

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA AGRONOMIJO

Anja MARINIČ

SPROŠČANJE CO₂ IZ TAL ZARAŠČAJOČIH KRAŠKIH PAŠNIKOV

DIPLOMSKO DELO
Univerzitetni študij

**CO₂ DEGASSING FROM THE SOILS OF AFFORESTATED KARSTIC
PASTURES**

GRADUATION THESIS
University Studies

Ljubljana, 2009

Diplomsko delo je zaključek univerzitetnega študija kmetijstvo in agronomija. Opravljeno je bilo na poskusni ploskvi na Podgorskem krasu in na Katedri za aplikativno botaniko, ekologijo, fiziologijo rastlin in informatiko Oddelka za agronomijo Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani. Naloga se veže na raziskovalni projekt »*Zaraščanje kraških travišč in spremembe njihove ponorne aktivnosti za ogljik*« (ARRS, J4-1009, nosilec Dominik Vodnik).

Študijska komisija Oddelka za agronomijo je za mentorja diplomske naloge imenovala prof. dr. Dominika VODNIKA.

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik: prof. dr. Franc BATIČ
Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo

Član: izr. prof. dr. Dominik VODNIK
Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo

Član: doc. dr. Marjetka SUHADOLC
Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo

Datum zagovora: 18. 06. 2009

Naloga je rezultat lastnega raziskovalnega dela. Podpisana se strinjam z objavo svoje naloge v polnem tekstu na spletni strani Digitalne knjižnice Biotehniške fakultete. Izjavljam, da je naloga, ki sem jo oddala v elektronski obliki, identična tiskani verziji.

Anja Marinič

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD	Dn
DK	UDK 631.432:631.433.53(043.2)
KG	tla/tok CO ₂ /dihanje tal/voda v tleh/kroženje ogljika/
KK	AGRIS P33
AV	MARINIČ, Anja
SA	VODNIK, Dominik (mentor)
KZ	SI – 1000 Ljubljana, Jamnikarjeva 101
ZA	Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo
LI	2009
IN	SPROŠČANJE CO ₂ IZ TAL ZARAŠČAJOČIH KRAŠKIH PAŠNIKOV
TD	Diplomsko delo (univerzitetni študij)
OP	IX, 39, [1] str., 3 pregl., 24 sl., 56 vir.
IJ	sl
JI	sl/en
AI	Na poskusnem polju v predelu Podgorskega Krasa smo preučevali dihanje tal na pašniku in bližnjem zaraščajočem travišču. Meritve so potekale preko vegetacijske sezone od junija 2008 do konec decembra 2008 na posameznih podploskvah (gozd, vrzel, pašeni, nepašeni del). Meritve toka talnega CO₂ smo izvajali z prenosnim sistemom za merjenje fotosinteze LI-6400-09, opremljenim s komoro za meritve toka CO₂ iz tal. Vzporedno smo opravljali tudi meritve volumetrične vsebnosti vode v tleh (FDR, SM200) in temperature tal. Povprečen tok CO₂ iz tal se je za navedeno obdobje gibal od 0,6 μmol m⁻² s⁻¹ do 8,3 μmol m⁻² s⁻¹ (povprečja za posamezen merilni termin). Imel je jasen sezonski vzorec, odvisen predvsem od temperature. V poletnih mesecih so bile največje vrednosti zabeležene na pašniku, najverjetneje zaradi tega, ker je veliko respiratorno aktivnost talnih mikroorganizmov v plitvih tleh omogočal relativno reden vnos padavin. Spomladi, ko so tla hladnejša, je tudi dihanje tal manjše, zato je tok CO₂ iz tal manjši. Poleti, ko so tla najtoplejša, je tok CO₂ v tleh največji. V poznem jesenskem času so temperature in posledično tudi dihanje tal višje v gozdu kot v vrzelih in na pašniku. Vzporedno z našimi meritvami so potekale tudi stalne meritve padavin in neto izmenjave CO₂ z metodo Eddy kovariance. S tem smo ugotovili, da je sproščanje CO₂ iz tal (dihanje tal in preprevanje karbonatov) pomemben del skupnega dihanja ekosistema in kroženja ogljika.

KEY WORDS DOCUMENTATION

DN Dn
DC UDC 631.432:631.433.53(043.2)
CX soil CO₂ flux/soil respiration/soil water/carbon cycling
CC AGRIS P33
AU MARINIČ, Anja
AA VODNIK, Dominik (supervisor)
PP SI – 1000 Ljubljana, Jamnikarjeva 101
PB University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Agronomy
PY 2009
TI CO₂ DEGASSING FROM THE SOILS OF AFFORESTATED KARSTIC PASTURES
DT Graduation thesis (university studies)
NO IX, 39, [1] p., 3 tab., 24 fig., 56 ref.
LA sl
AL sl/en
AB Soil respiration was studied at extensively used pastures and nearby afforested sites at Podgorski kras plateau. Measurements were performed by using dynamic method LI-6400-09 (LiCor, USA) from June 2008 till end of December 2008 in regular 2-weeks intervals. Grazed and non-grazed (pasture) and gaps and forest subplots (afforested site) were included, each in three replicates. Flux measurements were paralleled by temperature (depth of 10 cm) and soil moisture (SM200, Delta T Devices, UK) measurements. Flux rates varied from 0,6 to 8,3 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ and showed a clear seasonal pattern, which was mainly depended on temperature. In summer period the highest flux rates were measured for pasture, obviously high respiratory activity of shallow pasture soil was maintained by regular precipitation. In spring, when soil temperature is low, also lower flux rates were detected. They increase with increasing temperature in summer. In late autumn soil temperature and consequently soil respiration were higher at forest stands than in gaps of afforested site and at the pasture. Soil respiration correlated well with the respiration of the ecosystem derived from Eddy covariance measurements. This confirms an important contribution of soil CO₂ degassing (respiration + carbonate weathering) to ecosystem respiration and carbon cycling.

KAZALO VSEBINE

	str.
Ključna dokumentacijska informacija	III
Key words documentation	IV
Kazalo vsebine	V
Kazalo preglednic	VI
Kazalo slik	VII
Okrajšave in simboli	IX
1 UVOD	1
1.1 POVOD	1
1.2 NAMEN RAZISKAVE	2
1.3 DELOVNA HIPOTEZA	2
2 PREGLED OBJAV	3
2.1 OGLJIK IN NJEGOVE ZALOGE	3
2.2 DIHANJE TAL KOT DEL KROŽENJA OGLJIKA	4
2.3 DIHANJE TAL V RAZLIČNIH EKOSISTEMIH	6
2.3.1 Tok CO ₂ iz tal na travnatem svetu	6
2.3.2 Tok CO ₂ iz tal na pašniku	10
2.3.3 Tok CO ₂ iz tal zaraščenih travnišč	10
3 MATERIAL IN METODE	12
3.1 OPIS LOKACIJ, TLA, VEGETACIJA	12
3.1.1 Ploskev »ZARAŠČANJE«	14
3.1.2 Ploskev »PAŠNIK«	16
3.2 METODE POSKUSA	19
3.2.1 Merjenje toka CO ₂ iz tal in temperature tal	19
3.2.2 Merjenje vsebnosti vode v tleh	21
3.3 STATISTIČNA OBDELAVA PODATKOV	22
4 REZULTATI	23
4.1 TOK CO ₂ IZ TAL	23
4.2 TEMPERATURA TAL	24
4.3 VSEBNOST VODE V TLEH	24
4.4 DIHANJE TAL V ODVISNOSTI OD TEMPERATURE IN VODE V TLEH	26
4.5 PRIMERJAVA DIHANJA TAL IN DIHANJA EKOSISTEMA	28
5 RAZPRAVA IN SKLEPI	29
5.1 RAZPRAVA	29
5.1.1 Tok CO ₂ iz tal	29
5.2 SKLEPI	33
6 POVZETEK	34
7 VIRI	35

ZAHVALA

KAZALO PREGLEDNIC

	str.
Preglednica 1: Dihanje tal v odvisnosti od temperature, maksimalnega in letnega dihanja tal na travniških različnih pokrajin (prirejeno po Bahn in sod., 2008: 1362).	8
Preglednica 2: Podatki morfoloških lastnosti tal (pH (H ₂ O), pH (CaCl ₂), organska snov [%], tekstura, delež skeleta v 0-40 cm [%]), ločeni za posamezne podploskve.	12
Preglednica 3: Časovni razpored meritev, ki smo jih opravljali na raziskovalnih ploskvah Podgorskega krasa.	19

KAZALO SLIK

	str.
Slika 1: Prikaz globalnega kroženja ogljika, s poudarkom na tistih zalogah ogljika, ki so najbolj povezane s količino ogljika v atmosferi. Vrednosti pri posameznih besedah predstavljajo petagrame (Pg = 10 ¹⁵ /g) ogljika, shranjenega v največjih rezervoarjih. Vrednosti pri puščicah pa predstavljajo količino ogljika, ki se letno pretaka po različnih poteh med rezervoarji(Pg/leto) (Global... , 2007).	3
Slika 2: Pet glavnih virov CO ₂ iz tal, glede na hitrost sproščanja v atmosfero in na zadrževalni čas ogljika v tleh (Kuzyakov, 2006: 427, povzeto po Ogorevc, 2008: 9).....	5
Slika 3: Prikaz zaraščajoče ploskve in ploskve na pašniku (Vodnik, 2009).	13
Slika 4: Prikaz skice ploskve prvega poskusnega območja s podploskvami za vrzel in gozd (Vodnik, 2009).	14
Slika 5: Prikaz podploskve gozd – G3 (foto: Marinič, 2009).....	14
Slika 6: Prikaz podploskve vrzel – V2 (foto: Marinič, 2009).	15
Slika 7: Prikaz območja ploskve »PAŠNIK« (foto: Marinič, 2009).	16
Slika 8: Prikaz skice ploskve drugega poskusnega območja s podploskvami za pašen in nepašen del z ovratniki (Vodnik, 2009).	17
Slika 9: Prikaz skice ploskve drugega poskusnega območja s podploskvami za pašen in nepašen del z ovratniki (Vodnik, 2009).	17
Slika 10: Prikaz nepašenega in pašenega dela pašnika (Vodnik, 2009).	18
Slika 11: Prikaz nepašenega in pašenega dela pašnika (foto: Marinič, 2009).....	18
Slika 12: Prikaz, kako se je v določenem delu leta odstranilo odpadlo listje (foto: Marinič, 2009).	19
Slika 13: Li-Cor 6400-09 (Soil..., 2003).....	20
Slika 14: Prikaz postavitve komore ob ovratniku (določanje tarčne vrednosti) in komore na ovratniku (meritev toka) (Vodnik, 2009).	20
Slika 15: Prikaz meritve toka CO ₂ iz tal in temperature v neposredni bližini ovratnika (foto: Marinič, 2009).	21

Slika 16:	Prikaz sonde SM200, ki je priključena na HH2 moisture meter (Delta-T Devices) (foto: Marinič, 2009).	22
Slika 17:	Tok CO ₂ iz tal pašnika in zaraščajoče površine na Podgorskem krasu. Vrednosti toka so prikazane ločeno za ploskve gozd in vrzel (zaraščajoča površina) ter pašen in nepašen del (pašnik) za obdobje od julija do decembra 2008 in so povprečja meritev 7 merilnih mest.	23
Slika 18:	Temperature tal pašnika in zaraščajoče površine na Podgorskem krasu. Vrednosti temperatur so prikazane ločeno za ploskve gozd in vrzel (zaraščajoča površina) ter pašen in nepašen del (pašnik) za obdobje od julija do decembra 2008 in so povprečja meritev 7 merilnih mest.	24
Slika 19:	Vsebnost vode v tleh pašnika in zaraščajoče površine na Podgorskem krasu. Vrednosti vsebnosti vode v tleh so prikazane ločeno za ploskve gozd in vrzel (zaraščajoča površina) ter pašen in nepašen del (pašnik) za obdobje od julija do decembra 2008 in so povprečja meritev 7 merilnih mest	25
Slika 20:	Talni tok CO ₂ v odvisnosti od temperature tal (merjene na globini 5 cm) na območju pašnik-pašeno in pašnik-nepašeno.	26
Slika 21:	Talni tok CO ₂ v odvisnosti od temperature tal (merjene na globini 5 cm) na območju zaraščajoče ploskve-gozd in zaraščajoče ploskve-vrzel.	27
Slika 22:	Talni tok CO ₂ v odvisnosti od vsebnosti vode v tleh (merjene na globini 5 cm) na območju pašnik – pašeno, pašnik – nepašeno, zaraščajoča ploskev – gozd, zaraščajoča ploskev – vrzel.	27
Slika 23:	Primerjava dihanja tal in dihanja ekosistema (R ekos.) na zaraščajoči ploskvi (zgoraj) in na pašniku (spodaj).	28
Slika 24:	Zgornja slika prikazuje stalne meritve padavin in neto izmenjave CO ₂ na stolpu, na spodnji sliki pa vidimo obdobja naših meritev, ki smo jih izvajali na pašniku.	30

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

FDR	Frequency Domain Reflectometry
LAI	indeks listne površine
GPP	bruto primarna proizvodnja
NEE	neto izmenjava toka CO ₂
R ekos.	dihanje ekosistema

1 UVOD

Zaraščanje je v zadnjih desetletjih ena od najizrazitejših okoljskih sprememb v Sloveniji. Ta proces je še posebej razširjen v Submediteranu, na kraških območjih JZ Slovenije, kjer neugodna klima in tla omejujejo kmetijsko rabo. V preteklosti so zaradi preintenzivne paše skoraj popolnoma uničili vegetacijo, temu sledeča erozija pa je pustila na določenih predelih kamnito in golo pokrajino. V poznem 19. stoletju so se začela prizadevanja za ponovno ozelenitev in sanacijo Krasa. Tako so s prekinitvijo paše omogočili povečanje debeline tal in boljše zadrževanje vode, kar je povzročilo spontano širjenje grmovnih in drevesnih vrst na traviščih. S tem so travišča dobila današnjo podobo pokrajine (Eler, 2007).

V zadnjih letih se intenzivno proučuje travišča in gozdne ekosisteme kot vire in ponore ogljika, saj se ves svet spopada z naraščajočo vsebnostjo atmosferskega ogljikovega dioksida (CO₂), katere glavna posledica je segrevanja ozračja ali tako imenovani povečan učinek tople grede. Zaraščanje travišč z lesnimi vrstami naj bi po splošnem poročanju vodilo v povečanje zaloge ogljika v ekosistemu, kar naj bi bil predvsem rezultat povečanja nadzemne rastlinske biomase. Prevlada lesnatih vrst nad travniško vegetacijo vpliva na primarno produkcijo v ekosistemu, premeščanje ogljika, spremeni se globina, v kateri rastlinska odeja razvija korenine, prihaja do vplivov na procese v tleh. S tem prihaja do sprememb v dinamiki kroženja in sekvestracije ogljika (Eler, 2007).

Kroženje ogljika je proces, ki zajema tla, kopenske vode, oceane, atmosfero, vse živali in rastline, druge organizme in tudi ljudi. Resne motnje cikla bi pomenile katastrofo za vse žive organizme na tem planetu. Ogljik je gradnik vsega živega, saj je sestavina vseh organskih spojin. Primarni izvor ogljika je CO₂ iz atmosfere, od koder se vgrajuje v organske spojine kot glavni gradnik. V organski snovi je ogljik v reducirani obliki. Z biokemijsko oksidacijo v tleh prehaja v CO₂, ki prehaja v atmosfero in se lahko ponovno vrača v proces kroženja. Del CO₂ prehaja v tkiva favne in mikrobov, ki razgrajujejo organske ostanke, kjer se ponovno sprošča kot CO₂ v sekundarnem ciklusu. Ogljik, ki se vgradi v humus, je za daljše obdobje izključen iz kroženja (Chapin in sod., 2002).

1.1 POVOD

V povezavi s problemom globalnih okoljskih sprememb potekajo v svetu intenzivna proučevanja dinamike kroženja ogljika v različnih ekosistemih. Pomemben člen ogljikovega cikla predstavlja tok tega plina iz tal v atmosfero (t.i. dihanje tal), pri čemer je glavni vir CO₂ avtotrofno in heterotrofno dihanje tal. Dinamika toka CO₂ iz tal je pomembna za neto izmenjavo ogljika med ekosistemom in atmosfero, določajo pa jo biotski in abiotski dejavniki okolja.

Poleg gozdov naj bi bila pri ponoru ogljika pomembna tudi travišča, pri katerih pa je neto izmenjava CO₂ močno odvisna od načina njihove rabe. Bilanca ogljika se močno spremeni v primerih, ko se kmetijska raba opušča in prihaja do zaraščanja travišč z lesnatimi vrstami.

1.2 NAMEN RAZISKAVE

V diplomski nalogi nas je zanimalo, kakšne so lastnosti sproščanja CO₂ iz tal ekstenzivno rabljenih in zaraščenih kraških pašnikov. Proučevali smo časovno spremenljivost sproščanja CO₂ iz tal in njegovo odvisnost od temperature tal ter vsebnosti vode v tleh.

1.3 DELOVNA HIPOTEZA

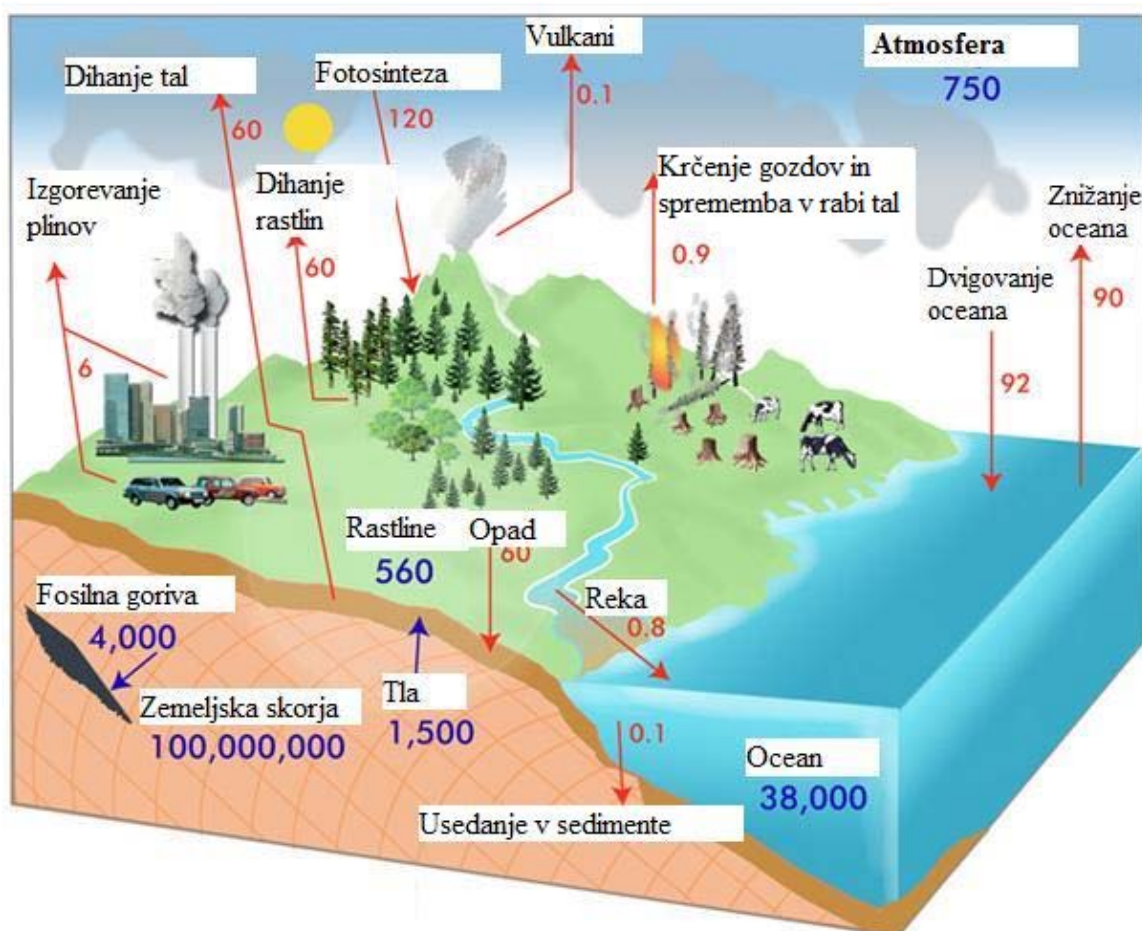
V okviru naloge smo postavili naslednje hipoteze:

- dihanje tal je sezonsko spremenljivo in odvisno predvsem od temperature tal in vsebnosti vode v tleh,
- tok CO₂ iz tal ima največje vrednosti v začetku poletja, najmanjše vrednosti pa doseže pozimi,
- med pašnikom in zaraščajočo površino pričakujemo tekom leta razlike v dihanju tal, te pa so rezultat razlik v temperaturah in vlažnostnih razmerah.

2 PREGLED OBJAV

2.1 OGLJIK IN NJEGOVE ZALOGE

Ogljikov krogotok predstavlja prehajanje ogljika v različnih oblikah med biosfero, atmosfero, oceani in geosfero. To kroženje je eden od biogeokemijskih tokov, ki pomenijo izmenjavo elementov med živimi dejavniki in neživim delom narave v okolju.



Slika 1: Prikaz globalnega kroženja ogljika, s poudarkom na tistih zalogah ogljika, ki so najbolj povezane s količino ogljika v atmosferi. Vrednosti pri posameznih besedah predstavljajo petagrame ($\text{Pg} = 10^{15}\text{g}$) ogljika, shranjenega v največjih rezervoarjih. Vrednosti pri puščicah pa predstavljajo količino ogljika, ki se letno pretaka po različnih poteh med rezervoarji (Pg/leto) (Global... , 2007).

Rastline imajo sposobnost absorbirati zračni CO₂, iz katerega v procesu fotosinteze s pomočjo energije sončne svetlobe tvorijo enostavne sladkorje in kasneje kompleksnejše organske molekule, kot so škrob, sladkor, celuloza in hemiceluloza. Škrob in sladkor lahko rastlina uporabi kot lasten vir energije. Pri tem se ogljik vrne v atmosfero kot CO₂. Organske molekule, kot sta celuloza in hemiceluloza, pa se vgradijo v vegetativne dele rastline in so sčasoma dodane tlam kot odpadlo listje, ostanki drugih delov rastline, žetveni ostanki. Pomembno vlogo pri vnosu ogljika v tla imajo tudi korenine, kjer se z eksudacijo

korenin v tla izločajo različne ogljikove spojine. Nekateri deli rastlin lahko služijo kot hrana za živali in ljudi. Pri tem se približno polovica zaužitega vrne v atmosfero z izdihanim CO₂, polovica pa ga konča v tleh z iztrebki in odmrli ostanki. Vsi rastlinski in živalski ostanki, dodani tlem, služijo kot vir energije talnim mikroorganizmom, ki sčasoma povrnejo ogljik v atmosfero kot CO₂ (Brady in Weil, 2002).

Manjše količine CO₂ lahko reagirajo s komponentami tal, sprostijo se ogljikova kislina in karbonati ter bikarbonati povezani s kalcijevimi, kalijevimi, magnezijevimi ali kakimi drugimi bazičnimi kationi. Bikarbonati so dobro topni, zato lahko iz tal izparijo. Sčasoma se večina ogljika v karbonatih in bikarbonatih vrne v atmosfero kot CO₂ (Brady in Weil, 2002). Po drugi strani pa so lahko nekateri produkti mikrobnega metabolizma v tleh veliko bolj stabilni (humus). Mine lahko tudi več desetletij ali stoletij, preden se ogljik, vezan v humusu, povrne v atmosfero kot CO₂. Takšna obstojnost humusa omogoča kopičenje organske snovi v tleh (Brady in Weil, 2002).

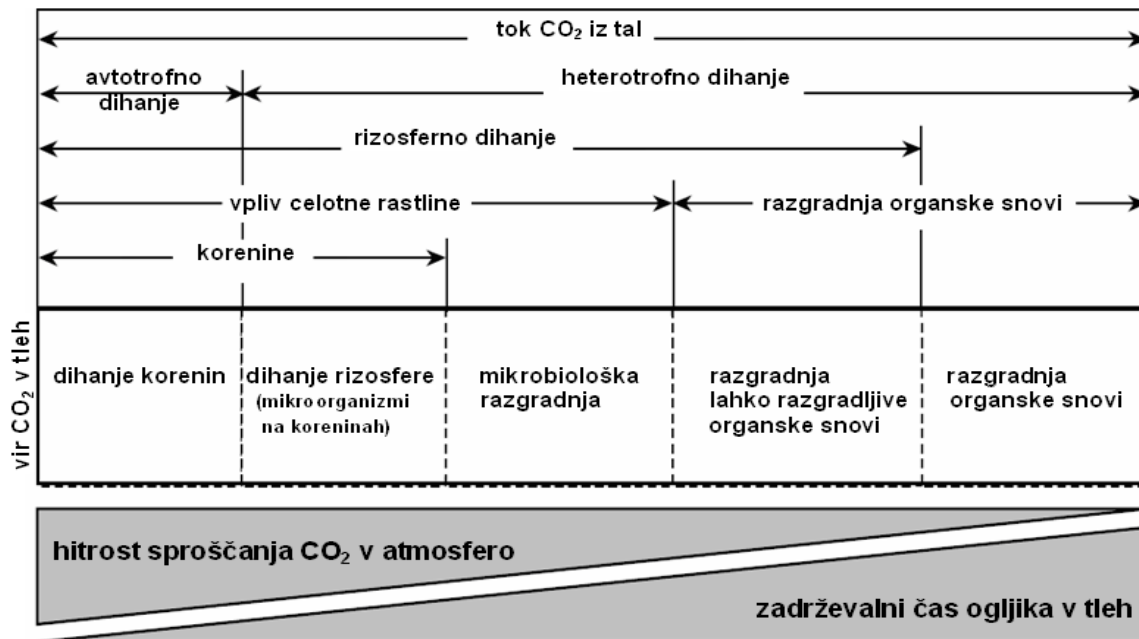
Organska snov izvira iz biocenoze, ki naseljuje določeno območje. Na gozdnih tleh se rastlinski ostanki nabirajo predvsem na površini tal, kot odmrlo listje in rastlinski ostanki v različnih stopnjah razgradnje. Na travnatih tleh so to podtalni ostanki odmrlih korenin in koreninski izločki. Brady in Weil (2002) navajata, da po enem letu, ko so bili v tla dani rastlinski ostanki, se večina ogljika vrne v atmosfero kot CO₂, vendar ga petina do tretjina verjetno ostane v tleh kot živa biomasa (5 %), kot humusne substance (20 %) ali kot nehumusna frakcija (5 %) organske snovi tal (koreninski ostanki so nekoliko večji od ostankov odpadnega listja). Rastline - proizvajalke primarne organske biomase in mikroorganizmi - razgrajevalci organske biomase so tudi najpomembnejši členi kroženja ogljika v naravi in dinamiki spreminjanja vsebnosti organske snovi v tleh kot delu kroženja ogljika, ki je vezan na ekosistem tal (Vidrih, 2006).

Tla v globalnem pogledu predstavljajo glavno zalogo različnih frakcij ogljika, v katerih se nahaja tako organski kot anorganski ogljik. Zaloge talnega organskega ogljika sestavljajo rastlinski in živalski ostanki; spojine, ki so nastale v procesih mikrobiološke ali kemične sinteze, humus; ter mikroba biomasa in mikrofavna in njihovi izločki (Schnitzer, 1991).

Vse organske snovi vsebujejo ogljik in vsak ekosistem predstavlja tako vir kot ponor tega elementa. Organska snov v tleh vsebuje približno trikrat toliko ogljika kot vse rastlinstvo in pomembno prispeva pri ohranjanju globalnega ravnotežja ogljika. Čeprav organska snov v tleh predstavlja le manjši delež v masi večine tal, pa ta dinamična komponenta močno vpliva na fizikalne (struktura talnih delcev, kapaciteta tal za vodo, volumska gostota in kationska izmenjalna kapaciteta), kemične in biološke lastnosti tal.

2.2 DIHANJE TAL KOT DEL KROŽENJA OGLJIKA

Pri kroženju ogljika v ekosistemi je pomemben dejavnik tok CO₂ iz tal, ki je tudi eden glavnih pokazateljev izmenjave plina med tlemi in atmosfero. Odvisen je od nastajanja CO₂ v tleh in njegovega nadaljnjega transporta proti površini tal. Glavni vir CO₂ v tleh je dihanje avtotrofnih (rastline, alge, kemolitotrofi, fotolitotrofi) in heterotrofnih (bakterije, glive, aktinomicete, protozoa in makrofavna) organizmov (Slika 2).



Slika 2: Pet glavnih virov CO₂ iz tal, glede na hitrost sproščanja v atmosfero in na zadrževalni čas ogljika v tleh (Kuzyakov, 2006: 427, povzeto po Ogorevc, 2008: 9).

Gibanje CO₂ v tleh lahko poteka z advekcijo, kadar je tlačna razlika med tlemi in atmosfero velika (npr. delovanje vetra, hitre spremembe atmosferskega pritiska) (Etiope, 1997). V brezveterju pa se CO₂ premešča z difuzijo v vodoravni smeri talnih por in ne izhaja v atmosfero (Jassal in sod., 2005). Dejavniki, ki vplivajo na difuzivnost talnega CO₂, so fizikalne in kemične lastnosti tal, vsebnost vode v tleh, temperatura tal ter veter na površini tal (Hillel, 1998; Jassal in sod., 2005). Največkrat je tok v pozitivni povezavi z vsebnostjo vode v tleh, temperaturo tal, vsebnostjo organske snovi v tleh, količino hranil v tleh, mikrobno aktivnostjo in s prisotnostjo rastlin (Xu in Qi, 2001; Kuzyakov, 2006). Kuzyakov (2006) navaja, da ima poleg neposrednega (dihanja korenin) vegetacija tudi velik posredni vpliv na tok CO₂ iz tal, saj vpliva na talno mikroklimo, strukturo, kvaliteto ter količino opada.

Sproščanje talnega CO₂ narašča s temperaturo, saj je takrat dihanje večje in s tem je posledično večji tudi tok CO₂ iz tal. Narašča tudi s povečevanjem deleža zračnih por v tleh (večja prevodnost za pline), kar pa je odvisno od gostote tal in vsebnosti vode v tleh (Hillel, 1998; Jassal in sod., 2005). Gostota tal na tok plinov nima pomembnega vpliva. V večjih globinah (50cm in več) je tok plina v primerjavi s površino tal manjši (Jassal in sod., 2005).

Na spremembo toka CO₂ vplivajo tudi okoljske razmere kot so suša in padavine. Večje količine padavin imajo negativen vpliv, saj se tok CO₂ drastično zmanjša zaradi z vodo zapolnjenih talnih por. Takoj po odteku gravitacijske vode pa se znova vzpostavi bolj stabilen tok (Ball in sod., 1999; Jassal in sod., 2005). Po drugi strani manjše količine padavin pozitivno vplivajo na tok, saj vzpodbujajo aktivnost organizmov (rastline, mikroorganizmi), kar vodi v nenadno povečanje količine in koncentracije plina v tleh.

Poletne suše lahko učinkovito vplivajo na spremembe toka, kajti povišane temperature vodijo v povečan nastanek CO₂ v tleh, lahko pa tudi omejijo tok plina, saj lahko majhna vsebnost vode v tleh omeji rast in aktivnost mikroorganizmov (Howard DM in Howard PJA, 1993). Kadar pa tla niso podvržena poletni suši, je tok CO₂ iz tal časovno bolj ustaljen.

Tok CO₂ iz tal se pogosto spreminja s časom, zato lahko govorimo o sezonskem in dnevnem nihanju toka (Xu in Qi, 2001; Mosier in sod., 2002). Xu in Qi (2001) sta v svoji raziskavi ugotovila, da dnevno nihanje toka CO₂ iz tal sledi spremembam temperature. Tok doseže največje vrednosti od 13:00 do 15:00 ure. Ugotovila sta tudi, da lahko ca. 70 % časovne spremenljivosti toka pripišemo delovanju kombinacije temperature tal in volumskega deleža vode v tleh. Vsebnost vode v tleh in tok CO₂ iz tal sta močno soodvisna kadar je vsebnost vode v tleh nižja od 19 % in obratno (Xu in Qi, 2001). Mielnich in Dugas (2000) navajata, da so meritve 12 urnega dnevnega povprečja toka CO₂ pokazale za 10 % večji tok kot 24 urno povprečje. Hkrati pa sta ugotovila, da so opoldanske vrednosti toka primerljive s povprečno celodnevno vrednostjo toka. Študije dnevnega poteka toka CO₂ iz tal so pokazale, da je nočno dihanje enako dihanju ob zori ali mraku (Dugas in sod., 1999). Sezonska vrednost toka CO₂ iz tal je pogojena predvsem s temperaturo tal in je najnižja pozimi, največjo vrednost pa doseže v začetku poletja (Fang in sod., 1998; Mielnick in Dugas, 2000; Jassal in sod., 2005). V času, ko je vode v tleh dovolj (od oktobra do maja), sta Xu in Qi (2001) ugotovila, da je tok CO₂ iz tal bolj odvisen od spremembe temperature tal kot vsebnosti vlage v tleh. V poletnem obdobju pa ravno obratno. Prehodno obdobje v septembru in maju kaže, da tako temperatura tal kot vsebnost vode v tleh uravnavata tok CO₂ iz tal.

2.3 DIHANJE TAL V RAZLIČNIH EKOSISTEMIH

2.3.1 Tok CO₂ iz tal na travnatem svetu

Travišča pokrivajo 20-40 % zemljine površine. V Evropi igrajo pomembno vlogo na površini, kjer klima in topografija omejujeta pridelavo drugih pridelkov. Bahn in sod. (2008) so povzeli rezultate raziskav dihanja tal na 20 evropskih traviščih, med katerimi je bilo 10 travnikov, 8 pašnikov in 2 travišči, kjer nista uporabljeni ne košnja ne paša (Preglednica 1). Poročajo o vrednostih od 1,9 do 15,9 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, dihanje tal pri 10°C je bilo od 0,3 do 5,5 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, ocena za letni tok CO₂ travniških tal pa je znašala od 58 do 1988 g C $\text{m}^{-2} \text{ y}^{-1}$.

Preglednica 1 prikazuje vrednosti dihanja tal za nekaj različnih tipov travišč. Pri primerjavi velikosti toka CO₂ iz tal moramo upoštevati različne okoljske danosti (tip ekosistema, klimatske razmere, ...) in okoliščine, v katerih so bile opravljene meritve.

Mielnick in Douglas (2000) sta opravila letno meritev toka CO₂ iz tal travnatega sveta. Želela sta odkriti medsebojno povezavo med tokom CO₂ v tleh, temperaturo tal in vsebnostjo vode v tleh. Meritve sta opravljala v času vegetacije v zaporedju 5 let s premično sondo, ki sta jo postavila na PVC ovratnike. Pred vsako meritvijo sta odstranila

obstoječo vegetacijo, ki je zrastle med dvema merjenjema na zemljišču, kjer že 30 let ni bil izveden noben agrotehnični ukrep. Ugotovila sta naslednje:

- povprečni dnevi tok CO₂ iz tal, ki so bila pokrita z rušo, je bil 59 $\mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$, med 7. in 19. uro pa 65 $\mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$;
- letni ocenjeni tok CO₂ iz tal v obdobju od 1993 do 1998 so bili: 1,6; 1,3; 1,2, 1,0; 2,1 in 1,5 kg CO₂-C m⁻² leto⁻¹;
- največji pretok plina je bil v letu z največ in najbolj enakomerno porazdeljenimi padavinami po mesecih, obratno je veljalo za najmanjši tok;
- potek toka CO₂ skozi leto je bil bolj odvisen od spreminjanja temperature kot od poteka sprememb v vsebnosti vode v tleh;
- 46 % variabilnosti toka CO₂ iz tal je bilo pojasnjenih z eksponentno odvisnostjo od temperature tal.

Tudi drugi raziskovalci poročajo o podobnih povezavah (Bahn in sod., 2008). V primeru visokogorskega pašnika s 700 mm letnih padavin, Alynia, Španija (glej Bahn in sod. 2008) so v dveh sezonah spremljali odzive dihanja tal na padavine. Dihanje tal julija 2003 je bilo majhno, pri čemer so bile majhne tudi spremembe tekom dneva. Po dežju, ko je vlaga v tleh narastla iz manj kot 10 vol. % na več kot 20 vol. %, se je tok CO₂ iz tal podvojil in sledil dnevni vzorcu. Takoj, ko vlaga zopet pade pod 10 vol. %, dihanje tal zopet sledi vrednostim, ki so bile pred dežjem z zmanjšanim vplivom temperature. V juniju 2004 pa vlaga v tleh ni nikoli padla pod 20 vol. %, zato povečanje vlage v tleh po dežju ni spremenilo razmerja dihanja tal in njegove odvisnosti od temperature.

Preglednica 1: Dihanje tal v odvisnosti od temperature, maksimalnega in letnega dihanja tal na travniških različnih pokrajin (prirejeno po Bahn in sod., 2008: 1362).

Tip ekosistema, pokrajina	R (T _{ref}) (μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)	R _{max} (μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)	R _{letni} (g C m ⁻² y ⁻¹)	Referenca
Travišča				
Zmerno travišče			187-830	Raich in Schlesinger (1992)
Tropsko travišče in savane			380-900	Raich in Schlesinger (1992)
Tropski pašnik (Amazonka)	5,1 (25°)	11,0	1000-1500	Davidson in sod. (2000)
Severnoameriška stepa (Tallgrass, Severna Amerika)		9,5	1090-1347	Bremer in sod (1998), Bremer in Ham (2002)
Severnoameriška stepa (Tallgrass, Severna Amerika)	3 (18°)		1100	Wan in Luo (2003)
Severnoameriška stepa (Tallgrass, Severna Amerika)			1700	Mielnick in Douglas (2000)
Severnoameriška stepa (Konza, Severna Amerika)		15 (18-22) ¹	1300-2100	Knapp in sod. (1998); Harper in sod. (2005)
Center Iowa C ₃ travišče (Severna Amerika)			730	Dornbush in Raich (2006)
Center Iowa C ₄ travišče (Severna Amerika)			1300	Dornbush in Raich (2006)
Travišče Kalifornija (Severna Amerika)		3,8	344-485	Luo in sod. (1996)
Stepa (Shortgrass, Severna Amerika)		4,6	530	Pendall in sod. (2003)
Great Basin western wheatgrass–cheatgrass	0,5-6,5 (15°)	3,3-5,7	400-650	Hibbard in sod. (2005)
Travišče Oklahoma (Severna Amerika)			704-881	Zhou in sod. (2007)
Pašnik (lahko-težko pašen) (Tibet)	1,7-3,9 (10°)	3,2-6,5	1533-2035	Cao in sod. (2004)
Travniki, širinski presek (Evropa)	3,2-5,5 (10°)	9,5-15,9	1070-1988	Bahn in sod. (2008)
Pašnik, širinski presek (Evropa)	1,4-3,2 (10°)	6,5-14,8	494-1166	Bahn in sod. (2008)
Nepašeno (Severna Evropa)	0,3-2,1 (10°)	1,9-4,9	58-529	Bahn in sod. (2008)
Gojen travnik (Slovenija)		4,6-27,9		Vodnik (2009)
Mešan pašnik		2-9		Flanagan in Johnson (2004)
Semiaridna stepa		1-95 mg CO ₂ m ⁻² h ⁻¹		Maestre in Cortina (2003)
Gozd				
Gozd (Evropa)	0,7-4,9 (10°)		281-1456	Janssens in sod. (2001, 2003)
Gozd (Evropa, US)		1,7-12,5	427-1805	Hibbard in sod. (2005)
Vzdrževan gozd			250-1414	Raich in Schlesinger (1992) ^b
Tropski gozd			345-1450	Raich in Schlesinger (1992) ^b
Tropski amazonski gozd		11,6	2000	Davidson in sod. (2000)
Duglazija gozd			1920	Drewitt in sod. (2002)

¹ Najvišje dihanje tal po dežju.

Iz preglednice 1 so razvidne velike vrednosti dihanja tal za travišča v centralni Evropi s sorazmerno visoko temperaturo skozi poletje, z majhnimi omejitvami talne vlage. Majhna vrednost toka CO₂ iz tal skozi zimo (manj kot 1 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹) se poravnava z velikim dihanjem skozi poletje (14-16 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹). V Tibetu je na pašniku z majhno obremenitvijo bila ocenjena podobna velika vrednost letnega toka CO₂ iz tal Cao in sod. (2004).

Zmeraj bolj spoznavamo, da je dihanje tal vedno bolj povezano s fotosintezo. Raich in Schleinger (1992) sta v svoji raziskavi pokazala, da je v splošnem temperatura najboljši napovednik za letno dihanje tal, če ekosistem ni podvržen pomanjkanju vode. Letne vrednosti dihanja tal naraščajo z naraščanjem ogljika v zgornji plasti tal ter z rastjo indeksa listne površine (LAI) in bruto primarne proizvodnje (gros primary production – GPP). Veliko avtorjev navaja, da lahko zato z GPP in LAI napovemo letno dihanje v gozdu (Janssens in sod., 2001; Reichstein in sod., 2003; Hibbard in sod., 2005), še posebej v primerih, kjer se GPP ne povečuje s temperaturo (Janssens in sod., 2001). Dornbush in Raich (2006) sta pokazala, da je v primeru travišč nadzemna biomasa manj primerna za napovedovanje letne spremembe dihanja tal kot temperatura tal.

Prav tako so Bahn in sod. (2008) v sezonskih meritvah intenzivno nadzorovane pašne opazili, da lahko razliko v zvezi temperatura - dihanje razložimo s spremembami v LAI. Tudi Reichstein in sod. (2003) so ugotovili, da je dihanje tal okrog območja gozdnega ekosistema močno povezano z LAI. Če s košnjo ali pašo odstranimo listno maso, se dihanje tal zmanjša, prav tako pa tudi njegova temperaturna občutljivost (Bahn in sod. 2008). S tem se strinjajo tudi drugi raziskovalci (Bremer in sod. 1998; Wan in Luo 2003; Cao in sod. 2004), ki so dihanje tal merili v severnoameriški stepi in na pašnikih v Tibetu. Do padca dihanja po košnji pride zaradi omejene dobave asimilatov, vendar pa lahko dihanje naraste na račun večje temperature pokošenih tal. Enako zmanjšanje toka zaradi zmanjšane dobave asimilatov se je pokazalo na travišču s senčenjem (Wan in Luo, 2003; Bahn in sod., 2008).

Raziskave časovne odvisnosti fotosinteze in dihanja tal nakazujejo zelo neposredno povezavo med obema procesoma. Za dihanje gozdnih tal ugotavljajo, da je v veliki meri gnano s sladkorji, ki so bili nedavno pridelani v fotosintezi. Pred kratkim so ugotovili dnevne variacije dihanja tal, ki niso bile pogojene s temperaturo, ampak naj bi na njih vplivala različna velikost dnevne fotosinteze. Rezultati, ki jih prikazujejo Bahn in sod. (2008) so podobni, saj je dnevna histeza povezana s temperaturo in dihanjem tal. Še posebej ob jasnih - sončnih dneh je sprememba odvisna od globine tal in izmerjene temperature. Odziv dihanja tal na spremembe temperature tal je največkrat zakasnen, vzroki za ta časovni zamik pa so lahko naslednji: (1) razlike v temperaturi tal na različnih globinah, (2) dnevne spremembe vlage tal ob kritični mejni vrednosti, (3) časovni zamik med nastankom CO₂ v različnih plasteh tal in njegovo difuzijo CO₂ iz tal (ko je vlaga v tleh velika), (4) možni učinki dnevnih nihanj v dobavi pravkar pridelanih fotoasimilatov do korenin in rizosfere.

Tla na travnatem svetu imajo po ugotovitvah mnogih raziskovalcev (Reeder in Schuman, 2002; Smith, 2004) večji potencial za vezavo ogljika kot njivska tla, ki jih vsako leto z

oranjem obračamo in s tem pospešujemo mineralizacijo organske snovi tal. Prav tako pa so tudi Bahn in sod. (2008) ugotovili, je tok CO₂ tal travišč lahko za 20 % višji kot v gozdu.

2.3.2 Tok CO₂ iz tal na pašniku

Različna raba travnatega sveta vpliva na lastnosti zemljišč za ponor ogljika (Conant in sod., 2001). Tako naj bi ukrepi izboljšane upravljanja s travnatimi zemljišči povečali zaloge ogljika tudi do 5 %.

Dihanje tal na pašniku je odvisno od avtotrofne in heterotrofne aktivnosti, obe pa sta kontrolirani z okoljskimi dejavniki. Pri primerjavi različnih okoljskih dejavnikov je organska snov prevladujoča za dihanje tal na pašniku. Vlaga v tleh je prevladujoč okoljski dejavnik, ki določa sezonske in medletne razlike v dihanju tal na pašniku, ko je sprememba v temperaturi konstantna. V poletnem času, ko je temperatura zelo visoka (čez 30 °C) in vlaga zelo majhna, so izmerili majhen tok CO₂ iz tal (pod 1 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹), medtem ko so pri veliki vlagi in rastlinski biomasi zasledili velik tok CO₂ iz tal na pašniku (Flanagan in Johnson, 2005).

Pri nadzorovani rabi paše domačih živali ima obremenitev pašnika značilen vpliv na vezavo ogljika. Reeder in Schuman (2002) poročata, da so tla, kjer je potekala paša ob veliki obremenitvi na globini do 30 cm, vsebovala več ogljika kot tista z majhno obremenitvijo ali kjer ni bilo paše. To naj bi bila predvsem posledica izdatnejšega povečanja mase korenin. Osnovni pogoj za hiter prirast mase asimilacijskega tkiva, ki sledi vsaki defoliaciji nadzemnih delov rastlin ruše, je kontinuirana oskrba rastlin z dušikom, to povečuje učinkovitost fotosinteze, posledično pa je vezanega tudi več ogljika.

Schuman in sod. (1999) so v raziskavi 12 letne paše pri različnih stopnjah obtežbe, prišli do zaključkov, da paša poveča količino ogljika v območju korenin (0-30 cm) od 6000 do 9000 kg ha⁻¹ ogljika v primerjavi z nepašenimi zemljišči. Ugotovili pa so tudi, da paša pospešuje kroženje ogljika iz nadzemne mase v tla, saj hitreje potekata procesa razgradnje in vnosa rastlinskega materiala. Franzluebbers in sod. (2000) ugotavljajo, da je na splošno vezava ogljika na pašnem travinju večja kot na košenem travinju.

Raich in Tufekcioglu (2000) sta ugotovila, da je dihanje tal za 20 % večje na pašniku kot v gozdu. To pripisujeta predvsem povečanemu prerazporejanju ogljika h koreninam na pašniku.

2.3.3 Tok CO₂ iz tal zaraščenih travišč

Od začetka 18. stoletja, ko so se začela masovna krčenja gozdnih zemljišč zaradi poljedelskega načina rabe tal, je ta način rabe zemljišč pospešil dihanje tal. Prav ta proces je do leta 1950 največ prispeval k povečani koncentraciji CO₂ v atmosferi (Schlesinger, 1986). Ob obratnem procesu, zaraščanju, gre pričakovati, da se bo zaloga ogljika v ekosistemu povečala, ekosistem lahko s tem deluje kot ponor ogljika, kar naj bi bilo pomembno tudi za omilitev naraščanja koncentracije CO₂ v atmosferi. Pri reševanju tega

problema so začeli uporabljati različne ukrepe, med katerimi sta tudi gojenje plantaž z drevesi in pogozditev marginalnih področij, kar po izračunih (Niu in Duiker, 2006) predstavlja velik potencial za vezavo ogljika.

Huang in sod. (2007) so proučevali preoblikovanje travišča v borov nasad vrst *Pinus massoniana* in *Pinus elliottii*. Neto akumulacija ogljika v gozdnem ekosistemu je bila skoraj dvakrat večja kot na travišču. Zanimivo pri tem je, da je vsebnost talnega ogljika v prvih 7 letih po zasaditvi upadla (s hitrostjo 0,1871 kg C m⁻² leto⁻¹), kasneje pa se je povečala (0,09 kg C m⁻² leto⁻¹). Na podlagi teh rezultatov so ugotovili, da se je zaloga talnega ogljika ob spremembi travišča v gozd v začetnem obdobju (7-8 let) zmanjšala za približno 20 %. O prehodnem zmanjšanju količine talne organske snovi poročata tudi Thuille in sod. (2002), ki sta proučevala spremembe v zalogah ogljika v različnih 'poolih' ob zaraščanju travišč z navadno smreko (*Picea abies*). Rezultati z različnih kronosekvenc so pokazali porast zaloge ogljika, ki ga je bilo moč pripisati predvsem povečanju zaloge v lesni biomasi in v organskih horizontih. V mineralnih horizontih tal je prišlo ob zaraščanju do začetnega zmanjšanja količine ogljika na 80 % vrednosti za travišče. Ta količina je kasneje počasi naraščala.

V literaturi je kar nekaj poročil o spremembah dihanja tal po pogozditvi ali po vzpostavljanju plantažnih nasadov lesnih vrst na kmetijskih tleh, manj pa poročil o toku CO₂ iz tal ekosistemov, ki so podvrženi naravnemu zaraščanju. Nouvellon in sod. (2007), so naredili raziskavo sproščanja CO₂ iz tal po pogozditvi v Kongu. Letni tok CO₂ iz tal, ki so ga zabeležili, je bil 0,66-0,65 kg C m⁻² y⁻¹ in je zelo podoben heterotrofnemu toku CO₂ iz tal v tropski savani na severu Avstralije (0,72 kg C m⁻² y⁻¹, Chen in sod., 2003). Rezultati pogozditve so pokazali, da se začetni tok talnega ogljika zmanjša iz -28 na -77 g C m⁻² y⁻¹. Podobno ugotavljata tudi Turner in Lambert (2000). Ob saditvi se poveča prezračenost tal, kar povečuje razgradnjo organske snovi tal in vzpodbudi tok CO₂ iz tal. (Mallik in Hu, 1997). Začetno povečanje dihanja ob pogozditvi, ki vpliva tudi na zmanjšanje količine talnega ogljika, je močno odvisno od klimatskih razmer in začetne količine C v tleh (Paul in sod., 2003). Bilance talnega ogljika ni možno oceniti po več kot enem letu pogozditve. Rezultati v študiji Nouvellon in sod. (2007) so pokazali, da se talni ogljik ne povečuje po pogozditvi zelo produktivnega travišča, ampak to povečanje talnega ogljika dosežemo le po pogozdovanju siromašnega travišča ali degradiranega pašnika (Paul in sod., 2003; Lima in sod., 2006).

Tok CO₂ iz tal predstavlja 40-80 % dihanja gozdnega ekosistema. Za peščena tla poročajo o manjšem toku kot za ilovnata tla, vzrok je slaba sposobnost zadrževanja vode (Dilustro in sod., 2004). V suhi sezoni je dva do trikrat manjši tok CO₂ iz tal kot v mokri sezoni (Nouvellon in sod., 2007). Primanjkljaj talne vlage zmanjša dihanje korenin za 17 % (Jassal in sod., 2004). Odvisnost dihanja gozdnih tal od temperature in vlage v tleh je podobna kot na traviščih, vlaga je pomemben dejavnik dihanja gozdnih tal le, kadar gre za peščena tla (Dilustro in sod., 2004).

3 MATERIAL IN METODE

3.1 OPIS LOKACIJ, TLA, VEGETACIJA

Na osnovi pregleda terena in predhodnega poznavanja submediteranskega območja Slovenije se je pokazalo, da je najprimernejša lokacija za raziskavo predel Podgorskega krasa. Podgorski kras leži na nadmorski višini od 420 do 500 m in je razmeroma obsežen kraški ravnik med kraškim robom in Slavniškim pogorjem. Gradijo ga paleogenski apnenci, v nekaterih območjih proti kraškemu robu pa se v apnenec zarivajo bolj ali manj dolgi jeziki eocenskega fliša (vale).

Tla na Podgorskem krasu so zaradi razmeroma enotne geološke sestave in ravnega terena dokaj homogena (Eler, 2007). Prevladuje sprsteninasta rendzina, v manjših depresijah, vrtačah in pod pobočji so se ponekod izoblikovala rjava pokarbonatna tla (Repolusk, 1998). Zadrževanje vode je zelo omejeno, saj je debelina tal zelo majhna. Tanka plast tal je poleg apnenčaste podlage verjetno posledica dezertifikacijskih procesov, povzročenih s pretirano pašo in dodatno podkrepjenih z delovanjem burje v preteklosti (2-3 stoletja nazaj) (Kaligarič, 2006).

Osnovne morfološke lastnosti tal, na poskusnih območjih, kjer smo izvajali meritve (glej 3.1.1 in 3.1.2.) so podane v preglednici 2.

Preglednica 2: Podatki morfoloških lastnosti tal (pH (H₂O), pH (CaCl₂), organska snov [%], tekstura, delež skeleta v 0-40 cm [%]), ločeni za posamezne podploskve.

lokacija	podploskev	pH (H ₂ O)	pH (CaCl ₂)	organska snov [%]	tekstura	delež skeleta v 0-40 cm [%]
pašnik	pašnik 1	7,4	6,7	16,9	G	54
	pašnik 2	7,1	6,3	14,5	G	38
	pašnik 3	7,4	6,8	14,2	G	67
zaraščanje	gozd 1	6,8	6,2	14,4	MG	28
	gozd 2	6,5	5,8	12,1	G	18
	gozd 3	6	5,1	9,1	G	12
	vrzel 1	7,5	6,9	13,3	G	63
	vrzel 2	7,3	6,5	12,7	G	89
	vrzel 3	7,6	7	14,6	G, MG	67

Razvidno je, da ima gozd kisel pH, medtem ko se vrzel in pašnik nagibata k bazičnemu pH. Prevladujejo glinasta tla, ki so zelo močno humusna in srednje do močno skeletna, razen na lokaciji gozda 3, kjer je skeletnost slaba.

Za Podgorski kras je značilno prehodno podnebje med (sub)mediteranskim in celinskim, z dokaj hladnimi in deževnimi zimami ter vročimi in suhimi poletji. Kljub razmeroma obilnim padavinam (1300-1600 mm na leto) pa je zaradi apnenčaste matične podlage in izredno plitvih tal (rendzina) to območje že na pogled izrazito sušno.

Sušni stres kot posledica pedoklimatskih dejavnikov ima izreden vpliv na podobo vegetacije na Podgorskem krasu. Od negozdne vegetacije prevladujejo suha travišča iz zveze *Satureion subspicatae* Ht. 62 (Kaligarič, 1997). Najpogostejša asociacija je, združba nizkega šaša in skalnega glavinca (*Carici humilis* – *Centaureetum rupestris* Ht. 31). Od gozdne vegetacije so najpogostejši submediteranski toploljubni gozdovi črnega gabra in puhastega hrasta (*Ostryo-Quercetum pubescentis*), velika območja pa pokrivajo tudi drugotni gozdovi črnega bora, ki so bodisi nasajeni (oz. nasejani) bodisi so se razširili spontano. Vegetacija Podgorskega krasa je zaradi sušnih razmer pogosto prizadeta zaradi požarov, posledica tega je predvsem opuščanje rabe zemljišč.

Pašniki so edina primerna oblika rabe tal po proizvodnem potencialu siromašnega sveta, ampak se še vedno obsežno zaraščajo, predvsem s puhastim hrastom (*Quercus pubescens* Wild), navadnim rujem (*Cotinus coggygria* Scop.) in navadnim brinom (*Juniperus communis* L.). Manjši del travišč je v košni rabi, to je predvsem tam, kjer je debelina tal nekoliko večja.

Na preučevanem območju smo v sklopu projekta izbrali dve ploskvi, ki sta v različnih stadijih zaraščanja: od ekstenzivno rabljenega pašnika, preko opuščenega pašnika, na eni ploskvi in z manjšim ali večjim deležem zarasti do gozda na drugi ploskvi. Raziskovalni ploskvi s premerom 200 m smo izbrali na podlagi tipa vegetacije, tipa tal, zgodovine rabe in reliefa. Za natančno določitev ploskev so bile predhodno opravljene preliminarne raziskave vegetacije in tal, pregledani pa so bili tudi stari prostorski prikaz tega območja (katastri, aeroposnetki).



Slika 3: Prikaz zaraščajoče ploskve in ploskve na pašniku (Vodnik, 2009).

3.1.1 Ploskev »ZARAŠČANJE«

Za prvo poskusno območje smo izbrali ploskev, ki je v poznem stadiju zaraščanja s puhastim hrastom. V okviru ploskve smo omejili tri podploskve velikosti ca. 20 m² v manjših sestojih puhastega hrasta (podploskve »gozd«) in tri podploskve v vrzelih (»vrzel«). Na vsaki od podploskve smo imeli po 7 mest, na katerih smo opravljali meritve.



Slika 4: Prikaz skice ploskve prvega poskusnega območja s podploskvami za vrzel in gozd (Vodnik, 2009).



Slika 5: Prikaz podploskve gozd - G3 (foto: Marinič, 2009).



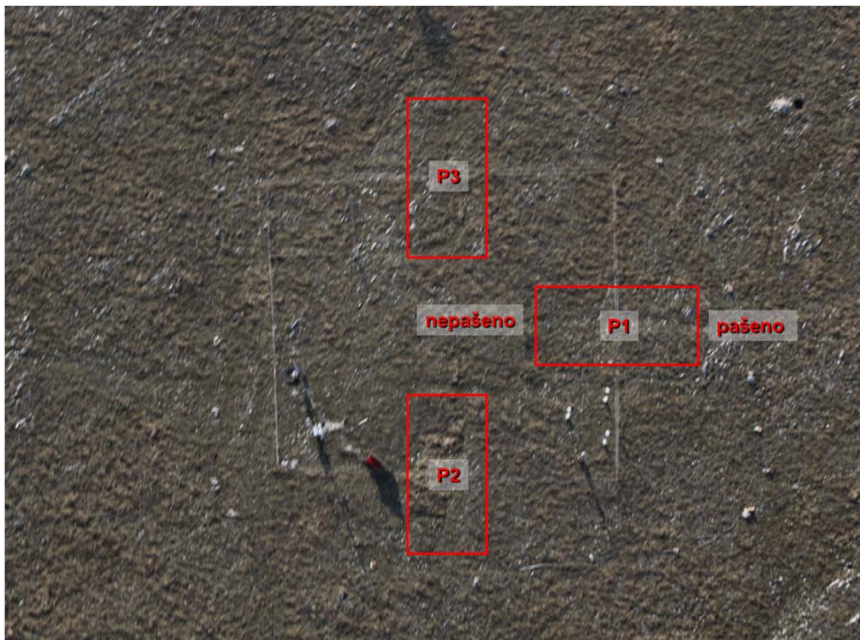
Slika 6: Prikaz podploskve vrzel – V2 (foto: Marinič, 2009).

3.1.2 Ploskev »PAŠNIK«

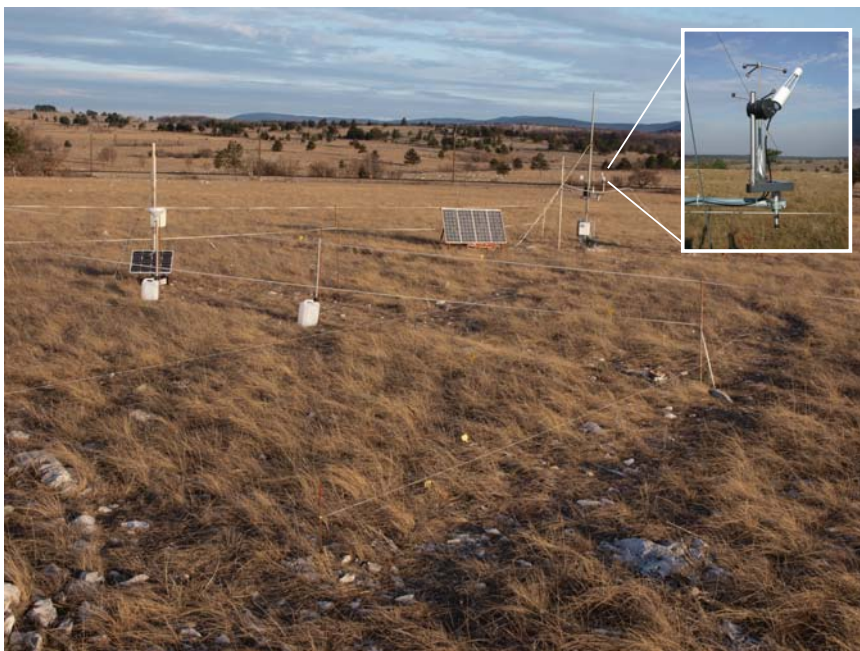


Slika 7: Prikaz območja ploskve »PAŠNIK« (foto: Marinič, 2009).

Drugo poskusno območje je bila ploskev na pašniku, ki smo ga ogradili na način kot prikazuje slika 8. V ograjenem delu smo imeli tri podploskve (»nepašeno«), zunaj ograje pa tri podploskve, na katere so imele živali na pašniku dostop (»pašeno«). Na vsaki od podploskev je bilo 7 merilnih mest.



Slika 8: Prikaz skice ploskve drugega poskusnega območja s podploskvami za pašen in nepašen del z ovratniki (Vodnik, 2009).



Slika 9: Prikaz skice ploskve drugega poskusnega območja s podploskvami za pašen in nepašen del z ovratniki (Vodnik, 2009).



Slika 10: Prikaz nepašenega in pašenega dela pašnika (Vodnik, 2009).



Slika 11: Prikaz nepašenega in pašenega dela pašnika (foto: Marinič, 2009).

3.2 METODE POSKUSA

V okviru vsake podploskve smo na začetku poskusa izbrali po 7 merilnih mest, na katerih smo kasneje lahko opravljali meritve, ne da bi vstopali na samo podploskev. V začetku rastne sezone 2008 smo na te točke postavili PVC ovratnike (4,5 cm visoke in 11,0 cm v premeru), tako da smo jih delno vkopali v tla. Znotraj posamezne podploskve so bili ovratniki oddaljeni eden od drugega 0,5-1 m. Na vsaki ploskvi smo postavili 6 x 7 ovratnikov, skupno torej 42 ovratnikov. Na ovratnike smo ob rednih meritvah toka CO₂ nameščali komoro merilnega sistema, na istih mestih pa smo opravljali tudi meritve temperature in vsebnosti vode.



Slika 12: Prikaz, kako se je v določenem delu leta odstranilo odpadlo listje (foto: Marinič, 2009).

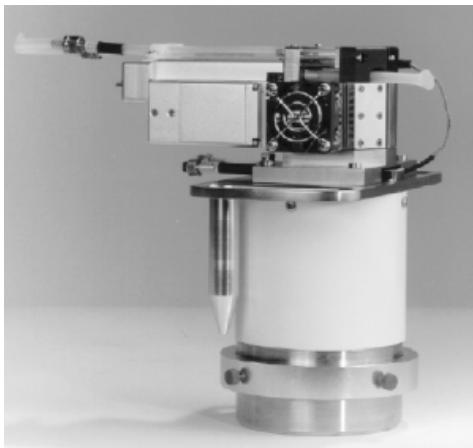
3.2.1 Merjenje toka CO₂ iz tal in temperature tal

Meritve talnega toka CO₂, temperature tal in vsebnosti vode v tleh so potekale v letu 2008 in 2009, preko vegetacijske sezone od junija 2008 do konca decembra 2008, v bolj ali manj rednih 2-tedenskih intervalih. Časovni razpored meritev prikazuje preglednica 2:

Preglednica 3: Časovni razpored meritev, ki smo jih opravljali na raziskovalnih ploskvah Podgorskega krasa.

Zap. št.	Datum	Dan v letu
1	23.7.2008	205
2	30.7.2008	212
3	5.8.2008	218
4	14.8.2008	227
5	28.8.2008	241
6	10.9.2008	254
7	24.9.2008	268
8	10.10.2008	284
9	22.10.2008	296
10	10.11.2008	315
11	27.11.2008	332
12	22.12.2008	357

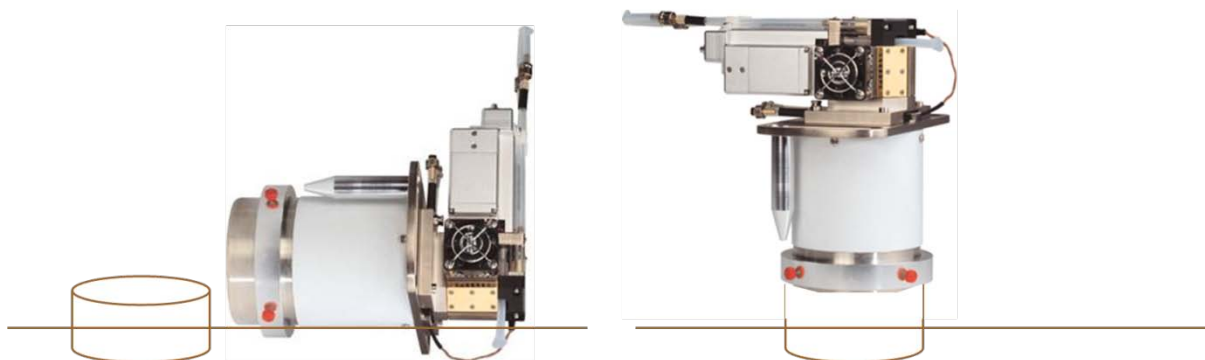
Meritev talnega CO₂ izpusta je potekala z dinamično metodo, z uporabo Li-Cor 6400 prenosnega sistema za merjenje fotosinteze (Li-Cor, Lincoln, NE, ZDA), opremljenega s komoro za meritve toka CO₂.



Slika 13: Li-Cor 6400-09 (Soil..., 2003).

Meritve smo izvajali v dvotedenskih intervalih od junija do januarja. Potekale pa so med 8:00 in 11:00, v dveh ali treh ponovitvah na posameznem ovratniku.

Z aparatom meritve izvajamo tako, da najprej izmerimo tarčno vrednost koncentracije CO₂ nad ovratnikom, tako da komora za merjenje leži ob ovratniku. Nato komoro postavimo na ovratnik in upoštevamo višino ovratnika. Aparat s prečrpavanjem zmanjša koncentracijo CO₂ v komori in nato meri čas, ki je potreben, da se koncentracija znotraj komore izenači s tarčno vrednostjo. Tako lahko izračunamo hitrost toka talnega CO₂ skozi ovratnik.



Slika 14: Prikaz postavitve komore ob ovratniku (določanje tarčne vrednosti) in komore na ovratniku (meritev toka) (Vodnik, 2009).

Hkrati z meritvami toka CO₂ smo merili tudi temperaturo tal s sondo (Omega Engineering Inc., Stamford, ZDA), ki je priključena na Li-Cor 6400. Meritev temperature je potekala do globine 10 cm, v neposredni bližini ovratnikov.



Slika 15: Prikaz meritve toka CO₂ iz tal in temperature v neposredni bližini ovratnika (foto: Marinič, 2009).

3.2.2 Merjenje vsebnosti vode v tleh

Vsebnost vode v tleh smo merili po meritvah toka CO₂ s FDR metodo. FDR metoda določi dielektrično konstanto medija z merjenjem časa, ki ga potrebuje elektromagnetni val za širjenje vzdolž elektromagnetne linije (elektrode), ki je obkrožena z medijem. Vsebnost vode v tleh smo merili neposredno v ovratniku, tako da smo v tla zapičili sondo SM200 Soil Moisture Sensor (Delta-T Devices) do globine 5 cm.

Sonda SM200 ki je priključena na HH2 moisture meter, ima dve jekleni paličasti elektrodi, ki služita kot prevodnik, medtem ko tla okoli in med njimi služijo kot dielektrični medij. Z vzpostavljanjem napetosti med elektrodami, se proizvaja visokofrekvenčni elektromagnetni signal, ki se na mestih s spremenjeno upornostjo deloma odbije. Preostali del signala pa potuje naprej do konca elektrod. Na mestu, kjer se signal odbije, se preostanek vrne nazaj v FDR sprejemnik. Naprava meri čas med poslanim in sprejetim signalom. Za določeno linijsko dolžino je časovni interval obratno sorazmeren s hitrostjo širjenja signala v tleh, saj se hitrost zmanjša s povečanjem vsebnosti vode, pri čemer se poveča čas (SM200..., 2006).

Odčitke SM200 v mV smo preračunali v volumske odstotke vode v tleh, tako da smo uporabili umeritvene krivulje, ki so bile predhodno narejene za tla na posameznih merilnih lokacijah (Vodnik, 2009).



Slika 16: Prikaz sonde SM200, ki je priključena na HH2 moisture meter (Delta-T Devices) (foto: Marinič, 2009).

3.3 STATISTIČNA OBDELAVA PODATKOV

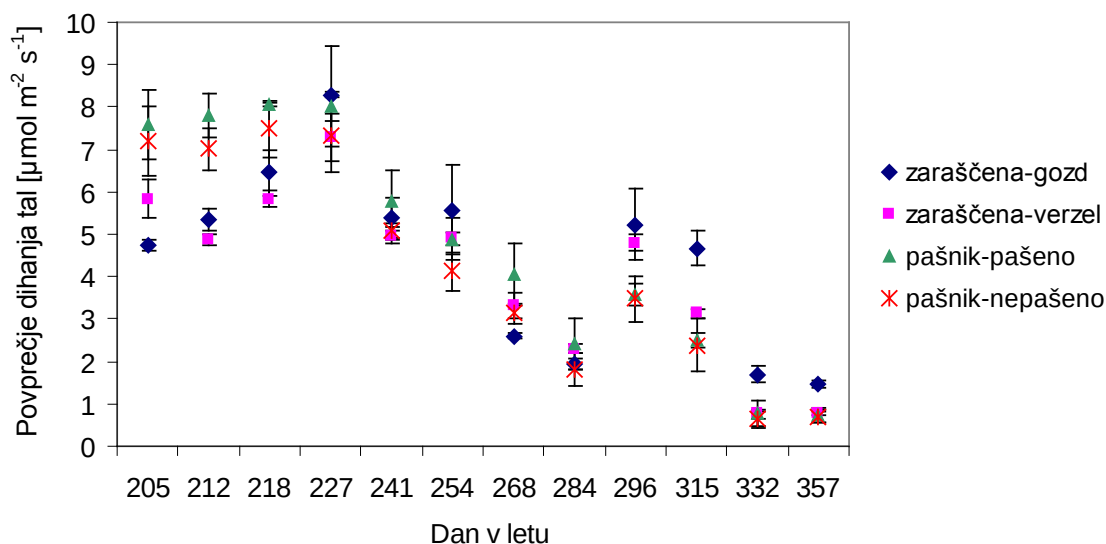
Za statistično obdelavo podatkov in grafične prikaze smo uporabili program Excel. Vse rezultate meritev smo obdelali z metodami opisne statistike (povprečja, standardna napaka). Zvezo med temperaturo tal, vsebnostjo vode v tleh in tokom CO₂ tal smo analizirali z nelinearno regresijsko analizo.

4 REZULTATI

4.1 TOK CO₂ IZ TAL

Vrednosti toka CO₂ iz tal se tekom obdobja, v katerem smo opravljali meritve, gibljejo od 0,6 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ in vse do 8,3 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (povprečja za posamezen merilni termin). V poletnem obdobju opazimo, da je tok CO₂ iz tal nekoliko večji in narašča vse do 14. avgusta (227 dan v letu), kjer doseže tudi največjo merjeno vrednost 8,3 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Ob naslednjih meritvah opazimo zmanjšanje tokov vse do 10. oktobra (254 dan v letu), ko pade na 1,8 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Do konca meseca oktobra pa se je vrednost toka CO₂ iz tal zopet nekoliko povečala na 5,2 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. V zimskem obdobju so vrednosti nekoliko manjše in ob meritvi 22. decembra (357 dan v letu) dosežejo najmanjšo vrednost 0,6 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

V določenih delih leta opazimo med posameznimi podploskvami (gozd, vrzel, pašeni, nepašeni del) razlike v sproščanju CO₂ iz tal. V poletnem obdobju, meseca julija, je tok CO₂ na pašniku večji od toka, ki smo ga izmerili na gozdnatih, vrzelnih površinah zaraščajoče ploskve. V zimskem obdobju pa je slika obrnjena, saj je na pašniku manjša vrednost toka CO₂ iz tal kot v gozdu in vrzeli. Pašnik ima v poletnem obdobju največji tok, najmanjši tok pa ima vrzel. V zimskem obdobju ima največji tok gozd, pašnik pa najmanjšega.

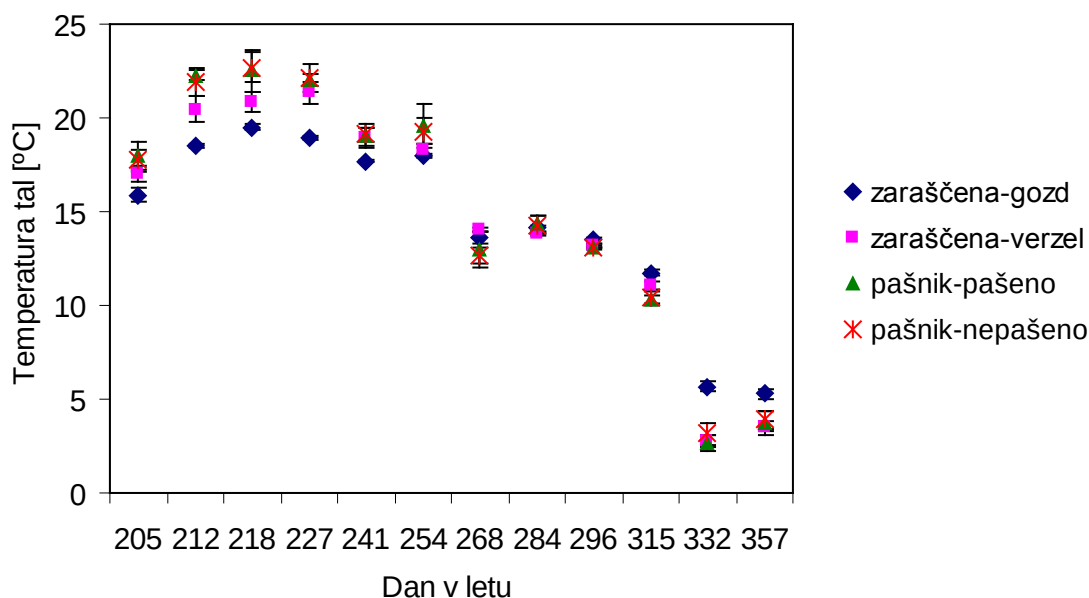


Slika 17: Tok CO₂ iz tal pašnika in zaraščajoče površine na Podgorskem krasu. Vrednosti toka so prikazane ločeno za ploskve gozd in vrzel (zaraščajoča površina) ter pašeni in nepašeni del (pašnik) za obdobje od julija do decembra 2008 in so povprečja meritev 7 merilnih mest.

4.2 TEMPERATURA TAL

V obdobju, v katerem smo opravljali meritve, se temperature tal gibajo od 2,6 °C do 22,7 °C. V poletnem obdobju temperatura tal narašča vse do meritve 5. avgusta (218 dan v letu), kjer doseže tudi največjo vrednost 22,7 °C. V naslednjih mesecih pa se meritve temperature tal znižujejo in 27. novembra (332 dan v letu) doseže temperatura tudi najmanjšo vrednost 2,6 °C.

V poletnem obdobju so bila tla toplejša na pašniku oz. v vrzelih ploskve v zaraščanju kar za nekaj stopinj nižjo temperaturo pa smo v istem obdobju izmerili v tleh gozdnih fragmentov. Za razliko od poletnega obdobja so bile temperature tal pozno jeseni na vseh ploskvah podobne.



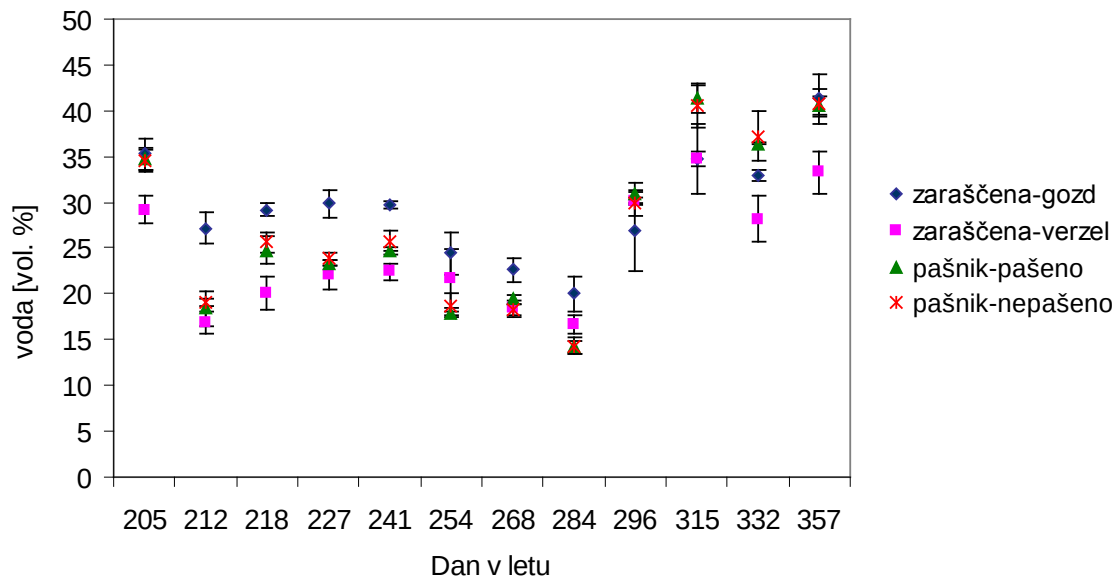
Slika 18: Temperature tal pašnika in zaraščajoče površine na Podgorskem krasu. Vrednosti temperatur so prikazane ločeno za ploskve gozd in vrzel (zaraščajoča površina) ter pašen in nepašen del (pašnik) za obdobje od julija do decembra 2008 in so povprečja meritev 7 merilnih mest.

4.3 VSEBNOST VODE V TLEH

Vsebnosti vode v tleh se tekom merjenega obdobja gibajo od 14,2 vol. % do 40,5 vol. %. V poletnem obdobju je izmerjena količina vode manjša in njena količina pada vse do 10. oktobra (284 dan v letu), kjer doseže najmanjšo izmerjeno vrednost 14,2 vol. %. V naslednjih mesecih pa vsebnost vode narašča in doseže največjo izmerjeno vrednost 40,5 vol. % 27. novembra (332 dan v letu).

Primerjava posameznih podploskev (gozd, vrzel, pašen in nepašen del) pokaže, da ima vrzelna površina zaraščajoče ploskve najmanj vode tako v poletnem kot zimskem

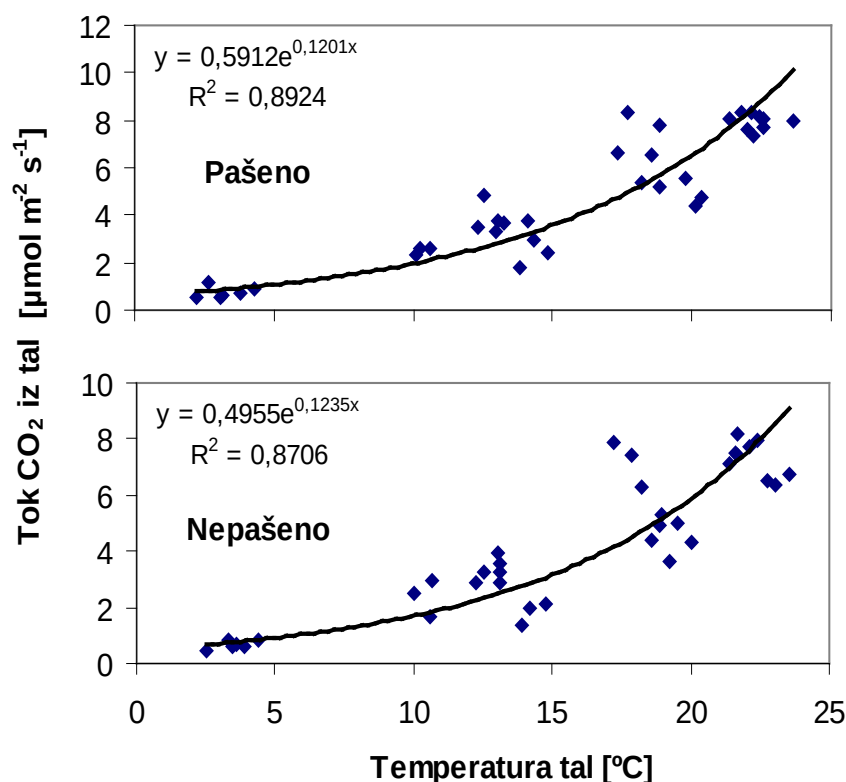
obdobju. Zaraščajoči gozd ima v poletnem obdobju največ vode, v zimskem obdobju pa ima največ vode pašnik.



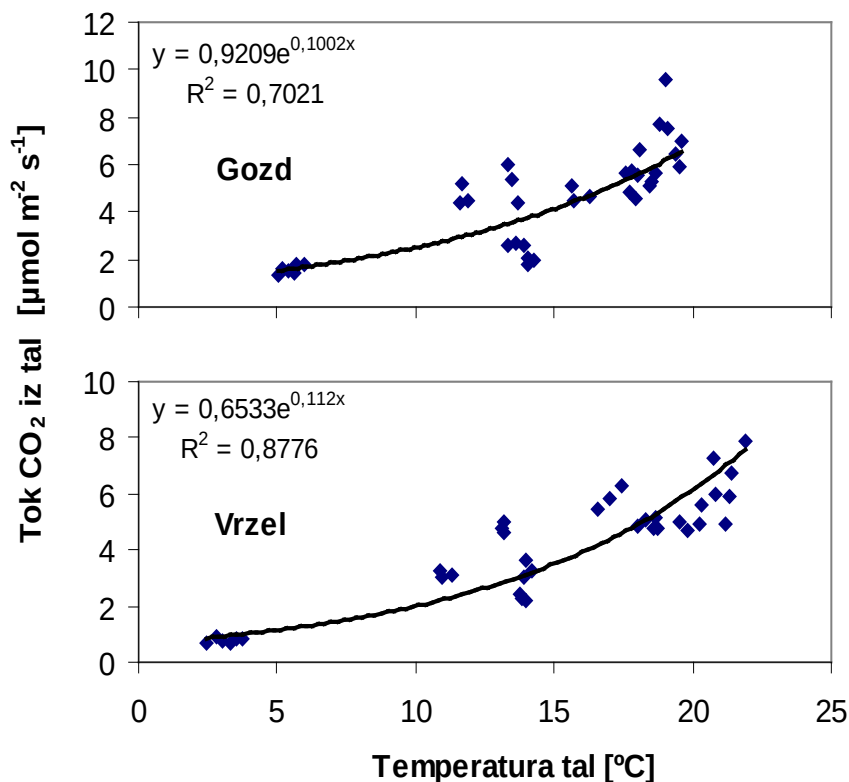
Slika 19: Vsebnost vode v tleh pašnika in zaraščajoče površine na Podgorskem krasu. Vrednosti vsebnosti vode v tleh so prikazane ločeno za ploskve gozd in vrzel (zaraščajoča površina) ter pašen in nepašen del (pašnik) za obdobje od julija do decembra 2008 in so povprečja meritev 7 merilnih mest.

4.4 DIHANJE TAL V ODVISNOSTI OD TEMPERATURE IN VODE V TLEH

Regresijska analiza pokaže statistično značilno ($p \leq 0,05$) odvisnost talnega toka CO₂ od temperature tal na posameznih območjih (pašnik-pašeno, pašnik-nepašeno, zaraščajoča ploskev-gozd, zaraščajoča ploskev-vrzel). Najbolj tesna in statistično značilna je bila povezava na pašnik-pašeno, ko variabilnost temperature tal razloži 89 % variabilnosti toka CO₂ iz tal (Slika 20). Najmanj tesna in statistično značilna je bila povezava zaraščajoča ploskev-gozd, ko variabilnost temperature tal razloži 70 % variabilnosti toka CO₂ iz tal (Slika 21).

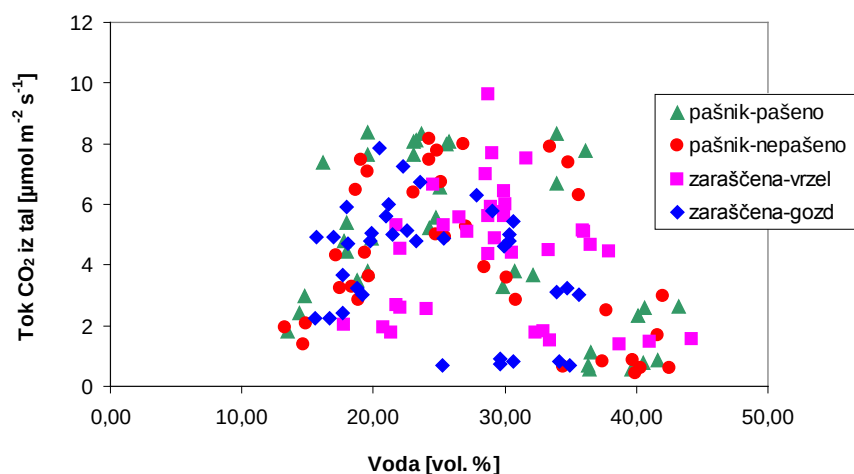


Slika 20: Talni tok CO₂ v odvisnosti od temperature tal (merjene na globini 5 cm) na območju pašnik - pašeno in pašnik - nepašeno.



Slika 21: Talni tok CO₂ v odvisnosti od temperature tal (merjene na globini 5 cm) na območju zaraščajoče ploskve - gozd in zaraščajoče ploskve - vrzel.

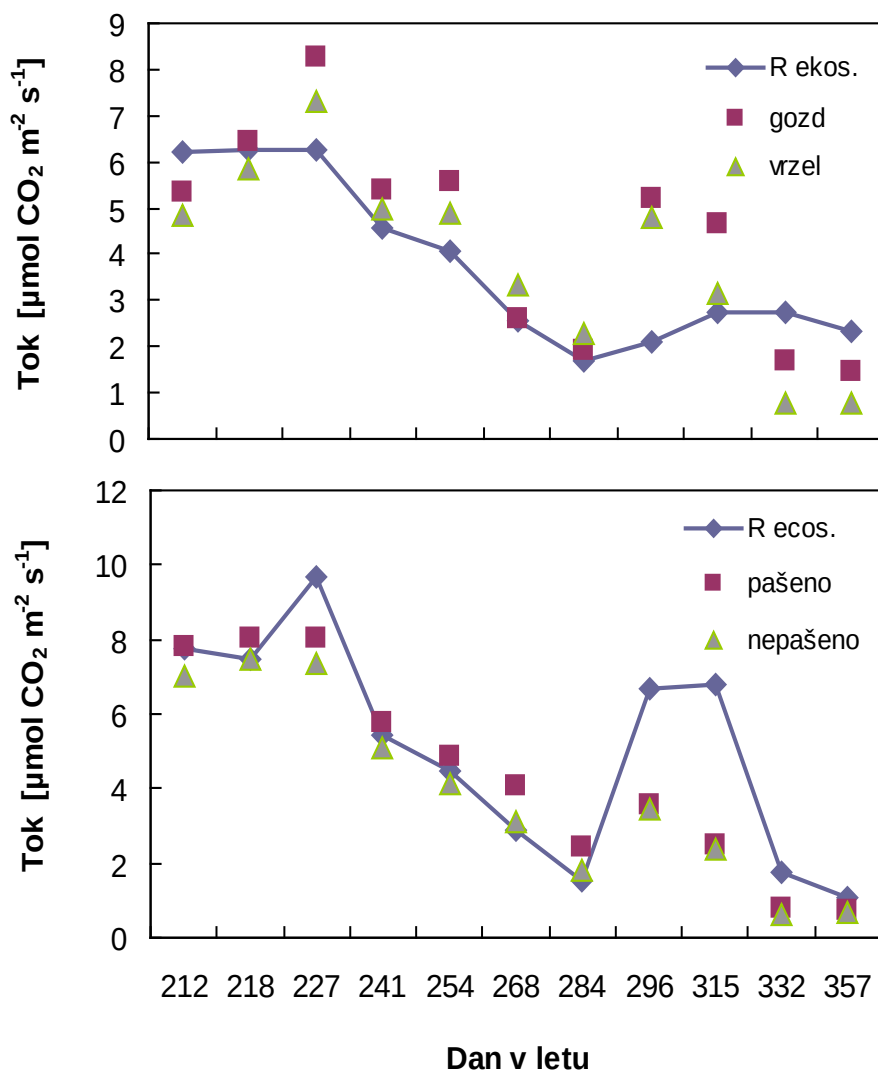
Pri primerjavi odvisnosti toka CO₂ od tal od vsebnosti vode v tleh, ne dobimo jasnega vzorca oz. je regresijska zveza statistično neznačilna. Z našimi podatki o vsebnosti vode v tleh smo lahko razložili le 14 % variabilnosti toka (slika 22).



Slika 22: Talni tok CO₂ v odvisnosti od vsebnosti vode v tleh (merjene na globini 5 cm) na območju pašnik – pašeno, pašnik – nepašeno, zaraščajoča ploskev – gozd, zaraščajoča ploskev – vrzel.

4.5 PRIMERJAVA DIHANJA TAL IN DIHANJA EKOSISTEMA

Vzporedno z našimi meritvami so potekale tudi stalne meritve padavin in neto izmenjave CO₂ z Eddy kovariantno metodo. Iz parametrov metode Eddy kovariance lahko modeliramo tudi dihanje ekosistema, katerega glavni del poleg dihanja tal predstavlja dihanje rastlinskega pokrova. Primerjava dihanja tal in dihanja ekosistema, podana na sliki 22, prikazuje precej veliko skladnost med njima.



Slika 23: Primerjava dihanja tal in dihanja ekosistema (R ekos.) na zaraščajoči ploskvi (zgoraj) in na pašniku (spodaj).

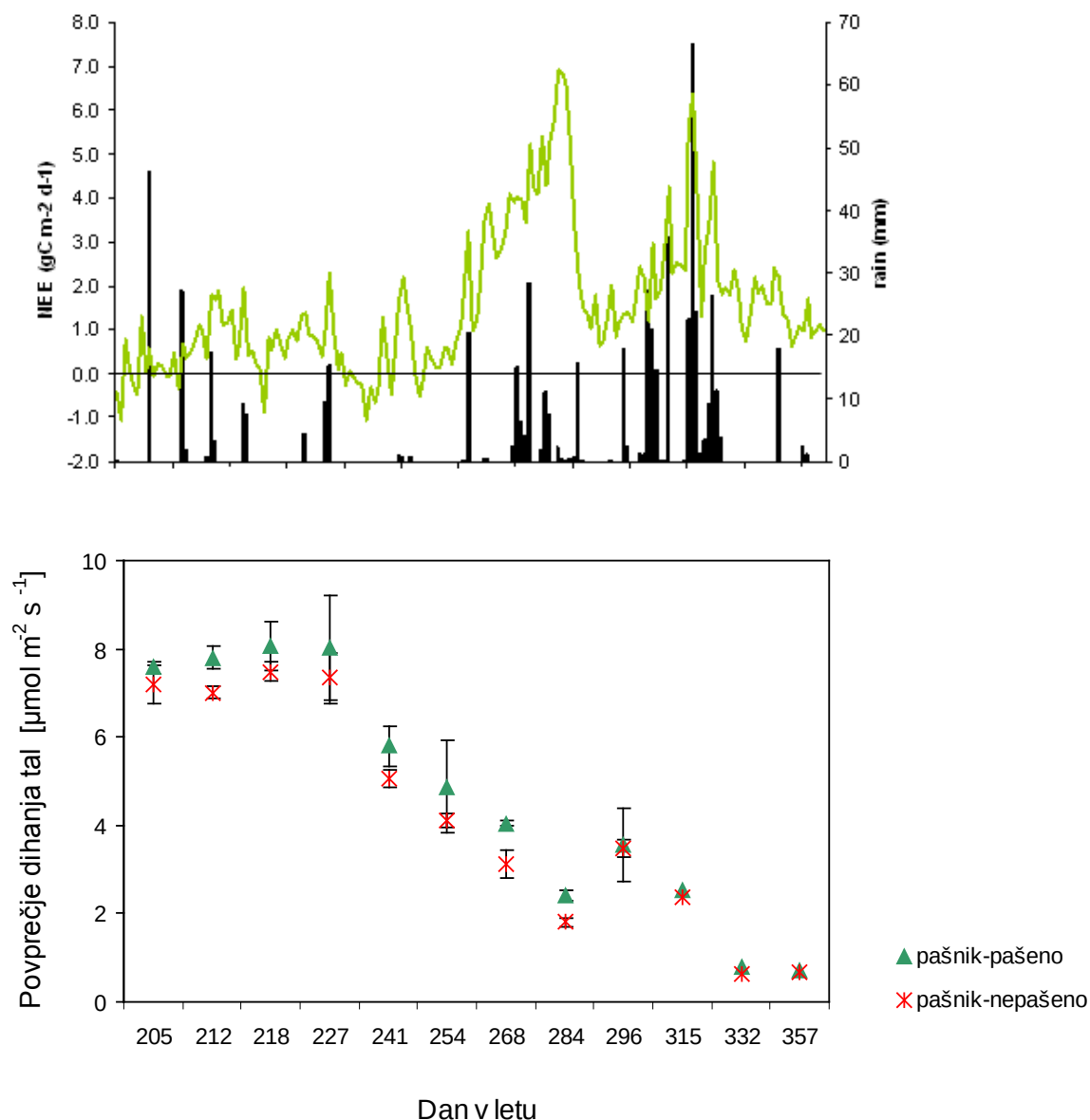
5 RAZPRAVA IN SKLEPI

5.1 RAZPRAVA

Poskus za diplomsko nalogo smo zasnovali glede na dejstvo, da za mnogo ekosistemov odgovora na globalne klimatske spremembe ne poznamo kakor tudi ne njihovega morebitnega pozitivnega in negativnega povratnega vpliva. Za zaraščajoče površine imamo v evropskem prostoru raziskave, ki obravnavajo to tematiko, narejene le za nekaj tipov travišč in gozdne vegetacije. V okviru diplomskega dela nas je zanimalo, kakšne so lastnosti dihanja tal v submediteranskem ekosistemu, na ekstenzivno rabljenih pašnikih in bližnjih zaraščajočih površinah Podgorskega krasa.

5.1.1 Tok CO₂ iz tal

Tok CO₂ iz tal se je na posameznih območjih (pašnik - pašeno, pašnik - nepašeno, zaraščajoča ploskev - gozd, zaraščajoča ploskev - vrzel) zelo razlikoval. Na območju pašnika smo izmerili vrednosti od 0,69 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ do 8,06 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (povprečja za posamezen merilni termin). Zanimiva je primerjava teh vrednosti s tokovi, ki jih za travišča navajajo drugi avtorji. Maestre in Cortina (2003) sta tok CO₂ merila na polsušnih mediteranskih tleh, kjer so vrednosti nihale med 0,17 in 0,31 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Ti rezultati se zelo ujemajo z vrednostmi tokov CO₂, ki naj bi veljale za globalno travinje (0,29 do 0,31 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) (Raich in Schlesinger, 1992). Maestre in Cortina (2003) navajata tudi primer polsušnega travinja v Northern Great Plains, kjer na leto zapade 388 mm padavin in naj bi bile vrednosti toka večje, in sicer od 0,9 do 1,13 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Večji tok CO₂ iz tal lahko izmerimo na travnikih zmerne pasu, kjer je razpoložljivost vode večja (Bahn in sod., 2008). Bahn in sod. (2008) so v Evropskem prostoru tako zabeležili vrednosti za maksimalno dihanje tal na travniku med 9,5 in 15,9 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, za pašnik pa se vrednosti gibljejo med 6,5 in 14,8 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. V podobnem območju so tudi vrednosti dihanja travniških tal gojenega travnika v Ščavniški dolini (Vodnik in sod., 2009). Tem vrednostim je podobno tudi dihanje tal, ki smo ga izmerili na naših poskusnih površinah, čeprav imamo opravka s submediteranskim ekosistemom, ki je po vodnem režimu polsušen. Vzrok za intenzivno dihanje tal preko celotne vegetacijske sezone gre iskati v relativno pogostem in rednem vnosu vode. Ta je razviden tudi iz Slike 20.



Slika 24: Zgornja slika prikazuje stalne meritve padavin in neto izmenjave CO₂ na stolpu, na spodnji sliki pa vidimo obdobja naših meritev, ki smo jih izvajali na pašniku.

Iz prikazane slike vidimo, da so padavine relativno dobro razporejene, razen izostanka v obdobju od konca avgusta do sredine septembra. Ta izostanek je najverjetneje vzrok, da se tla na naslednji vnos padavin odzovejo s povečanim dihanjem.

Velike količine padavin naj bi imele po navedbah drugih avtorjev negativen vpliv na tok CO₂ iz tal, ker se naenkrat zapolnijo vse pore in pride do zasičenosti tal, s tem pa naj bi se zmanjšala prevodnost za pline. V našem primeru tega ne opazimo, saj so tla zelo prepustna za vodo, prav tako meritve dihanja nismo opravljali neposredno po kakšnem večjem naliivu.

Podoben vpliv padavinskega režima na tok CO₂ so opazili tudi v poskusu izvedenem v Kanadi. Tam so meritve izvajali v letih 2001 in 2002 na mešanem travniku, kjer je dolgoletno povprečje padavin okoli 400 mm (Flanagan in Johnson, 2005). V letu 2001 je bila vsota padavin kar za polovico manjša od dolgoletnega povprečja, temu primerno so bili tudi tokovi CO₂ iz tal manjši in so znašali od 0,5 do 5 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. V letu 2002 pa so bile padavine bolj obilne od dolgoletnega povprečja in vrednosti tokov CO₂ so bile med 2 in 9 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Flanagan in Johnson, 2005).

Primerjava vsebnosti vode v zgornji plasti tal med posameznimi podploskvami (gozd, vrzel, pašeni, nepašeni del) pokaže, da je ta skozi celoten poskus najvišja na območju gozda, razen pozimi, 27. novembra in 22. decembra 2008. V tem obdobju je bila zaradi nizkih temperatur zmrznjena zgornja plast tal, zato je verjetno, da z FDR meritvami nismo točno ocenili količine vode v tleh.

Vzporedno z našimi meritvami so potekale tudi stalne meritve padavin in neto izmenjave CO₂ z Eddy kovariantno metodo. Pri tem na sliki opazimo, da od 14. avgusta 2008 in vse do 10. oktobra 2008 tok CO₂ iz tal pada, medtem ko neto izmenjava CO₂ narašča, t.j. ekosistem oddaja relativno veliko CO₂. Vzrok za večji tok CO₂ iz ekosistema v tem obdobju ni večje dihanje tal ampak respiracija nadzemne biomase in oslABLJena fotosintezna aktivnost ob koncu vegetacijske sezone.

Kot kažejo rezultati, se vrednosti toka CO₂ na območju vrzeli in gozda gibljejo med 0,77 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ in 8,26 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Največje vrednosti so bile pričakovane na območju gozda, torej na delih ekosistema, kjer naj bi povečanje nadzemne rastlinske biomase vodilo v povečanje zaloge ogljika v ekosistemu.

Sezonski vzorec toka CO₂ iz tal opazimo na vseh proučevanih ploskvah. V poletnih mesecih smo izmerili tudi do trikrat večje vrednosti toka CO₂ v tleh kot v spomladanskih oz. jesenskih mesecih. Povečan tok CO₂ v poletnih mesecih je najverjetneje posledica večje respiratorne aktivnosti talnih mikroorganizmov, korenin in razgradnje organskih snovi tal, zaradi ugodnejših temperatur in večje razpoložljivosti vode. Ta, sicer zelo spremenljiva dejavnika, sta odločilna za velikost toka respiratornega CO₂ (Tang in sod., 2005). Spomladi, ko so tla hladnejša, je tudi dihanje tal manjše, zato je tok CO₂ iz tal manjši. Poleti, ko so tla najtoplejša, je tok CO₂ v tleh največji. To potrjujejo tudi rezultati meritev, saj prikazujejo tesno eksponentno zvezo v odvisnosti toka CO₂ iz tal od temperature tal, kar se sklada s trditvami drugih avtorjev (Lloyd in Taylor, 1994). Pri naših meritvah opazimo, da je v poletnih mesecih temperatura na pašniku za nekaj stopinj višja od temperature na zaraščajoči ploskvi, kar ob zadostni količini vode omogoča opaženo večje tokove. Ko se začnejo tla spet ohlajati in se aktivnost rastlin začne umirjati, se dihanje tal zmanjša, zato je jeseni tudi tok CO₂ iz tal manjši. Izkaže se, da se v zaraščenih delih ploskve pozno jeseni ohranja nekaj večji tok CO₂ iz tal, kar gre pripisati dejstvu, da je bila temperatura tal v gozdnih fragmentih za 2,5 °C višja kot v vrzelih ali pa na pašniku.

Vsebnost vode v tleh na območju Podgorskega krasa v danih razmerah ne vpliva na tok CO₂, saj nismo uspeli pokazati značilne povezave med tokom CO₂ iz tal in vsebnostjo vode v tleh. Podobne ugotovitve navajata tudi Mielnik in Douglas (2000), ki hkrati opozarjata, da

je vpliv vsebnosti vode v tleh na CO₂ tok zanemarljiv takrat, ko so sezonske spremembe v vsebnosti vode majhne. Z našimi podatki o vsebnosti vode v tleh smo lahko razložili le 14 % variabilnosti toka.

V nekaterih tleh lahko k toku CO₂ iz tal pomembno prispevajo tudi karbonati. Ker se karbonati po izotopski sestavi ogljika (razmerje med ¹³C in ¹²C) razlikujejo od organske snovi, je moč z analizo ogljikovih izotopov v talnem zraku ovrednotiti vir CO₂, ki prispeva k njegovemu toku iz tal. Tovrstne meritve, ki so potekale vzporedno z našim diplomskim delom, nakazujejo, da posebej v času izven vegetacijske sezone preperevanje karbonatov pomembno prispeva k toku CO₂ iz tal, medtem ko je v poletnem času prispevek razgradnje organske snovi po deležu pomembnejši.

Pri merjenju toka CO₂ v predelu Podgorskega krasa je bilo na določenih lokacijah oz. ovratnikih moč opaziti veliko nihanje med posameznimi mesečnimi meritvami. Največjo variabilnost lahko opazimo na lokaciji gozda in vrzeli, predvsem na mestih z največjimi koncentracijami talnega CO₂. Vzroke za spremenljivost toka CO₂ iz tal gre najverjetneje pripisati heterogenosti tal. Na mestih, kjer so tla zelo plitva, se spremembe v temperaturi in vsebnosti vode močno odrazijo tudi v toku CO₂ iz tal. Na mestih, kjer so tla globlja, so nihanja praviloma manjša.

Neto izmenjava toka CO₂ (NEE) odraža izmenjavo CO₂ med ekosistemom in atmosfero in pri tem poleg dihanja tal vključuje še fotosintezo in dihanje rastlin. Primerjava dihanja tal in dihanja ekosistema, ki je podana na sliki 22, pokaže precej veliko skladnost med obema. To pomeni, da dihanje tal predstavlja zelo pomemben del skupnega dihanja ekosistema. Hkrati je iz primerjave razvidno, da smo z zasnovano meritvijo dihanja tal (število in raporeditev merilnih mest) učinkovito ovrednotili tok CO₂ iz tal na naši poskusni ploskvi (Chapin in sod., 2002).

5.2 SKLEPI

Na podlagi rezultatov, ki smo jih dobili v tej raziskavi, smo prišli do naslednjih sklepov:

- tok CO₂ iz tal se na različnih podploskvah (pašnik - pašeno, pašnik - nepašeno, zaraščajoča ploskev - gozd, zaraščajoča ploskev - vrzel) razlikuje.
- v poletnih mesecih 2008 je imel pašnik višji tok CO₂ iz tal kot zaraščajoča ploskev. V zimskih mesecih je to obratno. Za velik poletni tok CO₂ iz pašnika je ključno, da v letu 2008 ni bilo izrazite suše.
- sezonski potek toka CO₂ iz tal kaže vzorec, ki je najverjetneje pogojen s temperaturo in vlago v tleh.
- temperaturo lahko učinkovito opišemo z eksponentno zvezo s tokom CO₂ iz tal.
- temperatura je v poletnih mesecih višja na pašniku, v pozno jesenskem času ima zaraščajoča ploskev - gozd višjo temperaturo, kar omogoča večjo respiratorno aktivnost tal.

Hipoteze, da je dihanje tal sezonsko spremenljivo in odvisno predvsem od temperature tal in vsebnosti vode v tleh, smo potrdili. Prav tako smo potrdili hipotezo, da ima tok CO₂ iz tal največje vrednosti v začetku poletja, najmanjše vrednosti pa doseže pozimi. Razlike v dihanju tal med pašnikom in zaraščajočo površino so opazne predvsem v poletnih in jesenskih mesecih zaradi razlik v temperaturi in vlažnostnih razmerah.

6 POVZETEK

V večini biotopov pomemben člen ogljikovega cikla predstavlja tok tega plina iz tal v atmosfero, pri čemer je glavni vir CO₂ avtotrofno in heterotrofno dihanje tal. Dinamika toka CO₂ iz tal je pomembna za neto izmenjavo ogljika med ekosistemom in atmosfero, določajo pa jo biotski in abiotski dejavniki okolja.

V diplomski nalogi nas je zanimalo, kakšne so lastnosti toka CO₂ iz tal na rastiščih v različnih sukcesijskih stadijih (pašnik, opuščen pašnik, gozd, vrzel). Predpostavili smo, da je dihanje tal sezonsko spremenljivo in odvisno predvsem od temperature tal in vsebnosti vode v tleh. Predpostavili pa smo tudi, da ima tok CO₂ iz tal največje vrednosti v začetku poletja, najmanjše vrednosti pa doseže v zimskem času.

Poskus smo zastavili na predelu Podgorskega krasa, kjer smo na različnih lokacijah sočasno merili tok CO₂ iz tal in vsebnost vode v tleh. Meritve so potekale med vegetacijsko sezono od junija 2008 do januarja 2009. Meritve toka talnega CO₂ smo izvajali z uporabo LI-6400-09 prenosnega sistema za merjenje fotosinteze, opremljenega s komoro za meritve toka CO₂ iz tal. Hkrati z meritvami toka CO₂ smo merili tudi temperaturo tal s sondo (Omega Engineering Inc., Stamford, ZDA), ki je priključena na Li-Cor 6400. Meritve volumetrične vsebnosti vode v tleh so potekale na osnovi FDR metode.

Ugotovili smo, da se je tok na posameznih območjih (pašnik - pašeno, pašnik - nepašeno, zaraščajoča ploskev - gozd, zaraščajoča ploskev - vrzel) zelo razlikoval. Povprečen tok CO₂ iz tal se je za navedeno obdobje gibal od 0,6 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ do 8,3 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (povprečja za posamezen merilni termin). Rezultati raziskave kažejo tudi sezonski potek toka CO₂ iz tal. V poletnih mesecih smo izmerili celo do trikrat večje vrednosti toka CO₂ v tleh kot v spomladanskih oz. jesenskih mesecih. Povečan tok CO₂ v poletnih mesecih je najverjetneje posledica večje respiratorne aktivnosti talnih mikroorganizmov, korenin in razgradnja organskih snovi tal zaradi ugodnejših temperatur in večje razpoložljivosti vode. Spomladi, ko so tla hladnejša, je tudi dihanje tal manjše, zato je tok CO₂ iz tal manjši. Poleti, ko so tla najtoplejša, je tok CO₂ v tleh največji. V nekaterih tleh lahko k toku CO₂ iz tal v zimskem času pomembno prispevajo tudi karbonati, medtem ko je v poletnem času prispevek razgradnje organske snovi po deležu pomembnejši. Vzporedno z našimi meritvami so potekale tudi stalne meritve padavin in neto izmenjave CO₂ z metodo Eddy kovariance. S tem smo ugotovili, da dihanje tal predstavlja zelo pomemben del skupnega dihanja ekosistema.

Hipoteze, da je dihanje tal sezonsko spremenljivo in odvisno predvsem od temperature tal in vsebnosti vode v tleh, smo potrdili. Prav tako smo potrdili hipotezo, da ima tok CO₂ iz tal največje vrednosti v začetku poletja, najmanjše vrednosti pa doseže pozimi. Razlike v dihanju tal med pašnikom in zaraščajočo površino so opazne predvsem v poletnih in jesenskih mesecih zaradi razlik v temperaturi in vlažnostnih razmerah.

7 VIRI

- Bahn M., Rodeghiero M., Anderson-Dunn M., Dore S., Gimeno C., Drösler M., Williams M., Ammann C., Berninger F., Flechard C., Jones S., Balzarolo M., Kumar S., Newesely C., Priwitzer T., Raschi A., Siegwolf R., Susiluoto S., Tenhunen J., Wohlfahrt G., Cernusca A. 2008. Soil Respiration in European Grasslands in Relation to Climate and Assimilate Supply. *Ecosystems*, 11: 1352-1367
- Ball B.C., Scott A., Parker J.P. 1999. Field N₂O, CO₂ and CH₄ fluxes in relation to tillage, compaction and soil quality in Scotland. *Soil & Tillage Research*, 53: 29-39
- Brady N.C., Weil R.R. 2002. The nature and properties of soil. 13th edition. Upper Sadle River, Prentice Hall: 960 str.
- Bremer D.J., Ham J.M., Owensby C.E., Knapp A.K. 1998. Responses of soil respiration to clipping and grazing in a tallgrass prairie. *Jurnal of Environmental Quality*, 27: 1539-48
- Cao G., Tang Y., Mo W., Mo W., Wang Y., Li Y., Zhao X. 2004. Grazing intensity alters soil respiration in an alpine meadow on the Tibetan plateau. *Soil Biology & Biochemistry*, 36: 237-43
- Chapin F.S., Matson P.A., Mooney H.A. 2002. Principles of terrestrial ecosystem ecology. New York, Springer: 436 str.
- Chen X.C., Hutley L.B., Eamus D. 2003 Carbon balance of a tropical savanna of northern Australia. *Oecologia*, 137: 405-416
- Conant R.T., Paustian K., Elliott E.T. 2001. Grassland management and conversion into grassland: effects on soil carbon. *Ecological Applications*, 11, 2: 343-355
- Dilustro J.J., Collins B., Duncan L., Crawford C. 2004. Moisture and soil texture effects on soil CO₂ efflux components in southeastern mixed pine forest. *Forest Ecology and Management*, 204: 85-95
- Dornbush M.E., Raich J.W. 2006. Soil temperature, not aboveground plant productivity, best predicts intra-annual variations of soil respiration in Central Iowa grasslands. *Ecosystems*, 9: 909-20
- Dugas W.A., Heuer M.L., Mayeux H.S. 1999. Carbon dioxide fluxes over bermudagrass, native prairie, and sorghum. *Agricultural and Forest Meteorology*, 93 (2): 121-139

- Eler K. 2007. Dinamika vegetacije travnišč v slovenskem submediteranu: vzorci in procesi ob spremembah rabe tal. Doktorska disertacija. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo: 169 str.
- Etiopie G. 1997. Migration in the ground of CO₂ and other volatile contaminants. Theory and survey. V: Plant responses to elevated CO₂. Evidence from natural CO₂ springs. Raschi A., Miglietta F., Tognetti R., van Gardingen P.R. (ed.). Cambridge, Cambridge University Press: 7-20
- Fang C., Moncrieff J.B., Gholz H.L., Clark K.L. 1998. Soil CO₂ efflux and its spatial variation in a Florida slash pine plantation. *Plant and Soil*, 205: 135-146
- Flanagan L.B., Johnson B.G. 2005. Interacting effects of temperature, soil moisture and plant biomass production on ecosystem respiration in a northern temperate grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 130 (3 - 4): 237-253
- Franzluebbers A.J., Wright S.F., Stuedemann J.A. 2000. Soil aggregation and glomalin under pastures in the Southern Piedmont USA. *Soil Science Society of America Journal*, 64: 1018-1026
- Global Carbon Cycle Diagram. 2007. The GLOBE Program.
<http://www.globe.gov/fsl/html/templ.cgi?carboncycleDia&lang=es&nav=1> (januar, 2009)
- Hibbard K.A., Law B.E., Reichstein M., Sulzman J. 2005. An analysis of soil respiration across northern hemisphere temperate ecosystems. *Biogeochemistry*, 73: 29-70
- Hillel D. 1998. Environmental soil physics. San Diego, Academic Press: 771 str.
- Howard D.M., Howard P.J.A. 1993. Relationship between CO₂ evolution, moisture content and temperature for a range of soil types. *Soil Biology and Biochemistry*, 25: 1537-1546
- Huang M., Ji J. J., Li K. R., Liu Y. F., Yang F. T., Tao B. 2007. The ecosystem carbon accumulation after conversion of grasslands to pine plantations in subtropical red soil of south China. *Tellus Series B – Chemical and Physical Meteorology*, 59: 439-448
- Janssens I.A., Lankreijer H., Matteucci G., Kowalski A.S., Buchmann N., Epron D., Pilegaard K., Kutsch W., Longdoz B., Grünwald T., Montagnani L., Dore S., Rebmann C., Moors E.J., Grelle A., Rannik Ü., Morgenstern K., Oltchev S., Clement R., Gudmundsson J., Minerbi S., Berbigier P., Ibrom A., Moncrieff J., Aubinet M., Bernhofer C., Jensen N.O., Vesala T., Granier A., Schulze E.D., Lindroth A., Dolman A.J., Jarvis P.G., Ceulemans R., Valentini R. 2001. Productivity overshadows temperature in determining soil and ecosystem respiration across European forest. *Global Change Biology*, 7: 269-78

- Jassal R.S., Black A., Novak M., Morgenstern K., Nesic Z., Gaumont-Guay D. 2005. Relationship between soil CO₂ concentration and forest – floor CO₂ effluxes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 130: 176-192
- Jassal R.S., Black T.A., Drewitt G.B., Novak M.D., Gaumont-Guay D., Nesic Z. 2004. A model of the production and transport of CO₂ in soil: predicting soil CO₂ concentrations and CO₂ efflux from a forest floor. *Agricultural and Forest Meteorology*, 124: 219-236
- Kaligarič M. 1997. Rastlinstvo primorskega Krasa in slovenske Istre: travniki in pašniki. Koper, Zgodovinsko društvo za južno Primorsko: 111 str.
- Kaligarič M., Culiberg M., Kramberger B. 2006. Recent vegetation history of the North Adriatic grasslands: expansion and decay of an anthropogenic habitat. *Folia Geobotanica*, 41: 241-258
- Kuzyakov Y. 2006. Sources of CO₂ efflux from soil and review of partitioning methods. *Soil Biology & Biochemistry*, 38: 425-448
- Lima A.M.N., Silva I.R., Neves J.C.L., Novais R.F., Barros N.F., Mendonca E.S., Smyth T.J., Moreira M.S., Leite F.P. 2006. Soil carbon dynamics following afforestation of degraded pastures with *Eucalyptus* in south-eastern Brazil. *Forest Ecology. Manage*, 235: 219-231
- Lloyd J., Taylor J.A. 1994. On the temperature dependence of soil respiration. *Funct Ecology*, 8: 315-23
- Maestre F.T., Cortina J. 2003. Small-scale spatial variation in soil CO₂ efflux in a Mediterranean semiarid steppe. *Applied Soil Ecology*, 23: 199-209
- Mallik A.U., Hu D. 1997. Soil respiration following site preparation treatments in Boreal mixedwood forest. *Forest Ecol. Manage*, 97: 265-275
- Mielnick P.C., Dugas W.A. 2000. Soil CO₂ flux in a tallgrass prairie. *Soil Biology & Biochemistry*, 32: 221-228
- Mosier A.R., Morgan J.A., King J.Y., LeCain D., Milchunas D.G. 2002. Soil-atmosphere exchange of CH₄, CO₂, NO_x and N₂O in the Colorado shortgrass steppe under elevated CO₂. *Plant and Soil*, 240, 2: 201-211
- Niu X., Duiker S.W. 2006. Carbon sequestration potential by afforestation of marginal agricultural land in the Midwestern U.S. *Forest Ecology and Management*, 223: 415-427
- Nouvellon Y., Epron D., Kinana A., Hamel O., Mabilia A., D'Annunzio R., Deleporte P., Saint-André L., Marsden C., Roupsard O., Bouillet J.P., Laclau J.P. 2007. Soil CO₂ effluxes, soil carbon balance, and early tree growth following savannah afforestation

in Congo: Comparison of two site preparation treatments. *Forest Ecology and Management*, 255: 1926-1936

- Ogorevc B. 2008. Vpliv vode v tleh na tok geogenega CO₂ iz tal v atmosfero. Diplomsko delo. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo: 39 str.
- Paul K.I., Polglase P.J., Richard G.P. 2003. Predicted change in soil carbon following afforestation or reforestation, and analysis of controlling factors by linking a C accounting model (CAMFor) to models of forest growth (3PG), litter decomposition (GENDEC) and soil C turnover (RothC). *Forest Ecology. Manage*, 177: 485-501
- Raich J.W., Schlesinger W.H. 1992. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus*, 44B: 81-99
- Raich J.W., Tufekcioglu A. 2000. Vegetation and soil respiration: correlations and controls. *Biogeochemistry*, 48: 71-90
- Reeder J.D., Schuman G.E. 2002. Influence of livestock grazing on C sequestration in semi-arid mixed-grass and short-grass rangelands. *Environmental Pollution*, 116: 457-463
- Reichstein M., Rey A., Freibauer A., Tenhungen J., Valentini R., Banza J., Casals P., Cheng Y., Grünzweig J.M., Irvine J., Joffre R., Law B.E., Loustau D., Miglietta F., Oechel W., Ourcival J.M., Pereira J.S., Peressotti A., Ponti F., Qi Y., Rambal S., Rayment M., Romanya J., Rossi F., Tedeschi V., Tirone G., Xu M., Yakir D. 2003. Modeling temporal and large-scale spatial variability of soil respiration from soil water availability, temperature and vegetation productivity indices. *Global Biogeochem Cycles*, 17(4): 1104
- Repolusk P. 1998. Podgorski kras, Čičarija in Podgrajsko podolje. V: Slovenija – pokrajina in ljudje. Perko D., Orožen Adamič M. (ur.). Ljubljana, Mladinska knjiga: 258-267
- Schlesinger W.H. 1986. Changes in soil carbon storage and associated properties with disturbance and recovery. V: *The Changing Carbon Cycle: a Global Analysis*. Trabalka J.R., Reichle D.E. (eds.). New York, Springer: 194-220
- Schnitzer M. 1991. Soil organic matter the next 75 years. *Soil Science*, 151: 41-58
- Schuman G.E., Reeder J.D., Manley J.T., Hart R.H., Manley W.A. 1999. Impact of grazing management on the carbon and nitrogen balance of a mixed-grass rangeland. *Ecological Applications*, 9, 1: 65-71
- Smith P. 2004. Carbon sequestration in croplands: the potential in Europe and the global context. *European Journal of Agronomy*, 20: 229-236
- SM200 Soil Moisture Sensor User Manual. 2006.
<http://www.delta-t.co.uk/plant-soil-sciences.html> (december, 2008)

- Soil CO₂ Flux Chamber. 2003.
(<http://www.licor.com>) (december, 2008)
- Tang J., Baldocchi D., Xu L. 2005. Tree photosynthesis modulates soil respiration on a diurnal time scale. *Global Change Biology*, 11: 1298-304
- Thuille A., Buchmann N., Schulze E.D. 2002. Carbon stocks and soil respiration rates during deforestation, grassland use and subsequent Norway spruce afforestation in the Southern Alps, Italy. *Tree Physiology*, 20: 849-857
- Turner J., Lambert M. 2000. Change in organic carbon in forest plantation soils in eastern Australia. *Forest Ecology. Manage*, 133: 231-247
- Vidrih M. 2006. Vezava ogljika v pašeni ruši visokega krasa. Doktorska disertacija. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo: 102 str.
- Vodnik D. 2009. "Slikovno gradivo." Ljubljana, Biotehniška fakulteta (osebni vir, jan 2009)
- Vodnik D., Videmšek V., Pintar M., Maček I., Pfanz H. 2009. The characteristics of soil CO₂ fluxes at a site with natural CO₂ enrichment. *Geoderma*, 150: 32-37
- Wan S., Luo Y. 2003. Substrate regulation of soil respiration in a tallgrass prairie: results of a clipping and shading experiment. *Global Biogeochem Cycles*, 17: 1-12
- Xu M., Qi Y. 2001. Soil-surface CO₂ efflux and its spatial and temporal variations in young ponderosa pine plantation in northern California. *Global Change Biology*, 7: 667-677

ZAHVALA

Najprej se želim zahvaliti mentorju prof. dr. Dominiku Vodniku za vso strokovno pomoč ter spodbude, ideje in številne koristne nasvete pri delu.

Zahvalila bi se tudi Urški Videmšek in Klemnu Elerju za pomoč pri oblikovanju diplomske naloge.

Največjo zahvalo namenjam mojima staršema, ter babici in dedku, ki so mi vedno stali ob strani, mi omogočili študij in me spodbujali na vseh področjih.

Zahvaljujem se tudi vsem prijateljem, ki so večno poslušali, da nimam časa in me v času študija polnili s pozitivno energijo, smehom in dobrem razpoloženjem.

Hvala vsem!

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA AGRONOMIJO

Anja MARINIČ

**SPROŠČANJE CO₂ IZ TAL ZARAŠČAJOČIH
KRAŠKIH PAŠNIKOV**

DIPLOMSKO DELO

Univerzitetni študij

Ljubljana, 2009

