

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA AGRONOMIJO

Andreja KOTNIK

**HITROST RAZGRADNJE OPADA V TRAVNIŠKIH
TLEH V ZARAŠČANJU NA LOKACIJAH BOHINJ IN
USKOVNICA**

DIPLOMSKO DELO

Visokošolski strokovni študij

Ljubljana, 2010

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA AGRONOMIJO

Andreja KOTNIK

**HITROST RAZGRADNJE OPADA V TRAVNIŠKIH TLEH V
ZARAŠČANJU NA LOKACIJAH BOHINJ IN USKOVNICA**

DIPLOMSKO DELO
Visokošolski strokovni študij

**LITTER DECOMPOSITION RATE IN GRASSLAND SOILS AT
OVERGROWN SITES BOHINJ AND USKOVNICA**

GRADUATION THESIS
Higher professional studies

Ljubljana, 2010

Diplomsko delo je zaključek visokošolskega strokovnega študija agronomije. Opravljeno je bilo na katedri za pedologijo in varstvo okolja Oddelka za agronomijo Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani.

Študijska komisija Oddelka za agronomijo je za mentorja diplomske naloge imenovala doc. dr. Marjetko Suhadolc.

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik: prof. dr. Katja VADNAL
Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo

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

Član: prof. dr. Franc LOBNIK
Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo

Datum zagovora:

Naloga je rezultat lastnega raziskovalnega dela. Podpisana se strinjam z objavo moje diplomske 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.

Andreja KOTNIK

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD	Vs
DK	UDK 631.461.6 (043.2)
KG	organska snov tal/opad/razgradnja/ogljik/dušik
KK	AGRIS P30
AV	KOTNIK, Andreja
SA	SUHADOLC, Marjetka (mentor)
KZ	SI-1000 Ljubljana, Jamnikarjeva 101
ZA	Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, oddelek za agronomijo
LI	2010
IN	HITROST RAZGRADNJE OPADA V TRAVNIŠKIH TLEH V ZARAŠČANJU NA LOKACIJAH BOHINJ IN USKOVNICA
TD	Diplomsko delo (visokošolski strokovni študij)
OP	X, 40, [1] str., 4 pregl., 28 sl., 30 vir.
IJ	sl
JJ	sl/en
AI	Na Uskovnici in v Bohinju smo ugotavljali hitrost razgradnje rastlinskega opada v travniških tleh v naravnih razmerah. Preučevali smo vpliv temperaturnih razlik na hitrost razgradnje opada, zato smo izbrali lokaciji, ki se razlikujeta v dolgoletnih povprečnih temperaturah zraka, obenem imata podoben padavinski režim in talne lastnosti. V jeseni 2007 smo tik pod površje tal (Of horizont) vložili mrežaste najlonske vrečke s premešanim rastlinskim opadom iz obeh lokacij in do maja 2009 smo izvedli štiri vzorčenja. Povprečna razlika v mesečnih temperaturah zraka med lokacijama je bila v času poskusa 4,4 °C ($\pm 1,5$ °C). Ugotovili smo, da je razgradnja opada na obeh lokacijah potekala enako hitro in enak je bil tudi sezonski vzorec zmanjševanja mase. Razgradnja je potekala najhitreje v prvih tednih razgradnje in v poletnem času. Ob zadnjem vzorčenju je masa opada v Bohinju znašala 42,9 % in na Uskovnici 42 % začetne mase opada. Tudi dinamika skupne vsebnosti C, N, P, K, celuloze in lignina ter topnih oblik C in N v opadu je pokazala podoben potek razgradnje na obeh lokacijah. Rezultati niso potrdili vpliva razlike v povprečni temperaturi zraka na razgradnjo opada. Ugotovili smo, da je bil čas v našem poskusu glavni dejavnik, ki je vplival na razgradnjo opada z enako sestavo na obeh lokacijah.

KEY WORDS DOCUMENTATION

DN Vs
DC UDC 631.461.6 (043.2)
CX soil organic matter/litter/decomposition/carbon/nitrogen
CC AGRIS P30
AU KOTNIK, Andreja
AA SUHADOLC, Marjetka (supervisor)
PP SI-1000 Ljubljana, Jamnikarjeva 101
PB University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Agronomy
PY 2010
TI LITTER DECOMPOSITION RATE IN GRASSLAND SOILS AT
OVERGROWN SITES BOHINJ AND USKOVNICA
DT Graduation thesis (Higher professional studies)
NO X, 40, [1] p., 4 tab., 28 fig., 30 ref.
LA sl
AL sl/en
AB Plant litter decomposition rate was examined *in situ* at two grassland sites Bohinj and Uskovnica. The effect of temperature differences on the rate of plant litter decomposition was studied, thus two locations which differ in long-term average air temperatures but, at the same time, have a similar rainfall regime and soil properties were chosen. Nylon bags with mixed plant litter from both locations were placed into the ground, just under the surface (Of horizon) in the autumn of 2007, and, by May 2009, four samplings had been conducted. The average difference in monthly air temperatures between the locations during the time of the experiment was 4,4 °C ($\pm$ 1,5 °C). No differences in the plant litter decomposition rate as well as seasonal pattern were found between the two locations. Decomposition was the fastest during the first weeks of experiment and during the summer. In the final sampling, the remaining masses of litter were 42,9 % and 42,0 % of the initial mass of litter in Bohinj and Uskovnica, respectively. The dynamics of the total contents of C, N, P, K, cellulose and lignin, and the contents of dissolved C and N in litter also showed a similar process of decomposition at both locations. The results did not confirm any effect from the difference in the average air temperature on the plant litter decomposition. We conclude that, in our case, time was the main influential factor for the decomposition of litter, which was the same at both locations.

KAZALO VSEBINE

Ključna dokumentacijska informacija	III
Key words documentation	IV
Kazalo vsebine	V
Kazalo preglednic	VIII
Kazalo slik	IX
Simboli in okrajšave	X
1 UVOD	1
1.1 POVOD ZA IZDELAVO NALOGE.....	1
1.2 NAMEN NALOGE	2
1.3 DELOVNA HIPOTEZA.....	2
2 PREGLED OBJAV	3
2.1 GLOBALNO KROŽENJE OGLJIKA	3
2.2 ORGANSKA SNOV TAL.....	4
2.2.1 Razgradnja rastlinskega opada	5
2.2.1.1 Hitrost razgradnje rastlinskega opada.....	7
2.2.1.2 C/N razmerje.....	9
2.2.1.3 Vpliv temperature na razgradne procese v tleh	9
2.2.1.4 Razgradnja celuloze.....	10
2.2.1.5 Razgradnja lignina	10
2.2.2 Nastanek humusa	11
3 MATERIAL IN METODE	12
3.1 OPIS LOKACIJ	12
3.1.1 Tla.....	12
3.1.1.1 Tla na lokaciji Bohinj	13
3.1.1.2 Tla na lokaciji Uskovnica	14
3.1.2 Vegetacija	15
3.1.3 Podnebje	15
3.1.3.1 Podnebne značilnosti Bohinja.....	15
3.1.3.2 Podnebne značilnosti Uskovnice	16
3.2 ZASNOVA POSKUSA	17

3.2.1 Vložitev in vzorčenje opada	18
3.3 MERITEV HITROSTI RAZGRADNJE OPADA	19
3.4 ANALITSKE METODE	20
3.4.1 Osnovne analize tal	20
3.4.2 Skupna vsebnost C in N v opadu	20
3.4.3 Meritev topnih oblik C in N v ekstraktih opada	20
3.4.4 Meritev vsebnosti pepela, fosforja in kalija v opadu	21
3.4.5 Meritev vsebnosti celuloze in lignina v opadu	21
3.5 STATISTIČNE METODE	21
4 REZULTATI.....	22
4.1 ČASOVNA DINAMIKA TEMPERATURE IN PADAVIN V ČASU POSKUSA	22
4.1.1 Temperatura zraka	22
4.1.2 Padavine.....	22
4.2 IZGUBA MASE VGRAJENEGA OPADA	24
4.3 VSEBNOST SKUPNEGA ORGANSKEGA OGLJIKA IN DUŠIKA V RASTLINSKEM OPADU	24
4.3.1 Skupni organski ogljik.....	24
4.3.2 Skupni dušik.....	25
4.3.3 C/N razmerje	26
4.4 RAZGRADNJA LIGNINA IN CELULOZE	26
4.5 VSEBNOST FOSFORJA, KALIJA IN PEPELA V RASTLINSKEM OPADU.....	28
4.5.1 Fosfor	28
4.5.2 Kalij.....	28
4.5.3 Pepel	29
4.6 VSEBNOST LAŽJE DOSTOPNIH OBLIK OGLJIKA IN DUŠIKA V EKSTRAKTU OPADA.....	30
4.6.1 Vsebnost topnega organskega ogljika	30
4.6.2 Vsebnost topnega organskega dušika	30
4.6.3 C/N razmerje v ekstraktu opada	31
4.6.4 Vsebnost topnih mineralnih oblik dušika.....	32
5 RAZPRAVA IN SKLEPI	33
5.1 HITROST RAZGRADNJE OPADA V BOHINJU IN NA USKOVNICI.....	33
5.2 SEZONSKI POTEK RAZGRADNJE	35
5.3 SKLEPI.....	36

6 POVZETEK	37
-------------------------	-----------

7 VIRI.....	38
--------------------	-----------

ZAHVALA

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Opis pedološkega profila vzorčnega območja v Bohinju.	13
Preglednica 2: Opis pedološkega profila na območju vzorčenja na Uskovnici.	14
Preglednica 3: Datumi vzorčenja opada za spremljanje hitrosti razgradnje.	19
Preglednica 4: Vsota padavin (mm) in povprečna dnevna T (°C) zraka v obdobjih med posameznimi vzorčenji (Meteorološki... , 2009).	23

KAZALO SLIK

Slika 1: Tok ogljika med biosfero in atmosfero (Doran in sod., 1996, cit. po Vidrih, 2006)	3
Slika 2: Shema humifikacije, prirejeno po Kononovu (Čirić, 1986)	6
Slika 3: Shema razgradnje opada (Berg in McClaugherty, 2008)	7
Slika 4: Dejavniki, ki vplivajo na biorazgradnjo v tleh (Stopar, 2009)	8
Slika 5: Mikrolokacija na Uskovnici (foto: M. Suhadolc)	12
Slika 6: Mikrolokacija v Bohinju (foto: M. Suhadolc)	12
Slika 7: Izkopan pedološki profil na lokaciji Bohinj (foto: A. Kotnik)	13
Slika 8: Izkopan pedološki profil na Uskovnici (foto: M. Suhadolc)	14
Slika 9: Povprečne letne temperature zraka (°C) v letih 1999 (2003) - 2008 na obeh lokacijah	16
Slika 10: Povprečne letne vsote padavin (mm) v letih 1999-2008 na obeh lokacijah	17
Slika 11: Mrežasta najlonska vrečka z rastlinskim opadom (foto: M. Suhadolc)	17
Slika 12: Vlaganje vrečk z opadom na Uskovnici 29.10.2007 (foto: A. Kotnik)	18
Slika 13: Označeno vzorčno mesto z vloženimi vrečkami (foto: A. Kotnik)	18
Slika 14: Povprečne mesečne temperature zraka v obdobju poskusa na obeh lokacijah (Meteorološki., 2009)	22
Slika 15: Mesečne vsote padavin (mm) v obdobju trajanja poskusa na obeh lokacijah (Meteorološki., 2009)	23
Slika 16: Zmanjševanje mase opada (izraženo v % suhe snovi) po času trajanja razgradnje	24
Slika 17: Razmerje med skupnim organskim ogljikom v opadu ob vzorčenju in skupnim organskim ogljikom v opadu ob vložitvi	25
Slika 18: Razmerje med skupnim dušikom v opadu ob vzorčenju in skupnim dušikom v opadu ob vložitvi	25
Slika 19: C/N razmerje v opadu tekom trajanja poskusa	26
Slika 20: Razmerje med vsebnostjo lignina v opadu ob vzorčenju in ob vložitvi	27
Slika 21: Razmerje med vsebnostjo celuloze v opadu ob vzorčenju in ob vložitvi	27
Slika 22: Vsebnost fosforja v mletem opadu (g/kg)	28
Slika 23: Vsebnost kalija v mletem opadu (g/kg)	29
Slika 24: Delež pepela v mletem opadu (%)	29
Slika 25: Vsebnost topnega organskega ogljika (DOC) ob pričetku poskusa in ob vzorčenjih, izražena v mg C/g suhega opada	30
Slika 26: Vsebnost topnega organskega dušika (DON) ob pričetku poskusa in ob vzorčenjih, izražena v mg N/g suhega opada	31
Slika 27: C/N razmerje v ekstraktu opada	31
Slika 28: Vsebnost NH_4^+ (mg N/g suhega opada) ob pričetku poskusa in ob vzorčenjih	32

SIMBOLI IN OKRAJŠAVE

ARSO	Agencija Republike Slovenije za okolje
C	Ogljik
CPVO	Center za pedologijo in varstvo okolja
DOC	Dissolved organic carbon – topni organski ogljik
DON	Dissolved organic nitrogen – topni organski dušik
K	Kalij
N	Dušik
P	Fosfor
pH	Oznaka za kislost oz. bazičnost. Merilo za koncentracijo hidronijevih/vodikovih ionov v raztopini
TC	Total carbon – skupni ogljik

1 UVOD

Razgradnja rastlinskega opada je zelo kompleksen proces, ki vključuje številne kemične, fizikalne in biotske procese. Zaradi široke heterogenosti organskih spojin, ki se tekom procesa razgradnje opada tudi stalno spreminjajo, mnogoterih dejavnikov, ki vplivajo na razgradnjo in njihovih medsebojnih interakcij, lahko sam proces razgradnje v naravi opisujemo le na posplošujoč način (Berg in McClaugherty, 2008). Kljub omenjeni kompleksnosti pa je moč izpostaviti nekatere glavne procese in trende. Znano je, da na hitrost razgradnje vplivajo fizikalne, kemične in biološke lastnosti rastlinskega opada ter okoljski dejavniki, zlasti temperatura, vlaga in dostopnost hranil v tleh.

Razumevanje procesov razgradnje je nujno. Ne le zato, da bi doumeli bistvo delovanja talnega ekosistema, temveč tudi za predvidevanje posledic globalnih okoljskih sprememb na zaloge ogljika v tleh. Razgradnja organskih spojin v tleh močno vpliva na razmerje med ogljikom, ki se vrača v atmosfero v obliki ogljikovega dioksida (CO_2) in ogljikom, ki ostaja dolgoročno vezan v tleh v obliki stabilne organske snovi tal (humusa). Zato je poznavanje procesov razgradnje in njihovo spremljanje postalo nujno za izdelavo napovedi sproščanja ogljika iz tal v različnih okoljskih razmerah (Graça in sod., 2005). Tla namreč predstavljajo glavno zalogo organskega ogljika v kopenskih ekosistemih. Ogljik, ki je v tleh vezan kot humus, je odpornejši na razgradnjo in posledično prehaja v atmosfero bistveno počasneje od manj stabilnih organskih spojin. Za napoved predvidenega naraščanja količin ogljika v atmosferi so zato pomembni tudi dejavniki, ki vplivajo na količino in stabilnost ustvarjenega humusa (Schlesinger in Andrews, 2000, cit. po Berg in McClaugherty, 2008).

Slovenija se nahaja v geografskih širinah, kjer lahko glede na modele globalnega kroženja ozračja pričakujemo hitrejša in večja ogrevanja (Bergant, 2003). Med možnimi odzivi kopenskih ekosistemov na povišanje globalne temperature je poleg sprememb v rastlinski sestavi, tudi povišana stopnja mineralizacije organske snovi v tleh, kar lahko vodi do degradacijskih procesov v tleh, kot so zmanjšanje vsebnosti organske snovi tal, poslabšanje strukture in erozijskih procesov (Brady in Weil, 2002).

1.1 POVOD ZA IZDELAVO NALOGE

Razgradnja organskih ostankov in biokemični procesi v tleh so pomembni za rodovitnost in stabilnost talnih razmer. Vplivajo tudi na sproščanje CO_2 in so pomemben del kroženja ogljika. Predviden dvig temperature ozračja bi lahko pospešil mineralizacijo organske snovi tal, posledično bi se zmanjšala količina organskega ogljika v tleh in porušilo bi se ravnotežje v biogeokemijskem kroženju ogljika.

Podatki o hitrosti razgradnje rastlinskega opada in njeni odvisnosti od temperature bodo osnova za nadaljnja predvidevanja odziva rastlinskih združb in tal na spremembe v temperaturi zraka.

1.2 NAMEN NALOGE

Namen naloge je ugotoviti hitrost razgradnje rastlinskega opada v travniških tleh v zaraščanju in ugotoviti vpliv temperature na razgradnjo ob predpostavki, da so ostali okoljski dejavniki na izbranih lokacijah Bohinj in Uskovnica podobni (padavine, matična podlaga in razvoj tal, rastlinske združbe).

1.3 DELOVNA HIPOTEZA

Domnevamo, da temperatura vpliva na hitrost razgradnje rastlinskega opada v travniških tleh v zaraščanju. Domnevamo tudi, da je hitrost razgradnje rastlinskega opada na lokaciji Bohinj večja zaradi višjih povprečnih temperatur zraka v primerjavi z lokacijo Uskovnica.

Predvidevamo, da je hitrost razgradnje (izguba mase opada) odvisna tudi od časa trajanja razgradnje in se s časom zmanjšuje.

Domnevamo, da se razlike v hitrosti razgradnje odrazijo v kemijski sestavi opada ob različnih časih vzorčenja.

2 PREGLED OBJAV

2.1 GLOBALNO KROŽENJE OGLJIKA

Globalno kroženje ogljika pomeni njegovo prehajanje v različnih oblikah med biosfero, atmosfero, oceani in geosfero. Krogotok ogljika predstavlja enega temeljnih biogeokemičnih procesov v naravi. Vse organske snovi vsebujejo ogljik in vsak ekosistem (vodni ali kopenski) predstavlja tako vir, kot ponor tega elementa (Vidrih, 2006). Ogljik se v obliki CO₂ izmenjuje, oziroma prehaja po naravni poti med ekosistemi in atmosfero s procesi fotosinteze, dihanja in razgradnje (Brady in Weil, 2002).

Primarni izvor ogljika je CO₂ iz atmosfere, od koder se vgrajuje v organske spojine kot glavni gradnik. Tako vezan predstavlja ogromno količino energijskega materiala (Lobnik, 2001).



Slika 1: Tok ogljika med biosfero in atmosfero (Doran in sod., 1996, cit. po Vidrih, 2006)

Pomemben del kroženja ogljika je razgradnja organske snovi tal in njena vloga pri vzdrževanju ravnotežja tega procesa je velika. Organska snov v tleh vsebuje približno trikrat toliko ogljika kot celotna vegetacija. Ogljik v tleh z biokemijsko reakcijo prehaja v CO₂, ki prehaja v atmosfero in se lahko ponovno vrača v procese kroženja (Slika 1). Talni organizmi v procesu razgradnje in transformacije organskih ostankov porabljajo organsko vezan ogljik (Corg) kot vir energije in za sintezo svoje biomase. Večina ogljika se izloči kot ogljikov dioksid ali se vgradi v mikrobno biomaso. Rastline vnašajo ogljik v tla z odmrlo rastlinsko biomaso, pa tudi neposredno s t.i. rizodepozicijo. Ogljik, ki se vgradi v humus je za daljše obdobje izključen iz kroženja. Z vidika ravnotežja ogljikovega krogotoka je

pomembno ravnovesje med fotosintezo in dihanjem. S fotosintezo prehaja ogljik iz atmosfere v biosfero, z dihanjem pa se ogljikov dioksid sprošča nazaj v atmosfero. Dihanje tal vključuje dihanje mikroorganizmov, talnih živali in dihanje korenin. Razgradnja organske snovi je od temperature bolj odvisna kot fotosinteza, še posebej pri nizkih temperaturah. Ogrevanje bo zato bolj pospešilo razgradnjo organske snovi v tleh (izgubo ogljika) kot fotosintezo (pridobivanje ogljika), kar bi pomenilo negativno bilanco ogljika za tla. Posledično bi prišlo do občutnega izpusta CO₂ v ozračje zaradi razgradnje organske snovi (Muriel in sod., 2000, cit. po Ranljivost..., 2003).

Tla na travnatem svetu imajo v splošnem večji potencial za vezavo ogljika kot njivska tla. Z oranjem oziroma z obdelavo tal se pospešuje mineralizacija organske snovi tal, ker se povečata zračnost tal in intenziteta dihanja tal.

2.2 ORGANSKA SNOV TAL

Med organsko snov tal štejemo žive organizme, različno razgrajene rastlinske in živalske ostanke ter stabilizirane kompleksne organske spojine (humus) (Suhadolc in sod., 2008). Organska snov tal je večinoma rastlinskega izvora in je del naravnega ciklusa ogljika v kopenskih ekosistemih (Ćirić, 1986).

Količina organske snovi predstavlja pomemben kazalec kakovosti tal. Pomembno vpliva na številne fizikalne, kemijske in biološke lastnosti tal (Suhadolc in sod., 2008):

- vpliv na fizikalne lastnosti tal:
 - nastajanje in obstojnost strukturnih agregatov,
 - sposobnost za zadrževanje vode,
 - zračnost in poroznost tal,
 - konzistenca tal,
 - ogrevanje in toplotna prevodnost;
- vpliv na kemijske lastnosti tal:
 - povečuje puferno sposobnost tal preko širokega območja pH vrednosti,
 - povečuje kationsko izmenjalno kapaciteto (povečuje sposobnost tal za adsorptivno vezanje hranil in tudi onesnažil),
 - omogoča formiranje kompleksov,
 - hidrofilnost/hidrofobnost;
- vpliv na biološke lastnosti tal:
 - vir hranil in energije,
 - ohranjanje prehranjevalnih verig in biološke pestrosti,
 - vpliv na habitate.

Organska snov tal ima tudi pomembno vlogo kot vir in ponor CO₂ (Brady in Weil, 2002). Na nastanek in razgradnjo organske snovi v tleh vplivajo podnebni (temperatura, vlaga) in talni dejavniki (pH, tekstura, vsebnost hranil).

Razgradnja organskih ostankov je biokemični oksidacijski proces, ki je usmerjen h končni mineralizaciji organskih spojin, pri čemer se sproščajo voda, CO₂ in mineralne snovi (Ćirić, 1986). Približno 70-90 % organskih ostankov se vsako leto razgradi (mineralizira) do osnovnih rastlinskih hranil (nitrata, fosfata, sulfata). Od 10 do 30 % organskih ostankov v tleh pa ne razpade do osnovnih hranil, temveč se iz njih po delni razgradnji sintetizira humus (Grčman in sod., 2004). Mnogo procesov v ekosistemu je tesno povezanih z razgradnjo, če izpostavimo nekaj bistvenih (Berg in McClaugherty, 2008):

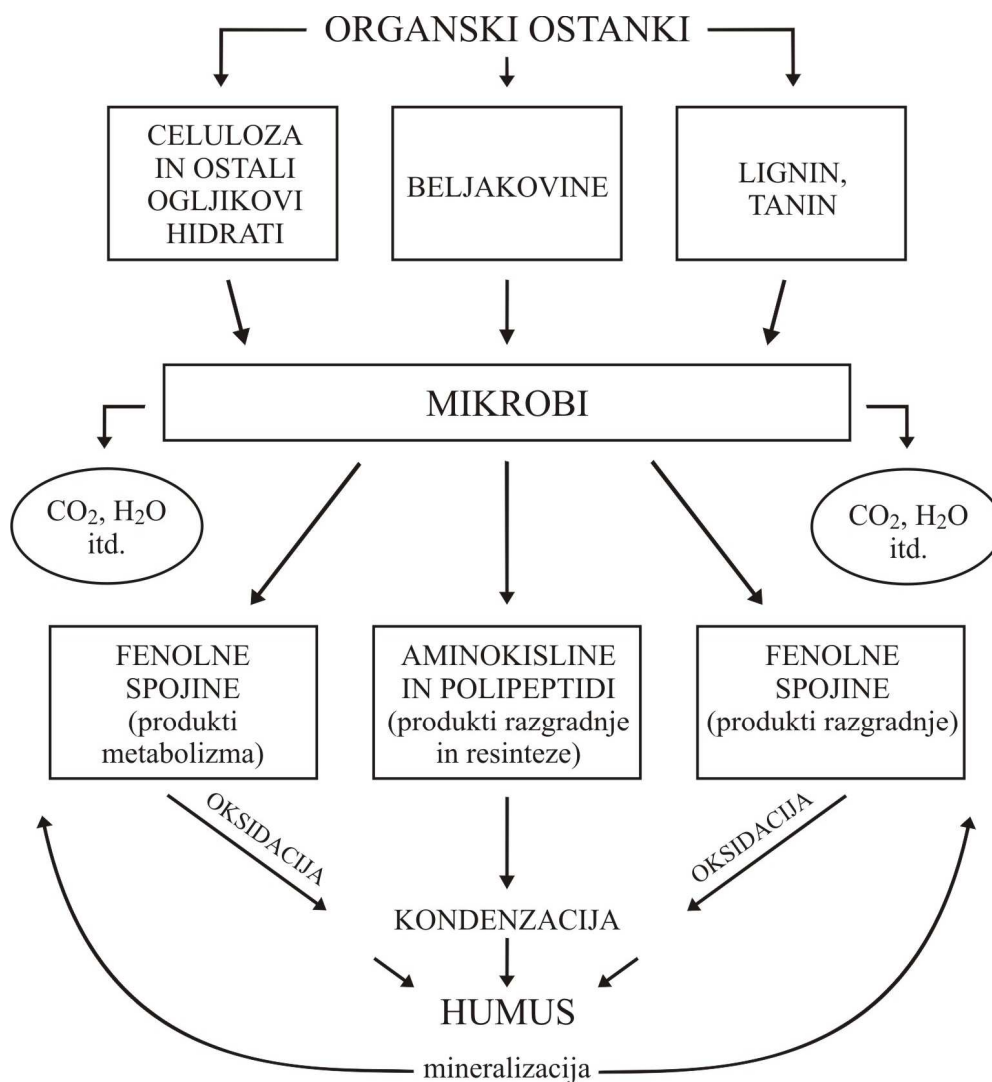
- kroženje hranil,
- nastanek talne organske snovi,
- vezava in sproščanje ogljika.

2.2.1 Razgradnja rastlinskega opada

Tkiva zelenih rastlin vsebujejo okrog 75 % vode, odpadlo listje in iglice pa od 30 do 50 %. Po sušenju rastlinske biomase na 105 °C do konstantne teže dobimo suho snov, ki vsebuje približno 90 % organske snovi: celuloze, hemiceluloze, škroba, enostavnih sladkorjev, lignina, proteinov, voska, tanina in maščob (Leštan, 2001). Te skupine organske snovi se po biološki razgradljivosti zelo razlikujejo. Sladkor in beljakovine se dokaj lahko in hitro razgrajujejo, lignin, maščobe in voski pa precej počasneje in se lahko v neugodnih okoliščinah njihova razgradnja celo zaustavi (Ćirić, 1986).

Suha snov vsebuje tudi mineralne elemente, kot so na primer fosfor, kalij, kalcij, magnezij in natrij. Ti po sežigu organske snovi ostanejo v pepelu. V travniškem opadu je vsebnost pepela do 10 % suhe snovi. Vsebnost mineralnih elementov v organskih ostankih vpliva na proces razgradnje rastlinskega opada. Nekateri od njih so nujni sestavni del prehrane organizmov, ki sodelujejo pri razgradnji in tako vplivajo na njihovo aktivnost. Določeni mineralni elementi pa nevtralizirajo kisline, ki se tvorijo ob razgradnji organskih ostankov (Ćirić, 1986).

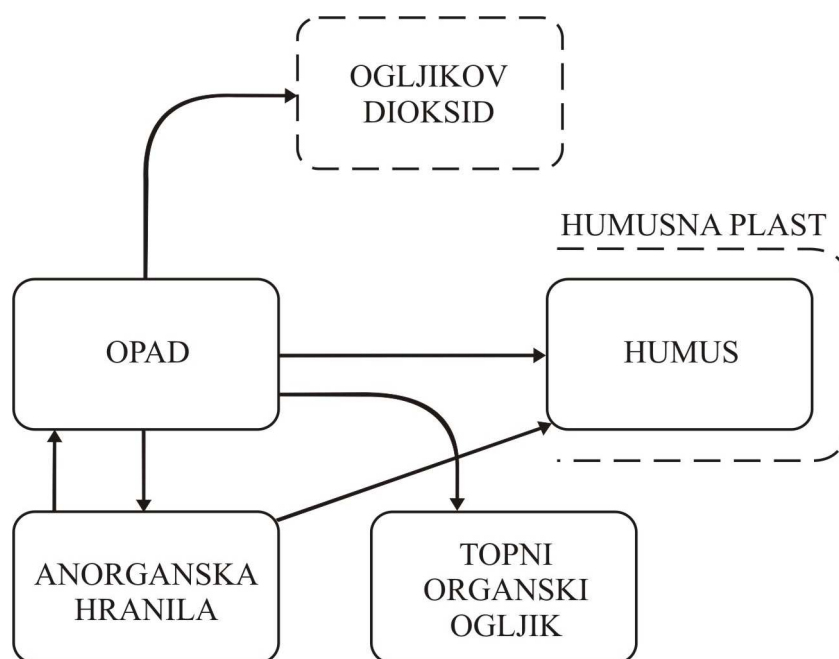
Pri razgradnji in mineralizaciji odmrlih rastlinskih ostankov se hranila deloma sprostijo in postanejo ponovno dostopna rastlinam, deloma pa preidejo v biomaso mikroorganizmov. Do 80 % lažje razgradljivih komponent mikroorganizmi mineralizirajo do CO₂. Težko razgradljive komponente organskih ostankov pa so osnova za nastanek stabilne organske snovi tal – humusa (Leštan, 2001).



Slika 2: Shema humifikacije, prirejeno po Kononovu (Ćirić, 1986)

Najprej se organski ostanki razgradijo do ogljikovih hidratov, celuloze, beljakovin, lignina, tanina itd.. V nadaljnjem procesu sledi razgradnja do CO₂ in vode ter mineralnih snovi (Slika 2).

Sproščanje hranil poteka na različne načine, odvisno od vrste in sestave opada. Glavna hranila, kot so dušik, fosfor in žveplo, delno preidejo v raztopino takoj po pričetku razgradnje ostankov (Slika 3). Kalij, ki je dobro topen, preide v talno raztopino v velikem obsegu. Druga hranila lahko delno preidejo v raztopino, kar je odvisno od njihove koncentracije v razgradnih ostankih. Kemična sestava rastlinskega opada določa tako mikrobiološko sestavo, kot tudi smer in obliko razgradnega procesa. Podnebje je močan dejavnik, ki uravnava proces razgradnje in neposredno vpliva na stopnjo razgradnje. Vpliv klime se z nadaljevanjem procesa razgradnje zmanjšuje (Berg in McClaugherty, 2008).



Slika 3: Shema razgradnje opada (Berg in McClaugherty, 2008)

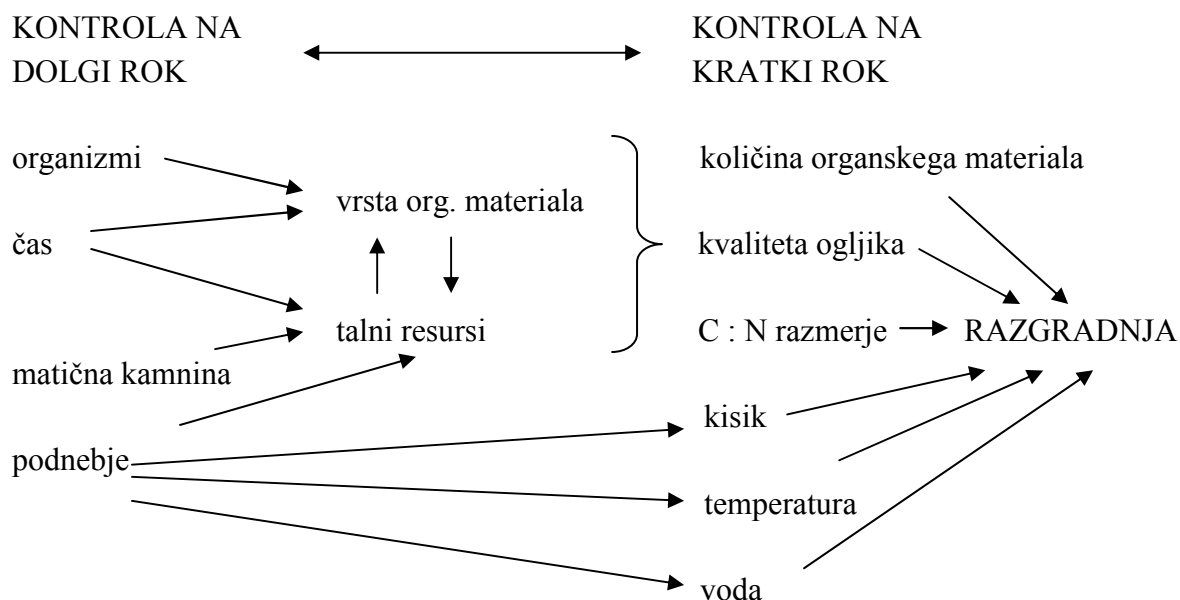
Od procesa razgradnje sta odvisna dva bistvena procesa: sproščanje CO₂ in izpiranje (Slika 3). Izpirajo se spojine, ki so v samem opadu, pa tudi novonastale spojine, ki so stabilne, vendar topne v vodi (raztopljeni organski ogljik). Dolgoročno stabilne spojine pa so gradniki humusa. Izpiranje v vodi topnih snovi ima lahko velik vpliv na izgubo mase opada v začetni fazi razgradnje. Raztopljene snovi iz rastlinskih ostankov se kasneje lahko vežejo na humus ali pa na glinene delce. V takem primeru so snovi iz substrata sprva izgubljene, vendar se ponovno vrnejo v talni ekosistem. V aerobnih razmerah se z mikrobno razgradnjo sprošča CO₂. Ob anaerobnih razmerah pa razkrojevalci proizvajajo več organskih kislin kot CO₂. Začetna faza razgradnje je odvisna od koncentracij glavnih hranil, predvsem dušika in fosforja. V začetnih fazah razgradnje so hranila imobilizirana in začasno izvzeta iz glavnega kroga, zato je dostopnost hranil zmanjšana. Na kasnejši potek razgradnje (blizu stopnje humusa) pa ima vpliv predvsem razgradnja lignina. V kasnejših fazah razgradnje je večja zastopanost težje razgradljivih snovi v substratu, zato razgradnja v določenih primerih doseže ničelno stopnjo. Celoten potek razgradnje je odvisen od temperature in vlage. Težko je ločiti vplive podnebja od vpliva sestave in kakovosti rastlinskih ostankov na razgradnjo (Berg in McClaugherty, 2008).

2.2.1.1 Hitrost razgradnje rastlinskega opada

Na hitrost in obliko razgradnje rastlinskega opada vplivajo naslednji dejavniki:

- kemična sestava opada,
- podnebje,
- talne lastnosti: kemične, fizikalne in biotične,

- drugi okoljski dejavniki.



Slika 4: Dejavniki, ki vplivajo na biorazgradnjo v tleh (Stopar, 2009)

Gre za prepletenost več dejavnikov, ki so v medsebojni interakciji in regulirajo izgubo mase, nastanek humusa, dinamiko hranil in samo obliko spreminjanja kemične sestave rastlinskih ostankov (Slika 4). Odvisno je, kateri rastlinski deli so udeleženi v razgradnji in tudi sama rastlinska vrsta. Kvaliteta opada, t.j. občutljivost na mikrobo razgradnjo oz. zahtevnost za razgradnjo, je vzrok za 5 – 10 kratne razlike v hitrosti razgradnje opada v istem klimatskem območju (Eler, 2007). Hitro rastoče rastlinske vrste porabijo večino ogljika za hitro rast, proizvedejo veliko listne mase z visoko fotosintetsko aktivnostjo in njihovi ostanki so hitro razgradljivi in bogati s hranili. Počasi rastoče rastlinske vrste, ki prevladujejo v razmerah z malo hranili in so manjše rasti, pa ustvarjajo opad z malo hranili in veliko težje razgradljivimi spojinami, kot so lignin in fenoli.

Spremembe v kemični sestavi razkrajajočih rastlinskih ostankov pa niso enake, četudi gre za podobne razgradne sestavine opada, kadar gre za različne okoljske razmere. Hitrost razgradnje je zmanjšana pri visoki in nizki vlažnosti. Pri visoki vlažnosti prihaja do pomanjkanja kisika, kar vodi v drugačne metabolne poti (denitrifikatorji). Pri pomanjkanju vlage je okrnjena ali celo zaustavljena mikrobiološka aktivnost v tleh. Pomemben je tudi vpliv lastnosti tal. Razgradnja poteka hitreje v nevtralnih do šibko kislih, kot pa v bolj kislih tleh. Vpliv pH tal je ključen za dostopnost nekaterih hranil, pomembnih za razgradnjo. Ravno tako pH tal vpliva tudi na sestavo vegetacije in s tem na kemične lastnosti opada. Tekstura tal je pomembna z vidika zračnosti tal (dostopnost kisika v tleh). Na splošno se hitrost razgradnje rastlinskih ostankov tekom časa in ko je kemična sestava že blizu humusa zmanjšuje.

2.2.1.2 C/N razmerje

C/N razmerje je merilo hitrosti razgradnje organske snovi. Pogosto se uporablja kot pokazatelj kakovosti opada. Opad z ožjim C/N razmerjem se razgrajuje hitreje kot opad s širšim C/N razmerjem. Mnogi mikroorganizmi potrebujejo veliko dušika za razgradnjo organske snovi. Če so vnešeni ostanki z dušikom siromašni, mikroorganizmi jemljejo dušik iz tal, da bi se vzpostavilo primerno C/N razmerje. Pri vnosu organskih ostankov s C/N razmerjem, širšim od 30:1, se ob začetni razgradnji pojavlja imobilizacija dušika. Nekaj prvih tednov po inkorporaciji se ostanki s C/N razmerjem, širšim od 30:1, razgrajujejo počasi, saj ne vsebujejo dovolj dušika za razmnoževanje mikroorganizmov. Posledica tega je, da mikroorganizmi jemljejo dušik iz tal. Ostanki s C/N razmerjem 20:1 do 30:1 zagotavljajo dovolj dušika za razgradnjo, vendar ga ni dovolj za prehrano rastlin. Rastlinski ostanki s C/N razmerjem 20:1 ali ožjim imajo dovolj dušika za oskrbo mikroorganizmov, ravno tako se sprost dovolj dušika za rastline. V takem primeru se običajno mineralni dušik sprošča že takoj na samem začetku razgradnje. Če so okoljske razmere ugodne, je razgradnja najhitrejša v prvih dveh tednih po inkorporaciji (Butorac, 1999). Pri C/N razmerju organskih ostankov 30:1 ali manj traja razkroj približno eno leto. Če je C/N razmerje 70:1 ali več pa so za razkroj potrebna 3-4 leta. Pri listih listavcev razmerje C/N znaša od 15-60:1, pri ostankih starejše detelje 20:1, pri ostankih travniške lasulje pa 30:1 (Butorac, 1999).

2.2.1.3 Vpliv temperature na razgradne procese v tleh

Poznavanje odvisnosti poteka razgradnje organskih ostankov in mineralizacije talne organske snovi od temperature je pomembno, ker določa, kako močan bo učinek pričakovane toplejše klime na koncentracijo atmosferskega CO₂ (Agren in Bosatta, 2002).

Temperatura ima neposredni vpliv na hitrost reakcij, učinek na mikrobe (pri ekstremnih temperaturah jih določen del odmre) in učinek zamrzovanja-odtaljevanja. Ima pa tudi posredni učinek na vlažnost opada, količino opada in dostopnost hranil (Eler, 2007). Vplive in dejanske učinke temperature na razgradnjo je težko opredeliti, kajti vključenih je več mehanizmov, ki pri mineralizaciji sodelujejo. Tudi zato so dosedanje znanstvene raziskave podale različne, včasih prav nasprotno zaključke. Po nekaterih naj bi predviden dvig temperature zraka in temperature tal neposredno kot tudi posredno preko aktivnosti mikroorganizmov pospešil mineralizacijo organske snovi v tleh (McCarthy in sod., 2001, cit. po Ranljivost... , 2003). Medtem ko Bardgett (2005) navaja, da naj bi imelo povišanje temperature v razponu od 1 – 3°C relativno majhen vpliv na talno bioto, ker so razne vrste favne in mikrobná biomasa temperaturno prilagodljive. Obenem ugotavlja, da obstajajo določene razmere, v katerih bi globalno segrevanje lahko imelo večji vpliv na biološke procese v tleh. Predvsem to velja za območja z nizkimi temperaturami (arktične in severnejše šotne ekosisteme). Poskusi z opadom (Kirschbaum, 1995, cit. po Agren in Bosatta, 2002) in talno organsko snovjo (Kätterer in sod., 1998, cit. po Agren in Bosatta, 2002) so pokazali močan vpliv temperature na stopnjo mineralizacije ogljika. Ta pogled je bil kasneje izpodbijan. S ponovnim pregledom časa razgradnje talne organske snovi v različnih podnebnih razmerah in z meritvami dihanja, sta Giardina in Ryan (2000) (cit. po

Agren in Bosatta, 2002) pokazala, da naj naraščajoča globalna temperatura ne bi vodila v povečano mineralizacijo ogljika v tleh.

Mikroorganizmi se pri višji temperaturi hitreje razvijajo. Mikrobne združbe imajo precejšnjo zmožnost prilagajanja na spremembo temperaturnega in padavinskega režima. Kljub temu sta oba dejavnika lahko omejujoča. Kadar je temperatura nižja, tudi povečana vlažnost ne pomeni večje mikrobiološke aktivnosti. In obratno, mikrobiološka aktivnost se kljub naraščajoči temperaturi ne bo povečala, če bo prisotno pomanjkanje razpoložljive vode. Kolikšen bo vpliv morebitne spremembe klimatskih dejavnikov na mikrobiološko aktivnost je v veliki meri odvisno tudi od dostopnosti hranil in kolikšni so razpoložljivi viri ogljika. Če je prisotno pomanjkanje, tudi povišana temperatura ne more vplivati na večjo mikrobiološko aktivnost (Berg in McClaugherty, 2008).

2.2.1.4 Razgradnja celuloze

Celulozo sestavljajo molekule glukoze, med seboj povezane z β -1,4 glukozidno vezjo. Dolge, linearne molekule celuloze tvorijo vlakna in so glavna sestavina celičnih sten pri rastlinah (Leštan, 2001). Celuloze je v opadu količinsko največ. V procesu njenega razgrajevanja sodelujejo encimi gliv, predvsem tistih iz družine Basidiomycetae. Pomembno vlogo pri razgradnji imajo tudi nekatere aerobne bakterije, ter anaerobna bakterija *Clostridium*. Celulozo encimi v tleh hidrolizirajo v krajše molekule in naprej do glukoze. Njena nadaljnja razgradnja pa je tako kot pri monosaharidih odvisna od prisotnosti kisika. Poleg kisika na razgradnjo vpliva tudi pH okolja. Bakterij ni v okolju s pH pod 5,5 in v tem primeru ostanejo kot razgrajevalci le glive. Za razgradnjo celuloze je nujno potreben dušik (1g N/30 g celuloze). C/N razmerje, širše od 30, znatno oteži razgradnjo (Lobnik, 2001).

2.2.1.5 Razgradnja lignina

Sestava lignina je zapletena, saj ga sestavljajo makromolekule, ki vsebujejo tudi aromatske obročje. Lignin je precej odporen na mikrobno razgradnjo. S svojo trdnostjo daje oporo rastlinskemu tkivu. Lignin obdaja celulozo in jo ščiti pred mikrobno razgradnjo. Depolimerizacije lignina so sposobne le nekatere glive (Basidiomycetae). Čeprav lignin vsebuje veliko ogljikovih atomov, ga glive niso sposobne uporabiti kot vir ogljika (Leštan, 2001).

Prepoznana sta dva glavna mehanizma, ki vplivata na razgradnjo lignina. Biološki mehanizem, ki pomeni, da povišane vrednosti dušika lahko zavirajo razgradnjo lignina in posledično tudi stopnjo razgradnje opada (Berg in sod., 1987, povzeto po Berg in McClaugherty, 2008). Višja kot je vsebnost dušika, večji zaviralni učinek ima na nastanek lignolitičnih encimov v populaciji organizmov, ki razgrajujejo lignin. Kemični mehanizem pa pomeni, da se na začetku razgradnje opada dušik veže na lignin in se s kondenzacijo prične humifikacija. Z omenjenimi kemičnimi spremembami nastanejo strukture, ki so za

mikroorganizme težje razgradljive. Oksidacija lignina in njegova vezava z dušikom je pomembna v procesu nastajanja trajnega humusa.

2.2.2 Nastanek humusa

Humus je stabilnejša oblika organske snovi, ki nastaja v procesu razgradnje in transformacije organskih ostankov. Znanstvena literatura še ni uspela povsem dognati, kako se različne sestavine opada preoblikujejo in spremenijo v humus (Berg in McClaugherty, 2008). Vrsta oziroma oblika razgradnih ostankov vpliva na obliko humusa, ki nastaja. Količina in vrsta nastalega humusa je odvisna tudi od podnebja, vegetacije, tipa tal in topografije. Humus, ki je v začetni fazi preobrazbe in ga sestavljajo še vidni rastlinski ostanki, imenujemo surovi humus. Prva faza v razvoju pravega humusa je t.i. hranljivi humus. Njegova sestava je nekje med še nepredelanimi ostanki in pravim humusom. Hranljivi humus vsebuje pomemben del lahko razgradljivih spojin (hemiceluloza, celuloza, sladkorji, škrob itd.). Zato je pomemben izvor energije za mikroorganizme. Pri razgradnji hranljivega humusa nastaja voda, ogljikov dioksid, dušik, žveplo, fosfor, določene anorganske kisline in t.i. »biološki cement« oz. lepljive snovi, ki so gradniki strukturnih agregatov tal (Butorac, 1999). Pravi ali trajni humus je črne barve in v tleh ostaja mnogo dlje od hranljivega humusa. Trajni humus nastaja v procesu humifikacije kot rezultat razgradnje in sinteze. Gre za stabilen in težko razgradljiv organski kompleks tal. Sestavljajo ga lignin, tanini, maščobe, voski in težko razgradljivi proteini. V procesu humifikacije prihaja do obogatitja organske snovi z ogljikom.

Humus lahko deluje kot vir ogljika za mikroorganizme, ki proizvajajo kisline in prispevajo k preperevanju. V humusu so uskladiščena hranila, kar pomeni rezervo hranil za rastline, ki se ob določenih mehanizmih oz. dejavnikih lahko sprostijo (Berg in McClaugherty, 2008). Ena od najpomembnejših funkcij humusa je zadrževanje dušika v tleh. Organska snov tal vsebuje skoraj ves dušik (okoli 90 %) v tleh. Humus igra zelo pomembno vlogo tudi z vidika globalnih podnebnih sprememb, saj predstavlja pomembno skladišče ogljika na dolgi rok.

3 MATERIAL IN METODE

Poskus je potekal od oktobra 2007 do maja 2009 na dveh lokacijah, ki smo ju izbrali s pomočjo talnega informacijskega sistema. Odločili smo se za Bohinj in Uskovnico, ki se zaradi različne nadmorske višine razlikujeta v povprečnih dolgoletnih temperaturah, po količini padavin pa sta si podobna. Izbrali smo dve mikrolokaciji, ki sta si podobni po rastlinski sestavi, topografiji in matični podlagi. V obeh primerih gre za zaraščen, grbinast travnik oziroma opuščeni pašnik (Sliki 5 in 6).



Slika 5: Mikrolokacija na Uskovnici (foto: M. Suhadolc).



Slika 6: Mikrolokacija v Bohinju (foto: M. Suhadolc).

3.1 OPIS LOKACIJ

3.1.1 Tla

Tla na mikrolokaciji v Bohinju so z organsko snovjo bogatejša. Povprečni delež organske snovi v tleh je bil v Bohinju 26,3 % in na Uskovnici 19,3 %. V Bohinju se je C/N razmerje tekom trajanja poskusa gibalo od 11-16 in na Uskovnici od 9–15. Lokaciji imata sorodno pedološko osnovo in podobne talne lastnosti, saj smo v poskusu namenoma izpostavili podnebne dejavnike.

3.1.1.1 Tla na lokaciji Bohinj

Mikrorelief vzorčnega mesta je ravnina v kotlini, s severno ekspozicijo. Matična podlaga je karbonatna morena (Slika 7). Tla na območju so plitva, med 30 in 50 cm. Koreninski sistem je gost. Tla so humozna. Oblika humusa je prhninasta do sprsteninasta rendzina. Talni profil sestavljajo A-C horizonti. Humusni A horizont sega do globine 4 cm, sledi A1 horizont, ki prehaja v matično podlago preko AC horizonta. Dreniranost mikrolokacije je dobra, infiltracija je zelo hitra. Struktura tal: mrvičasta, srednje obstojnosti in rahle konsistence. Tla so bila ob opisu sveža. Kamnitost in skalovitost nista prisotni.

Opis pedološkega profila prhninasto sprsteninaste rendzine na karbonatni moreni je podan v preglednici 1.

Preglednica 1: Opis pedološkega profila vzorčnega območja v Bohinju.

Horizont	Globina cm	Struktura	Teksturni razred	Organska snov	pH
Ah	0 – 4	mrvičasta	MI	močno humozen	5,4
A1	4 – 13	mrvičasta	MGI-MI	humozen	6,4
AC	13 – 18	mrvičasta	MI	humozen	7,2
C1	18 +	Zaobljeni karbonatni prodniki in droben MI - pesek			



Slika 7: Izkopan pedološki profil na lokaciji Bohinj (foto: A.Kotnik).

3.1.1.2 Tla na lokaciji Uskovnica

Mikrorelief vzorčnega mesta je sredina pobočja planote, z južno ekspozicijo. Matična podlaga je nesprijeta karbonatna morena (Slika 8). Tla na območju so plitva, med 30 in 50 cm. Koreninski sistem je gost. Talni profil sestavljajo A-B-C horizonti. Površinski horizont je zelo močno humozen. Humoznost z globino pada in B horizont je že slabo humozen. Oblika humusa je prhninasta rendzina. Dreniranost in infiltracija na mikrolokaciji sta zmerni. V zgornjih horizontih tal je mrvičasta, nato grudičasta struktura, drobljive konsistence in srednje do dobre obstojnosti. Tla so bila ob opisu sveža do vlažna. Kamnitost in skalovitost sta redkeje prisotni. Opis pedološkega profila prhninaste rendzine na karbonatni moreni je podan v preglednici 2.

Preglednica 2: Opis pedološkega profila na območju vzorčenja na Uskovnici.

Horizont	Globina cm	Struktura	Teksturni razred	Organska snov	pH
Ah	0 - 6	mrvičast	MI	zelo močno humozen	5,1
A1	6 – 12	grudičast	MGI	humozen	5,3
A2	12 -23	grudičast	MG-MGI	srednje humozen	6,5
B1	23 – 36	oreškast	MG	slabo humozen	7,1
BC	36 – 45	peščena frakcija morene in GI delci			
C	45 +	čista morena			



Slika 8: Izkopan pedološki profil na Uskovnici (foto: M. Suhadole).

3.1.2 Vegetacija

Na območju mikrolokacije v Bohinju prevladujejo rastlinske vrste, ki uspevajo na s hranili revnih, po vsej verjetnosti izpranih tleh: skalna glota (*Brachypodium rupestre*), ovčja bilnica (*Festuca ovina*), prava lakota (*Galium verum*), šaš (*Carex sp.*), cipresasti mleček (*Euphorbia cyparissias*), mah (*Hylocomium splendens*, *Pleurozium schreberi*), idr. Spadajo v okvirno rastlinsko združbo **Mesobrometum erecti** (Eler, 2010).

Na območju mikrolokacije na Uskovnici se pojavljajo rastlinske vrste, ki so značilne za višje nadmorske lege: skalna glota (*Brachypodium rupestre*), rdeča bilnica (*Festuca rubra*), gorski šaš (*Carex montana*), plazeči skrečnik (*Ajuga reptans*), borovnica (*Vaccinium myrtillus*), mah (*Hylocomium splendens*), idr. Spadajo v okvirno rastlinsko združbo: mozaična združba na prehodu med zvezami **Bromion erecti** in **Seslerio-Mesobromion** (Eler, 2010). Prisotne rastlinske vrste kažejo na zakisanost tal, verjetno kot posledico izpiranja.

3.1.3 Podnebje

3.1.3.1 Podnebne značilnosti Bohinja

Območje Bohinja sodi po Koeppenovi klasifikaciji v klimatsko območje C, za katerega je značilno zmerno toplo in vlažno podnebje. Padavine so izredno pogoste, ravno tako pozne pozebe. Ker so tudi zime zelo mokre, gre za klimatski tip Cf (Poglavja... , 2009).

Bohinj leži na 599 m n.m.v. Podatke o temperaturnih vrednostih smo s pomočjo Agencije Republike Slovenije za okolje pridobili iz meteorološke postaje Bohinjska Češnjica (603 m n.m.v.) (Slika 9). Povprečna letna temperatura zraka v obdobju od leta 2003 (ko je postaja pričela z delovanjem) do vključno leta 2008 je bila 8,37 °C. Najtoplejša meseca v tem obdobju sta bila julij (s povprečno temperaturo zraka 18,4 °C) in avgust (17,3 °C). Najhladnejša meseca sta bila januar (-1,8 °C) in december (- 0,87 °C) (Meteorološki... , 2009).

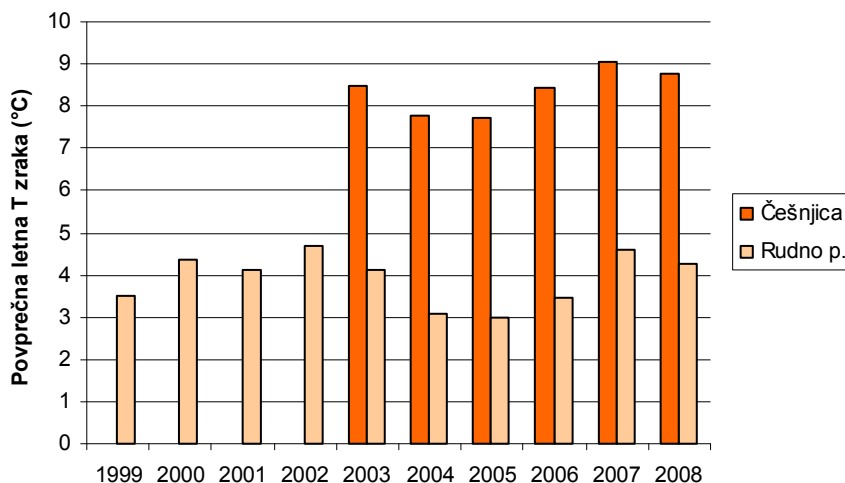
Za podatke o vrednostih in razporeditvi padavin smo izbrali padavinsko postajo Bohinjska Bistrica (507 m n.m.v.) (Slika 10). V letih 1999-2008 je bila povprečna letna vsota padavin 1844,7 mm. Meseca z najmanjšo vsoto padavin v tem obdobju sta bila februar (764 mm) in januar (1084,7 mm). Največ padavin je padlo v mesecu oktobru (2443,5 mm) in aprilu (1807,7 mm).

3.1.3.2 Podnebne značilnosti Uskovnice

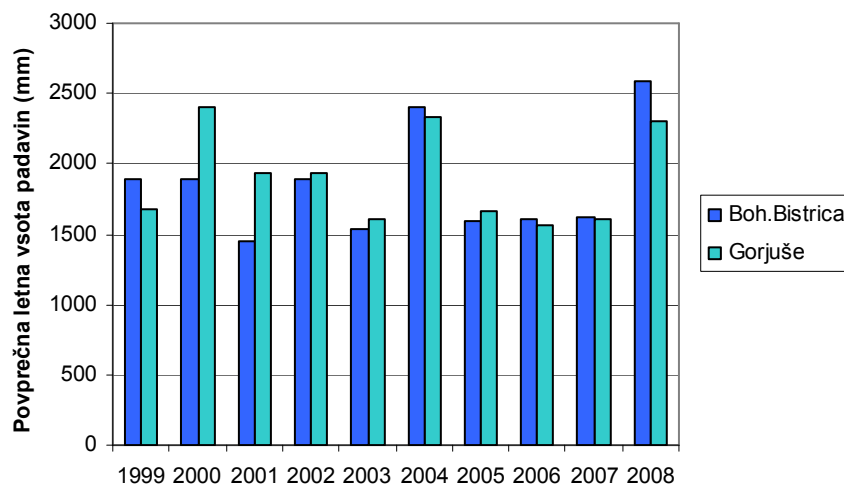
Uskovnica (1138 m n.m.v.) spada po Koeppenovi klasifikaciji v klimatsko območje D: podnebje hladnega gozda. Značilna je nizka srednja letna temperatura, doba rasti je zelo kratka. Podnebje je vlažno, tudi zime so mokre, zato sodi v klimatski tip Df (Poglavja... , 2009).

Podatke o temperaturnih vrednostih smo pridobili iz meteorološke postaje Rudno polje (1347 m n.m.v.) (Slika 9). Na Rudnem polju je nekoliko hladneje kot na Uskovnici, vendar je omenjena meteorološka postaja naši poskusni lokaciji najbližje. Povprečna letna temperatura zraka v zadnjem desetletju (1999 – 2008) je bila 3,9°C. Najtoplejša meseca sta bila julij in avgust, s povprečno temperaturo zraka 13 °C in 12,7 °C. Najhladnejša meseca sta bila januar in februar (-5,2 °C in -4,4 °C) (Meteorološki... , 2009).

Za podatke o vrednostih in razporeditvi padavin smo izbrali padavinsko postajo Gorjuše (940 m n.m.v. (Slika 10). V zadnjem desetletju (1999-2008) je bila povprečna letna vsota padavin 1903,43 mm. V tem obdobju sta bila meseca z najmanjšo skupno vsoto padavin: februar (777 mm) in januar (897,7 mm). Največ padavin je padlo v mesecu novembru (2295,7 mm) in oktobru (2174,8 mm).



Slika 9: Povprečne letne temperature zraka (°C) v letih 1999 (2003) - 2008 na obeh lokacijah.



Slika 10: Povprečne letne vsote padavin (mm) v letih 1999-2008 na obeh lokacijah.

3.2 ZASNOVA POSKUSA

Na obeh izbranih mikrolokacijah smo nabrali rastlinski opad, ga posušili na 35 °C, narezali na 0,5-1 cm dolžine in oba vzorca opada premešali v razmerju 1:1. Tako pripravljen opad smo natehtali v količini 9-10 g v številsko označene mrežaste najlonske vrečke in robove vrečk zašili. Vrečke z opadom so bile s tem pripravljene na vložitev (Slika 11).



Slika 11: Mrežasta najlonska vrečka z rastlinskim opadom (foto: M. Suhadolc).

3.2.1 Vložitev in vzorčenje opada

Vrečke z opadom smo vložili 29.10.2007 v vzorčno mesto v Bohinju in vzorčno mesto na Uskovnici v Of horizont (2-3 cm od površja) (Slika 12).



Slika 12: Vlaganje vrečk z opadom na Uskovnici 29.10.2007 (foto: A. Kotnik).

Vrečke smo vložili v krogu, ki smo ga označili s pobarvanimi količki za večjo preglednost (Slika 13).



Slika 13: Označeno vzorčno mesto z vložnimi vrečkami (foto: A. Kotnik).

Obenem smo izvedli pregled obeh vzorčnih območij, popis rastlinja ter izkop in opis profila tal. Vzeli smo vzorec tal iz območja Of horizonta na obeh mikrolokacijah za nadaljnje analize, ki so opisane v poglavju 3.4.

Vzorčenja vloženih vrečk smo izvedli v časovnih intervalih glede na literaturne podatke in vremenske razmere (temperatura, sneg). Datume vzorčenja vloženih vrečk prikazuje preglednica 3:

Preglednica 3: Datumi vzorčenja opada za spremljanje hitrosti razgradnje.

Zaporedno vzorčenje	Datum vzorčenja	Opis časa vzorčenja
Prvo vzorčenje	14.11.2007	2 tedna po vložitvi
Drugo vzorčenje	08.05.2008	6 mesecev po vložitvi 2-3 tedne po snegu
Tretje vzorčenje	24.06.2008	8 mesecev po vložitvi 10 tednov po snegu
Četrto vzorčenje	07.04.2009 Bohinj 06.05.2009 Uskovnica	17, 18 mesecev po vložitvi 2-3 tedne po snegu

Ob vsakem vzorčenju smo odvzeli po 5 vrečk iz obeh lokacij za analizo hitrosti razgradnje opada in kemijske analize. Vsakič smo odvzeli tudi talni vzorec iz horizonta vloženih vrečk za kasnejšo analizo vsebnosti lažje dostopnih oblik ogljika in dušika.

3.3 MERITEV HITROSTI RAZGRADNJE OPADA

Pričetki raziskav razgradnje rastlinskega opada z uporabo škatel, odprtih cevi in kasneje mrežastih vrečk, napolnjenih z opadom, segajo v leto 1930. Četudi so se metode skozi ves čas nadgrajevale, je uporaba mrežastih vrečk razširjena še danes (Grača in sod., 2005). S to metodo ugotavljamo razgradnjo rastlinskih ostankov v dejanskih razmerah v naravi. Z rastlinskim opadom napolnjene mrežaste najlonske vrečke zakopljemo tik pod površjem tal. Količino razgrajenega opada ugotovimo s tehtanjem (spremembe v masi opada).

Po vsakem vzorčenju smo pobrane vrečke dali na sušenje za 96 ur pri 70 °C, jih dali v eksikator in stekali. Zmlete vzorce smo shranili v vrečkah pri sobni temperaturi do nadaljnjih analiz. V vzorcih smo določili suho snov s sušenjem na 105 °C. Pri delu smo uporabili naslednji material in opremo:

- rastlinski material z mesta poskusa,
- vrečke, velikosti 10 x 10 cm, 0,04 mm premera luknjic,
- pečica,
- tehtnica,
- eksikator.

3.4 ANALITSKE METODE

3.4.1 Osnovne analize tal

Osnovne analize tal so opravili na Biotehniški fakulteti, na Centru za pedologijo in varstvo okolja (CPVO). Reakcijo tal so merili po elektrometrični meritvi aktivnosti H^+ -ionov (izraženo kot dekadčni logaritem) v suspenziji tal z raztopino 0,01 mol/l kalcijevega klorida v volumskem razmerju 1:5 (SIST ISO 10390, 2005). Teksturo so merili s sedimentacijsko pipetno metodo (Janitzky, 1986). Organsko snov so merili po metodi mokre oksidacije (SIST ISO 14235, metoda po Walkley-Blacku), pri kateri organski ogljik oksidira v žvepleno kislem okolju ob dodatku oksidacijskega sredstva (dikromata). Po tej metodi merimo porabo oksidacijskega sredstva, na osnovi katere nato izračunamo maso C. Po tej metodi ne merimo visoko kondenziranih in mineralnih oblik C.

3.4.2 Skupna vsebnost C in N v opadu

Skupno vsebnost ogljika in dušika v opadu smo merili s postopkom suhe oksidacije, pri kateri se ogljik iz organskih spojin sprosti v obliki CO_2 . Na osnovi tega merimo vsebnost skupnega organskega ogljika. Postopek smo izvedli na elementnem CNS analizatorju firme Elementar, model VarioMAX. Zatehtali smo 0,3 g vzorca posušenega in mletega rastlinskega opada. Celokupna vsebnost C in N je bila izmerjena po sežigu pri 900 °C s pomočjo TCD detektorja (Thermal Conductivity Detector). Metoda je določena na podlagi standardov (SIST ISO 10694, 1996 in SIST ISO 13878, 1999).

3.4.3 Meritev topnih oblik C in N v ekstraktih opada

Za meritev topnih oblik C in N smo uporabili $CaCl_2$ – ekstrakcijsko metodo (Houba, 1986). Mleti rastlinski opad (0,5 g) smo ekstrahirali z 10 mL $CaCl_2$ (0.01 M). Vzorce smo stresali 20 minut in jih zatem centrifugirali 30 minut pri 4000 obratih/min. (aparatus ROTANTA 96 S). Ekstrakt smo filtrirali z vakuumsko filtrirno napravo preko filtrirnih lističev (Whatman Nr. 111207 PC MB 50 mm, 0,4 mikrom). Ekstrakt smo shranili v zamrzovalnik do določitve C in N.

Skupni C v ekstraktu rastlinskega opada (DOC) smo merili s TC analizatorjem (DIMATEC, Germany). Amonijski, nitratni in skupni dušik smo merili fotometrično na analizatorju s kontinuiranim pretokom (Skalar Analytical, The Netherlands). Topni organski dušik smo izračunali iz razlike med skupnim N in mineralnimi oblikami N.

3.4.4 Meritev vsebnosti pepela, fosforja in kalija v opadu

Vsebnost celokupnega fosforja in kalija smo merili po razklopu organske snovi s sežigom pri 550 °C (SIST ISO 5516, 1995). Fosfor smo merili v raztopini pepela spektrofotometrijsko na aparatu Perkin Elmer, Lambda 2 in kalij na plamenskem fotometru Flapho 40 (SIST ISO 6491, 1999).

3.4.5 Meritev vsebnosti celuloze in lignina v opadu

Vsebnost celuloze in lignina v rastlinskem opadu so merili v laboratoriju BF na oddelku Zootehnike in sicer po metodi za določanje vlaken, netopnih v kislem detergentu, oziroma KDV (ANKOM Technology- 05/03). Vlakna so frakcija vzorca, ki jo dobimo po enournem kuhanju s kislim detergentom (2% raztopina cetiltrimetilamonijevega bromida v 1 N H₂SO₄). Vsebuje celulozo, lignin, kutin in v kislini netopni pepel (Lavrenčič, 2003).

Uporabili so tudi metodo za meritev v kislem detergentu netopnega lignina (KDL), po metodologiji ANKOM Technology FSA 72 (07/02). V kislem detergentu netopni lignin je frakcija vzorca, ki jo izmerimo kot organski ostanek po triurni obdelavi KDV (vlakna, netopna v kislem detergentu) z 72 % žveplovo (VI) kislino (H₂SO₄). Vsebuje predvsem lignin in kutin (Lavrenčič, 2003). Rezultat KDL nam poda oceno vsebnosti lignina v materialu, razlika med KDV in KDL pa nam poda oceno vsebnosti celuloze.

3.5 STATISTIČNE METODE

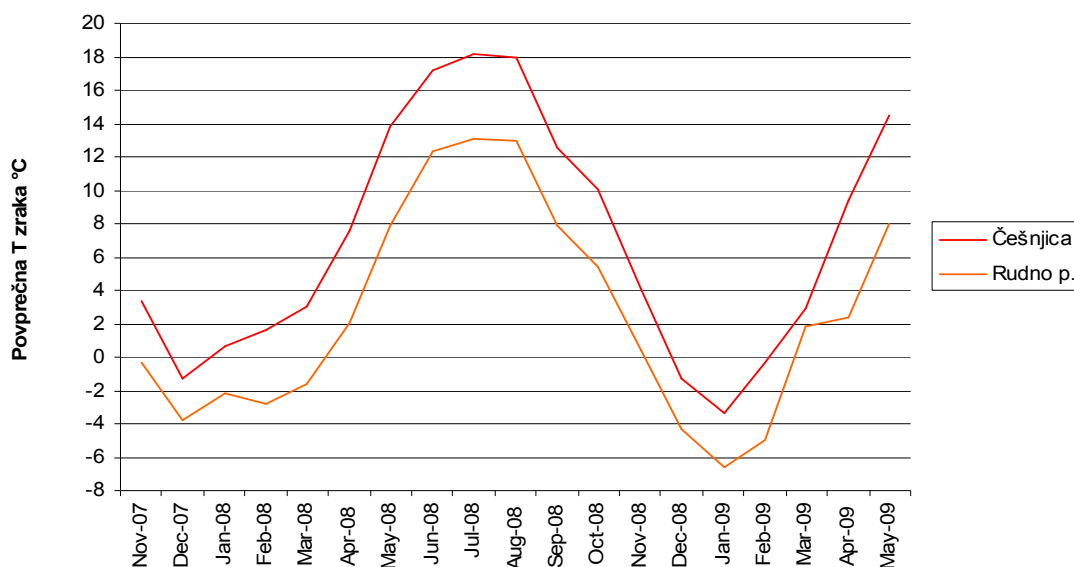
Rezultate meritev iz analiz smo obdelali z metodami opisne statistike (povprečje, standardni odklon). Uporabili smo program Microsoft Excel.

4 REZULTATI

4.1 ČASOVNA DINAMIKA TEMPERATURE IN PADAVIN V ČASU POSKUSA

4.1.1 Temperatura zraka

Po podatkih z meteorološke postaje Bohinjska Češnjica je bilo v Bohinju v času trajanja poskusa povprečje mesečnih povprečnih temperatur zraka 6,87 °C (Slika 14). Najtoplejša meseca sta bila julij 2008 (18,13 °C) in avgust 2008 (17,97 °C), najhladnejša pa januar 2009 (-3,3 °C) in december 2007 (-1,35 °C) (Meteorološki..., 2009). Na Uskovnici je bilo po podatkih z meteorološke postaje Rudno polje povprečje mesečnih povprečnih temperatur zraka v enakem obdobju poskusa 2,5 °C. Najtoplejša meseca sta bila julij 2008 (13,12 °C) in avgust 2008 (12,94 °C), najhladnejša meseca pa januar 2009 (-6,6 °C) in december 2008 (-4,34 °C) (Meteorološki..., 2009). Povprečna razlika v mesečnih temperaturah zraka med postajama je bila v času poskusa 4,4 °C ($\pm 1,5$ °C).

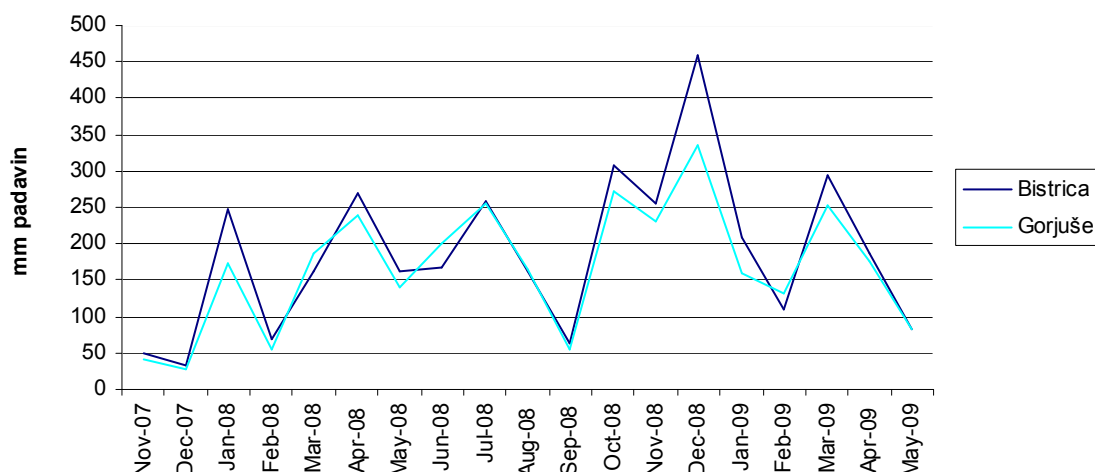


Slika 14: Povprečne mesečne temperature zraka v obdobju poskusa na obeh lokacijah (Meteorološki..., 2009).

4.1.2 Padavine

Po podatkih z meteorološke postaje v Bohinjski Bistrici je v Bohinju v času poskusa skupaj padlo 3548,7 mm padavin oziroma povprečno mesečno 186,8 mm. Največ padavin je padlo v decembru 2008 (458,3 mm) in oktobru 2008 (307,2 mm) (Slika 15). Leto 2008 je omenjena meteorološka postaja zabeležila kot najbolj mokro leto zadnjega desetletja (2584 mm padavin). Pokritost s snežno odejo je trajala vse do meseca aprila 2009. Najbolj sušna meseca sta bila december 2007 (32,5 mm) in november 2007 (50,7 mm) (Meteorološki...,

2009). Tudi na Uskovnici je bilo leto 2008 med bolj mokrimi leti zadnjega desetletja (2309,8 mm padavin). V času trajanja poskusa je skupaj padlo 3181,4 mm padavin oziroma povprečno 167,4 mm/mesec. Največ padavin je padlo v decembru 2008 (335,6 mm) in oktobru 2008 (271,3 mm). Pokritost s snežno odejo je trajala vse do konca aprila 2009. Najbolj suha meseca sta bila december 2007 (27,4 mm) in november 2007 (41,2 mm) (Meteorološki..., 2009).



Slika 15: Mesečne vsote padavin (mm) v obdobju trajanja poskusa na obeh lokacijah (Meteorološki..., 2009).

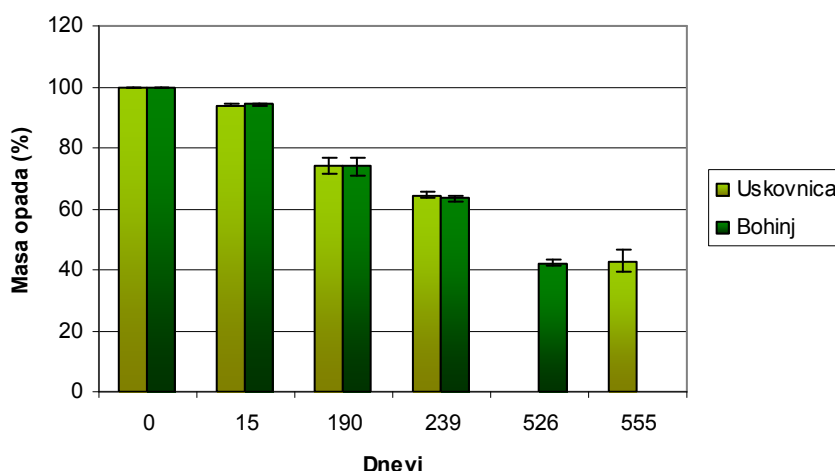
Padavinski postaji v Bohinjski Bistrici in na Gorjušah beležita skoraj identičen padavinski režim. Večje odstopanje v količini padavin je razvidno le v zimskih mesecih (januar in december 2008), ko je več padavin padlo v Bohinjski Bistrici oziroma v Bohinju (Slika 15). Povprečna razlika v mesečnih vsotah padavin je bila 19,3 mm (± 36 mm) oziroma je v celotnem obdobju poskusa v Bohinju padlo za 367,3 mm več padavin, kot na Uskovnici.

Preglednica 4: Vsota padavin (mm) in povprečna dnevna T (°C) zraka v obdobjih med posameznimi vzorčenji.

Obdobje vzorčenja	Od 29.10.07 do 14.11.07 (1.vzorčenje)		Od 15.11.07 do 08.05.08 (2.vzorčenje)		Od 09.05.08 do 24.06.08 (3.vzorčenje)		Od 25.06.08 do 06.05.09 (4.vzorčenje)	
Količina padavin in temperatura	Vsota padavin (mm)	Povpr. dnevna T (°C)	Vsota padavin (mm)	Povpr. dnevna T (°C)	Vsota padavin (mm)	Povpr. dnevna T (°C)	Vsota padavin (mm)	Povpr. dnevna T (°C)
Uskovnica	10,2	1,1	736	-1,4	321	10,1	2041	2,8
Bohinj	9,6	4,2	854	2,8	306	15,3	2309	7,4

4.2 IZGUBA MASE VGRAJENEGA OPADA

Razgradnjo rastlinskega opada smo spremljali leto dni in pol, v naravnih razmerah lokacij Bohinj in Uskovnica. V tem času med lokacijama ni bilo razlik v hitrosti in poteku razgradnje (Slika 16).



Slika 16: Zmanjševanje mase opada (izraženo v % suhe snovi) po času trajanja razgradnje.

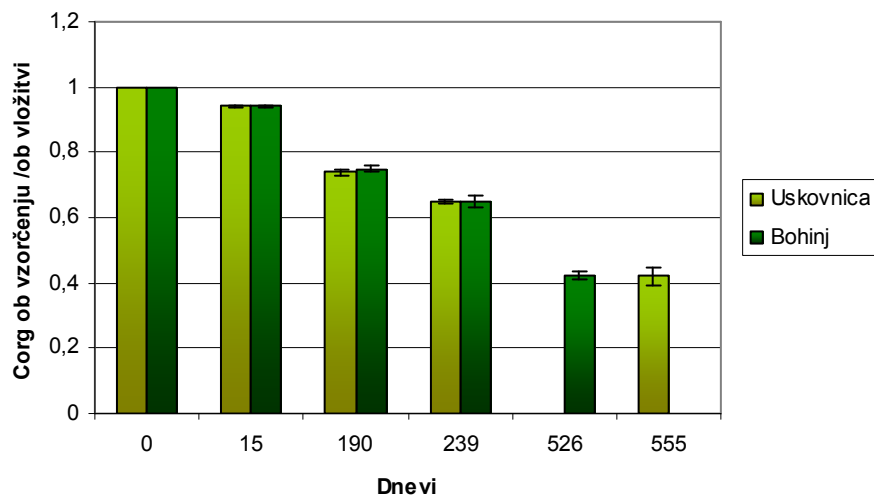
V prvih 15 dneh razgradnje se je masa opada na obeh lokacijah povprečno zmanjšala za skoraj 6 odstotkov glede na začetno vrednost in po 190 dneh razgradnje za 26 odstotkov. To je večji padec na časovno enoto, kot v kasnejši fazi razgradnje, ko se je v približno 300 dneh med tretjim in četrtem vzorčenjem masa suhe snovi zmanjšala za 21 odstotkov. Takoj po vložitvi opada je bila hitrost razgradnje največja, ker se najprej razgradijo hitro razgradljive snovi. Izguba mase opada je na obeh lokacijah potekala z enako hitrostjo, enak je tudi vzorec zmanjševanja mase. Ob zadnjem vzorčenju, po 555 dneh razgradnje, je masa suhe snovi opada na Uskovnici povprečno znašala 42,9 odstotkov začetne mase suhe snovi vloženga opada, v Bohinju pa 42,0 odstotkov, po 526 dneh razgradnje. V Bohinju je bila izguba mase opada le za 0,9 % večja od izgube mase opada na Uskovnici.

4.3 VSEBNOST SKUPNEGA ORGANSKEGA OGLJIKA IN DUŠIKA V RASTLINSKEM OPADU

4.3.1 Skupni organski ogljik

Delež skupnega organskega ogljika v rastlinskem opadu se je na obeh lokacijah enakovredno zniževal (Slika 17). Iz rezultatov je razvidno, da se je razgradnja pričela takoj po vložitvi in njegov delež se je v prvih 15 dneh poskusa znižal za 6 % na obeh lokacijah. Ob drugem vzorčenju se je njegov delež znižal za 26 % na Uskovnici in za 25 % v

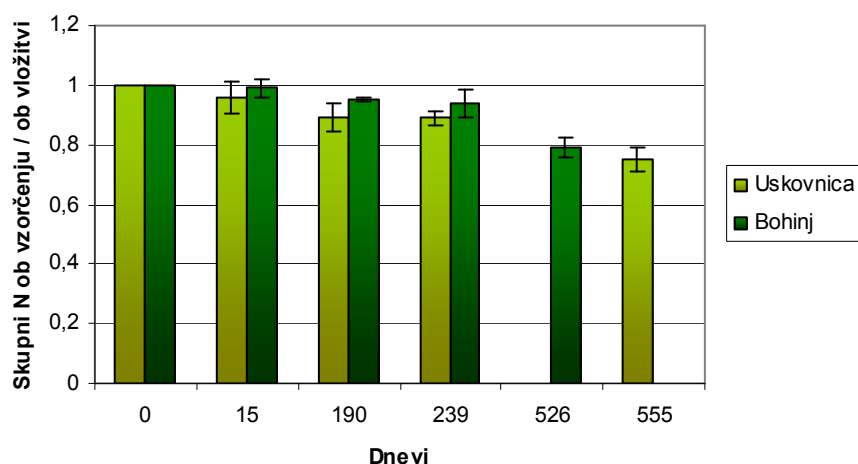
Bohinju. Zniževanje deleža skupnega organskega ogljika v rastlinskem opadu natančno prikazuje zniževanje mase suhe snovi opada.



Slika 17: Razmerje med skupnim organskim ogljikom v opadu ob vzorčenju in skupnim organskim ogljikom v opadu ob vložitvi.

4.3.2 Skupni dušik

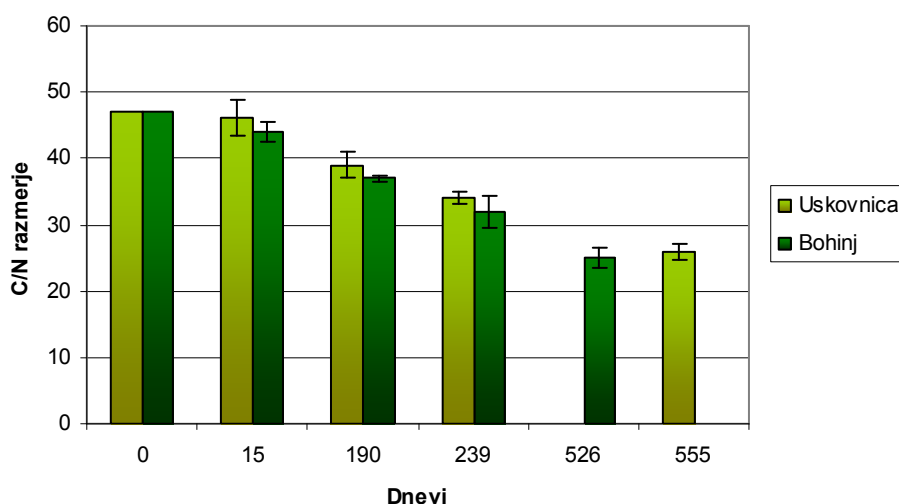
Delež skupnega dušika v rastlinskem opadu se je skozi celotno obdobje poskusa počasi in enakomerno zniževal in je bil ob vseh vzorčenjih nekoliko nižji na lokaciji Uskovnica. Ob zadnjem vzorčenju je znašal povprečno 75 odstotkov začetne vrednosti na Uskovnici in 79 odstotkov začetne vrednosti v Bohinju (Slika 18).



Slika 18: Razmerje med skupnim dušikom v opadu ob vzorčenju in skupnim dušikom v opadu ob vložitvi.

4.3.3 C/N razmerje

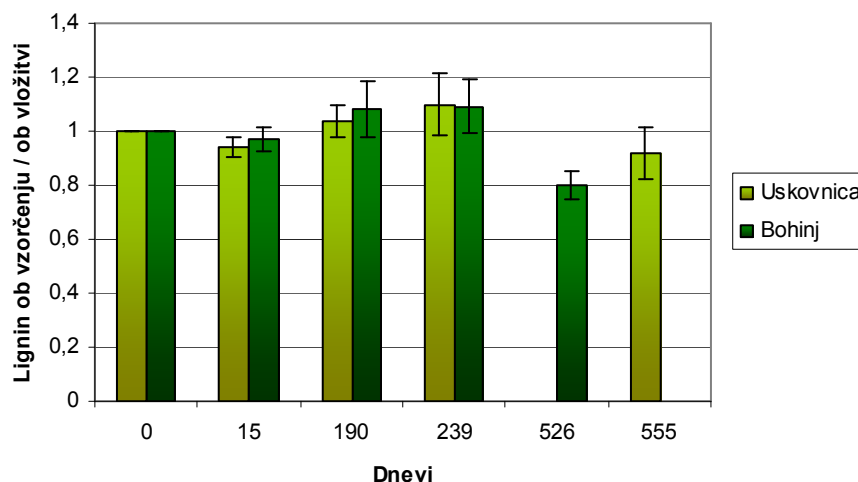
V začetnem rastlinskem materialu je bilo C/N razmerje 47 in se je tekom poskusa ožilo na obeh lokacijah, nekoliko bolj v Bohinju (Slika 19). Ob koncu poskusa je bilo C/N razmerje v Bohinju 25 in na Uskovnici 26.



Slika 19: C/N razmerje v opadu tekom trajanja poskusa.

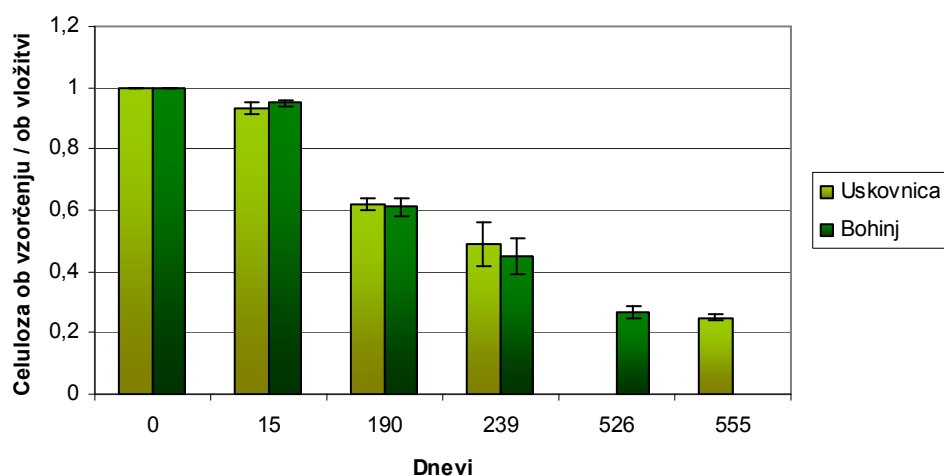
4.4 RAZGRADNJA LIGNINA IN CELULOZE

Vsebnost lignina v opadu je bila v prvem letu relativno konstantna, posebno ob upoštevanju standardnega odklona med ponovitvami (Slika 20). Ob koncu poskusa pa smo zaznali določeno zmanjšanje. Vsebnost lignina se je do konca poskusa v povprečju zmanjšala za 8 % na Uskovnici in za 20 % v Bohinju.



Slika 20: Razmerje med vsebnostjo lignina v opadu ob vzorčenju in ob vložitvi.

Delež celuloze v mletem rastlinskem opadu se je tekom trajanja razgradnje zniževal (Slika 21).



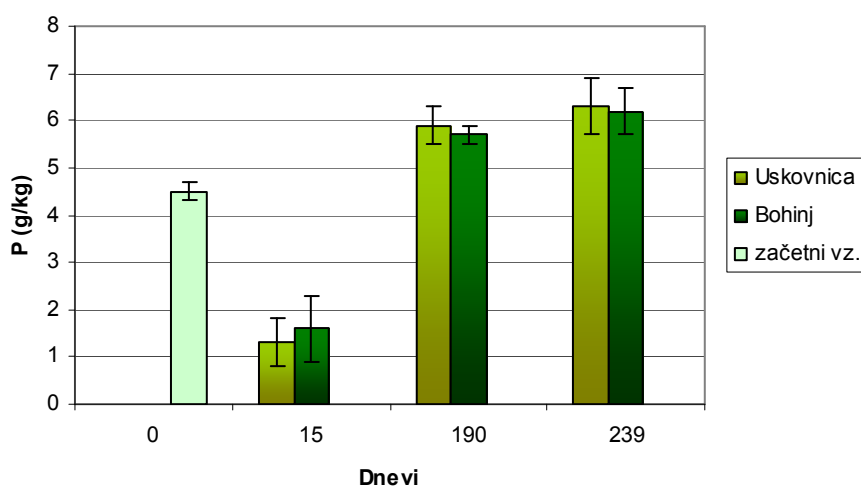
Slika 21: Razmerje med vsebnostjo celuloze v opadu ob vzorčenju in ob vložitvi.

Razgradnja celuloze se je pričela kmalu po vložitvi in njen delež se je v prvih 15 dneh na Uskovnici zmanjšal za 7 % in v Bohinju za 5 %. Po 190 dneh razgradnje se je njen delež, glede na delež v začetnem materialu, zmanjšal za 38 % na Uskovnici in za 39 % v Bohinju. Ob koncu poskusa je bil delež celuloze v rastlinskem opadu na Uskovnici 25 % in v Bohinju 27 % njenega deleža v začetnem materialu. Iz rezultatov razgradnje celuloze je dobro razviden enak potek razgradnje opada na obeh lokacijah.

4.5 VSEBNOST FOSFORJA, KALIJA IN PEPELA V RASTLINSKEM OPADU

4.5.1 Fosfor

V začetnem rastlinskem materialu je bila povprečna vsebnost fosforja 4,5 g/kg (Slika 22). Po 15 dneh razgradnje se je njegova vsebnost na obeh lokacijah znižala in je povprečno znašala 1,3 g/kg na Uskovnici in 1,6 g/kg v Bohinju. Z nadaljnjo razgradnjo je vsebnost fosforja naraščala in po 239 dneh razgradnje smo ga izmerili povprečno 6,3 g/kg na Uskovnici in 6,2 g/kg v Bohinju. Ob koncu poskusa je bila količina vzorca opada zaradi razgradnje toliko zmanjšana, da meritve fosforja nismo mogli opraviti.

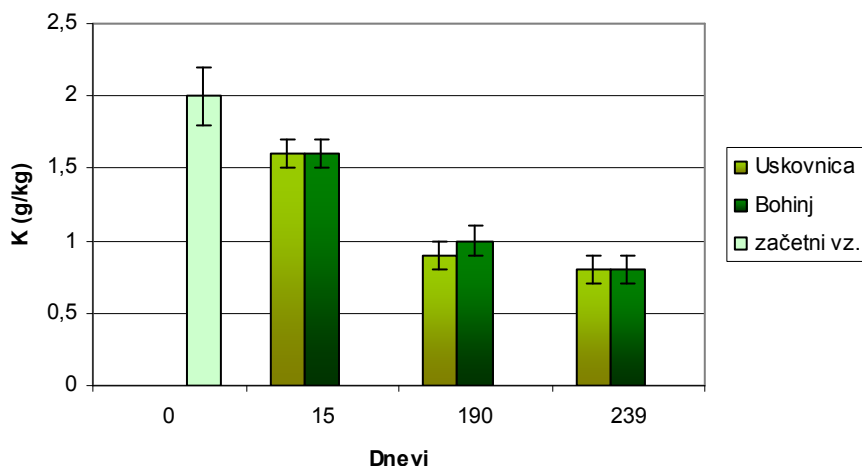


Slika 22: Vsebnost fosforja v mletem opadu (g/kg).

4.5.2 Kalij

Kalij je zelo mobilni element, občutljiv na izpiranje in ob razgradnji opada se je njegova vsebnost znižala (Slika 23).

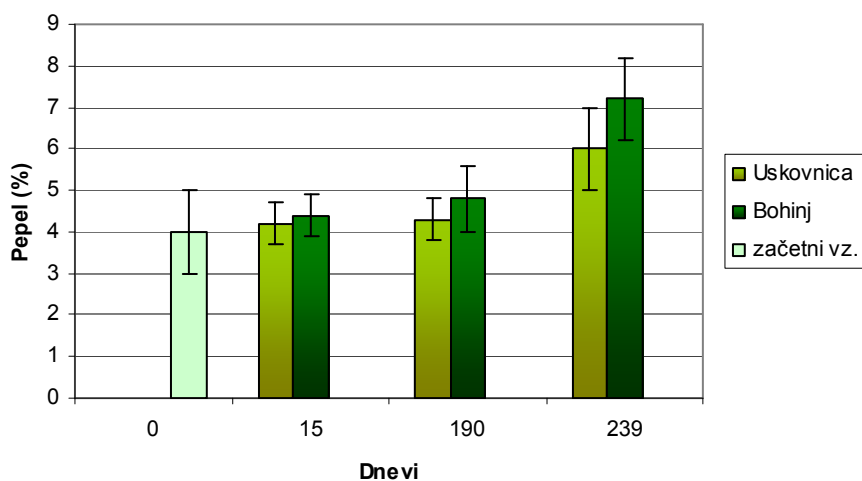
V začetnem rastlinskem materialu je bila povprečna vsebnost kalija 2 g/kg. Njegova vsebnost se je enakovredno zniževala na obeh lokacijah in je po 239 dneh razgradnje znašala 0,8 g/kg opada. Gibanje vsebnosti kalija prikazuje izenačen potek razgradnje na Uskovnici in v Bohinju.



Slika 23: Vsebnost kalija v mletem opadu (g/kg).

4.5.3 Pepel

Povprečni delež pepela v začetnem rastlinskem materialu je znašal 4 % opada (Slika 24). Tekom razgradnje se je njegov delež postopoma povečeval in je ob zadnji meritvi, po 239 dneh razgradnje, dosegal 6 % opada na Uskovnici in 7,2 % opada v Bohinju.



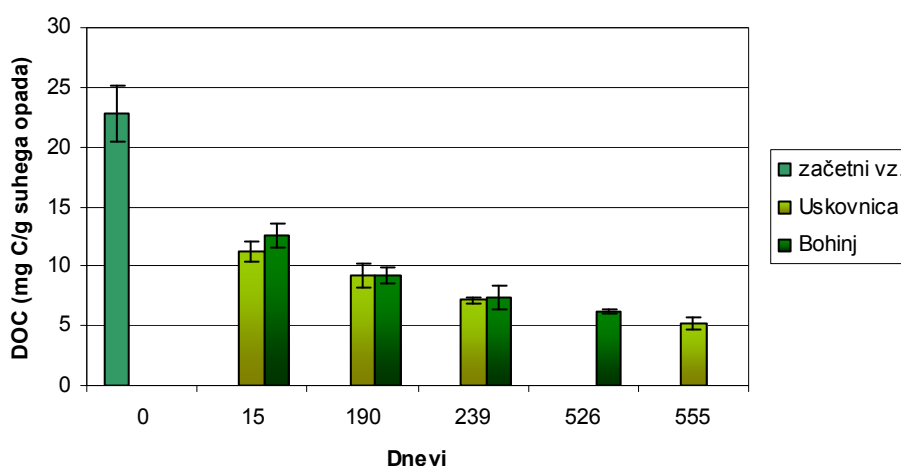
Slika 24: Delež pepela v mletem opadu (%).

4.6 VSEBNOST LAŽJE DOSTOPNIH OBLIK OGLJIKA IN DUŠIKA V EKSTRAKTU OPADA

4.6.1 Vsebnost topnega organskega ogljika

V ekstraktu začetnega rastlinskega materiala je bila povprečna vsebnost topnega organskega ogljika (DOC) 23 mg C/g (Slika 25). Že v prvih 15 dneh razgradnje se je vsebnost DOC močno znižala in ob prvem vzorčenju smo izmerili 11,2 mg C/g na Uskovnici in 12,6 mg C/g v Bohinju. Ob koncu poskusa smo po 555 dneh razgradnje na Uskovnici izmerili 5,2 mg C/g in po 526 dneh razgradnje v Bohinju 6,2 mg C/g.

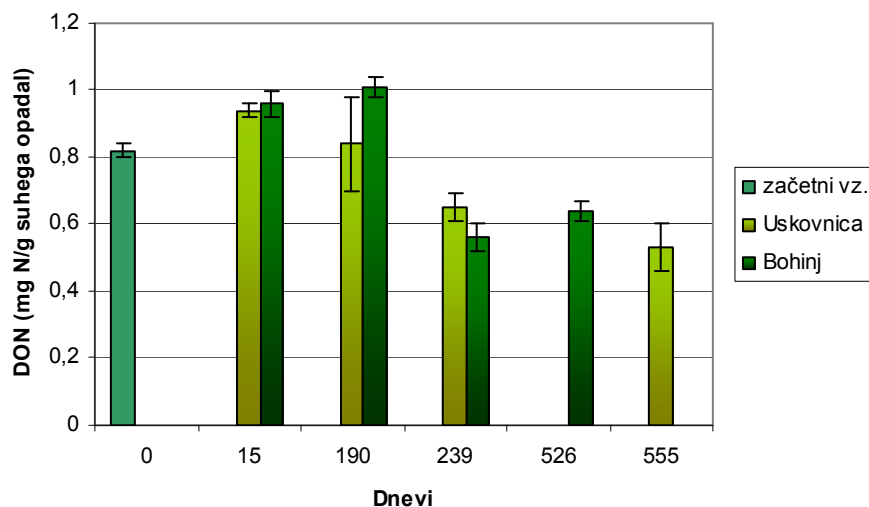
Ogljikov dioksid se prične sproščati takoj na začetku razgradnje. Svoj delež pri zniževanju koncentracije DOC ima tudi izpiranje, vendar padavin v tem obdobju ni bilo veliko. Koncentracija DOC se značilno znižuje ves čas trajanja poskusa, a se intenziteta zniževanja s časom trajanja poskusa zmanjšuje.



Slika 25: Vsebnost topnega organskega ogljika (DOC) ob pričetku poskusa in ob vzorčenjih, izražena v mg C/g suhega opada.

4.6.2 Vsebnost topnega organskega dušika

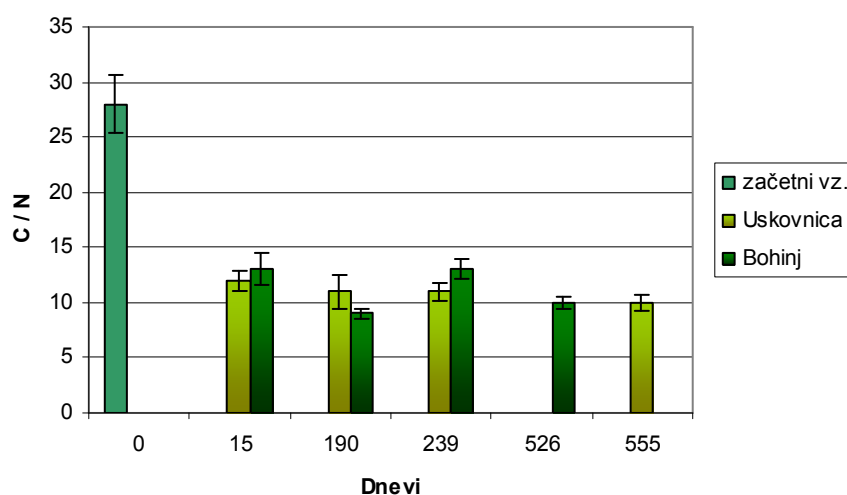
Povprečna začetna vsebnost topnega organskega dušika (DON) v rastlinskem ekstraktu je bila 0,82 mg N/g (Slika 26). V prvih 190 dneh razgradnje opada je njegova vsebnost naraščala, nato pa se je v poletnem času na obeh lokacijah znižala in ob tretjem vzorčenju smo na Uskovnici izmerili 0,65 mg N/g in v Bohinju 0,56 mg N/g. V kasnejši fazi razgradnje, v približno 300 dneh razgradnje, se vsebnost DON ni bistveno spremenila.



Slika 26: Vsebnost topnega organskega dušika (DON) ob pričetku poskusa in ob vzorčenjih, izražena v mg N/g suhega opada.

4.6.3 C/N razmerje v ekstraktu opada

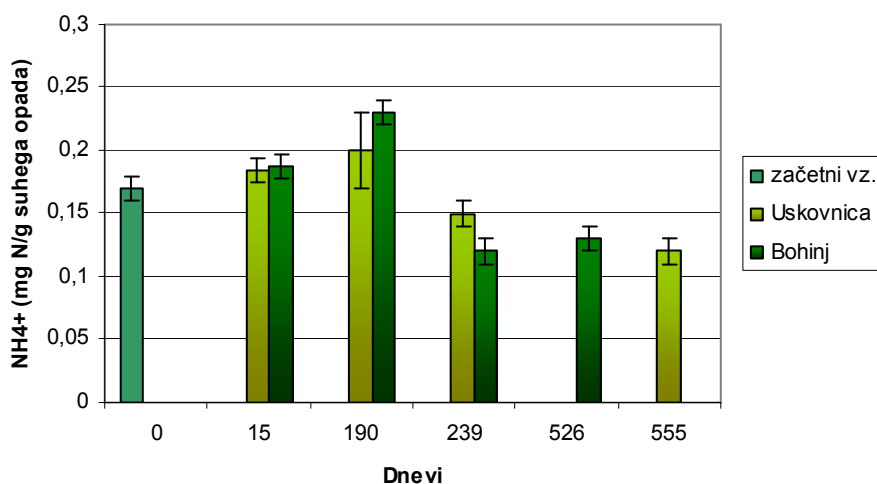
V ekstraktu začetnega rastlinskega materiala je bilo C/N razmerje v povprečju 28 (Slika 27). Močno se je znižalo že takoj po vložitvi in bistvenih razlik med lokacijama nismo zaznali. Ob koncu poskusa je bilo C/N razmerje 10 na obeh lokacijah.



Slika 27: C/N razmerje v ekstraktu opada.

4.6.4 Vsebnost topnih mineralnih oblik dušika

Vsebnost nitratnih ionov v ekstraktu opada je bila ob vseh opravljenih meritvah pod detekcijsko mejo. Vsebnost amonijevih ionov v ekstraktu opada se je prvih 190 dni poskusa na obeh lokacijah povečevala in je ob drugem vzorčenju dosegla najvišjo vrednost, tj. na Uskovnici 0,20 mg N/g in v Bohinju 0,23 mg N/g (Slika 28). V nadaljnjih 49 dneh razgradnje, v poletnem času, se je značilno znižala. Vsebnost amonijevih ionov je bila ves čas, razen ob tretjem vzorčenju, nekoliko višja na lokaciji Bohinj.



Slika 28: Vsebnost NH_4^+ (mg N/g suhega opada) ob pričetku poskusa in ob vzorčenjih.

5 RAZPRAVA IN SKLEPI

5.1 HITROST RAZGRADNJE OPADA V BOHINJU IN NA USKOVNICI

Razumevanje razgradnje rastlinskega opada je pomembno z vidika globalnega podnebne segrevanja, ker se pomembne količine CO₂, metana in drugih plinov sproščajo kot produkti razgradnje. Dejavniki, ki vplivajo na povečano stopnjo razgradnje, vplivajo tudi na povečano količino plinov na osnovi ogljika v atmosferi.

Merjenje izgube mase v mrežaste vrečke vložene rastlinskega opada je uporabna metoda že najmanj 50 let (Bocock in Gilbert, 1957, cit. po Coleman in sod., 2004). Vrečke z znano maso opada vložimo v tla in jih kasneje ponovno stehtamo. Rezultat prikažemo kot odstotek mase, ki ostane. Z merjenjem stopnje izgube mase opada ugotovimo hitrost razgradnje. Merjenje izgube mase vložene opada je dragoceno za primerjavo različnih substratov, kot so listi, iglice in korenine. Hitrost razgradnje opada se med ekosistemi na lokalni in širši geografski skali razlikuje. Na ta način lahko primerjamo različne habitate in geografske regije (Coleman in sod., 2004).

Pri uporabi vrečk z opadom je zelo pomembna perforacija vrečke. Pri vrečkah s premerom luknjic 1- 2 mm je iz procesa razgradnje izključena večina makrofavne, zato je stopnja razgradnje, glede na naravne razmere brez uporabe vrečk, podcenjena (Coleman in sod., 2004). V našem poskusu smo uporabili vrečke s premerom luknjic 0,04 mm. Zato je verjetno, da bi bila v naravnih razmerah brez uporabe vrečk hitrost razgradnje še nekoliko večja, kot so pokazale naše meritve. Pri uporabi vrečk z večjimi luknjicami pa lahko večji delci vložene materiala izpadejo ven in je zato stopnja razgradnje precenjena. V vrečkah je ponavadi večja vlažnost, kot je sicer v opadu, ki prosto leži v tleh. To pa lahko pomeni večjo mikrobno aktivnost (Coleman in sod., 2004).

V diplomskem delu so nas zanimale morebitne razlike v hitrosti razgradnje izenačenega rastlinskega opada na dveh temperaturno različnih lokacijah, v Bohinju in na Uskovnici. Povprečna razlika mesečnih povprečnih temperatur zraka med lokacijama je bila 4,4°C ($\pm 1,5$ °C). Glede na rezultate je očitno, da razlika v temperaturi zraka ni imela ključnega vpliva na potek in hitrost razgradnje. V približno leto dni in pol trajajočem poskusu se med lokacijama niso pokazale večje razlike v hitrosti razgradnje opada. Ob zadnjem vzorčenju je masa suhe snovi vložene opada na Uskovnici znašala 42,9 % začetne mase opada, v Bohinju pa 42 % (Slika 16). Tudi vzorec zmanjševanja mase opada je tekom poskusa identičen.

Naše hipoteze, da bo razgradnja rastlinskega opada na lokaciji Bohinj hitrejša zaradi višjih povprečnih temperatur zraka, rezultati poskusa tako niso potrdili. Poleg podnebnih dejavnikov so za potek in hitrost razgradnje ključnega pomena tudi fizikalne in kemične lastnosti opada. Vsebnost hranil in delež posameznih sestavin v opadu močno določa splošno stopnjo razgradljivosti materiala. V našem poskusu smo na obeh lokacijah vložili homogeniziran rastlinski opad. Predvidevamo, da so enaka sestava oziroma kvaliteta opada in podobne talne lastnosti imeli ključen vpliv na identičen potek razgradnje rastlinskega

opada na obeh lokacijah. Talne lastnosti, zlasti tekstura tal, močno vplivajo na mikroklimatske razmere z uravnavanjem kapacitete tal za vodo. Tekstura tal določa, koliko vode bo na voljo talni favni in mikrobom (Coleman in sod., 2004). Analize so pokazale podobno teksturo tal na izbranih mikrolokacijah, posebno v zgornjih horizontih (Preglednici 1 in 2). Učinek temperature je lahko zmanjšala lega mikrolokacij. Mikrolokacija na Uskovnici ima južno ekspozicijo, medtem ko ima mikrolokacija v Bohinju severno ekspozicijo. Topografija, predvsem nagib, vpliva na vodno dinamiko in na spremembe v mikroklimi. Vloga topografije v dinamiki razgrajevanja še ni dobro dokumentirana (Berg in McClaugherty, 2008).

Analiza dinamike razgradnje vključuje poleg vpliva podnebnih dejavnikov tudi vpliv različne kvalitete in sestave rastlinskega opada. V poskusu razgradnje opada iz smrekovih iglic na Norveškem je bila hitrost razgradnje v tesnejši povezavi s kvaliteto opada, kot s podnebnimi dejavniki. Sestava mikrobnih skupnosti je močno odvisna od koncentracije hranil in razgradljivosti opada (Berg in McClaugherty, 2008). Vsebnost glavnih hranil, zlasti dušika in fosforja, je ključni dejavnik za potek razgradnje v začetni fazi. V kasnejši fazi razgradnje je pomembna vsebnost lignina (Berg in McClaugherty, 2008). Koliko energije in hranil v rastlinskem opadu se sprostijo, je odvisno tudi od količine lignina in celuloze, deleža sekundarnih kemičnih spojin (tanini, polifenoli) ter od deleža ogljika. Sestava rastlinskega opada, njegova vsebnost celuloze, hemiceluloze in lignina močno vplivajo na mineralizacijo ogljika in dušika ter na njeno dinamiko (Bardgett, 2005).

Tudi nekatere zadnje študije kažejo, da je talna organska snov na spremembe v temperaturi manj občutljiva, kot so sprva mislili (Agren in Bosatta, 2002). Razgradnja organske snovi naj bi bila bolj odvisna od temperature, kadar razgradni material vložimo v okolje z drugačno temperaturo, kot je značilna za okolje, v katerem je preučevani material nastal. V našem poskusu smo rastlinski opad vložili v okolje njegovega izvora, kar bi lahko pojasnilo, zakaj vpliva temperatura na razgradnjo opada nismo zaznali. Različen izvor materiala je lahko eden bistvenih dejavnikov, da so izsledki raziskav o vplivu temperature na razgradnjo organske snovi med avtorji tako različni.

Nadalje, povprečne dnevne temperature so bile na obeh lokacijah v času trajanja poskusa relativno nizke z vidika optimalnih temperatur za aktivnost mikroorganizmov: na lokaciji Bohinj 6,8 °C in na lokaciji Uskovnica 2,5 °C. Vpliv temperature na hitrost razgradnje opada bi bilo tako smiselno raziskati na toplejših lokacijah, s podobno razliko v povprečnih temperaturah.

Zaenkrat si znanstveniki glede vprašanja, kakšna je odzivnost mineralizacije opada in talne organske snovi na temperaturne spremembe še niso enotni. V proces razgradnje je vključenih več mehanizmov in vsak od njih ima svojo specifično občutljivost na spremembe v temperaturi. Na primer Thornley in Cannell sta leta 2001 (cit. po Agren in Wetterstedt, 2007) z raziskavo pokazala, da od temperature odvisna reakcija adsorpcije, ki organsko snov stabilizira, lahko celo poveča zaloge ogljika, če temperatura naraste. Kolikšen bo vpliv temperature na proces razgradnje, je odvisno tudi od številnih drugih procesov, ki učinkovito prispevajo k mineralizaciji. Pomembno vlogo igrajo organizmi, ki sodelujejo pri razgradnji. Ti se v različnih okoljih razlikujejo, razlikuje se tudi njihovo

delovanje. Ugotovljeno pa je bilo, da imajo mikrobne združbe precejšnjo sposobnost prilagajanja na spremembo temperaturnega in padavinskega režima (Berg in McClaugherty, 2008).

Odperto ostaja tudi vprašanje, ali so na spremembe v temperaturi bolj občutljive težje razgradljivi substrati z manj hranili ali lažje razgradljivi substrati, z ugodnejšo sestavo in večjo vsebnostjo hranil. Liski (1999) (cit. po Agren in Bosatta, 2002) je podal zaključek, da je razgradnja starejše talne organske snovi tolerantna na temperaturne spremembe. Starejši kot je material, manj imajo spremembe v temperaturi vpliv na hitrost njegove razgradnje. Ravno nasprotno pa menijo nekateri drugi raziskovalci. Razgradnja težje razgradljivih spojin naj bi bila bolj občutljiva na temperaturne spremembe, kot lažje razgradljivi substrati (Agren in Bosatta, 2002). To sta utemeljila z dejstvom, da je potrebnih več korakov v procesu razgradnje, da se kompleksnejši substrati razgradijo.

5.2 SEZONSKI POTEK RAZGRADNJE

Razgradnja rastlinskega opada je bila najhitrejša v prvih dveh tednih po vložitvi, ko se je masa opada znižala za skoraj 6 % na obeh lokacijah. Za prve tedne razgradnje je značilna hitra izguba mase opada, ker se najprej razgradijo hitro razgradljive spojine (Coleman in sod., 2004). V zimskih mesecih 2007/08, oziroma v prvih 6 mesecih po vložitvi, se je masa opada na obeh lokacijah enako znižala, in sicer za 26 %. V zmanjšanju mase opada med lokacijama ni bilo razlike, kljub temu, da so negativne temperature zraka na Uskovnici trajale vse do začetnih dni v aprilu, medtem ko so bile v Bohinju že ves mesec marec temperature zraka nad lediščem. Pokritost s snežno odejo je zato spomladi 2008 na Uskovnici trajala teden dni dlje, spomladi 2009 pa celo tri tedne dlje, kot v Bohinju. Sneg je pomemben regulator procesov v ekosistemi zaradi svoje vloge izolatorja tal. Pospešuje aktivnost mikrobov in mineralizacijo v tleh (Bardgett, 2005). Voda v tleh ne zamrzne in razgradnja je omogočena tudi pod snežno odejo.

Razgradnja opada je bila pospešena tudi v pozni pomladi, zaradi bolj ugodne mikroklimе in posledično večje mikrobne aktivnosti. Masa opada se je tedaj, v 47 dneh od drugega do tretjega vzorčenja, v Bohinju zmanjšala za 10,5 % in na Uskovnici za 9,5 %. Čeprav je bilo povprečje temperatur zraka v Bohinju v mesecu aprilu 2008 za 5,5 °C in v mesecu maju 2008 za 6 °C višje od povprečnih temperatur zraka na Uskovnici, je bila izguba mase opada v Bohinju le za 1 % višja, kot na Uskovnici. Po nadaljnjih 10 mesecih trajanja razgradnje se je masa opada znižala še za približno 21 % na obeh lokacijah. Razgradnja se v kasnejši fazi značilno upočasni, ker v opadu prevladujejo težje razgradljive spojine.

Rezultati meritev razgradnje opada iz hrastovega listja in vloženega v hrastov gozd, ki jih je predstavil Coleman in sod. (2004), izkazujejo podobno krivuljo sezonskega padanja mase opada, kot v našem primeru. Najhitreje je razgradnja potekala v jeseni, na začetku razgradnje, ter v pozni pomladi. Po 6 mesecih razgradnje je preostanek mase znašal 80 % začetne mase opada (v našem primeru 74 %), po 8 mesecih 75 % (v našem primeru 64 %).

V našem primeru je bila razgradnja opada v času pozne pomladi še nekoliko hitrejša. Verjetno zaradi dejstva, da je v omenjeni raziskavi vzorčenje potekalo v gozdu.

Raziskave so redko povsem primerljive zaradi raznolikosti izbranih rastlinskih materialov in okolja vzorčenja, ki sta bistvena dejavnika v poteku procesa razgradnje.

5.3 SKLEPI

Razlika v povprečnih mesečnih temperaturah zraka med lokacijama Bohinj in Uskovnica ni vplivala na hitrost in potek razgradnje rastlinskega opada.

Enaka sestava rastlinskega opada, podobne talne lastnosti in identičen padavinski režim v Bohinju in na Uskovnici so bili glavni dejavniki za identičen potek razgradnje na obeh lokacijah.

Razgradnja je bila najhitrejša takoj po vložitvi opada, potem se je upočasnila. V toplejšem obdobju leta je bila hitrejša, kot v zimskem času.

Vsebnost in dinamika hranil ter vsebnost surovih vlaknin v rastlinskem opadu dobro opisujejo potek razgradnje.

Za natančno spremljanje poteka razgradnje in vrednotenje posameznih dejavnikov, ki vplivajo na razgradnjo, so potrebna pogosta vzorčenja opada. Glede na literaturo bi bilo v nadaljnjih tovrstnih poskusih dobro uvesti 10-12 vzorčenj v začetni fazi razgradnje, ko je vpliv podnebnih dejavnikov izrazit.

6 POVZETEK

Razgradnja je temeljni proces v delovanju ekosistemov, ki zagotavlja njihovo produktivnost in je sestavni del globalnega ogljikovega cikla. Hitrost razgradnje je pomembna z vidika kroženja hranil, nastanka organske snovi v tleh, ter vezave in sproščanja ogljika.

V diplomskem delu nas je zanimal vpliv razlike v povprečni letni temperaturi zraka na hitrost razgradnje rastlinskega opada. V Bohinju so bile v času poskusa povprečne mesečne temperature zraka povprečno za 4,4 °C ($\pm 1,5$) višje, kot na Uskovnici. Predpostavili smo, da bo zaradi višjih povprečnih temperatur zraka razgradnja rastlinskega opada hitrejša na lokaciji Bohinj.

Najlonske vrečke z luknjicami premera 0,04 mm smo napolnili s homogeniziranim rastlinskim opadom z obeh lokacij in jih v jeseni 2007 vložili v globino 0f horizonta. Izbrali smo mikrolokaciji, ki sta si podobni po vegetaciji in talnih lastnostih. Poskus je trajal do maja 2009. V tem obdobju smo izvedli štiri vzorčenja rastlinskega opada za spremljanje izgube mase opada in analizo skupnih vsebnosti C, N, P in K, ter topnih oblik C in N. Vsakič smo odvzeli tudi vzorec tal iz horizonta vloženih vrečk za pedološko analizo.

Ugotovili smo, da se je rastlinski opad razgrajeval na obeh lokacijah enako hitro ves čas trajanja poskusa. Vsa štiri vzorčenja so pokazala enako zmanjšanje mase rastlinskega opada, kakor tudi enako zmanjšanje deleža skupnega organskega ogljika v opadu. Šele ob koncu poskusa, po 526 oziroma 555 dneh razgradnje, je bila povprečna masa suhe snovi opada v Bohinju za 0,9 % nižja, kot na Uskovnici. Razgradnja je bila najhitrejša v začetni fazi poskusa. V 15 dneh po vložitvi se je masa suhe snovi opada na obeh lokacijah zmanjšala za 6 % in v 190 dneh po vložitvi za 26 %. Ob koncu poskusa je bila v Bohinju masa suhe snovi opada 42 % in na Uskovnici 42,9 % začetne mase suhe snovi opada. Vsebnost topnega organskega ogljika v ekstraktu opada se je močno znižala takoj po vložitvi. Po dveh tednih razgradnje se je iz začetne koncentracije 23 mg C/g opada znižala na 11,2 mg/g opada na Uskovnici in 12,6 mg/g opada v Bohinju. Ob koncu poskusa je bila vsebnost DOC 5,2 mg/g opada na Uskovnici in 6,2 mg/g opada v Bohinju. Tudi razgradnja celuloze se je pričela kmalu po vložitvi in njena vsebnost se je ves čas trajanja poskusa značilno zniževala. Ob koncu poskusa je bil njen delež v opadu na Uskovnici 25 % in v Bohinju 27 % njenega deleža v začetnem rastlinskem materialu. Lignin se je razgrajeval počasneje in njegova vsebnost je bila tekom poskusa relativno konstantna, vse do zadnjega vzorčenja, ko je analiza pokazala v povprečju 8 % zmanjšanje njegove vsebnosti na Uskovnici in 20 % zmanjšanje v Bohinju.

Hipoteze, da bo razgradnja opada zaradi višjih temperatur zraka potekala hitreje v Bohinju, rezultati niso potrdili. Poskus je pokazal, da so v določenih primerih ključni dejavniki za potek razgradnje sestava in kvaliteta opada ter lastnosti tal na poskusni lokaciji.

7 VIRI

- Agren G., Wetterstedt J.A. 2007. What determines the temperature response of soil organic matter decomposition? *Soil Biology & Biochemistry* 39: 1794-1798
- Agren G, Bosatta E. 2002. Reconciling differences in predictions of temperature response of soil organic matter. *Soil Biology & Biochemistry* 34: 129-132
- Bardgett R. 2005. *The biology of soil*. Oxford University Press: 97-159
- Berg B., McClaugherty C. 2008. *Plant litter*. Berlin, Springer Verlag: 176 str.
- Bergant K. 2003. Projekcije simulacij globalne klime na lokalni nivo in njihova uporaba v agrometeorologiji. Doktorska disertacija. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo: 170 str.
- Brady N.C., Weil R.R. 2002. *The nature and properties of soils*. 13 th edition. Upper Sadle River, Prentice Hall: 960 str.
- Butorac A. 1999. *Opća Agronomija*. Zagreb, Školska knjiga d.d.: 648 str.
- Coleman C.D., Crossley A.D., Hendrix F.A. 2004. *Fundamentals of soil ecology*. 2 nd edition. New York, Elsevier: 287 str.
- Ćirić M. 1986. *Pedologija*. Sarajevo, Svjetlost: 312 str.
- Eler K. Ogljikov cikel. 2007. Biotehniška fakulteta, 14.12.2009.
http://www.bf.uni-lj.si/fileadmin/groups/2711/Gradiva_Eler_Predavanja_Bolonja/Eler_P_Ekologija-07-Ogljikov_cikel.pdf. (15.1.2010).
- Eler K. »Rastlinske združbe na lokacijah Uskovnica in Bohinj«. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo (osebni vir, april 2010).
- Grača M., Bärlocher F., Gessner M. 2005. *Methods to Study Litter Decomposition*. Berlin, Springer Verlag: 221 str.
- Grčman H., Hudnik V., Lobnik F., Mihelič R., Prus T., Vrščaj B. In Zupan M. 2004. Tla. V: *Narava Slovenije*. Zych B. In Mihelač Š. (ur.). Ljubljana, Mladinska knjiga: 154-155
- Houba V.J.G. 1986. Comparision of soil extractions by 0.01 M CaCl₂, by EUF and by some conventional extraction procedures. *Plant and Soil* 96, 433-437

Janitzky P. 1986. Particle-size analysis. V: Field and laboratory procedures in a soil chronosequence study. Singer M.J., Janitzky P. (eds.). Reston, U.S. Geological Survey Bulletin: 11-16

Lavrenčič A. 2003. Vaje pri predmetu Prehrana domačih živali. Ljubljana, Veterinarska fakulteta: 115 str.

Leštan D., 2001. Organska snov tal. Študijsko gradivo. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo: 68 str.

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

»Meteorološki podatki« za leta 2007-2009. 2009. Ljubljana, Agencija Republike Slovenije za okolje (izpis iz baze podatkov).

Poglavja iz klime. 2009. Biotehniška fakulteta. 8.9.2009.

<http://web.bf.uni-lj.si/agromet/Poglavja%20iz%20klime.pdf> (februar, 2010)

Ranljivost Slovenskega kmetijstva in gozdarstva na podnebno spremenljivost in ocena predvidenega vpliva. 2003. Ljubljana, Agencija Republike Slovenije za okolje: 52-53
<http://aas.bf.uni-lj.si/maj2005/03kajfez1.pdf> (januar, 2010)

SIST ISO 5516. Sadje, zelenjava in sadni in zelenjavni proizvodi - razklop organskih snovi pred analizo – sežig. 1995: 2 str.

SIST ISO 6491. Krma – določevanje vsebnosti fosforja – spektrometrijska metoda. 1999: 7 str.

SIST ISO 10390. Kakovost tal – določevanje pH. 2005: 10 str.

SIST ISO 10694. Kakovost tal - ugotavljanje organskega in skupnega dušika po suhem sežigu (elementna analiza). 1996: 7 str.

SIST ISO 13878. Kakovost tal – določevanje skupnega dušika po suhem sežigu (elementna analiza). 1999: 5 str.

SIST ISO 14235. Kakovost tal - določevanje organskega ogljika z oksidacijo v kromžvepleni kislini (modif. po Walkley-Black-u). 1999: 5 str.

Stopar D. Biorazgradnja. 2009. Biotehniška fakulteta, 8.9.2009.

www.bf.uni-lj.si/zt/mikro/homepage/biorazgradnja.pdf (april, 2010)

Suhadolc M., Ruprecht J., Zupan M. 2008. Nauk o tleh. Študijsko gradivo za vaje. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo: 49 str.

Vidrih M. 2006. Vezava ogljika v pašeni ruši visokega krasa. Doktorska disertacija. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo: 102 str.

ZAHVALA

Iskreno se zahvaljujem svoji mentorici, doc. dr. Metki Suhadolc, za strokovno vodenje in vse koristne nasvete pri izdelavi diplomske naloge. Veliko sem se naučila od nje.

Hvala vodji laboratorija na CPVO, gospe Andreji Hodnik, za svetovanje pri laboratorijskem delu. Vedno si je vzela čas. Zahvaljujem se tudi Nadki, Svetlani in Zalki, ki so priskočile na pomoč vedno, ko je bilo to potrebno.

In nenazadnje, hvala moji družini, za vso podporo in razumevanje v času študija. Tilnu hvala tudi za pomoč pri računalniškem oblikovanju diplomske naloge.