

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA AGRONOMIJO

Boštjan OGOREVC

**VPLIV VODE V TLEH NA TOK GEOGENEGA CO₂
IZ TAL V ATMOSFERO**

DIPLOMSKO DELO

Univerzitetni študij

Ljubljana, 2008

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA AGRONOMIJO

Boštjan OGOREVC

**VPLIV VODE V TLEH NA TOK GEOGENEGA CO₂
IZ TAL V ATMOSFERO**

DIPLOMSKO DELO
Univerzitetni študij

**THE EFFECTS OF SOIL WATER ON THE FLUX OF GEOGENIC CO₂
FROM THE SOIL TO THE ATMOSPHERE**

GRADUATION THESIS
University Studies

Ljubljana 2008

Diplomsko delo je zaključek Univerzitetnega študija agronomije. Opravljeno je bilo na poskusnem polju v Stavešincih in na Katedri za aplikativno botaniko, ekologijo in fiziologijo rastlin Oddelka za agronomijo Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani. Naloga se vsebinsko in z delom podatkov veže na doktorsko delo Urške Videmšek »*Tok geogenega CO₂ iz tal ter mikrobna aktivnost in struktura mikrobne združbe v travniških tleh na območju mofete Stavešinci*« (mentor prof. dr. Dominik Vodnik).

Študijska komisija Oddelka za agronomijo je za mentorja diplomske naloge imenovala prof. dr. Dominika VODNIKA in za somentorico prof. dr. Marino PINTAR.

Komisija za oceno in zagovor:

- Predsednik: red. 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: izr. prof. dr. Marina PINTAR
Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo
- Član: red. prof. dr. Lučka KAJFEŽ-BOGATAJ
Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo

Datum zagovora: 9. december 2008

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

Boštjan Ogorevc

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD Dn
DK UDK 631.432:631.433.53(043.2)
KG voda v tleh/tok CO₂ v tleh/naravni izviri CO₂/kroženje ogljika
KK AGRIS P33
AV OGOREVC, Boštjan
SA VODNIK, Dominik (mentor), PINTAR Marina (somentor)
KZ SI – 1000 Ljubljana, Jamnikarjeva 101
ZA Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo
LI 2008
IN VPLIV VODE V TLEH NA TOK GEOGENEGA CO₂ IZ TAL V ATMOSFERO
TD Diplomsko delo (univerzitetni študij)
OP VIII, 39, [1] str., 16 sl., 47 vir.
IJ sl
JI sl / en
AI Na travniški mofeti ob Stavešincih smo na različnih lokacijah sočasno merili tok CO₂ iz tal in vsebnost vode v tleh. Meritve so potekale med vegetacijsko sezono od junija do novembra leta 2005 in od aprila do novembra leta 2006 na območjih, ki so različno bogata z geogenim CO₂ (majhna, srednja in velika). Meritve toka talnega CO₂ smo izvajali z prenosnim sistemom za merjenje fotosinteze LI-6400-09, opremljenega s komoro za meritve toka CO₂ iz tal. Meritve volumetrične vsebnosti vode v tleh pa so potekale z napravo Diviner 2000, ki deluje na principu FD (Frequency Domain) metode. Povprečje dnevnega toka CO₂ za obe leti se je gibalo med 4,6 in 27,9 μmol m⁻² s⁻¹ na območju majhne, med 6,1 in 92,4 μmol m⁻² s⁻¹ na območju srednje in med 68 in 268,2 μmol m⁻² s⁻¹ na območju velike obogatitve z geogenim CO₂. V tleh s povečano vsebnostjo CO₂ dihanje tal ni glavni vir CO₂, ampak je tok CO₂ v glavnem odvisen od geogenega CO₂. Jasen sezonski vzorec toka CO₂ se je pokazal le za tla, kjer njegov glavni vir ni geogeni CO₂, temveč dihanje tal. Opaženi vzorec je najverjetneje pogojen s temperaturo tal in vlago v tleh. Sezonskega vzorca sproščanja CO₂ iz tal na lokacijah, kjer je prisoten geogeni CO₂, ni opaziti. Vpliva vsebnosti vode v tleh za lokacije z različno prisotnostjo geogenega CO₂ na tok CO₂ iz tal nismo mogli potrditi za nobeno od območij, ki so različno izpostavljena geogenemu CO₂ (majhna, srednja in velika obogatitev). Opazili pa smo, da obogatitev tal s CO₂ posredno vpliva na vsebnost vode v tleh. Zaradi negativnih učinkov velikih koncentracij CO₂ na vegetacijo, je v tleh z veliko CO₂, transpiracijsko oddajanje vode omejeno. Vrhne plasti tal pa zato vsebujejo več vode.

KEY WORDS DOCUMENTATION

DN Dn
DC UDC 631.432:631.433.53(043.2)
CX soil water/CO₂ flux/natural CO₂ springs/carbon cycling
CC AGRIS P33
AU OGOREVC, Boštjan
AA VODNIK, Dominik (supervisor), PINTAR Marina (co-supervisor)
PP SI – 1000 Ljubljana, Jamnikarjeva 101
PB University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Agronomy
PY 2008
TI THE EFFECTS OF SOIL WATER ON THE FLUX OF GEOGENIC CO₂ FROM THE SOIL TO THE ATMOSPHERE
DT Graduation thesis (University studies)
NO VIII, 39, [1] p., 16 fig., 47 ref.
LA sl
AL sl / en
AB Soil CO₂ degassing was studied at mofette Stavešinci by small-scale measurements of fluxes and soil water. Measurements were performed in 2005 and 2006, at the sites that differ in the rate of soil CO₂ enrichment (low-, medium- and high-CO₂) and were made by using soil respiration chamber LI-6400-09 (CO₂ fluxes) and by FD method – Diviner 2000 (soil water). Throughout the two seasons the daily average CO₂ efflux rates varied from 4,6 to 27,9 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹ in the low-CO₂, 6,1 – 92,4 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹ in medium CO₂ and from 68 to 268,2 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹ in high CO₂. At the later sites biogenesis of CO₂ is known to be suppressed and geogenic CO₂ flux exceeds the respiratory one for several orders of magnitude. Seasonal patterns and diurnal patterns of CO₂ degassing could be observed only in low-CO₂ measuring sites which can be related to temperature-promoted biogenesis of CO₂. No clear seasonal trend could be observed in locations where the geogenic CO₂ dominated the efflux. The effect of soil moisture on CO₂ fluxes was negligible for both, soils enriched with geogenic CO₂ and, for control, low-CO₂ soils. An indirect effect of CO₂ enrichment on soil water content was observed. On the sites where elevated CO₂ concentrations limited plant growth the moisture of the upper soil layers remained high also at the time of the year when a high transpirational water loss was induced from the soils with normally developed vegetation.

KAZALO VSEBINE

	Ključna dokumentacijska informacija	str. III
	Key words documentation	IV
	Kazalo vsebine	V
	Kazalo slik	VII
	Okrajšave in simboli	VIII
1	UVOD	1
1.1	POVOD	1
1.2	NAMEN IN HIPOTEZE	2
2	PREGLED OBJAV	3
2.1	TLA KOT TROFAZNI ŠISTEM IN LASTNOSTI TAL, KI SO POMEMBNE ZA ZRAČNO-VODNO RAZMERJE	3
2.1.1	Tekstura	3
2.1.2	Struktura	3
2.1.3	Organska snov	4
2.1.4	Poroznost	4
2.2	VODA V TLEH	5
2.2.1	Matrični potencial vode v tleh	6
2.2.2	Vodno-retenzijska krivulja	7
2.3	ZRAK V TLEH	8
2.3.1	Dihanje tal	8
2.3.2	Naravni izviri CO ₂	10
3	MATERIAL IN METODE	12
3.1	OPREDELITEV OBMOČJA RAZISKAVE	12
3.2	METODE DELA	13
3.2.1	Zasnova poskusa	13
3.2.2	Merjenje toka talnega CO ₂ , temperature tal in vsebnosti vode v tleh	14
4	REZULTATI	17
4.1	PADAVINE IN VSEBNOST VODE V TLEH	17
4.2	SEZONSKI POTEK TOKA CO ₂ IZ TAL	25
4.3	VPLIV VSEBNOSTI VODE V TLEH NA TOK TALNEGA CO ₂	27
5	RAZPRAVA IN SKLEPI	29
5.1	RAZPRAVA	29
5.1.1	Tok CO ₂ iz tal	29
5.1.2	Vpliv vsebnosti vode v tleh na tok CO ₂ iz tal	30
5.2	SKLEPI	33
6	POVZETEK	34
7	VIRI	36
	ZAHVALA	

KAZALO SLIK

	str.
Slika 1: Povezava med količino vode in tenzijo le te v različnih tleh	7
Slika 2: Pet glavnih virov CO ₂ iz tal, glede na hitrost sproščanja v atmosfero in na zadrževalni čas ogljika v tleh	9
Slika 3: Vrelci CO ₂ v dolini reke Ščavnice in okolici Radencev	13
Slika 4: Fotografija poskusnega polja v Stavešincih. Na fotografiji so označena mesta, kjer smo merili tok CO ₂ iz tal in vsebnost vlage v tleh	14
Slika 5: Merilna naprava LI-6400-09 ter potek meritev s štirimi merilni cikli	15
Slika 6: Merilna sonda Diviner 2000 z data loggerjem ter potek meritev z Diviner 2000 sondo v merilni cevi nameščeni v tleh	16
Slika 7: Dnevne količine padavin za leto 2005 na pluviografski postaji Kadrenci	17
Slika 8: Dnevne količine padavin za leto 2006 na pluviografski postaji Kadrenci	18
Slika 9: Vsebnost vode v tleh na poskusnem polju Stavešinci za globino 0 – 10 cm za leto 2005 na območjih, ki so različno obogatena z geogenim CO ₂	19
Slika 10: Vsebnost vode v tleh na poskusnem polju Stavešinci za globino 10 – 20 cm za leto 2005 na območjih, ki so različno obogatena z geogenim CO ₂	20
Slika 11: Vsebnost vode v tleh na poskusnem polju Stavešinci za globino 20 – 30 cm za leto 2005 na območjih, ki so različno obogatena z geogenim CO ₂	21
Slika 12: Vsebnost vode v tleh na poskusnem polju Stavešinci za globino 0 – 10 cm za leto 2006 na območjih, ki so različno obogatena z geogenim CO ₂	22
Slika 13: Vsebnost vode v tleh na poskusnem polju Stavešinci za globino 10 – 20 cm za leto 2006 na območjih, ki so različno obogatena z geogenim CO ₂	23
Slika 14: Vsebnost vode v tleh na poskusnem polju Stavešinci za globino 20 – 30 cm za leto 2006 na območjih, ki so različno obogatena z geogenim CO ₂	24
Slika 15: Prikaz sezonskega toka talnega CO ₂ na mofeti Stavešinci za leti 2005 in 2006 na na območjih, ki so različno obogatena z geogenim CO ₂	26
Slika 16: Tok CO ₂ iz tal glede na vsebnost vode v tleh do globine 30 cm na mofeti Stavešinci za leti 2005 in 2006 na območjih, ki so različno obogatena z geogenim CO ₂	28

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

ARSO	Agencija Republike Slovenije za okolje
FD	Frequency Domain
GMT	Greenwich Mean Time (zahodnoevropski čas)
P %	poroznost
pF	potencial force
PK	poljska kapaciteta
ppm	part per milion (milijonski delec)
RV	razpoložljiva voda
TV	točka venenja
ρ_t	gostota talnih delcev (gostota trdne faze tal)
ρ_{vol}	gostota tal (volumska gostota tal)

1 UVOD

V zadnjih letih se ves svet spopada z naraščajočo vsebnostjo atmosferskega ogljikovega dioksida (CO₂), katere glavna posledica je segrevanje ozračja ali tako imenovani povečan učinek tople grede. Svetovna zaskrbljenost zaradi globalnega segrevanja in njegovega vpliva na okolje v prihodnosti zahteva boljše razumevanje globalnega kroženja ogljika. To je proces, za katerega lahko trdimo, da piše zgodbo življenja na našem planetu. Cikel zajema tla, kopenske vode in oceane, atmosfero, vse živali in rastline, druge organizme in tudi ljudi. Resne motnje cikla bi pomenile katastrofo za vse žive organizme na planetu. Ogljik je gradnik vsega živega, saj je sestavina vseh organskih spojin. Že dalj časa je znano dejstvo, da se koncentracija atmosferskega CO₂ v svetovnem merilu povečuje. Za začetek naraščanja koncentracije CO₂ štejemo začetek industrijske revolucije v 18. stoletju. Na začetku 19. stoletja je koncentracija atmosferskega CO₂ znašala približno 280 ppm, danes že dosega mejo 400 ppm in še vedno narašča. Ob takem napredovanju naj bi do leta 2075 znašala že 700 ppm (Mingkui in Woodward, 1998). Največja krivca za to sta industrija in promet, ki z rabo fosilnih goriv sproščata velike količine CO₂ v atmosfero. Veliko vlogo pri povečevanju koncentracije CO₂ v zraku ima tudi kmetijstvo, kjer zaradi spremenjene rabe tal prihaja do sproščanja velikih količin CO₂ zaradi hitrejše mineralizacije humusa.

1.1 POVOD

V povezavi s kroženjem ogljika v različnih ekosistemih in s problemom globalnih okoljskih sprememb potekajo v svetu intenzivna proučevanja dinamike kroženja ogljika v različnih ekosistemih. 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.

O kroženju ogljika se lahko veliko naučimo tudi iz ekosistemov, ki so glede posameznih komponent ogljikovega cikla posebni. Takšen primer predstavljajo rastišča z naravno povečano koncentracijo CO₂, naravni vreli ali mofete, kjer predstavlja glavni del toka CO₂ geogeni CO₂, katerega tokovi oz. fluksi lahko dosežajo precej velike vrednosti. Zanimivo je, da imamo kljub intenzivnim raziskavam na mofetah za ta rastišča malo podrobnejših raziskav o prehajanju CO₂ iz tal v atmosfero.

1.2 NAMEN IN HIPOTEZE

V diplomski nalogi nas je zanimalo, kakšne so lastnosti toka CO₂ iz tal na območju naravnega izvira CO₂ Stavešinci. Hipoteze so bile naslednje:

Tok CO₂ iz tal je na lokacijah, kjer je prisotnost geogenega CO₂ različna, različen.

Geogeni CO₂ bistveno poveča tokove CO₂ iz tal.

Vsebnost vode v tleh pomembno vpliva na hitrost toka CO₂ iz tal.

Odvisnost toka CO₂ iz tal od vsebnosti vode v tleh se za lokacije z različno prisotnostjo geogenega CO₂ razlikuje.

2 PREGLED OBJAV

2.1 TLA KOT TROFAZNI SISTEM IN LASTNOSTI TAL, KI SO POMEMBNE ZA ZRAČNO-VODNO RAZMERJE

Tla so izredno dinamičen sistem, ki se je izoblikoval na zemeljski površini in predstavlja stično točko litosfere, hidrosfere, atmosfere in biosfere. Pomembna so predvsem zato, ker rastlinam zagotavljajo vir hranil, jim dajejo oporo in omogočajo njihovo rast in razvoj. Mogoče na prvi pogled delujejo kot preprost sistem, vendar so tla v resnici porozna in heterogena mešanica. So trifazni sistem, sestavljen iz treh agregatnih stanj. Trdno fazo, ki zavzema približno 50 % skupne mase tal, predstavljajo mineralni delci in organska snov, v katero so vključeni tudi živi organizmi. Odnos med tema dvema komponentama se lahko spreminja, kar je odvisno od samih tal. Mineralni del absolutno prevladuje, saj predstavlja kar 90 – 95 % trdne faze. Poleg trdne faze sistem zapolnjujeta še tekoča faza, ki jo predstavlja talna raztopina (voda z raztopljenimi snovmi), in plinasta faza, ki predstavlja zrak v tleh (Ćirić, 1984). Voda zapolnjuje pore, zrak pa zapolnjuje tiste vrzeli, kjer ni vode (Zupanc in Pintar, 2001). Razmerje med vodo in talnim zrakom je odvisno od stopnje navlaženosti tal, pogojujejo pa ga predvsem v nadaljevanju naštetih talnih fizikalno-kemijskih lastnosti.

2.1.1 Tekstura

Velikost mineralnih delcev ključno definira fizikalne, kemijske in biološke lastnosti tal. Tako na primer močno vpliva na zračnost, prepustnost tal za vodo, kapaciteto tal za zadrževanje vode in na prostor, primeren za naseljevanje organizmov. Mineralni delci so različnih velikosti, ki se delijo v sledeče teksturne (velikostne) razrede: pesek, melj in glina. V tleh so delci zastopani v različnih deležih in govorimo o peščenih tleh, peščeno glinastih, peščeno meljastih, ilovnatih, meljasto glinenih, itd. V ilovnatih tleh so sorazmerno enaki deleži peska, melja in gline. V splošnem so peščena tla lažja in glinasta tla težja (Pintar, 2003).

2.1.2 Struktura

Talne delce med seboj vežejo organska snov ter mineralna veziva v večje ali manjše skupke ali sprimke, ki jih imenujemo strukturni agregati. Ločimo jih po obliki in velikosti ter po obstojnosti, kar daje tlam različno strukturo. Ugodna struktura z dobro obstojnostjo strukturnih agregatov je pomemben dejavnik za izboljšanje rodovitnosti tal. Najpomembnejša značilnost strukturnih tal je, da lahko vpijajo vodo in jo zadržujejo (Klobučar in sod., 1982) ter tako pomembno vplivajo na vodno retenzijske lastnosti tal. Pomembno vlogo igra struktura tudi pri procesih kot so erozija, mehanska upornost tal, kroženje hranil ter pri globini prodiranja korenin in zračnosti tal.

2.1.3 Organska snov

Organsko snov tal sestavljata živa in neživa organska snov. Med živo organsko snov štejemo žive organizme, neživa organska snov pa nastaja iz odmrle rastlinske in živalske biomase. Delimo jo v razgradljivo organsko snov, ki prestavlja manjši del nežive organske snovi tal in stabilno organsko snov – humus (Leštan, 2001). Humus ima veliko sposobnost adsorpcije, saj je njegova kapaciteta za adsorpcijo dvakrat do trikrat večja kot pri rudninskih koloidih (Klobučar in sod., 1982), kar povečuje vodno retenzijske sposobnosti tal. Večino tal sestavlja anorganska snov, organske snovi je le redko več kot 10 %, ima pa velik vpliv na fizikalne in kemijske lastnosti tal. Povečuje stabilnost talnih agregatov ter s tem izboljšuje strukturo tal. Ima tudi pomembno vlogo pri črpanju rastlinskih hranil iz mineralov.

2.1.4 Poroznost

Med trdnimi talnimi delci se nahajajo prazni prostorčki – talne pore različnih oblik in velikosti. V talnih porah se lahko zadržujeta voda, zrak ali oba. Po velikosti jih delimo na makro- (večje) in mikro- (manjše) pore. Za rastline je najboljša situacija, ko makropore zapolnjuje zrak in mikropore voda. Talna voda in zrak sta v ravnotežju, oz. sta med seboj odvisna. Za dana tla je to razmerje odvisno od velikosti, oblike por in njihove medsebojne povezanosti ter količine vode, ki je na voljo (padavine, bližina podtalnice). Vodno zračni režim tal (razmerje med vodo in zrakom) v veliki meri pogojuje rodovitnost tal. Velikost in oblika por zelo vplivata tudi na sposobnost tal za zadrževanje vode (Suhadolc in sod., 2005).

Lastnost, ki nam pove, kakšen je volumen por glede na skupni volumen tal, imenujemo poroznost (P %) in je odvisna od teksture, strukture in deleža organske snovi v tleh. Posebno vlogo pri teksturi imajo glinasti delci, ker pri večji vsebnosti vode v tleh nabreknejo in s tem spremenijo velikost in obliko talnih por. Od strukturnih lastnosti na spremembo poroznosti najbolj vpliva obstojnost strukturnih agregatov. Če je ta majhna, strukturni agregati ob povečani vsebnosti vode v tleh razpadejo in sistem talnih por se spremeni (Suhadolc in sod., 2005). Organska snov zaradi svoje strukture ponavadi poveča poroznost tal.

Poroznost je kvantitativno določena z razmerjem med skupnim volumnom por in celotnim volumnom danega neporušenega talnega vzorca. Ker je skupni volumen por v neporušenem talnem vzorcu v praksi direktno nemogoče natančno določiti, izračunamo odstotek poroznosti tal z uporabo fizikalno – matematičnih zvez, na osnovi meritev gostote trdnih delcev (ρ_t) in gostote tal (ρ_{vol}).

Gostota trdne faze tal (ρ_t) je definirana z razmerjem med maso in volumnom trdne faze tal. Odvisna je predvsem od razmerja med količinama mineralnih in organskih talnih delcev izbranega vzorca tal. V splošnem znaša med 2,50 – 2,66 g/cm³.

Volumska gostota (ρ_{vol}) je definirana z razmerjem med maso trdne faze tal in volumnom celotnega neporušenega vzorca tal. Iz definicije sledi, da je tudi ta količina odvisna od razmerja med količinama organske in mineralne snovi v tleh in od velikosti skupnega volumna por. Tla, ki vsebujejo veliko organske snovi in imajo velik porni volumen, imajo majhno gostoto tal (surovi humus – $0,2 \times 10^3$ kg/m³, povprečna poljska tla – $1,5 \times 10^3$ kg/m³). Gostoto tal določajo tekstura, struktura in delež organske snovi v tleh. Primarno namreč na volumsko gostoto vpliva specifična gostota osnovnih talnih delcev (peska, melja, gline, organske snovi) ter njihova razporeditev. Gostota tal je dinamična lastnost tal, ki se spreminja z obdelovanjem tal, uporabo kmetijske mehanizacije, gaženjem živali in tudi pod vplivom specifičnih vremenskih razmer (npr. intenzivne padavine, toča). Pri večji volumski gostoti je manj pornega prostora (tla so bolj zbita), kar vpliva na gibanje vode v tleh, prodiranje in rast korenin, kalitev semen, itd. (Suhadolc in sod., 2005).

2.2 VODA V TLEH

Voda je osnovni pogoj za vse procese v tleh in temeljni vir življenja za organizme. V tleh se nahaja v sistemu talnih por in vpliva na mnoge fizikalne, kemične in biološke procese. Poleg tega vpliva tudi na mnoge lastnosti tal, kot so: zračnost, toplotno stanje, mikrobiološka aktivnost, itd. Voda ima v tleh veliko nalog, med drugim deluje kot topilo in kot prenašalec raztopljenih snovi, potrebnih za rast in razvoj rastlin, in je eden ključnih dejavnikov za rodovitnost tal (Čirić, 1984). Talna raztopina vsebuje v vodi raztopljene različne mineralne snovi, katerih količina in koncentracija sta odvisni predvsem od tal samih. Ker so koncentracije mineralnih hranil v tleh zelo majhne, razen pri zelo zasoljenih tleh, na gibanje vode razlike v osmotskem tlaku ne vplivajo. Zato se za talno raztopino običajno uporablja kar izraz voda v tleh (Genuchten, 1980).

Količino in stanje vode v tleh podamo z masnim ali volumskim odstotkom vode v tleh in z njenim matričnim potencialom (tenzijo). Značilnosti vodnega režima v tleh v splošnem opišemo z vodno-retenzijsko krivuljo in hidravlično prevodnostjo tal (Suhadolc in sod., 2005). Glinasta tla zadržijo pri enaki tenziji več vode kot peščena. Količina vezane vode v tleh se lahko podaja v obliki: masnih odstotkov (koliko g vode tla zadržijo v 100 g tal), volumskih odstotkov (koliko cm³ vode tla zadržijo v 100 cm³ tal, oz. mm vodne plasti / 100 mm tal), debeline vodne plasti, ki jo tla zadržijo (npr. 10 mm vode v 15 cm tal), in z matričnim potencialom. Prvi trije nam podajo samo informacijo o količini vode v tleh, ne pa tudi o jakosti vezave vode na talne delce. Z ugotavljanjem matričnega potenciala ali tenzije vode pa dobimo poleg podatka o vlažnosti tal tudi sliko o deležu rastlinam dostopne in nedostopne vode v tleh (Pintar, 2003).

2.2.1 Matrični potencial vode v tleh

Poleg vsebnosti vode v tleh je vodni potencial tal najpomembnejša karakteristika tal. Vodni potencial je definiran kot razlika v potencialni energiji na enoto količine vode med vodo v tleh in referenčno vodo. Predstavlja mehansko delo, ki ga voda v tleh porabi za reverzibilni in izotermalni premik enote količine vode iz točke v tleh na referenčno točko. Gradient celotnega potenciala talne vode določi velikost gonilne sile, ki vpliva na vodo. Od vodnega potenciala je odvisna gibljivost vode v tleh in njena dostopnost za rastline (Stephens, 1995).

Voda se v tleh zadržuje v obliki vodne pare ali v obliki kapljevine (tekočine). Ko količina vodnih molekul v talnem zraku doseže nasičenje, t.j. takrat, ko so vse talne pore napolnjene z vodo (maksimalna higroskopičnost), se začne vezava vode na talne delce v obliki kapljevine oz. tekočine (Pintar, 2003).

Vodo v tleh razlikujemo glede na to, kako močno je vezana na talne delce (Klobučar in sod., 1982).

- Vodni hlapi so v porah, v katerih ni tekoče vode, ampak zrak. Pogosto se gibljejo od kraja z večjo proti kraju z manjšo napetostjo oz. iz toplejših plasti v hladnejše.
- Konstitucijska voda je kemično vezana v spojinah, npr. v $\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$ in je negibna.
- Higroskopska voda je tanek ovoj vode na površini talnih delcev. Nanje je trdno vezana z molekularnimi silami, zato je prav tako negibna.
- Filmska voda je tanka plast vode nad higroskopsko vodo. Od nje se razlikuje po tem, da se giblje v obliki kapljicne vode, a zelo počasi.
- Kapilarna voda se zaradi površinske napetosti nabira kot prevleka okoli talnih delcev, se zadržuje med njimi in se nabira v kapilarah.
- Gravitacijska voda je v nekapilarnih porah in se zaradi težnosti stalno premika iz višjih v nižje plasti. Zato je v teh porah le začasno, med dežjem, pozneje pa se nabira v globljih plasteh.
- Podtalnica se zbira v nižjih plasteh tal tik nad nepropustno podlago. Gladina podtalnice predstavlja mejo med zasičeno in nenasičeno cono v poroznem prostoru.

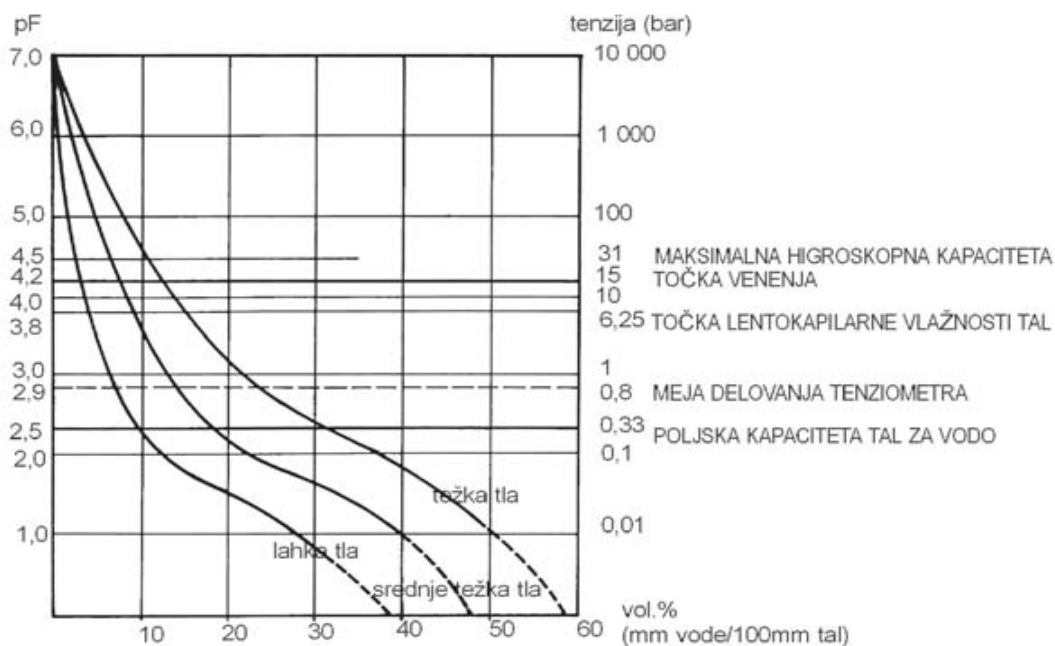
Voda v tleh se na površino talnih delcev veže na dva različna načina. Prvi je adsorpcija molekul vode na površino talnih delcev preko Van der Valsovih sil. Drugi način je zadrževanje vode v tleh z menisknimi silami, ki se pojavijo na mestu kontakta dveh delcev. Manjši je delež vode v tleh, večja je moč vezave. Matrični potencial je torej sestavljen iz adsorptivnih sil vode na talne delce ter kapilarnih sil znotraj por. Energija, potrebna za premaganje skupka teh sil, ustreza in je nasprotno enaka matričnemu potencialu. Tako ima matrični potencial vedno negativen predznak (Hillel, 1998).

Matrični potencial oz. tenzijo lahko izražamo na tri različne načine: v enotah za tlak (Pa), v enotah višine vodnega stolpca (cm), ali v pF enotah (potential Force), ki so definirane kot negativni logaritem centimetrov vodnega stolpca (Pintar, 2003). Npr. pri tenziji 1000 cm

vodnega stolpca je pF vrednost 3 oz. 100 kPa hidrostatičnega tlaka. Na tenzijo vode v tleh v največji meri vpliva velikost in oblika talnih por, torej je odvisna od strukture, teksture in vsebnosti organske snovi tal in grobega skeleta ter stopnje humoznosti tal (Suhadolc in sod., 2005).

2.2.2 Vodno-retenzijska krivulja

Grafični prikaz, ki prikazuje odvisnost med matričnim potencialom in vsebnostjo vode v tleh, kadar je voda v tleh v ravnovesju, ali drugače povedano, kakšen matrični potencial ima voda v tleh pri določeni vsebnosti vode, se imenuje vodno-retenzijska krivulja (Slika 1). Določimo jo lahko za vsak tip tal, pove pa nam, s kolikšno silo je voda vezana na talne delce (Suhadolc in sod., 2005). V praksi jo grobo opišemo s tremi karakterističnimi točkami: stanjem nasičenosti, poljsko kapaciteto tal in točko venenja.



Slika 1: Povezava med količino vode in tenzijo le te v različnih tleh (Pintar, 2003)

Ko je vode v tleh toliko, da so z njo napolnjene tako makropore, kot mikropore, govorimo o polni kapaciteti tal za vodo oz. o stanju nasičenosti ($pF = 0$). Ko gravitacijsko odcedna voda odteče in ostane le kapilarna in higroskopsko vezana voda ($pF = 2,54$), se vzpostavi stanje poljske kapacitete tal za vodo (PK), kar se v peščenih tleh zgodi po približno enem in v glinastih tleh po približno treh dneh. (Pintar, 2003). Poljska kapaciteta tal za vodo je največja količina vode, ki jo tla lahko zadržijo. Vezana je s silo 10 kPa v lahkih peščenih tleh oz. 33 kPa v težkih glinastih tleh. V tem stanju so mikropore zapolnjene z vodo in makropore zapolnjene z zrakom. Za večino rastlin je to najprimernejše stanje, saj imajo korenine na voljo dovolj vode in zraka.

Rastline morajo zato, da lahko sprejmejo vodo skozi korenine, premagati silo, s katero je voda vezana na talne delce. Prva plast molekul vode je vezana s silo 30 bar (3000 kPa) in več. Več je vode v tleh, šibkeje je vezana in vedno bolj je dostopna rastlinam. Največja sila, ki jo rastline lahko premagajo, je 15 barov (1500 kPa), vendar lahko nekatere dosežejo tudi večjo sesalno moč (Pintar, 2003). Ko je voda v tleh vezana s tenzijo 15 barov, govorimo o točki venenja (TV), ki je določena glede na preskrbljenost rastlin z vodo (Suhadolc in sod., 2005). Takrat rastline zaradi pomanjkanja njim dostopne vode v tleh trajno ovenijo in si ne opomorejo, četudi jih zalijemo ($pF = 4,2$).

Rastlinam dostopna voda v tleh je tista, ki se zadrži med PK in TV in jo imenujemo razpoložljiva voda (RV). Ker imajo rastline različno sposobnost črpanja vode, so različno odporne na sušo. Kritična točka, je določena količina vode v tleh, do katere rastlina relativno lahko črpa vodo in je za posamezne vrste in tudi sorte rastlin različna. V območju pod to kritično točko rastlina del energije, ki bi jo sicer porabila za oblikovanje pridelka, porablja za premagovanje tenzije vode. Rastlina je tedaj v sušnem stresu (Pintar, 2003).

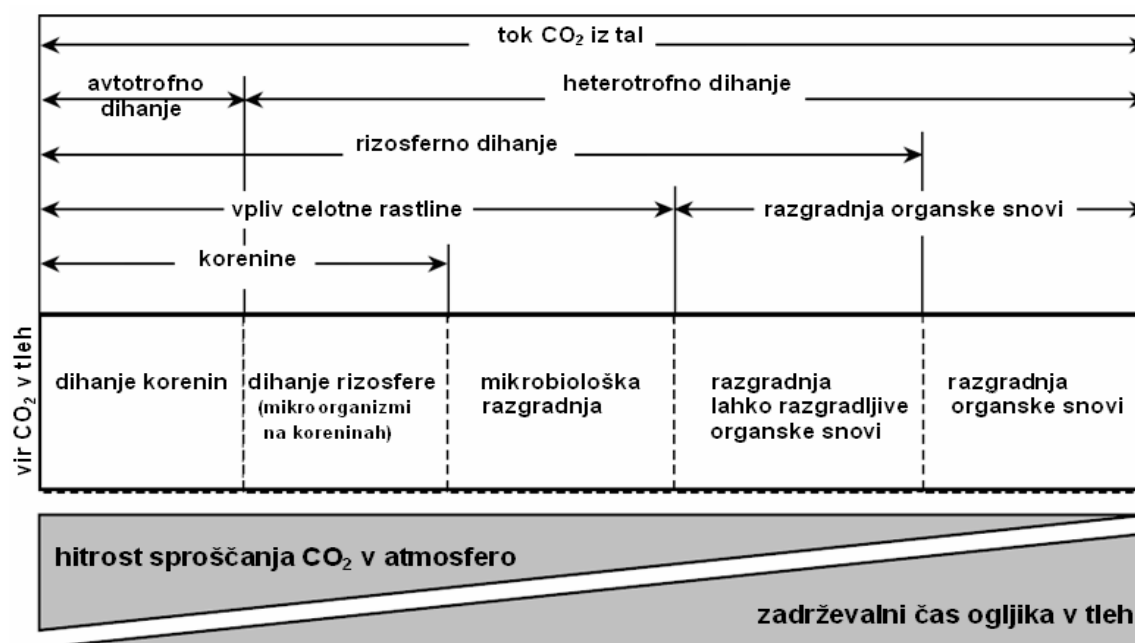
2.3 ZRAK V TLEH

Sestava zraka v tleh se razlikuje od atmosferske. Zrak v tleh je veliko bolj nasičen z vodno paro in relativna zračna vlažnost znaša do 95 %, medtem ko je nasičenje atmosferskega zraka manjše. Talni zrak vsebuje 78 % dušika, 18 – 20 % O₂ in 0,15 – 0,65 % CO₂. Razlika je tudi v količini CO₂, ki ga je lahko tudi stokrat več kot v atmosferi. To je posledica porabe kisika za dihanje in hkratne proizvodnje CO₂. Količina CO₂ je odvisna od tipa in lastnosti tal, vsebnosti vode, mikrobiološke aktivnosti, poraščenosti tal, itd. Talni zrak je osiromašen z O₂ glede na atmosfersko koncentracijo, vendar ga je še vedno dovolj za dihanje rastlinskih korenin in talnih organizmov vključno z mikroorganizmi (Ćirić, 1984). Deleži plinov so odvisni predvsem od aktivnosti procesov v tleh in letnega časa. V zelo anaerobnih razmerah, to je v zelo mokrih tleh, pa lahko delež O₂ pade na 10 %, delež CO₂ pa naraste celo do 5 – 6 % (Ćirić, 1984). Talne koncentracije CO₂ na naravnih izviri CO₂ so lahko še precej večje (Pfanzen in sod., 2004). Parcialni tlak O₂ in parcialni tlak CO₂ sta ponavadi v tleh v obratnem sorazmerju, spremembe v koncentraciji obeh plinov so zato simultane (Lobnik, 2001).

2.3.1 Dihanje tal

Tok CO₂ iz tal je pomemben dejavnik pri kroženju ogljika in eden glavnih pokazateljev izmenjave tega plina med tlemi in atmosfero. Odvisen je od nastajanja CO₂ v tleh in njegovega sproščanja v atmosfero. V brezvetrju se CO₂ v tleh z difuzijo premešča v vodoravni smeri v pornem sistemu tal in ne izhaja v atmosfero (Jassal in sod., 2005). Na difuznost talnega CO₂ vpliva več dejavnikov. Večkrat zasledimo, da je količina CO₂, ki se sprošča iz tal, v veliki meri odvisna od dejavnikov, ki pospešujejo dihanje tal. Dihanje tal je glavni vir CO₂ v večini tal, ki je lahko avtotrofno (dihanje korenin) ali pa heterotrofno

(dihanje talnih organizmov) (Slika 2). Dihanje tal je močno odvisno od temperature, aktivnosti rastlin in dostopnosti vlage. Svoj del CO₂ pa doda še razgradnja organske snovi v tleh (Maček in sod., 2003).



Slika 2: Pet glavnih virov CO₂ iz tal, glede na hitrost sproščanja v atmosfero in na zadrževalni čas ogljika v tleh (Kuzyakov, 2006)

Difuznost talnega CO₂ narašča s temperaturo, saj je takrat dihanje večje in s tem posledično tudi tok CO₂ iz tal. Narašča tudi s povečevanjem deleža zračnih por v tleh, kar pa je odvisno od gostote tal in vsebnosti vode v tleh (Hillel, 1998; Jassal in sod., 2005). Na difuznost pa ne vpliva globina tal (Jassal in sod., 2005). V razmerah, ki omogočajo lažjo difuzijo CO₂ v tleh, je tudi tok CO₂ iz tal povečan (Stoyan in sod., 2000; Xu in Qi, 2001).

Dež ima dvojen vpliv na tok CO₂. Negativen je, ko izpodrine zrak iz tal in se posledično tok zmanjša, hkrati pa manjše količine padavin pozitivno vplivajo na tok in še dodatno stimulirajo aktivnost organizmov (rastline, mikroorganizmi), zato se tok poveča. Ekstremne količine padavin imajo negativen vpliv, ker se naenkrat zapolnijo vse pore in tok se obnovi šele, ko odteče gravitacijska voda. Takoj po močnem deževju, zlasti ko so tla izsušena, se tok CO₂ zmanjša zaradi zmanjšane difuznosti, vendar se kmalu zopet vzpostavi prejšnje stanje (Jassal in sod., 2005). V času suše je tok konstanten oz. lahko začne postopoma padati zaradi pomanjkanja vode (padec dihanja). Kadar so talne pore napolnjene z vodo ali s katerim drugim plinom (npr. CO₂), prihaja do pomanjkanja kisika, kajti motena ali onemogočena je difuzija plina iz atmosfere (Taiz in Zeiger, 1998).

Tok CO₂ iz tal se pogosto spreminja s časom, zato lahko govorimo o sezonskem in tudi o dnevnem nihanju toka (Xu in Qi, 2001; Mosier in sod., 2001). Časovno spremenljivost

talnega dihanja lahko razložimo s časovno spremenljivostjo temperature in vlage v tleh. Kot sta ugotovila Xu in Qi (2001), lahko 70 % časovne spremenljivosti talnega dihanja pripišemo delovanju teh dveh talnih parametrov. Študije dnevnega poteka talnega dihanja so pokazale, da je nočno dihanje enako dihanju ob zori ali mraku (Dugas in sod., 1999). Mielnich in Dugas (2000) sta ugotovila, da je 12 urno dnevno povprečje dihanja tal samo za približno 10 % večje kot 24 urno povprečje. Spremenljivost dihanja tal preko leta nam pokaže, da je najmanjše pozimi in največje v zgodnjem poletju (Mielnick in Dugas, 2000; Jassal in sod., 2005; Fang in sod., 1998). Kasneje lahko poletna suša občutno zmanjša nastanek CO₂ in omeji vpliv temperature, ki bi sicer povečala nastanek CO₂ v tem letnem času. Če ni zadostne količine vlage, je dihanje v tleh bolj ali manj odvisno od sezonske spremenljivosti temperature tal (Billings in sod., 1998; Fang in sod., 1998). Padavine močno vplivajo na količino CO₂ v tleh.

2.3.2 Naravni izviri CO₂

V nekaterih tleh dihanje ni glavni vir CO₂ (Mörner in Etiope, 2002). V naravnih izvirih CO₂ (mofetah), je talna koncentracija CO₂ v glavnem odvisna od geogenega CO₂.

Naravni izviri CO₂, ki jih imenujemo tudi mofete, nastajajo na mestih, ki so bila v preteklosti ali pa so še danes vulkansko aktivna. Do nastanka sproščenih zalog CO₂ v zemeljski notranjosti je prišlo zaradi topljenja karbonatnih kamnin pod vplivom visokih temperatur in tlaka. Tako nastali CO₂ je neenakomerno razporejen v podzemnih bazenih in do njegove sprostitve pride samo v primeru, če mu uspe prodreti skozi zemeljsko skorjo skozi večje ali manjše razpoke. Večji izviri se pojavljajo predvsem v okolici delujočih vulkanov. Prodiranje plina je odvisno predvsem od lastnosti posameznega izvira, ter od plasti tal, ki ležijo nad virom. V nekaterih primerih plin enostavno sledi razpoki v talnem profilu. Ko je plin nad tlemi, ga mešanje zraka naglo razredči. Pomembno vlogo pri redčenju in mešanju geogenega CO₂ z atmosferskim zrakom imata hitrost in smer vetra (Pfanzen in sod., 2004).

Izviri se razvijejo na poljih ali travnikih, močvirjih in barjih, v hribovitem svetu ali dolinah. Poleg plinastih izpustov (mofete) se lahko CO₂ v ozračje sprošča iz mokrih izvirov (reke, jezera, zalivi, izviri, slani studenci). Ko se na poti na površje sreča s podtalnico in jo obogati, nastane z ogljikovo kislino bogata naravna mineralna voda, v severovzhodni Sloveniji imenovana tudi slatina.

Mofete in mokri izviri CO₂ so zelo razširjeni, najdemo jih lahko domala po vsem svetu. Pojavljajo se v vzhodni Nemčiji, na Islandiji, v severovzhodni Sloveniji, na vzhodnem Češkem, Madžarskem, v Romuniji, Španiji, Grčiji, na Portugalskem, v Avstriji, v centralni Franciji ter v centralni in severni Italiji (Pfanzen in sod., 2004), prav tako pa tudi v ZDA in na Novi Zelandiji (Badiani in sod., 2000).

Medtem ko v normalnih tleh koncentracija v zgornji plasti tal (20 cm globine) ne preseže 0,2 – 1,5 %, ta lahko v tleh na območju mofet doseže tudi 100 % (Pfanž in sod., 2004). Posledica velike koncentracije CO₂ v tleh je manjši delež kisika (Maček, 2004). Neposredno ob vrelih na travniku je lahko koncentracija CO₂ v tleh ekstremno velika in lahko dosega 100 % koncentracijo CO₂ (Pfanž in sod., 2004). Prav tako je nad običajno koncentracijo CO₂ (0,04 %) povečana tudi koncentracija CO₂ v zraku. Nihanje koncentracij je odvisno od bližine izvira (Vodnik in sod., 2005). Ponavadi je sestava plina, ki izhaja iz izvirov naslednja: CO₂ (50 – 99,9 %), dušik (5 – 10 %), metan (do 3,2 %) in žveplove spojine v sledih (H₂S oz. SO₂) (Pfanž in sod., 2004).

Neposredna bližina izvirov je redko porasla z vegetacijo, oz. te sploh ni. Rast rastlin je pod vplivom zračnega in verjetno bolj pomembnega talnega CO₂ v koreninski plasti močno inhibirana. Z oddaljenostjo od vrecev se inhibitorni učinek CO₂ zmanjšuje in višina rastlin se večja. V predhodnih raziskavah je bilo pokazano, da je rast negativno pogojena s koncentracijo CO₂ v tleh (Pfanž in sod. 2004, Vodnik in sod. 2006). Meritve talne koncentracije plinov se lahko zato uporabljajo za določitev plinskega režima in izpostavitve posameznih rastlin na območju mofete.

Vodnik in sod. (2006) so preučevali prostorsko in časovno spremenljivost talne koncentracije CO₂ na naravnem izviru CO₂ Stavešinci (SV Slovenija). Meritve koncentracij talnega CO₂ na vzorčni mreži (globina 20 cm, ločljivost 0,5 m, površina 60 m²) so pokazale različne vrednosti talnega CO₂. Na podlagi zaporednih meritev so ugotovili, da so rezultati meritev talnih plinov dokaj ustaljeni skozi daljše časovno obdobje. Predvidevajo, da je v mirnem obdobju brez vetra prostorski vzorec obogatitve atmosfere z geogenim CO₂ podoben tistemu v tleh.

Študije raziskav toka CO₂ iz tal v mofetah so do sedaj v glavnem ocenjevale doprinos geogenega CO₂ k skupnem CO₂ v atmosferi in njegov vpliv na globalne podnebne spremembe (Mörner in Etiope, 2002). Za najbolj znano italijansko mofeto Il'Bossolo (Toskana) so bile vrednosti toka CO₂ ocenjene na približno 3500 t/leto, vendar so lahko v ostalih mofetah izpusti CO₂ še znatno večji (Mörner in Etiope, 2002). V mofetah do sedaj pravzaprav ni bilo sistematičnih meritev toka geogenega CO₂ na majhni prostorski skali. Poleg tega je o časovni spremenljivosti izpusta ogljika znanega zelo malo.

3 MATERIAL IN METODE

3.1 OPREDELITEV OBMOČJA RAZISKAVE

Pomurje leži v severovzhodni Sloveniji in je po svoji geografski legi in geološki zgradbi del obrobja Panonske kotline, in sicer murske in delno dravske udorine (Žlebnik, 1977). Ščavniška dolina leži v osrčju Slovenskih goric, je pokrajinsko enotna, a se kljub temu deli na zgornjo, srednjo in spodnjo Ščavnico (Belec, 1986).

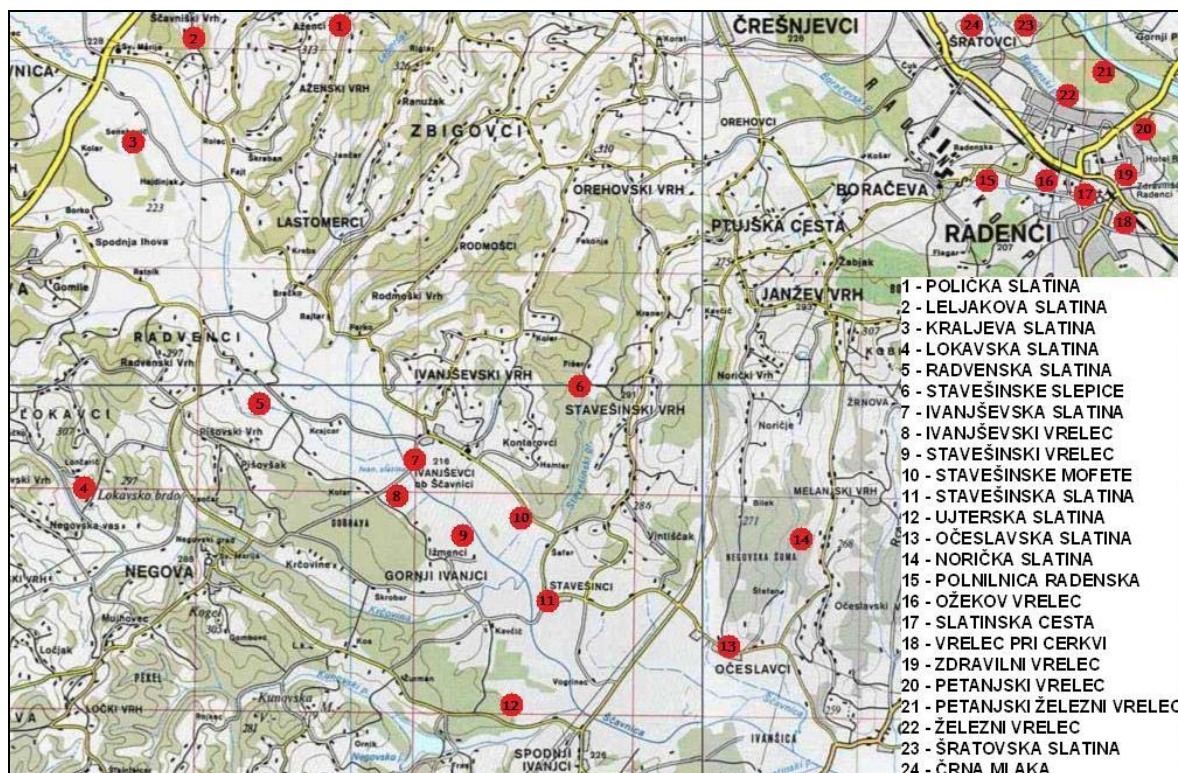
Oddaljenost od morja in nizka nadmorska višina sta dejavnika, zaradi katerih je Pomurje eno najbolj sušnih predelov Slovenije, z najbolj celinskim podnebjem, ki je na območju goric manj izrazit kot v ravnini. Od zahoda proti vzhodu se večajo temperaturne razlike in se zmanjšuje količina padavin. Ščavniška dolina ima zmerno celinsko ali subpanonsko podnebje vzhodne Slovenije, v katerem so jasno izoblikovane značilnosti tega tipa podnebja – vroča poletja, mrzle zime, celinski padavinski režim, povprečna aprilaska temperatura je enaka ali višja od oktobrske, povprečna letna količina padavin med 800 in 1000 mm (Geografski atlas Slovenije, 1998).

Pomurje je poleti ena toplejših slovenskih pokrajin. Najtoplejša meseca sta julij in avgust, najhladnejši so december, januar in februar. Povprečne julijske temperature so skoraj povsod višje od 19 °C, večinoma med 20 in 21 °C. Segrevanje se močno stopnjuje že v pozni pomladi in se nadaljuje še v zgodnji jeseni. Poletna toplina je povezana tudi z izrazito prevlado jasnih dni – v obdobju 1991 – 2001 je bilo v Gornji Radgoni povprečno 60,7 jasnih dni (torej z oblačnostjo pod 20 %) (Klimatološka analiza ..., 2008). V obdobju 1961 – 1990 je bila povprečna letna temperatura v Gornji Radgoni 9,5 °C, srednja januarska -1,7 °C in srednja julijska 19,3 °C. V istem obdobju je znašala absolutna najnižja temperatura -23 °C in najvišja 36,2 °C (Klimatski podatki ..., 2008). Povprečna mesečna temperatura tal na globini 10 cm v obdobju 2001 – 2007 je bila najnižja januarja, to je 0,4 °C, in najvišja julija, 23,6 °C. Na globini 30 cm se tla počasneje ohlajajo, zato je povprečna mesečna temperatura tal januarja nekoliko višja, in sicer 1,3 °C. Prav tako se na globini 30 cm tla počasneje segrevajo, zato je julija povprečna mesečna temperatura tal 22,6 °C (Podatki o temperaturi ..., 2008).

Območje nastajanja mineralne vode v Ščavniški dolini po doslej znanih podatkih obsega ves njen ravninski del skupaj s severovzhodno in jugozahodno potekajočimi ozkimi grapami od Očeslavcev do Ihove. Le nekaj redkih izjem vrelcev in suhih izvirov CO₂ leži na višje ležečih mestih na pobočjih hribov. Dolina reke Ščavnice je široka od 1 do 1,5 km in poteka v smeri od severozahoda proti jugovzhodu. Dolina je tektonsko pogojena, poteka namreč pravokotno na slemenitev plasti (Babič, 1980).

Najbolj znane mofete v Ščavniški dolini se nahajajo pod vasjo Stavešinski vrh (Stavešinska slepica) in v bližini vasi Stavešinci (Stavešinske mofete, Slika 3). Med Ivanjševci in

Stavešinci lahko na cca. 3000 m² veliki kmetijski površini ob regionalni cesti najdemo precej izvirov zelo čistega CO₂ brez primesi drugih plinov. Na območju največjega izhajanja CO₂ so domačini zaradi premajhnih pridelkov opustili pridelovanje kulturnih rastlin. Tako je del poskusne površine opuščeno in zarasel, predvsem s travami, pionirskimi zelmi in neofiti. V letu 2005, ko je bil zasnovan poskus za to diplomsko delo, je bilo poskusno območje zatravljeno.



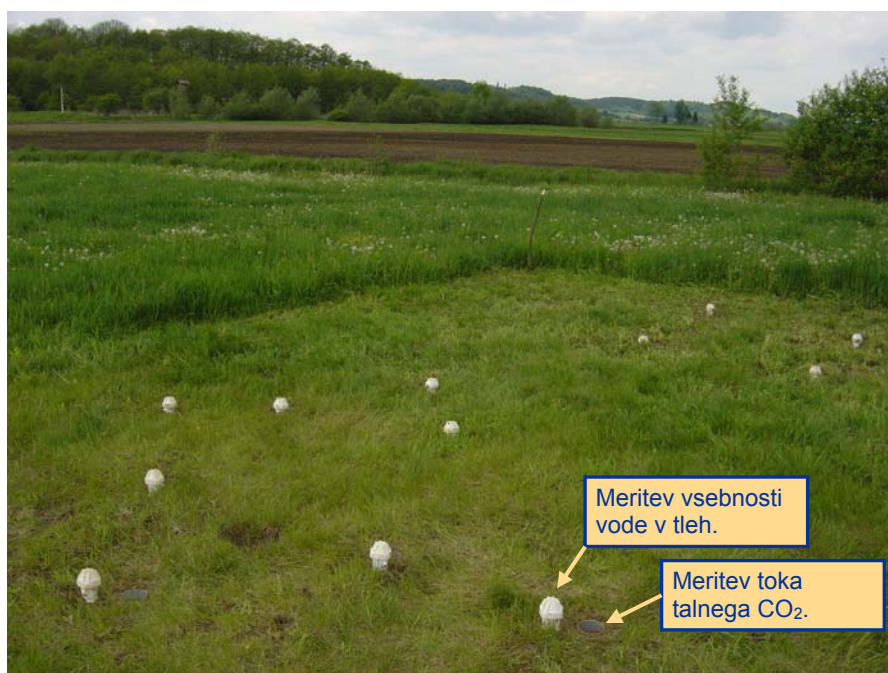
Slika 3: Vrelci CO₂ v dolini reke Ščavnice in okolici Radencev (prirejeno po TIC..., 2008)

3.2 METODE DELA

3.2.1 Zasnova poskusa

Na travniški mofeti ob Stavešincih (Slika 4) smo v letu 2005 na raziskovalni ploskvi velikosti 5 × 12 m (60 m²) zastavili poskus, v katerem smo na različnih lokacijah sočasno merili tok CO₂ iz tal in vsebnost vode v tleh. Izbranih je bilo 14 merilnih mest, ki so bila na območjih z veliko koncentracijo geogenega CO₂, srednjo koncentracijo geogenega CO₂ in na robnem delu, kjer so predhodne meritve pokazale, da talne koncentracije CO₂ ne odstopajo od normalnih. Za merjenje toka CO₂ iz tal smo na ta mesta namestili PVC ovratnike notranjega premera 10 cm in višine 5 cm, na katere smo ob meritvah toka CO₂ iz tal nameščali kiveto merilnega instrumenta (glej sliko 5). Znotraj posameznega območja so bili ovratniki oddaljeni drug od drugega okoli 30 – 50 cm. Cev je bila od ovratnika oddaljena 20 – 30 cm. Med posameznimi skupinami je bila razdalja med 100 in 150 cm.

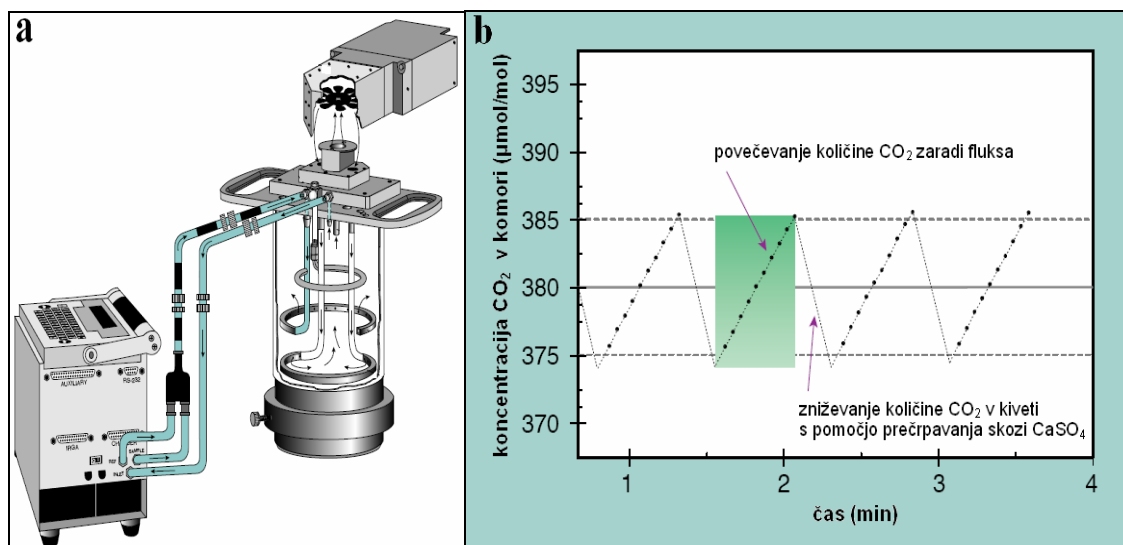
Na razdalji med 20 in 30 cm od vsakega ovratnika smo v tla vertikalno vgradili PVC cev za merjenje vode po talnem profilu. S svedrom smo v tla izvrtali luknje za PVC cevi. Izvrtano tla smo nato presejali skozi sito. Presejana tla smo stresli v vedro in dodali vodo. Mešanico smo gnetli toliko časa, dokler nismo dobili paste. Tako dobljeno pasto smo iztisnili v izvrtane luknje. Nato smo namestili 70 cm dolge PVC cevi, ki smo jih predhodno zmočili zaradi lažjega nameščanja.



Slika 4: Fotografija poskusnega polja v Stavešincih. Na fotografiji so označena mesta, kjer smo merili tok CO₂ iz tal in vsebnost vlage v tleh (Foto: Dominik Vodnik)

3.2.2 Merjenje toka talnega CO₂, temperature tal in vsebnosti vode v tleh

Meritve toka talnega CO₂, temperature tal in vsebnosti vode v tleh so potekale med vegetacijsko sezono od junija do novembra leta 2005 in od aprila do novembra leta 2006. Ovratnike smo v času poskusa pustili na raziskovalni ploskvi. Pred samimi meritvami smo iz njihove notranjosti odstranjevali vegetacijo. Meritev toka talnega CO₂ je potekala z dinamično metodo, z uporabo LI-6400-09 prenosnega sistema za merjenje fotosinteze (LI-COR, inc., Lincoln, NE, ZDA), opremljenega s komoro za meritve toka CO₂ (Slika 5a). 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. Aparat s prečrpavanjem zmanjša koncentracijo CO₂ v komori in nato meri čas, ki je potreben, da se koncentracija znotraj komore izenači s tarčnimi vrednostmi (Slika 5b). Tako dobimo hitrost toka CO₂ iz tal za površino, ki jo pokriva komora.



Slika 5: a) Merilna naprava LI-6400-09, b) spremembe koncentracije CO₂ v merilni komori LI-6400-09, prikazani so štirje merilni cikli (LI-6400-09 Soil CO₂..., 1997)

Meritve smo izvajali v dvotedenskih intervalih med celotno vegetacijsko sezono, v obdobju od septembra do novembra pa enkrat mesečno. Meritve so potekale med 8:00 in 13:00 uro (po lokalnem času, GMT + 1), v dveh ali treh ponovitvah na posameznem ovratniku.

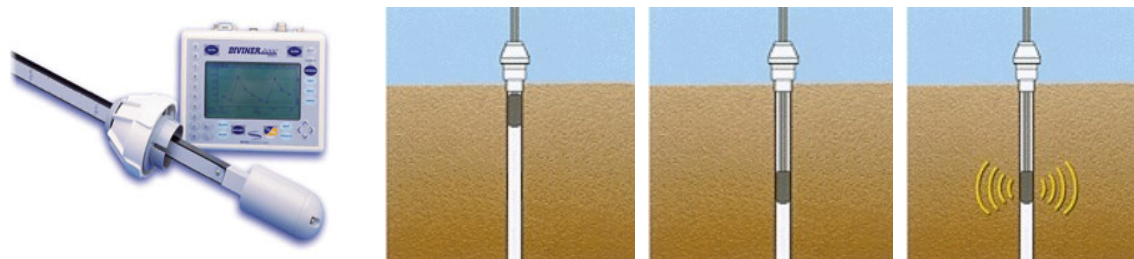
Na območju velike talne CO₂ koncentracije so se v vetrovnih dnevih pojavljale velike in nagle spremembe v izpustih CO₂ iz tal in v takšnih merilnih dnevih smo upoštevali, da je tok, ki smo ga izmerili na območju kontrolnega CO₂, veljal kot tarčni tok. Sprememba (delta) vrednosti CO₂, ki je determinirana kot vrednost koncentracije, pri kateri se preračunavajo vrednosti toka, smo na kontrolnih točkah nastavili na 10 µmol mol⁻¹, na območju srednjega 10 – 20 µmol mol⁻¹ in 50 µmol mol⁻¹ na lokacijah velikega CO₂.

Dnevni tok CO₂ smo izmerili 22. junija 2005. Z meritvijo toka smo pričeli ob 7. uri zjutraj in končali ob 20. uri. Meritve na posameznem ovratniku smo opravili ciklično, in sicer v sedmih zaporednih meritvah.

Sočasno z meritvami toka CO₂ smo merili tudi temperaturo tal s sondo (Omega Engineering Inc., Stamford, ZDA), ki je priključena na LI-6400-09. Temperaturo smo merili do globine 10 cm, v neposredni bližini ovratnikov.

Vzporedno z meritvami talnega CO₂ toka in temperature tal smo merili volumsko vsebnost vode v tleh. Meritve so potekale z napravo Diviner 2000 (Sentek Pty Ltd, Avstralija). Naprava je dielektrični senzor oz. nadzorovalni sistem za ugotavljanje vsebnosti vode na enakomernih 10 cm dolgih intervalih. Deluje na principu FD (Frequency Domain) metode. To je princip merjenja frekvence. Sestavljajo jo valjasta sonda, zaslon in okrogle PVC cevi (premera 5 cm), namenjene vstavljanju sonde (Diviner 2000..., 2000). Ko je sonda

vstavljena v tla ali v PVC merilno cev, nameščeno na polju, in jo aktiviramo (s pomočjo radio frekvenc), sistem tla-voda-zrak okoli PVC cevi ustvarja dielektričnost kondenzatorja, le ta pa zaključi oscilacijski krog (Slika 6). Spremembe v vsebnosti vode v tleh povzročijo premik – spremembo frekvence (Starr in Platineau, 2002). Za zanesljivo oceno vsebnosti vode v tleh je zelo pomembno, da je stik med cevjo za sondo in poroznim sistemom dober (Zupanc in Pintar, 2001).



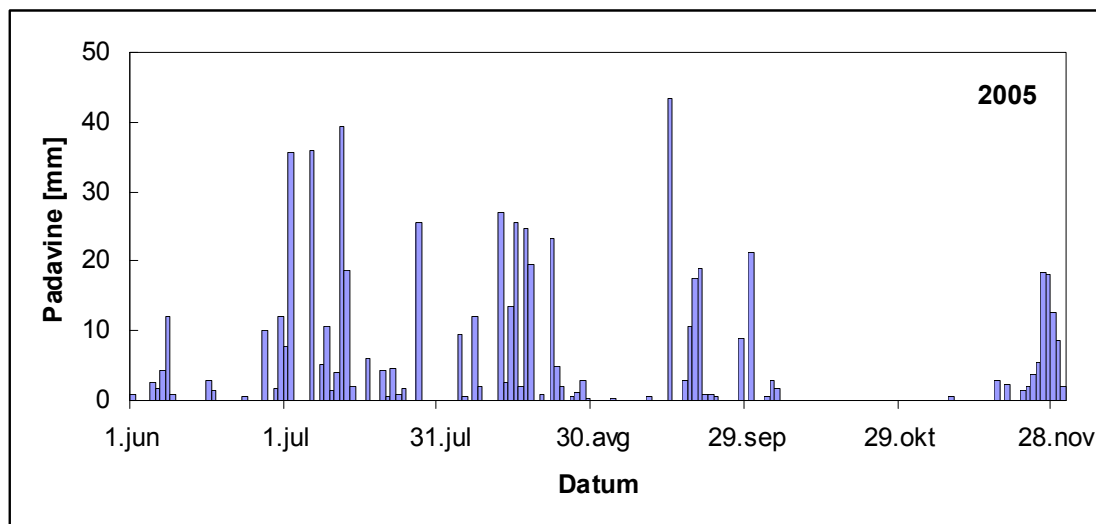
Slika 6: Merilna sonda Diviner 2000 z data loggerjem ter potek meritev z Diviner 2000 sondo v merilni cevi nameščeni v tleh (Diviner 2000..., 2000)

4 REZULTATI

Meritve vsebnosti vode v tleh so potekale v letih 2005 in 2006 na poskusnem polju v Stavešincih, med vegetacijsko sezono od aprila do novembra. Sočasno z meritvami vsebnosti vode v tleh smo merili tudi tok CO₂ iz tal. Podatke o padavinah smo dobili iz arhiva Urada za meteorologijo Agencije Republike Slovenije za okolje (ARSO), za dežemerno postajo Kadrenci, ki se nahaja v bližini našega poskusnega polja.

4.1 PADAVINE IN VSEBNOST VODE V TLEH

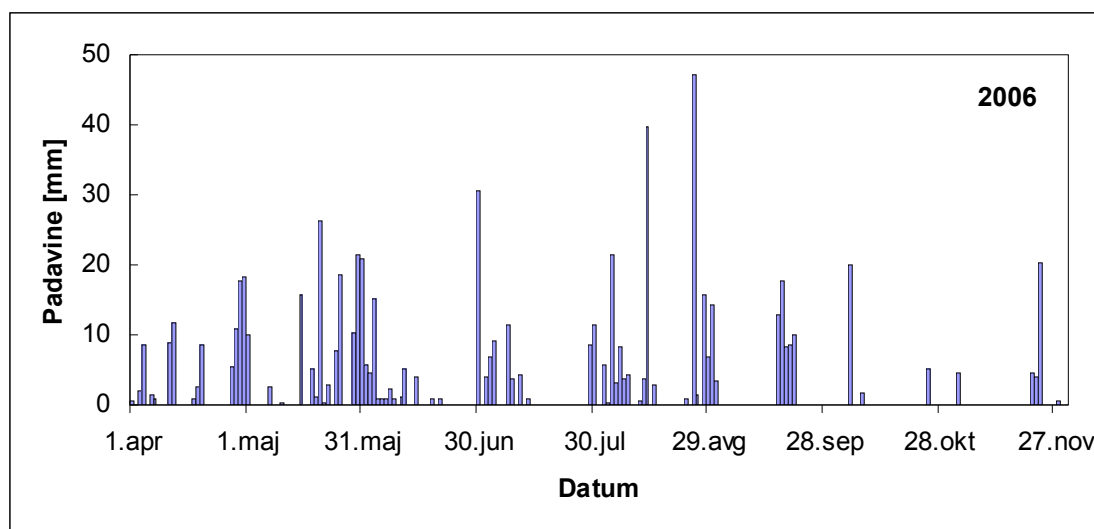
Junija leta 2005 je bilo padavin v Kadrencih malo (Slika 7), saj je skupaj padlo samo 51 mm dežja. Največ padavin je padlo julija, 204 mm, in avgusta 174 mm. V juliju so dnevne padavine trikrat presegle 35 mm. Sušno obdobje je bilo od 24. avgusta do 13. septembra, ko je skupaj padlo le 8 mm padavin. Po obdobju suše je sledil dan z največ padavinami, to je 14. september, ko je padlo 43 mm. Skupaj je septembra padlo 127 mm padavin. Sledil je zelo suh oktober, skupaj je padlo samo 5 mm padavin. Sušno obdobje se je nadaljevalo vse do zadnje dekade novembra, ko je zopet padlo nekaj več dežja. Skupno je novembra padlo 78 mm padavin.



Slika 7: Dnevne količine padavin za leto 2005 na pluviografski postaji Kadrenci (Podatki ..., 2007)

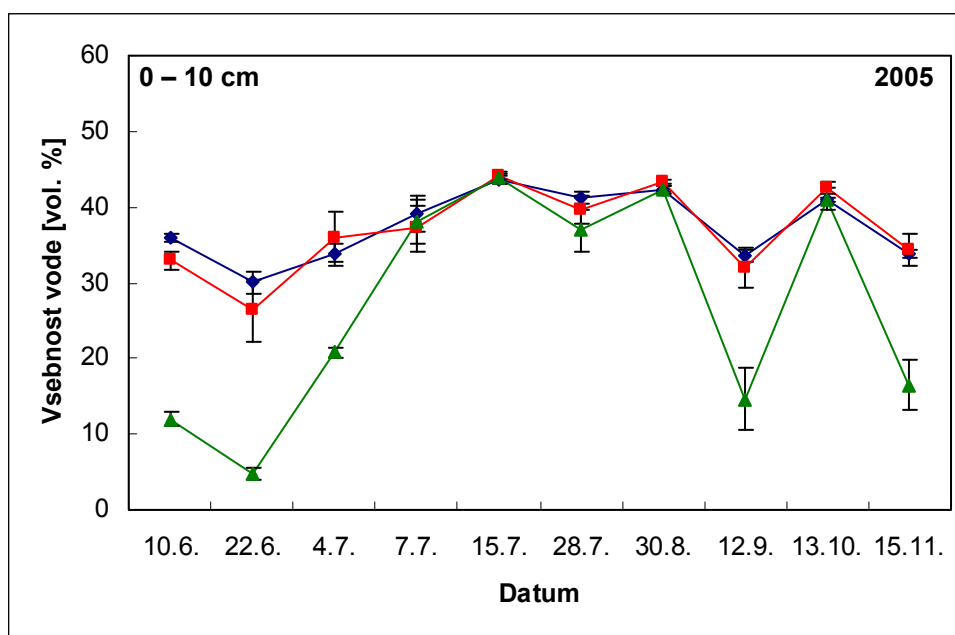
Leta 2006 je bilo v obdobju od aprila do novembra v Kadrencih (Slika 8) padavin manj kot leta 2005. Aprila je padlo 98 mm in maja 143 mm padavin. Junija je bilo padavin manj, saj je padlo 74 mm dežja, od tega 30. junija kar 30 mm. Sledil je še bolj suh julij, ko je padlo 60 mm padavin. V juliju je bilo obdobje, ko v 15 dneh ni padla niti kaplja dežja. Največ padavin je bilo avgusta, ko je padlo 184 mm. Avgusta sta bila tudi dneva z največ padavinami, in sicer 13. avgust s 40 mm padavin in 25. avgust, ko je padlo 47 mm. Sledili so trije sušni meseci z malo dežja. Septembra je padlo 57 mm padavin, celotna količina je padla v petih dneh od 16. do 20. avgusta. Oktober je bil najbolj sušen mesec, saj so bili samo trije dnevi s padavinami, padlo je 27 mm dežja. Tudi november je bil sušen, imel je pet padavinskih dni s skupno 34 mm dežja.

Predvidevali smo, da se vzorec padavin odraža tudi v vsebnosti vode v tleh. Ob manjših padavinah bi povečanje vlažnosti tal pričakovali predvsem v zgornjih plasteh tal. Zato smo meritve izvajali po horizontih do globine 30 cm na vsakih 10 cm. Rezultati so prikazani na slikah 9 – 11 za leto 2005 in slikah 12 – 14 za leto 2006, in sicer ločeno za območja majhne, srednje in velike obogatitve z geogenim CO₂.



Slika 8: Dnevne količine padavin za leto 2006 na pluviografski postaji Kadrenci (Podatki ..., 2007)

Na območju majhnega toka CO₂ je bila v **zgornji plasti tal** (0 – 10 cm, Slika 9) vsebnost vode 10. junija 12 vol. %, nato je 22. junija padla na najmanjšo vrednost, to je pod 5 vol. %. Vsebnost vode je nato naraščala do 15. julija, kjer je dosegla največjo vrednost 44 vol. %. Veliko zmanjšanje vsebnosti vode lahko opazimo v prvi dekadi septembra, do 12. septembra je padla na 15 vol. %. Za ta datum je opazna tudi večja variabilnost. V naslednjem mesecu dni se je količina vode v tleh zopet povečala na 41 vol. %. Podoben padec kot septembra je bil tudi v prvi polovici novembra, ko je vsebnost vode dosegla vrednost 26 vol. %. Tudi tu je variabilnost med merilnimi mesti velika.

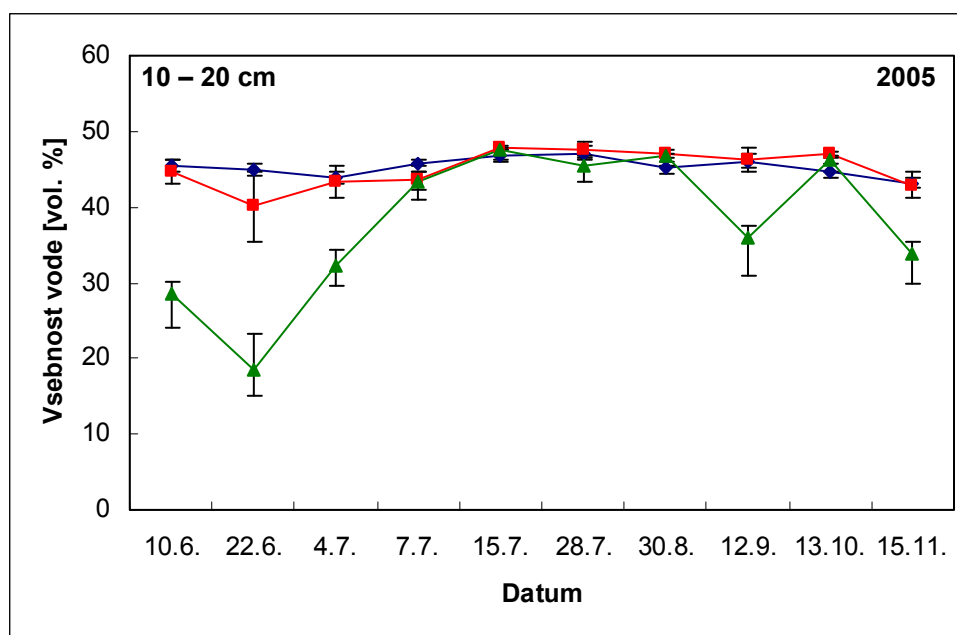


Slika 9: Vsebnost vode v tleh na poskusnem polju Stavešinci za globino 0 – 10 cm. Podatki so prikazani za leto 2005 za območja majhne (zeleni), srednje (rdeča) in velike (modra) obogatitve z geogenim CO₂.

Vsebnost vode pri srednji obogatitvi s CO₂ je bila 10. junija 33 vol. %. Tudi na območju srednjega toka CO₂ je bila vsebnost vode najmanjša 22. junija, to je 26 vol. %. Tu se kaže tudi večja variabilnost. Nato je količina vode v tleh naraščala do 15. julija, ko je bila njena vrednost največja, 44 vol. %. Vsebnost vode v tleh se je manjšala do 12. septembra in se nato nekoliko zvečala do 13. oktobra. Do 25. novembra se je vsebnost vode nekoliko zmanjšala in je znašala 34 vol. %, kar je podobno kot 10. junija.

Potek vsebnosti vode je bil na območju velikega toka CO₂ podoben kot pri srednji obogatitvi s CO₂. Vsebnost vode na začetku je bila malo večja in sicer 36 vol. %. Na območju velike obogatitve s CO₂ se vsebnost vode v tleh najmanj spreminja, med najmanjšo in največjo vrednostjo je manj kot 13 vol. %.

Na območju majhnega toka CO₂ je potek **na globini 10 – 20 cm** (Slika 10) enak kot na globini 0 – 10 cm, le vsebnost vode je pri vseh meritvah večja. 10. junija je bila vsebnost vode 29 vol. %. Najmanj vode je bilo v tleh 22. junija, to je 18 vol. %. Pri obeh junijskih meritvah je pri majhnem toku CO₂ variabilnost nekoliko večja. Vsebnost vode se je nato povečevala do 15. julija na 48 vol. %. Do konca avgusta se količina vode v tleh ni spreminjala. Zmanjšala se je 12. septembra na 36 vol. %, do 13. oktobra pa je zopet narasla nazaj na pozno poletni nivo. Pri zadnji meritvi 15. novembra se je vsebnost vode zopet nekoliko zmanjšala, na 34 vol. %.

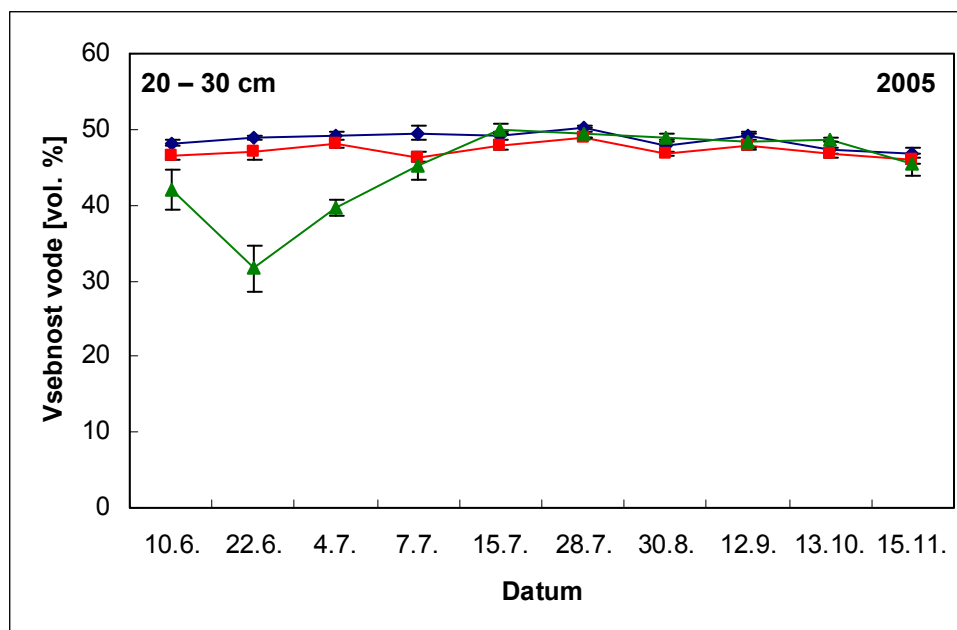


Slika 10: Vsebnost vode v tleh na poskusnem polju Stavešinci za globino 10 – 20 cm. Podatki so prikazani za leto 2005 za območja majhne (zeleni), srednje (rdeča) in velike (modra) obogatitve z geogenim CO₂.

Vsebnost vode pri srednji obogatitvi s CO₂ je bila 10. junija 45 vol. %. Najmanj vode v tleh je bilo 22. junija, 40 vol. %. Za ta datum je tudi variabilnost največja. Vsebnost vode je naraščala do 15. julija do 48 vol. % in se nato do 15. novembra malenkostno zmanjšala do 43 vol. %.

Vrednosti na velikem toku CO₂ so primerljive z vrednostmi pri srednji obogatitvi. Pri prvi (10.6.) in zadnji meritvi (15.11.) so vrednosti skoraj enake. Skozi vso sezono se je vsebnost vode v tleh le malo spreminjala. Med najmanjšo in največjo vrednostjo je le 2 vol. % razlike.

Vsebnost vode je bila na območju majhnega toka CO₂ na **globini 20 – 30 cm** (Slika 11) 10. junija 42 vol. %. Do 22. junija je padala in dosegla spodnjo mejo pri 32 vol. %. Tudi na tej globini je pri obeh junijskih meritvah pri majhnem toku CO₂ variabilnost nekoliko večja. Vsebnost vode je nato naraščala do 15. julija, do 50 vol. %, kjer se je ustalila. Nato se vsebnost vode do 15. novembra ni več bistveno spreminjala, saj se je počasi v štirih mesecih zmanjšala za samo 5 vol. % na 45 vol. %.

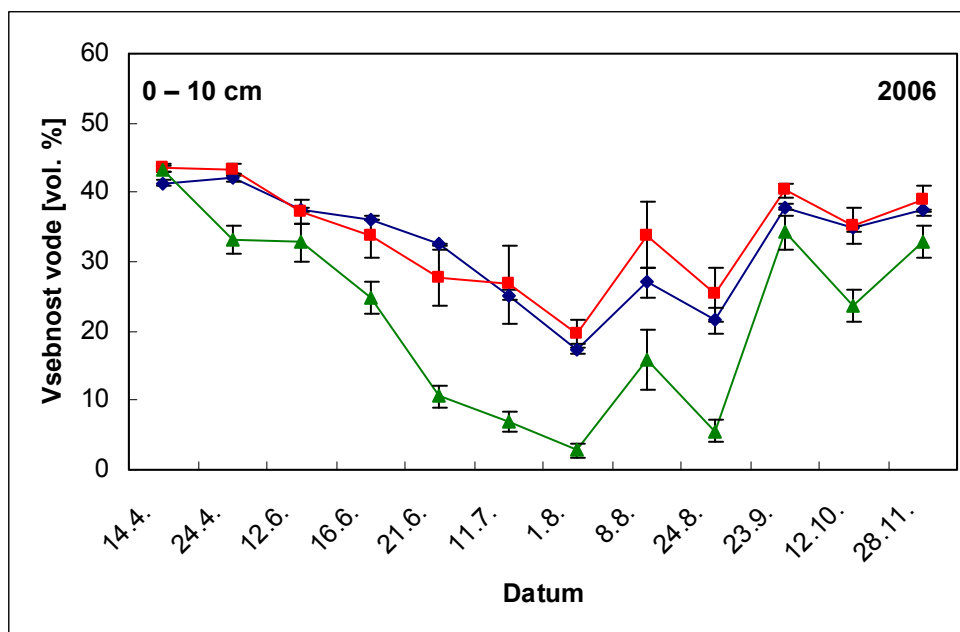


Slika 11: Vsebnost vode v tleh na poskusnem polju Stavešinci za globino 20 – 30 cm. Podatki so prikazani za leto 2005 za območja majhne (zeleni), srednje (rdeča) in velike (modra) obogatitve z geogenim CO₂.

Za srednji tok CO₂ je bila 10. junija izmerjena vsebnost vode malo pod 47 vol. %. Vsebnost vode se skozi vso rastno dobo ni veliko spreminjala. Med najmanjšo in največjo vrednostjo je bilo manj kot 3 vol. % razlike.

Na območju velike obogatitve z geogenim CO₂ je potek podoben kot pri srednji obogatitvi. Razlika je samo v vsebnosti vode, saj je pri vseh meritvah nekoliko večja. Samo 7. junija je ta razlika večja kot 3 vol. %, pri vseh ostalih meritvah je razlika 2 vol. %, ali celo manj.

V letu 2006 je bila količina vode v tleh v primerjavi z 2005 bolj spremenljiva. Vsebnost vode na območju majhnega toka CO₂ na globini 0 – 10 cm (Slika 12) je v sredini aprila 2006 znašala 43 vol. %. Nato se je manjšala do 1. avgusta, ko je bila samo 3 vol. %. V naslednjem tednu se je povečala na 16 vol. %. Za ta datum je opazna večja variabilnost med merilnimi mesti. Do 24. avgusta se je vsebnost vode spet zmanjšala. Do velikega povečanja vsebnosti vode je prišlo septembra, ko je vsebnost narasla na 34 vol. %. Do 12. oktobra se je količina vode prehodno spet nekoliko zmanjšala.

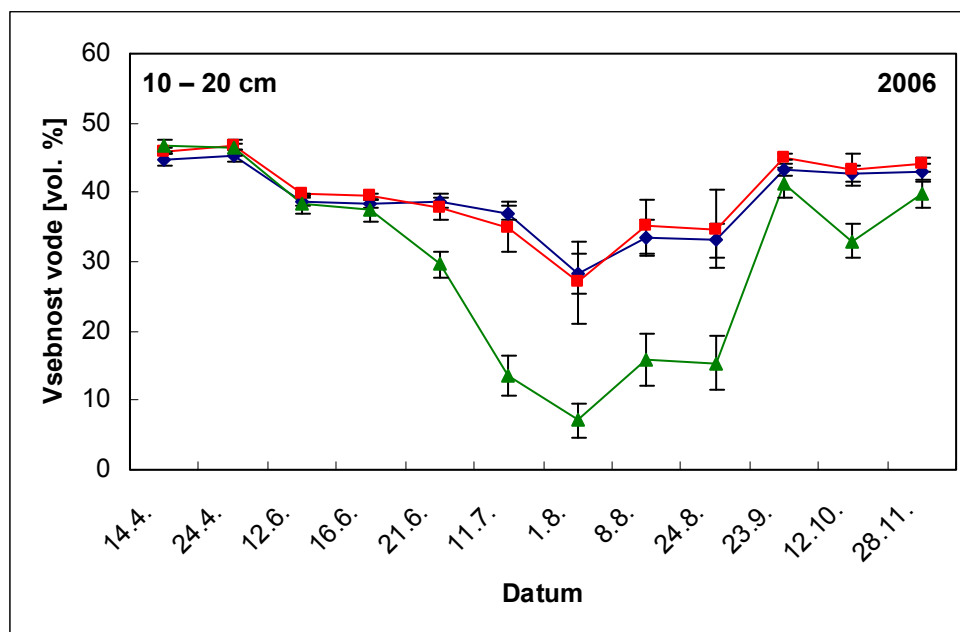


Slika 12: Vsebnost vode v tleh na poskusnem polju Stavešinci za globino 0 – 10 cm. Podatki so prikazani za leto 2006 za območja majhne (zeleni), srednje (rdeča) in velike (modra) obogatitve z geogenim CO₂.

Na območju srednje obogatitve z geogenim CO₂ je bila 14. aprila vsebnost vode enaka kot pri majhni obogatitvi. Prav tako se je nato do poletja zmanjševala in v začetku avgusta dosegla minimum (20 vol. %), ki pa je precej večji kot v primeru tal, kjer je geogenega CO₂ malo oz. ga ni. Nato se je začela vsebnost vode večati. 8. avgusta je dosegla 34 vol. %. Tako kot pri majhnem toku CO₂ je za ta datum nekoliko večja variabilnost. Do 24. avgusta se je vsebnost vode zmanjšala na 25 vol. % in do 23. septembra spet povečala na 40 vol. % in se ni bistveno spremenila do konca novembra.

Vsebnost vode na območju velikega toka CO₂ je 14. aprila podobna kot na območju majhnega in srednjega toka, to je 41 vol. %. Prav tako se manjša do 1. avgusta, ko je vsebnost vode v tleh 17 vol. %. Potek od avgusta do konca novembra je podoben poteku na srednjem toku CO₂, le vrednosti so nekoliko manjše.

Na **globini 10 – 20 cm** (Slika 13) je bila 14. aprila količina vode na območju majhnega toka CO₂ 47 vol. %. Do 24. aprila se ni spreminjala. 12. junija je bila vsebnost vode 38 vol. % in se do 16. junija ni spremenila. Nato se je manjšala do 1. avgusta, ko je bilo vode v tleh samo 3 vol. %. Avgusta se je količina vode začela večati do 23. septembra, kjer je dosegla 41 vol. %. Še posebej se je zvečala po 24. avgustu. Do 12. oktobra se je vsebnost vode zmanjšala na 33 vol. % in se do 28. novembra spet povečala, na 40 vol. %.

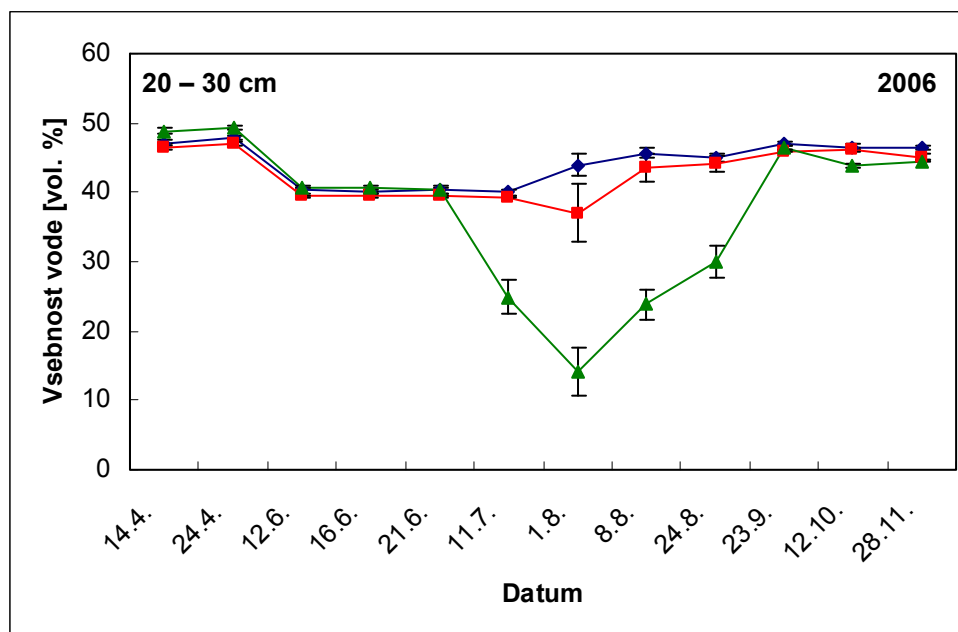


Slika 13: Vsebnost vode v tleh na poskusnem polju Stavešinci za globino 10 – 20 cm. Podatki so prikazani za leto 2006 za območja majhne (zeleni), srednje (rdeča) in velike (modra) obogatitve z geogenim CO₂.

Vsebnost vode na območju srednjega toka CO₂ je bila 14. aprila 46 vol. %. Do 16. junija je bil potek enak kot pri majhnem toku CO₂, kjer je bila količina vode 37 vol. %. Ta je se do 1. avgusta prav tako zmanjševala do najmanjše vrednosti, 27 vol. %. Do 23. septembra se je količina vode v tleh povečevala do 45 vol. %. Pri avgustovskih meritvah je bila tudi variabilnost večja. Do konca novembra se nato vsebnost vode v tleh ni več spreminjala.

Potek vsebnosti vode v tleh na območju velikega toka na globini 10 – 20 cm je skozi celo sezono skoraj povsem enak kot na območju srednjega toka. Vrednosti pri vseh meritvah se razlikujejo za manj kot 2 vol. %.

Vsebnost vode na **globini 20 – 30 cm** (Slika 14) pri majhni obogatitvi s CO₂ je bila 14. aprila 49 vol. %. Do naslednje meritve 24. aprila se ni spreminjala. Nato se je do 12. junija zmanjšala na 40 vol. % in ostala do 21. junija nespremenjena. Do 1. avgusta je sledil velik padec vsebnosti vode do najmanjše vrednosti 14 vol. %. Količina vode v tleh se je nato povečevala do 23. septembra na 47 vol. %. Do konca novembra se je zmanjšala za 2 vol. %.



Slika 14: Vsebnost vode v tleh na poskusnem polju Stavešinci za globino 20 – 30 cm. Podatki so prikazani za leto 2006 za območja majhne (zeleno), srednje (rdeča) in velike (modra) obogatitve z geogenim CO₂.

Na območju srednjega toka CO₂ je potek vsebnosti vode v tleh od 14. aprila do 21. junija enak poteku pri majhnem toku. Pri srednjem toku so vrednosti do 2 vol. % manjše. Za razliko od območja majhnega toka CO₂, se po 21. juniju količina vode v tleh ni zmanjševala tako hitro, ampak je ostala do 11. julija celo nespremenjena. Do 1. avgusta se je zmanjšala na 37 vol. %. Do 23. septembra se je nato količina vode v tleh večala do 46 vol. % in se do konca novembra ni več spreminjala.

Potek vode v tleh na območju velike obogatitve s CO₂ na globini 20 – 30 cm je tako kot na globini 10 – 20 cm skozi celo sezono skoraj povsem enak kot na območju srednje obogatitve s CO₂. Vrednosti pri vseh meritvah se razlikujejo za manj kot 2 vol. %, razen 1. avgusta, ko je pri območju velikega toka CO₂ količina vode v tleh večja za 7 vol. % in znaša 37 vol. %.

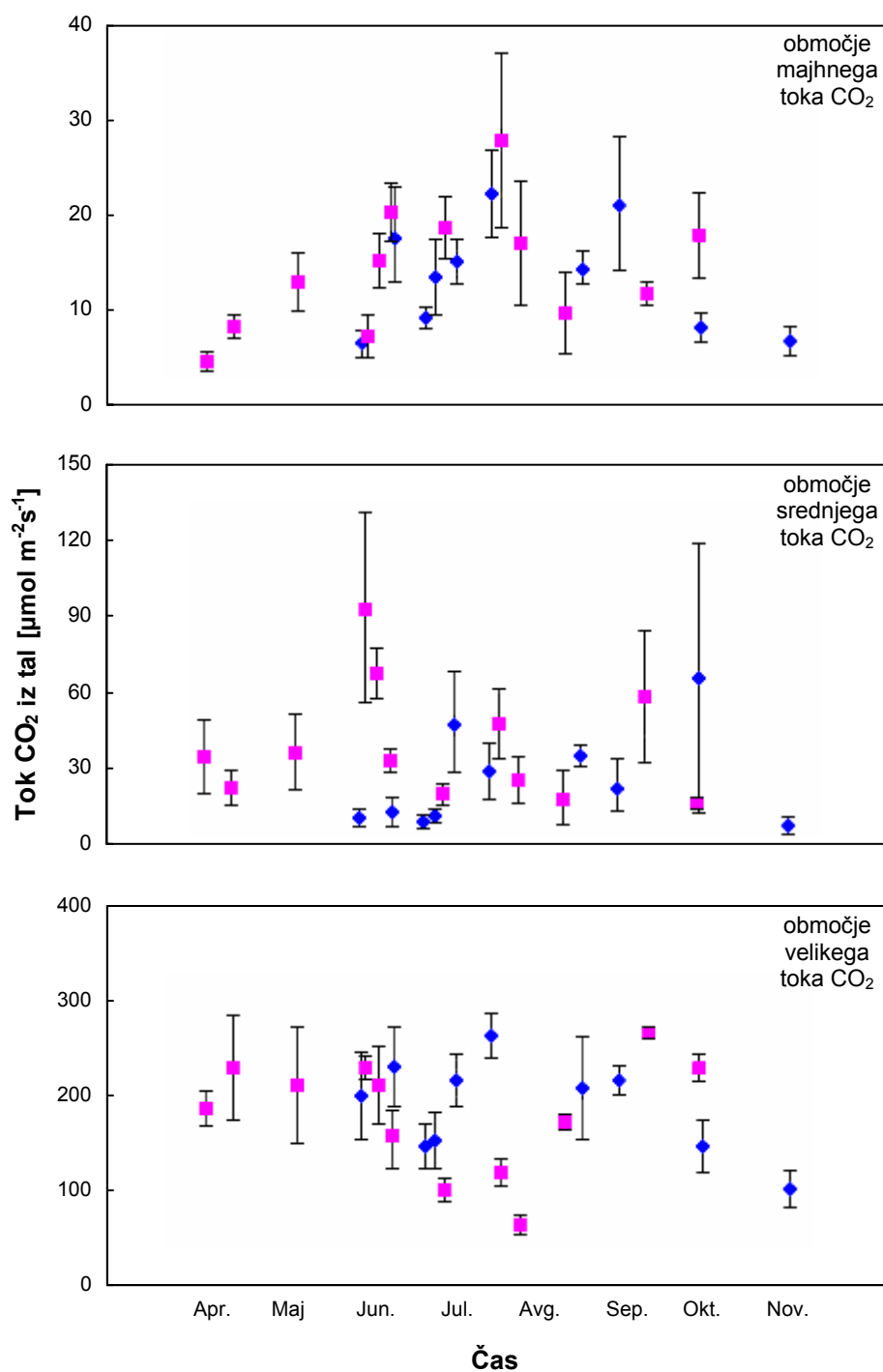
4.2 SEZONSKI POTEK TOKA CO₂ IZ TAL

Tok CO₂ se je na območjih, ki so različno obogatene z geogenim CO₂, zelo razlikoval (Slika 15). Vrednosti toka se na območju, ki ni obogateno z geogenim CO₂, gibljejo med 4,6 in 27,9 μmol m⁻² s⁻¹. Na območju srednje obogatitve se vrednosti toka CO₂ gibljejo med 6,1 in 92,4 μmol m⁻² s⁻¹. Največje vrednosti so bile pričakovano na območju, ki je zelo obogateno z geogenim CO₂, kjer so vrednosti dosegale do 268,2 μmol m⁻² s⁻¹.

Na območju majhnega toka CO₂ je njegov potek v obeh letih podoben in kaže sezonsko spremenljivost. Spomladi je tok CO₂ iz tal manjši in se postopoma veča z viškom v poletnih mesecih (julij, avgust). V jesenskem času se tok začne zmanjševati in je primerljiv s spomladansko vrednostjo. Vrednosti toka CO₂ se gibljejo med 4,6 in 27,9 μmol m⁻² s⁻¹. V letu 2006 je variabilnost večja, še posebej izrazita je pri avgustovskih meritvah.

Na območju srednje obogatitve s CO₂ takega poteka, kot je na območju majhnega toka, ni videti. Na območju srednje obogatitve je večja variabilnost za leto 2006. Vrednosti talnega toka CO₂ so večje kot na območju majhne obogatitve CO₂. Največja vrednost v letu 2005 je bila 13. oktobra 63,9 μmol m⁻² s⁻¹, leta 2006 pa 12. junija, ko je bila 92,4 μmol m⁻² s⁻¹. Najmanjše vrednosti so bile leta 2005, in sicer 4. in 7. junija, ko so bile vrednosti 6,7 oz. 8,0 μmol m⁻² s⁻¹ in 15. novembra 6,1 μmol m⁻² s⁻¹.

Na območju velikega toka CO₂ njegove vrednosti dosegajo do 268,2 μmol m⁻² s⁻¹. O jasnem sezonskem vzorcu, kot se je pokazal na območju majhnega toka CO₂, ne moremo govoriti. Na območju velikega toka je bila variabilnost toka CO₂ nekoliko večja leta 2006, veliko variabilnost pa smo izmerili tudi spomladi 2006.



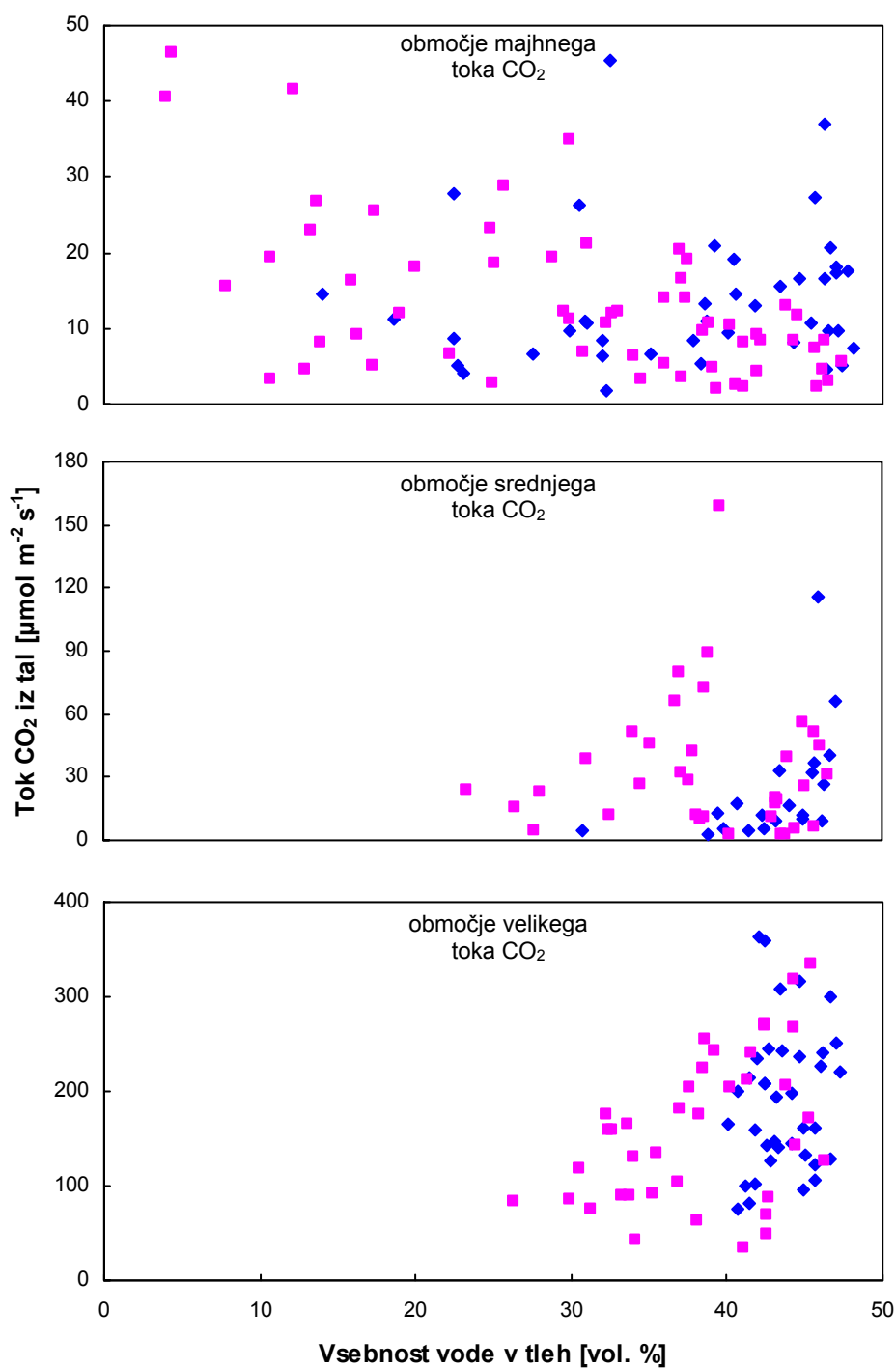
Slika 15: Prikaz sezonskega toka talnega CO₂ na mofeti Stavešinci. Podatki so predstavljeni za leto 2005 (modra) in leto 2006 (vijolična) na območjih, ki so različno obogatena z geogenim CO₂ (majhna, srednja in velika).

4.3 VPLIV VSEBNOSTI VODE V TLEH NA TOK TALNEGA CO₂

Primerjavo vsebnosti vode v tleh in toka CO₂ smo ločeno opravili za območja, ki se razlikujejo v izpostavljenosti geogenemu CO₂ (Slika 16). Na območju, kjer je ta majhna oz. geogenega CO₂ ni, smo najmanjše vrednosti toka CO₂ 2 μmol m⁻² s⁻¹ izmerili večkrat pri različnih vsebnostih vode v tleh. Največji izmerjen tok CO₂ je bil leta 2005 45,3 μmol m⁻² s⁻¹ pri 33 vol. %, leta 2006 pa 46,5 μmol m⁻² s⁻¹, ko je bilo v tleh samo 4 vol. %. Tok CO₂ ne kaže odvisnosti od vsebnosti vode v tleh.

Vrednosti toka CO₂ na območju srednje obogatitve z geogenim CO₂ so večje od vrednosti na območju majhne obogatitve. Najmanjša izmerjena vrednost CO₂ leta 2005 je bila 2,5 μmol m⁻² s⁻¹ pri 44 vol. % vode v tleh. Največja vrednost toka CO₂ je bila izmerjena leta 2006, to je 158,8 μmol m⁻² s⁻¹, pri 40 vol. %. Tudi na tem območju ni opaziti odvisnosti toka CO₂ od vsebnosti vode v tleh.

Vrednosti toka CO₂ iz tal so na tem območju dosegale največje vrednosti, to je do 363,8 μmol m⁻² s⁻¹ leta 2005, ob vsebnosti vode 44 vol. %. Najmanjša vrednost CO₂ je bila leta 2006, 34 μmol m⁻² s⁻¹, ob 41 vol.% vode v tleh. Vsebnost vode je bila večja leta 2005, kar pa ni vplivalo na tok CO₂, ki ne kaže jasne odvisnosti od vsebnosti vode v tleh.



Slika 16: Tok CO₂ iz tal glede na vsebnost vode v tleh do globine 30 cm na mofeti Stavešinci. Podatki so predstavljeni za leto 2005 (modra) in leto 2006 (vijolična) na območjih, ki so različno obogatena z geogenim CO₂ (majhna, srednja in velika).

5 RAZPRAVA IN SKLEPI

5.1 RAZPRAVA

Poskus za diplomsko nalogo smo zasnovali na dejstvu, da imamo kljub intenzivnim raziskavam na mofetah za ta rastišča malo podrobnejših raziskav o prehajanju CO₂ iz tal v atmosfero. Zanimalo nas je, kakšne so lastnosti toka CO₂ iz tal na območju naravnega izvira CO₂ Stavešinci in kako nanj vpliva različna vsebnost vode v tleh.

5.1.1 Tok CO₂ iz tal

Tok CO₂ iz tal se je na območjih, ki so različno obogatena z geogenim CO₂ zelo razlikoval. Na območju, kjer ni obogatitve z geogenim CO₂, smo ob meritvah v Stavešincih na lokacijah, ki so bile privzete kot kontrolne, izmerili vrednosti od 4,6 do 27,9 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. 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. Vrednosti so nihale med 0,17 in 0,31 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Te vrednosti 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 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 zmernega pasu, kjer je razpoložljivost vode večja. V tem primeru se vrednosti približajo tistim, ki smo jih izmerili v naši raziskavi. Na Japonskem so na travniku, kjer so bile prisotne tako C₃ kot C₄ rastline, izmerili vrednosti toka CO₂ v tleh, ki so znašale med 5 in 12 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Wang in sod, 2005). Podobne rezultate so dobili tudi pri poskusu, izvedenem v Kanadi. Tu so prav tako kot v našem poskusu merili vrednosti toka CO₂ z aparatom LI-6400-09. Meritve so se izvajale v letih 2001 in 2002 na mešanem travniku, na območju, kjer je dolgoletno povprečje padavin okoli 400 mm. V letu 2001 je bila vsota padavin kar za polovico manjša od dolgoletnega povprečja, temu primerno so bili tudi tokovi CO₂ v tleh 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).

V rezultatih se vrednosti toka CO₂ na območju srednje obogatitve gibljejo med 6,1 in 92,4 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Največje vrednosti so bile pričakovano na območju, ki je zelo obogateno z geogenim CO₂, kjer je tok dosegal 268,2 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Razliko v vrednostih gre pripisati temu, da so izpusti geogenega CO₂ na območju velike obogatitve zelo veliki, z oddaljevanjem od glavnih virov pa se zmanjšujejo. Ko se dovolj oddaljimo in ni več pričakovati vpliva geogenega CO₂, so vrednosti toka zelo majhne (glej prejšnji odstavek). Pričakovati je, da je v tem primeru CO₂, ki ga sproščajo tla, rezultat respiratorne aktivnosti talnih mikroorganizmov in korenin.

Sezonski vzorec toka CO₂ iz tal opazimo le na območjih z majhno obogatitvijo z geogenim CO₂. V poletnih mesecih smo izmerili tudi do trikrat večje vrednosti toka CO₂ v tleh kot v spomladanskih oz. jesenskih mesecih. Povečan tok v poletnih mesecih je najverjetneje posledica večje respiratorne aktivnosti talnih mikroorganizmov in korenin zaradi ugodnejših temperatur in večje vodne razpoložljivosti. Ta, sicer zelo spremenljiva dejavnika, sta odločilna za velikost toka respiratornega CO₂ (Tang in sod., 2005). Spomladi, ko so tla še hladnejša, je tudi dihanje tal manjše, zato je tok CO₂ iz tal manjši. Poleti, ko so tla najtoplejša, je tok CO₂ v tleh največji. Ko se začnejo tla spet ohlajati in se aktivnost rastlin začne umirjati, se zmanjša dihanje tal, zato je jeseni tudi tok CO₂ iz tal manjši.

Na območjih z geogenim CO₂ sezonskega vzorca toka CO₂ iz tal nismo opazili. Sklepamo, da je v tem primeru tok odvisen predvsem od dotoka CO₂ in zračne prevodnosti tal, ki pa je poleg fizikalnih lastnosti tal odvisna od vsebnosti vode v tleh. Očitno je, da ima v takšnih tleh temperatura tal bistveno manjši vpliv na tok CO₂, sezonski vzorec pa zato izostane.

Pri merjenju toka CO₂ v Stavešincih je bilo na določenih lokacijah oz. ovratnikih moč opaziti veliko nihanje med posameznimi mesečnimi meritvami. Največjo variabilnost lahko opazimo na lokacijah s srednjim tokom CO₂, predvsem na mestih, ki so mejna med deli mofete z največjimi koncentracijami talnega CO₂ in deli, kjer ne moremo govoriti o obogatitvi z geogenim CO₂. Najverjetneje gre vzroke za spremenljivost toka CO₂ iskati v spremembah prevodnosti tal za pline. Na to vpliva predvsem vsebnost vode v tleh. Na območju našega poskusa so tla težka in imajo dobro sposobnost zadrževanja vode. Struktura tal se zaradi vsebnosti vode in temperature nenehno spreminja. Prav zaradi spremembe strukture tal si talni CO₂ različno utira pot na površje. Vedno izhaja po najlažji poti. Ob veliki suši so se naredile globoke razpoke in CO₂ se je premeščal po njih iz območja velike obogatitve in izhajal na tem mestu, zato so bile izmerjene vrednosti tako velike. Takšno variabilnost lahko opazimo 13. oktobra 2005. Pred to meritvijo je bilo sušno obdobje, saj je v 23 dneh padlo samo 37 mm, en teden pred meritvijo pa padavin sploh ni bilo. Prav tako se velika variabilnost kaže 12. junija 2006, ko je bilo padavin pred tem tudi zelo malo. Spet drugič, ko teh razpok ni bilo, ali pa so se naredile na drugem mestu, si je geogeni CO₂ pot utiral nekje drugje in so bile zato takrat vrednosti izmerjenega CO₂ manjše.

5.1.2 Vpliv vsebnosti vode v tleh na tok CO₂ iz tal

Na vsebnost vode v zgornji plasti tal močno vplivajo padavine. To dobro ilustrirajo tudi rezultati meritev. Nekaj primerov: leta 2005 je bil junij zelo suh, do meritve 22. junija je padlo samo 40 mm, zato je bila tudi vsebnost vode v tleh majhna. Na območju, kjer ni obogatitve z geogenim CO₂, je bila vsebnost vode manj kot 5 vol. %, na območju velike obogatitve pa 30 vol. %. Do 15. julija je padlo 185 mm padavin, kar je vplivalo na vsebnost vode v tleh. Na območju, kjer ni obogatitve z geogenim CO₂, kot tudi na območju

velike obogatitve, se je vsebnost vode povečala na 44 vol. %. Tudi sušno obdobje, ko je med meritvama od 30. avgusta do 12. septembra padlo manj kot 1 mm padavin, kaže vpliv na vsebnosti vode v tleh. Na območju, kjer ni obogatitve z geogenim CO₂, se je vsebnost vode zmanjšala z 42 vol. % na 15 vol. %, na območju velike obogatitve pa z 42 vol. % na 34 vol. %. Leta 2006 je bil potek padavin drugačen kot leta 2005, kar se kaže tudi v vsebnosti vode v tleh. V času med 11. julijem in 1. avgustom je padlo samo 21 mm padavin. Na območju, kjer ni obogatitve z geogenim CO₂, se je vsebnost vode zmanjšala s 7 vol. % na 3 vol. %, na območju velike obogatitve pa s 25 vol. % na 17 vol. %. V naslednjem tednu je nato do 8. avgusta padlo 47 mm padavin, kar je vplivalo na povečanje vsebnosti v tleh. Na območju, kjer ni obogatitve z geogenim CO₂, se je vsebnost vode povečala na 16 vol. %, in na območju velike obogatitve na 27 vol. %.

Padavine so glavni vir vode v tleh, vendar njihov prispevek k skupni količini vode v tleh skoraj nikoli ni 100 %, ampak le 80 – 85 %. Če pade v nekem dnevu 10 mm padavin, se količina vode v tleh poveča le za približno 8 mm. Del padavin izhlapi na listih rastlin, še preden pade na površino tal, del padavin izhlapi s površine tal, še preden se vanjo vpije in del padavin, zlasti če so le te bolj intenzivne, lahko tudi z relativno ravnih terenov površinsko odteče (Pintar, 2003).

Zanimiva je primerjava vsebnosti vode v zgornji plasti tal za območja, ki so različno izpostavljena geogenemu CO₂. Na območju s povečano koncentracijo geogenega CO₂ so v zgornji plasti tal spremembe v vsebnosti vode zelo majhne. Te spremembe so nekoliko večje le, če je bolj spremenljiv padavinski režim. Leta 2005 so bile padavine bolj enakomerno razporejene, zato je tudi vsebnost vode v tleh manj variirala. Leta 2006 je bilo padavin manj, zlasti junija in julija, zato se je tudi vsebnost vode do 1. avgusta vseskozi manjšala.

Spremembe v vsebnosti vode v zgornji plasti tal, ki niso izpostavljena geogenemu CO₂, naj bi pripisali predvsem dejstvu, da povečana koncentracija CO₂ negativno vpliva na rast rastlin. Na našem poskusnem polju so bili tokovi CO₂ tudi do dvajsetkrat večji od tistih v normalnih travniških tleh, znano pa je, da lahko ob takšnih tokovih v nekaterih delih tal pričakujemo tudi koncentracije CO₂ v višini 50 – 100 % (Vodnik in sod., v tisku). Posledice tega so bile predvsem opazne pri rastlinah, ki so bile na takih območjih močno zavirane v rasti zaradi negativnih učinkov CO₂ na korenine in talne procese, ter – v brezvetrju – zaradi negativnih učinkov povečanih koncentracij CO₂ na nadzemne dele. Negativni učinek CO₂ na rastline se izraža v zmanjšanemu transpiracijskemu odvzemu vode iz tal. Ta je večji na območju, kjer ni obogatitve z geogenim CO₂, saj je rast rastlin tam nemotena. Na tem območju je največji odvzem vode na globini 0 – 10 cm, kjer je tudi največ korenin. V povprečju se rastline z vodo največ oskrbujejo iz prve četrtine globine korenin, in sicer tam dobijo do 40 % vse potrebne vode. 30 % se oskrbujejo iz druge četrtine korenin ter 20 in 10 % iz tretje in četrte četrtine korenin (Pintar, 2003), kar pomeni, da globlje ko gremo, manj je odvzema vode s strani rastlin. Zato je v nižjih plasteh

vsebnost vode večja in se skozi rastno sezono manj spreminja. Pri globini 50 cm se vsebnost vode v tleh skoraj ne spreminja več.

Velike količine padavin bi lahko imele na območju majhne obogatitve z geogenim CO₂ negativen vpliv na tok CO₂, ker se naenkrat zapolnijo vse pore in pride do zasičenosti tal ter s tem zmanjšane prevodnosti za pline. Meritve pa so pokazale, da na območju večje obogatitve niti suša niti velike količine padavin nimajo vpliva na tok CO₂, oz. je ta vpliv zanemarljiv. Da je temu tako, bi lahko pripisali dejstvu, da so na območju našega poskusa tla težka in imajo dobro sposobnost zadrževanja vode. Na območju velike obogatitve s geogenim CO₂ se skozi celotno rastno dobo vsebnost vode v tleh ni bistveno spreminjala. Prevodnost tal za pline pa je najverjetneje pogojena s prevodnostjo, ki jo določajo makropore.

Hipoteze, da vsebnost vode v tleh za lokacije z različno prisotnostjo geogenega CO₂ vpliva na tok CO₂, nismo potrdili. Za nobeno od območij, ki so različno izpostavljena geogenemu CO₂ (majhna, srednja in velika obogatitev), v poskusu te povezave nismo našli, saj so bili pri različnih vsebnostih vode v tleh tokovi bodisi povsem različni bodisi enaki. Ugotovili pa smo, da je vsebnost vode v tleh, kjer je več CO₂, zaradi negativnih učinkov velikih koncentracij CO₂ na vegetacijo, bolj ustaljena.

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 območjih mofete CO₂ zelo razlikuje.
- Geogeni CO₂ bistveno poveča tok CO₂ iz tal.
- Sezonski potek toka CO₂ kaže v tleh, kjer njegov glavni vir ni geogeni CO₂, temveč dihanje tal (avtotrofno in heterotrofno), vzorec, ki je najverjetneje pogojen s temperaturo tal in vlago v tleh.
- Sezonskega vzorca sproščanja CO₂ iz tal na lokacijah, kjer je prisoten geogeni CO₂, ni opaziti. Najverjetneje so spremembe tega toka odvisne predvsem od dotoka CO₂ in zračne prevodnosti tal, ki je poleg fizikalnih lastnosti tal odvisna od vsebnosti vode v tleh.
- V danih vremenskih razmerah na vsebnost vode v zgornji plasti tal na območju mofete močno vplivajo padavine.
- Odvzem vode s transpiracijo rastlin je največji na območju, kjer ni obogatitve z geogenim CO₂ in ta ne zavira rasti in razvoja rastlin.
- Na območju, kjer je prisoten geogeni CO₂, je vsebnost vode v tleh večja. Spremembe v vsebnosti vode so zelo majhne. Te spremembe so nekoliko večje le, če je bolj spremenljiv padavinski režim. Ne suša ne velike količine padavin nimajo vpliva na tok CO₂, oz. je ta zanemarljiv.

Hipoteze, da vsebnost vode v tleh za lokacije z različno prisotnostjo geogenega CO₂ vpliva na tok CO₂, nismo mogli potrditi. Za nobeno od območij, ki so različno izpostavljena geogenemu CO₂ (majhna, srednja in velika obogatitev), v poskusu te povezave nismo našli. Pri različnih vsebnostih vode v tleh so bili tokovi bodisi povsem različni bodisi enaki. Ugotovili pa smo, da je vsebnost vode v tleh, kjer je več CO₂, zaradi negativnih učinkov velikih koncentracij CO₂ na vegetacijo, bolj ustaljena.

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. O kroženju ogljika se lahko veliko naučimo tudi iz ekosistemov, ki so glede posameznih komponent ogljikovega cikla posebni. Takšen primer predstavljajo rastišča z naravno povečano koncentracijo CO₂, naravni vrelci ali mofete, kjer predstavlja glavni del toka CO₂ geogeni CO₂, katerega tokovi oz. fluksi lahko dosežajo precej velike vrednosti.

V diplomski nalogi nas je zanimalo, kakšne so lastnosti toka CO₂ iz tal na območju naravnega izvira CO₂ Stavešinci. Predpostavili smo, da je na lokacijah, kjer je prisotnost geogenega CO₂ različna, tudi tok CO₂ različen in da prisotnost geogenega CO₂ močno poveča tok CO₂ iz tal. Predpostavili smo tudi, da vsebnost vode v tleh pomembno vpliva na hitrost toka CO₂ iz tal na lokacijah z različno prisotnostjo geogenega CO₂.

Poskus smo zastavili na travniški mofeti ob Stavešincih, kjer smo na različnih lokacijah sočasno merili tok CO₂ iz tal in vsebnost vode v tleh. Meritve so potekale med vegetacijsko sezono od junija do novembra leta 2005 in od aprila do novembra leta 2006. 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. Meritve volumetrične vsebnosti vode v tleh pa so potekale z napravo Diviner 2000, ki deluje na principu FD (Frequency Domain) metode.

Ugotovili smo, da se je tok na območjih, ki so različno obogatena z geogenim CO₂ zelo razlikoval in da geogeni tok bistveno poveča tok CO₂ iz tal. Rezultati raziskave kažejo, da se sezonski potek toka CO₂ kaže v tleh, kjer njegov glavni vir ni geogeni CO₂, temveč dihanje tal. Opaženi vzorec je najverjetneje pogojen s temperaturo tal in vlago v tleh. Sezonskega vzorca sproščanja CO₂ iz tal na lokacijah, kjer je prisoten geogeni CO₂, ni opaziti. Najverjetneje so spremembe tega toka odvisne predvsem od dotoka CO₂ in zračne prevodnosti tal, ki je poleg fizikalnih lastnosti tal odvisna od vsebnosti vode v tleh. Na vsebnost vode v zgornji plasti tal, ki niso izpostavljene geogenemu CO₂, v danih vremenskih razmerah močno vplivajo padavine. Odvzem vode s strani rastlin je največji na območju, kjer ni obogatitve z geogenim CO₂, saj je rast rastlin tam najmanj motena. Na območju, kjer je prisoten geogeni CO₂, je vsebnost vode v tleh večja zaradi zmanjšane transpiracijskega odvzema. Spremembe v vsebnosti vode so zelo majhne. Nekoliko večje so le, če je bolj spremenljiv padavinski režim. Niti suša niti velike količine padavin nimajo vpliva na tok CO₂, oz. je ta zanemarljiv.

Hipoteze, da vsebnost vode v tleh za lokacije z različno prisotnostjo geogenega CO₂ vpliva na tok CO₂, nismo mogli potrditi. Za nobeno od območij, ki so različno izpostavljena geogenemu CO₂ (majhna, srednja in velika obogatitev), v poskusu te povezave nismo

našli, saj so bili pri različnih vsebnostih vode v tleh tokovi bodisi povsem različni bodisi enaki. Ugotovili pa smo, da je vsebnost vode v tleh, kjer je več CO₂, zaradi negativnih učinkov velikih koncentracij CO₂ na vegetacijo, bolj ustaljena.

7 VIRI

- Babič J. 1980. Fizikalno- kemijska karakterizacija in geneza mineralnih vod. Radenci, RSS: 48 str.
- Badiani M., Rasci A., Paolacci A.R., Miglietta F. 2000. Plants responses to elevated CO₂; a perspective from natural CO₂ springs. V: Environmental pollution and plant response. Agrawal, S.B., Agrawal, M. (ur.). Boca Raton, Lewis Pub.: 45-81
- Belec B. 1986. Melioracije in komasacije v spodnji Ščavniški dolini in njihov učinek na preobrazbo pokrajine (elaborat): III faza. Maribor, Univerza v Mariboru, Pedagoška fakulteta, Razvojno raziskovalni inštitut: 36 str.
- Billings S.A., Richter D.D., Yarie J. 1998. Soil carbon dioxide fluxes and profile concentrations in two boreal forests. Canadian Journal of Forest Research, 28: 1773-1783
- Ćirić M. 1984. Pedologija. I izdanje. Sarajevo, SOUR »Svjetlost«, OOUR Zavod za udžbenike i nastavna sredstva: 107 str.
- Diviner 2000 User Guide Version 1.2. 2000. Stepney, Australia, Sentek Pty Ltd: 70 str. <http://www.sentek.com.au/products/diviner.asp> (8. apr. 2008)
- 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
- 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
- Genuchten M. Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of America Journal, 44, 5: 892-898
- Geografski atlas Slovenije: država v prostoru in času. 1998. Ljubljana, Državna založba Slovenije: 360 str.
- Hillel D. 1998. Environmental soil physics. San Diego, Academic Press: 771 str.

Jassal R.S., Black A., Novak M., Morgenstern K., Nestic Z., Gaumont-Guay D. 2005. Relationship between soil CO₂ concentration and forest – floor CO₂ effluxes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 130: 176-192

Klimatološka analiza letnih in mesečnih vrednosti za meteorološko postajo Gornja Radgona v obdobju 1991 – 2006. 2008.

http://www.arso.gov.si/vreme/podnebje/Gor_Radgona.pdf (18. nov. 2008)

Klimatski podatki za meteorološko postajo Gornja Radgona v obdobju 1961 – 1991. 2008.

http://www.arso.gov.si/vreme/napovedi%20in%20podatki/gornja_radgona.htm

(18. nov. 2008)

Klobučar B., Gračan R., Todorčić I. 1982. Splošno poljedelstvo. Ljubljana, Državna založba Slovenije: 172 str.

Kuzyakov Y. 2006. Sources of CO₂ efflux from soil and review of partitioning methods. *Soil Biology & Biochemistry*, 38: 425-448

Leštan D. 2001. Organska snov v tleh (študijsko gradivo). Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta: 68 str.

LI-6400-09 Soil CO₂ Flux Chamber. Instruction Manual. 1997. LI-COR, Lincoln, Nebraska, USA: 50 str.

<http://www.licor.com> (1. mar. 2008)

Lobnik F. 2001. Pedologija. Predavanja za študente univerzitetnega študija gozdarstva. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta: CD-ROM

Maček I. 2004. Odziv korenin izbranih kmetijsko pomembnih vrst na naravno povečano koncentracijo CO₂. Doktorska disertacija. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo: 105 str.

Maček I., Vodnik D., Batič F. 2003. Soil respiration measured with soil flux chamber LI-6400-09 – effects of soil temperature. Zbornik Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani, *Kmet.* 81, 1: 95-102

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

Mielnick P.C., Dugas W.A. 2000. Soil CO₂ flux in a tallgrass prairie. *Soil Biology & Biochemistry*, 32: 221-228

- Mingkui C., Woodward F. I. 1998. Dynamic responses of terrestrial ecosystem carbon cycling to global climate change, 393: 249-252
- Mosier A.R., Morgan J.A., King J.Y., LeCain D., Milchunas D.G. 2001. Soil atmosphere exchange of CH₄, CO₂, NO_x, and N₂O in the Colorado shortgrass steppe under elevated CO₂. *Plant and Soil*, 240: 201-211
- Mörner N.A., Etiope G. 2002. Carbon degassing from lithosphere. *Global and Planetary Change*, 33: 185-203
- Pfanz H., Vodnik D., Wittmann C., Aschan G., Raschi A. 2004. Plants and Geothermal CO₂ Exhalations - Survival in and Adaptation to the high CO₂ Environment. *Progress in Botany*, 65: 449-538
- Pintar M. 2003. Osnove namakanja s poudarkom na vrtninah in sadnih vrstah v severovzhodni Sloveniji. Ljubljana, Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano: 49 str.
- Podatki o količini padavin za postajo Kadrenci za obdobje 2005 in 2006. 2007. Ljubljana, Urad za meteorologijo Agencije Republike Slovenije za okolje (ARSO), Izpis iz arhiva.
- Podatki o temperaturi tal za postajo Murska Sobota za obdobje od 2001 – 2007. 2008. Ljubljana, Urad za meteorologijo Agencije Republike Slovenije za okolje (ARSO), Izpis iz arhiva.
- 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
- Starr, J.L., Platineau, I.C. 2002. Capacitance Devices. V: *Methods of soil analysis. Part 4, Physical methods*. Dane, J.H., Topp, G.C., (ur.). Madison, WI, Soil Science Society of America, Soil Science Society of America Book Series Number 5: 1692 str.
- Stephens D.B. 1995. *Vadose zone hydrology*. Florida, CRC Press, Lewis publishers: 347 str.
- Stoyan H., De-Polli H., Bohm S., Robertson G.P., Paul E.A. 2000. Spatial heterogeneity of soil respiration and related properties at plant scale. *Plant and Soil*, 222: 203-214
- Suhadolc M., Ruprecht J., Zupan M. 2005. Študijsko gradivo za vaje iz pedologije. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta: 40 str.
- Taiz L., Zeiger E. 1998. *Plant physiology*. Second edition. Massachusetts, Sunderland, Sinauer Associates, Inc., Publishers: 792 str.

Tang J., Misson L., Gershenson A., Cheng B., Goldstein A.H. 2005. Continuous measurements of soil respiration with and without roots in a ponderosa pine plantation in the Sierra Nevada Mountains. *Agricultural and Forest Meteorology*, 132: 212-227

TIC Gornja Radgona. 2008.

<http://www.tic-radgona.si/> (24. sep. 2008)

Vodnik D., Pfanz H., Wittmann C., Maček I., Kastelec D., Turk B., Batič F. 2002. Photosynthetic acclimation in plants growing near a carbon dioxide spring. *Phyton-Annales rei Botanicae*, 42 (3): 239-244

Vodnik D., Šircelj H., Kastelec D., Maček I., Pfanz H., Batič F. 2005. The effect of natural CO₂ enrichment on the growth of maize. *Journal of Crop Improvement*, 13 (1/2): 193-212

Vodnik D., Kastelec D., Pfanz H., Maček I., Turk B. 2006. Small-scale spatial variation in soil CO₂ concentration in a natural carbon dioxide spring and some related plant responses. *Geoderma*, 133 (3 - 4): 309-319

Vodnik D., Videmšek U., Pintar M., Pfanz H. 2008. The characteristics of soil CO₂ fluxes at a site with natural CO₂ enrichment. *Geoderma* v tisku

Wang W., Ohse K., Liu J.J, Mo W.H., Oikawa T. 2005. Contribution of root respiration to soil respiration in a C-3/C-4 mixed grassland. *Journal of Biosciences*, 30 (4): 507-514

Zupanc V., Pintar M. 2001. Melioracije in urejanje kmetijskih zemljišč. Interno gradivo za vaje. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta: 66 str.

Žlebnik L. 1977. Hidrogeološke raziskave mineralne vode v Ščavniški dolini v letih 1976 in 1977. Ljubljana, RSS: 21 str.

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 za vso pomoč pri vodenju in izdelavi naloge zahvaliti mentorju prof. dr. Dominiku Vodniku in somentorici prof. dr. Marini Pintar.

Zahvalil bi se tudi Urški Videmšek za dragocene nasvete in pomoč pri oblikovanju diplomske naloge.

Največjo zahvalo namenjam mojima staršema, ki sta mi vedno stala ob strani in me spodbujala na vseh področjih ter mi omogočila študij in bratu Primožu za vso potrpežljivost v času nastajanja naloge.

Zahvaljujem se tudi vsem prijateljem, ki so me v času študija polnili s pozitivno energijo, smehom in dobrim razpoloženjem, kar mi je vedno znova pomagalo pri premagovanju novih izzivov.

Hvala vsem!