja zalog ogljika in primerjavo z merjenimi vrednosti iz terenskih meritev. Izdelali smo tudi kartografsko gradivo in vizualno ocenili logičnost prostorske razporeditve. Zaloge smo preračunali iz t/ha v t, ter tako izračunali skupno zalogo ogljika v tleh KZ Slovenije. Na koncu smo spisali še končno poročilo.

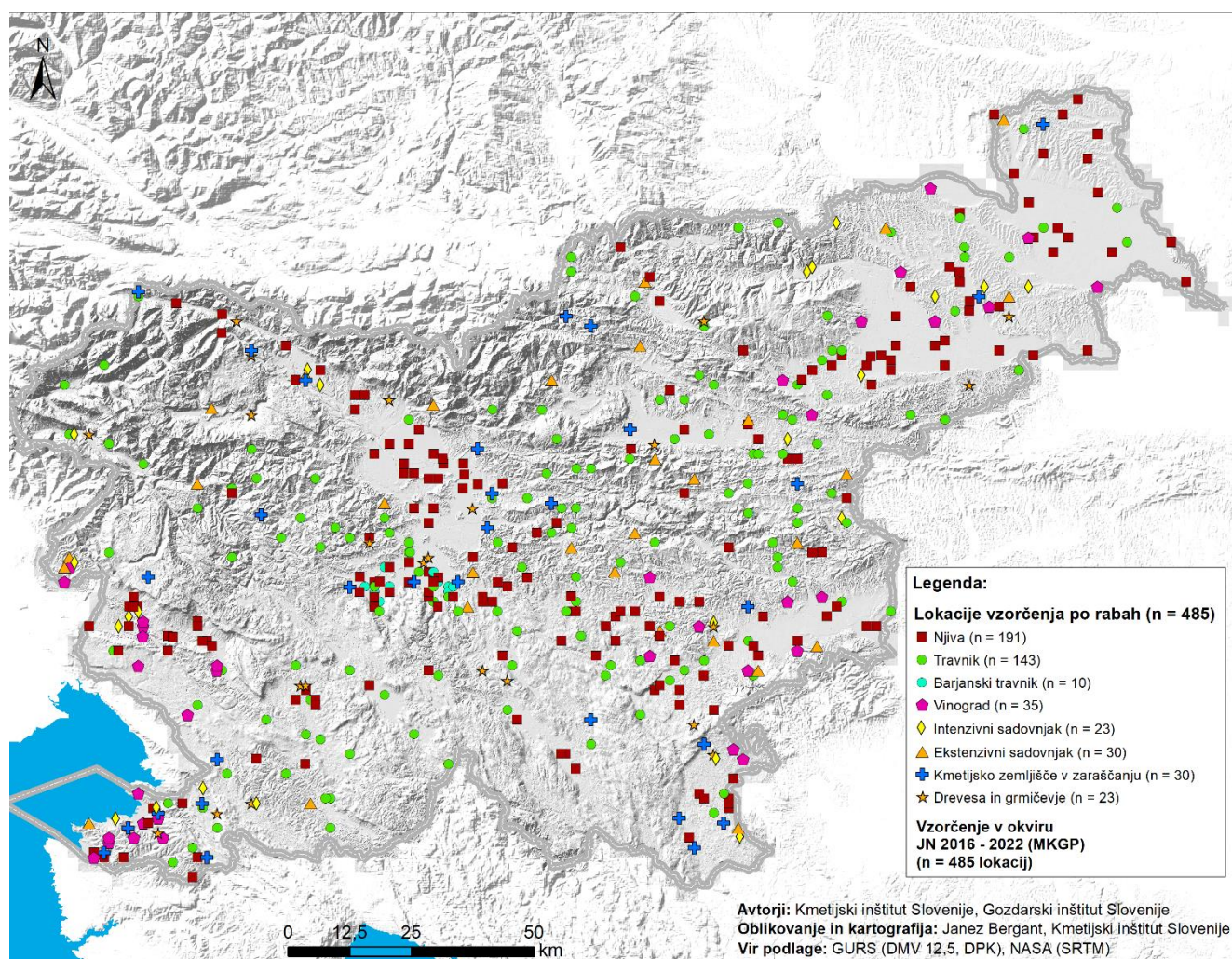


Slika 1: Shematski prikaz algoritma modela SOCmapSI-RK.

5 Zbiranje, harmonizacija in priprava merjenih podatkov tal (vsebnost ogljika v tleh, gostota tal, kamnitost,...)

5.1 Podatki vzorčenja tal

Kot vhodne točkovne podatke tal, za izdelavo ocene zalo ogljika na KZ Slovenije smo uporabili parametre tal, ki smo jih izmerili na vzorcih tal iz **projektov vzorčenja za oceno zaloga ogljika v tleh**, ki jih je financiral MKGP preko JN med leti 2016 – 2022. Nabor vključuje 485 lokacij vzorčenja po Sloveniji, ki jih prikazuje spodnja karta (Slika 2).



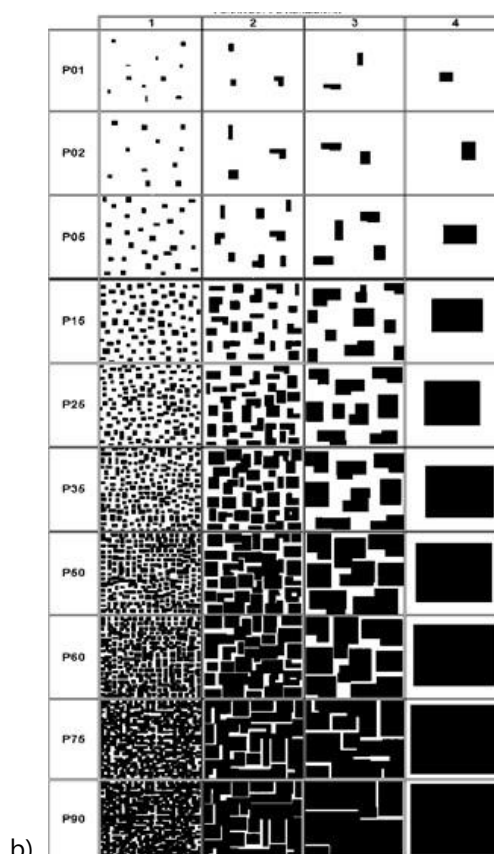
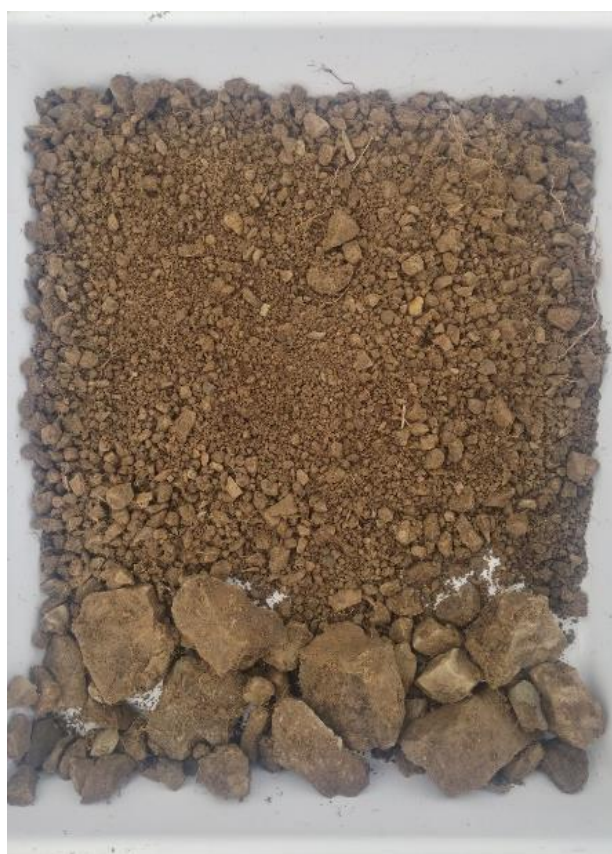
Slika 2: Lokacije vzorčenja tal za oceno zaloga ogljika v kmetijskih tleh Slovenije med leti 2016 – 2022.

Vzorci tal so bili odvzeti iz treh globin 0 – 10 cm, 10 – 20 cm, 20 – 30 cm po enotni metodologiji vzorčenja in enakimi analitskimi metodami. Vzorci tal so bili v laboratoriju analizirani na parametre, ki omogočajo izračun zaloga ogljika v tleh na vsaki lokaciji vzorčenja (t C/ha).

Preglednica 2: Analizirani parametri na vzorcih tal vzorčenja za oceno zalog ogljika v tleh med leti 2016 – 2022.

Parameter	Uporabljen standard	Porušeni vzorci	Neporušeni vzorci
Priprava vzorca (sušenje, trenje, sejanje)	ISO 11464:2006	x	
Suha snov / Vsebnost vode	ISO 11465:1993	x	
pH v 0,01 M CaCl ₂	ISO 10390:2006	x	
Skupni dušik (N)	ISO 11261:1996	x	
	ISO 13878:1999	x	
Organski ogljik/Organska snov	ISO 14235:1999	x	
	ISO 10694:1996	x	
	ISO 10693:2014	x	
Tekstura tal (delež peska, melja, gline)	ISO 11277:2011	x	
Navidezna specifična teža oz. volumska gostota	ISO 11272:2017		x

Volumski delež skeleta v tleh (vol %) za vse 3 globine vzorčenja je ocenjen s pomočjo (pripomočka) na terenskih listih in razporeditve vzorca tal in skeleta na pladnju.



Slika 3: Določanje skeletnosti tal na terenu (a) ter pripomoček za objektivnejše določanje volumskega deleža skeleta v tleh (b)

Vsi rezultati laboratorijskih analiz in opisni in merjeni podatki iz terena se nahajajo v relacijski podatkovni bazi MTO na Kmetijskem inštitutu Slovenije.

5.2 Priprava merjenih podatkov tal, harmonizacija in obdelava

Iz baze MTO smo z algoritmi zapisanimi v SQL sintaksi izdelali dve tabeli, ki sta predstavljali vhodni podatek za pripravo merjenih podatkov tal:

- **tabelo s podatki vezanimi na lokacijo vzorčenja (JN-OrgC_2016-2022_lokacije).**
V tej tabeli se nahajajo podatki lokacij vzorčenja z atributi → unikatna oznaka vzorčne točke (TOCKA), X in Y koordinate vzorčne lokacije (D96 koordinatni sistem), raba zemljišča zabeležena na terenu, leto vzorčenja itd.
- **tabelo s podatki vezanimi na sloje/horizonte tal (JN-OrgC_2016-2022_vzorci).**
V tabeli se nahajajo podatki tal po slojih; unikatna oznaka vzorčne točke (TOCKA), delež skeleta (vol %), organska snov in organski ogljik (%), volumska gostota sloja tal (povprečje iz ponovitev za vsako globino v g/cm³), zgornji (ZGMEJA) in spodnji meji (SPMEJA) vzorčnega sloja (izraženo v cm) in drugi parametri tal.

Tabeli smo uvozili v delovno okolje R, kjer je potekala preostala priprava podatkov tal iz vzorčenja. Podatke obeh tabel smo v prvi fazi priprave preuredili in odstranili vse neuporabne spremenljivke ter tabeli združili preko unikatne oznake vzorčne lokacije »TOCKA«. V obdelavo smo vzeli le sloje, ki so bili odvzeti do globine 30 cm¹, kar je pomenilo **1438 slojev iz 485 lokacij**.

V drugi fazi priprave smo preverili popolnost in celovitost podatkov:

- Pri parametru volumski delež skeleta v tleh (skeletalnost TAL) smo vse vrednosti brez podatka (označen z -9999) zamenjali z vrednostjo »NA« (NA pomeni ni podatka) zaradi kasnejših pravih izračunov.
- Podatka volumske gostote tal ni bilo potrebno prilagajati.
- Podatka delež organskega ogljika ni bilo potrebno prilagajati.

Koraku odpravljanja nepopolnosti podatkov je sledil preračun parametrov tal na ciljno globino izračuna, ki je v našem primeru 0 – 30 cm. Preračun smo izvedli z metodo *Equal Area Splines* (R knjižnica *aqp*), ki temelji na načelu, da se vrednost talnega parametra iz horizonta razporedi do poljubne globine z zveznim prilagajanjem polinomske krivulje preko srednjih vrednosti parametra po poljubnih globinah (slojih) (Malone et al., 2017). Ker so v našem primeru podatki vzorčeni po slojih do globine 30 cm sicer metoda nima učinka, a smo jo vseeno implementirali saj bo tako omogočala učinkovitejše delo v prihodnje v kolikor bi v model dodali še talne podatke iz drugih vzorčenj, ki ne bi imeli nujno omejitve globine do 30 cm in enakih globin vzorčenja kot smo jih vzorčili pri vzorčenju KZ med leti 2016 – 2022 (torej 0 – 10, 10 – 20 in 20 – 30 cm). S preračunom parametrov na globino 0 do 30 cm je tako naše število podatkov (vrstic) postalo enako številu vzorčnih lokacij oz. 485.

¹ Na nekaj lokacijah vzorčenja smo odvzeli vzorce tal tudi iz globine 30 – 50 cm.

Koraku preračuna parametrov na globine je sledil izračun zalog ogljika v tleh, ki smo ga izvedli po formuli.

$$\text{SOCzal}_{\text{sloj}} = \text{SOC}_{\text{sloj}} \times \rho_{\text{sloj}} \times \text{DEB}_{\text{sloj}} \times \text{CRF}_{\text{sloj}}$$

$\text{SOCzal}_{\text{sloj}}$ = zaloga organskega ogljika (t/ha) v sloju tal

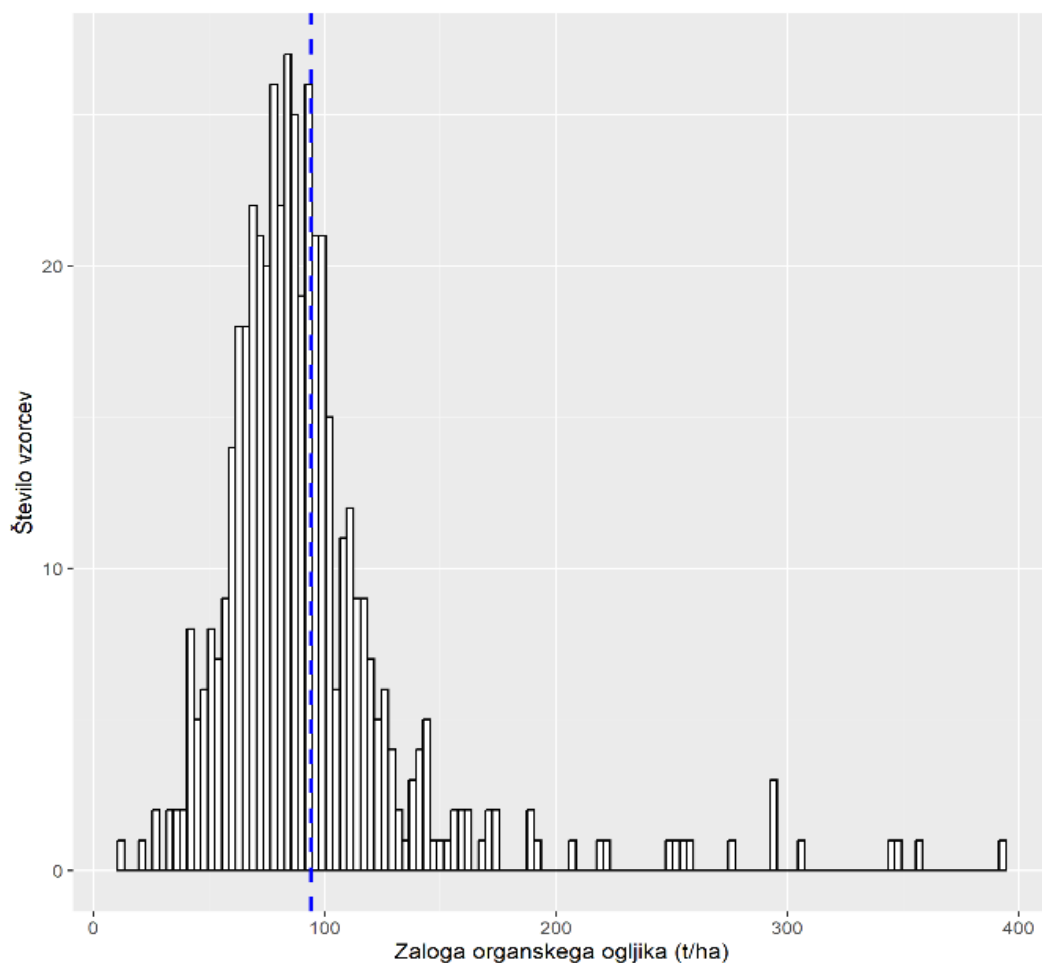
SOC_{sloj} = delež organskega ogljika (masni %) v sloju tal

ρ_{sloj} = volumska gostota tal oz. navidezna specifična teža sloja tal (g/cm^3)

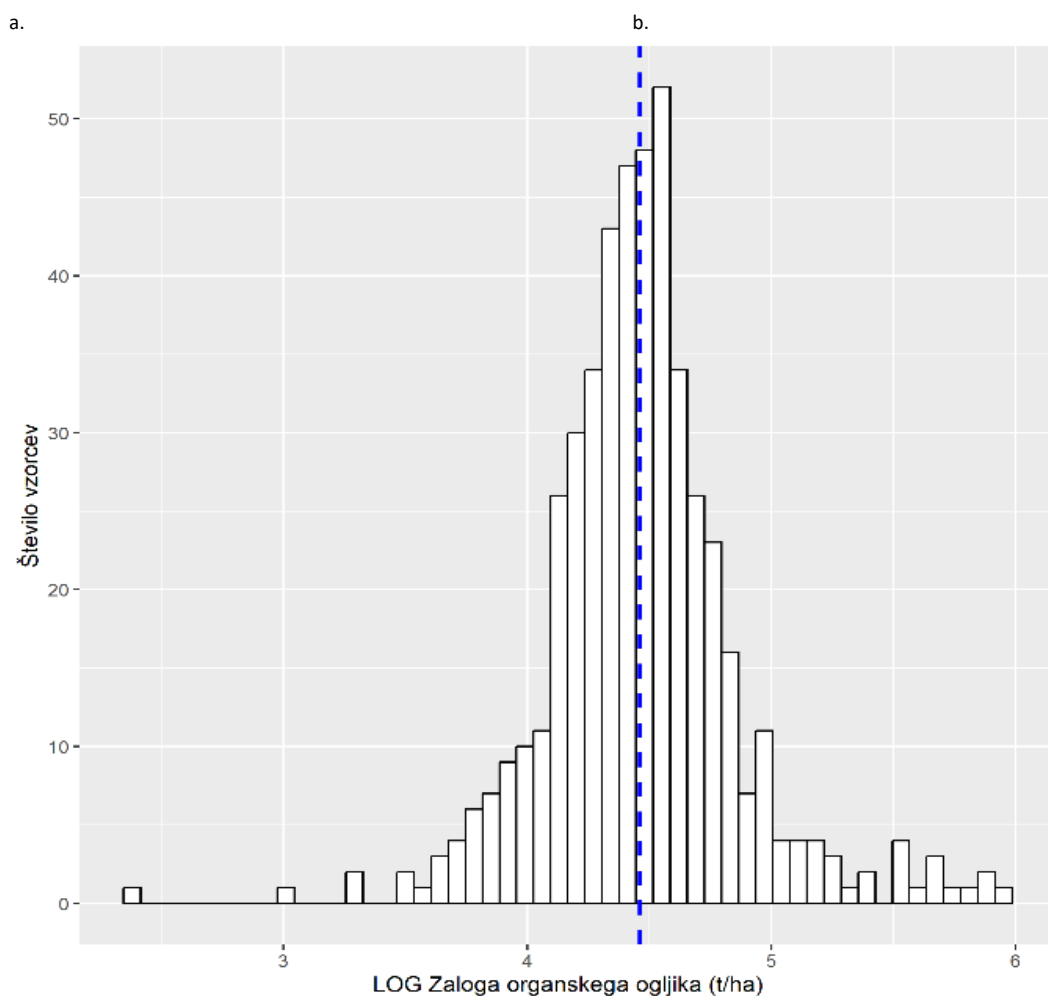
DEB_{sloj} = debelina sloja za katerega izračunavamo zalogo ogljika (cm)

CRF_{sloj} = korekcijski faktor za skeletnost/kamnitost; $1 - (\text{vol \% skeleta}/100)$

V zadnjem koraku priprave smo izčistili podatkovno tabelo preračunanih vrednosti, tako da smo odstranili vse vrstice, kjer zaloge ogljika zaradi pomanjkanja vhodnih podatkov niso izračunane. Po pregledu histograma zalog ogljika smo ugotovili nesimetričnost v levo. Zaloge ogljika smo zato logaritmirali in s tem razporeditev vzorcev v histogramu približali statistični normalni razporeditvi.



Slika 4: Porazdelitev zalog ogljika do globine 30 cm na vzorčnih lokacijah (t/ha).



Slika 5: Porazdelitev logaritmiranih vrednosti zalog ogljika.

Zaradi kasnejše validacije ocene zalog talnega ogljika na KZ smo podatke vzorčenja tal naključno razdelili in sicer na 85 % lokacij kot učni set in 15 % lokacij kot testni - validacijski set.

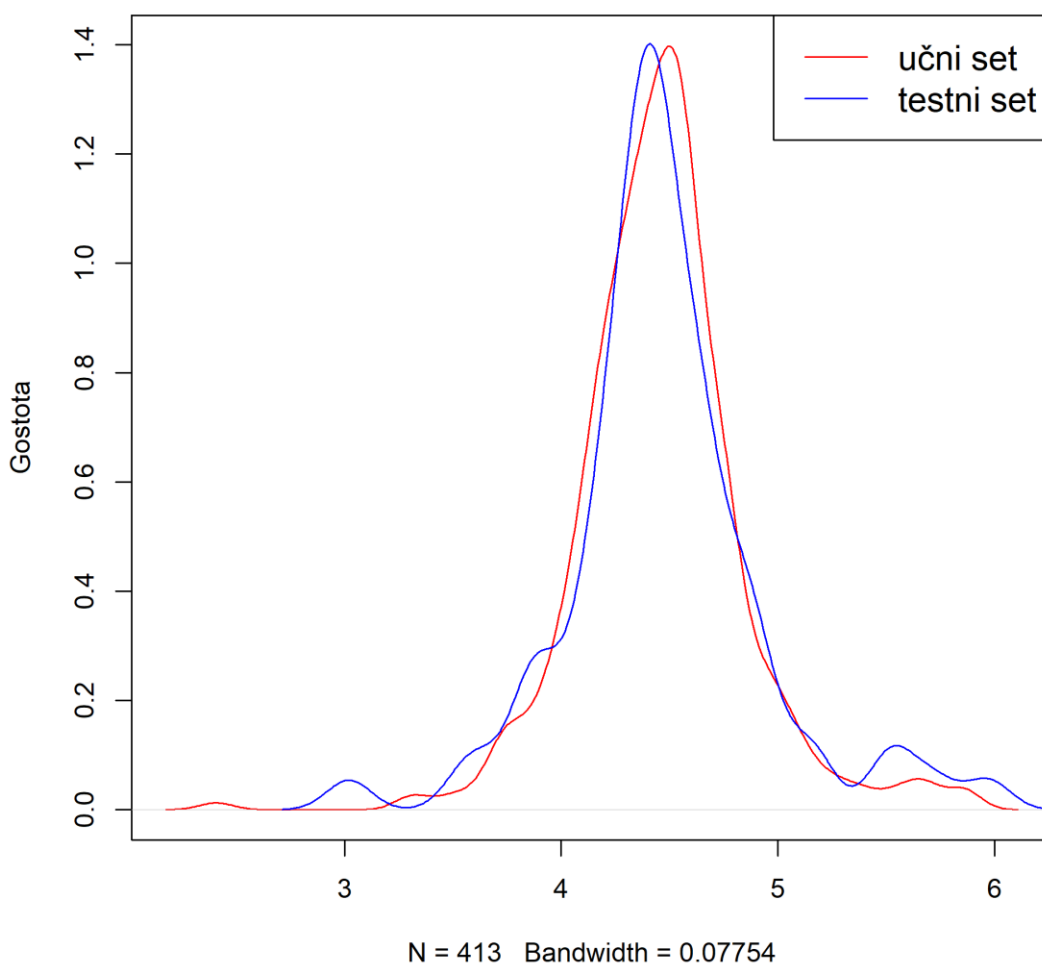
Podatke učnega seta smo v modelu uporabili za izgradnjo modela in napoved zalog ogljika v tleh. Testni set smo uporabili za validacijo rezultatov modela.

5.3 Rezultati priprave merjenih podatkov tal

Rezultat priprave merjenih podatkov tal vzorčenja je podatkovna tabela z izračunanimi zalogami ogljika na lokacijah vzorčenja za globino 0 – 30 cm (*soil_data_prep.csv*) ter iz nje izpeljani tabeli:

- Učni set (*dat_train.csv*),
- Testni ali validacijski set (*dat_test.csv*)

Ko primerjamo razporeditev lokacij glede na logaritmirane vrednosti zalog ogljika na lokacijah vzorčenja med učnim in testnim setom podatkov vidimo, da sta krivulji porazdelitev v celoti primerljivi kar potrjuje oceno, da smo za izgradnjo modela in validacijo izbrali zaupanja vreden vzorec lokacij (Slika 4).



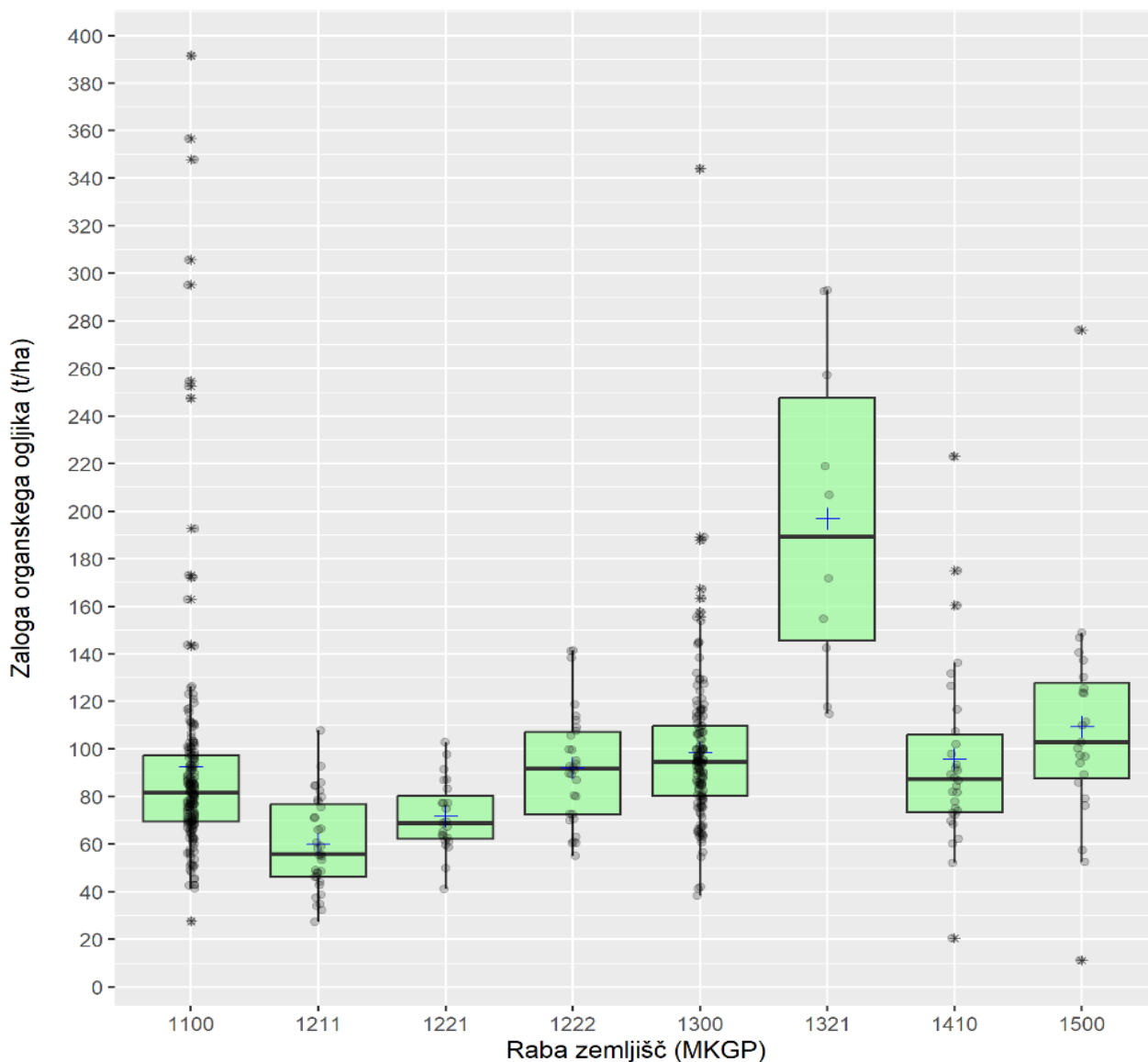
Slika 6: Histogram logaritmiranih zalog talnega ogljika lokacij vzorčenja med učnim in testnim setom.

Če vsebinsko na kratko opišemo rezultate priprave merjenih podatkov tal ugotovimo, da smo zaloge ogljika izračunali na vseh 485 lokacijah vzorčenja od tega je 191 lokacij na njivah (RABA ID = 1100), 143 na trajnih travnikih (RABA ID = 1300). Sledijo vinogradi 35 lokacij (RABA ID = 1211), ekstenzivni sadovnjaki (RABA ID = 1222) in kmetijska zemljišča v zaraščanju (RABA ID = 1410) oboji po 30 lokacij, intenzivni sadovnjaki (RABA ID = 1221) in drevesa in grmičevje (RABA ID = 1500) oboji po 23 lokacij ter 10 lokacij na barjanskih travnikih (RABA_ID = 1321). Iz števila vzorčnih lokacij po rabah tal lahko ugotovimo, da so ocene zalog ogljika v tleh na njivah in trajnih travnikih bolj zanesljive kot ocene zalog na drugih rabah z manjšim številom vzorčnih lokacij.

Ocenjene zaloge ogljika v tleh od 0 – 30 cm na vzorčnih lokacijah ($n = 485$) se gibljejo **med 11,1 t C/ha in celo 391,6 t C/ha s povprečno zalogo 94,1 t C/ha**. Zaloge ogljika se razlikujejo med rabami zemljišč in sicer so te v povprečju s 197,0 t C/ha najvišje na barjanskih travnikih (RABA_ID = 1321) pri rabi drevesa in grmičevje (RABA ID = 1500) s povprečjem 109,4 t C/ha, sledijo trajni travniki (98,4 t C/ha), ki so po zalogah v povprečju zelo podobni s kmetijskimi zemljišči v zaraščanju (95,7 t/ha). Še manj zalog imajo ekstenzivni sadovnjaki (92,1 t C/ha). Njive imajo v povprečju 92,7 t C/ha, intenzivni sadovnjaki 71,7 t C/ha. Najmanj s precejšnjo razliko pa imajo zalog ogljika vinogradi, v povprečju le 59,9 t C/ha.

Hkrati s povprečnimi vrednostmi so pomembne tudi variabilnosti zalog ogljika po rabah (koeficient variacije KV). Te so prav tako kot zaloge ogljika najvišje na njivah (KV = 55,8 %), sledi raba drevesa in grmičevje (KV = 44,8 %), kmetijska zemljišča v zaraščanju (KV = 41,4 %), barjanski

travniki (KV = 34,3 %), trajni travniki (KV = 33,9 %), vinogradi (KV = 32,7 %), ekstenzivni sadovnjaki (KV = 26,0 %) in nazadnje z najmanjšo variabilnostjo zalog ogljika intenzivni sadovnjaki (KV = 20,9 %).



Slika 7: Prikaz zalog organskega ogljika v tleh 0 – 30 cm (t/ha) po rabah zemljišč.



Slika 8: Nazoren prikaz razlik v količini organske snovi in zalogi ogljika po globinah tal (primer ene od vzorčnih lokacij). Razlike so opazne v barvi vzorca tal kot tudi iz rezultatov laboratorijskih analiz.

6 Zbiranje, harmonizacija in predobdelava podatkov, ki predstavljajo vplivne dejavnike za zaloge ogljika v tleh

Poglavje zajema opis priprave podatkov talnih tipov in pedosekvenc, rabe tal in pokrovnosti tal, reliefa in mikroklimatskih razmer, klime in ostalih dejavnikov, ki potencialno vplivajo na zaloge organskega ogljika v tleh.

6.1 Standardni parametri za pripravo prostorskih rastrskih slojev

Vse rastrske sloje vključene v model ocen zalog ogljika v tleh smo pripravili na način, da so ustrezali naslednjim parametrom.

1. Koordinatni sistem (kratica KRS): D96 ali EPSG: 3794 - Slovenia 1996 /Slovene National Grid
2. Format rastra: geoTIFF (končnica .tif)
3. Resolucija rastrske celice: 10 x 10 m
4. Prostorski obseg sloja (extent) v izbranem KRS:
 - minX oz. min E (West) = 373600
 - maxX oz. max E (East) = 625700
 - minY oz. min N (South) = 28400
 - maxY oz. max N (North) = 196500

6.2 Uporabljeni podatkovni sloji kot spremenljivke (kovariate)

Po zgledu literature FAO in ekspertnega znanja, smo zbrali prostorske sloje, ki predstavljajo potencialne vplivne dejavnike na zalogo ogljika v tleh, njihovo pripravo in harmonizacijo pa podrobneje opisujemo v naslednjih poglavjih. V primerjavi s faznim poročilom kjer smo uporabili 12 spremenljivk (rastrskih slojev) smo nabor podatkov izpopolnili in ob koncu projektne naloge pripravili in uporabili 35 spremenljivk (rastrskih slojev). **Seznam vseh uporabljenih podatkovnih slojev je prikazan kot tabela v prilogi (Priloga 4), kjer so navedeni tudi dodatni metapodatki slojev.**

Priprava prostorskih slojev je v splošnem obsegala:

- Projekcijo v koordinatni sistem D96 (EPSG: 3794),
- pretvorbo rastrskih slojev v format geotif (v kolikor je bil original vhodni sloj v vektorski obliki),
- pretvorbo rastra v ustrezno resolucijo,
- določitev istega prostorskega obsega (extent),
- izdelavo derivatov (če je bilo smiselno),
- izvedbo vsebinskih popravkov vrednosti prostorskih slojev (npr. preklasifikacija, združevanje itd.).

6.2.1 Digitalni model višin in njegovi derivati

Za model višin smo vzeli podatek digitalnega modela višin 12,5 m (Geodetska uprava Republike Slovenije, DMV 12,5 m) v ESRI GRID formatu. Rastrski sloj smo z uporabo programskega paketa

SAGA 7.8.2. pretvorili v resolucijo 10 x 10 m z uporabo tehnike bližnjega sosa in sloju določili pravi prostorski okvir (extent). Rezultat priprave je rastrski sloj nadmorskih višin (m) *dmv.tif*.

Iz rastrskega sloja *dmv.tif* smo izdelali derivate reliefa, ki kvantitativno prikazujejo reliefne značilnosti in predstavljajo potencialne vplivne dejavnike na zaloge ogljika v tleh. Med njimi so multiresolucijski indeks uravnosti dna dolin (MRVBF). Ta algoritem združuje dva parametra in sicer parameter uravnosti in parameter globine dna dolin. Uravnost izračunava kot inverzno vrednost nagiba reliefa, globino dolin pa preko rangiranja nadmorskih višin v okolici obdelovane rastrske celice. Vrednosti nižje od 0,5 predstavljajo pobočja oz. ne predstavljajo ravnin in dna dolin. Vrednosti med 0,5 in 1,5 so dna najmanjših dolin, večje doline in uravnave pa imajo v rastru vrednost 1,5 in več (Gallant and Dowling, 2003). Poleg MRVBF smo izračunali tudi multiresolucijski indeks uravnosti grebenov (MRRTF). Oba sloja smo izvedli z uporabo SAGA orodja in s prednastavljenimi vhodnimi parametri, rezultat sta sloja *mrvmf.tif* in *mrrtf.tif*.

Z uporabo modula Relative Heights and Slope position (SAGA) (Jürgen Böhner and Selige, 2006) smo izdelali sloj relativne pozicije nagiba sredine pobočja (*midslp_posit.tif*), normalizirane višine (*norm_height.tif*), višino pobočij (*slope_height.tif*) in sloj, ki predstavlja globino dolin (*valleydepth.tif*). Slednji algoritem izračuna vertikalno razdaljo (m) med grebeni (ki jih algoritem določi iz vhodnega modela nadmorskih višin) in rečno mrežo (ki je algoritem prav tako izdelal iz vhodnega modela višin).

Iz *dmv.tif* smo izdelali še rastrski sloj nagibov površja (enote: °), usmerjenost pobočij (azimutne °), ter topografski indeks vlažnosti (TWI) (*twi.tif*). Topografski indeks vlažnosti prikazuje akumulacijo vode glede na reliefne značilnosti in je zelo pogosto uporabljen pri modeliranju in kartiranju talnih parametrov (Jürgen Böhner and Selige, 2006). Višje kot so vrednosti v celici, večja je teoretična količina akumulirane vode in večjo vlažnost tal lahko pričakujemo. Vlažnost tal pa posredno vpliva na hitrost razgradnje rastlinskega opada in žetvenih ostankov ter posledično kopičenje organske snovi v tleh.

6.2.2 Klimatski podatki

Med klimatske podatke, ki smo jih uporabili v modelu uvrščamo prostorske podatke; povprečno letno višino padavin med leti 1971 – 2000 (ARSO, n.d.), sloje povprečne, maksimalne in minimalne letne dnevne temperature zraka 1971 – 2000 (ARSO, 2000b, 2000c, 2000d) ter sloje povprečne letne potencialne evapotranspiracije (ARSO, 2000e) in sloj povprečne letne vodne bilance za obdobje 1971 – 2000 (ARSO, 2000f).

Med klimatske podatke uvrščamo tudi podatkovni sloj energije kvaziglobalnega sončnega obsevanja, ki smo ga prejeli od GIAM (Kastelec D. et al., 2007; Zakšek, Klemen et al., 2004, 2003)

Vsi uporabljeni izvorni prostorski sloji ARSO so bili v resoluciji 1 x 1 km in v koordinatnem sistemu D48. Sloj energije kvaziglobalnega sončnega obsevanja pa v resoluciji 100 x 100 m in prav tako v resoluciji D48. Priprava podatkov je zato zajemala postopek pre-projekcije rastrov v koordinatni sistem D96 ob hkratni pretvorbi resolucije na (10 x 10 m) in določitvi prostorskega obsega sloja. Nastali so sloji *pad13.tif* (padavine), *tpov13.tif* (povprečne temperature), *tmax13.tif* (maksimalne temperature), *tmin13.tif* (minimalne temperature), *petp.tif* (potencialna evapotranspiracija), *vodbil.tif* (vodna bilanca) ter *k13.tif* (energija sončnega obsevanja).

6.2.3 Podatki tal

Kot vhodni podatek smo vzeli tipe tal po slovenski klasifikaciji tal, ki smo jih povezali na talne kartografske enote pedološke karte 1:25.000 (MKGP). Tekom izpopolnjevanja modela, ki uporablja algoritme regresijske interpolacije smo ugotovili, da model ne deluje v kolikor sloj, ki ima za vrednost kategorično spremenljivko, vsebuje več kategorij kot smo jih zaznali ob prostorskem preseku z merjenimi točkovnimi podatki. Ker je talni tip kot spremenljivka kategoričen podatek in ker na z-ih talnih tipih nismo imeli merjenega podatka iz vzorčenja smo se odločili, da talne tipe grupiramo in sicer:

- šotna tla visokega barja, združimo s šotna tla nizkega barja;
- epiglej, združimo s hipoglej;
- koluvialno-deluvialna tla, združimo s karbonatna tla rjava;
- litosol/kamnišče, združimo z rendzino;
- podzol, združimo z izprana tla (luvisol);
- regosol, združimo s karbonatna tla rjava;
- tla deponij, združimo z rigolana tla.

Tako smo iz prvotnih 25 kategorij talnih tipov dobili 18 kategorij ter izdelali rastrski sloj talnih tipov *soilmap.tif* z vrednostmi:

- [1] ŠOTNA TLA NIZKEGA BARJA"
- [2]"AMFIGLEJ"
- [3]"DISTRIČNA RJAVA TLA"
- [4] "EVTRIČNA RJAVA TLA"
- [5]"GLEJ NA ORGANSKEM PODTALJU"
- [6]"HIPOGLEJ"
- [7] "IZPRANA TLA"
- [8]"IZPRANA TLA (LUVISOL)"
- [9]"KARBONATNA RJAVA TLA"
- [10] "MINERALNO-ORGANSKA TLA (MOLIČNI GLEJ)"
- [11]"NERAZVITA OBREČNA TLA (FLUVISOL)"
- [12]"OBREČNA TLA"
- [13] "PSEVDOGLEJ"
- [14]"RANKER"
- [15]"RDEČE-RJAVA TLA (TERRA ROSSA)"
- [16] "RENDZINA"
- [17]"RIGOLANA TLA"
- [18]"RJAVA POKARBONATNA TLA"

Kot drugi sloj podatkov tal je v model vstopal sloj pedosekvenc, ki ga hranimo na Kmetijskem inštitutu Slovenije (KIS). Pedosekvence so rezultat razvrstitve talnih tipov pedološke karte 1:25.000 v 5 pedosekvenc Slovenije, ki jih je opredelil Stritar (Stritar, 1991). Razvrstitev kartografskih enot digitalne pedološke karte Slovenije v merilu 1:25.000 je opravil dr. Vrščaj B. Vektorski sloj pedosekvenc v D96 koordinatnem sistemu smo rasterizirali (R) in pretvorili v ustrezno ločljivost in prostorski obseg ter shranili kot rastrski sloj *ps.tif*.

6.2.4 Podatki rabe zemljišč in pokrovnosti

Naša hipoteza in izkušnje iz terenskega opazovanja so bile, da je raba zemljišč eden ključnih dejavnikov, ki vplivajo na zaloge ogljika v tleh. Na rabo tal lahko pripišemo vplive in njihov učinek na zaloge ogljika v tleh kot so preko vnosa organske snovi (npr. gnojenje na njivah, travnikih), oranje in s tem povečana mineralizacija organske snovi. Vektorski sloj rabe zemljišč smo pridobili na MKGP (datum 31.1.2023) (Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano, n.d.) v D96 koordinatnem sistemu ter ga rasterizirali po vrsti rabe zemljišč (stolpec RABA_ID).

Ob izpopolnjevanju modela smo ugotovili, da se vrste rabe na nekaj lokacijah merjenih podatkov tal, razlikujejo od tistih, ki so v uradnem sloju rabe zemljišč MKGP. Nekatere lokacije so tako prejele vrednost rabe zemljišč, ki je nismo vzorčili na terenu (npr. gozd RABA_ID = 2000). Ker bi upoštevanje takšnih vrednosti privedlo, do napačnih zaključkov, saj bi tako zalogo ogljika ocenjevali tudi na območjih zemljišč, ki jih nismo vzorčili smo izdelali modificiran sloj rabe zemljišč. V prvem koraku smo vse vrednosti rabe zemljišč iz točkovnih merjenih podatkov lokacij pretvorili v rastrski sloj (rz_point.tif), ki smo ga prekrili z uradnim slojem rabe zemljišč MKGP. Končni sloj *grz23.tif* je na celicah, kjer je bilo opravljeno vzorčenje, prejel vrsto rabe iz terena, ostale celice pa vrsto rabe iz uradne evidence MKGP. V sloj *grz23.tif* smo vključili le tiste vrste rabe zemljišč (vrednost RABA_ID), ki so bile vzorčene med leti 2016 – 2022. To so vrste rabe zemljišč:

- njiva, RABA_ID = 1100,
- vinograd RABA_ID = 1211,
- intenzivni sadovnjak RABA_ID = 1221,
- ekstenzivni oziroma travniški sadovnjak, RABA_ID = 1222,
- trajni travnik, RABA_ID = 1300,
- barjanski travnik, RABA_ID = 1321,
- kmetijsko zemljišče v zaraščanju, RABA_ID = 1410,
- drevesa in grmičevje, RABA_ID = 1500.

Kot vhodne spremenljivke smo dodali tudi 13 rastrskih slojev, ki predstavljajo pokritost z vegetacijo. Hipotetično smo predpostavljali, da večja kot je pokritost z zeleno odejo večja je produkcija opada in posledično večja je zaloga ogljika v tleh. Za oceno pokritosti z zeleno vegetacijo smo izbrali normirani diferencialni vegetacijski indeks (NDVI), ki je pogosto uporabljen za opazovanje stanja vegetacije. NDVI predstavlja razmerje med razliko infrardečega in rdečega kanala in njuno vsoto. NDVI indeks zavzame vrednost -1 do + 1, pri čemer višja vrednost pomeni bolj intenzivno vegetacijo. Podatke za njegov izračun smo vzeli iz satelitskih posnetkov satelita Sentinel-2 (Copernicus, n.d.) in ga izračunali kot mediano na mesečni ravni. Uporabili smo posnetke iz obdobja 29.3.2017 do 28.12.2022. Tako smo izdelali 12 slojev (jan. do dec → *NDVI1.tif* – *NDVI12.tif*) ter mediano letne NDVI vrednosti (*NDVI13.tif*). Vseh 13 rastrskih slojev NDVI smo obrezali na reprojecirali v D96 koordinatni sistem, obrezali na območje proučevanja ter pripisali ustrezen prostorski okvir (extent). Pretvorba resolucije ni bila potrebna, saj so satelitski posnetki Sentinel-2 že v ciljni resoluciji 10 m.

7 Gradnja prostorskega modela zalog ogljika (izbira in test metodoloških prilagajanj modela razmeram v Sloveniji)

7.1 Območje proučevanja in območje ocene zalog ogljika

Kot območje proučevanja (ang. area of interest oz. AOI) smo izbrali prostorski sloj meje Slovenije (GURS) in ga pretvorili v rastrski sloj z enotno vrednostjo 1 (*Slo_meja.tif*). Rastrski sloj ustreza vsem dogovorjenim tehničnim parametrom. Sloj smo v nadaljevanju modeliranja uporabljali **kot masko s katero smo obrezali ostale vhodne rastrske sloje in jim pripisali standardne tehnične parametre**.

Obseg rezultata procesiranja je dejansko manjši, saj obsega tista območja (rastrske celice), kjer popolnoma vsi vključeni geoinformacijski rastrski sloji vsebujejo informacijo na ravni celice. Kjer katerakoli istoležna celica enega od vključenih rastrskih slojev spremenljivk vsebuje vrednost »NA« je tudi končni rezultat prazen. Zato na tem mestu poudarjamo, da smo model izvedli za vrste kmetijskih zemljišč, ki so bile vzorčene med leti 2016 – 2022 (glej poglavje 6.2.4 Podatki rabe zemljišč in pokrovnosti).

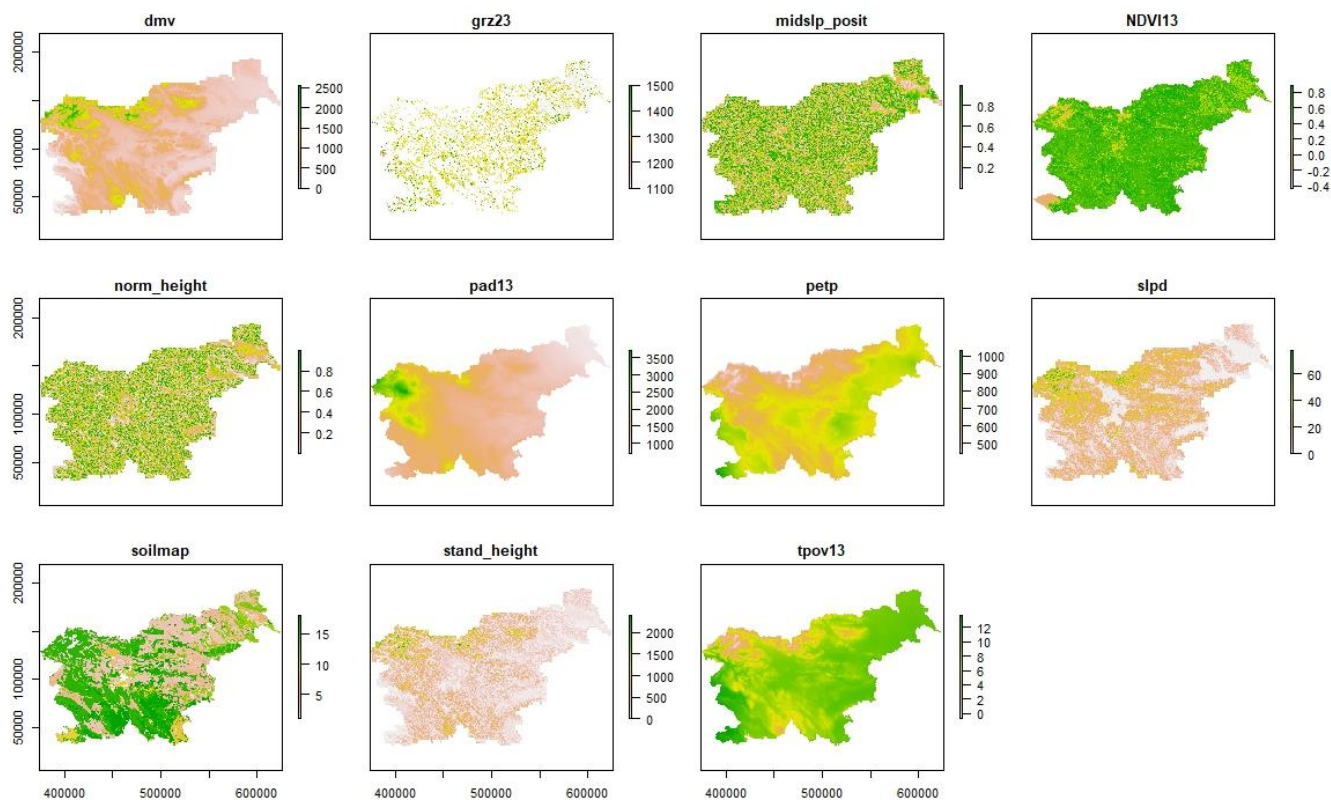
Prav tako so iz procesiranja izključena območja, ki so po geometriji pedološke karte kategorizirana kot ne-tla (TKE = 0) ter območje gramoznic (TKE = 1296 oz. TSE 0 994) in kamnolomov (TKE = 1576 oz. TSE = 993). Območja ne-tal vsebujejo območja večjih naselij ter visokogorska skalnata območja. Poudariti moramo, da je prostorska natančnost geometrije pedološke karte 1:25.000 slabša od tiste, ki jo beležimo v evidenci rabe zemljišč, zato ob prekrivanju prihaja do prostorskih neujemanj.

7.2 Izdelava prostorskega modela za oceno zalog ogljika v tleh z metodo regresijske interpolacije

Regresijska interpolacija (ang. regression-kriging) je tehnika prostorske interpolacije, ki združuje multiplo regresijsko analizo med odvisno spremenljivko (zaloge ogljika) in neodvisnimi spremenljivkami (okoljski dejavniki, ki jih predstavljajo rastrski sloji) ter interpolacijo napak napovedi s tehniko »kriging«.

Na pripravljenih podatkih učnega seta smo izvedli multipli regresijski model in preverili vpliv posameznih okoljskih dejavnikov na zalogo ogljika (*Slo_RegMatrix.csv*). Za odvisno spremenljivko smo v model vzeli logaritmirane vrednosti zalog ogljika v tleh, saj se ta spremenljivka porazdeljuje normalno v primerjavi z osnovnimi vrednostmi zalog ogljika. Postopek regresijske analize smo ponovili še s tehniko »stepwise«, ki na podlagi deleža pojasnjene variance zalog ogljika v tleh iz modela izloča posamezne neodvisne spremenljivke (okoljske dejavnike), ki ne vplivajo pomembno na delež pojasnjene variance zalog ogljika. S testom multikolinearnosti (VIF) smo ugotovili, da nekaj vhodnih spremenljivk ne izpolnjuje pogoja multikolinearnosti (kvadratni koren $VIF > 2$). To pomeni, da takšna neodvisna spremenljivka nakazuje, da je linearna kombinacija ene ali več drugih spremenljivk oz. je spremenljivka preveč soodvisna od ene ali več drugih neodvisnih spremenljivk. Te spremenljivke smo izključili iz modela. Od skupno 35 vhodnih rastrskih slojev vplivnih dejavnikov se je izkazalo, da na zaloge ogljika vpliva 11 spremenljivk, ki hkrati izpolnjujejo tudi pogoj multikolinearnosti (Slika 9).

Sledila je implementacija modela 11-ih spremenljivk (rastrskih slojev) v interpolacijsko procesiranje z orodjem autoKrige (Rstudio). Postopek je zahteval največ procesorskih in spominskih zmogljivosti med vsemi fazami dela. Za izvedbo postopka interpolacije smo uporabili delovno postajo s procesorjem Intel(R) Core(TM) i9-10900 CPU in vgrajenim 128 GB RAM-a. Ker so bile spominske kapacitete za izvedbo na 10x10 m premajhne (zadoščala ni niti selitev na strežnik z dodeljenimi 340 GB RAM-a) smo vse predhodno pripravljene rastrske sloje pretvorili na resolucijo 20x20 m in ponovili vse postopke izdelave prostorskega modela.



Slika 9: Pripravljene prostorske sloje v resoluciji 20x20, ki v model vstopajo kot neodvisne spremenljivke za oceno zalog organskega ogljika v tleh.

8 Validacija rezultatov in izpopolnjevanje modela napovedi zalog ogljika v tleh kmetijskih zemljišč na globini 0 – 30 cm

8.1 Metoda izdelave zalog ogljika v tleh iz prvega faznega poročila

Rezultat prvega faznega poročila je bil geoinformacijski sloj zalog ogljika v tleh Slovenije, ki je bil izdelan iz vhodnih podatkov vzorčenja tal med leti 2016 – 2022.

Vzorčene lokacije v letu 2022 še niso bile vključene.

Uporabili smo metodo prostorskega ujemanja (geomatching). Uporabili smo sloj rabe zemljišč (31.7.2022, MKGP) in iz njega izbrali le kmetijska zemljišča (RABA_ID < 2000) ter sloj pedosekvenc (5 pedosekvenc) vezanih na sloj pedološke karte 1:25.000 (PK25, MKGP) in izdelali agregacijo, pri čemer smo pri sloju kmetijskih zemljišč za agregacijo upoštevali atribut vrsta rabe (RABA_ID), sloj pedosekvenc pa smo agregirali po atributu, ki označuje pedosekvenco (PS).

Sloja smo med seboj presekali, da je nastal sloj prostorskih enot (zones_ps1_kz), ki smo ga v naslednjem koraku podložili pod sloj vzorčnih lokacij z izračunanim ogljikom in za prostorsko enoto izračunali povprečno zalogo ogljika v tleh iz naležnih lokacij vzorčenja.

Zaloge ogljika so ocenjene na vseh prostorskih enotah, ki imajo v fazi algoritma vsaj eno naležno vzorčno lokacijo.

Podatek zalog ogljika (parameter OCSTHA) smo pretvorili v rastrski podatkovni sloj (SI_OCSTHA_GM.tif), ki predstavlja oceno zalog ogljika v tleh v t C/ha za globino 0 – 30 cm.

Z namenom da rezultat in algoritem razlikujemo od končnega izdelanega algoritma **SOCmapSI-RK** ga imenujemo **SOCmapSI-GM**.

8.2 Metode validacije in opis izpopolnjevanja algoritma modela

Tekom projektne naloge smo izvedli 17 različic algoritmov ocene zalog ogljika v KZ, pri čemer so bile pri nekaterih vrednosti v končnem rezultatskem sloju nerealne in jih nismo podrobneje opisali in evidentirali. Poleg 17-ih različic je bilo nekaj tudi takšnih, ki sploh niso dajale rezultatov in jih prav tako nismo evidentirali. Od 17 variant jih je 16 izdelanih z metodo regresijske interpolacije.

Uspešnost izdelanega modela SOCmapSI smo preverjali:

- s kazalcem R^2 , ki pojasni delež pojasnjene variance neodvisne spremenljivke
- s primerjavo vrednosti zalog ogljika izračunanimi z modelom SOCmapSI-RK in izračunanimi vrednostmi na lokacijah vzorčenja (razpon in povprečne vrednosti) ter
- vizualno oceno prostorske razporeditve zalog ogljika izračunanih z modelom SOCmapSI-RK in izračunanimi vrednostmi na lokacijah vzorčenja.

Primerjali smo rezultat ocene zalog ogljika iz faznega poročila (**SOCmapSI-GM**) s končnim rezultatom **SOCmapSI-RK**. Za validacijo smo izbrali kazalec standardna napaka ocene (RMSE) in kazalec deleža pojasnjene variance (AVE). RMSE je kazalec, ki nam pove kakšna je povprečna napaka napovedi modela. AVE ocenjuje ali z modelom točneje napovemo zaloge ogljika v tleh kot, če bi za oceno zalog uporabili povprečno vrednost. Višja kot je vrednost nad 0, bolj je točen

v primerjavi z uporabo povprečja. Če pa je AVE negativen, pomeni, da je napoved bolj točna če vzamemo povprečje.

Dodatno smo opravili grafično validacijo, kjer smo na grafu za vse validacijske lokacije (validacijski set) izrisali napovedane in merjene vrednosti ter izrisali linearno regresijsko premico.

8.3 Rezultati validacije in izpopolnjevanja modela

Najpomembnejša izpopolnitev modela za drugo fazno poročilo je bil torej prehod iz metode prostorskega ujemanja (prvo fazno poročilo) na uporabo in implementacijo metode regresijske interpolacije (končno poročilo).

Z varianto 3 smo npr. iz modela dobili prve rezultate, ki so bile glede na razpon vrednosti realne, čeprav so bile maksimalne vrednosti zalog v primerjavi z merjenimi vrednostmi nizke in sicer 129,9 t C/ha in delež pojasnjene variance rezultatov (R^2) je imel vrednost 17,2. Pri vsaki naslednji iteraciji smo implementirali nekaj manjših tehničnih dopolnitev in parametrov ter postopoma povečevali število vključenih slojev potencialno vplivnih dejavnikov. Pri varianti 6 npr. smo vključili že 42 slojev potencialno vplivnih dejavnikov in dosegli razpon med 26,3 in 1.009,3 t C/ha s povprečjem 105,7 t C/ha in $R^2 = 34,3$. Nato smo na lokacijah vzorčenja popravili vhodni podatek rabe zemljišč in popravili sloje osončenosti in klimatske podatke (vrednosti 0 v no data). Pri varianti 9 smo uspeli doseči $R^2 = 0,409$, vendar so bili razponi vrednosti in povprečja manj primerljivi z merjenimi podatki (min = 0, maks = 60,03) povprečje zalog pa popolnoma nerealno 0,34 t C/ha). Nato smo popravili sloj pedološke karte tako, da je vseboval zgolj tiste talne tipe, kjer na katerih je bilo opravljeno vzorčenje sprva med leti 2016 in 2021 nato pa v celotnem obdobju vzorčenja 2016 – 2022. Na ta način smo pri ivarianti15 izboljšali R^2 na vrednost 0,509, ter razpon vrednosti zalog med 38,27 in 326 ter povprečjem 88,1 t C/ha. Nato smo poskusili še z modeliranjem v resoluciji 10 m. Varianta z 10 m resolucijo je bila neuspešna, saj model zaradi spominskih omejitev ni uspel izdelati rezultatskega sloja. Zato smo se odločili za pretvorbo pripravljenih slojev vplivnih dejavnikov na 20 m resolucijo. Model je bil uspešno izveden, rezultati so bili primerljivi z merjenimi vrednostmi s povprečjem 87,1 t C/ha in razponom min = 30,9 in maks. = 329 t C/ha. Vrednost R^2 je bila 0,506.

Če strnemo najbolj ključne izpopolnitve modela, so to:

- Prehod iz metode prostorskega ujemanja (SOCmapSI-GM) na regresijsko interpolacijo (SOCmapSI-RK),
- delitev lokacij vzorčenja na učni in validacijski set,
- vključitev lokacij vzorčenja na kmetijskih zemljiščih iz let 2016 – 2022,
- postopno vključevanje geoinformacijskih slojev, ki predstavljajo potencialne vplivne dejavnike;
- izboljšana prostorska natančnost (iz 100 m na 20 m resolucijo);
- popravki sloja rabe tal na tiste evidentirane na terenu;
- združevanje talnih tipov, ki z vzorčenjem 2016 – 2022 niso bili zajeti;
- reklasifikacija vrednosti 0 v no data;
- pretvorba kategoričnih spremenljivk v tip »factor«.

Rezultati validacije kažejo primerjavo opisnih statistik napak napovedi za oba izdelana algoritma. Ugotovimo, da so povprečne napake napovedi zelo podobne. Pri modelu SOCmapSI-RK je v

primerjavi SOCmapSI_GM manjša predvsem minimalna in maksimalna napaka, manjše je tudi število validacijskih lokacij, brez vrednosti zalog ogljika (Preglednica 3).

Preglednica 3: Povzetek napak napovedi za modela SOCmapSI-GM in SOCmapSI-RK.

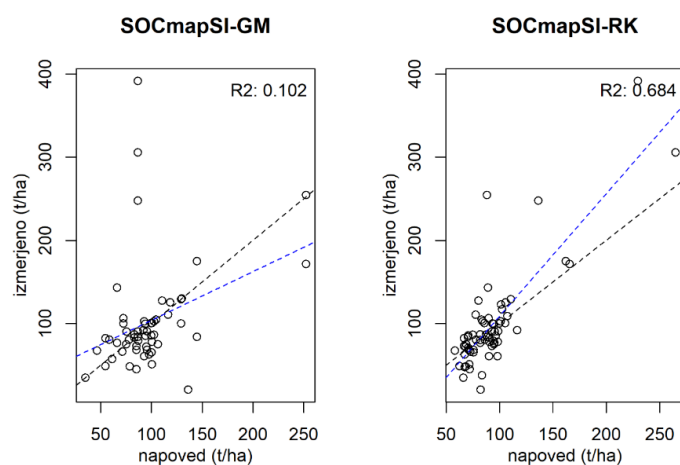
	SOCmapSI-GM	SOCmapSI-RK
Min.	305,04	166,42
1st Qu.:	-7,65	-14,44
Median	0,00	0,38
Mean	-5,15	-5,48
3rd Qu.:	18,21	12,18
Max.	115,65	61,99
NA's	16,00	6,00

Standardna napaka ocene, ki primerja merjene in ocenjene zaloge ogljika v tleh na validacijskem setu podatkov, je pri modelu SOCmapSI-RK manjša (35,83) kot pri modelu SOCmapSI-GM. Kljub temu je standardna napaka napovedi še vedno precej velika. Je pa to le eden od kazalcev zanesljivosti modela in ocenjuje povprečno odstopanje. Pomagamo si lahko tudi z kazalcem AVE (delež pojasnjene variance), ki pri modelu SOCmapSI pokaže, da je precej višji (0,62) kot pri modelu SOCmapSI-GM (0,11). Z njim torej natančneje ocenimo zalogo ogljika na poljubni lokaciji, kot z modelom SOCmapSI-GM in hkrati veliko bolje kot če bi za oceno zalog ogljika vzeli povprečno vrednost (Preglednica 4).

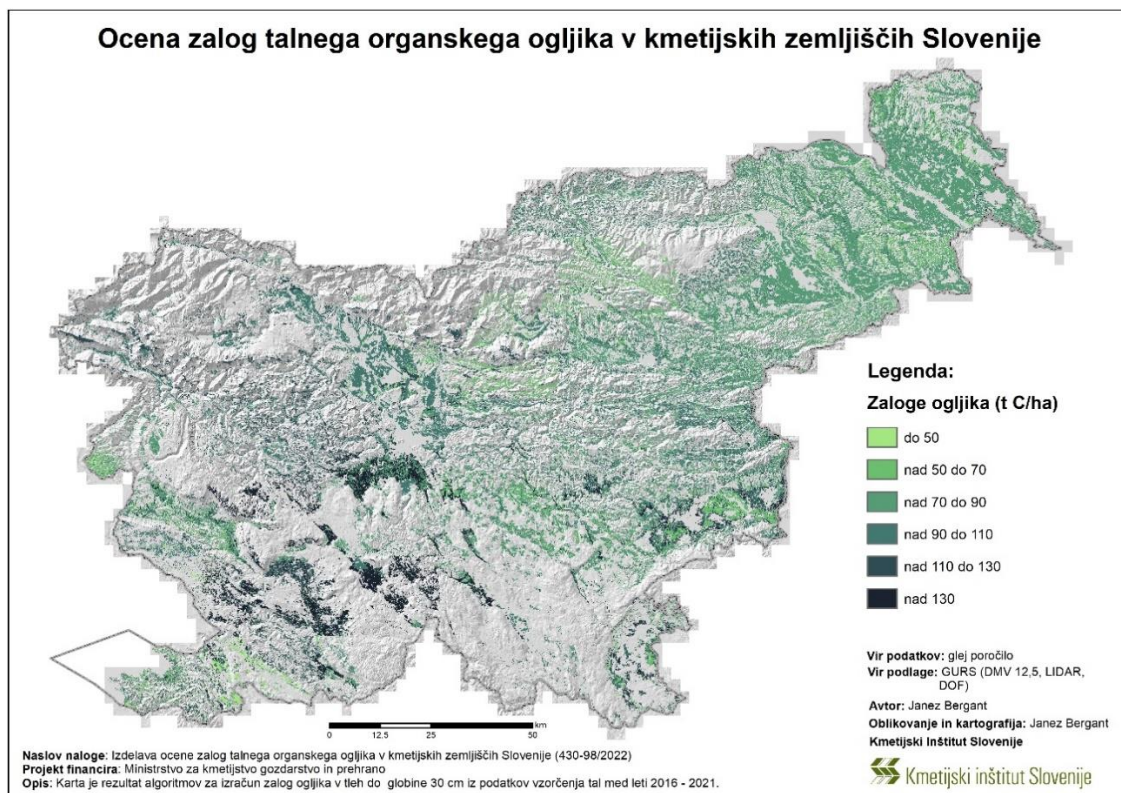
Preglednica 4: Povzetek vrednosti uporabljenih kazalcev za oceno kakovosti modela SOCmapSI-GM in SOCmapSI-RK.

	SOCmapSI-GM	SOCmapSI-RK
RMSE	54,65	35,83
AVE	0,11	0,62

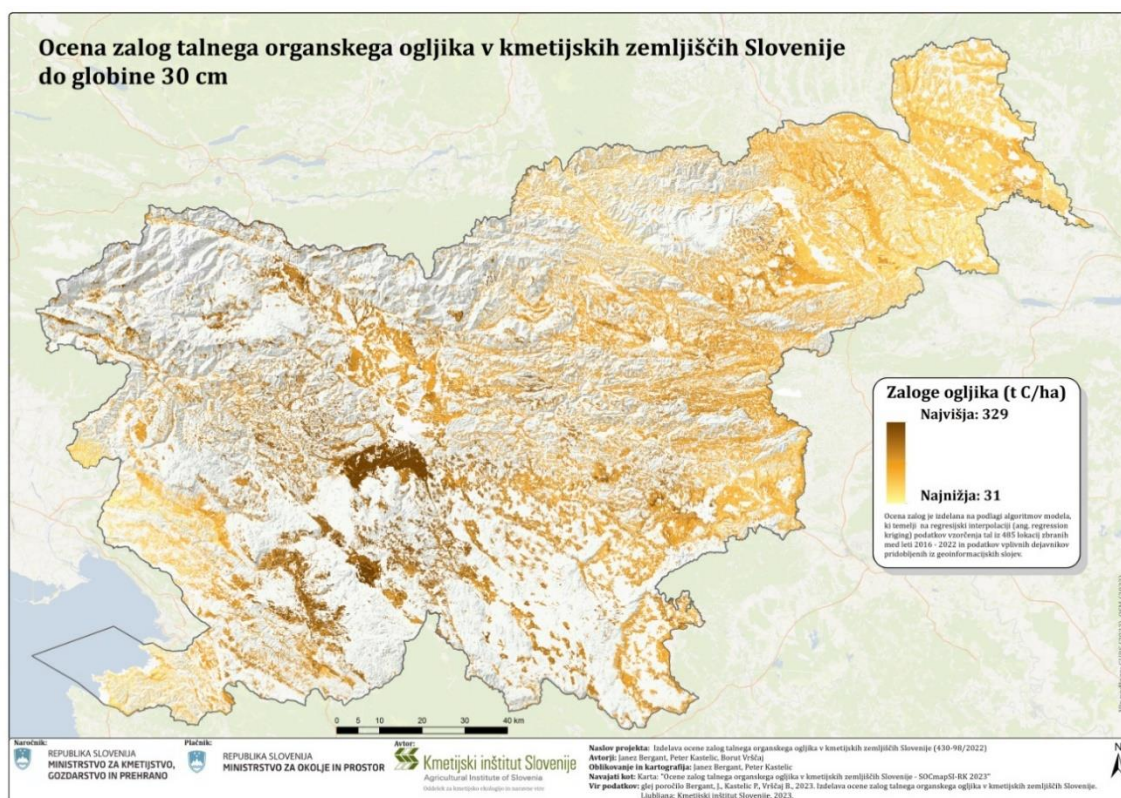
Linearna regresijska premica med napovedanimi in merjenimi vrednostmi zalog ogljika izkazuje večjo korelacijo pri modelu SOCmapSI-RK. Z uporabo modela SOCmapSI-RK lahko pojasnimo 68,4 % variance zalog iz merjenih vrednosti validacijskega seta. Pri modelu SOCmapSI-GM je ta odstotek 10 % (Slika 10).



Slika 10: Razpršeni grafikon napovedanih in merjenih vrednosti validacijskega seta. Črna premica je teoretična linija 1:1 med napovedjo in merjenimi vrednostmi, modra črta pa predstavlja dejansko regresijsko premico med merjenimi in napovedanimi vrednostmi za model SOCmapSI-GM in SOCmapSI-RK.



Slika 11: Ocena zalog talnega organskega ogljika po modelu SOCmapSI-GM (fazno poročilo).



Slika 12: Ocena zalog talnega organskega ogljika po modelu SOCmapSI-RK (končno poročilo).

9 Rezultati projektne naloge

9.1 Rastrski sloj zalog organskega ogljika v tleh kmetijskih zemljišč Slovenije (t C/ha) na globini 0-30 cm

Po uspešno končani interpolaciji je glavni rezultat modela **SOCmapSI-RK rastrski geoinformacijski sloj napovedi zalog ogljika v tleh (t/ha)** (*SI_OCSTHA_RK.tif*) ter sloj standardnih deviacij zalog ogljika v tleh (*SI_OCSTHA_RKpredsd.tif*) v resoluciji 20x20 m za območje KZ Slovenije v koordinatnem sistemu D96 (EPSG:3794). Sloj *SI_OCSTHA_RK.tif* je priložen kot digitalna priloga končnemu poročilu (Priloga 1). Podrobnosti v zvezi s slojem so podane v priloženi datoteki (berime.txt).

Sloj smo uporabili za izdelavo karte ocene zaloge ogljika v tleh kmetijskih zemljišč Slovenije na globini 0–30 cm, ki je tiskana v 2 izvodih kot poster formata A0 in je priloga temu poročilu (Priloga 2). V skladu z zahtevami projektne naloge smo pripravili tudi karto v velikosti formata A2, ki je digitalna priloga tega poročila (*20230225_Karta_OCS_A2v3_300DPI.tif*) (Priloga 5)

9.2 Interpretacija rezultatov in splošne ugotovitve

S končnim modelom SOCmapSI-RK uspešno napovemo 54,8 % variance zalog talnega ogljika v tleh ($R^2 = 0,5479$) (

Preglednica 5). Model vključuje 11 neodvisnih spremenljivk in ga lahko zapišemo kot:

$$\log(OCSTHA) = dmv + grz23 + midslp_posit + NDVI13 + norm_height + pad13 + petp + slpd + soilmap + stand_height + tpov13$$

Z zanemarljivo stopnjo tveganja (F test: 13,15 na 33 in prostostni stopnji 358, p-vrednost $< 2,2 \cdot 10^{-16}$) lahko trdimo, da je model statistično značilen kar pomeni, da vsaj ena od vključenih neodvisnih spremenljivk v modelu pomembno vpliva na zaloge ogljika v tleh.

Z zanemarljivo stopnjo tveganja je vpliv na zaloge ogljika statistično značilen pri številskih spremenljivkah: dmv, NDVI13 in tpov13.

S stopnjo tveganja pod 1 % je vpliv statistično značilen pri številskih spremenljivkah pad13 in stand_height.

S stopnjo tveganja med 1 in 5 % je vpliv statistično značilen pri številskih spremenljivkah dmv, midslp_posit, norm_height, petp in slpd.

Med 9-imi statistično značilnimi neodvisnimi številskimi spremenljivkami imajo na **zaloge ogljika v tleh negativen vpliv** (negativen predznak napovednega koeficienta) spremenljivke dmv, midslp_posit, norm_height, slpd in tpov13. To pomeni, da se npr. s povečanjem povprečne letne temperature (tpov13) za 1 stopinjo °C zaloga ogljika zmanjša za 0,12 t C/ha ali za vsakih 100 m nadmorske višine se zaloga ogljika v tleh zmanjša za 0,05 t C/ha.

Pozitivno korelacijo z zalogami ogljika v modelu imajo številске spremenljivke NDVI13, pad13, petp in stand_height. To pomeni, da se npr. na vsakih 100 mm povprečne letne višine padavin zaloga organske snovi v tleh v povprečju poveča za 0,02 t C/ha.

V model smo vključili tudi nominalni spremenljivki, ki pomembno vplivata na oceno zalog ogljika v tleh; talne tipe in pedološke karte (soilmap) in rabo tal (grz23). Pri interpretaciji nominalnih spremenljivk je drugačna. Pri kategorični spremenljivki ena od kategorij vedno prevzame referenčno vrednost s katero so primerjane vse ostale. V našem modelu je referenčna vrednost pri spremenljivki raba postala vrednost 1100, kar predstavlja njive. Pri spremenljivki talni tipi pa je referenčna vrednost postala vrednost 1, ki predstavlja šotna tla.

V primeru rabe zemljišč tako statistični koeficient za vrednost 1211 (vinograd) z vrednostjo -0,168 pomeni, da je zaloga ogljika v tleh vinogradov v povprečju za 0,17 t C/ha nižja kot je zaloga ogljika na njivah pri statistični značilnosti tveganja 2 %, če predpostavljamo, da se vrednost drugih spremenljivk ne spremeni. Še z manj tveganja (0,7 %) lahko trdimo, da je zaloga ogljika v tleh intenzivnih sadovnjakov (1221) v povprečju za 0,21 t C/ha (koeficient = 0,208) nižja kot v tleh njiv ob predpostavki, da ostale vrednosti spremenljivk ostanejo enake. Pri vseh ostalih rabah zemljišč vpliv rabe na zalogo ogljika v tleh ni statistično značilen.

Enako interpretiramo tudi vpliv talnih tipov na zaloge ogljika v tleh. V modelu se vsi talni tipi primerjajo s šotnimi tlemi (vrednost 1). Vidimo lahko, da so prav pri vseh ostalih talnih tipih zaloge ogljika v tleh nižje kot pri šotnih tleh, pri tem pa je statistična značilnost visoka. Razen pri mineralno organskih tleh (koeficient = -0,182) vpliv rabe ni statistično značilen ($p > 0,05$). Ta ugotovitev se sklada z znanimi vedenji in pričakovani vplivi talnih tipov na zaloge ogljika v tleh. Namreč mineralno-organska tla se pojavljajo v kombinaciji s šotnimi tlemi, zato je njihova podobnost pričakovana in logična.

Najbolj različne zaloge ogljika od šotnih tal imajo po modelu rdeče rjava tla (koeficient = - 1,241) in rigolana tla (koeficient = - 1,227). To so tla submediteranske Slovenije, kjer so povprečne vrednosti zalog ogljika nižje kot v osrednji Sloveniji. Rigolana tla se praviloma pojavljajo v vinogradih, ki imajo zaloge izračunane iz terenskih meritev vzorčenj podpovprečne (povprečje 60 t C/ha).

Precej visok negativen koeficient imajo še psevdogleji (-1,134), karbonatna rjava tla (-1,107) in obrečna tla (-1,102).

S povprečno za več kot 1 t C/ha manjšo zalogo ogljika v primerjavi s šotnimi tlemi uvrščamo po modelu še izprana tla (-1,096), izprana tla (luvisol) (-1,073) in nerazvita obrečna tla (-1,044). Ostali talni tipi imajo razliko manjšo. Najmanjšo razliko s šotnimi tlemi (razen organsko-mineralnih tal, ki smo jih že opisali in so s šotnimi tlemi zelo podobna imajo gleji na organskem podtalju (-0,534), ki se prav tako pojavljajo na podobnih območjih kot šotna tla, a statistično gledano imajo že statistično značilno manj ogljika kot šotna tla.

Preglednica 5: Povzetek regresijskega modela SOCmap-RK.

```

lm(formula = log(OCSTHA) ~ dmv + grz23 + midslp_posit + NDVI13 + norm_height + pad13 + petp + slpd + soilmap + stand_height + tpov13, data
= datdf)
Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-1.62786 -0.14222  0.00435  0.15870  0.86196
Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  5.4929219  0.3447995  15.931 < 2e-16 ***
dmv          -0.0005458  0.0002492  -2.191 0.029118 *
grz231211    -0.1677376  0.0727773  -2.305 0.021749 *
grz231221    -0.2082894  0.0774119  -2.691 0.007465 **
grz231222     0.0297953  0.0749333   0.398 0.691144
grz231300     0.0354585  0.0439580   0.807 0.420407
grz231321     0.0793629  0.1179180   0.673 0.501359
grz231410     0.0219364  0.0828148   0.265 0.791251
grz231500    -0.1226529  0.0793280  -1.546 0.122952
midslp_posit -0.1220042  0.0561470  -2.173 0.030440 *
NDVI13        0.6014255  0.1377147   4.367 1.65e-05 ***
norm_height  -0.2736905  0.1225486  -2.233 0.026145 *
pad13         0.0001886  0.0000592   3.186 0.001569 **
petp          0.0011029  0.0004659   2.367 0.018446 *
slpd         -0.0064000  0.0030740  -2.082 0.038054 *
soilmap2     -0.8706968  0.1389338  -6.267 1.06e-09 ***
soilmap3     -1.1499383  0.1041711 -11.039 < 2e-16 ***
soilmap4     -1.0814466  0.1000089 -10.813 < 2e-16 ***
soilmap5     -0.5338547  0.1334184  -4.001 7.66e-05 ***
soilmap6     -0.9886824  0.1037363  -9.531 < 2e-16 ***
soilmap7     -1.0959763  0.1569250  -6.984 1.40e-11 ***
soilmap8     -1.0730348  0.1179679  -9.096 < 2e-16 ***
soilmap9     -1.1065242  0.1585090  -6.981 1.43e-11 ***
soilmap10    -0.1822640  0.1638984  -1.112 0.266861
soilmap11    -1.0440631  0.2150219  -4.856 1.80e-06 ***
soilmap12    -1.1016553  0.1022183 -10.777 < 2e-16 ***
soilmap13    -1.1343070  0.1098494 -10.326 < 2e-16 ***
soilmap14    -0.9164771  0.2190725  -4.183 3.62e-05 ***
soilmap15    -1.2413003  0.1927930  -6.439 3.88e-10 ***
soilmap16    -0.9909356  0.1103315  -8.981 < 2e-16 ***
soilmap17    -1.2276142  0.1512661  -8.116 7.84e-15 ***
soilmap18    -0.9822932  0.1094056  -8.978 < 2e-16 ***
stand_height  0.0007586  0.0002820   2.690 0.007483 **
tpov13       -0.1149104  0.0340002  -3.380 0.000806 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
Residual standard error: 0.2712 on 358 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.5479,    Adjusted R-squared:  0.5063
F-statistic: 13.15 on 33 and 358 DF, p-value: < 2.2e-16

```

Z modelom SOCmapSI-RK ocenjujemo, da se zaloge ogljika v kmetijskih zemljiščih Slovenije gibljejo med 31,0 in 329,0 t C/ha s povprečno vrednostjo 87,2 t/ha.

Izmerjene zaloge na lokacijah vzorčenja so imele nekoliko širši razpon in sicer med 11,1 - 392,6 t C/ha z nekoliko višjo povprečno zalogo 94,1 t C/ha.

Najvišje povprečne zaloge ogljika po modelu SOCmapSI-RK ocenjujemo na barjanskih travnikih (216,3 t C/ha). Primerljive s povprečjem za kmetijska zemljišča so zaloge na ekstenzivnih sadovnjakih, travnikih, kmetijskih zemljiščih v zaraščanju in rabi drevesa in grmičevje. Opazno nižje so ocenjene zaloge na intenzivnih sadovnjakih (68,0 t C/ha) in vinogradih s povprečjem 63,1 t C/ha.

Iz rezultatov modela in površin, ki jih model pokriva smo izračunali skupne zaloge talnega ogljika na kmetijskih zemljiščih Slovenije. **Ocenjujemo, da je v tleh kmetijskih zemljišč do globine 0 - 30 cm vezanih 54,9 Mt organskega C.**

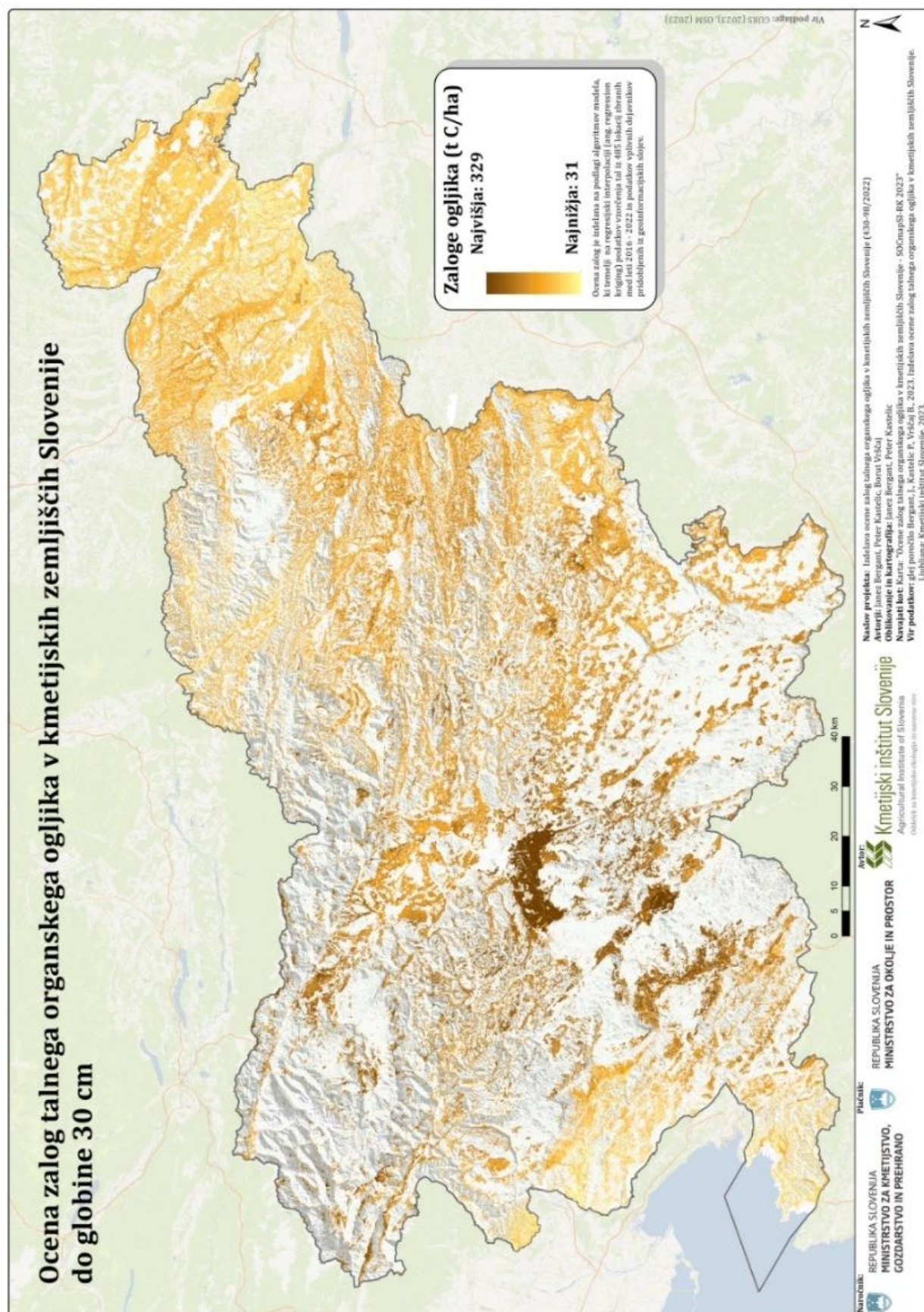
Med rabami zemljišč obstajajo razlike. Skoraj polovico vseh zalog je shranjenih v tleh trajnih travnikov in sicer 29,0 Mt C. Več kot polovico manj zalog je shranjenih v njivskih tleh (13,3 Mt C). Zaloge ogljika na travnikih in njivah predstavljajo 77 % vseh zalog talnega organskega ogljika kmetijskih zemljišč. Vse ostale rabe hranijo 3 % ali manj celotnega deleža zalog ogljika kmetijskih zemljišč.

Rezultate modela SOCmapSI-RK smo prikazali grafično po vrstah rabe zemljišč (uporabili smo sloj grz23) ter njihove povprečne vrednosti (zaloge org. ogljika t/ha) primerjali s povprečnimi zalogami organskega ogljika na lokacijah vzorčenja med leti 2016 - 2022.

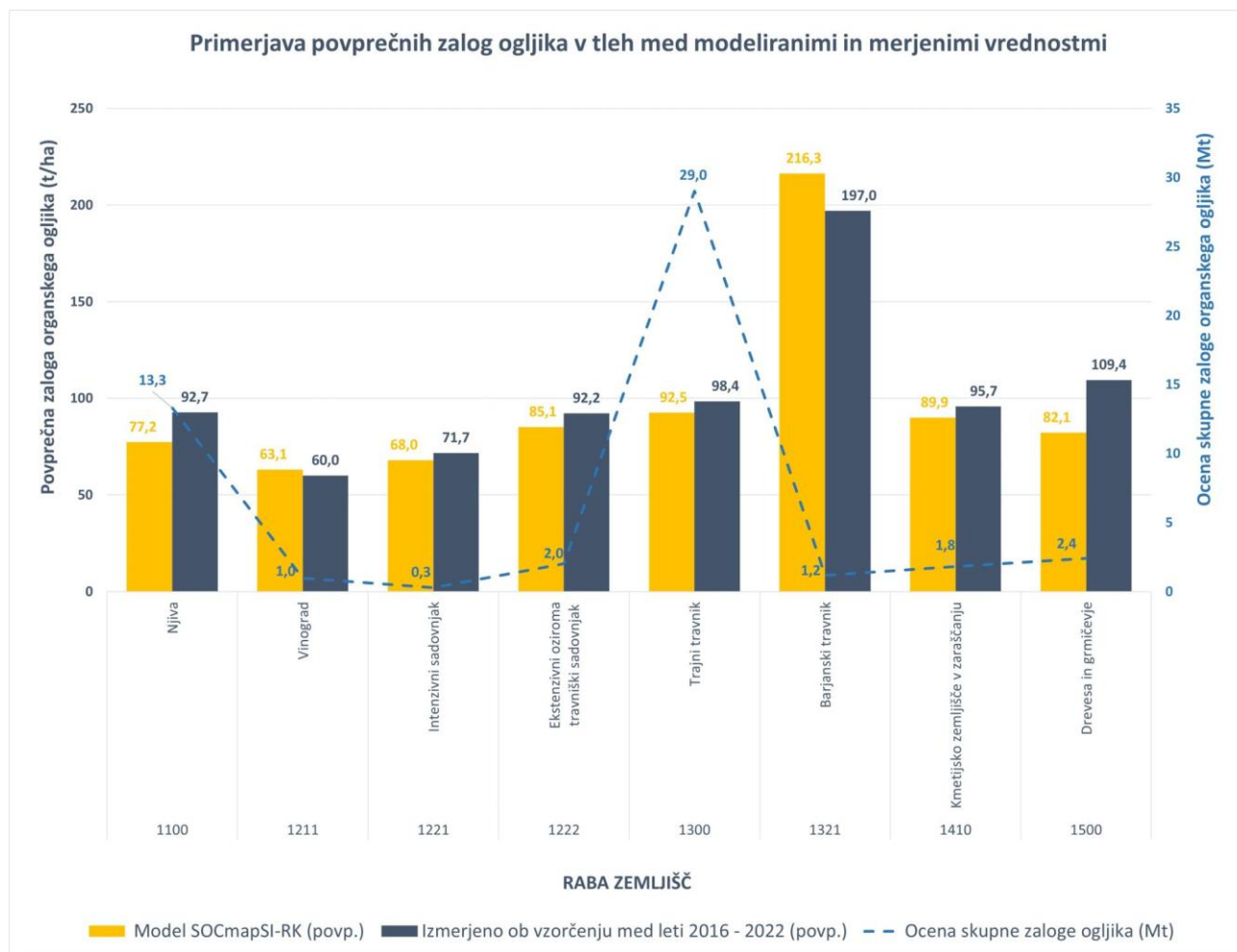
Pri 6 od 8 vrst obravnavanih rab zemljišč model zaloge organskega ogljika v tleh podcenjuje. Na njivah model v povprečju podcenjuje zaloge za absolutno napako 15,4 t C/ha. Pri intenzivnih sadovnjakih model podcenjuje povprečne zaloge za 3,7 t C/ha, v ekstenzivnih sadovnjakih model podcenjuje povprečne zaloge za 7,0 t C/ha, pri trajnih travnikih za 5,9 t/ha, pri kmetijskih zemljiščih v zaraščanju za 5,8 t C/ha. Največja napaka v povprečnih zalogah je pri drevesih in grmičevju kjer model podcenjuje povprečja za 27,3 t C/ha.

Na 2 od 8 rab zemljišč model precenjuje zaloge ogljika v tleh. V tleh vinogradov model rahlo precenjuje povprečne zaloge in sicer za 3,1 t C/ha, na barjanskih travnikih pa model precenjuje zaloge ogljika za 19,3 t C/ha.

Zaloge ogljika v tleh se zelo razlikujejo tudi geografsko kar dobro prikazuje karta. Najvišje zaloge so na območju barij (na karti izstopa Ljubljansko barje) in Notranjskih kraških poljih (npr. Planinsko polje, Cerčniško polje). V grobem lahko ugotovimo, da so zaloge ogljika nadpovprečne na območju gorske pregrade, ki jo oblikujejo Julijske Alpe z Zahodnim predalpskim hribovjem in Visokimi dinarsko-kraškimi planotami. Proti zahodu na Primorsko stran opazimo zmanjšanje zalog ogljika na zelo kratki razdalji (npr. Trnovski gozd vs Vipavska dolina). Prav tako zaloge ogljika upadajo proti vzhodu in severovzhodu države, kjer so na najbolj kmetijsko intenzivno obdelanih območjih Slovenije (Dravsko-Ptujski polje in Murska kotlina) podpovprečne. Podobno nizke so tudi na območju Slovenskih goric, Haložah in na Goričkem.



Slika 13: Karta ocene zalog talnega organskega ogljika po modelu SOCmapSI-RK (končno poročilo)



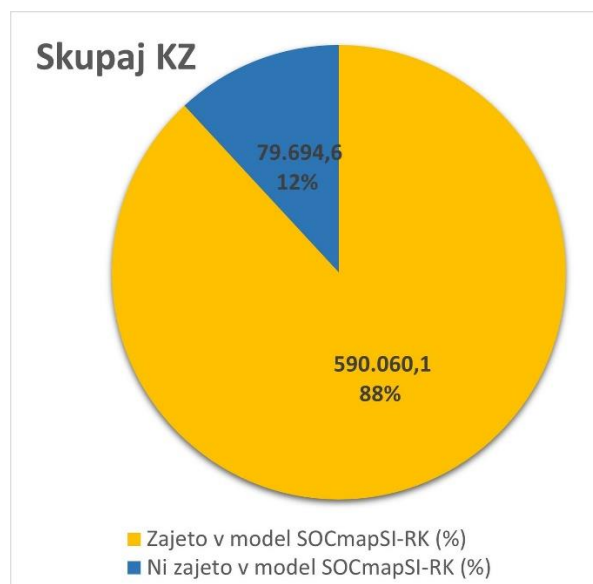
Slika 14: Primerjava povprečnih zaloge ogljika v tleh kmetijskih zemljišč po modelu SOCmapSI-RK iz izmerjenimi na lokacijah terenskih vzorčenj 2016 – 2022 (primarna os). Prikaz skupnih zalog ogljika (sekundarna os).

Po podatkih analize rabe zemljišč (pridobljeno iz rastra grz23) je v Sloveniji 669.754,7 ha KZ. Model SOCmapSI-RK pokriva 630.077,2 ha zemljišč od tega 590.60,1 ha spada pod kmetijska zemljišča kar je dobrih 88 % vseh kmetijskih zemljišč (Slika 15). V model smo vključili 8 vrst rab kmetijskih zemljišč (t.i. obravnavane rabe) kar z modelom pokrije 584.263,6 ha in sicer (Slika 16):

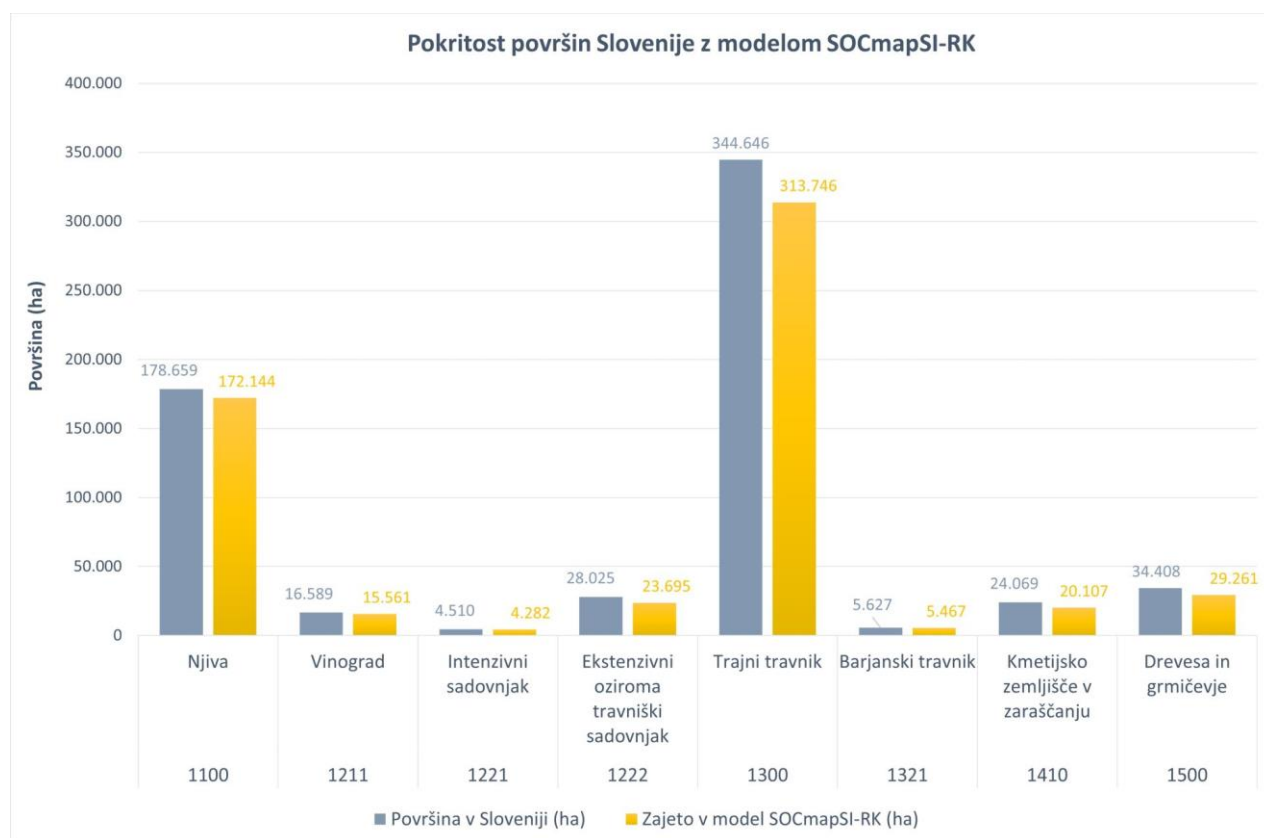
- njive (RABA_ID = 1100) 172.143,7 ha oz. 96,4 % vseh njiv,
- vinograd (RABA_ID = 1211) 15.560,5 ha oz. 93,8 % vseh vinogradov,
- intenzivni sadovnjak (RABA_ID = 1221) 4.282,5 ha oz. 94,9 % vseh intenzivnih sadovnjakov,
- ekstenzivni sadovnjak (RABA_ID = 1222) 23.695,5 ha oz. 84,6 % vseh ekstenzivnih sadovnjakov,
- trajni travnik (RABA_ID = 1300) 313.746,3 ha oz. 91,0 % vseh trajnih travnikov,
- barjanski travnik (RABA_ID = 1321) 5.466,6 ha oz. 97,2 % vseh barjanskih travnikov,
- kmetijsko zemljišče v zaraščanju (RABA_ID = 1410) 20.107,3 ha oz. 83,5 % zemljišč v zaraščanju,
- drevesa in grmičevje (RABA_ID = 1500) 29.261,3 ha oz. 85 % vseh rab drevesa in grmičevje.

V model niso vključene nekmetijske rabe zemljišč (RABA_ID < 2000) in kmetijske rabe zemljišč, ki niso RABA_ID 1100, 1211, 1221, 1222, 1300, 1321, 1410 ali 1500. V modelu so prav tako izključena vse površine kjer katerikoli od vhodnih prostorskih slojev vplivnih dejavnikov ni imel podatka (NA vrednosti celic) na območju Slovenije. To so območja, ki so po podatkih Pedološke

karte Slovenije (PK25) uvrščena kot ne-tla (območja večjih, strnjenih poselitev, vodnih površin). Natančnost geometrije PK25 ni primerljiva z natančnostjo evidenc rabe zemljišč, zato se kategorije pozidanih območij in območij ne-tal in podatkov pedološke karte Slovenije merila 1:25.000 ne ujemajo popolnoma.



Slika 15: Površina kmetijskih zemljišč, ki jih zajamemo v model SOCmapSI-RK.



Slika 16: Površinska pokritost modela SOCmapSI-RK v po kmetijskih zemljiščih Slovenije.

9.3 Smernice

Prostorski sloj zalog ogljika ocenjen z modelom SOCmapSI-RK je ob zaključku naloge (februar 2022) najbolj metodološko dovršen in prostorsko natančen ter ažuren podatek, ki na nacionalni ravni ocenjuje zaloge talnega ogljika na kmetijskih zemljiščih.

Uporabo prostorskega sloja ocene zalog ogljika v tleh po modelu SOCmapSI-RK vidimo predvsem:

- pri poročanju Slovenije o zalogah ogljika v tleh na FAO in prispevek k svetovni karti zalog ogljika v tleh;
- kot vhodni podatek za namen preračunavanja ponorov in izgub zalog ogljika v sektorju LULUCF;
- kot vhodni podatek pri modeliranju in ocenjevanju vezave ogljika v tla (npr. RothC model)
- kot vhodni podatek za izračunavanje in poročanje izpustov toplogrednih plinov iz kmetijstva;
- kot informacijo za bolj ciljno prostorsko usmerjanje kmetijsko-okoljskih ukrepov za ohranjanje organske snovi v tleh;
- kot vhodni podatek za določanje ogroženih območij z nizkimi vsebnostmi organskega ogljika;
- kot vhodni podatek za spremljanje stanja kmetijskih tal v Sloveniji;
- kot vhodni podatek pri določanju najboljših kmetijskih zemljišč;
- kot vhodni podatek za oceno rodovitnosti tal in ravnanje z rodovitnim delom tal pri večjih gradbenih posegih;
- za objektivnejše vrednotenje kakovosti tal na območjih kjer se na kmetijskih zemljiščih prekrivajo okoljevarstvene strategije (ohranjanje biotske raznovrstnosti, Ramsarska konvencija, ukrepi na VVO območjih itd.);
- za boljšo oceno ekosistemskih storitev tal;
- prostorsko planiranje in ohranjanje najboljših kmetijskih zemljišč.

Eno od ključnih izpopolnitev skupne ocene zalog ogljika vidimo v vključitvi vhodni slojev terenskih vzorčenj tal na gozdnih zemljiščih, ki jih za poročanje izpustov toplogrednih plinov in poročanje po LULUCF izvajajo na Gozdarskem inštitutu Slovenije. Vključitev tovrstnih vhodnih podatkov, bi pomenila izboljšanje statistične značilnosti modela zaradi večjega števila merjenih podatkov. Hkrati bi s tem pokrili večinski delež Slovenije, saj gozd po trenutnih podatkih pokriva 1.197.419 ha kar je 59 % Slovenije (sloj grz23 rasterizirano iz MKGP raba zemljišč). Skupaj s kmetijskimi zemljišči, kjer model pokriva 31 % Slovenije bi nova verzija modela SOCmapSI lahko izboljšala pokritost na 90 % Slovenije.

Izpopolnitve, a manjše, so pričakovane tudi v posodobitvi vhodnih podatkov potencialnih vplivnih dejavnikov kot so klimatski podatki.

V prihodnje bi bilo zelo smiselno izdelati in testirati še model, ki bi temeljil na tehniki »random forest« in »support vector machines« ter primerjati rezultate z modelom SOCmapSI-RK in merjenimi vrednostmi terenskih vzorčenj.

Ena glavnih pomanjkljivosti kateregakoli modela za oceno zalog ogljika v tleh je dejstvo, da na nivoju zemljišča nimamo podatka o različnih antropogenih vplivih. Ti so individualni in jih administrativno na ravni države ne spremljamo ali pa nimamo dostopa do njih. Tu mislimo

predvsem na podatek o količini in vrsti vnosa gnojil, ki zlasti na kmetijskih zemljiščih v veliki meri vpliva na končne zaloge ogljika v tleh. Menimo, da smo v modelu SOCmapSI-RK pokrili večino naravnih dejavnikov, ki vplivajo na zaloge ogljika v tleh. Prav zaradi tega smo prepričani, da z dodajanjem zgolj prostorskih slojev, ki bi predstavljali dodatne naravne potencialne dejavnike na zaloge ogljika v tleh ne bi mogli več bistveno izboljšati moči modela (npr. R^2 bi ostal podoben). Po drugi strani pa bi vključitev dejavnika »količina gnojil« ali »vrsta gnojil« najbrž pomembneje vplivala na izboljšanje moči modela.

10 Spletna predstavitev rezultatov celotne projektne naloge naročniku

Naročniku smo predstavili način zajema podatkov tal in drugih vplivnih dejavnikov, metodologijo izdelave modela, rezultate in nadaljnje usmeritve. Predstavitev je bila izvedena 27.2.2023 ob 9:30 kot spletna predstavitev v ZOOM.

Od: Jani Bergant <jani.bergant@kis.si>
Za: "maja.dovzsek@gov.si" <maja.dovzsek@gov.si>
Datum: 23. 02. 2023 10:44
Zadeva: Fw: Spletna predstavitev rezultatov projektne naloge: Izdelava ocene zalog talnega organskega ogljika v KZ (2550-22-311048)

Pozdravljeni,

v skladu z obveznostmi projektne naloge "Izdelava ocene zalog talnega organskega ogljika v KZ (2550-22-311048)" vas vabimo na spletno predstavitev projektne naloge naročniku kjer bomo predstavili zajem podatkov, rezultate in nadaljnje usmeritve. Predstavitev bomo izvedli v ponedeljek 27.2.2023 ob 9:30 in bo potekala prek ZOOM-a. Lepo vabljeni.

Lp Jani

KIS [AIS] is inviting you to a scheduled Zoom meeting.

Topic: Predstavitev JN Izdelava ocene zalog talnega organskega ogljika v KZ (2550-22-311048)
Time: Feb 27, 2023 09:30 Budapest

Join Zoom Meeting
<https://us06web.zoom.us/j/86262553960>

Meeting ID: 862 6255 3960
One tap mobile
+38616003102,,86262553960# Slovenia
+38618888788,,86262553960# Slovenia

Dial by your location
+386 1600 3102 Slovenia
+386 1888 8788 Slovenia
Meeting ID: 862 6255 3960
Find your local number: <https://us06web.zoom.us/j/kNdp7vF2>

Janez Bergant

Strokovni sodelavec/Expert | Oddelek za kmetijsko ekologijo in naravne vire/Department of Agricultural Ecology and Natural Resources

Kmetijski inštitut Slovenije/Agricultural Institute of Slovenia | Hacquetova ulica 17 | SI-1000 Ljubljana | Slovenija/Slovenia

T +386 (0)1 280 52 29 | E jani.bergant@kis.si | [www.kis.si]www.kis.si

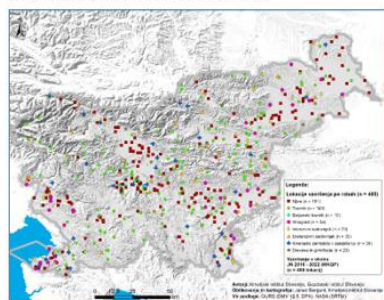
Slika 17: Vabilo na zaključno predstavitev dela na projektu za naročnika.

11 Zasnova in izdelava ilustrirane elektronske brošure o zalogah ogljika v tleh

Pripravili smo elektronsko brošuro o zalogah ogljika v tleh, ki zajema oris celotnega dela od zajema terenskih podatkov tal do izdelave karte zalog ogljika na kmetijskih zemljiščih Slovenije (Priloga 3).

Lokacije

Vzorčenje je potekalo v letih 2016 do 2022 na 485 kmetijskih zemljiščih. Lokacije smo izbrali na podlagi vrste kmetijske rabe, vrste tal, klimatske razmere in delež KZ v regiji.



Razporeditev lokacij vzorčenja tal med leti 2016 in 2022.

Vzorčenje

Vsako lokacijo smo natančno določili, tla vzorčili po predpisnem postopku v globinah 0-10, 10-20 in 20-30 cm.



Analitika

Vzorce so analizirali v Centralnem laboratoriju KIS in Laboratoriju za tla Gozdarskega inštituta Slovenije; skupno 1438 vzorčih smo analizirali volumsko gostoto, vsebnost talne organske snovi, kislost, skupni dušik, in zrnavost (teksturo).

Rezultati

Zaloge ogljika v kmetijskih zemljiščih Slovenije preračunane na globino 0 – 30 so med 11,1 t C/ha do 392,6 t C/ha, povprečju pa 94,1 t C/ha. Najvišje so na barjanskih travnikih (Raba 1321) 197, drevesa in grmičevje (1500), trajni travniki



Slika prikazuje razlike v barvi tal kot posledica vsebnosti talnega organskega ogljika. Razlike v barvi vzorcev tal potrjujejo rezultati laboratorijskih analiz.

O raziskavah tal

V raziskavah vsebnosti talnega organskega ogljika so sodelovali

O letaku
Avtorja letaka: dr. Borut Vrščaj, Janez Bergant
Izvedba projekta

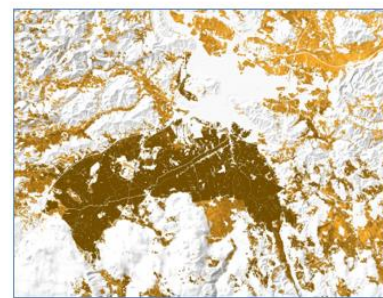
Dodatne informacije: Borut.Vrscaj@kis.si, Jani.Bergant@kis.si

Baze podatkov:
Janez Bergant, Peter Kastelic, Borut Vrščaj, 2023; CorgMap-SI2023-

Kmetijski inštitut Slovenije
Agricultural Institute of Slovenia

Oddelek za kmetijsko ekologijo in naravne vire

Ocena zalog organskega ogljika v tleh kmetijskih zemljišč Slovenije

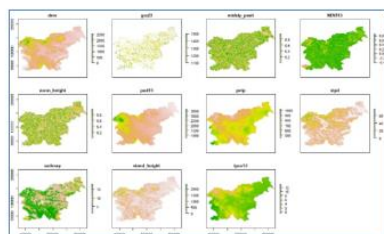


Del karte ocene vsebnosti organskega C v tleh v globini 0 – 30 cm.

Vsebnosti talnega organskega ogljika v tleh kmetijskih zemljišč je pomembna informacija o prispevku kmetijstva k zmanjšanju CO₂ v ozračju, ohranjanju rodovitnosti tal, odpornosti na sušo in blaženju podnebnih sprememb.

Ljubljana, 2023

Dejavniki ki vplivajo na vsebnost organskega C v tleh



11 prostorski sloji v ločljivosti 20 m - neodvisne spremenljivke modela za oceno zalog organskega ogljika v tleh.

Model za oceno vsebnosti organskega ogljika v tleh. talne organske snov v kmetijskih zemljiščih Slovenije

Izris rastrske baze podatkov ocene vsebnosti talnega organskega ogljika (karta)



Slika 18: Izsek iz elektronske brošure o zalogah ogljika v tleh.

VIRI

- ARSO, 2000a. Povprečna letna višina padavin med leti 1971 – 2000.
- ARSO, 2000b. Povprečna letna dnevna temperature zraka 1971 – 2000.
- ARSO, 2000c. Povprečna minimalna dnevna temperature zraka 1971 – 2000.
- ARSO, 2000d. Povprečna maksimalna dnevna temperature zraka 1971 – 2000.
- ARSO, 2000e. Povprečna letna potencialna evapotranspiracija 1971 - 2000.
- ARSO, 2000f. Povprečna letna vodna bilanca 1971 - 2000.
- Batjes, N.H., 2014. Batjes, N. H. 1996. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science* , 47, 151-163. *Reflections by N.H. Batjes*. Eur J Soil Sci 65, 2–3. <https://doi.org/10.1111/ejss.12115>
- Copernicus, n.d. Satelitski posnetki Sentinel-2.
- FAO, 2020. Technical specifications and country guidelines for Global Soil Organic Carbon Sequestration Potential Map (GSOCseq) 2020.
- FAO, 2017. GSP Guidelines for sharing national data/information to compile a Global Soil Organic Carbon (GSOC) map; Version 1 2017.
- Gallant, J.C., Dowling, T.I., 2003. A multiresolution index of valley bottom flatness for mapping depositional areas: MULTIREOLUTION VALLEY BOTTOM FLATNESS. *Water Resour. Res.* 39. <https://doi.org/10.1029/2002WR001426>
- Geodetska uprava Republike Slovenije, DMV 12,5 m. Digitalni model višin 12,5 m.
- Global Soil Organic Carbon Map (GSOCmap) Version 1.5, 2020. . FAO. <https://doi.org/10.4060/ca7597en>
- Government of Western Australia, 2022. What is soil organic carbon.
- Jansson, C., Wulschleger, S.D., Kalluri, U.C., Tuskan, G.A., 2010. Phytosequestration: Carbon Biosequestration by Plants and the Prospects of Genetic Engineering. *BioScience* 60, 685–696. <https://doi.org/10.1525/bio.2010.60.9.6>
- Jürgen Böhner, Selige, T., 2006. SPATIAL PREDICTION OF SOIL ATTRIBUTES USING TERRAIN ANALYSIS AND CLIMATE REGIONALISATION. SAGA - Analyses and Modelling Applications 2006.
- Kastelec D., Rakovec J., Zakšek K., 2007. Sončna energija v Sloveniji. ZRC, ZRC SAZU, Ljubljana.
- Lefevre, C., 2017. Soil organic carbon: the hidden potential. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Lorenz, K., Lal, R., 2018. Carbon Sequestration in Agricultural Ecosystems, 1st ed. 2018. ed. Springer International Publishing : Imprint: Springer, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-92318-5>
- Malone, B.P., Minasny, B., McBratney, A.B., 2017. Using R for Digital Soil Mapping, Progress in Soil Science. Springer International Publishing, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-44327-0>
- Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano, n.d. Grafični podatki rabe zemljišč za Slovenijo.

MKGP,. Pedološka karta 1:25.000.

Scharlemann, J.P., Tanner, E.V., Hiederer, R., Kapos, V., 2014. Global soil carbon: understanding and managing the largest terrestrial carbon pool. *Carbon Management* 5, 81–91. <https://doi.org/10.4155/cmt.13.77>

Smith, P., Soussana, J., Angers, D., Schipper, L., Chenu, C., Rasse, D.P., Batjes, N.H., Egmond, F., McNeill, S., Kuhnert, M., Arias-Navarro, C., Olesen, J.E., Chirinda, N., Fornara, D., Wollenberg, E., Álvaro-Fuentes, J., Sanz-Cobena, A., Klumpp, K., 2020. How to measure, report and verify soil carbon change to realize the potential of soil carbon sequestration for atmospheric greenhouse gas removal. *Global Change Biology* 26, 219–241. <https://doi.org/10.1111/gcb.14815>

Soil organic carbon mapping cookbook, 2nd edition. ed, 2018. . Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.

Stritar, A., 1991. Pedologija-kompndij. Biotehniška fakulteta, Agronomski oddelek, Ljubljana.

Tifafi, M., Guenet, B., Hatté, C., 2018. Large Differences in Global and Regional Total Soil Carbon Stock Estimates Based on SoilGrids, HWSD, and NCSCD: Intercomparison and Evaluation Based on Field Data From USA, England, Wales, and France: Differences in total SOC stock estimates. *Global Biogeochem. Cycles* 32, 42–56. <https://doi.org/10.1002/2017GB005678>

Zakšek, Klemen, Oštir, Krišto (avtor), Podobnikar, Tomaž, 2004. Osončenost površja Slovenije. *Geografski vestnik*, *Geografski vestnik* 76, 79–90.

Zakšek, Klemen, Oštir, Krištof, Podobnikar, Tomaž, 2003. Osončenost površja Slovenije. *Geodetski vestnik*, *Geodetski vestnik* 47, 55–63.

Priloge

Priloga 1: Rastrski sloj z vrednostmi ocenjenih zalog ogljika v tleh Slovenije (SI_OCSTHA_RK.tif). Rastrski sloj je priložen temu poročilu kot ločena digitalna priloga. Več podrobnosti o tehničnih lastnostih sloja v priloženi datoteki berime.txt

Priloga 2: Tiskana karta ocene zalog ogljika v tleh kmetijskih zemljišč Slovenije priložena kot poster A0 v dveh izvodih temu poročilu.

Priloga 3: Elektronska brošura o zalogah ogljika v tleh (priložena kot datoteka 20230227_Corg2023-letak-v2.pdf).

Priloga 4: Seznam uporabljenih vhodnih prostorskih slojev v modelu. Sloji ki predstavljajo potencialne vplivne dejavnike na zalogo ogljika v tleh.

Tp prostorskega sloja	Ime datoteke (sloja)	Ime serije	Kratek opis	Podrobnejši opis	Enote	Ciljna resolucija	Uporabljen v modelu	Kategoričen podatek	Vir izvornih podatkov
izvorni	dmv	Digitalni model višin in derivati	Digitalni model višin (m)	Digitalni model višin v resoluciji 12,5 m pretvorjen v resolucijo X z metodo Nearest Neighbour* (SAGA)	m	10 m	da	ne	GURS
derivat	midslp_posit	Digitalni model višin in derivati	Relativna pozicija nagiba sredine pobočja (ang. midslope position)	Izdelan iz DMV (SAGA)	indeks	10 m	da	ne	GURS
derivat	norm_height	Digitalni model višin in derivati	Nnormalizirana višina (ang. normalized height)	Izdelan iz DMV (SAGA)	indeks	10 m	da	ne	GURS
derivat	slpd	Digitalni model višin in derivati	Nagib površja (°)	Izdelan iz DMV (SAGA)	°	10 m	da	ne	GURS
derivat	stand_height	Digitalni model višin in derivati	Standardizirana višina (ang. szandardized height)	Izdelan iz DMV (SAGA)	indeks	10 m	da	ne	GURS
derivat	aspect	Digitalni model višin in derivati	Usmerjenost pobočij	Izdelan iz DMV (SAGA)	° azimuta	10 m	da	ne	GURS
derivat	MRRTF	Digitalni model višin in derivati	Multiresolucijski indeks uravnanosti grebenov (ang. multiresolution index of the ridge top flatness)	Izdelan iz DMV (SAGA)	indeks	10 m	da	ne	GURS
derivat	mrvmf	Digitalni model višin in derivati	Multiresolucijski indeks uravnanosti dna dolin	Izdelan iz DMV (SAGA)	indeks	10 m	da	ne	GURS
derivat	slope_height	Digitalni model višin in derivati	Višina pobočja	Izdelan iz DMV (SAGA)	indeks	10 m	da	ne	GURS
derivat	twi	Digitalni model višin in derivati	Topografski indeks vlažnosti	Izdelan iz DMV (SAGA)	indeks	10 m	da	ne	GURS
derivat	valleydepth	Digitalni model višin in derivati	Globina dolin	Izdelan iz DMV (SAGA)	indeks	10 m	da	ne	GURS
izvorni	pad13	Klimatski podatki	Povprečna letna višina padavin (mm)	Povprečna letna višina padavin 1971 - 2000, pretvorjena iz resolucije 1km na resolucijo X (R)	mm	10 m	da	ne	ARSO
izvorni	petp	Klimatski podatki	Povprečna potencialna evapotranspiracija (mm)	Povprečna potencialna letna evapotranspiracija med leti 1971 - 2000, pretvorjena iz resolucije 1km na resolucijo X (R)	mm	10 m	da	ne	ARSO
izvorni	tpov13	Klimatski podatki	Povprečna letna temperatura (°C)	Povprečna letna temperatura 1971 - 2000, pretvorjena iz resolucije 1km na resolucijo X (R)	°C	10 m	da	ne	ARSO
izvorni	k13	Klimatski podatki	Energija kvaziglobalnega sončnega obsevanja	Desetletno (1994 - 2003) povprečje letnega kvaziglobalnega sončnega obseva, pretvorba v D96 in resolucijo 100m na X (R)	MJ/m ²	10 m	da	ne	Kastelec D. in sod., 2007; Zakšek K. in sod., 2003; Zakšek K. in sod., 2004
izvorni	tmax13	Klimatski podatki	Povprečna letna minimalna temperatura zraka (°C)	Povprečna letna minimalna temperatura 1971 - 2000, pretvorjena iz resolucije 1km na resolucijo X (R)	°C	10 m	da	ne	ARSO
izvorni	tmin13	Klimatski podatki	Povprečna letna maksimalna temperatura zraka (°C)	Povprečna letna maksimalna temperatura 1971 - 2000, pretvorjena iz resolucije 1km na resolucijo X (R)	°C	10 m	da	ne	ARSO
izvorni	vodbil	Klimatski podatki	Vodna bilanca	Vodna bilanca kot razlika med povprečnimi letnimi padavinami in povprečno letno evapotranspiracijo	mm	10 m	da	ne	ARSO

Tip prostorskega sloja	Ime datoteke (sloja)	Ime serije	Kratek opis	Podrobnejši opis	Enote	Ciljna resolucija	Uporabljen v modelu	Kategoričen podatek	Vir izvornih podatkov
izvorni	soilmap	Pedološki podatki	Talni tipi pedološke karte 1:25.000	Grupiranje talnih tipov iz spremenljivke TIP_TAL_TS v sloju pk25kis_TALNITIPoSKT.shp ter rasterizacija (R)	talni tipi	10 m	da	da	MKGP
derivat	ps	Pedološki podatki	Pedosekvenca Slovenije (po Stritar)	Razvrstitev talnih tipov pedološke karte 1:25.000 v 5 pedosekvenc Slovenije, ki jih je opredelil Stritar. Razvrstitev opravil dr. Vrščaj B. (KIS)	pedosekvenca	10 m	da	da	MKGP
izvorni	grz23	Raba tal in pokrovnost	Raba zemljišč za Slovenijo (31-1-2023)	rasteriziran sloj RABA_20230131.shp po stolpcu RABA_ID (SAGA)	rabe zemljišč	10 m	da	da	MKGP
derivat	NDVI13	Raba tal in pokrovnost	Normiran diferencialni vegetacijski indeks (letna mediana obdobja 2017 - 2022)	Indeks izračunan iz odbojev NIR in RED kanalov satelitskih posnetkov Sentinel-2 med 29.3.2017-28.12.2022 (GEE in R)	indeks	10 m	da	ne	Copernicus
derivat	NDVI01	Raba tal in pokrovnost	Normiran diferencialni vegetacijski indeks (mediana za januar iz obdobja 2017 - 2022)	Indeks izračunan iz odbojev NIR in RED kanalov satelitskih posnetkov Sentinel-2 med 29.3.2017-28.12.2022 (GEE in R)	indeks	10 m	da	ne	Copernicus
derivat	NDVI02	Raba tal in pokrovnost	Normiran diferencialni vegetacijski indeks (mediana za februar iz obdobja 2017 - 2022)	Indeks izračunan iz odbojev NIR in RED kanalov satelitskih posnetkov Sentinel-2 med 29.3.2017-28.12.2022 (GEE in R)	indeks	10 m	da	ne	Copernicus
derivat	NDVI03	Raba tal in pokrovnost	Normiran diferencialni vegetacijski indeks (mediana za marec iz obdobja 2017 - 2022)	Indeks izračunan iz odbojev NIR in RED kanalov satelitskih posnetkov Sentinel-2 med 29.3.2017-28.12.2022 (GEE in R)	indeks	10 m	da	ne	Copernicus
derivat	NDVI04	Raba tal in pokrovnost	Normiran diferencialni vegetacijski indeks (mediana za april iz obdobja 2017 - 2022)	Indeks izračunan iz odbojev NIR in RED kanalov satelitskih posnetkov Sentinel-2 med 29.3.2017-28.12.2022 (GEE in R)	indeks	10 m	da	ne	Copernicus
derivat	NDVI05	Raba tal in pokrovnost	Normiran diferencialni vegetacijski indeks (mediana za maj iz obdobja 2017 - 2022)	Indeks izračunan iz odbojev NIR in RED kanalov satelitskih posnetkov Sentinel-2 med 29.3.2017-28.12.2022 (GEE in R)	indeks	10 m	da	ne	Copernicus
derivat	NDVI06	Raba tal in pokrovnost	Normiran diferencialni vegetacijski indeks (mediana za junij iz obdobja 2017 - 2022)	Indeks izračunan iz odbojev NIR in RED kanalov satelitskih posnetkov Sentinel-2 med 29.3.2017-28.12.2022 (GEE in R)	indeks	10 m	da	ne	Copernicus
derivat	NDVI07	Raba tal in pokrovnost	Normiran diferencialni vegetacijski indeks (mediana za julij iz obdobja 2017 - 2022)	Indeks izračunan iz odbojev NIR in RED kanalov satelitskih posnetkov Sentinel-2 med 29.3.2017-28.12.2022 (GEE in R)	indeks	10 m	da	ne	Copernicus
derivat	NDVI08	Raba tal in pokrovnost	Normiran diferencialni vegetacijski indeks (mediana za avgust iz obdobja 2017 - 2022)	Indeks izračunan iz odbojev NIR in RED kanalov satelitskih posnetkov Sentinel-2 med 29.3.2017-28.12.2022 (GEE in R)	indeks	10 m	da	ne	Copernicus
derivat	NDVI09	Raba tal in pokrovnost	Normiran diferencialni vegetacijski indeks (mediana za september iz obdobja 2017 - 2022)	Indeks izračunan iz odbojev NIR in RED kanalov satelitskih posnetkov Sentinel-2 med 29.3.2017-28.12.2022 (GEE in R)	indeks	10 m	da	ne	Copernicus
derivat	NDVI10	Raba tal in pokrovnost	Normiran diferencialni vegetacijski indeks (mediana za oktober iz obdobja 2017 - 2022)	Indeks izračunan iz odbojev NIR in RED kanalov satelitskih posnetkov Sentinel-2 med 29.3.2017-28.12.2022 (GEE in R)	indeks	10 m	da	ne	Copernicus
derivat	NDVI11	Raba tal in pokrovnost	Normiran diferencialni vegetacijski indeks (mediana za november iz obdobja 2017 - 2022)	Indeks izračunan iz odbojev NIR in RED kanalov satelitskih posnetkov Sentinel-2 med 29.3.2017-28.12.2022 (GEE in R)	indeks	10 m	da	ne	Copernicus
derivat	NDVI12	Raba tal in pokrovnost	Normiran diferencialni vegetacijski indeks (mediana za december iz obdobja 2017 - 2022)	Indeks izračunan iz odbojev NIR in RED kanalov satelitskih posnetkov Sentinel-2 med 29.3.2017-28.12.2022 (GEE in R)	indeks	10 m	da	ne	Copernicus

Priloga 5: Karta ocene zalog ogljika v tleh Slovenije v velikosti formata A2 in priložena kot digitalna priloga temu poročilu (20230225_Karta_OCS_A2v3_300DPI.tif).

