

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA AGRONOMIJO

Pia KOLARIČ

**OCENA ASIMILACIJSKE POVRŠINE IN
FOTOSINTETSKO AKTIVNE BIOMASE NA
EKSTENZIVNEM PAŠNIKU IN GOJENEM
TRAVNIKU**

MAGISTRSKO DELO

Magistrski študij - 2. stopnja

Ljubljana, 2014

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA AGRONOMIJO

Pia KOLARIČ

**OCENA ASIMILACIJSKE POVRŠINE IN FOTOSINTETSKO
AKTIVNE BIOMASE NA EKSTENZIVNEM PAŠNIKU IN GOJENEM
TRAVNIKU**

MAGISTRSKO DELO
Magistrski študij - 2. stopnja

**THE ESTIMATION OF ASSIMILATION AREA AND
PHOTOSYNTHETICALLY ACTIVE BIOMASS ON EXTENSIVE
PASTURE AND INTENSIVE MEADOW**

M. SC. THESIS
Master Study Programmes

Ljubljana, 2014

Magistrsko delo je zaključek Magistrskega študijskega programa 2. stopnje Hortikultura. Delo je bilo opravljeno na Katedri za aplikativno botaniko, ekologijo, fiziologijo rastlin in informatiko.

Študijska komisija Oddelka za agronomijo je za mentorja magistrskega dela imenovala prof. dr. Dominika Vodnika, za somentorja pa doc. dr. Jureta Čopa.

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik: prof. dr. Marijana Jakše
Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo

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

Član: doc. dr. Jure Čop
Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo

Član: doc. dr. Matej Vidrih
Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo

Datum zagovora:

Magistrsko delo je rezultat lastnega dela. Podpisana se strinjam z objavo svojega magistrskega dela na spletni strani Digitalne knjižnice Biotehniške fakultete. Izjavljam, da je delo, ki sem ga oddala v elektronski obliki, identično tiskani verziji.

Pia Kolarič

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

- ŠD Du2
- DK UDK 633.2.032:581.5:581.13(043.2)
- KG asimilacijska površina/ekstenzivni pašniki/gojeni travniki/LAI/NDVI/biomasa
- AV KOLARIČ, Pia
- SA VODNIK, Dominik (mentor)/ČOP, Jure (somentor)
- KZ SI-1000 Ljubljana, Jamnikarjeva 101
- ZA Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo
- LI 2014
- IN OCENA ASIMILACIJSKE POVRŠINE IN FOTOSINTETSKO AKTIVNE
BIOMASE NA EKSTENZIVNEM PAŠNIKU IN GOJENEM TRAVNIKU
- TD Magistrsko delo (Magistrski študij - 2. stopnja)
- OP IX, 42 str., 1 pregl., 17 sl., 32 vir.
- IJ sl
- JI sl/en
- AI V letu 2013 smo izvedli poskus, v katerem smo ocenili sezonski prirast biomase na ekstenzivnem pašniku in oskrbovanem travniku s pomočjo treh izbranih parametrov: LAI, NDVI in direktnim merjenjem zelene biomase. Gojeni travnik se nahaja na poskusnem polju Biotehniške fakultete v Ljubljani in je zasnovan v obliki deljenk (split-plot) z dvanajstimi obravnavanji v štirih ponovitvah, ekstenzivni pašnik pa je lociran na raziskovalni ploskvi na planoti Podgorskega krasa v Submediteranski regiji Slovenije. Na obeh lokacijah smo skozi vegetacijsko dobo v različnih terminih opravljali meritve indeksa listne površine, indeksa NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) ter ob enem vzorčili in tehtali zeleno biomaso. Pričakovano je bila količina biomase na gojenem travniku precej večja kot na ekstenzivnem pašniku. Največja izmerjena količina suhe biomase je bila na oskrbovanem travniku v Ljubljani za 2 kg/10 m² večja kot izmerjena največja količina suhe biomase na ekstenzivnem pašniku na planoti Podgorskega krasa. Izmerjene vrednosti indeksa listne površine so se skladale z meritvami biomase, manjše so bile na ekstenzivnem pašniku kot na oskrbovanem travniku, saj je na slednjem travna ruša gostejša in višje rasti, kar je posledica gnojenja in pogostosti rabe. Izmerjene vrednosti indeksa NDVI so bile glede na literaturo nekaj večje kot smo pričakovali, saj so se na intenzivnem travniku vrednosti indeksa NDVI gibale do največ 0,94, na ekstenzivnem pašniku pa so bile izmerjene vrednosti nekoliko nižje (največ 0,8). V opravljeni raziskavi smo dokazali visoko stopnjo linearne povezanosti med parametroma LAI in biomaso na obeh izbranih lokacijah, medtem ko povezanost med parametroma NDVI in LAI ni enostavna linearna.

KEY WORDS DOCUMENTATION

- ND Du2
- DC UDC 633.2.032:581.5:581.13(043.2)
- CX assimilation area/extensive pasture/intensive meadow/LAI/NDVI/biomass
- AU KOLARIČ, Pia
- AA VODNIK, Dominik (supervisor)/ČOP, Jure (co-advisor)
- PP SI-1000 Ljubljana, Jamnikarjeva 101
- PB University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Agronomy
- PY 2014
- TY THE ESTIMATION OF ASSIMILATION AREA AND
PHOTOSYNTHETICALLY ACTIVE BIOMASS ON EXTENSIVE PASTURE
AND INTENSIVE MEADOW
- DT M. Sc. Thesis (Master Study Programmes)
- NO IX, 42 p., 1 tab., 17 fig., 32 ref.
- LA sl
- Al sl/en
- AB In year 2013 we performed an experiment in which we estimated the seasonal increase in biomass in extensive pasture and intensive meadow by using three parameters: LAI, NDVI and direct measurement of green biomass. Intensive meadow is located in the experimental field of the Biotechnical Faculty in Ljubljana and is designed in split-plot model with twelve treatments in four replications. Extensive pasture is located at the research plot on plateau of Podgorski karst in the submediterranean region of Slovenia. We performed measurements of tree selected parameters through vegetation period at different times on both locations. According to expectations the amount of biomass on cultivated meadow was quite larger than in the extensive pasture. The maximum measured quantity of dry biomass on intensive meadow in Ljubljana was for 2 kg/10 m² larger than on extensive pasture of Podgorski karst. The measured values of leaf area index were lower on extensive pasture as on cultivated meadow, because the green cover on cultivated meadow is denser and has stronger growth as a result of fertilization and frequency of use. The measured values of the index NDVI were higher than ones cited in literature. On intensive meadow NDVI values ranged up to 0,94, while on extensive pasture were measured values slightly lower (up to 0,8). In the study we demonstrated a significant linear correlation between LAI index and biomass at both selected locations, while no simple linear regression was found between the two indices, NDVI and LAI.

KAZALO VSEBINE

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA.....	II
KEYWORDS DOCUMENTATION.....	III
KAZALO VSEBINE.....	V
KAZALO PREGLEDNIC.....	VII
KAZALO SLIKO.....	VIII
OKRAJŠAVE IN SIMBOLI.....	IX
1 UVOD.....	1
1.1 NAMEN IN CILJI.....	2
1.2 HIPOTEZE.....	2
2 PREGLED OBJAV.....	3
2.1 IZGRADNJA RASTLINSKE BIOMASE.....	3
2.2 OCENJEVANJE KOLIČINE NADZEMNE RASTLINSKE BIOMASE.....	4
2.2.1 Direktne meritve s tehtanjem.....	5
2.2.2 Indeks listne površine.....	6
2.2.3 NDVI.....	9
2.3 NADZEMNA BIOMASA NA TRAVIŠČIH.....	11
2.3.1 Uporaba LAI in NDVI za oceno biomase na traviščih.....	13
3 MATERIALI IN METODE.....	15
3.1. OPIS POSKUSNIH LOKACIJ, TRAVNIKOV IN POSKUSNIH ZASNOV.....	15
3.1.1 Gojeni travnik – Ljubljana.....	15
3.1.2 Ekstenzivni pašnik – Podgorski kras.....	16
3.2 METODE.....	18
3.2.1 Shema vzorčenj oziroma meritev.....	18
3.2.2 Meritve biomase s tehtanjem.....	18
3.2.3 LAI meritve.....	19
3.2.4 NDVI meritve.....	19
3.2.5. Statistične metode.....	20
4 REZULTATI.....	21
4.1 BIOMASA.....	21
4.1.1 Gojeni travnik – poskus Travistor.....	21

4.1.2 Ekstenzivni pašnik – Podgorski kras	23
4.2 MEDSEBOJNA ODVISNOST INDEKSA LAI IN BIOMASE	24
4.2.1 Gojeni travnik – poskus Travistor	24
4.2.2 Ekstenzivni pašnik – Podgorski kras	25
4.3 MEDSEBOJNA ODVISNOST INDEKSA NDVI IN BIOMASE	26
4.3.1 Gojen travnik – poskus Travistor	26
4.3.2 Ekstenzivni pašnik – Podgorski kras	27
4.4 MEDSEBOJNA ODVISNOST INDEKSA NDVI IN INDEKSA LAI	30
4.4.1 Gojeni travnik – poskus Travistor	30
4.4.2 Ekstenzivni travnik – Podgorski kras	31
5 RAZPRAVA IN SKLEPI	34
5.1 RAZPRAVA	34
5.1.1 Produkcija biomase	34
5.1.2 Vrednosti indeksa LAI in NDVI	36
5.1.3 Povezave med spremenljivkami	36
5.2 SKLEPI	37
6 POVZETEK	39
7 VIRI	40
ZAHVALA	

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Termini opravljanja meritev treh izbranih parametrov na proučevanih traviščih	18
----------------------------------------------------------------------------------------------------	----

KAZALO SLIK

Slika 1: Neto primarna produkcija (NPP) na Zemlji	5
Slika 2: Eksponentno zmanjševanje intenzitete svetlobe v različnih rastlinskih združbah kot funkcija indeksa listne površine (LAI)	7
Slika 3: Obstoječa snov (biomasa) in izgube suhe snovi na traviščih.	11
Slika 4: Načrt poskusa gojenega travnika TRAVISTOR, Laboratorijsko polje BF	16
Slika 5: Ortofoto posnetek raziskovalne ploskve na Podgorskem Krasu z označenimi tremi pari poskusnih parcel.....	17
Slika 6: Količina sveže biomase s standardnimi odkloni po obravnavanjih in po košnjah na gojenem travniku v Ljubljani	22
Slika 7: Količina suhe biomase s standardnimi odkloni po obravnavanjih in po košnjah na gojenem travniku v Ljubljani	23
Slika 8: Količina skupne (ob vzorčenju suhi del + zeleni del) posušene biomase s standardnimi odkloni na ekstenzivnem pašniku na Podgorskem krasu	24
Slika 9: Indeks LAI glede na količino posušene zelene biomase na gojenem travniku v Ljubljani	25
Slika 10: Indeks LAI glede na količino posušene (ob vzorčenju suhi del + zeleni del) biomase na ekstenzivnem pašniku na Podgorskem krasu	26
Slika 11: Indeks NDVI glede na količino posušene zelene biomase na gojenem travniku v Ljubljani	27
Slika 12: Indeks NDVI glede na količino posušenega zelenega dela biomase na ekstenzivnem pašniku na Podgorskem krasu	28
Slika 13: Indeks NDVI glede na količino že ob vzorčenju suhega dela biomase na ekstenzivnem pašniku na Podgorskem krasu	29
Slika 14: Indeks NDVI glede na količino skupne (že ob vzorčenju suhi del+zeleni del) biomase na ekstenzivnem pašniku na Podgorskem krasu	30
Slika 15: Indeks NDVI glede na indeks LAI na gojenem travniku v Ljubljani	31
Slika 16: Indeks NDVI glede na indeks LAI na nepožganih poskusnih ploskvah ekstenzivnega pašnika na Podgorskem krasu	32
Slika 17: Indeks NDVI glede na indeks LAI na požganih poskusnih ploskvah ekstenzivnega pašnika na Podgorskem krasu	33

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

LAI	Leaf area indeks – indeks listne površine
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
GPP	bruto primarna produkcija
NPP	neto primarna produkcija
PAR	fotosintetsko aktivno sevanje
PR	produktivnost
Y_p	produkcijski donos
N	dušik
P	fosfor
K	kalij
NPK	dušik, fosfor, kalij
PK	fosfor, kalij
I_z	jakost sevanja na določeni višini v rastlinski odeji
I_0	jakost sevanja nad rastlinsko odejo
RVI	Ratio Vegetation Index
G	letne izgube suhe snovi zaradi rabe travinja
L	letne izgube suhe snovi kot detrit

1 UVOD

Travišča¹ predstavljajo 20 % kopne površine Zemlje in so zato globalno pomembni ekosistemi. Ekološko so pomembna, saj predstavljajo življenjski prostor številnim rastlinskim in živalskim vrstam. Prav tako imajo pomembno vlogo pri kroženju vode in hranil, ter predstavljajo ogromno skladišče za ogljik, saj skladiščijo vsaj 10 % globalne organske snovi (Wong, 2013). Večina te organske snovi, oziroma v njej vezanega ogljika, se nahaja v tleh, saj zaradi obsežnega vlaknatega koreninskega sistema travišča tvorijo veliko podzemne biomase (Frank in Karn, 2003).

Travišča imajo tudi pomembno ekonomsko vlogo, saj predstavljajo velik del svetovne pašne zmogljivosti in zagotavljajo krmo za divje in domače travojede živali (Wong, 2013).

Ustvarjanje rastlinske biomase poteka na podlagi procesa fotosinteze. Fotosinteza je biokemijski proces, pri katerem rastline izrabljajo svetlobno sevanje za pridobivanje hrane, ki jo potrebujejo za svojo rast in razvoj. Za proces je, poleg svetlobne energije, potrebna voda, ki jo rastline s koreninami črpajo iz tal, in ogljikov dioksid, ki ga pridobijo iz zraka. V rastlinah poteče biokemijska reakcija pri kateri rastline s pomočjo asimilacijskih barvil v svojih tkivih pretvorijo svetlobno energijo v kemično, ki omogoči pretvorbo asimiliranega ogljikovega dioksida in vode v sladkorje. Pri tem pa se kot stranski produkt sprošča kisik.

Rastlinska biomasa predstavlja 99 % celotne biomase vseh živih organizmov na Zemlji. Zelena rastlinsko biomaso izražamo kot količino suhe snovi, za njeno povečanje v rastlinah pa je odgovoren asimilirani oziroma pridobljeni ogljik, ki ni porabljen za dihanje rastlin. Presežek asimiliranega CO₂ se porabi za rast in akumulacijo rezerv, kar predstavlja povečanje rastlinske biomase (Larcher, 2002).

Količino biomase, ki jo ustvarja vegetacija nekega območja imenujemo primarna produkcija. Primarna produkcija je definirana s hitrostjo produkcije (production rate), ki pa je izražena kot pridobljena biomasa, izražena kot suha masa na enoto časa. Eden izmed parametrov, s katerim lahko spremljamo primarno produkcijo, je indeks listne površine (Leaf area index = LAI). Če indeks listne površine narašča, pomeni da je na razpolago več fotosintetsko aktivne površine in tako lahko pričakujemo, da bo primarna produkcija večja (Larcher, 2002).

Za določanje primarne produkcije torej merimo oziroma ocenjujemo fotosintetsko aktivno površino rastlin.

Asimilacijsko površino posredno določamo z vegetacijskimi indeksi, kamor spada najpogosteje uporabljen NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), indeks listne površine (LAI) in drugi indeksi, ki omogočajo ocenjevanje prestrezanja sevanja in padavin, izmenjave plinov in vode ter procesov kot je primarna produkcija v povezavi z absorpcijo

¹ v kmetijstvu za travišča uporabljamo izraz travinje. V nalogi uporabljam ime, ki ga uporabljajo v ekologiji.

fotosintetsko aktivnega sevanja (PAR). Indeksa LAI in NDVI sta v primeru posameznih vrst rastlin, ki rastejo v istih okoljskih razmerah, v dobri korelaciji (Larcher, 2002).

1.1 NAMEN IN CILJI

Namen naloge je oceniti sezonski prirast zelene biomase na ekstenzivnem pašniku in oskrbovanem travniku s pomočjo treh izbranih parametrov rasti: LAI, NDVI in z direktnim merjenjem zelene biomase (pridelka zelinja). V različnih terminih smo skozi vegetacijsko dobo opravljali meritve indeksa listne površine, indeksa NDVI ter obenem vzorčili in tehtali pridelok zelene biomase.

Indeks listne površine (LAI) je ključna spremenljivka, ki je funkcionalno povezana s produkcijo biomase, prestrezanjem vode, slabitvijo svetlobe, izmenjavo vode in ogljika ter določa mikroklimo v rastlinskem pokrovu. Natančna ocena tega parametra je zato pomembna za spremljanje in analiziranje biofizikalnih procesov v ekosistemih (Fan in sod., 2009). Za merjenje NDVI smo se odločili, ker so dosedanje raziskave pokazale, da je ta široko uporabljan indeks, zelo uporaben tudi za indirektno ocenjevanje indeksa listne površine (Fan in sod., 2009).

Povezanost pridobljenih podatkov bomo ocenili s korelacijsko analizo. Cilji naloge so preveriti povezanost med indeksom listne površine, indeksom NDVI ter dejansko zeleno biomaso na različno produktivnih traviščih.

1.2 HIPOTEZE

V nalogi smo si zastavili naslednje hipoteze:

- pričakujemo, da bo indeks listne površine na ekstenzivnem pašniku manjši kot na oskrbovanem travniku;
- pričakujemo, da bodo vrednosti NDVI nizke pozitivne vrednosti (od 0,2 do 0,4), kar je značilno za travišča;
- med opazovanimi parametri (LAI, NDVI, količina zelene biomase) pričakujemo visoko stopnjo povezanosti;
- pričakujemo, da bo povezava med indeksoma LAI in NDVI boljša na gojenem travniku kot ekstenzivnem pašniku.

2 PREGLED OBJAV

2.1 IZGRADNJA RASTLINSKE BIOMASE

Fotoavtotrofi so med evolucijo ustvarili energetska in materialno podlago za razvoj življenja na Zemlji, in sicer s sposobnostjo za izvajanje fotosinteze – asimilacijo ogljika. Fotosinteza vključuje svetlobne reakcije fotosinteze, ogljikove (temotne) reakcije fotosinteze in proces difuzije, pri katerem poteka izmenjava ogljikovega dioksida in kisika med kloroplastom in atmosfero. Sočasno s fotosintezo poteka v rastlini tudi disimilacija – dihanje. Asimilirani ogljik, ki ni porabljen z dihanjem rastline (presežek asimiliranega CO₂), se lahko porabi za rast in kopičenje rezervnih snovi ter s tem povečuje suho snov rastline. Med presežkom CO₂ in povečanjem suhe snovi obstaja neposredna in izmerljiva povezava (Larcher, 2002).

Na proizvodnjo suhe snovi vplivajo okoljski dejavniki, in sicer preko učinkov na izmenjavo CO₂ in bilanco ogljika. Povečanje sevanja (intenziteta osvetlitve in/ali daljša izpostavljenost osvetlitvi) poveča produkcijo rastlin. Povečanje biomase pa ni odvisno samo od sprejema CO₂ in sončnega sevanja, ampak tudi od dostopnosti vode in hranil. Pomanjkanje vode in pomanjkanje hranil ali neuravnotežena oskrba s hranili zmanjšuje produkcijo rastlin.

Prirast rastlinske biomase imenujemo hitrost rasti (produkcijska stopnja, production rate, PR) ali produktivnost. Hitrost produkcije izraža povečanje mase rastline v suhi snovi na enoto časa (dan, teden), skozi produkcijsko periodo.

$$PR = dDM / dt \quad \dots(1)$$

Produkcijska stopnja ali produktivnost je določena s periodo akumulacije. Produkcijska stopnja individualne rastline je lahko izražena kot relativna hitrost rasti (relative growth rate, RGR) ali pa kot hitrost rasti izražena na enoto listne površine (unit leaf rate, ULR). Relativna hitrost rasti (RGR) izraža povečanje suhe snovi (dry matter, DM) na enoto časa z upoštevanjem izhodiščne suhe snovi rastline:

$$PR \text{ kot RGR} = dDM / dt * 1 / DM \quad (\text{g org DM g}^{-1} \text{ t}^{-1}) \quad \dots(2)$$

Hitrost rasti izražena na enoto listne površine (ULR) izraža povečanje suhe snovi glede na celotno listno površino (A), katere fotosintetska aktivnost je odgovorna za to povečanje.

$$PR \text{ kot ULR} = dDM / dt * 1 / A \quad (\text{g org DM g}^{-2} \text{ t}^{-1}) \quad \dots(3)$$

Enačba 3 predpostavlja, da je listna površina med povečevanjem suhe snovi konstantna. Za bolj točno analizo rasti, je potrebno uporabiti modele, ki upoštevajo eksponentno rast listne površine. ULR je mera produktivnosti različnih vrst rastlin in njihovih različic, sort, skozi njihov ontogenetski razvoj v prevladujočih okoljskih razmerah.

Skupno oziroma kumulativno povečanje biomase imenujemo produkcijski donos (production yield, Y_P). Produkcijski donos izrazimo kot integralno funkcijo in je razlika med začetno organsko suho snovjo (t_1) in organsko suho snovjo na koncu celotne rastne sezone (t_2):

$$Y_P = \int_{t_1}^{t_2} PR \, dt \quad \dots(4)$$

Produkcijski donos je prav tako kot letna bilanca CO_2 , odvisen od asimilacijske kapacitete rastline, dolžine rastne sezone in od pozitivnih ter negativnih učinkov okoljskih dejavnikov na vgradnji ogljika in razporejanje fotosintatov (Larcher, 2002).

2.2 OCENJEVANJE KOLIČINE NADZEMNE RASTLINSKE BIOMASE

Primarno produkcijo ocenjujemo na osnovi količine nadzemne rastlinske biomase. Glavni proces primarne produkcije je fotosinteza, ki kot vir energije za sintezo organskih spojin iz ogljikovega dioksida uporablja sončno sevanje oziroma svetlobo. Poznamo bruto primarno produkcijo (GPP), ki predstavlja celoten vnos ogljika v rastline, ter neto primarno produkcijo (NPP), ki predstavlja realni del vnosa, pri čemer upošteva izgube ogljika z dihanjem. Bruto primarne produkcije ne moremo direktno izmeriti, zato grobo oceno le te izračunamo iz neto primarne produkcije in dihanja (ΣR) rastlinske združbe oziroma ekosistema (Larcher, 2002).

$$GPP = NPP + \Sigma R \quad \dots(5)$$

Bruto primarna produkcija ekosistema je najbolj odvisna od LAI, dolžine vegetacijske dobe in fotosinteze posameznih listov. GPP je definirana kot količina fiksnega ogljikovega dioksida v procesu fotosinteze (Glenn in sod., 2008).

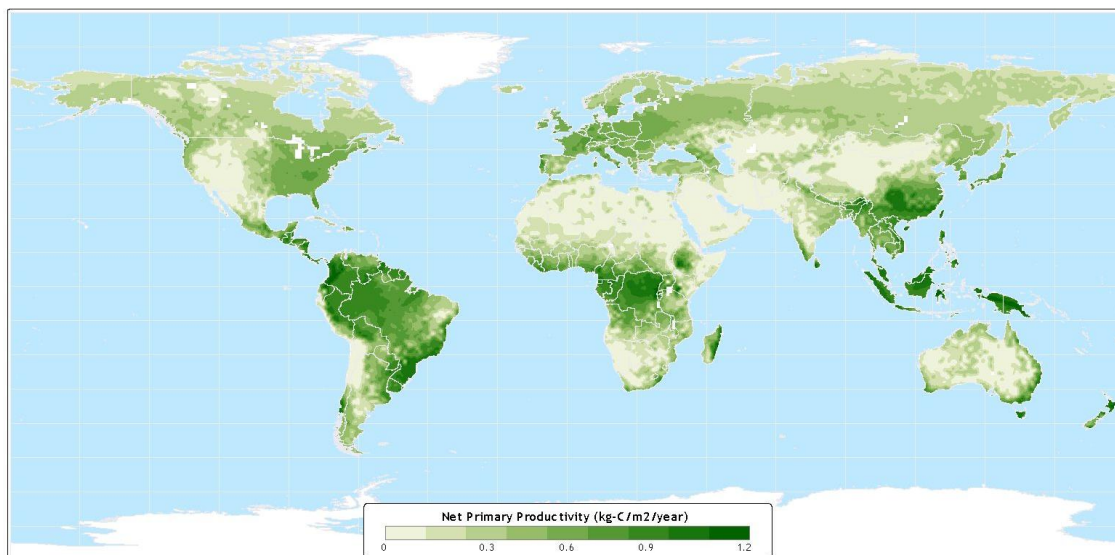
Proizvodnji donos suhe snovi ekosistema imenujemo neto primarna produkcija in jo izražamo kot kilogram suhe snovi na m^2 tal, lahko pa v tonah suhe snovi na hektar (Larcher, 2002).

$$NPP = GPP - \Sigma R \quad \dots(6)$$

Neto primarna produkcija je uporabljena za gradnjo organske suhe snovi, katere del se skozi leto izgubi kot opad (L; na sliki 3) ali pa je izgubljena zaradi uporabnikov (G). Te izgube vključujejo odpadanje listov, cvetov, plodov, odmrlih vej, odmiranje korenin, porabe s strani herbivorov, pa tudi sproščanje koreninskih izločkov in porabe s strani mikoriznih gliv. Ostanek neto donosa gre za povečanje obstoječe biomase (ΔB) na enoto površine. Za izražanje neto primarne produkcije je običajno uporabljena enačba ekološke produkcije:

$$NPP (PP_n) = \Delta B + L + G \quad \dots(7)$$

Enačba 7 opisuje prenos ogljičnega donosa in vsi njeni parametri so direktno izmerljivi (Larcher, 2002).



Slika 1: Neto primarna produkcija (NPP) na Zemlji. V kilogramih ogljika na m² na leto; neto količina atmosferskega ogljika, ki ga rastline prevzamejo na kvadratni meter zelene površine na leto (Atlas ..., 2002).

Produkcijo rastlinske združbe ali sestoja določamo z ocenjevanjem biomase, meritvijo biomase ali kombinacijo obojega (Butler in sod., 2003).

2.2.1 Direktne meritve s tehtanjem

Merjenje pridelka z odstranitvijo celotne nadzemne biomase imenujemo direktna ali destruktivna metoda. Biomaso odstranimo na manjši reprezentativni površini, pridobljene podatke pa nato uporabimo za oceno celotne biomase, ki se pojavlja na nekem območju, ki ga želimo oceniti.

Osnovni koraki so naslednji, najprej izberemo reprezentativno površino, ki je primerna za vzorčenje. Kot pripomoček uporabljamo kovinske okvirje, običajno velikosti 0,25 m² (lahko pa tudi 1 ali 10 m²), ki jih naključno razporedimo po površini, nato pa znotraj njih odstranimo celotno nadzemno biomaso.

V vzorec vključimo vse nadzemne dele rastlin, ki izraščajo iz izbrane parcele, vključno z vsemi nadzemnimi deli (poganjki, listi), ki presegajo meje parcele. Izključimo pa vse nadzemne dele, ki izraščajo zunaj izbrane parcele, čeprav njihovi listi in poganjki segajo v izbrano parcelo (Butler in sod., 2003).

Nadzemne dele biomase odstranjujemo kar se da pri tleh. Pridobljeno biomaso stehtamo in tako dobimo svežo maso. Najbolje je, če tehtanje sveže biomase opravimo že na polju ali pa kasneje v laboratoriju. Če je območje, ki nas zanima, bolj variabilno, naberemo temu primerno večje število vzorcev. Vzorce shranimo v papirnate ali jutaste vreče, jih odnesemo v laboratorij, kjer jih najprej stehtamo, nato jih posušimo in kasneje zopet stehtamo za določitev suhe biomase. Priporočljivo je, da pridobljeno biomaso pričenemo sušiti čim prej, najkasneje pa v 24 urah. Najbolje je, da vzorce sušimo na zraku, lahko pa jih posušimo tudi v temu namenjenih sušilnikih. Če se odločimo za slednje, jih sušimo 24 do 48 ur pri temperaturi 60–70 °C, do konstantne mase (Direct ..., 2009).

Odstranjevanje biomase in kasnejše tehtanje le te je najbolj direktna in objektivna metoda za merjenje nadzemne rastlinske biomase. Metoda je zelo natančna, vendar je precej zamudna.

Masa svežega rastlinskega materiala vključuje vodo, ki se nahaja v rastlinah (v in med celicami), ter vodo na površini listov in poganjkov, kot sta rosa in padavine. Sveža masa nabranega rastlinskega materiala je zelo variabilna in je odvisna od dostopnosti vode, pogojev v atmosferi in samega vodnega statusa rastline. Zaradi omenjenega, za bolj jasno interpretacijo produkcije biomase uporabljamo maso suhe rastlinske biomase.

Iz pridobljene sveže mase in suhe mase nato izračunamo vsebnost (odstotni delež) suhe snovi, po enačbi 8:

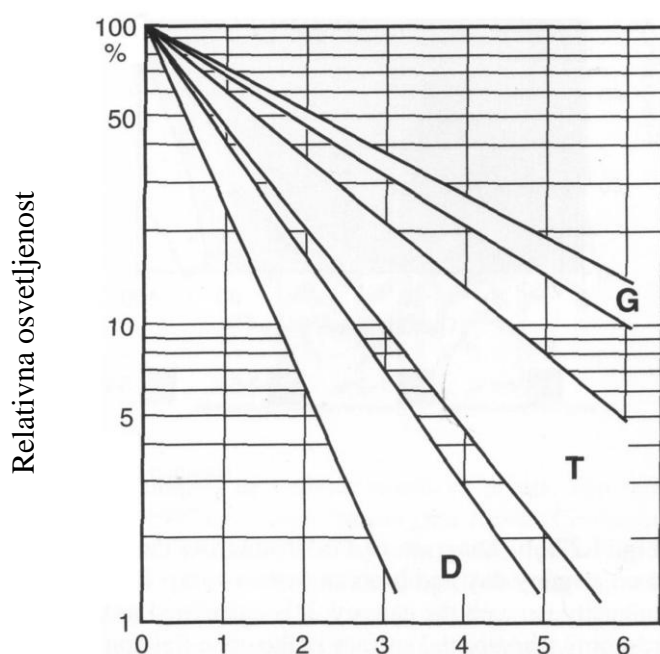
$$\% \text{ suhe snovi} = \text{suha masa} / \text{sveža masa} * 100 \quad \dots(8)$$

2.2.2 Indeks listne površine

Indeks listne površine (leaf area index = LAI) je definiran kot skupna površina listov nad določeno površino tal.

$$\text{LAI} = \text{skupna površina listov} / \text{površina tal} [\text{m}^2 / \text{m}^2] \quad \dots(9)$$

Indeks listne površine je brezdimenzijska mera pokrovnosti tal. Rastlina z indeksom listne površine 4, bi teoretično 1 m² tal prekrila s 4 m² listov, urejenimi v več plasteh. Indeks listne površine uporabljamo pri merjenju prestrezanja sevanja in padavin, pomemben je pri izmenjavi plinov in vode ter odločilen za mikroklimatske razmere. Uporablja se za napovedovanje primarne produkcije fotosinteze, evapotranspiracije in kot referenčno orodje za spremljanje rasti rastlin. Poleg vsega naštetega igra ključno vlogo pri teoretični produkcijski ekologiji. V skladu z definicijo indeks listne površine (LAI) označuje rastlinski pokrov nekega ekosistema. Je ključni parameter v ekofiziologiji, zlasti če s pomočjo parametrov, izmerjenih na ravni lista, sklepamo na aktivnost procesov na ravni rastlinskega pokrova. LAI pogojuje klimo znotraj rastlinskega pokrova, pa tudi pod njim. Zaradi velike prostorske in časovne spremenljivosti ga je težko ustrezno kvantificirati (Bréda, 2003).



Kumulativni indeks listne površine (LAI_{kum})

Slika 2: Eksponentno zmanjševanje intenzitete svetlobe v različnih rastlinskih združbah kot funkcija indeksa listne površine (LAI). Kumulativni LAI je pridobljen iz vsot vrednosti indeksa za vsako individualno horizontalno ploskev v rastlinski odeji posebej. D združbe dvokaličnic (široki listi); G združbe trav; T drevesni sestoji. V združbah dvokaličnic je slabljenje svetlobe precejšnje, čeprav je LAI majhen. V travnih združbah je slabljenje svetlobe postopnejše, drevesne združbe pa so glede slabljenja svetlobe ravno med združbami dvokaličnic in združbami trav (Larcher, 2002).

Bruto primarna produkcija (GPP) je najbolj povezana z indeksom listne površine (LAI), dolžino fotosintetske (rastne) sezone in fotosintezo posameznih listov.

Listna površina je pomemben dejavnik fotosintetske asimilacije ogljika, tako da je indeks listne površine pomemben pokazatelj potenciala rasti (Scurlock in sod., 2001). Vsako spremembo LAI v rastlinski odeji spremlja sprememba produktivnosti rastlinskega

pokrova. Indeks listne površine je tudi ključni vhodni parameter za izdelavo kvantitativnih analiz produktivnosti ekosistemov v modelih za ekosistemske simulacije (Bréda, 2003).

Sklenjena rastlinska odeja predstavlja kompleksen asimilacijski sistem, ki ga sestavlja več nivojev listov, ki se med seboj delno prekrivajo in senčijo. Notranjost rastlinskega sestoja sevanje doseže na tri načine in sicer s prodiranjem skozi vrzeli ali s strani, s razpršitvijo svetlobe od površine listov in tal in s prehodom svetlobe skozi višje ležeče liste. Kakšno je slabljenje sevanja pri prehodu svetlobe skozi rastlinski pokrov je odvisno od listne površine, razporeditve listov v rastlinski odeji in naklona oziroma kota listov glede na vpadno sevanje. V gostih rastlinskih odejah, kjer so listi horizontalni, je večina sevanja absorbiranega in razpršenega nazaj v zgornjo tretjino rastlinskega pokrova, v vegetaciji z ozkimi in pokončnimi listi pa je vpadajoča svetloba bolj enakomerno porazdeljena v sestoju (Larcher, 2002).

Sončno sevanje, ki prehaja skozi rastlinski pokrov, gre skozi več plasti listov. V tem procesu se intenziteta sevanja eksponentno zmanjšuje v skladu z Lambert-Beer-ovim zakonom slabljenja sevanja. Če so plasti listov skozi rastlinski pokrov homogene, lahko zmanjšanje osvetlitve skozi plasti listov izračunamo s spodaj navedeno prilagojeno enačbo slabljenja (10) (Monsi and Saeki 1953).

$$I_z = I_0 e^{-k LAI} \quad \dots(10)$$

Zadrževanje sevanja v zgornjih slojih rastlinske odeje je odvisno od ekstinkcijskih lastnosti vegetacije (k = ekstinkcijski koeficient ali koeficient slabljenja) in LAI (skupna listna površina na m^{-2} tal nad dano višino). I_z je jakost sevanja na določeni višini v rastlinski odeji, I_0 je jakost sevanja nad rastlinsko odejo.

Koeficient slabljenja označuje stopnjo zmanjšanja osvetlitve zaradi absorpcije in razpršitve v rastlinskem pokrovu. V rastlinskih sestojih, kjer so rastline z vertikalno nagnjenimi listi, se ekstinkcijski koeficient navadno giblje med 0,3 in 0,5. V sredini takšnega sestoja jakost osvetlitve še vedno predstavlja vsaj polovico vrednosti jakosti svetlobe nad sestojem. V rastlinskih sestojih z horizontalno postavljenimi listi se ekstinkcijski koeficient giblje med 0,7 in 1. Sredino sestoja doseže le še od dve tretjini do tri četrtine vrednosti začetne padajoče svetlobe.

Z indeksom listne površine je ovrednotena tudi učinkovitost izrabe svetlobnega sevanja (radiation use efficiency = RUE). Učinkovitost izrabe sevanja odraža sposobnost rastline oziroma rastlinskega pokrova pri uporabi sončeve energije za primarno produkcijo (Larcher, 2002).

Meritve indeksa listne površine lahko izvajamo z direktnimi in indirektnimi metodami.

Direktne ali neposredne metode merjenja indeksa listne površine so destruktivne, saj zahtevajo odstranjevanje listov in nato merjenje le teh. Tradicionalno merjenje LAI

zahteva merjenje celotne listne površine nad dano površino tal na reprezentativnih vzorcih, kar pomeni, da vsak list posebej odstranimo in nato skeniramo, da dobimo listno površino.

Indirektne ali posredne metode merjenja LAI so nedestruktivne metode, saj z njimi izmerimo svetlobo nad sestojem in nato še na višini kjer nas zanima. S pomočjo enačbe nato izračunamo indeks listne površine. Med posredne metode uvrščamo 1) geometrijo rastlinske odeje, 2) pojemanje svetlobe v rastlinski odeji katerega merimo s ceptometrom in 3) ocena svetlobnih razmer s hemisferično fotografijo pri kateri uporabljamo objektiv z vidnim kotom 180° (fisheye).

Rezultati v raziskavi, ki so jo opravljali He in sod. (2007) se je izkazalo, da je bil inštrumentalno izmerjen LAI statistično značilno podcenjen v primerjavi z destruktivno izmerjenim LAI. V povprečju je bil indeks listne površine izmerjen z LAI 2000 15,3 % manjši kot LAI izmerjen z destruktivno metodo (He in sod., 2007).

2.2.3 NDVI

Ključna razlika med vegetacijskim indeksom NDVI in indeksom LAI je, da pri vegetacijskih indeksih količino zelene biomase sklepamo iz svetlobe, ki se odbije od vegetacije, pri indeksu LAI pa s ceptometrom dejansko merimo koliko svetlobe preide skozi rastlinsko odejo.

Vegetacijski indeksi spadajo med najstarejše pripomočke v raziskavah z metodami daljinskega zaznavanja. Čeprav obstaja veliko različic vegetacijskih indeksov, večina od njih deluje na razmerju odboja svetlobe v rdečem in bližnjem infrardečem spektru. Teoretične analize in poskusi v naravi so pokazali, da so vegetacijski indeksi skoraj linearno povezani z absorbcijo fotosintetsko aktivnega sevanja rastlinskega pokrova in tako s svetlobno pogojenimi fiziološkimi procesi, kot je fotosinteza (Glenn in sod., 2008). Prvi razviti vegetacijski indeks je Ratio Vegetation Index (RVI). Od takrat je bilo razvitih veliko vegetacijskih indeksov, ki so razdeljeni v štiri skupine, in sicer razmernostni, ortogonalni, hibridni in nelinearni vegetacijski indeksi (Zhang, 2005).

Vegetacijski indeksi so nepogrešljivi pripomočki pri klasificiranju zemeljskega površja, spremljanju klimatskih sprememb, suše in izgube habitatov, pa tudi sprememb v rabi površin. Najpogosteje uporabljen vegetacijski indeks je Normalized Difference Vegetation indeks (Glenn in sod., 2008). NDVI uvrščamo v skupino razmernostnih vegetacijskih indeksov in je bil v raziskavah travišč pogosto uporabljen za ocenjevanje rastlinskega pokrova, nadzemne biomase, vsebnosti klorofila, listne površine, fenologije, pa tudi za ocene absorbiranega PAR sevanja in neto primarne proizvodnje (Zhang, 2005).

Normalized Difference Vegetation Index ali NDVI je preprost grafični indikator, ki se uporablja za preučevanje vegetacije z daljinskim zaznavanjem, običajno, ne pa nujno, iz vesoljske platforme. Z njim ocenjujemo, če tarčno mesto pokriva vegetacija in kakšna je.

$$NDVI = (\rho_{NIR} - \rho_{Red}) / (\rho_{NIR} + \rho_{Red}) \quad \dots(11)$$

V enačbi 11 sta parametra ρ_{Red} in ρ_{NIR} vrednosti odboja rdeče in bližnje infrardeče svetlobe, ki jih prejme senzor. NDVI je bil razvit na podlagi opazovanj, ki so pokazala, da klorofil a in klorofil b v zelenih rastlinskih tkivih močno absorbirata svetlobo v rdečem območju, z maksimalno absorpcijo pri valovni dolžini 690 nm, medtem ko celične stene močno razpršijo (odboj in prenos) svetlobo v bližnjem infrardečem spektru pri valovni dolžini okoli 850 nm (Glenn in sod., 2008). Sposobnost odboja in prenosa svetlobe v infrardečem območju spektra so celice razvile, ker energija fotonov v tem območju spektra (več kot 700 nm) ni zadostna za vzbujanje fotosinteznega aparata in s tem ni koristna za sintezo organskih molekul. Močna absorpcija svetlobe v valovnih dolžinah nad 700 nm bi lahko povzročila pregretje rastline in poškodbe tkiva.

Če povzamem, klorofil v zelenem rastlinskem tkivu močno absorbira sevanje v fotosintetsko aktivnem delu spektra (PAR; 400 do 700 nm), katerega nato porabi kot vir energije v procesu fotosinteze. Celična struktura listov pa močno razprši infrardečo svetlobo (IR; 700 do 1100 nm). Zato rastline z gledajo relativno temne v PAR spektru in relativno svetle v IR spektru. Nasprotno pa oblaki in sneg z gledajo precej svetlo v PAR spektru in precej temno v IR spektru.

Vrednosti NDVI se gibljejo od -1 do +1. Gosta vegetacija ima visoke vrednosti NDVI, medtem ko imajo tla oziroma zemlja nizke pozitivne vrednosti, voda pa negativne vrednosti, zaradi visoke absorpcije infrardečega spektra svetlobe.

Pri daljinskem zaznavanju so vrednosti NDVI razdeljene tako, da negativne vrednosti (-1) predstavljajo vodo, vrednosti blizu 0 (-0,1 do 0,1) predstavljajo gola, neplodna območja kamenja, peska in snega. Nizke pozitivne vrednosti NDVI (0,2 do 0,4) predstavljajo grmičevje in travinje, visoke vrednosti (blizu 1) pa definirajo gozdove zmernega pasu in tropske gozdove.

Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) je funkcionalno, ne pa tudi linearno, ekvivalenten oziroma enak preprostemu razmerju med infrardečim in vidnim spektrom (NIR/VIS). Prednost NDVI pred NIR/VIS razmerjem je ta, da je NDVI definiran na območju -1 do 1, medtem ko je razmerje NIR/VIS matematično neskončno (zajema vrednosti od 0 do neskončno).

NDVI je neposredno povezan s fotosintetsko kapaciteto in s tem absorpcijsko energijo rastlinske biomase. Tucker (1979) (cit. po Glenn in sod., 2008) je preučeval kombinacije rdečih, infrardečih in zelenih pasov sevanja za napoved biomase, vsebnosti vode in vsebnosti klorofila na traviščih. Izkazalo se je, da je NDVI v močni povezavi z vsebnostjo klorofila in lastnostmi preučevane vegetacije, ki so bile neposredno povezane z vsebnostjo klorofila, kot tudi z zeleno biomaso in vsebnostjo vode v listih.

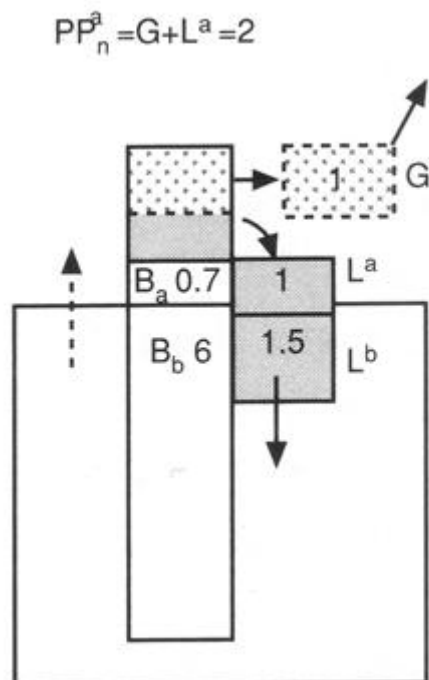
Z indeksom NDVI ocenjujejo veliko število lastnosti vegetacije, kot so indeks listne površine (LAI), biomasa, vsebnost oziroma koncentracija klorofila in produktivnost vegetacije, delno pa tudi pokritost območja z vegetacijo ter akumulirane padavine.

2.3 NADZEMNA BIOMASA NA TRAVIŠČIH

Ob začetku vegetacijske sezone se na traviščih nadzemna biomasa hitro poveča, obenem pa ob istem času že del poganjkov odmre ali pa jih odstranijo porabniki (travojede živali, košnja). Sprememba biomase na letni ravni se na traviščih giblje okoli ničle. V sušnih območjih z variabilno razporejenimi padavinami se sprememba biomase giblje med močno pozitivnimi vrednostmi v vlažnih letih in močno negativnimi vrednostmi v sušnih letih, vendar je večletno povprečje prav tako približno nič (Larcher, 2002).

Na ekstenzivnih traviščih se listi obarvajo rumeno in se ob koncu sezone posušijo ter kasneje mineralizirajo. V stepah je vrednost takšnih izgub več kot polovica skozi rastno sezono proizvedene biomase. V puščavskih travnatih združbah pa se ta vrednost giblje med 60 in 100 % (Larcher, 2002).

Na travnikih in pašnikih se biomasa skozi celotno rastno sezono konstantno odstranjuje, tako da odstranjena biomasa (oznaka G na sliki 3) velikokrat preseže količino opada (oznaka L na sliki 3). Za razliko od naravnega odmiranja listne mase ob košnji ali paši rastline ostajajo v fazi, v kateri so sposobne polne fotosintetske aktivnosti. Po drugi strani lahko pretirana košnja ali paša (če je G večji kot polovica NPP) ogroža obstoj travišča (Larcher, 2002).



Slika 3: Obstoječa snov (biomasa) in izgube suhe snovi na traviščih. Pravokotniki predstavljajo zaloge suhe snovi v kg/m^2 ; sivo obarvana območja: letne izgube suhe snovi v $\text{kg}/\text{m}^2/\text{leto}$; B_a nadzemna biomasa; B_b podzemna biomasa; PP_n neto primarna produkcija; L^a letne nadzemne izgube suhe snovi kot detrit; L^b letne izgube podzemne suhe snovi kot detrit; črtkana območja G letne izgube suhe snovi zaradi rabe travinja (Larcher, 2002).

Nadzemni in podzemni rastlinski deli so funkcionalno soodvisni in ta dva sistema med seboj ohranjata dinamično ravnotežje v celotni rastlinski biomasi. Razmerje med sistemoma se spreminja glede na razpoložljivost nadzemnih virov (svetloba, CO₂) in virov v območju korenin (voda, hranila). Stopnja rasti rastlin in razmerje med koreninami in nadzemnimi deli rastlin so rezultat genotipa in interakcije z okoljem.

Kakšno je razmerje med nadzemno in podzemno biomaso je odvisno od okoljskih razmer. Ta odnos je ključni parameter za oceno zalog ogljika v kopenskih ekosistemih (Luo in sod., 2013).

V večini celotnega travinja na Zemlji je velik delež celotne biomase pod zemljo (Gill in sod., 2002). Delež rastlinske biomase v tleh predstavlja v mnogih negozdnih ekosistemih več kot 80 % skupne rastlinske biomase (Jackson in sod., 1996). Podzemna rastlinska biomasa travinja v zmernem pasu je v povprečju trikrat do štirikrat večja kot nadzemna biomasa (WenHong in sod., 2008).

Razmerje med podzemno in nadzemno rastlinsko biomaso določamo z merjenjem razmerja med koreninami in nadzemnim delom (root:shoot ratio). S fiziološkega vidika razmerje med koreninami in nadzemnim delom običajno odraža porazdelitev fotoasimilatov med podzemnimi in nadzemnimi organi, ki so odvisne od abiotskih in biotskih dejavnikov. Če je rast rastlin močnejše odvisna od talnih dejavnikov, kot je dostopnost vode in hranil, rastline razporedijo več biomase koreninam, če pa so omejujoči dejavniki nadzemni (svetloba in CO₂), pa rastline več izgrajene biomase namenijo nadzemnim delom. Temperatura in dostopnost vode sta pomembna abiotska dejavnika, ki vplivata na rast rastlin in na razporeditev biomase. Če povprečne letne temperature in padavine naraščajo se razmerje korenine:poganjki manjša, kar pomeni, da rastline več izgrajene biomase vlagajo v nadzemne dele (Luo in sod., 2013).

Jackson in sod. (1996) so v raziskavi ocenili, da se na traviščih zmernega pasu 83 % podzemne biomase nahaja v zgornjih 30 cm zemlje. Povprečna obstoječa podzemna biomasa je v omenjenem travinju 1,4 kg/m², razmerje med koreninami in poganjki pa je 3,7. To razmerje je bilo večje samo v tundri (6,6), v ostalih preučevanih biomih pa se je razmerje med koreninami in poganjki gibalo od 0,1 do 1,2.

Donos biomase je v veliki meri omejen z razpoložljivostjo vode, ki pa je odvisna od talnih in podnebnih dejavnikov. Biomasa na travinju se povečuje tako z večjo razpoložljivostjo vode, kot tudi z višjo temperaturo, vendar le če je na voljo dovolj vode. V pol naravnem travinju zmernega podnebnega pasu z ustrezno količino vode in intenzivno rabo, pa ima verjetno gnojenje in pogostost rabe večji vpliv na donos biomase, kot pa klimatske razmere.

Römermann in sod. (2011) so v raziskavi ugotovili, da gnojenje v splošnem povečuje biomaso na traviščih, pridelki pa so največji na traviščih s srednjo pogostostjo rabe. Ugotovijo, da je pomen klime in parametrov vrstne in funkcionalne raznolikosti v proizvodnji biomase odvisen od frekvence motenj in dognojevanja.

2.3.1 Uporaba LAI in NDVI za oceno biomase na traviščih

Čeprav so raziskave pokazale učinkovitost meritev na osnovi daljinskega zaznavanja pri spremljanju travišč, je v heterogenih krajinah (mešana travišča) njihova uporaba še vedno problem. Analizo za izračun indeksov otežuje visok delež odmrlega materiala, ki se pojavlja v mešanih traviščih. V homogenih krajinah, kjer so bile meritve daljinskega zaznavanja razvite je delež odmrlega rastlinskega materiala precej manjši (Guo in sod., 2005).

Tehnike daljinskega zaznavanja in satelitski senzorji so se do sedaj za travnate ekosisteme uporabljali za določanje sestave travišč vključno z določanjem razmerja C_3/C_4 trav, določanje biofizikalnih parametrov, predvsem za oceno biomase ter za določanje klimatskih sprememb in prostorskega vzorca (Guo in sod., 2005).

Indeks NDVI je najbolj pogosto uporabljen spektralni kazalnik za biofizikalne meritve na traviščih. V veliki meri se je uporabljal za proučevanje produkcije vegetacije skozi rastno sezono.

V raziskavi, ki je potekala na traviščih narodnega parka Saskatchewan v Kanadi in na okoliških pašnikih so Guo in sod. (2005) merili LAI, NDVI in vzorčili biomaso. Območje ima letno v povprečju 340 mm padavin, ki se pojavljajo predvsem v rastni dobi (maj-september) in povprečno letno temperaturo 3,4 °C. Korelacijska analiza je bila narejena med različnimi parametri (celotna biomasa, zelena biomasa trav, biomasa drugih zelnatih rastlin, vsebnost vode v rastlinah) in NDVI, ter med LAI in biofizikalnimi parametri. Rezultati so pokazali, da odmrli rastlinski material predstavlja skoraj polovico celotne biomase (47 %), drugi največji del pa pripada travam (41,7 %). Ta dva parametra zajemata blizu 89 % celotne biomase. NDVI vrednosti so znašale od 0,36 do 0,50 (v povprečju 0,44). V območju, kjer je NDVI definiran (-1 do 1), vrednost 0,44 predstavlja relativno visoko fotosintetsko aktivnost, ki jo pripisujejo visokemu deležu zelene biomase trav (41,7 %). Povprečna vrednost indeksa listne površine je 0,87. V povezavi med NDVI in drugimi parametri je bila ugotovljena le ena statistično značilna razlika in sicer pri vsebnosti vode v rastlinah z $r = 0,729$. Indeks listne površine pa pokaže močno povezavo z biomaso trav ($r = 0,761$), z odmrlim materialom ($r = 0,723$), celotno biomaso ($r = 0,773$) in z vsebnostjo vode v rastlinah ($r = 0,903$). Kasnejša regresijska analiza pokaže, da LAI pojasni 81,5 % variabilnosti vsebnosti vode v rastlinah in 59,8 % variabilnosti celotne biomase, medtem ko NDVI ni statistično značilno povezan z biomaso in pojasni le 53,2 % variabilnosti vsebnosti vode v rastlinskem materialu.

Raziskovalci ugotavljajo, da je velika vsebnost odmrlega rastlinskega materiala ovira za merjenje NDVI v mešanih travnatih ekosistemih, saj odmrli rastlinski material značilno zmanjša zaznavanje stopnje fotosinteze oziroma odbojnega sevanja. Statistično značilno razmerje med NDVI in vsebnostjo vode v rastlinah nam pove, da je NDVI bolj občutljiv na absorpcijo vode, kot na fotosintetsko aktivnost, kadar je prisoten velik delež odmrle rastlinske mase. Zaključujejo, da je LAI primernejša indirektna metoda za ocenjevanje strukture rastlinskega pokrova, v katerem je prisoten večji delež odmrlega rastlinskega materiala, kot pa indeks NDVI (Guo in sod., 2005).

Todd in sodelavci (1998) poročajo, da odmrli in suhi material ustvarja odbojne vzorce, ki so bolj podobni odbojnim vzorcem tal, kot pa vzorcem zdrave vegetacije, zato pričakujemo, da bo povezava med indeksoma LAI in NDVI boljša na gojenem travniku kot na ekstenzivnem pašniku. Vzrok temu so okoljske razmere, kot tudi intenzivnost rabe, ki spreminja relativno razmerje med odmrlo in zeleno biomaso. Če se raba poveča, se količina odmrle rastlinske biomase in opada zmanjša, saj je rastlinska biomasa odstranjena s površine predno preide v fazo senescence (Todd in sod., 1998).

V Mongoliji so Fan in sodelavci (2009) na pol sušnih traviščih merili LAI in NDVI, da bi proučili povezavo med njima. Za poskus so bila izbrana tri različna travišča z različnim načinom rabe. Na prvem travišču se paša ni izvajala, na drugem je potekala zimska paša (od sredine oktobra do sredine februarja) zmerne intenzivnosti (1 do 2 ovci/ha), na tretjem travišču pa je potekala intenzivna paša s 4 ovci na hektar. Rezultati raziskave so pokazali, da je na ekstenzivnem travišču, brez paše najboljša regresijska povezava med NDVI in LAI, na travišču kjer poteka paša srednje intenzivnosti je regresijska povezava med parametroma malo slabša, najslabša pa je na travišču z intenzivno pašo. Kakorkoli, na vseh treh traviščih je bila dokazana linearna regresija med indeksoma NDVI in LAI z regresijskimi koeficienti večjimi od 0,77 (Fan in sod., 2009).

3 MATERIALI IN METODE

3.1 OPIS POSKUSNIH LOKACIJ, TRAVNIKOV IN POSKUSNIH ZASNOV

3.1.1 Gojeni travnik – Ljubljana

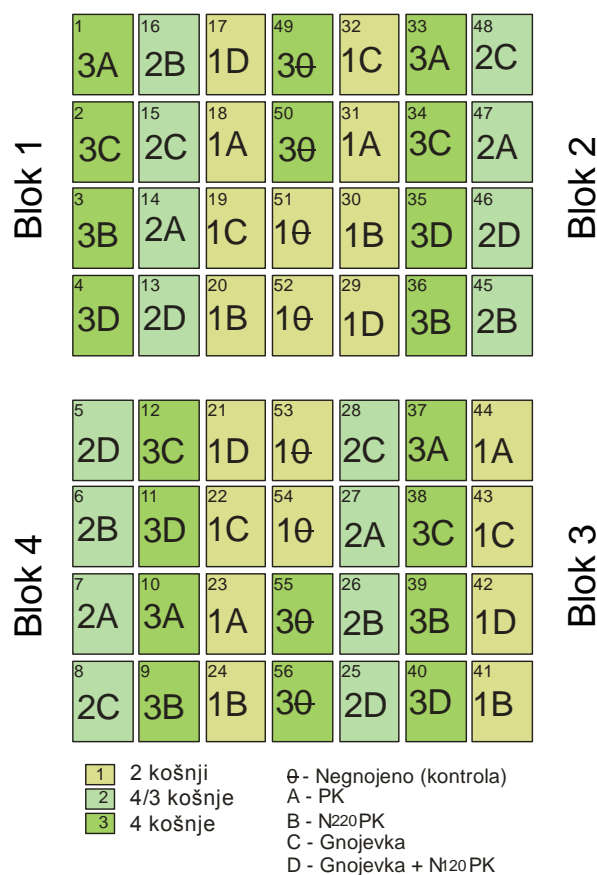
Poskus z akronimom TRAVISTOR se nahaja na poskusnem polju Biotehniške fakultete v Ljubljani. Zasnovan je bil 1. aprila 2011 na okoli trideset let starem sejanem in naturaliziranem travniku zveze Arrhenatherion. Travniki iz te zveze, za katero je najbolj značilna vrsta visoka pahovka, so najbolj razširjeni v nižinskih območjih Slovenije. Če upoštevamo vse travnike iz reda Arrhenatheretalia, v katerega sodi tudi zveza Arrhenatherion, predstavljajo 27 % (84.809 ha) celotnega travinja v Sloveniji (Leskovšek, 2013). Značilno za te travnike je, da uspevajo na svežih tleh, ki so srednje do dobro prehranjena s hranili.

Na poskusni ploskvi so evtrična, psevdoglejena tla zmerno kisle reakcije (pH v 0,01 M $\text{CaCl}_2 = 6,4$).

Vremenski podatki za 30 letno obdobje (1971-2000) za Ljubljano kažejo, da je najtoplejši mesec julij s povprečno temperaturo 20,4 °C, najhladnejši mesec pa januar s povprečno temperaturo -0,1 °C. Letna količina padavin znaša 1368 mm, mesec z največ padavinami pa je junij z 154 mm (ARSO ..., 2014).

Travniški poskus je zasnovan v obliki deljenk (split-plot) s petnajstimi obravnavami v štirih ponovitvah. Osnovne ploskve so velikosti 10 m² v razmerju stranic 2 × 5 m. Meje med ploskvami so bile začrtane in vzdrževane s herbicidom na osnovi glifosata. Velikost poskusa vključno z mejami je 588 m². Na glavnih parcelah so trije režimi košnje (2 košnji, 4 košnje s pozno 1. košnjo vsako 3. leto (= 4/3 košnje), 4 košnje), na podparcelah pa so štirje režimi gnojenja (PK, N220PK, gnojevka, gnojevka + N120PK) ter negnojene podparcele (kontrola).

Naše meritve smo opravljali na robnih parcelah poskusa. Zajetih je bilo šestindvajset parcel z vsemi tremi sistemi defoliacije in vsemi štirimi aplikacijami gnojil vključno z negnojeno kontrolo. Meritve so potekale pred košnjami, ki so bile opravljene v rastni sezoni 2013.



Slika 4: Načrt poskusa gojenega travnika TRAVISTOR, Laboratorijsko polje BF

3.1.2 Ekstenzivni pašnik – Podgorski kras

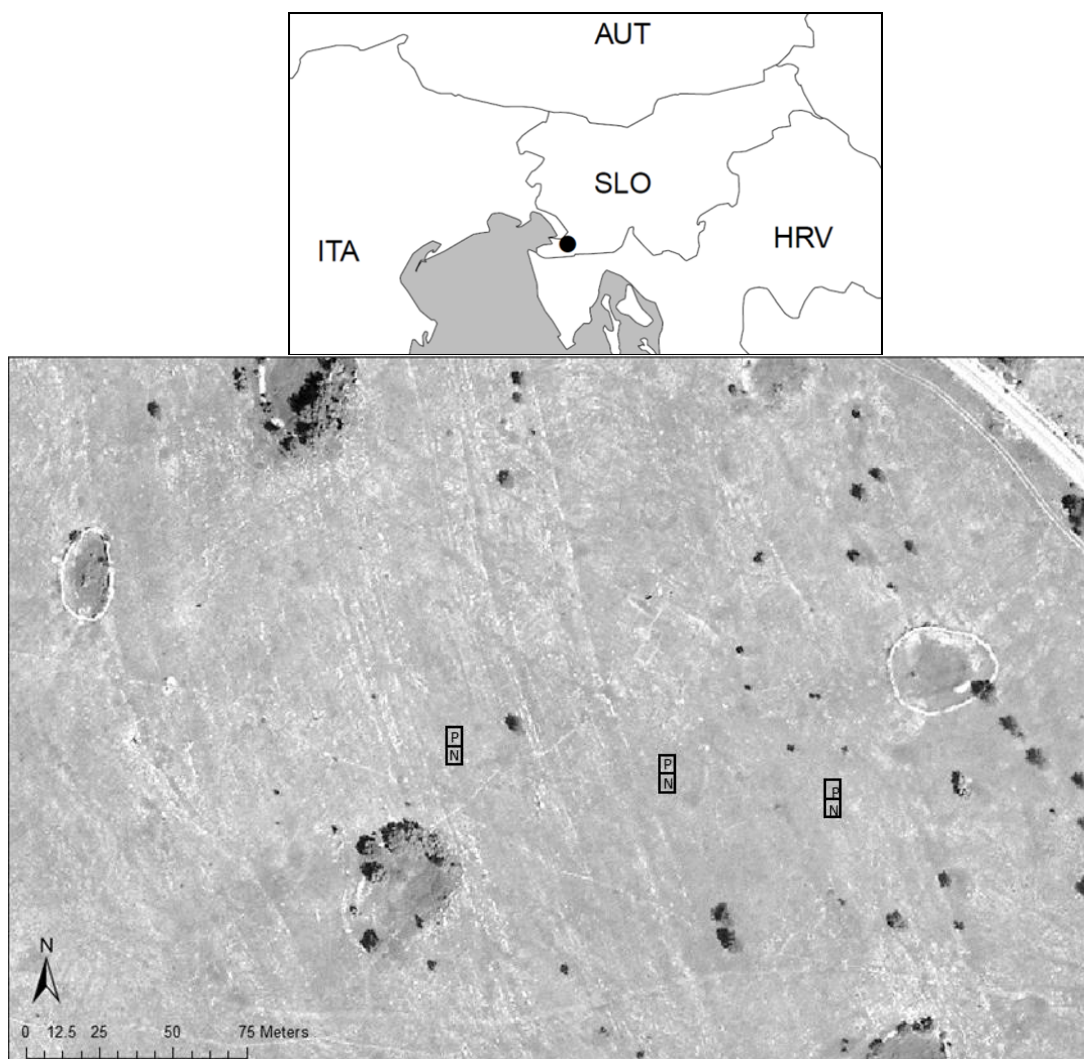
Raziskovalna ploskev se nahaja na planoti Podgorskega Krasa v submediteranski regiji Slovenije (Slika 5). Nahaja se na nadmorski višini 400 do 430 m, s koordinatami 45°33' severne geografske širine in 13°55' vzhodne geografske dolžine. Prevladujoč tip tal na tem območju je rendzina na paleogeni apnenčasti kamnini. Globina tal na lokaciji je zelo neenakomerna, giba se od 0 cm do več decimetrov v razpokah med skalami, ki predstavljajo kar 50 % volumna tal v zgornjih 40 cm talnega profila. Tekstura tal je glinena, z majhno vsebnostjo rastlinskih hranil, še posebno fosforja. Talna reakcija je skoraj nevtralna, vsebnost organske snovi v zgornji plasti tal pa je 12 do 15 %.

Podnebje na območju poskusa je prehodno, na meji med submediteranskim in kontinentalnim podnebjem. Poletja so vroča in suha (povprečna dnevna temperatura julija je 19,9 °C), zime pa relativno hladne in mokre (povprečna dnevna temperatura v januarju je 1,8 °C). Na leto pade v povprečju 1370 mm padavin, glavnina med septembrom in majem, z nekaj plohami poleti.

Na poskusni ploskvi je pokritost z drevesi pod 5 %, ter je skoncentrirana okoli vrtač, ki so tradicionalen način zaščite pred erozijo vetra.

V zadnjih desetletjih se je na območju bolj ali manj stalno izvajala ekstenzivna paša (osli, konji ali ovce s pašno obremenitvijo pod 0,25 GVŽ (glav velike živali)) (Ferlan in sod., 2011).

Leta 2013 je na raziskovalni ploskvi potekala simulacija pogostih požarov v regiji. Izveden je bil poskus, ki je vključeval kontroliran požig ploskev in nadaljnje meritve okrevanja travnate vegetacije po požaru. Ploskve se nahajajo blizu območja, ki ga pokriva Eddy covariance stolp za meritve NEE travišča. Tu so potekale tudi pomožne meritve okoljskih parametrov (Ferlan in sod., 2011). Poskus so pričeli 4. aprila 2013, ko so zakoličili parcele, in sicer tri pare parcel (požgano-kontrola), vsaka parcela pa meri 5 x 5 m. Ena parcela od vsakega para je bila kontrolirano požgana 11. 4. 2013 (Vončina in sod., 2014). Na teh treh parih parcel smo opravljali tudi naše meritve vseh treh izbranih parametrov (LAI, NDVI in količina zelene biomase). Meritve smo opravili trikrat v rastni sezoni in sicer meseca aprila, maja in avgusta.



Slika 5: Ortofotoposnetek raziskovalne ploskve na Podgorskem Krasu z označenimi tremi pari poskusnih parcel (Vončina in sod., 2014).

3.2 METODE

Med vegetacijsko dobo smo v terminih, ki so navedeni v preglednici 1, opravljali meritve izbranih vegetacijskih indeksov in zelene biomase. Za potrebe laboratorijskih analiz smo travno rušo tudi vzorčili. Meritve indeksa listne površine smo opravljali s ceptomrom LAI-2200 (LiCor, ZDA). Na istih mestih smo z multispektralnim radiometrom MSR87, povezanim z DLC 2000 (CROPSCAN Inc.), opravili meritve NDVI. V laboratoriju smo določili delež zelene biomase (odbiranje, sušenje, tehtanje) v vzorcih. S statistično obdelavo podatkov smo ugotovili časovne spremembe posameznih parametrov za obe izbrani lokaciji. Povezanost parametrov smo ocenili s korelacijsko analizo.

3.2.1 Shema vzorčenj oziroma meritev

Meritve LAI in NDVI ter vzorčenja biomase smo na proučevanih traviščih opravili v terminih navedenih v preglednici 1.

Preglednica 1: Termini opravljanja meritev treh izbranih parametrov na proučevanih traviščih

	Ekstenzivni pašnik - Podgorski kras			Gojeni travnik - poskus Travistor				
Indeks LAI	28.5.2013		22.8.2013	14.5.2013	5.6.2013	2.7.2013	28.8.2013	23.10.2013
Indeks NDVI	14.4.2013	3.6.2013	22.8.2013	14.5.2013	5.6.2013	2.7.2013	27.8.2013	25.10.2013
Pridelek biomase	11.4.2013	28.8.2013	22.8.2013	15.5.2013	5.6.2013	3.7.2013	29.8.2013	28.10.2013

3.2.2 Meritve biomase s tehtanjem

Travna ruša na poskusu v Ljubljani je bila v rastni sezoni 2013 pokošena dvakrat oziroma štirikrat. Višina košnje je bila 5 cm. Takoj po košnji smo stehali sveže zelinje z vsake parcele posebej. Za določitev zračno suhe snovi smo po tehtanju celotne sveže mase odvzeli 1 do 1,5 kg velike vzorce in jih posušili v sušilniku (3 dni; 55 °C). Z dosušitvijo zračno suhih vzorcev, ki je trajala 24 ur pri 105 °C, smo dobili absolutno suho snov.

Za vzorčenje biomase na Podgorskem krasu smo za pripomoček uporabili kovinski okvir velikosti 0,25 m², ki smo ga naključno postavili na vsako posamezno parcelico. Travno rušo, ki se je nahajala znotraj kovinskega okvirja smo pri tleh odstranili s škarjami in jo shranili v vreče. V laboratoriju smo kasneje pridobljeno biomaso ločili na zeleni in že suhi del biomase. Zeleni del biomase je bil nato zračno posušen. Nazadnje pa smo biomaso še stehali.

3.2.3 LAI meritve

Za meritve indeksa listne površine smo uporabili posredno, nedestruktivno metodo. Meritve indeksa smo opravljali z aparatom LAI-2200 Plant Canopy Analyzer (LiCor, Lincoln, ZDA). Merilni instrument s pomočjo izračuna, preko meritev sevanja z optičnim senzorjem »fish eye«, določi indeks listne površine (LAI) in veliko drugih struktur rastlinskega pokrova.

Merilni instrument izračunava prestrežanje modre svetlobe (320 do 490 nm) v 5 zenitnih kotih (148° vidnega polja) iz odčitkov nad in pod rastlinsko odejo. Optični senzor meri podatke v petih koncentričnih krogih pod koti 7°, 23°, 38°, 53° in 68°. S pomočjo algoritmov izračuna količino olistanosti in njeno usmerjenost. Vsi izračuni se izvajajo v konzoli merilnega instrumenta, tako da lahko rezultate odčitamo že na polju. Pridobljene podatke lahko kasneje obdelujemo na računalniku s pomočjo programa FV2200 (LiCor, ZDA).

Na vsaki poskusni ploskvi smo izvedli meritve indeksa listne površine. Vsaka meritev LAI je povprečna vrednost, izračunana iz ene meritve nad rastlinskim pokrovom in petih meritev pod rastlinskim pokrovom. Meritve smo vedno opravljali v razmerah, ko ni bilo direktne sončne svetlobe (oblačno vreme ali zgodaj zjutraj). Merili smo iz roba parcelice, pri čemer smo za lečo uporabili 270° senčilo (merilni kot 90° je bil usmerjen v središče ploskve).

3.2.4 NDVI meritve

Za meritve indeksa NDVI smo uporabili multispektralni radiometer MSR87 povezan za DLC 2000 (CROPSCAN Inc., Minnesota, ZDA). Osnovna delovanja tega merilnega instrumenta je, da vsaka snov absorbira, oddaja, prenaša ali odbija elektromagnetno sevanje na način, ki je značilen za to snov. Z merjenjem količine absorbiranega, prenesenega ali odbitega sevanja v različnih valovnih dolžinah lahko opredelimo lastnosti snovi. Multispektralni radiometer je nameščen na podporni palici nad rastlinskim pokrovom. Premer vidnega polja merilnega instrumenta je eno polovico višine na kateri je nad rastlinsko odejo nameščen radiometer. Program za pridobivanje podatkov omogoča digitalizacijo napetosti in snemanje odbojnosti za vsako od izbranih valovnih dolžin. Omogoča tudi izračun povprečja večjih vzorcev ter zapisovanje pomožnih podatkov, kot so parcele, čas, raven vpadnega sevanja in temperatura. Vsako skeniranje rastlinskega pokrova traja približno dve sekundi.

Zasnova radiometra omogoča skoraj sočasne vhode napetosti, ki predstavljajo vpadno kot tudi odbito sevanje. Ta funkcija omogoča natančno merjenje odbojnosti svetlobe od rastlinske odeje, tudi če svetlobni pogoji niso idealni (CROPSCAN Inc.).

Na vsaki poskusni ploskvi smo izmerili pet meritev NDVI, iz kateri smo izračunali povprečno vrednost indeksa NDVI za vsako posamezno poskusno ploskev.

3.2.5 Statistične metode

S pomočjo programa Microsoft Excel 2010 smo za opravljene meritve izračunali povprečja in standardne odklone ter narisali grafične prikaze. Izračun korelacijske analize smo naredili v programu R. Linearno povezanost med dvema številskima spremenljivkama smo preverili s Pearsonovim koeficientom korelacije.

Za preverjanje hipotez smo uporabili Studentovo t-test metodo, kjer testna statistika sledi Studentovi porazdelitvi ob predpostavki, da ničelna hipoteza drži. T-test metoda predpostavlja normalno porazdelitev in enako varianco obeh vzorcev, uporabili pa smo jo ker je primerna tudi za preverjanje razlik majhnih vzorcev ($n < 30$).

4 REZULTATI

4.1 BIOMASA

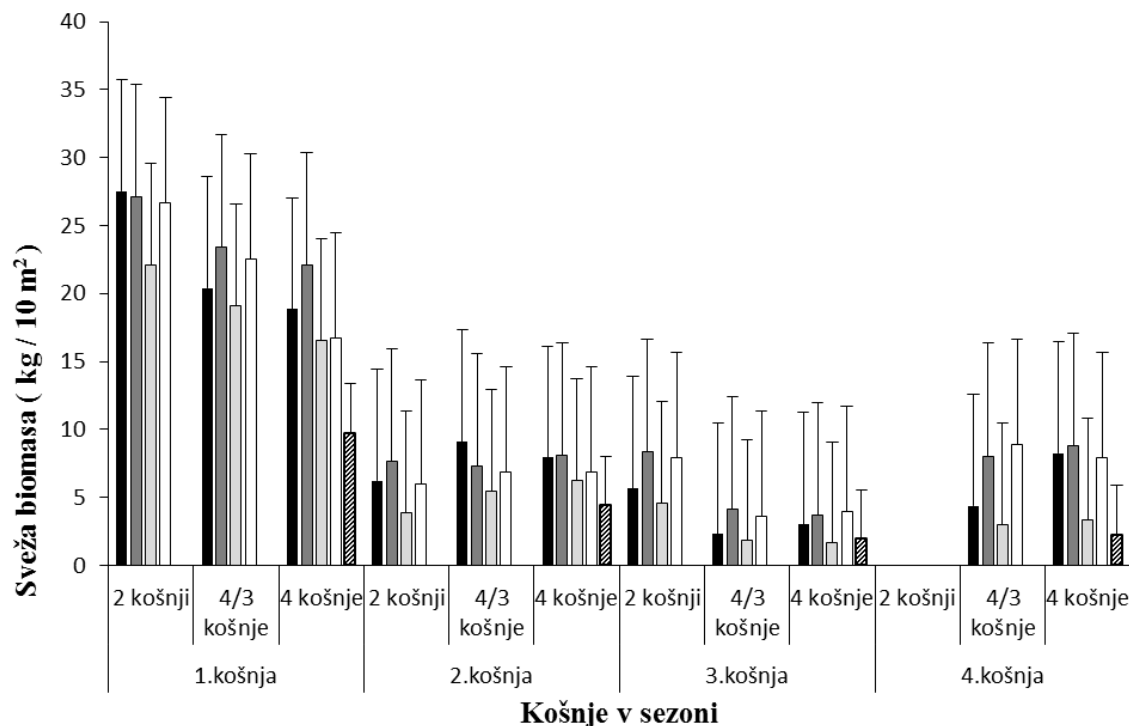
Predstavljena je količina biomase s standardnimi odkloni za obe izbrani lokaciji. Na poskusni ploskvi gojenega travnika (Travistor) v Ljubljani so bili pridelki večji kot na ploskvi ekstenzivnega pašnika na Podgorskem krasu.

4.1.1 Gojeni travnik – poskus Travistor

Na sliki 6 je prikazana povprečna količina sveže biomase s standardnimi odkloni po obravnavanjih in po košnjah.

Iz grafa je razvidno, da je bila največja količina biomase na merjenih ploskvah ob prvi košnji, kasneje pa je bila ob vsaki košnji manjša, z izjemo četrte košnje, kjer je bila količina biomase približno enaka količini ob drugi košnji. Najmanjša količina biomase je bila izmerjena na parcelah, ki niso bile gnojene (kontrola). Kontrolni so sledile parcele, ki so bile gnojene z gnojevko, parcele, ki so bile gnojene s PK in parcele, ki so bile gnojene z gnojevko + N₁₂₀PK. Največjo količino biomase pa smo izmerili na parcelah, ki so bile gnojene z mineralnim gnojilom N₂₂₀PK. Če v ospredje postavimo sistem defoliacije ugotovimo, da je bila največja količina biomase izmerjena pri merjenih parcelah z 2 košnjama na sezono, sledi ji količina biomase pri 4 košnjah na sezono z eno pozno prvo košnjo vsako 3. leto, najmanjša količina biomase pa je bila izmerjena pri merjenih parcelah s 4 košnjami na sezono.

Največjo količino sveže biomase smo izmerili ob prvi košnji pri obravnavanju 2 košnji v kombinaciji z gnojenjem PK in sicer 27,52 kg/10 m². Najmanjša količina sveže biomase je bila izmerjena ob tretji košnji pri obravnavanju 4 košnje v kombinaciji z gnojenjem z gnojevko in sicer 1,62 kg/10 m².



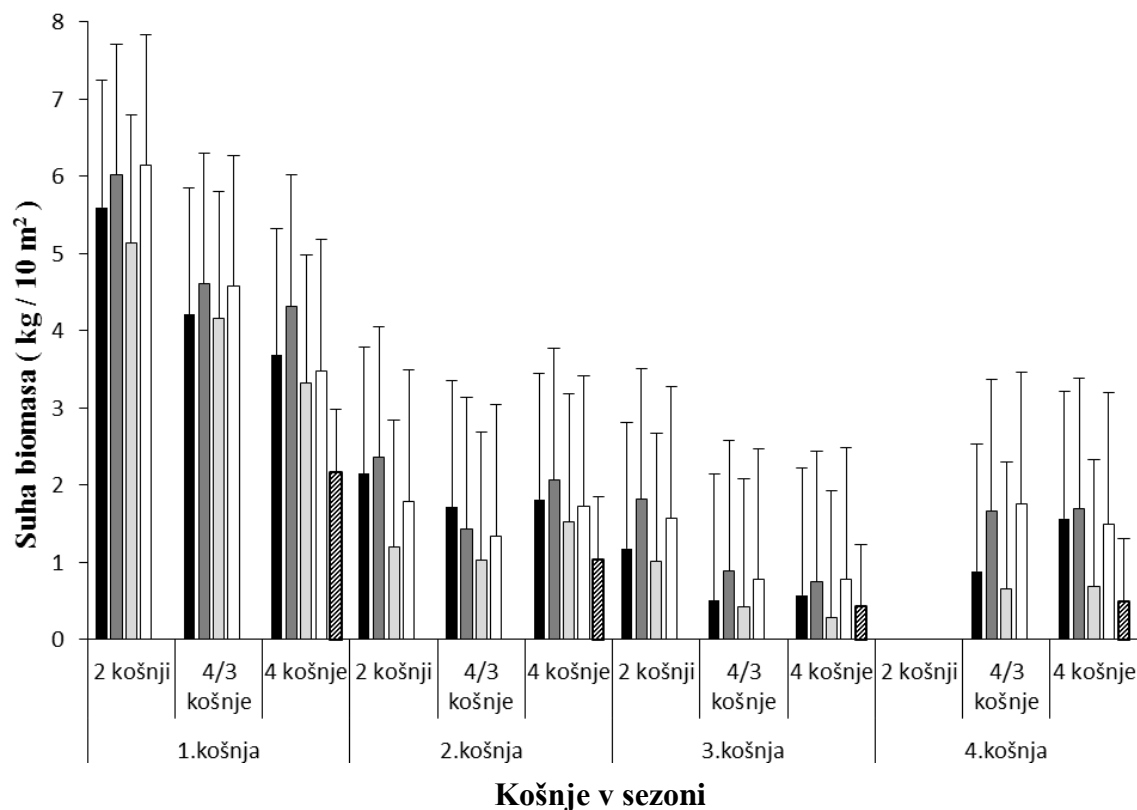
Slika 6: Količina sveže biomase s standardnimi odkloni po obravnavanjih in po košnjah na gojenem travniku v Ljubljani. Črni stolpci: gnojeno s PK; sivi stolpci: gnojeno s N₂₂₀PK; svetlo sivi stolpci: gnojeno z gnojevko; beli stolpci: gnojeno z gnojevko + N₁₂₀PK; črtkani stolpci: negnojeno (kontrola)

Na sliki 7 je prikazana povprečna količina suhe biomase s standardnimi odkloni po obravnavanjih in po košnjah.

Iz grafa je razvidno, da je bila največja izmerjena količina biomase na merjenih ploskvah ob prvi košnji, ob drugi košnji je bila manjša, še manjša ob četrti košnji, najmanjša količina biomase pa je bila izmerjena ob tretji košnji.

Najmanjša povprečna količina biomase je bila izmerjena pri merjenih parcelah, ki niso bile gnojene (kontrola). Kontrolni sledijo parcele, ki so bile gnojene z gnojevko, parcele, ki so bile gnojene s PK in parcele, ki so bile gnojene z gnojevko + N₁₂₀PK. Največja povprečna količina suhe biomase pa je bila izmerjena na merjenih parcelah gnojenih z N₂₂₀PK. Trendi razlik med skupinami oziroma med obravnavanji so bili glede na sistem defoliacije zelo podobni kot pri sveži masi.

Največjo povprečno količino suhe biomase smo izmerili ob prvi košnji pri obravnavanju 2 košnje v kombinaciji z gnojenjem z gnojevko + N₁₂₀PK in sicer 6,14 kg/10 m². Najmanjša povprečna količina suhe biomase je bila izmerjena ob tretji košnji pri obravnavanju 4 košnje v kombinaciji z gnojenjem z gnojevko in sicer 0,28 kg/10 m².



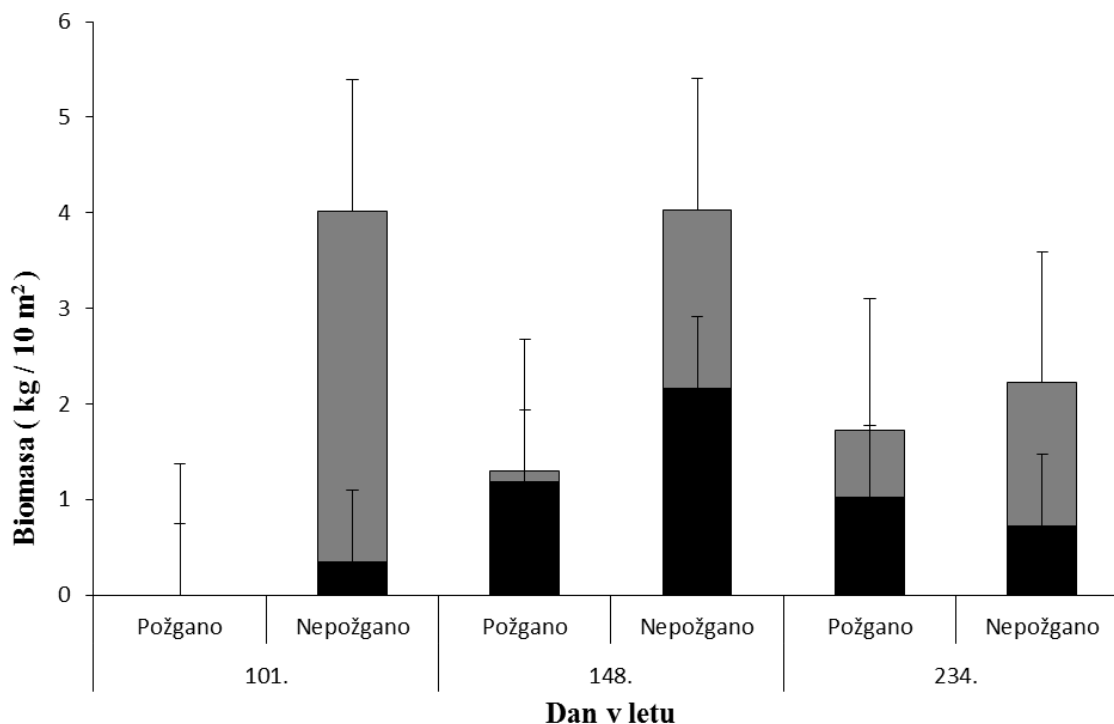
Slika 7: Količina suhe biomase s standardnimi odkloni po obravnavanjih in po košnjah na gojenem travniku v Ljubljani. Črni stolpci: gnojeno s PK; sivi stolpci: gnojeno s N₂₂₀PK; svetlo sivi stolpci: gnojeno z gnojevko; beli stolpci: gnojeno z gnojevko + N₁₂₀PK; črtkani stolpci: negojeno (kontrola)

4.1.2 Ekstenzivni pašnik – Podgorski kras

Slika 8 kaže posušeno biomaso s standardnimi odkloni po košnjah. Vidimo, da je bila povprečna količina biomase na poskusnih parcelah, ki niso bile požgane v vseh izbranih terminih merjenja večja, kot na parcelah, ki smo jih požgali. Razlika v količini biomase med nepožganimi in požganimi parcelami je bila v vsakem naslednjem terminu merjenja manjša.

Izmerjena povprečna količina že ob vzorčenju suhega dela biomase je bila največja ob prvem terminu merjenja (101. dan v letu), medtem ko je bila povprečna količina zelenega dela biomase največja ob drugem terminu merjenja (148. dan v letu), obakrat na parcelah, ki niso bile požgane. Najmanjša povprečna količina zelenega dela biomase je bila izmerjena ob prvem terminu merjenja (101. dan v letu) na nepožganih parcelah. Povprečna količina suhega dela biomase pa je bila izmerjena ob drugem terminu merjenja (148. dan v letu) na požganih parcelah.

Največjo povprečno količino celotne posušene biomase (že ob vzorčenju suhi del biomase in zeleni del biomase) smo izmerili ob drugem terminu merjenja na nepožganih parcelah in sicer 4,03 kg/10 m².



Slika 8: Količina skupne (ob vzorčenju suhi del + zeleni del) posušene biomase s standardnimi odkloni na ekstenzivnem pašniku na Podgorskem krasu. Črni stolpci: zeleni del biomase; sivi stolpci: suhi del biomase

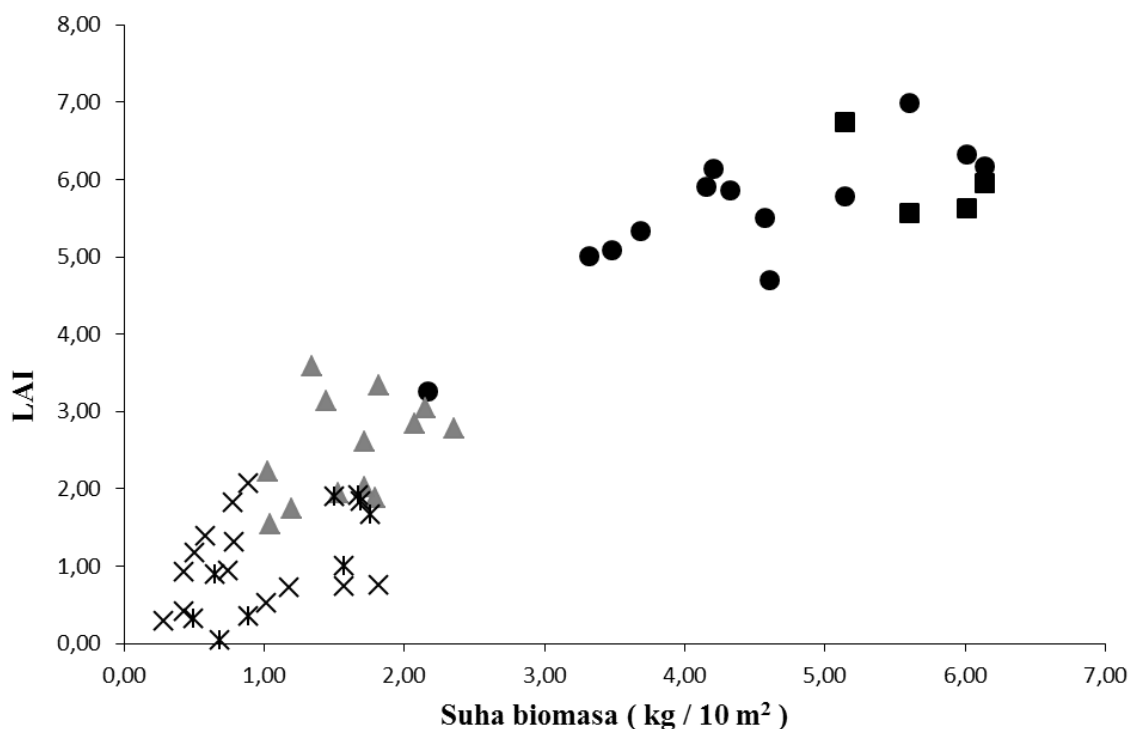
4.2 MEDSEBOJNA ODVISNOST INDEKSA LAI IN BIOMASE

Na slikah 9 in 10 je predstavljena primerjava indeksa LAI in meritev biomase za obe izbrani lokaciji. Na poskusni ploskvi gojenega travnika (Travistor) se vrednosti indeksa LAI gibljejo od 0 do 7, medtem ko se izmerjene vrednosti istega indeksa na poskusni ploskvi ekstenzivnega pašnika na Podgorskem krasu gibajo od 0 do 1,1.

4.2.1 Gojeni travnik – poskus Travistor

Na sliki 9 je prikazan indeks LAI v odvisnosti od posušene zelene biomase. Korelacijska analiza je pokazala linearno povezanost med indeksom LAI in biomaso, ki je statistično značilna ($p = 0,0005$). Vrednost Pearsonovega koeficienta korelacije je $r = 0,83$ pri $\alpha = 0,05$.

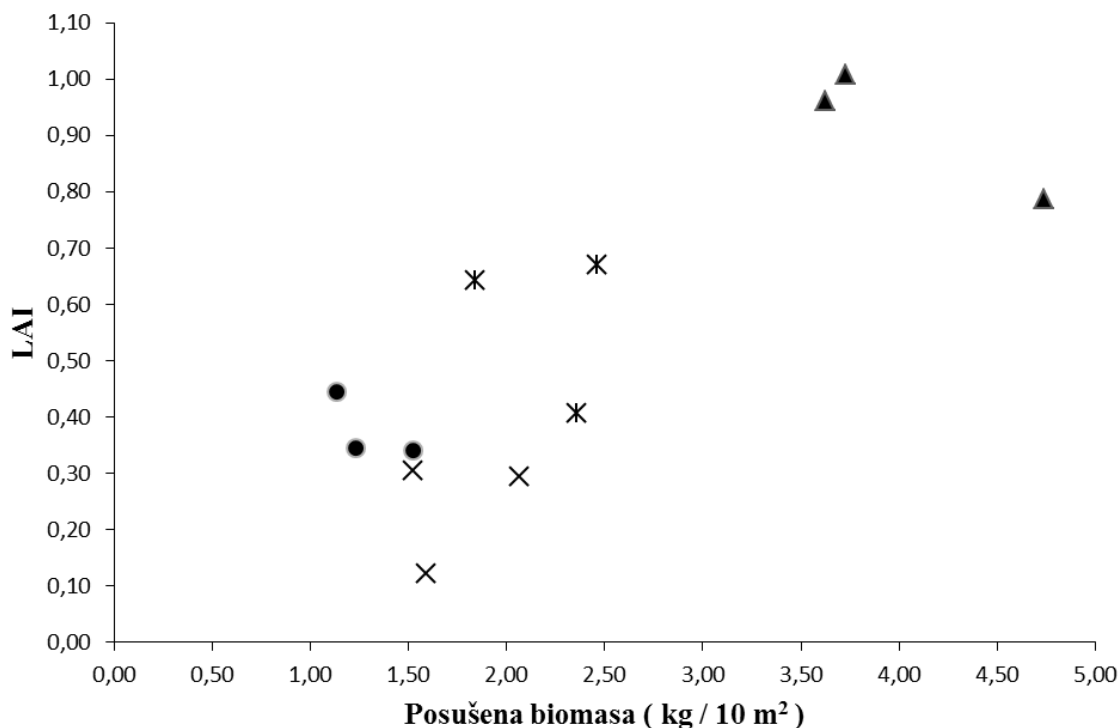
Med indeksom LAI in biomaso obstaja pozitivna linearna povezava ($p < 0,05$). Z naraščanjem količine biomase je naraščala tudi vrednost indeksa LAI. Največja izmerjena vrednost indeksa LAI je bila ob prvi košnji (134. dan v letu) in sicer 7. Najmanjša izmerjena vrednost indeksa LAI je bila ob četrti košnji (296. dan v letu) in sicer 0,04.



Slika 9: Indeks LAI glede na količino posušene zelene biomase na gojenem travniku v Ljubljani. Krogci: 1. košnja (134. dan v letu); kvadratki: 1. košnja (156. dan v letu); trikotniki: 2. košnja (183. dan v letu); križci: 3. košnja (240. dan v letu); zvezdice: 4. košnja (296. dan v letu)

4.2.2 Ekstenzivni pašnik – Podgorski kras

Na sliki 10 je prikazan izmerjeni indeks LAI glede na količino posušene (ob vzorčenju suhi del + zeleni del) biomase ($\text{kg}/10 \text{ m}^2$). Korelacijska analiza je pokazala linearno povezanost med indeksom LAI in biomaso. Linearna povezanost med spremenljivkama je statistično značilna ($p = 0,0413$). Pri $\alpha = 0,05$ je vrednost Pearsonovega koeficienta korelacije $r = 0,83$. Med indeksom LAI in biomaso obstaja pozitivna linearna povezanost ($p < 0,05$). Z naraščanjem količine biomase naraščajo tudi vrednosti indeksa LAI. Največje vrednosti obeh spremenljivk predstajajo parcele, ki niso bile požgane in merjene 148. dan v letu. Najmanjša izmerjena vrednost indeksa LAI je bila na požgani parceli, merjena 234. dan v letu.



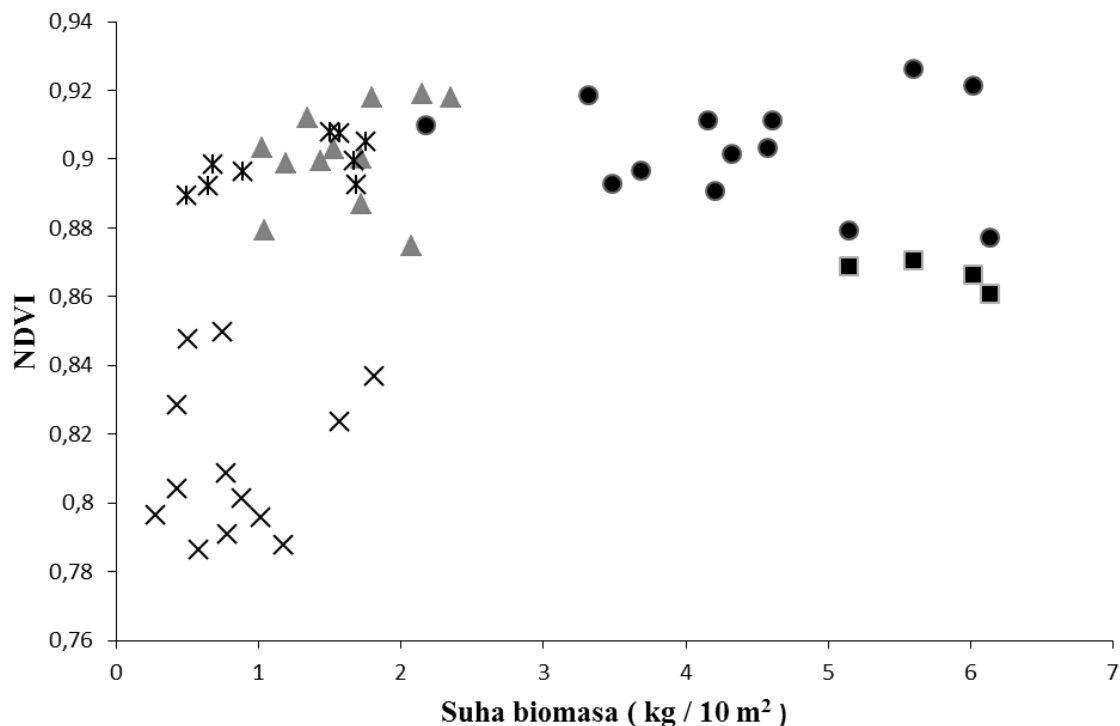
Slika 10: Indeks LAI glede na količino posušene (ob vzorčenju suhi del + zeleni del) biomase na ekstenzivnem pašniku na Podgorskem krasu. Trikotniki: nepožgano, 148. dan v letu; krogci: požgano, 148. dan v letu; zvezdice: nepožgano, 234. dan v letu; križci: požgano, 234. dan v letu

4.3 MEDSEBOJNA ODVISNOST INDEKSA NDVI IN BIOMASE

Predstavljena je primerjava indeksa NDVI in biomase za obe izbrani lokaciji. Izmerjene vrednosti indeksa NDVI so bile na poskusni ploskvi gojenega travnika večje kot na poskusni ploskvi ekstenzivnega pašnika na Podgorskem krasu.

4.3.1 Gojen travnik – poskus Travistor

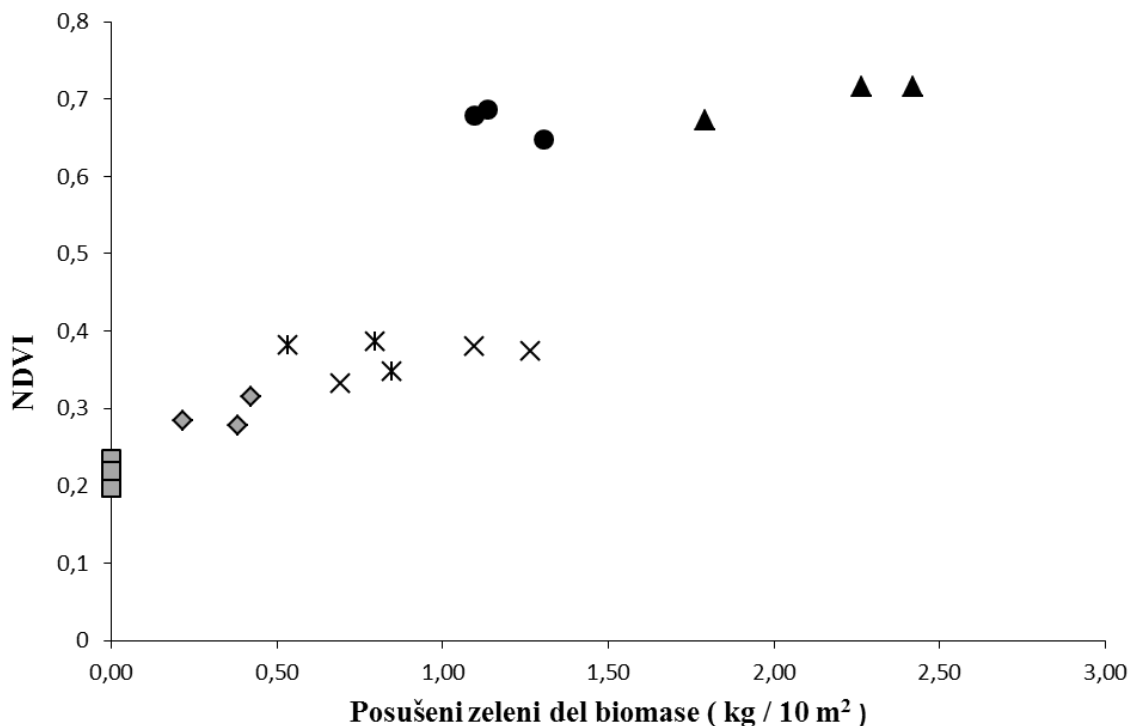
Slika 11 prikazuje indeks NDVI glede na količino posušene zelene biomase (kg/10 m²). Najmanjše vrednosti vzorčene biomase, kot tudi indeksa NDVI so bile izmerjene ob tretji košnji (239. dan v letu), medtem ko smo največje vrednosti NDVI in biomase izmerili ob prvi košnji (134. dan v letu). Malo manjše vrednosti indeksa NDVI ter enake vrednosti biomase kot ob prvi košnji (134. dan v letu) pa so bile izmerjene 156. dan v letu, ko je potekala prva košnja pri rabi z dvema košnjama. Ob drugi in četrti košnji so bile vrednosti indeksa NDVI in izmerjene biomase približno enake. Vrednosti indeksa NDVI so bile enako velike kot ob prvi košnji, vrednosti izmerjene biomase pa so bile manjše in sicer so se gibale od 0,5 do 2,5 kg/10 m².



Slika 11: Indeks NDVI glede na količino posušene zelene biomase na gojenem travniku v Ljubljani. Krogci: 1. košnja (134. dan v letu); kvadratki: 1. košnja (156. dan v letu); trikotniki: 2. košnja (183. dan v letu); križci: 3. košnja (239. dan v letu); zvezdice: 4. košnja (298. dan v letu)

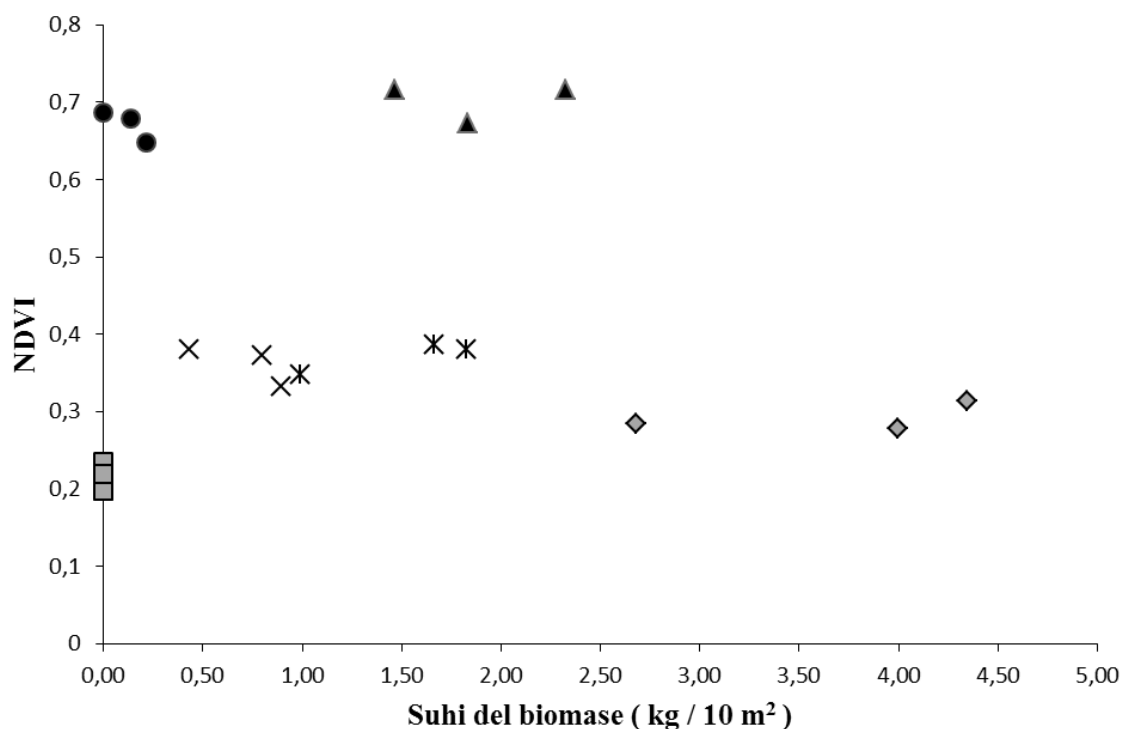
4.3.2 Ekstenzivni pašnik – Podgorski kras

Na sliki 12 je prikazan indeks NDVI glede na količino posušenega zelenega dela biomase ($\text{kg}/10 \text{ m}^2$). Korelacijska analiza je pokazala linearno povezanost med indeksom NDVI in posušenim zelenim delom biomase. Linearna povezanost med spremenljivkama je statistično značilna ($p = 0,0083$). Pri $\alpha = 0,05$ je vrednost Pearsonovega koeficienta korelacije $r = 0,92$. Največje vrednosti indeksa NDVI predstavljajo parcele, tako požgane kot nepožgane, merjene v drugem terminu meritev (148. dan v letu), in sicer od 0,6 do 0,8. Meritve v prvem in tretjem terminu zajemajo manjše vrednosti indeksa NDVI in sicer od 0,2 do 0,4.



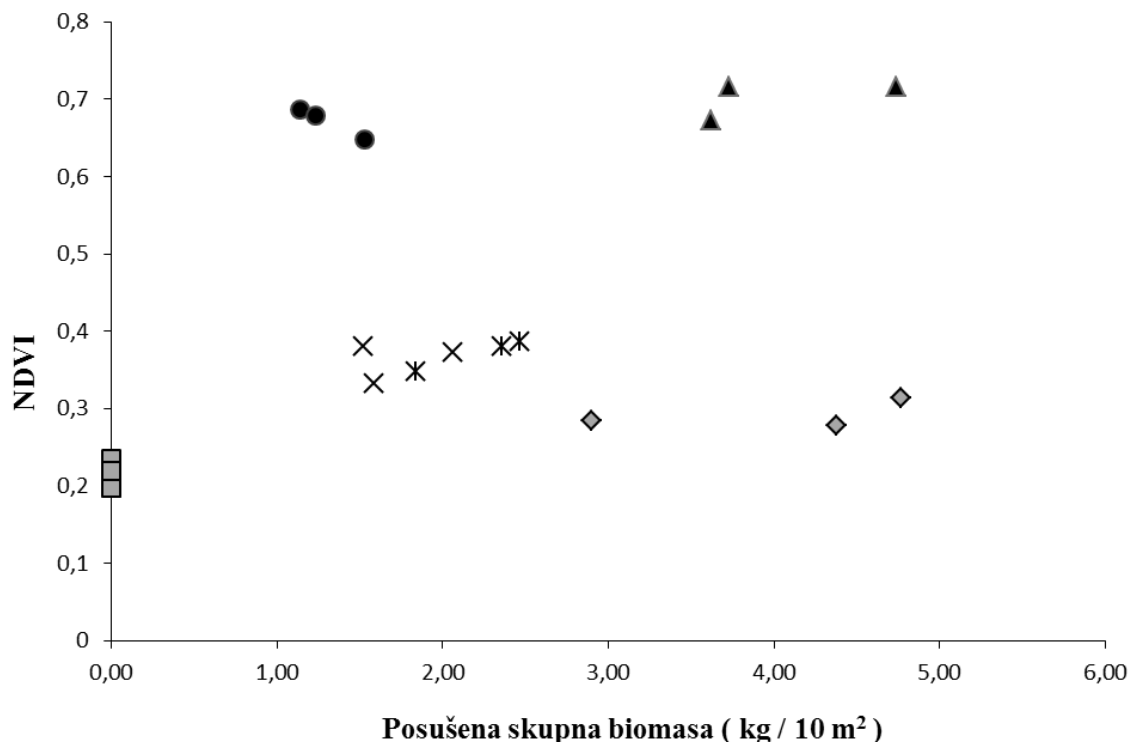
Slika 12: Indeks NDVI glede na količino posušenega zelenega dela biomase na ekstenzivnem pašniku na Podgorskem krasu. Karo: nepožgano, 101. dan v letu; kvadratki: požgano, 101. dan v letu; trikotniki: nepožgano, 148. dan v letu; krogi: požgano, 148. dan v letu; zvezdice: nepožgano, 234. dan v letu; križci: požgano, 234. dan v letu

Na sliki 13 je prikazan indeks NDVI glede na količino že ob vzorčenju suhega dela biomase (kg/10 m²). Največje izmerjene vrednosti indeksa NDVI so bile zabeležene v drugem terminu merjenja (148. dan v letu), tako na požganih kot na nepožganih parcelah in sicer okoli 0,7. V prvem in tretjem terminu merjenja pa so bile vrednosti indeksa NDVI nekoliko manjše. Gibale so se od 0,2 do 0,4. Vzrok je verjetno v večji količini odmrle biomase. Korelacijska analiza je pokazala linearno povezanost med indeksom NDVI in suhim delom biomase. Pri $\alpha = 0,05$ je vrednost Pearsonovega koeficienta korelacije $r = 0,89$.



Slika 13: Indeks NDVI glede na količino že ob vzorčenju suhega dela biomase na ekstenzivnem pašniku na Podgorskem krasu. Karo: nepožgano, 101. dan v letu; kvadratki: požgano, 101. dan v letu; trikotniki: nepožgano, 148. dan v letu; krogi: požgano, 148. dan v letu; zvezdice: nepožgano, 234. dan v letu; križci: požgano, 234. dan v letu

Slika 14 prikazuje indeks NDVI glede na količino posušene skupne (že ob vzorčenju suhi del + zeleni del) biomase ($\text{kg}/10 \text{ m}^2$). Korelacijska analiza je pokazala linearno povezanost med indeksom NDVI in posušeno skupno biomaso, ki je statistično značilna ($p = 0,0123$). Pri $\alpha = 0,05$ je vrednost Pearsonovega koeficienta korelacije $r = 0,91$. Največje izmerjene vrednosti indeksa NDVI so bile zabeležene v drugem terminu merjenja (148. dan v letu), tako na požganih kot nepožganih parcelah in sicer okoli 0,7. V prvem in tretjem terminu merjenja pa so bile vrednosti indeksa NDVI nekoliko manjše. Gibale so se od 0,2 do 0,4.



Slika 14: Indeks NDVI glede na količino skupne (že ob vzorčenju suhi del+zeleni del) biomase na ekstenzivnem pašniku na Podgorskem krasu. Karo: nepožgano, 101. dan v letu; kvadratki: požgano, 101. dan v letu; trikotniki: nepožgano, 148. dan v letu; krogi: požgano, 148. dan v letu; zvezdice: nepožgano, 234. dan v letu; križci: požgano, 234. dan v letu

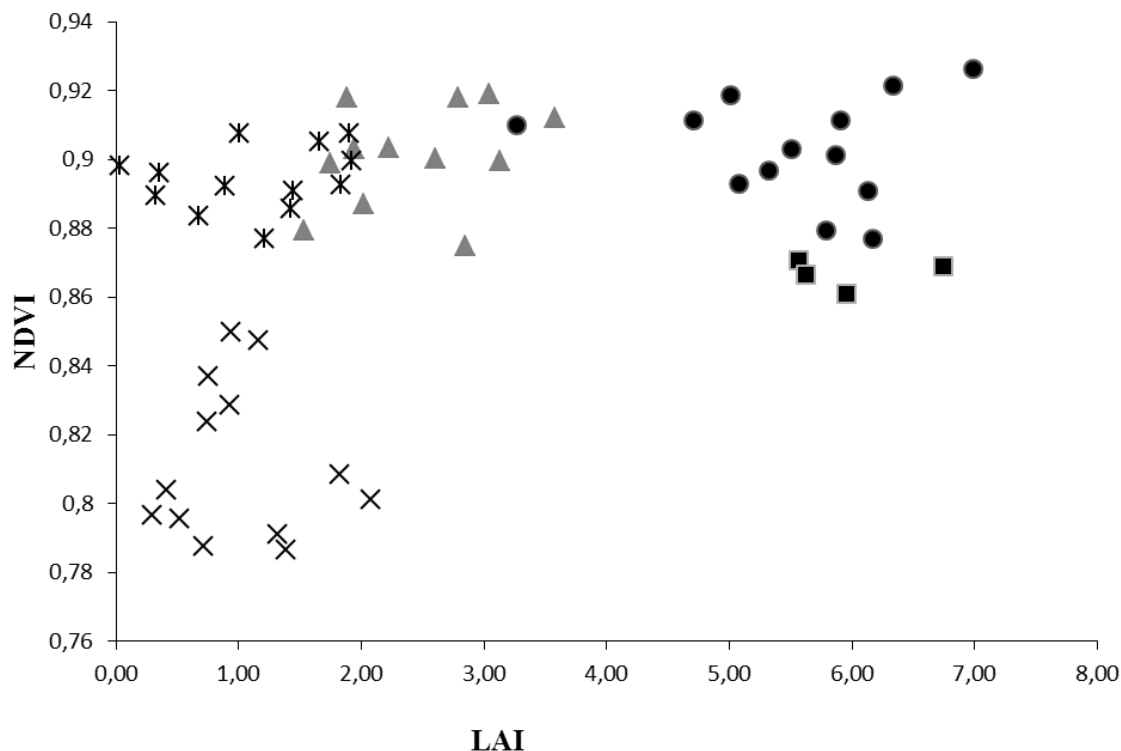
4.4 MEDSEBOJNA ODVISNOST INDEKSA NDVI IN INDEKSA LAI

Predstavljen je primerjava indeksa NDVI in indeksa LAI za obe izbrani lokaciji.

4.4.1 Gojeni travnik – poskus Travistor

Na sliki 15 je prikazan indeks NDVI glede na indeks LAI. Korelacijska analiza je pokazala, da linearna povezanost med spremenljivkama ne obstaja ($p = 0,9810$).

Največje vrednosti tako indeksa NDVI, kot indeksa LAI so bile izmerjene ob prvi košnji, dne 14. maja (134. dan v letu) in 5. junija 2013 (156. dan v letu). Najmanjše vrednosti obeh indeksov so bile izmerjene 28. avgusta 2013 (240. dan v letu), ko so se vrednosti NDVI gibale od 0,78 do 0,86, vrednosti LAI pa od 0 do 2,5. Enako majhen LAI (od 0 do 2) je bil izmerjen ob četrti košnji, 23. oktobra (296. dan v letu), izmerjen indeks NDVI pa je bil na isti dan višji in sicer med 0,87 in 0,91.

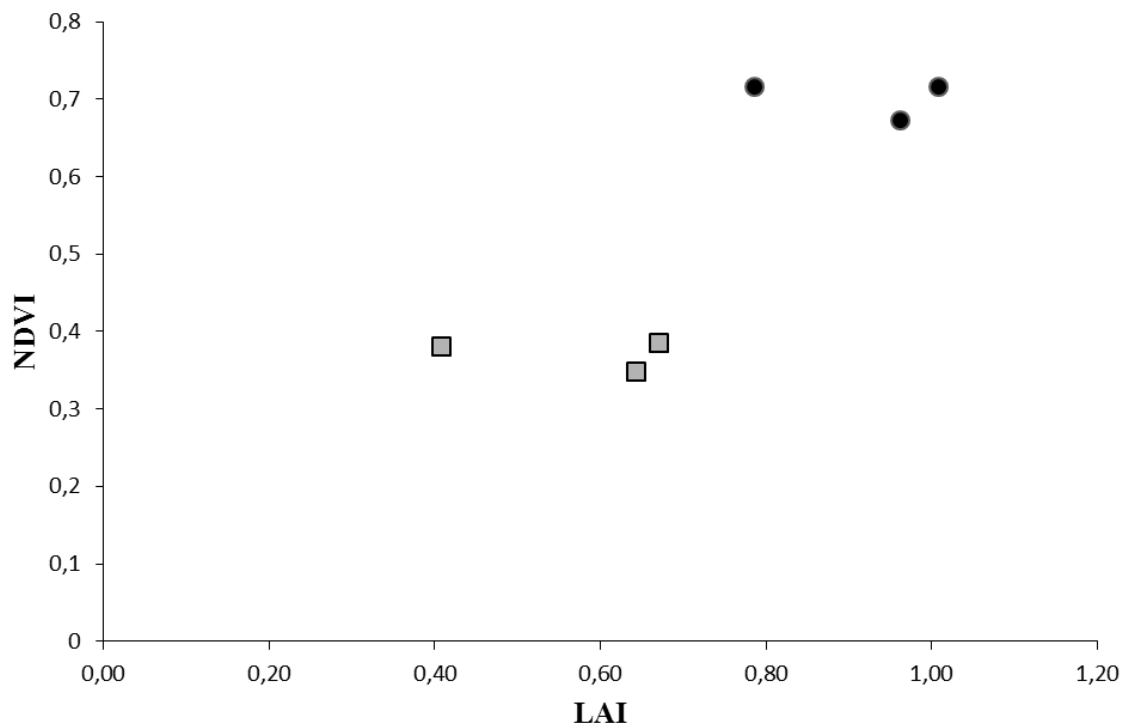


Slika 15: Indeks NDVI glede na indeks LAI na gojenem travniku v Ljubljani. Krogci: 1. košnja (134. dan v letu); kvadratki: 1. košnja (156. dan v letu); trikotniki: 2. košnja (183. dan v letu); križci: 3. košnja (240. dan v letu); zvezdice: 4. košnja (296. dan v letu)

4.4.2 Ekstenzivni travnik – Podgorski kras

Na sliki 16 so prikazane izmerjene vrednosti indeksa NDVI glede na izmerjene vrednosti indeksa LAI na parcelah, ki niso bile požgane. Korelacijska analiza je pokazala, da linearna povezanost med spremenljivkama ne obstaja ($p = 0,7962$).

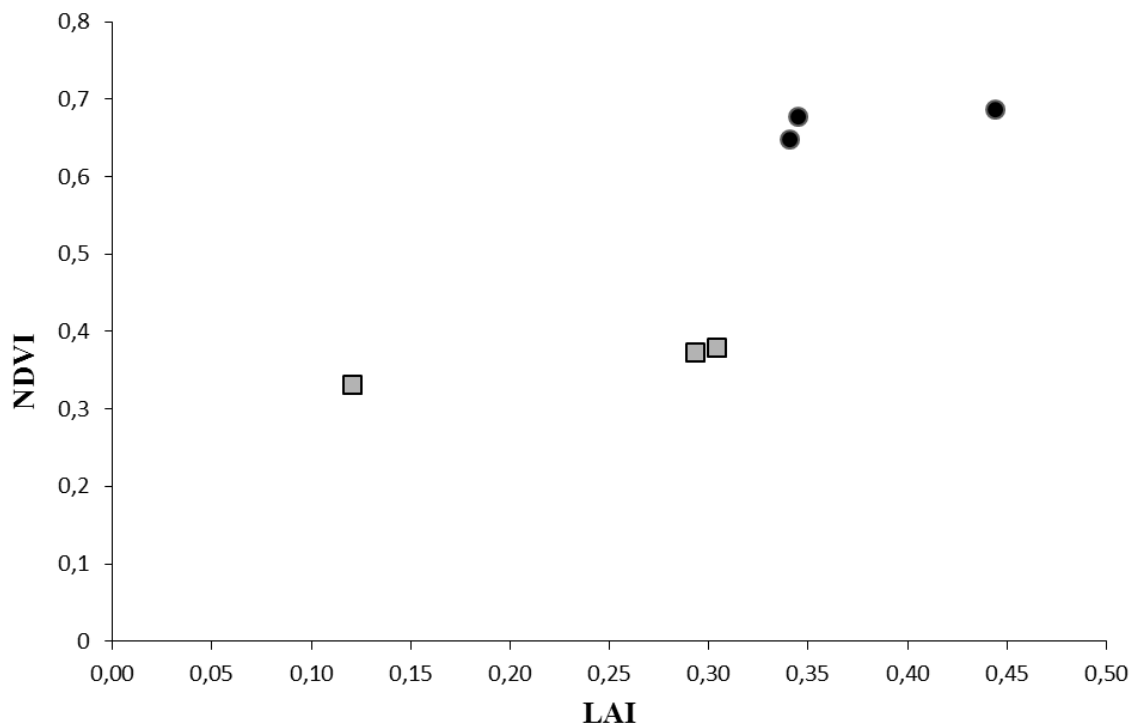
Najvišje vrednosti indeksa NDVI (0,6 do 0,8) in indeksa LAI (0,8 do 1,1) so bile izmerjene 28. maja (148. dan v letu), najnižje vrednosti obeh indeksov pa 22. avgusta 2013 (234. dan v letu), ko se je NDVI gibal med 0,3 in 0,4, indeks LAI pa med 0,4 in 0,8.



Slika 16: Indeks NDVI glede na indeks LAI na nepožganih poskusnih ploskvah ekstenzivnega pašnika na Podgorskem krasu. Krogci: 148. dan v letu; kvadratki: 234. dan v letu

Na sliki 17 so prikazane izmerjene vrednosti indeksa NDVI glede na izmerjene vrednosti indeksa LAI na požganih parcelah. Korelacijska analiza je pokazala, da linearna povezanost med spremenljivkama ne obstaja ($p = 0,2228$).

Tako kot pri nepožgani travni ruši so bile tudi tukaj vrednosti obeh merjenih indeksov največje 28. maja (148. dan v letu) in najmanjše 22. avgusta 2013 (234. dan v letu). Vrednosti indeksa NDVI so bile v obeh terminih približno enake kot na nepožganih parcelah, vrednost indeksa LAI pa so bile v obeh terminih merjenja nekoliko nižje kot na nepožganih parcelah, saj največje vrednosti LAI niso presegle 0,5.



Slika 17: Indeks NDVI glede na indeks LAI na požganih poskusnih ploskvah ekstenzivnega pašnika na Podgorskem krasu. Krogci: 148. dan v letu; kvadratki: 234. dan v letu

5 RAZPRAVA IN SKLEPI

5.1 RAZPRAVA

5.1.1 Produkcija biomase

Produkcija biomase na traviščih je odvisna predvsem od podnebnih oziroma vremenskih razmer. Poleg teh pa na produkcijo biomase močno vplivajo tudi globina in tekstura tal, pogostost rabe (košnja, paša) in gnojenje (Leskovšek, 2013).

Na poskusni ploskvi gojenega travnika Travistor je bila najmanjša povprečna količina biomase izmerjena na merjenih parcelah, ki niso bile gnojene (kontrola). Kontrolni sledijo parcele, ki so bile gnojene z gnojevko, parcele, ki so bile gnojene s PK in parcele, ki so bile gnojene z gnojevko + N₁₂₀PK. Največja povprečna količina biomase pa je bila izmerjena na parcelah, gnojenih z N₂₂₀PK. Če izvzamemo kontrolo, ki je negnojena, smo najmanjšo količino biomase izmerili na parcelah gnojenih z gnojevko. Podobne rezultate je na istem poskusu v predhodnih sezonah zabeležila tudi Leskovšek (2013), ki pojasnjuje, da je gnojevka vsebovala precej majhne vrednosti hranil.

Največja produkcija biomase je bila izmerjena pri obravnavanjih, v katerih je bilo vključeno gnojenje z mineralnimi oblikami dušika, kar je skladno z ugotovitvijo, ki jo navaja Leskovšek (2013). Največjo povprečno količino vzorčene biomase smo enako kot Leskovšek (2013) izmerili ob 1. košnji, le da so bile naše izmerjene vrednosti nekoliko večje in sicer so se gibale od 2,17 kg / 10 m² pri 4-kosni rabi brez gnojenja do 6,14 kg / 10 m² pri 2-kosni rabi in gnojenju z gnojevko + N₁₂₀PK.

Leskovšek (2013) navaja, da količina biomase z vsako naslednjo košnjo upada, kar je skladno z zakonitostjo sezonske rasti travinja (Persons, 1988).

Največja povprečna količina biomase je bila izmerjena meseca maja (prva košnja), ko je travna ruša v vrhu svoje rasti. Leskovšek (2013) v svoji raziskavi na poskusu Travistor navaja nekoliko manjše vrednosti biomase ob prvi košnji v primerjavi z našimi, kar je moč pripisati manjši količini padavin v rastni dobi 2011.

Ob tretji košnji smo izmerili precej majhne vrednosti vseh spremljanih parametrov, kar lahko pripišemo poteku sezonske rasti travne ruše. Poleti in jeseni v travi prevladujejo rastlinski poganjki, ki rastejo počasneje kot mladi generativni poganjki, ki v travni ruši prevladujejo spomladi. Spomladanski pridelki so veliko večji, saj travo v tem času sestavljajo skoraj sami mladi generativni poganjki, ki hitro priraščajo (Čop, 2009). Prirast biomase v poletju pogosto omejujejo tudi nezadostne padavine in visoke temperature.

Če primerjamo gojeni travnik in ekstenziven pašnik, in sicer del, ki ni bil podvržen požaru, vidimo, da je bila najmanjša količina suhe biomase na obeh izbranih lokacijah izmerjena v mesecu avgustu, največja pa v mesecu maju.

Izmerjena največja količina suhe biomase je bila na gojenem travniku v Ljubljani za 2 kg/10 m² večja kot izmerjena največja količina suhe biomase na ekstenzivnem pašniku na Podgorskem krasu. Najmanjša količina suhe biomase, ki je bila izmerjena na poskusu Travistor, je bila nekoliko manjša kot 1 kg/10 m². Najmanjša količina biomase izmerjena na nepožganih parcelah na ekstenzivnem pašniku na Podgorskem krasu pa je znašala 2 kg/10 m². Na ekstenzivnem pašniku na Podgorskem krasu je bila skupna (že ob vzorčenju suhi del + zeleni del) količina biomase ob prvem in drugem merjenju enaka (4 kg/10 m²), s to razliko, da je bil ob prvem merjenju delež že ob vzorčenju suhega dela biomase enkrat večji, kot ob drugem merjenju.

Ugotovili smo, da je količina biomase na poskusni ploskvi intenzivnega travnika večja kot količina biomase na poskusni ploskvi ekstenzivnega pašnika na Podgorskem krasu, kar pa je odvisno od pridelovalne zmogljivosti zemljišča, ki je na krasu omejena zaradi pomanjkanja vode v tleh, skromnega gnojenja oziroma majhnih vsebnosti rastlinskih hranil v plitkih ali kamnitih tleh (Vidrih, 2003).

Na prirast travne ruše imajo močan vpliv motnje, kamor med drugim prištevamo tudi požare. Ti so zelo pogosti tudi v kraškem svetu, kjer so potekale naše raziskave. Romanyà in sod. (2001) navajajo, da so požari pomemben dejavnik, ki oblikuje mediteranske pokrajine in njene vegetacijske vzorce (Naveh, 1989; cit. po Romanyà in sod., 2001), ki se zaradi opuščanja rabe prav tako kot Kras kolonizirajo z naravno vegetacijo. Raziskave so pokazale, da požari povečujejo kratkoročno razpoložljivost hranil v tleh (Rundel, 1983, cit. po Romanyà in sod., 2001; Trabaud, 1983, cit. po Romanyà in sod., 2001; Kutiel in Naveh, 1987; cit. po Romanyà in sod., 2001). Ključni dejavnik zmanjševanja izgub hranil iz tal po požaru pa je hitrost ponovne rastlinske kolonizacije.

Iz naših rezultatov je razvidno, da je na ekstenzivnem pašniku na parcelah, ki so bile požgane, količina biomase precej manjša kot pa na nepožganih parcelah, v vseh terminih merjenja. Po požaru pa je količina suhega dela biomase na požganih parcelah precej manjša, kot na nepožganih parcelah. Enako poročajo tudi Romanyà in sod. (2001). Prav tako je bila količina zelenega dela biomase na požganih parcelah manjša, kot na nepožganih, kar je v nasprotju z rezultati, ki jih navajajo Romanyà in sod. (2001), saj posušena vegetacija ob požaru zgori in če so razmere ugodne (predvsem dovolj razpoložljive vode) se lahko na požganih površinah ustvari relativno več zelene biomase kot na nepožganih površinah, saj je na površinah, ki so pogorele, več razpoložljive svetlobe in hranil.

Rezultati tretjega merjenja (22. avgust) kažejo, da je bila količina zelenega dela biomase na požganih parcelah večja (1,02 kg/10 m²), kot na nepožganih (0,73 kg/10 m²). Carilla in sod. (2011) so izvedli poskus na lokaciji s približno enako količino padavin kot na Krasu (1300 mm) in ugotovili, da je količina skupne nadzemne biomase značilno večja na nepožganih, kot na požganih ploskvah v vseh terminih izvajanja meritev. Enako so pokazali naši rezultati. Povprečna količina skupne biomase na nepožganih parcelah je bila trikrat večja kot na požganih parcelah, Carilla in sod. (2011) pa poročajo, da je količina skupne biomase na nepožganih parcelah dvakrat večja, kot na požganih.

5.1.2 Vrednosti indeksa LAI in NDVI

Obseg listne površine, ki jo vegetacija razvija na dano površino tal se lahko v različnih ekosistemih zelo razlikuje. Največje vrednosti indeksa listne površine dosegajo vedno zeleni gozdovi zmernega podnebnege pasu in tropski gozdovi, sledijo jim mokrišča in listopadni gozdovi, savane, travišča in stepe, tundra in na koncu puščave (Larcher, 2002).

Asner in sod. (2003) v svoji raziskavi navajajo, da največje LAI vrednosti dosegajo nasadi, sledijo jim vednozeleni gozdovi zmernega pasu in mokrišča. Biomi, ki imajo najmanjše vrednosti indeksa LAI, pa so tundra, sledijo ji travišča in puščave.

Največja vrednosti indeksa LAI na poskusni ploskvi gojenega travnika Travistor je 7. Breuer in sod. (2003) poročajo enako za združbo *Arrhenatheretum*, ki je združba znotraj zveze *Arrhenatherion* in kjer poteka intenzivna raba. Poleg tega navajajo, da minimalna izmerjena vrednost indeksa LAI v Evropi na travinju z zmernim podnebjem 0,5, kar se približa vrednostim indeksa LAI, ki smo ga izmerili na poskusni ploskvi ekstenzivnega travnika na Podgorskem krasu (0,1 do 1). Vrednosti indeksa LAI so višje na parcelah, ki niso bile požgane, kot na parcelah, ki smo jih požgali, kar pa je ravno obratno kot so ugotovili Turner in sod. (1999), ki so v raziskavi na območju Konza Prairie Research Natural Area v Kansasu obravnavali vrednosti LAI na požganih in nepožganih parcelah.

Izmerjene vrednosti indeksa NDVI na intenzivnem travniku so se gibale od 0,78 do 0,94, na ekstenzivnem pašniku pa so bile nekoliko nižje, od 0,2 do 0,8. Li in Guo (2012) navajata nekoliko manjši razpon vrednosti indeksa NDVI na polsuhem travinju, in sicer od 0,52 do 0,60. Guo in sod. (2005) navajajo vrednosti indeksa NDVI od 0,36 do 0,50. Prav tako kot v raziskavi, ki so jo opravili Turner in sod. (1999), so tudi naši rezultati pokazali, da so vrednosti indeksa NDVI približno enake tako za požgane, kot za nepožgane parcele na poskusni ploskvi ekstenzivnega pašnika, verjetno zaradi približno enaklega razmerja med zelenim delom in že ob vzorčenju suhim delom biomase, tako na požganih kot na nepožganih parcelah.

5.1.3 Povezave med spremenljivkami

Korelacijska analiza je pokazala statistično značilno linearno povezanost med indeksom LAI in biomaso, tako na poskusni ploskvi gojenega travnika ($r = 0,83$), kot na poskusni ploskvi ekstenzivnega pašnika ($r = 0,83$). Močno povezanost med LAI in biomaso ($r = 0,773$) navajajo tudi Guo in sod. (2005). Guo in sod. (2005) navajajo tudi, da korelacijska analiza ni pokazala statistično značilne povezave med indeksom NDVI in biomaso. Naši rezultati korelacijske analize so pokazali enako, vendar samo pri povezavi med NDVI in biomaso na poskusni ploskvi intenzivnega travnika Travistor, ne pa tudi ne ekstenzivnem pašniku, kjer je bila linearna povezanost, tako med NDVI in posušeno zeleno biomaso, kot tudi med NDVI in prvotno suho biomaso, statistično značilna. Linearna povezanost med NDVI in posušeno zeleno biomaso ($r = 0,92$) je boljše kot povezanost med NDVI in prvotno suho biomaso ($r = 0,89$), kar je logično, saj merilni instrument za merjenje indeksa

NDVI vrednosti preračuna na podlagi svetlobe, ki se odbije od zelenih delov rastlinskega pokrova.

Korelacijska analiza za spremenljivki NDVI in LAI je pokazala, da enostavne linearne povezanosti med indeksoma ni, in sicer na obeh izbranih lokacijah. Vseeno pa smo potrdili hipotezo, ki pravi, da bo povezava med indeksoma boljša na gojenem travniku, kot na ekstenzivnem pašniku, saj je na slednjem manjša količina biomase oziroma manj suhe snovi. Rezultati nakazujejo odvisnost obeh parametrov, ki pa se razlikuje za velikostno območje LAI nad ali pod 2. Povezanost obeh parametrov bi bilo potrebno preveriti z nelinearnimi modeli ali pa s segmentno linearno regresijo.

Med meritvami indeksa LAI in indeksa NDVI obstaja ključna razlika. Pri merjenju indeksa LAI dejansko merimo koliko svetlobe pride skozi rastlinsko odejo, saj merilnik za izračun vrednosti LAI potrebuje posnetek nad in pod rastlinsko odejo. Pri merjenju indeksa NDVI pa merilni instrument vrednost NDVI preračuna na podlagi svetlobe, ki se odbije od vegetacije. To pojasni rezultate na ekstenzivnem pašniku na Podgorskem krasu, ki so pokazali, da če indeks NDVI primerjamo samo z zelenim delom biomase dobimo boljše povezanost ($r = 0,92$), kot če indeks NDVI primerjamo s suhim delom biomase ($r = 0,89$). Suhi oziroma odmrli del biomase odbija svetlobo, ki jo merilnik indeksa NDVI zazna kot svetlobo, ki jo reflektirajo gola tla, ne pa zeleni deli vegetacije.

5.2 SKLEPI

Iz opravljene raziskave smo ugotovili, da je količina biomase na gojenem travniku mnogo večja, kot na ekstenzivnem pašniku na Podgorskem krasu. Ugotovili smo, da je bila količina biomase na nepožganih poskusnih parcelah Podgorskega krasa večja, kot na tistih, ki so bile požgane pomladi istega leta.

Z raziskavo smo potrdili tudi postavljeno hipotezo, da bodo vrednosti indeksa LAI na ekstenzivnem pašniku manjše kot na intenzivnem travniku, saj je na slednjem travna ruša gostejša in višje rasti, zaradi boljših rastnih razmer in intenzivnejše pridelave travniške krme.

Domnevali smo, da bo merjeni indeks NDVI zajemal nizke pozitivne vrednosti od 0,2 do 0,4, kar literatura navaja kot običajne vrednosti za omenjeni indeks na travinju. Postavljena hipoteza je zavrnjena, saj so naše izmerjene vrednosti indeksa NDVI precej večje od navedenih v literaturi.

Na ekstenzivnem pašniku smo ugotovili boljše povezanost indeksa NDVI in zelene biomase, kot pa indeksa NDVI in skupne biomase oziroma indeksa NDVI in že ob vzorčenju suhe biomase, to pa zaradi tega, ker merilni instrument vrednost NDVI preračuna na podlagi svetlobe, ki se odbije od zelene vegetacije. Ugotovili smo, da je indeks NDVI dobro merilo za delež zelene vegetacije, ter s tem tudi za vrednotenje regeneracije vegetacije po požaru.

Dokazali smo, da med parametroma LAI in biomaso obstaja visoka stopnja linearne povezanosti na obeh izbranih lokacijah. Linearna povezava med indeksom NDVI in biomaso je statistično značilna na ekstenzivnem pašniku, ne pa tudi na intenzivnem travniku.

Med parametroma NDVI in LAI nismo dokazali enostavne linearne povezave, oba pa sta se pokazala kot uporabna za vrednotenje vegetacije na traviščih.

6 POVZETEK

V letu 2013 smo izvedli raziskavo v kateri smo ocenili sezonski prirast biomase na ekstenzivnem pašniku in oskrbovanem travniku s pomočjo treh izbranih parametrov: LAI, NDVI in direktnim merjenjem zelene biomase. Skozi vegetacijsko dobo smo v različnih terminih opravljali meritve indeksa listne površine, indeksa NDVI ter ob enem vzorčili in tehtali zeleno biomaso. Predpostavili smo, da bodo izmerjene vrednosti indeksa LAI na ekstenzivnem pašniku manjše kot na oskrbovanem travniku, saj je na slednjem travna ruša gostejša ter višje rasti, zaradi gnojenja in ustreznega režima košnje. Domnevali smo, da bo med merjenimi parametri visoka stopnja povezanosti in da bo povezava med LAI in NDVI boljša na gojenem travniku kot na ekstenzivnem pašniku.

Meritve izbranih parametrov smo opravljali na dveh lokacijah. Gojeni travnik se nahaja na poskusnem polju Biotehniške fakultete v Ljubljani, ekstenzivni pašnik pa je lociran na raziskovalni ploskvi na planoti Podgorskega krasa v Submediteranski regiji na jugozahodu Slovenije. Travniški poskus v Ljubljani je zasnovan v obliki deljenk (split-plot) z dvanajstimi obravnavanji v 4 ponovitvah. Glavne parcele predstavljajo tri načine rabe in sicer 2-kosno rabo, 4-kosno rabo s prvo pozno košnjo vsako 3. leto in 4-kosno rabo; podparcele pa štiri ravni gnojenja (PK, N₂₂₀PK, gnojevka, gnojevka+N₁₂₀PK). Na raziskovalni ploskvi na Podgorskem krasu smo meritve izvajali na treh parih parcel (požgano-kontrola), velikosti 5×5 m.

Meritve indeksa listne površine smo opravljali s ceptometrom LAI-2200 (LiCor, ZDA), meritve indeksa NDVI pa smo na istih mestih merili z multispektralnim radiometrom MSR87 povezanim z DLC 2000 (CROPSCAN Inc.). Na obeh lokacijah smo poleg meritev dveh indeksov, vzorčili zeleno biomaso, ki je bila nato uporabljena za potrebe laboratorijskih analiz.

Poskus je pokazal, da je količina biomase na poskusni ploskvi oskrbovanega travnika večja kot biomaso na poskusni ploskvi ekstenzivnega pašnika na Podgorskem krasu. Pridelovalna sposobnost na ekstenzivnem pašniku je precej manjša kot na oskrbovanem travniku, zaradi pomanjkanja vode v tleh in majhnih vsebnosti rastlinskih hranil v kamnitih in plitvih tleh.

S korelacijsko analizo smo dokazali statistično značilno linearno povezanost med indeksom listne površine in biomaso na obeh lokacijah. Povezava med indeksom NDVI in biomaso je bila statistično značilna le na ekstenzivnem pašniku, ne pa tudi na gojenem travniku, kjer linearne povezave med parametroma ni bilo. Med indeksoma NDVI in LAI nismo dokazali enostavne linearne povezave na nobeni izmed lokacij, čeprav rezultati nakazujejo odvisnost obeh parametrov. Ugotovili smo, da bi bilo potrebno povezanost obeh parametrov preveriti z nelinearnimi modeli ali pa s segmentno linearno regresijo.

7 VIRI

- Atlas of the biosphere. Net primary production. 2002. Center for Sustainability and the Global Environment, University of Wisconsin, Madison.
<http://www.sage.wisc.edu> (5. jan. 2014)
- ARSO: Agencija Republike Slovenije za okolje. Ljubljana, Ministrstvo za kmetijstvo in okolje.
<http://www.arso.gov.si/> (6. jan. 2014)
- Asner G. P., Scurlock J. M. O., Hicke J. A. 2003. Global synthesis of leaf area index observations: implications for ecological and remote sensing studies. *Global Ecology & Biogeography*, 12: 191-205
- Bréda N. J. J. 2003. Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. *Journal of Experimental Botany*, 54, 392: 2403-2417
- Breuer L., Eckhardt K., Frede H.-G. 2003. Plant parameter values for models in temperate climates. *Ecological Modelling*, 169: 237-293
- Butler L. D., Cropper J. B., Johnson R. H., Norman A. J., Peacock G. L., Shaver P. L., Spaeth K. E. 2003. Methods of determining production and composition. V: National range and pasture handbook. Chapter 4: Inventorying and monitoring grazing land resources: 3-7.
<http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/national/landuse/rangepasture/?cid=stelprdb1043084> (5. jan. 2014)
- Carilla J., Aragón R., Gurvich D. E. 2011. Fire and grazing differentially affect aerial biomass and species composition in Andean grasslands. *Acta Oecologica*, 37: 337-345
- Čop J. 2009. Evolucijska prilagoditev rasti trave na defoliacijo in njen pomen za travništvo. *Naše travinje, revija društva za gospodarjenje na travinju Slovenije*, 5, 1: 8-9
- Direct measures of biomass. 2009. University of Idaho, College of Natural Resources.
http://www.webpages.uidaho.edu/veg_measure/Modules/Lessons/Module%207%28Biomass&Utilization%29/7_3_Direct%20Methods.htm (7. jan. 2014)
- Fan L., Gao Y., Bruch H., Bernhofer C. 2009. Investigating the relationship between NDVI and LAI in semiarid grassland in Inner Mongolia using in-situ measurements. *Theoretical and Applied Climatology*, 95: 151-156
- Ferlan M., Alberti G., Eler K., Batič F., Peresotti A., Miglietta F., Zaldei A., Simončič P., Vodnik D. 2011. Comparing carbon fluxes between different stages of secondary succession of a karst grassland. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 140: 199-

207

- Frank A. B., Karn J. F. 2003. Vegetation indices, CO₂ flux, and biomass for Northern Plains Grasslands. *Journal of Range Management*, 56, 4: 382-387
- Gill R. A., Kelly R. H., Parton W. J., Day K. A., Jackson R. B., Morgan J. A., Scurlock J. M., Tieszen L. L., Castle J. V., Ojima D. S., Zhang X. S. 2002. Using simple environmental variables to estimate belowground productivity in grasslands. *Global Ecology & Biogeography*, 11: 79-86
- Glenn P.E., Huete R.A., Nagler L.P., Nelson G.S. 2008. Relationship between remotely-sensed vegetation indices, canopy attributes and plant physiological processes: what vegetation indices can and cannot tell us about the landscape. *Sensors*, 8: 2136-2160
- Guo X., Zhang C., Wilmshurst J. F., Sissons R. 2005. Monitoring grassland health with remote sensing approaches. V: *Prairie perspectives: geographical essays*. Vol. 8. Bram F. Noble, Diane J.F. Martz, Alec E. Aitken (eds.). Saskatchewan, University of Saskatchewan: 11-22
<http://pcag.uwinnipeg.ca/prairie-perspectives.html> (2. feb. 2014)
- He Y., Guo X., Wilmshurst J. F. 2007. Comparison of different methods for measuring leaf area index in a mixed grassland. *Canadian Journal of Plant Science*, 87: 803-81
- Jackson R. B., Canadell J., Ehleringer J. R., Mooney H. A., Sala O. E., Schulze E. D. 1996. A global analysis of root distributions for terrestrial biomes. *Oecologia*, 108: 389-411
- Larcher W. 2002. *Physiological plant ecology. Ecophysiology and stress physiology of functional groups*. 4th. ed. Berlin, Springer: 506 str.
- Leskovšek A. 2013. Zgodnji vpliv sistemov pridelovanja travniške krme na floristično sestavo in pridelek travne ruše. Diplomsko delo. Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo: 40 str.
- Li Z., Guo X. 2012. A suitable NDVI product for monitoring spatiotemporal variations of LAI in semiarid mixed grassland. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 38, 6: 683-694
- Luo W., Jiang Y., Lü X., Wang X., Li M-H., Bai E., Han X., Xu Z. 2013. Patterns of plant biomass allocation in temperate grasslands across a 2500-km transect in Northern China. *PLoS ONE*, 8, 8: e71749, doi: 10.1371/journal.pone.0071749
- Persons A. J. 1988. The effects of season and management on the growth of grass swards. V: *Seasonal production. The grass crop. The physiological basis of production*. Netherlands, Springer: 129-177

- Romanyà J., Casals P., Vallejo V. R. 2001. Short-term effects of fire on soil nitrogen availability in Mediterranean grasslands and shrublands growing in old fields. *Forest Ecology and Management*, 147: 39-53
- Römermann M., Römermann C., Sperlich S., Schmidt W. 2011. Explaining grassland biomass – the contribution of climate, species and functional diversity depends on fertilization and mowing frequency. *Journal of Applied Ecology*, 48: 1088-1097
- Scurlock J. M. O., Asner G. P., Gower S. T. 2001. Worldwide historical estimates of leaf area index, 1932 – 2000. Oak Ridge National Laboratory. Managed by ut-battelle for the department of energy. ORNL/TM-2001/268
<http://www.osti.gov/bridge> (7. jan. 2014)
- Todd S.W., Hoffer R.M., Milchunas D.G. 1998. Biomass estimation on grazed and ungrazed rangelands using spectral indices. *International Journal of Remote Sensing*, 19, 3: 427-438
- Turner D. P., Cohen W. B., Kennedy R. E., Fassnacht K. S., Briggs J. M. 1999. Relationships between leaf area index and Landsat TM spectral vegetation indices across three temperate zone sites. *Remote Sensing Environment*, 70: 52-68
- Vidrih M. 2003. Botanična sestava in proizvodnost ruše kraških pašnikov ob različnih načinih nadzorovane paše. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, oddelek za agronomijo: 99 str.
- Vončina A., Ferlan M., Eler K., Batič F., Vodnik D. 2014. Effects of fire on carbon fluxes of a calcareous grassland. *International Journal of Wildland Fire*, 23, 3: 425-434
<http://dx.doi.org/10.1071/WF12195> (20. jun. 2014)
- WenHong M., Yang Y., He J., Zeng H., Fang J. 2008. Above- and belowground biomass in relation to environmental factors in temperate grasslands, Inner Mongolia. *Science in China Series C: Life Science*, 51, 3: 263-270
- Wong K. 2013. Remote sensing of tall grasslands: Estimating vegetation biochemical contents at multiple spatial scales and investigating vegetation temporal response to climate conditions. A thesis submitted in conformity with the requirements for the degree of Masters of Science. Toronto, University of Toronto, Department of Geography: 67 str.
- Zhang C. 2005. The evaluation of broadband vegetation indices on monitoring northern mixed grassland. V: *Prairie perspectives: geographical essays*. Vol. 8. Bram F. Noble, Diane J.F. Martz, Alec E. Aitken (eds.). Saskatchewan, University of Saskatchewan: 23-36
<http://pcag.uwinnipeg.ca/prairie-perspectives.html> (2. feb. 2014)

ZAHVALA

Najprej se iskreno zahvaljujem mentorju prof. dr. Dominiku Vodniku za vse napotke, nasvete, podporo in pomoč pri pisanju magistrskega dela.

Somentorju doc. dr. Juretu Čopu in recenzentu doc. dr. Mateju Vidrihu se zahvaljujem za natančnost in vestnost pri pregledovanju in popravljanju magistrskega dela.

Zahvaljujem se Andreju Vončina univ. dipl. ing. agr. za pomoč, sodelovanje in praktične nasvete pri izvedbi meritev.

Hvala Jaku, ki me je med pisanjem magistrskega dela spodbujal, polnil s pozitivno energijo in verjel, da mi bo uspelo, tudi takrat, ko ni bilo najlažje.

Največja zahvala pa gre moji mami, ki me je v času študija vseskozi spodbujala, mi pomagala, me podpirala in mi vedno stala ob strani.