

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA

Tanja MENEGALIJA

**VPLIV SOLJENJA CEST NA SMREKO (*Picea abies* (L.)
Karsten) V OBCESTNEM PROSTORU NA POKLJUKI**

MAGISTRSKO DELO

Ljubljana, 2015

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA

Tanja MENEGALIJA

**VPLIV SOLJENJA CEST NA SMREKO (*Picea abies* (L.) Karsten) V
OBCESTNEM PROSTORU NA POKLJUKI**

MAGISTRSKO DELO

**EFFECTS OF DE-ICING SALT ON NORWAY SPRUCE (*Picea abies* (L.)
Karsten) IN THE ROAD-SIDE AREA ON POKLJUKA**

M.SC. THESIS

Ljubljana, 2015

Magistrsko delo je zaključek podiplomskega študija Varstvo okolja na Oddelku za biologijo Biotehniške fakultete, Univerze v Ljubljani. Praktično delo je bilo opravljeno v laboratorijih Katedre za ekologijo in varstvo okolja na Oddelku za biologijo, BF.

Na podlagi Statuta Univerze v Ljubljani ter po sklepu Senata Biotehniške fakultete z dne, 24. 2. 2014, je bilo potrjeno, da kandidatka izpolnjuje pogoje za magistrski Univerzitetni podiplomski študij Varstva okolja ter opravljanje magisterija znanosti. Za mentorja je bil imenovan doc. dr. Igor Zelnik.

Komisija za oceno in zagovor:

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

Član: doc. dr. Igor Zelnik
Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za biologijo

Članica: prof. dr. Alenka Gaberščik
Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za biologijo

Datum zagovora: 24. 2. 2015

Podpisana izjavljam, da je magistrsko delo rezultat lastnega raziskovalnega dela. Izjavljam, da je elektronski izvod identičen tiskanemu. Na univerzo neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravici shranitve avtorskega dela v elektronski obliki in reproduciranja ter pravico omogočanja javnega dostopa do avtorskega dela na svetovnem spletu preko Digitalne knjižnice Biotehniške fakultete.

Tanja Menegalija

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD	Md
DK	GDK 424.4:174.7(497.4)(043.2)=163.6
KG	soljenje cest/smreka/poškodbe rastlin/natrij/Pokljuka
AV	MENEGALIJA, Tanja, univ. dipl. biologinja
SA	ZELNIK, Igor (mentor)
KZ	SI-1000 Ljubljana, Večna pot 111
ZA	Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta
LI	2015
IN	VPLIV SOLJENJA CEST NA SMREKO (<i>Picea abies</i> (L.) Karsten) V OBCESTNEM PROSTORU NA POKLJUKI
TD	Magistrsko delo
OP	XI, 60 str., 6 pregl., 28 sl., 2 pril., 84 vir.
IJ	sl
JI	sl/en
AI	Soljenje cest vpliva na kemijske lastnosti tal in posledično na fiziološke parametre in rast rastlin v obcestnem prostoru. Vpliv soljenja smo preučevali na območju Pokljuke (Triglavski narodni park), kjer smo izbrali vzorčna mesta, ki so ob intenzivno soljenem cestnem odseku in referenčno mesto brez tega vpliva. Meritve rasti rastlin in fizioloških parametrov smo opravili na smreki (<i>Picea abies</i> (L.) Karsten). V letih 2009 in 2010 smo izmerili naslednje parametre: fotokemično učinkovitost FS II, vodni potencial, transpiracijo, vsebnost klorofila <i>a</i> in <i>b</i> ter kationov (Na^+, K^+, Ca^{2+} in Mg^{2+}) v iglicah. Na teh vzorčnih mestih smo odvzeli vzorce tal in snega. Analizirali smo kemijske parametre in sicer, električno prevodnost, vsebnost bazičnih kationov, oziroma kationsko izmenjalno kapaciteto (Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^+, Na^+). Analize so pokazale bistveno večje vsebnosti Na^+ v snegu ter v tleh v spomladanskem obdobju. Statistično značilne razlike med soljenimi in nesoljenimi rastišči so se pokazale v ksilemskem vodnem potencialu, kot tudi v biomasi poganjkov. Za vzorčno mesto V1s, kjer so tla plitvejša, smo pri večjem številu fizioloških parametrov izračunali statistično značilne razlike z referenčnim rastiščem (V6ns), saj so razmere tam za rast smreke manj ugodne, vpliv soljenja pa se zaradi manjše kapacitete tal za vodo prej odrazi. V letu 2013, po zimi, ko je bilo porabljeno največ soli, je bila prirast rastlin statistično značilno manjša na obeh soljenih lokacijah, v primerjavi z nesoljeno.

KEY WORDS DOCUMENTATION

DN Md
DC FDC 424.4:174.7(497.4)(043.2)=163.6
CX de-icing salt/Norway spruce/plant damage/sodium/Pokljuka
AU MENEGALIJA, Tanja, univ. dipl. biologinja
AA ZELNIK, Igor (mentor)
PP SI-1000 Ljubljana, Večna pot 111
PB University of Ljubljana, Biotechnical Faculty
PY 2015
TI EFFECTS OF DE-ICING SALT ON NORWAY SPRUCE (*Picea abies* (L.) Karsten)
IN THE ROAD-SIDE AREA ON POKLJUKA
DT M.Sc. Thesis
NO XI, 60 p., 6 tab., 28 fig., 2 ann., 84 ref.
LA sl
AL sl/en

AB Application of de-icing salt affects the chemical properties of the soil, and consequently the growth and physiology of the plants in the road-side areas. Effects of de-icing salt applied for road maintenance was studied in the area of Pokljuka (Triglav National Park), where a reference site without the impact and two sites exposed to intensive use of de-icing salt were selected. Plant growth rate and selected physiological parameters were measured on Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karsten). The following parameters were measured in the years 2009 and 2010: photochemical efficiency of photosystem II (PS II), water potential, transpiration, the content of chlorophyll *a* and *b* and the cations (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} and Mg^{2+}) in the needles. In these sites, soil and snow samples were taken for further analyses, where the chemical parameters, namely, the electrical conductivity, and the cation exchange capacity (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+) were measured. Analyses showed significantly higher levels of Na^+ in the snow and in the soil in the spring samples. Statistically significant differences between salted and unsalted sites were calculated in case of plant water potential, as well as in the biomass of shoots. In the site V1s, where the soil is shallower, most of physiological parameters showed statistically significant differences in comparison with the reference site (V6ns). Most probably, due to less favourable growth conditions and lower water capacity of those soils, the effects of de-icing salt are more pronounced. In the year 2013, after the winter, when the highest amount of salt was applied, the growth of plants was significantly lower at both salted sites, in comparison with the unsalted, reference site.

KAZALO VSEBINE

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA	III
KEY WORDS DOCUMENTATION	IV
KAZALO VSEBINE	V
KAZALO PREGLEDNIC	VII
KAZALO SLIK	VIII
KAZALO PRILOG	XI
1 UVOD.....	1
1.1 OPREDELITEV RAZISKOVALNEGA PROBLEMA.....	1
1.2 RAZISKOVALNE HIPOTEZE	2
1.3 PRIČAKOVANI REZULTATI IN POMEN ZA ZNANOST	2
2 PREGLED OBJAV.....	3
2.1 VPLIV SOLJENJA NA OKOLJE.....	3
2.1.1 Vpliv soljenja na vegetacijo	4
2.1.2 Vpliv na tla	10
2.1.3 Vpliv na vodne ekosisteme.....	11
2.2 VRSTE IN KOLIČINE UPORABLJENIH POSIPNIH SREDSTEV	12
3 MATERIALI IN METODE.....	16
3.1 OPIS RAZISKOVALNEGA OBMOČJA.....	16
3.2 VZORČNA MESTA	19
3.3 MERITVE IN ANALIZE	21
3.3.1 Vzorčenje in kemijske analize tal ter snega	21
3.3.2 Fiziološke meritve.....	22
3.3.2.1 Vodni potencial	22
3.3.2.2 Fotokemična učinkovitost	23
3.3.2.3 Transpiracija	24
3.3.2.4 Analiza vsebnosti fotosinteznih pigmentov	24
3.3.2.5 Analiza vsebnosti ionov v iglicah	25
3.3.2.6 Merjenje biomase	25
3.3.2.7 Statistične analize.....	26
4 REZULTATI.....	27
4.1 KEMIJSKE ANALIZE TAL TER SNEGA	27
4.2 VSEBNOST IONOV V IGLICAH	31
4.3 FIZIOLOŠKE MERITVE	33
4.3.1 Vodni potencial.....	33

4.3.2	Fotokemična učinkovitost	34
4.3.3	Transpiracija	36
4.4	VSEBNOST FOTOSINTEZNIH BARVIL	38
4.5	BIOMASA	40
5	RAZPRAVA IN SKLEPI	44
5.1	RAZPRAVA	44
5.2	SKLEPI	50
6	POVZETEK (SUMMARY)	51
7	VIRI	55
	ZAHVALA	
	PRILOGE	

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Relativna občutljivost halofobnih dreves in grmov na slana tla in slani prš (Larcher, 2003: 345).....	7
Preglednica 2: Razredi tal glede na izmerjeno električno prevodnost po metodi saturiranega vzorca tal (Rowell, 1994: 132).	11
Preglednica 3: Skupna poraba posipnih materialov za ceste v upravljanju DRSC od 1995/1996 do 2007/2008 (Zimsko vzdrževanje cest, 2008: 5).	14
Preglednica 4: Poraba posipnih sredstev na Pokljuki na odseku Mrzli studenec-Rudno polje od 2008 do 2014 (Poljanec, 2014).	15
Preglednica 5: Opis vzorčnih mest, natančna lokacija in opravljene meritve na posameznem mestu.	19
Preglednica 6: Vsebnost ionov (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} in Mg^{2+}) v iglicah (povprečje $\pm$ SD, T-test, $*p<0,05$) (ST=suha teža).	32

KAZALO SLIK

Slika 1: Vplivi posipanja cestišč s soljo na okolje (National Research Council (U.S.) & Committee on the Comparative Costs of Rock Salt and Calcium Magnesium Acetate (CMA) for Highway Deicing, 1991: 165)	4
Slika 2: Poškodbe iglic na smreki zaradi vpliva soljenja.	9
Slika 3: Vidne poškodbe smrek ob cesti Mrzli studenec-Rudno polje.	10
Slika 4: Količina padavin na merilni postaji Rudno polje v letih 2009 in 2010 (Arhiv meteoroloških podatkov, 2011).	17
Slika 5: Količina padavin na merilni postaji Rudno polje v letih 2009 in 2010, 3 tedne pred posamezno meritvijo fizioloških parametrov (Arhiv meteoroloških podatkov, 2011).	17
Slika 6: Karta lokacij vzorčnih mest.	20
Slika 7: Vzorčno mesto V3s.	21
Slika 8: Merjenje vodnega potenciala rastlin.	23
Slika 9: Primerjava vsebnosti K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} in Na^+ ter elektroprevodnosti v tleh na nesoljenih in soljenih vzorčnih mestih (4 m) v spomladanskem in jesenskem času (T-test, povprečje $\pm SD$, * - $p < 0,05$).	28
Slika 10: Primerjava vsebnosti K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} in Na^+ ter elektroprevodnosti v tleh na soljenih vzorčnih mestih v spomladanskem in jesenskem času na različnih oddaljenostih od ceste (4m, 10 m, 25 m in 50 m).	29
Slika 11: Primerjava vsebnosti K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} in Na^+ v snegu odvzetem 26. 5. 2009 na nesoljenih in soljenih vzorčnih mestih (4m).	30
Slika 12: Vsebnost Na^+ , K^+ , Ca^{2+} in Mg^{2+} v iglicah smreke na soljenih in nesoljenih vzorčnih mestih (T-test, * $p < 0,05$).	31
Slika 13: Vsebnost Na^+ , K^+ , Ca^{2+} in Mg^{2+} v enoletnih in dvoletnih iglicah smreke na soljenih in nesoljenih vzorčnih mestih (T-test, * $p < 0,05$).	32
Slika 14: Vodni potencial (Ψ_w) na treh vzorčnih mestih (4m) (povprečje $\pm SD$, $n=15$). Enosmerna ANOVA, Scheffe <i>post-hoc</i> test. Različne črke označujejo statistično značilno razliko pri $p < 0,05$ med ploskvami znotraj istega datuma (a in b, pri čemer je najmanjša vrednost označena z »a«).	33
Slika 15: Potencialna fotokemična učinkovitost PS2 (F_v/F_m) na treh vzorčnih mestih (4m) (povprečje $\pm SD$, $n=45$). Enosmerna ANOVA, Scheffe <i>post-hoc</i> test. Različne črke označujejo statistično značilno razliko pri $p < 0,05$ med ploskvami znotraj istega datuma (a in b, pri čemer je največja vrednost označena z »a«).	34
Slika 16: Potencialna fotokemična učinkovitost PS2 (F_v/F_m) na treh vzorčnih mestih različno oddaljenih od ceste (4m, 10m, 25m) (povprečje $\pm SD$, $n=45$). Enosmerna ANOVA, Scheffe	

post-hoc test. Različne črke označujejo statistično značilno razliko pri $p < 0,05$ med ploskvami znotraj istega datuma (a in b, pri čemer je največja vrednost označena z »a«). 35

Slika 17: Dejanska fotokemična učinkovitost PSII na treh vzorčnih mestih (4m) (povprečje $\pm$ SD, $n=45$). Enosmerna ANOVA, Scheffe *post-hoc* test. Različne črke označujejo statistično značilno razliko pri $p < 0,05$ med ploskvami znotraj istega datuma (a, b in c, pri čemer je največja vrednost označena z »a«). 36

Slika 18: Transpiracija na treh vzorčnih mestih (4 m) (povprečje $\pm$ SD, $n=60$). Enosmerna ANOVA, Scheffe *post-hoc* test. Različne črke označujejo statistično značilno razliko pri $p < 0,05$ med ploskvami znotraj istega datuma (a, in b, pri čemer je največja vrednost označena z »a«). 37

Slika 19: Transpiracija na treh vzorčnih mestih različno oddaljenih od ceste (4m, 10m, 25m) (povprečje $\pm$ SD, $n= 60$). Enosmerna ANOVA, Scheffe *post-hoc* test. Različne črke označujejo statistično značilno razliko pri $p < 0,05$ med ploskvami znotraj istega datuma (a in b, pri čemer je največja vrednost označena z »a«). 37

Slika 20: Vsebnost klorofila *a* na treh vzorčnih mestih (4 m) (povprečje $\pm$ SD, $n=45$). Enosmerna ANOVA, Scheffe *post-hoc* test. Različne črke označujejo statistično značilno razliko pri $p < 0,05$ med ploskvami znotraj istega datuma (a, in b, pri čemer je največja vrednost označena z »a«). 38

Slika 21: Vsebnost klorofila *b* na treh vzorčnih mestih (4 m) (povprečje $\pm$ SD, $n=45$). Enosmerna ANOVA, Scheffe *post-hoc* test. Različne črke označujejo statistično značilno razliko pri $p < 0,05$ med ploskvami znotraj istega datuma (a, in b, pri čemer je največja vrednost označena z »a«). 39

Slika 22: Razmerje vsebnosti klorofilov *a/b* na treh vzorčnih mestih (4m) (povprečje $\pm$ SD, $n=45$). Enosmerna ANOVA, Scheffe *post-hoc* test. Različne črke označujejo statistično značilno razliko pri $p < 0,05$ med ploskvami znotraj istega datuma (a, in b, pri čemer je največja vrednost označena z »a«). 39

Slika 23: Vsebnost klorofila *a* in *b* na treh vzorčnih mestih različno oddaljenih od ceste (4m, 10m, 25m) (povprečje $\pm$ SD, $n= 45$). Enosmerna ANOVA, Scheffe *post-hoc* test. Različne črke označujejo statistično značilno razliko pri $p < 0,05$ med ploskvami znotraj istega datuma (a in b, pri čemer je največja vrednost označena z »a«). 40

Slika 24: Primerjava suhe mase vejic in iglic na treh vzorčnih mestih (4 m)(povprečje $\pm$ SD, $n=6$). Enosmerna ANOVA, Scheffe *post-hoc* test. Različne črke označujejo statistično značilno razliko pri $p < 0,05$ med ploskvami znotraj istega leta (a in b, pri čemer je največja vrednost označena z »a«). 41

Slika 25: Primerjava dolžine vejic na treh vzorčnih mestih (4 m) v zadnjih šestih letih (povprečje $\pm$ SD, $n=6$). Enosmerna ANOVA, Scheffe *post-hoc* test. Različne črke označujejo statistično značilno razliko pri $p < 0,05$ med ploskvami znotraj istega leta (a in b, pri čemer je največja vrednost označena z »a«). 41

Slika 26: Primerjava suhe mase vejic in iglic na treh vzorčnih mestih (4 m) v zadnjih šestih letih (povprečje $\pm$ SD, $n=6$). Enosmerna ANOVA, Scheffe *post-hoc* test. Različne črke označujejo statistično značilno razliko pri $p < 0,05$ med ploskvami znotraj istega leta (a in b, pri čemer je največja vrednost označena z »a«). 42

Slika 27: Primerjava suhe mase iglic na treh vzorčnih mestih (4 m) v zadnjih šestih letih (povprečje $\pm$ SD, n=6). Enosmerna ANOVA, Sheffe *post-hoc* test. Različne črke označujejo statistično značilno razliko pri $p < 0,05$ med ploskvami znotraj istega leta (a in b, pri čemer je največja vrednost označena z »a«). 42

Slika 28: Primerjava suhe mase vejic na treh vzorčnih mestih (4 m) v zadnjih šestih letih (povprečje $\pm$ SD, n=6). Enosmerna ANOVA, Sheffe *post-hoc* test. Različne črke označujejo statistično značilno razliko pri $p < 0,05$ med ploskvami znotraj istega leta (a in b, pri čemer je največja vrednost označena z »a«). 43

KAZALO PRILOG

Priloga A: Grafični prikazi preiskovanih parametrov pri katerih nismo ugotovili statističnih razlik.

Priloga B: Povezanost med fiziološkimi parametri (vodni potencial (Ψ_w), potencialna fotokemična učinkovitost FS II (F_v/F_m), dejansko fotokemično učinkovitost FS II (Y), transpiracija (Trans)), vsebnostjo Na^+ v iglicah (Na_{iglice}) in v tleh (Na_{tla}) ter količino padavin v obdobju 3 tednov pred merjenjem (Pad). Dvosmerni Pearsonov test korelacije: nz $p > 0,05$, * $p \leq 0,05$, ** $p \leq 0,01$, *** $p \leq 0,001$.

1 UVOD

1.1 OPREDELITEV RAZISKOVALNEGA PROBLEMA

Uporaba kuhinjske soli (NaCl) za zimsko vzdrževanje cest povzroča različne poškodbe na vegetaciji (Blomqvist, 1998). Sol se s cest spira ali pa se širi po zraku v obliki pršenja, ki ga povzročajo vozila ali veter (Beyschlag in sod., 1992). V rastline tako sol pride posredno preko vode v tleh, ali pa neposredno s pomočjo kapljic raztopine soli, ki se iz zraka usedajo na rastlino.

Zaradi povečane slanosti v rastlini pride do osmotskega in ionskega stresa. Večja količina soli v tleh zmanjša njihov vodni potencial, kar oteži absorpcijo vode v rastlino (Brady in Weil, 2008). Povečane količine natrija pa motijo absorpcijo magnezija in kalija (bistvena za sintezo klorofila), medtem ko klor preprečuje odpiranje brstov (Jayasundara in sod., 1998). Posledica je upočasnjena rast, kloroze in nekroze na zelenih delih rastlin, sušenje in v končni fazi tudi propad rastline. Vidne poškodbe so lahko tudi neposredna posledica usedanja slanih aerosolov na rastlino. Na povečano slanost so bolj občutljivi iglavci kot listavci (Davison, 1971).

Vpliv soljenja cest na obcestno vegetacijo smo proučevali na Pokljuki. Pokljuka leži znotraj Triglavskega narodnega parka in predstavlja pomembno območje za rekreacijo in turizem, obenem pa je tudi območje velike biotske raznolikosti in rezervoar za pitno vodo. Poleg velikega števila obiskovalcev, hrupa in prometa je obremenitev okolja tudi zimsko soljenje cest. Poraba soli je velika, kar se že kaže tudi na asimilacijskih površinah dreves, ki so obrnjene proti cesti.

Namen naše raziskave je bil ugotoviti kako soljenje cest na Pokljuki vpliva na obcestno vegetacijo. Ker je na preučevanem območju navadna smreka vodilna in najpogostejša drevesna vrsta, ki gradi prevladujočo gozdno združbo, smo raziskave opravili na smreki (*Picea abies* (L.) Karsten). V nalogi smo primerjali rezultate meritev fizioloških parametrov pri rastlinah, ki so izpostavljene soljenju cest s tistimi, ki niso bile nikoli izpostavljene omenjenemu vplivu. Prav tako smo poskušali ugotoviti kako daleč od ceste so koncentracije Na^+ ionov v tleh še povečane in v kolikšni meri vplivajo na vsebnost nekaterih drugih bazičnih ionov (npr. Mg^{2+} , K^+) v rastlinah ter na vitalnost rastlin.

Namen magistrske naloge je:

- primerjati kemijske značilnosti tal in snega na soljenih in nesoljenih rastiščih
- primerjati izbrane fiziološke in biokemijske značilnosti (vodni potencial, fotokemično učinkovitost fotosistema II, transpiracijo, vsebnost fotosinteznih barvil, ...) pri smreki na soljenih in nesoljenih rastiščih in na osnovi rezultatov sklepati kakšen je vpliv soljenja
- primerjati rast rastlin na soljenih in nesoljenih rastiščih
- prispevati k znanju o vplivih soljenja cest na okolje ter k zmanjšanju uporabe v zavarovanem območju.

1.2 RAZISKOVALNE HIPOTEZE

Glede na opisana dejstva predvidevamo:

- da se bodo v kemijskih lastnostih tal in fizioloških odzivih rastlin pokazale razlike med vzorčnimi mesti, ki so izpostavljena vplivu soli in tistimi, kjer vpliva soli ni;
- da se bodo v kemijskih lastnostih tal in fizioloških odzivih rastlin pokazale razlike v odvisnosti od časa merjenja (začetek ali konec sezone) in od oddaljenosti vzorčnih ploskev od ceste;
- da bo rast rastlin na soljenih rastiščih manjša in, da bodo tudi opazne vidne poškodbe.

1.3 PRIČAKOVANI REZULTATI IN POMEN ZA ZNANOST

Pričakujemo, da bo raziskava potrdila negativni vpliv soljenja cest na rastline. Rezultati bodo pokazali v kolikšni oddaljenosti od ceste soljenje še negativno učinkuje na rastline, kakšna je akumulacija soli v tleh ter kakšna je občutljivost smreke na soljenje.

Ugotovili bomo tudi povezavo med dolgoročnim kopičenjem Na^+ v rastlinah in sezonski (zimski) izpostavljenosti slanemu pršu ter pomembnost drugih stresnih dejavnikov ob cestah na fiziološke parametre in rast rastlin.

2 PREGLED OBJAV

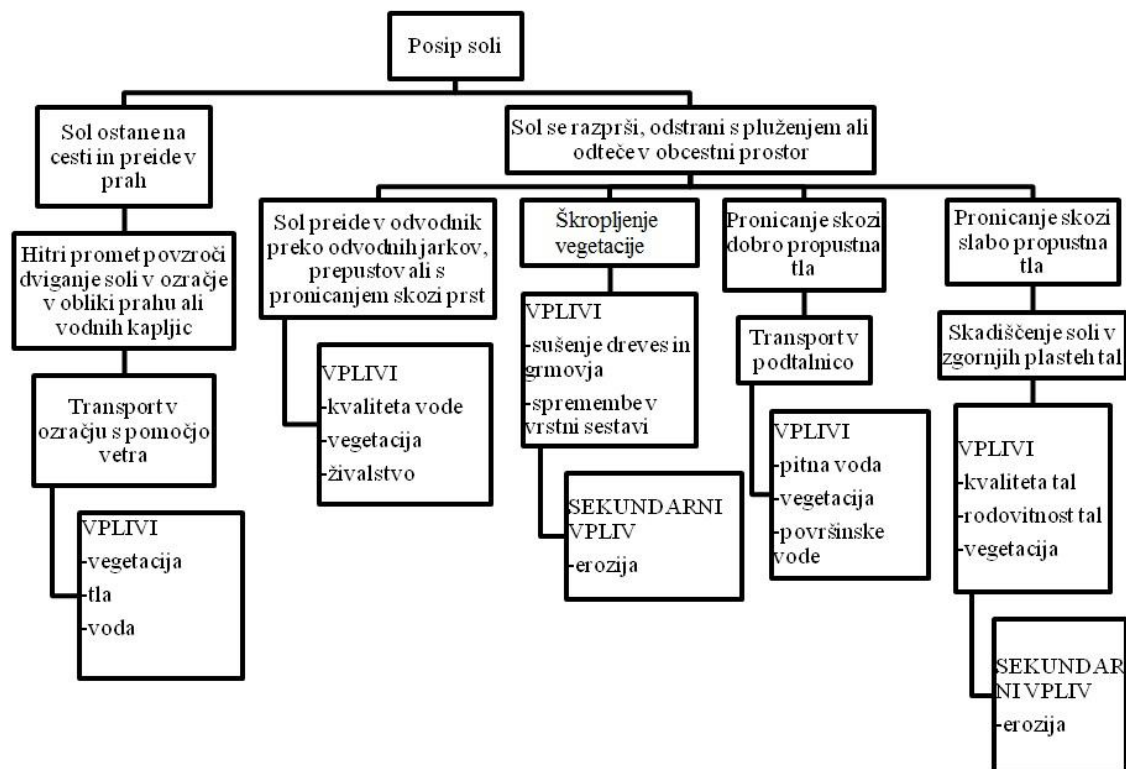
2.1 VPLIV SOLJENJA NA OKOLJE

Naravno slana rastišča se pojavljajo na obalnih območjih, kjer prihaja do poplavljanja obrežja ali pršenja morske vode, ki ga veter nosi nad kopno. Slana rastišča so pogosta tudi v predelih z aridno klimo. Tam se voda giblje od globljih plasti tal proti površju in s seboj nosi raztopljene soli, ki se nalagajo na površju (litogena slanišča). Ta proces je še posebno izrazit, kadar matično podlago gradijo morski sedimenti (Thorburn in sod., 1995).

Sekundarno slana rastišča so antropogenega nastanka. V sušnih predelih nastanejo slana tla zaradi talnega namakanja kmetijskih zemljišč, kjer so procesi podobni kot na območjih z aridno klimo, saj se raztopljeni minerali zaradi vertikalnega gibanja vode s kapilarnim dvigom nenehno nalagajo v površinski plasti tal (Thorburn in sod., 1995). Povečana slanost tal pa je lahko tudi posledica zimskega soljenja cest. Zimsko soljenje cest ima poleg dobrih strani, ki so povezane z tekočim in varnim prometom, tudi slabe strani. Predvsem so to vplivi na okolje, saj sredstva, ki so namenjena zimskemu vzdrževanju cest, nanj negativno vplivajo. Poleg same infrastrukture in vozil, ki so s posipnimi sredstvi v neposrednem stiku, ima sol velik učinek tudi na obcestni prostor in prav tako na predele okolja, ki so od cest razmeroma oddaljeni. S tem delovanjem človek negativno vpliva na vegetacijo, tla ter na površinske in podtalne vode (Trahan in Peterson, 2007).

Na globalni ravni znaša pretok klora iz troposfere v pedosfero približno 34 Mt letno, medtem ko soljenje cest samo na severni polobli letno k temu prispeva skoraj dvakrat več, in sicer 60 Mt klora (Houska, 2007).

V tleh vzdolž avtocest, v pasu 20-30 m, so tako zaradi zimskega soljenja cest koncentracije Na^+ večje (Viskari in Kärenlampi, 2000), saj se uporabljata NaCl in CaCl_2 . Pri tem pa soljenje bistveno manj obremenjuje tla s Cl^- , ker je klorid zelo dobro topen anion (Scheffer in Schachtschabel, 2002, cit. po v Bernhardt-Römermann, 2006), ki ga dež v pomladanskem in poletnem času hitro izpira iz tal (Viskari in Kärenlampi 2000),



Slika 1: Vplivi posipanja cestišč s soljo na okolje (National Research Council (U.S.) & Committee on the Comparative Costs of Rock Salt and Calcium Magnesium Acetate (CMA) for Highway Deicing, 1991: 165)
Figure 1: Road salt impacts on the environment (National Research Council (U.S.) & Committee on the Comparative Costs of Rock Salt and Calcium Magnesium Acetate (CMA) for Highway Deicing, 1991: 165)

Rastline naravno slanih rastišč imajo razvite morfološke, biokemijske in fiziološke prilagoditve, ki jim omogočajo uspevanje na slanih tleh, medtem ko so pri rastlinah na sekundarno slanih rastiščih prizadete nekatere funkcije, ki lahko privedejo tudi do propada rastlin.

2.1.1 Vpliv soljenja na vegetacijo

Številne raziskave kažejo, da ponavljajoče soljenje in pršenje soli v zimskem času lahko povzroči akutne poškodbe dreves vzdolž soljenih cest (Hautala in sod., 1992, cit. po Forczek in sod., 2011). Do poškodb vegetacije pride lahko zaradi pršenja slane vode, zaradi spiranja slane vode s cestišč v obcestni prostor ali zaradi kombinacije obeh vplivov (Townsend, 1980, 1984, cit. po Fostad in Pedersen, 2000). V vodi raztopljene soli se s cest spirajo v obcestni prostor, kjer jo lahko privzamejo koreninski sistemi rastlin. Spiranje je odvisno od količine in pogostosti padavin, temperature, hitrosti vozil ter nagiba terena. Sol s ceste v obliki slanega prša lahko veter odnaša tudi na večje razdalje. Na odprtih površinah do nekaj sto metrov

(Kelsey in Hootman, 1992), na gozdnatih od 2 do 40 m (Blomqvist in Johansson, 1999). Velike koncentracije Na in Cl lahko prizadenejo rastline neposredno s povečano absorpcijo teh ionov ali pa posredno zaradi višje reakcije tal (Fostad in Pedersen, 2000).

Pri rastlinah stres zaradi soli nastane zaradi motenj v oskrbi z vodo (osmotski stres), zaradi neravnovesja ionov in hranil ter zaradi specifične strupenosti ionov (Jayasundara in sod., 1998). Katera motnja se bo najbolj izrazila je odvisno od koncentracije soli, vrste rastline ter od okoljskih dejavnikov (Panahi, 2009).

Osmotski stres vodi v inhibicijo absorpcije vode zaradi zmanjšanja osmotskega potenciala v plasti tal med koreninami in podtalnico. Rastline zato potrebujejo veliko energije za uravnavanje osmotskega potenciala v celicah, glede na osmotski potencial talne raztopine. Poraba energije se kaže v redukciji rasti (Brady in sod., 2001). Bois in sod. (2006) so ugotovili, da se je z naraščajočo koncentracijo soli v tleh biomasa poganjkov značilno zmanjševala.

Velike koncentracije soli v rastlini povečajo hiperozmotski stres in zmanjšajo vodni potencial (Parvaiz in Satyawati, 2008). Posledično to vodi v nekroze in pospešuje senescenco (Renault, 2005; Weissflog in sod., 2007).

Specifična strupenost ionov se pojavi, ko ioni vstopijo v rastlino in povzročijo različne fiziološke spremembe (Blomqvist, 1998). Pri uporabi NaCl kot slanega posipa so rastline neposredno prizadete zaradi prekomernega absorbiranja Na^+ in Cl^- ionov. Iona, nakopičena v listih, lahko vplivata na zmanjšanje fotosinteze zaradi ionskih sprememb v kloroplastih (Jayasundara in sod., 1998). Pri absorpciji NaCl pride do poslabšanja različnih fizioloških procesov zaradi toksičnosti Na^+ in Cl^- (Marschner, 1995; Larcher, 1995). Toksičnost Na^+ in Cl^- se kaže v spremembi hormonskega ravnotežja rastline, spremembi encimske aktivnosti in celovitosti celičnih membran, poruši se metabolizem proteinov in zmanjša neto fotosinteza, oziroma neto primarna produkcija (Hasegawa in sod., 2000; Munns, 2005).

Prisotnost soli negativno vpliva na dostopnost drugih ionov. Tako na primer antagonistično delovanje Na^+ in Cl^- proti K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} in NO_3^- vodi do neenakomerne preskrbljenosti rastlin s hranili (Jayasundara in sod., 1998).

Fostad in Pedersen (2000) sta odkrila, da z naraščajočo izpostavljenostjo vplivu soli v iglicah narašča tudi koncentracija K. Nasprotno, pa sta Stavarek in Rains (1983) odkrila zmanjšane

koncentracije K, če so se koncentracije Na v rastlini povečale (Hautala in sod., 1992, cit. po Fostad in Pedersen, 2000). Tudi drugi avtorji omenjajo preferenčno absorpcijo Na pred K in s tem povezane probleme (Cramer in sod., 1987). Sčasoma pa zaradi konstantno večje koncentracije Na in večje absorpcije to vseeno zmanjša razmerje K/Na, kar negativno vpliva na rastline (Fostad in Pedersen, 2000). Bois in sod. (2006) so ugotovili, da se je razmerje K/Na in Ca/Na pri beli smreki (*Picea glauca* (Moench.) Voss.) značilno zmanjšalo z naraščajočo koncentracijo NaCl v tleh, poleg tega so ugotovili, da je Na postal toksičen, ko je njegova koncentracija v poganjkih dosegla 1-1,5 % suhe mase; takrat se je zmanjšala potencialna fotokemična učinkovitost - Fv/Fm. Hansen in sod. (1998) so pri osebkih navadne smreke, kjer so opazili največ vidnih simptomov (razbarvanje iglic tekočega leta in odpadanje iglic iz prejšnjih let), izmerili tudi najbolj opazno zmanjšanje fotosinteze in transpiracije. Te skupine osebkov so absorbirale največ soli.

Pri iglavcih sol pride v rastlino preko korenin in iglic, na kar pa vplivajo vremenske razmere in ostali okoljski dejavniki (White in Broadley, 2001; Forczek in sod., 2011). Na rastline deluje sol neposredno, ko prši izpod koles ali plužnih strojev (Blomqvist, 2001). Vozila med vožnjo dvignejo raztopino soli v obliki drobnih kapljic v zrak in ustvarijo aerosol, ki se počasi useda na okoliško vegetacijo. Med laboratorijskimi raziskavami so ugotovili, da raztopina soli podre v notranjost brstov in spomladi povzroči zastoj pri rasti ter jeseni in pozimi obarvanje in odpadanje listja in iglic (Kayama in sod., 2003)

Forczek in sod. (2011) so ugotovili, da je za privzem klorida pomembnejša absorpcija preko korenin, ker je hitrejša, kar pa je tudi vzrok za propad številnih mladih osebkov. Pri številnih lesnatih vrstah je toleranca na sol odvisna od tega ali gre za pršenje slane vode ali absorpcijo soli iz tal (Moxley in Davidson, 1973, cit. po Fostad in Pedersen, 2000).

Pojav in obseg vidnih poškodb je odvisen od trajanja izpostavljenosti rastline, od načina privzema soli (skozi korenine, liste ali iglice) in od sočasnega delovanja drugih dejavnikov (temperatura, svetloba, vlažnost, veter, tekstura tal, količina padavin, velikost rastline ter stopnja tolerance). Simptomi so podobni kot jih povzročata suša ali poškodbe korenin. Iglavci, ki so izpostavljeni delovanju soli iz zraka imajo rjave iglice (rjaveti začnejo na konici) na spodnjih delih obrnjenih proti cesti že v zgodnji pomladi, poškodbe, ki nastanejo s privzemom soli skozi korenine pa so vidne v krošnji ali spiralnih vzorcih (Kayama in sod., 2003). Pri listavcih poškodbe niso opazne pred pomladjo. Kasneje se pojavijo zakrneli listi, rjavi listni robovi, prezgodnja jesenska obarvanost, mrtvi brsti in veje v spodnjem delu dreves

(Blomqvist, 1998). Listne poškodbe so povezane s povečano koncentracijo natrijevih in kloridnih ionov, ki zavirajo nekatere celične funkcije kot sta regulacija delovanja listnih rež ter sinteza klorofila (Slabu in sod., 2009).

Rastlinske vrste ob cestah na prekomerno soljenje reagirajo različno. Drevesa ob zmerno soljenih cestnih površinah zaradi delovanja soli postanejo postopno manj odporna na različne stresorje, npr. proti zajedavcem ter patogenim organizmom. Na splošno so iglavci bolj občutljivi kot listavci (Preglednica 1). Vrste iz rodu smreka (*Picea*) so zelo občutljive na sol, v primerjavi z drugimi lesnatimi vrstami (Bogemans in sod. 1989; Larcher, 1995, cit. po Kayama in sod., 2003). Med občutljivimi drevesi so tudi vrste iz rodov javor (*Acer*), lipa (*Tilia*) in divji kostanj (*Aesculus*), odpornejše pa so vrste iz rodov topol (*Populus*), jesen (*Fraxinus*) in hrast (*Quercus*) (Larcher, 2003).

Preglednica 1: Relativna občutljivost halofobnih dreves in grmov na slana tla in slani prš (Larcher, 2003: 345).

Table 1: Relative sensitivity of halofobic trees and shrubs on saline soils and salt spray (Larcher, 2003: 345).

Vrste občutljive na sol	Vrste manj občutjive na sol
Listopadna drevesa in grmi	
<i>Acer platanoides</i>	<i>Acer negundo</i>
<i>Aesculus hippocastanum</i>	<i>Ailanthus altissima</i>
<i>Carpinus betulus</i>	<i>Eleagnus</i>
<i>Euonymus</i> sp.	<i>Fraxinus excelsior</i>
<i>Fagus sylvatica</i>	<i>Gleditschia triacanthos</i>
<i>Juglans regia</i>	<i>Hippophaë rhamnoides</i>
<i>Ligustrum vulgare</i>	
<i>Platanus</i> sp.	<i>Potentilla fruticosa</i>
<i>Prunus serrotina</i>	<i>Quercus</i> , vse vrste
<i>Rosa</i> , nekatere vrste	<i>Rosa rugosa</i>
<i>Syringa vulgaris</i>	<i>Robinia pseudaccacia</i>
<i>Tilia</i> sp.	<i>Sophora japonica</i>
Zimzelene lesnate rastline	
<i>Ilex</i> , nekatere vrste	<i>Ficus</i> , nekatere vrste
<i>Ligustrum lucidum</i>	<i>Magnolia grandiflora</i>

»se nadaljuje«

»nadaljevanje«

Vrste občutljive na sol	Vrste manj občutljive na sol
<i>Mahonia</i>	<i>Nerium</i>
Iglavci	
<i>Abies</i> , veliko vrst	<i>Juniperus chinensis</i>
<i>Picea</i> , veliko vrst	<i>Picea mariana</i>
<i>Pinus strobus</i>	<i>Picea parryana</i>
<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Pinus halepensis</i>
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	<i>Pinus nigra</i>
<i>Taxus</i> sp.	<i>Pinus ponderosa</i>

Fostad in Pedersen (2000) sta pri preučevanju občutljivosti smreke, rdečega bora, navadne breze in gorskega javorja na sol, odkrila največjo občutljivost pri smreki. V smrekovih iglicah so bile tudi koncentracije Na in Cl največje. Poškodbe iglic in nekroze so bile pri tem hujše pri dvoletnih poganjkih. Obseg nekroz iglic je bil v korelaciji s koncentracijo Na in Cl v iglicah. Sejanci smreke so bili poškodovani zaradi soli tudi po obilnem zalivanju (Fostad in Pedersen, 2000). Mejna koncentracija soli v iglicah, ki povzroči poškodbe je 10 mg NaCl /g suhe teže iglic, pri 4,4 mg pa je s poganjkov odpadlo že 50 % iglic (Kayama in sod., 2003).

Fostad in Pedersen (2000) sta odkrila, da so bile smreke, ki so rasle v peščenih tleh bistveno bolj prizadete kot sadike, ki so rasle v ilovnatih tleh. Soljenje cest lahko povzroči tudi propad manjših dreves (Kayama in sod., 2003).

Okrevanje dreves po zimski solni izpostavljenosti je zelo težko. Tudi, če ima območje veliko padavin se vsa sol ne spere in rastline jo nekaj asimilirajo v korenine, brste, veje in liste. Najbolj škodljiva je uporaba soli v zgodnjem spomladanskem obdobju. V tem času rastline preidejo iz zimskega mirovanja v aktivno stanje. Intenzivno začnejo srkati minerale in vodo iz tal. Med njimi veliko toksičnih klorovih ionov, ki so zgodaj spomladi še prisotni v tleh, kasneje pa zaradi hitrega spiranja niso več prisotni (Larcher, 2003)



Slika 2: Poškodbe iglic na smreki zaradi vpliva soljenja.
Figure 2: Injuries on spruce needles due to the impacts of de-icing salt.

V Sloveniji o vplivu soljenja cest na vegetacijo še ni bilo veliko raziskav. Oven (2000) je proučeval vpliv soli na poškodovanost dreves v mestnem okolju. Ugotovil je, da so simptomi prizadetosti zaradi soli najbolj vidni na najbolj soljenih lokacijah. Med najbolj občutljivimi vrstami so navadni divji kostanj (*Aesculus hippocastanum*), navadni beli gaber (*Carpinus betulus*), javorji (*Acer* sp.) in lipe (*Tilia* sp.).

Vpliv soljenja v obcestnem prostoru v Ljubljani je ugotavljala Čotar (2010). Soljenje je povečalo bazičnost vrhnje plasti tal. Količina klora v tleh se je po soljenju povečala na večini lokacij. Po končanem zimskem obdobju se je količina klora in natrija na iglicah črnega bora (*Pinus nigra*) močno zmanjšala.

Levanič in Oven (2002) sta ugotovila, da drevesa rdečega bora (*P. sylvestris*) ob avtocesti Ljubljana-Kranj zaradi vpliva soli slabše rastejo v debelino in v višino, imajo znatno krajše iglice in do 20x večjo vsebnost kloridov v njih.

Vpliv uporabe slanih posipov na slanost tal v mestni občini Ljubljana je preučeval Završnik (2004). Ugotovil je, da se v bodoče zaradi spremembe okoljskih parametrov, predvsem

količine in razporeditve padavin, lahko poveča možnost vpliva nekaterih ionov (npr. Na^+) na rast rastlin. V spremenjenih razmerah lahko sedanje normalne koncentracije soli v tleh postanejo omejitveni dejavnik za mnoge rastlinske vrste.

Na podlagi raziskav v logaškem drevoredu so Prus in sod. (1989, 1990) ugotovili, da je vzrok velikega deleža Na^+ na sorptivnem delu tal verjetno posledica soljenja cest. Delež Na^+ narašča z globino in je večinoma dva do štirikrat večji kot v referenčnih profilih, vpliva pa tudi na moten sprejem kalija in magnezija pri rastlinah. Vsebnost natrija v listih lip ob cesti, presega vrednosti v listih lip iz gozda (Prus in sod., 1990). Prus in sod. (1989), navajajo, da se delež natrija zaradi prenehanja uporabe NaCl posipa v zgornji plasti tal (do globine 50 cm) počasi zmanjšuje. Ker je natrij zaradi močne hidratacije slabo vezan na sorptivni del tal, je po navedbah Appleton in sod. (2003) škodljiv vpliv slanih posipov manj problematičen že v krajih, kjer je letna vsota padavin več kot 490 mm, kar pa velja za celo Slovenijo



Slika 3: Vidne poškodbe smrek ob cesti Mrzli studenec-Rudno polje.
Figure 3: Visible injuries on Norway spruce along the road Mrzli studenec-Rudno polje.

2.1.2 Vpliv na tla

Slanost vpliva tudi na fizikalne lastnosti tal (teksturo, prepustnost, zračnost in kationsko izmenjalno kapaciteto), ki imajo neposreden vpliv na rast in razvoj rastlin (Rowell, 1994). Slana tla postanejo bolj lepljiva in plastična kadar so mokra, ter bolj trda kadar so suha.

Zmanjša se tudi hidravlična prevodnost tal, zaradi česar se voda ob padavinah zadržuje na površini tal in zelo počasi pronica skozi tla. Zastajanje vode na površini tal in v območju korenin privede do zmanjšane prezračenosti tal. V tleh se ustvarijo lahko anoksične razmere, pride do denitrifikacije in tvorbe toksinov. Namesto aerobnih talnih mikroorganizmov se razvijejo fakultativni in obligatni anaerobni mikroorganizmi. Zaradi delovanja anaerobne talne favne se v coni korenin tvorijo in akumulirajo toksini, kot so mlečna kislina, etanol, maslena kislina in amini (Jayasundara in sod., 1998). Prisotnost Na^+ ionov v tleh vpliva tudi na povečanje pH tal, ta pa na razpad organske komponente tal (Brady in Weil, 2008).

Slanost tal določamo z merjenjem električne prevodnosti tal. Prevodnost tal izražamo v enotah dS/m, kar je enako mS/cm. Glede na slanost (ECe) lahko tla razvrstimo v posamezne razrede (Rowell, 1994) (Preglednica 2).

Preglednica 2: Razredi tal glede na izmerjeno električno prevodnost po metodi saturiranega vzorca tal (Rowell, 1994: 132).

Table 2: The classes of soil according to the measured electric conductivity by the method of saturated soil sample (Rowell, 1994: 132).

Električna prevodnost (mS/cm)	Slanost	Vpliv na rastline
0 do 2	Neslana tla	Ni vpliva
2.1 do 4	Rahlo slana tla	Vpliv na občutljive vrste
4.1 do 8	Zmerno slana tla	Vpliv na veliko vrst
8.1 do 16	Močno slana tla	Vpliv na kultivirane vrste
<16	Zelo močno slana tla	Uspevajo le halofiti

Pridelek večine kulturnih rastlin upade pri prevodnosti >4 mS/cm. Voda za zalivanje mora imeti električno prevodnost <2 mS/cm (za primerjavo ima morska voda prevodnost 44 mS/cm).

2.1.3 Vpliv na vodne ekosisteme

Kalcijev in natrijev klorid sta v vodi dobro topna in se s padavinami spirata v površinske vode, ali pa skozi zemljo pronicata v talno vodo (Ramakrishna in Viraraghavan, 2005).

V tekočih vodah in jezerih pomenijo povečane koncentracije kloridov potencialno grožnjo za organizme, ki se na spremenjene razmere ne morejo prilagoditi. Največji vpliv se kaže v potokih in majhnih, plitvih jezerih (Thunqvist, 2004). Raziskave so pokazale, da povečane koncentracije soli v vodi spremenijo vrstno sestavo kremenastih alg (Oškinis in Kasperovičius, 2005), povečajo vsebnost težkih kovin (Bäckström in sod., 2004) ter negativno vplivajo na populacije vodnih bolh in ribjih mladice (Ramakrishna in Viraraghavan, 2005).

Vplivi soljenja cest na podzemne vode se lahko najbolj negativno pokažejo v kontaminaciji pitne vode (Ramakrishna in Viraraghavan, 2005). V Pravilniku o pitni vodi (Ur.l. RS št.:19/04 in 35/04) je mejna vrednost za kloride 250 mg/l. Koncentracije, ki presegajo 250 mg/l povečujejo korozijo kovin, kar lahko sekundarno vodi do povečanih koncentracij kovin v pitni vodi. Mejna vrednost za natrij (Ur.l. RS št.:19/04, 35/04 in 26/06) je 200 mg/l. Koncentracije natrija v pitni vodi, ki presegajo 200 mg/l lahko dajejo vodi okus; meja okušanja je individualna in odvisna še od drugih faktorjev. Te koncentracije so daleč pod tistimi, ki bi lahko imele zdravstvene učinke. Lahko pa so te koncentracije natrija v pitni vodi pomembne za osebe, za katere velja omejitev vnosa soli (npr.: povišan krvni pritisk in obolenja v zvezi z njim).

Potencialno nevarnost za kvaliteto vode predstavlja tudi dodatek proti strjevanju soli (običajno natrijev ali kalijev heksacianoferat), ki se v kislem dežju ali pod vplivom močnega sončnega sevanja lahko razgradi v smrtonosno kislino HCN. Raziskave so pokazale, da pri močnem sončnem obsevanju ne pride do razgraditve kemikalij v takšni meri, da so lahko nevarne za okolico. V primeru kislega dežja se lahko v prisotnosti večjih količin omenjenega dodatka pojavijo resne težave s kvaliteto vode (Paschka in sod., 1999).

2.2 VRSTE IN KOLIČINE UPORABLJENIH POSIPNIH SREDSTEV

Namen posipnih sredstev je zniževanje temperature ledišča vode. Za preprečevanje poledice na cestah je primernih več vrst posipnih sredstev, vendar se je predvsem zaradi dostopnosti, nizke cene in zadovoljive učinkovitosti, pri nas in v svetu najbolj uveljavil natrijev klorid. NaCl je učinkovit le do okoli $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$, čeprav se posipa tudi pri nižjih temperaturah. V teh primerih posipanje nima pozitivnih učinkov, ampak le negativne na naravo. Čisti NaCl je slabo higroskopsna snov, vendar pa že ob manjših količinah vsebovanih nečistoč, še posebej

CaCl_2 in MgCl_2 , postane zelo higroskopen in hitro veže vodo. To povzroča sprijemanje delcev v velike aglomerate in tvorbo trde skorje na površini nasute soli. Za ohranitev sipkosti se uporabljajo sredstva, ki preprečujejo strjevanje soli. Najbolj poznano in učinkovito sredstvo je kalijev heksacianoferat, poleg njega pa še natrijev in železov heksacianoferat (Verbovšek in sod., 2005).

Redkeje se kot posip uporabljata za okolje manj obremenilna CaCl_2 in MgCl_2 (Gorše in Vuk, 2008). Uporabljata se predvsem za preventivno posipanje na avtocestah, hitrih in glavnih cestah ter pri nižjih temperaturah (-8°C). V zadnjih letih se izvaja tudi škropljenje s solno raztopino. Tako se prepreči odletavanje delcev soli s suhe ceste ob velikem prometu, zaradi boljše oprijemljivosti talila na vozišče pa je pospešeno tudi topljenje ledu (Urankar, 2007). Ponekod je v uporabi kalcij magnezijev acetat (CMA), katerega uporaba je povezana z večjimi stroški (Lerner, 2001). CMA je kot alternativna vrsta posipa sestavljen iz dolomitiziranega apnenca in očetne kisline. Ta posip ima manjši negativen vpliv na rastline in živali (Fitzergald in Janssen, 2004), zato se na občutljivih predelih narave priporoča uporaba CMA (Akbar in sod., 2006).

Za preprečevanje poledice na letališčih se uporabljajo še druga sredstva, kot so alkoholi in glikoli, sečnina (urea), formamid, amonijak in amonijeve spojine (Rodošek in sod., 1998).

Količina porabljene soli je odvisna od dolžine zime, temperature in vremenskih razmer. Če je veliko padavin in snega, je posledično veliko operativnega in tudi več preventivnega posipanja (Gorše in Vuk, 2008). V ZDA in Kanadi se poraba soli giblje od 5 do 10 milijonov ton na leto (Akbar in sod., 2006), kar je v povprečju 3,3 tone na km cestne mreže. V Evropi se največje količine porabijo v državah, kjer je veliko snežnih padavin in so temperature v zimskem obdobju nižje. Pri količini porabljene soli je na prvem mestu Nemčija, ki potrebuje vsako zimo približno 3 milijone ton soli. Avstrijska poraba doseže okrog 400.000 ton, medtem ko v Švici in na Švedskem vrednost doseže 300.000 ton. Povprečno to pomeni 2,3 tone na km cestne mreže na sezono (Lajevec, 2008).

V Sloveniji se povprečna poraba sredstev za zimsko soljenje na avtocestah po podatkih DARS-a giblje okoli 2 kg/m^2 prometne površine, ali 40 ton na km avtoceste na sezono (Zimsko vzdrževanje cest, 2008).

Poraba soli (NaCl) na cestah, ki jih upravlja Direkcija Republike Slovenije za ceste (DRSC) (5825 km) od leta 1995 do 2008 giblje od 16.000 do 76.000 ton na sezono (Zimsko vzdrževanje cest, 2008). Soljenje cest se začne takoj, ko se začnejo snežne padavine, poteka med posameznimi pluženji in tudi že preventivno, ob meteorološki napovedi poledice. Po količini porabljene soli izstopa sezona 2005/06. Takrat je bila zima z veliko količino snežnih padavin in mrzlih dni. V tej sezoni se je porabilo 76.446 ton soli, kar pomeni 13 ton na km cestne mreže, povprečno poraba v desetih letih pa je 6,8 ton na km cest.

Preglednica 3: Skupna poraba posipnih materialov za ceste v upravljanju DRSC od 1995/1996 do 2007/2008 (Zimsko vzdrževanje cest, 2008: 5).

Table 3: Total consumption of de-icing agents for roads managed by DRSC 1995/1996 to 2007/2008 (Zimsko vzdrževanje cest, 2008: 5).

Leto	NaCl (t)	CaCl ₂ (t)	MgCl ₂ (t)	Drobir (m ³)
1995/1996	40.609	704	0	56.517
1996/1997	31.484	667	0	48.678
1997/1998	16.139	425	0	14.829
1998/1999	49.884	197	473	54.090
1999/2000	42.878	0	402	41.628
2000/2001	19.994	0	161	15.219
2001/2002	37.487	146	376	27.410
2002/2003	48.035	37	548	31.931
2003/2004	51.201	0	426	41.818
2004/2005	49.632	0	505	36.132
2005/2006	76.446	0	570	62.520
2006/2007	18.183	0	288	12.066
2007/2008	35.314	0	652	19.756
Povprečje	39.791	167	338	35.584

Zimsko vzdrževanje cest na Pokljuki izvaja Gorenjska gradbena družba. Skupna dolžina cest, kjer se uporabljajo posipni materiali je 44 km (odseki Krnica - Mrzli studenec, Mrzli studenec - Rudno polje, Mrzli studenec - Jereka). Za posipanje uporabljajo NaCl, raztopino MgCl₂ in drobir. Povprečna poraba soli od 2008 do 2014 je bila 11 t NaCl, 36 litrov raztopine MgCl₂ in 5 m³ drobirja na km ceste. Na odseku Mrzli studenec - Rudno polje je poraba največja (17 t NaCl, 51 L MgCl₂ in 6 m³ drobirja). Po količini porabe NaCl izstopa zima 2012/13, ko je bilo v povprečju na pokljuških cestah porabljeno 18 ton soli na km ceste.

Preglednica 4: Poraba posipnih sredstev na Pokljuki na odseku Mrzli studenec-Rudno polje od 2008 do 2014 (Poljanec, 2014).

Table 4: Consumption of de-icing agents on the Pokljuka on the road section Mrzli studenec-Rudno polje from 2008 to 2014 (Poljanec, 2014).

Obdobje	NaCl (t)	Poraba NaCl/km ceste	MgCl ₂ (l)	Poraba MgCl ₂ /km ceste	Drobir (m ³)	Poraba drobirja/km ceste
od 15.11.2013 do 28.02.2014	101,6	16,9	-		40,2	6,7
od 15.11.2012 do 15.03.2013	155,0	25,8	279,2	46,5	44,6	7,4
od 15.11.2011 do 15.03.2012	72,8	12,1	311,0	51,8	15,8	2,6
od 15.11.2010 do 15.03.2011	89,0	14,8	532,0	88,7	4,6	0,8
od 15.11.2009 do 15.03.2010	65,3	10,9	723,9	120,7	63,3	10,6
od 15.11.2008 do 15.03.2009	144,6	24,1	-		56,5	9,4

3 MATERIALI IN METODE

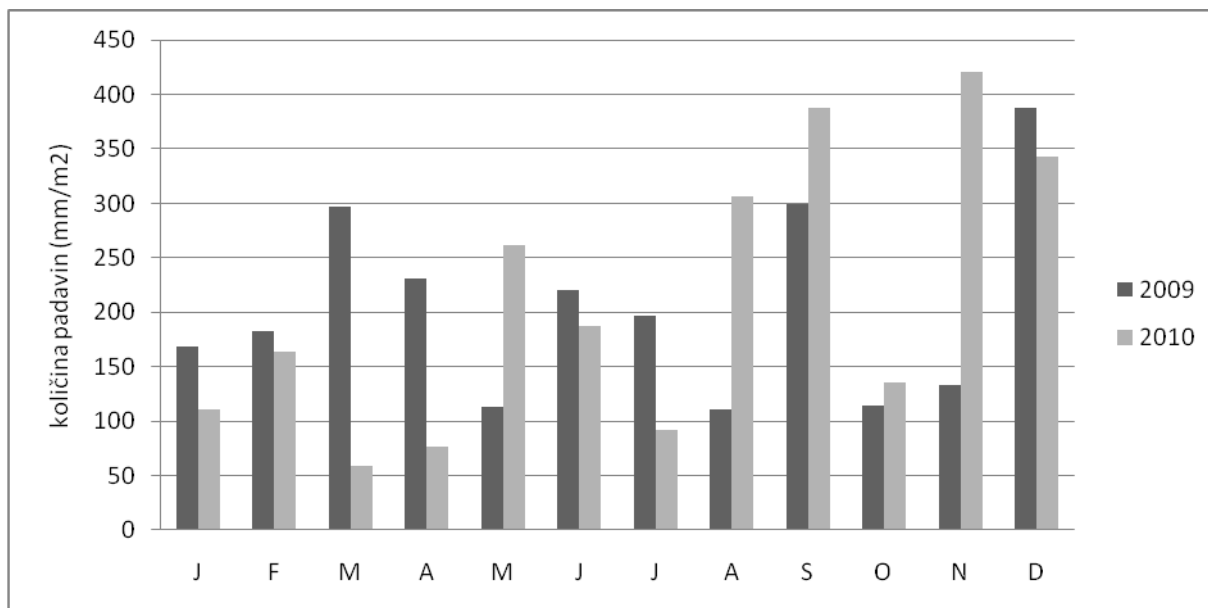
3.1 OPIS RAZISKOVALNEGA OBMOČJA

Raziskava je potekala na planoti Pokljuka, ki se nahaja znotraj Triglavskega narodnega parka. Okrog 90 % površja sestavljajo karbonatne kamenine triasne, jurske in kredne starosti. Menjavajo se ploščasti in skladoviti apnenec z roženci, masivni krinoidni apnenec in oolitni apnenec. Na območju so značilni kraški pojavi, kot so kraške doline in vrtače, ki povečujejo reliefno pestrost. Na Pokljuki je ohranjenega tudi veliko morenskega gradiva in pleistocenske preperine, ki sta napravila kraško površje manj prepustno (močviren svet v depresijah) (Gams in Ramovš, 1990). Kraško površje Pokljuke je zelo razgibano in nagnjeno proti jugovzhodu. Ta smer je pogojena z ledeniškim in tektonskim delovanjem. Večji del planote se širi v nadmorski višini od 1200 do 1500 m (Melik, 1954).

Tla na Pokljuki so relativno mlada. Večinoma so se razvila šele po zadnji ledeni dobi. Na območjih, kjer je več preperelega, oz. drobnega materiala, nastalega iz matične podlage, so tla globlja in večinoma zakisana, sicer pa so zelo plitva (Kodrič, 1958)

Planota Pokljuka leži na vzhodnem delu Julijskih Alp. Podnebje je gorsko, nanj pa vplivajo nadmorska višina, ekspozicija ter bližnja klimatska vplivna območja. Zanj je značilno, da je povprečna temperatura najhladnejšega meseca manj kot -3°C in najtoplejšega več kot 10°C . Takšne razmere so do zgornje gozdne meje z nadmorsko višino 1700 m do 1900 m. Značilne so obilne padavine. V vzhodnem delu Pokljuke pade letno 1900 do 2000 mm padavin, proti zahodu količina padavin narašča in na najvišjem delu doseže od 2600 do 2700 mm. Približno polovica je snežnih padavin. Padavin je zelo veliko čez poletje, novembra pa doseže največjo vrednost (Bogataj, 2010). Na padavinski postaji Rudno polje (1340 m n.v.) je bila povprečna letna vsota padavin v zadnjem desetletnem obdobju (2001–2010) 1930 mm. Meseca z najmanjšo skupno vsoto padavin sta bila februar in januar, največ padavin je padlo meseca septembra in novembra. V času raziskave (2009 in 2010) je bila letna količina padavin okoli 2500 mm/m^2 . V letu 2009 je največ padavin padlo meseca marca in aprila ter septembra in decembra. V letu 2010 je bilo več padavin maja, avgusta, septembra ter novembra in decembra (Arhiv meteoroloških podatkov, 2011) (Slika 4). Padavinski režim je na območju

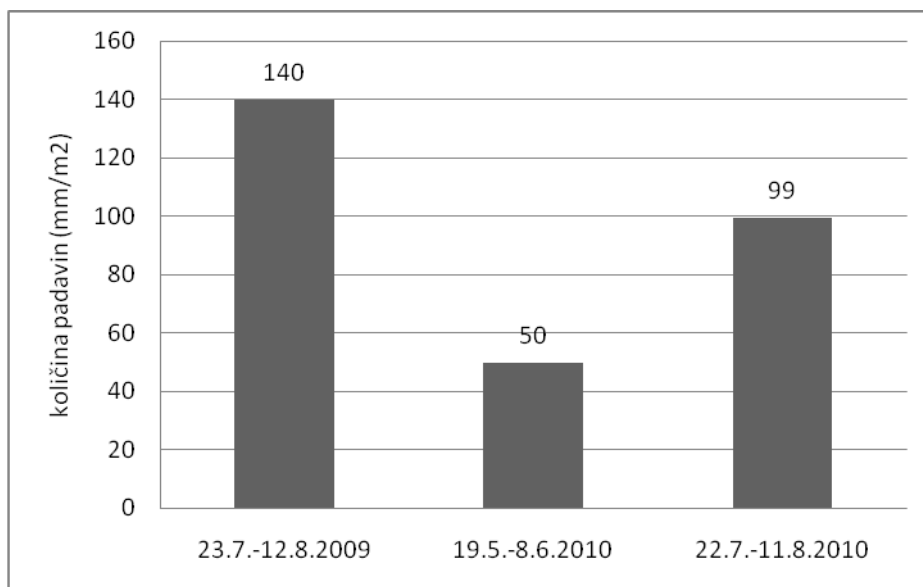
raziskave submediteranski s primarnim viškom padavin jeseni, sekundarnim pa spomladi (Arhiv meteoroloških podatkov, 2011).



Slika 4: Količina padavin na merilni postaji Rudno polje v letih 2009 in 2010 (Arhiv meteoroloških podatkov, 2011).

Figure 4: The amount of precipitation at the measuring station Rudno polje in the years 2009 and 2010 (Meteorological data archive, 2011).

Količina padavin v času meritev, oziroma 3 tedne pred posamezno meritvijo fizioloških parametrov je bila v juliju in avgustu 2009 140 mm/m², v maju in juniju 2010 50 mm/m², v juliju in avgustu 2010 pa 99 mm/m² (Slika 5).



Slika 5: Količina padavin na merilni postaji Rudno polje v letih 2009 in 2010, 3 tedne pred posamezno meritvijo fizioloških parametrov (Arhiv meteoroloških podatkov, 2011).

Figure 5: The amount of precipitation at the measuring station Rudno polje in the years 2009 and 2010, 3 weeks before each measurement of physiological parameters (Meteorological data archive, 2011).

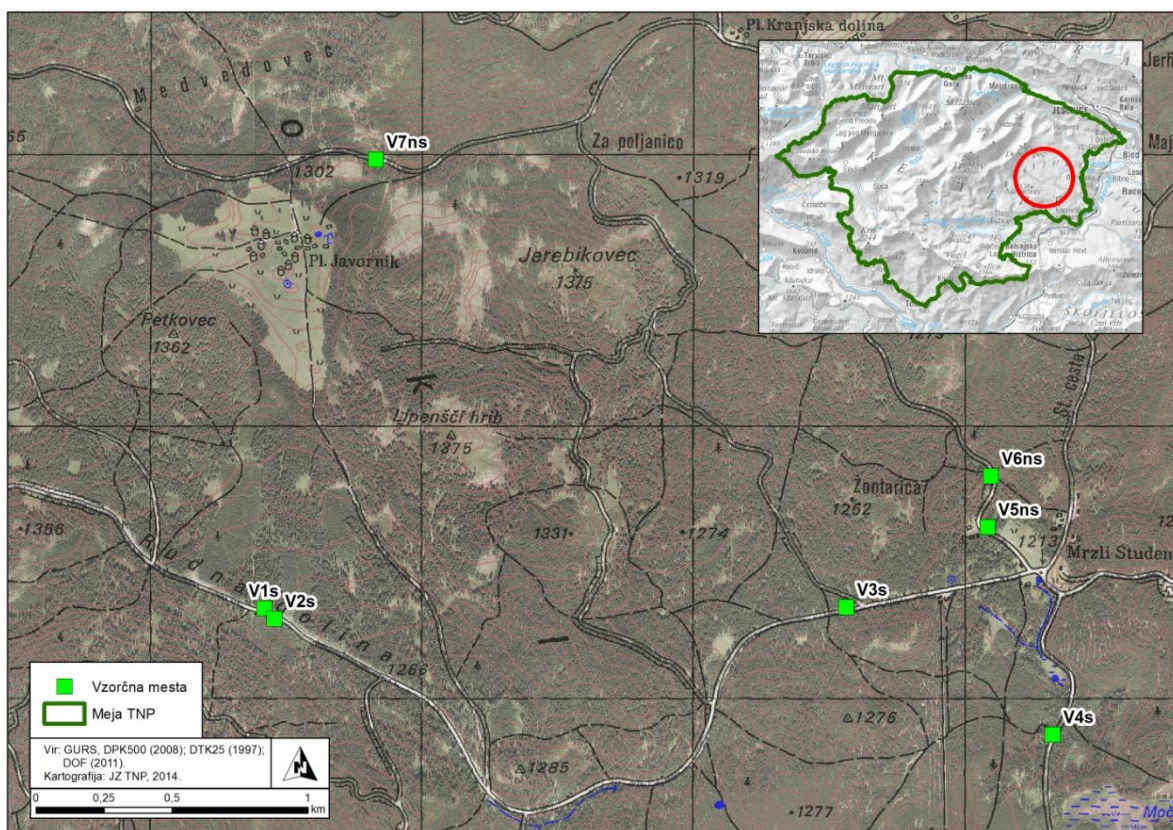
Po fitogeografski razdelitvi Slovenije se Pokljuka nahaja v alpskem območju (Wraber, 1969). Vodilna drevesna vrsta na planoti je smreka. Razširjenost smrekovega gozda v montanskem pasu Pokljuke je rezultat gospodarjenja in ekstremnih rastiščnih razmer. Zaradi mrziščnega značaja poključke planote se smrekov gozd pojavlja že na nadmorski višini med 1050 in 1400 metri (Horvat-Marolt, 1984), kar je precej nižje od pasu smreke na silikatni podlagi Centralnih Alp (med 1300 in 1700 metri nadmorske višine). Verjetneje pa so potencialna rastišča naravnega smrekovega gozda na Pokljuki omejena le na nekatere izrazito hladne lege. To so barja, njihova obrobja in druge konkavne površine s severnejšimi ekspozicijami. V prisojnih in nižjih legah na obrobju planote prevladujejo bukovi sestoji (*Anemone trifoliae-Fagetum*) (Tregubov, 1962).

3.2 VZORČNA MESTA

Na območju Pokljuke smo ob cestah Mrzli studenec - Rudno polje, Mrzli studenec - planina Javornik in Mrzli studenec - Gorjuše izbrali sedem vzorčnih mest (Preglednica 5, Slika 6), ki so med seboj primerljiva po tipu tal, naklonu, ekspoziciji, nadmorski višini, pa tudi vremenskim vplivom in sončevem sevanju. Vzorčna mesta se med seboj razlikujejo po tem, da so bila nekatera ob cestah kjer se v zimski sezoni uporablja sol, (V1s, V2s, V3s, V4s), druga ob cestah kjer se sol ne uporablja (V5ns, V6ns, V7ns). Vzorčna mesta so bila od ceste oddaljena 4 m. Na dveh mestih (V1s in V2s) smo preučevali koliko daleč od ceste še seže vpliv soljenja. Tam so se mesta vzorčenja nahajala 4, 10, 25 in 50 m od ceste.

Preglednica 5: Opis vzorčnih mest, natančna lokacija in opravljene meritve na posameznem mestu.
Table 5: Description of the sampling sites, the exact location and list of performed measurements at each site.

Oznaka vzorčnega mesta	Opis vzorčnega mesta	Koordinate	Nadmor. višina	Opravljene meritve
V1s	Vzorčno mesto se nahaja na desni strani ceste Mrzli studenec - Rudno polje.	46°20'53.52"N 13°56'53.93"E	1280 m	-kemijska analiza tal (4, 10, 25 in 50 m) -fiziološke meritve (4 m)
V2s	Vzorčno mesto se nahaja na levi strani ceste Mrzli studenec - Rudno polje v sestoji mladega smrekovja.	46°20'52.70"N 13°56'54.67"E	1280 m	-kemijska analiza snega -kemijska analiza tal (4, 10, 25 m) -fiziološke meritve (4, 10, 25 m)
V3s	Vzorčno mesto se nahaja na desni strani ceste Mrzli studenec - Rudno polje na meji med občinama Gorje in Bohinjska Bistrica.	46°20'54.67"N 13°58'33.61"E	1230 m	-kemijska analiza tal (4 m) -fiziološke meritve (4 m)
V4s	Vzorčno mesto se nahaja na desni strani ceste Mrzli studenec - Goreljek.	46°20'39.23"N 13°59'9.58"E	1200 m	-kemijska analiza tal
V5ns	Vzorčno mesto se nahaja na desni strani makadamske ceste Mrzli studenec - planina Javornik.	46°21'4.68"N 13°58'57.68"E	1210 m	-kemijska analiza tal (4 m)
V6ns	Vzorčno mesto se nahaja na desni strani ceste Mrzli studenec - planina Javornik.	46°21'10.53"N 13°58'58.58"E	1230 m	-kemijska analiza snega -kemijska analiza tal (4m) -fiziološke meritve
V7ns	Vzorčno mesto se nahaja na desni strani ceste Mrzli studenec - planina Javornik.	46°21'47.08"N 13°57'11.63"E	1300m	-kemijska analiza tal (4m)



Slika 6: Karta lokacij vzorčnih mest.

Figure 6: Map of the locations of the sampling sites.

Meritve in vzorčenje so potekali na mladih smrekah (*Picea abies* (L.) Karsten) velikosti do 2 m (Slika 7). Pri izbiri rastlinske vrste je bilo, poleg tega da so prisotne na vseh mestih, pomembno tudi to, da so razmeram na rastišču izpostavljene že daljše obdobje.



Slika 7: Vzorčno mesto V3s.
Figure 7: Sampling site V3s.

3.3 MERITVE IN ANALIZE

Meritve so potekale na terenu in v laboratoriju. Na terenu smo nabrali vzorce tal in snega, nabrali smo poganjke, oziroma vzorce iglic, in opravili meritve vodnega potenciala, fotokemične učinkovitosti in transpiracije. Poleg tega smo na terenu spremljali rast in razvoj rastlin.

V laboratoriju na Katedri za ekologijo in varstvo okolja na Oddelku za biologijo smo izvedli analizo fotosinteznih pigmentov na vzorčnem materialu nabranem na terenu. Analize vzorcev tal so bile opravljene v Infrastrukturnem centru za pedologijo in varstvo okolja, Oddelek za agronomijo, Biotehniška fakulteta, kemijske analize iglic in snega pa na Gozdarskem inštitutu Slovenije.

3.3.1 Vzorčenje in kemijske analize tal ter snega

Na vzorčnih mestih pod vplivom soljenja (V1s, V2s, V3s, V4s), kot tudi na kontrolnih (V5ns, V6ns, V7ns), smo v letu 2009 v spomladanskem in jesenskem času (26. 5. 2009 in 7. 10. 2009) odvzeli vzorce tal z globine 0-10 cm (glej Kayama in sod., 2003). Vzorce smo odvzeli s pomočjo vzorčevalne sonde iz nerjavečega jekla (notranjega premera 2.5 cm). Na mestih, kjer

smo odvzeli vzorec tal smo odstranili, oziroma razmaknili vegetacijo, odstranili opad. Sondo za odvzem vzorcev smo zabili v tla do globine 10 cm in jo zavrteli okrog navpične osi, izvlekli vzorec tal ter ga shranili v papirnato vrečko. Reprezentativen vzorec posameznega vzorčnega mesta je bil sestavljen iz petih podvzorcev, ki smo jih odvzeli na različnih mikrolokacijah znotraj vzorčnega mesta. Vzorce smo odnesli v Infrastrukturni center za pedologijo in varstvo okolja, Oddelek za agronomijo, Biotehniška fakulteta za nadaljnje kemijske analize.

Na enem izmed soljenih vzorčnih mest (V2s) in na nesoljenem (V6ns) smo nabrali tudi vzorec snega z globine 0-10 cm, da bi ugotovili kontaminiranost snega z NaCl (Kayama in sod., 2003)

V laboratoriju so bile po standardnih protokolih (Soil survey laboratory methods manual, 1992) opravljene naslednje meritve: električna prevodnost (EC) in kationska izmenjalna kapaciteta (vsebnosti Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , H^+). Izračunane so bile tudi vrednosti T (vsota navedenih kationov) S - vsota samo bazičnih kationov (Ca, Mg, K in Na) ter V vrednost, ki pomeni delež bazičnih kationov (S/T v %).

3.3.2 Fiziološke meritve

Fiziološke parametre smo spremljali na istoletnih (c), enoletnih (c+1) in dveletnih (c+2) iglicah/poganjkih na štirih vzorčnih mestih (V1s, V2s, V3s, V6ns), velikost vzorca je bila pet rastlin. Vzorce smo naključno izbirali na vejah obrnjenih proti cesti. Meritve smo opravili 12. 8. 2009, 8. 6. 2010 in 11. 8. 2010.

3.3.2.1 Vodni potencial

Preskrbljenost rastline z vodo in vodni stres lahko ovrednotimo z meritvijo vodnega potenciala. Za merjenje smo uporabili tlačno (Scholandrovo) komoro. Ker je prenosna in omogoča ponavljanje meritev, je najprimernejša merilna naprava za določanje vodnega stanja rastlin na terenu. Pred pričetkom meritev smo preverili čistočo merilne komore.

Vzorčene vejice smo čim bolj ravno odrezali z ostrim rezilom. Odrezano vejico smo vstavili v luknjico gumijastega tesnila, namestili v pokrov in vse skupaj vstavili v komoro ter dobro zaprli pokrov. Odrezano površino smo opazovali s povečevalnim steklom in hkrati s počasnim odpiranjem ventila za dovod plina povečevali tlak v komori. Ko se je na odrezani površini

pojaviła ksilemska tekočina, smo ventil zaprli in odčitali tlak. Ta po velikosti ustreza ksilemskemu negativnemu tlaku, ki je bil v poganjku preden smo ga odrezali.

Meritve smo opravili med 11. in 14. uro, na petih rastlinah.



Slika 8: Merjenje vodnega potenciala rastlin.
Figure 8: Measurement of the plant water potential.

3.3.2.2 Fotokemična učinkovitost

Fotokemično učinkovitost fotosistema II (FS II) smo določili z modulacijskim fluorometrom OS-500 (OPTI-SCIENCES, Tyngsboro, MA, USA) preko meritev klorofilne fluorescence. Metoda predstavlja zelo uporabno in informativno tehniko merjenja fotosinteznega elektronskega transporta *in vivo* (Raghavendra, 2000). Meritve smo izvedli okrog poldneva pri sončnem vremenu, ko je bila gostota toka fotonov fotosintezno aktivnega spektra sevanja (PPFD) večja ali enaka $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Merili smo potencialno fotokemično učinkovitost FS II, s časom prehodne zatemnitve 10 minut in pulzom bele svetlobe saturacijske jakosti ($\text{PPFD} \approx 8000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, trajanje 0,8 s). Fluorescenco smo izrazili kot količnik variabilne (F_v) in maksimalne (F_m) fluorescence temotno adaptiranega vzorca (F_v/F_m), kjer variabilna fluorescenca predstavlja razliko med maksimalno in minimalno (F_o) fluorescenco temotno adaptiranega vzorca ($F_v = F_m - F_o$). Razmerje F_v/F_m dosega optimalne vrednosti okrog 0,83.

Manjše vrednosti nakazujejo na izpostavljenost rastline stresu, ki se odraža v fotoinhibiciji (Maxwell in Johnson, 2000).

Dejansko fotokemično učinkovitost FS II smo merili na osvetljenih vzorcih s saturacijskim pulzom bele svetlobe ($PPFD \approx 9000 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, trajanje 0,8 s). Izrazili smo jo kot količnik variabilne in maksimalne (F_m s) fluorescence osvetljenega vzorca ($Y = F_m - F_s / F_m$), kjer je variabilna fluorescenca predstavljala razliko med maksimalno in minimalno (F_s) fluorescenco osvetljenega vzorca ($F_m - F_s$).

Na vsaki od petih rastlin smo opravili tri meritve potencialne in dejanske fotokemične učinkovitosti.

3.3.2.3 Transpiracija

Transpiracija je oddajanje vode iz nadzemnih delov kopenskih rastlin. Razlika v vodnem potencialu tal in vodnem potencialu zraka je gonilna sila za transpiracijski tok, t.j. gibanje vode iz tal, skozi korenine v rastlino in po rastlini skozi liste v atmosfero. Koliko vode rastlina odda s transpiracijo, je odvisno od omenjene razlike v vodnem potencialu in pa od upora vodnemu toku, ki ga imajo tla, rastlina in mejna plast zraka.

Za merjenje transpiracije oziroma stomatalne prevodnosti smo uporabili listni porometer tipa SC-1. Merjenje temelji na zaznavanju vlažnosti s pomočjo dveh senzorjev v območju listne površine. Merjenje smo na vsaki vzorčni rastlini ponovili štirikrat.

3.3.2.4 Analiza vsebnosti fotosinteznih pigmentov

Klorofil *a* in *b* sta komponenti fotosinteznih membran in se pojavljata v razmerju *a/b* med 1 in 3. Glede na rastiščne razmere in okoljske dejavnike se lahko to razmerje spreminja. Pri rastlinah izpostavljenih močnemu soncu je razmerje *a/b* med 3,2 in 4, pri rastlinah v senci pa so te vrednosti manjše, in sicer med 2,5 in 2,9 (Lichtenthaler, 1987).

Od petih izbranih rastlin smo na terenu odrezali manjšo vejico, skupaj 5 vejic na vzorčno mesto. Sveže iglice smo stehali in jih nato posušili v liofilizerju Christ 2-4α. Vsebnost

klorofila *a* in *b* ter karotenoide smo določili laboratorijsko s pomočjo homogenizacije materiala z 90 % acetonom. Vzorce smo zmleli v terilnici v 7 ml 90 % acetona in homogenat centrifugirali 4 minute pri $v=10\,000$ Hz in $T=4^{\circ}\text{C}$ (Jeffrey in Humphrey, 1975). Po centrifugiranju smo izmerili volumen ekstrakta.

S spektrofotometrom (HP 8452A, Palo Alto, CA, USA) smo izmerili ekstinkcije pri valovnih dolžinah 662 in 645 nm. Skupno vsebnost klorofila smo izrazili na suho maso vzorca in izračunali razmerje med klorofiloma *a* in *b*. Vsebnosti fotosinteznih pigmentov smo merili na enoletnih in dvoletnih poganjkih.

Vsebnost klorofilov *a* in *b* smo izračunali po enačbah:

$$\text{klorofil } a = 11,24 \times E_{662} - 2,04 \times E_{645} \times V_a / G \times 1000 \text{ (mg kl } a \text{ g}^{-1} \text{ G)} \quad \dots(1)$$

$$\text{klorofil } b = 20,13 \times E_{645} - 4,19 \times E_{662} \times V_a / G \times 1000 \text{ (mg kl } b \text{ g}^{-1} \text{ G)} \quad \dots(2)$$

E - ekstinkcija pri izbrani valovni dolžini

V_a - volumen acetona

G - masa suhega vzorca

3.3.2.5 Analiza vsebnosti ionov v iglicah

Deleže suhe snovi iglic smo izračunali iz vzorca desetih iglic posameznega starostnega razreda, ki smo jih sušili v sušilniku Sterimatic ST-11 (Instrumentaria, Zagreb), 24 ur, pri temperaturi 105°C . Za tehtanje smo uporabljali miligramsko tehtnico Sartorius.

3.3.2.6 Merjenje biomase

Rast rastlin smo spremljali z merjenjem suhe teže vejic in iglic. Na smrekah visokih približno dva metra smo na strani obrnjeni proti cesti na vzorčnih mestih V1s, V3s in V6ns odrezali po šest vej. Glavno vejo smo razrezali po posameznih letih in vejice sušili 48 ur na 105°C . Po zaključku sušenja smo ločeno stehali vejice in iglice. Biomaso smo spremljali od leta 2009 do 2014.

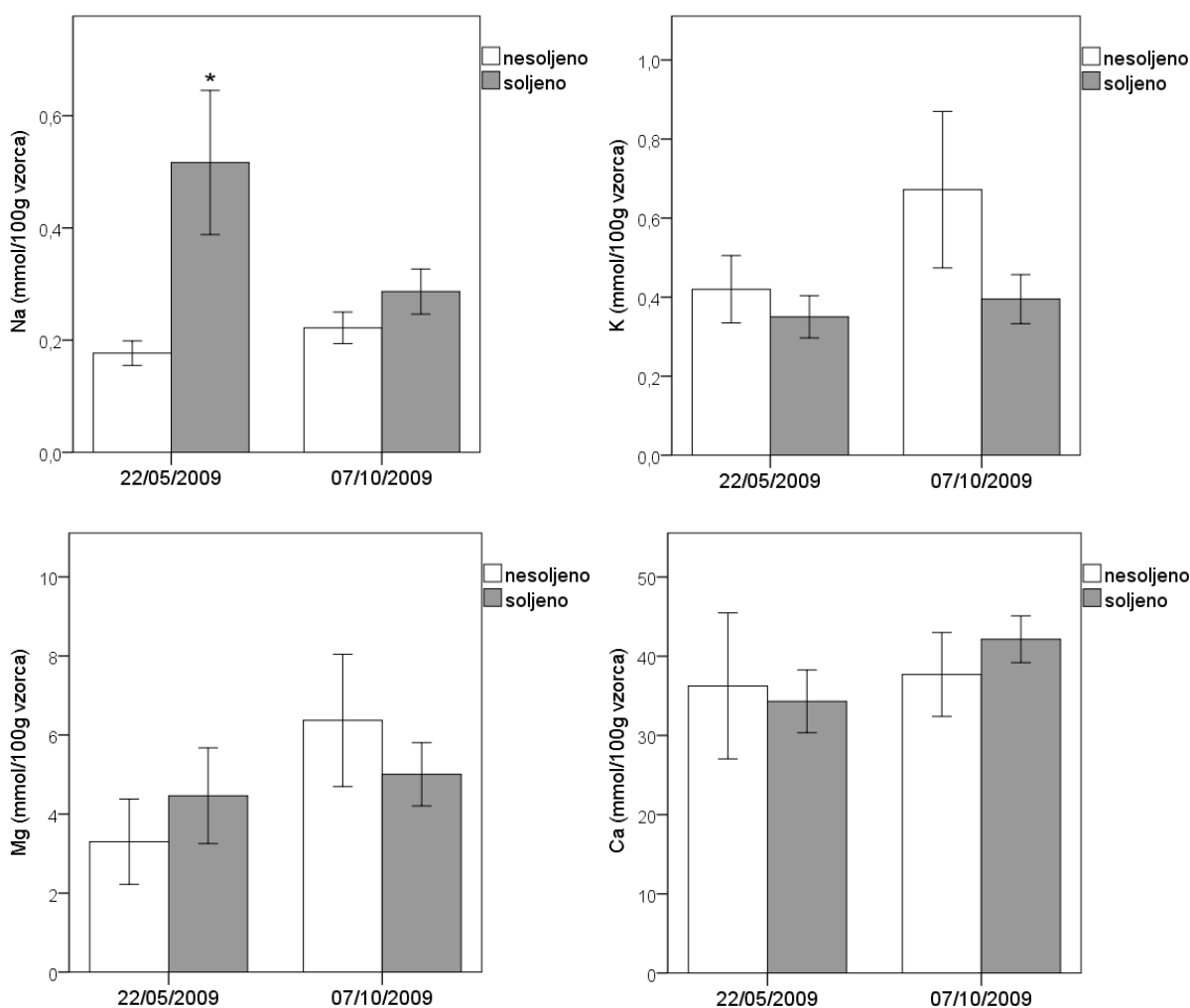
3.3.2.7 Statistične analize

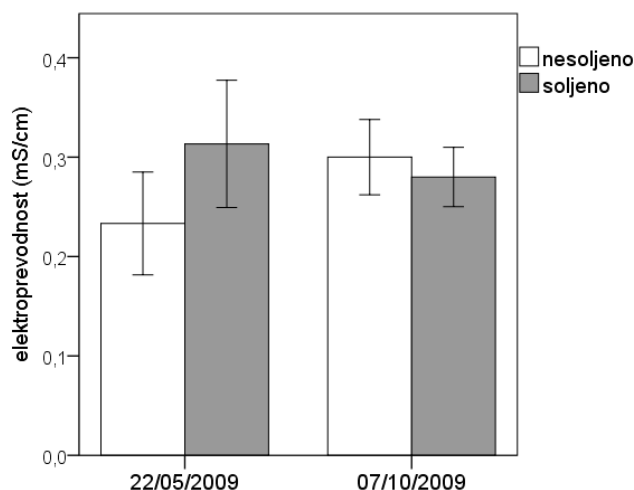
Za statistično primerjavo merjenih parametrov med vzorčnimi mesti in vplivom soljenja cest smo uporabili enosmerno analizo variance (ANOVA) in Scheffe *post-hoc* test pri $p < 0,05$. Pri primerjavi ekoloških in fizioloških parametrov, oziroma ugotavljanju statistično signifikantnih razlik, izmerjenih na soljenih in nesoljenih vzorčnih mestih, smo uporabili t-test. Vse statistične analize smo izvedli s pomočjo programa SPSS Statistics 20.

4 REZULTATI

4.1 KEMIJSKE ANALIZE TAL TER SNEGA

Primerjali smo vsebnost K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} in Na^+ v tleh ter elektroprevodnost na nesoljenih in soljenih mestih v spomladanskem (22. 5. 2009) in jesenskem času (7. 10. 2009). Pri vsebnosti K^+ , Ca^{2+} in Mg^{2+} ter elektroprevodnosti razlike med soljenimi in nesoljenimi rastišči niso bile statistično značilne, prav tako pri nobenem od omenjenih parametrov ni bilo statističnih razlik med obema obdobjema vzorčenja. Statistično značilna razlika med nesoljenimi in soljenimi mesti pa se je pokazala v vsebnosti Na^+ v mesecu maju, ko je bila vsebnost značilno večja na soljenih rastiščih kot na nesoljenih, medtem, ko oktobra te razlike ni bilo več (T-test, * - $p < 0,05$) (Slika 9).

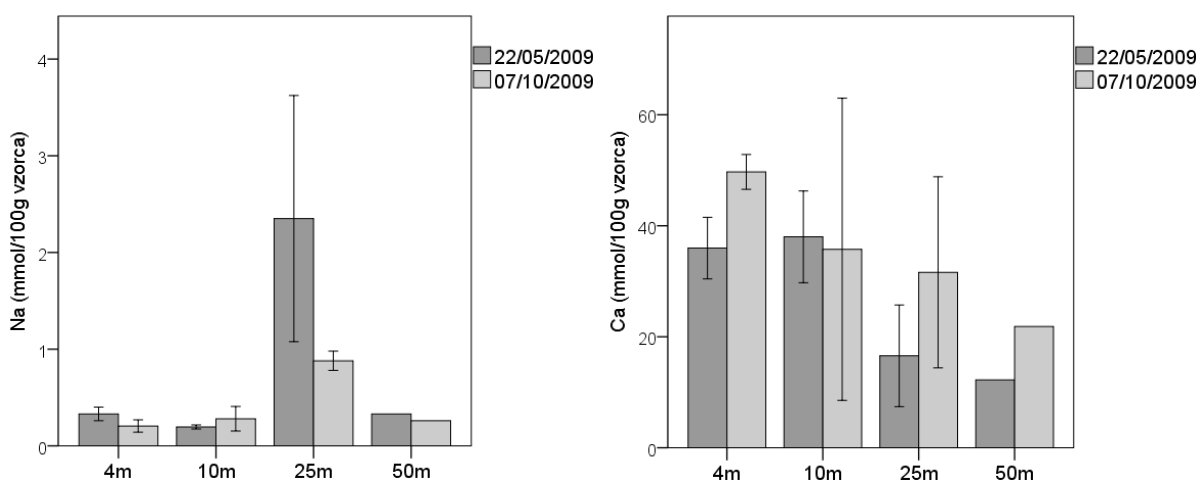


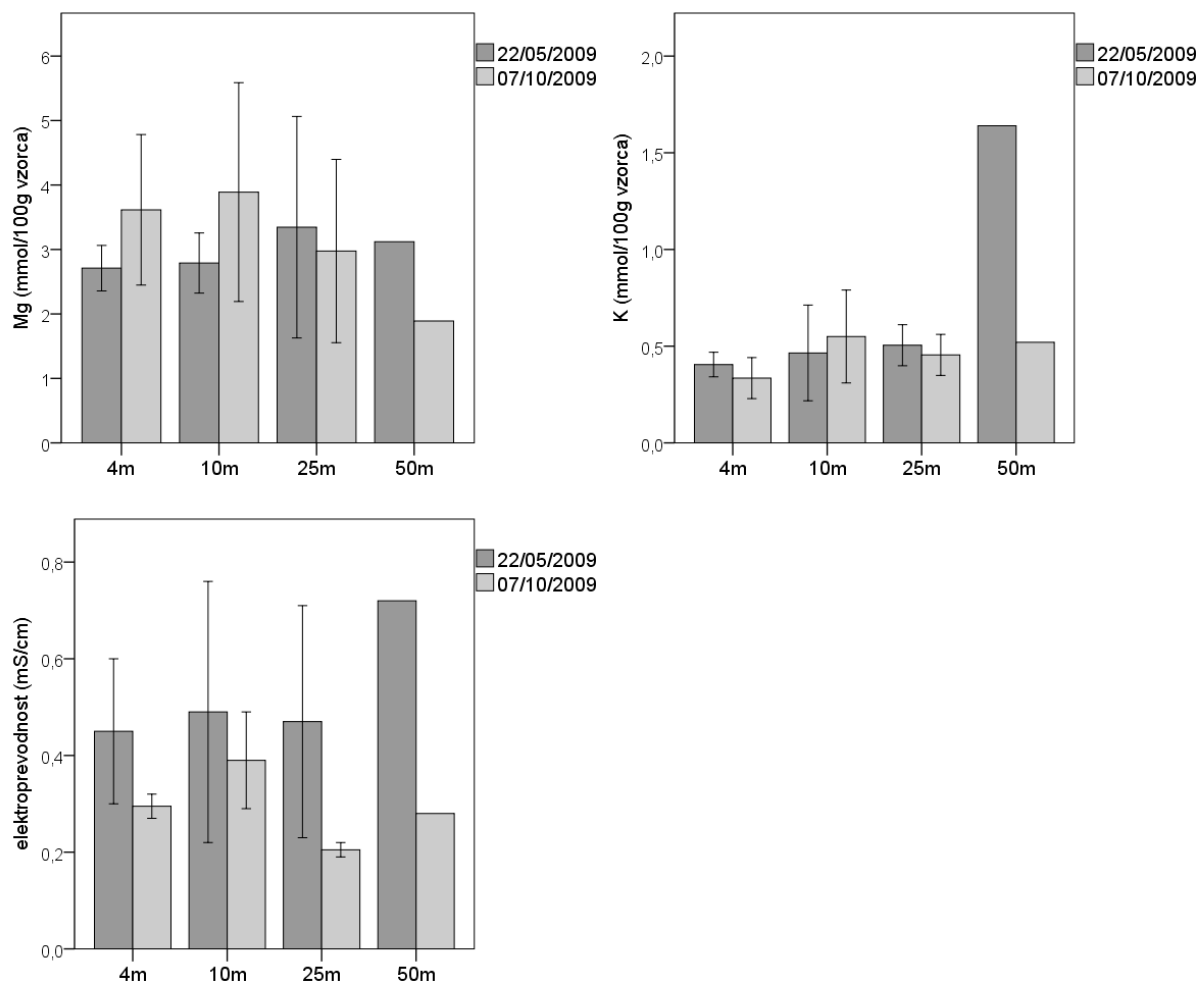


Slika 9: Primerjava vsebnosti K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} in Na^+ ter elektroprevodnosti v tleh na nesoljenih in soljenih vzorčnih mestih (4 m) v spomladanskem in jesenskem času (T-test, povprečje $\pm$ SD, * - $p < 0,05$).

Figure 9: Comparison of the content of K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} and Na^+ in the soil, as well as the electrical conductivity of the soil in unsalted and salted sampling sites (4 m) in spring and autumn (T-test, mean $\pm$ SD, * - $p < 0.05$).

Pri merjenju vsebnosti K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} in Na^+ v tleh ter elektroprevodnosti na soljenih lokacijah na različnih razdaljah od ceste, smo izmerili največje koncentracije Na^+ na oddaljenosti 25 m v maju 2009. V oktobru 2009 je bila vrednost za 1,5x manjša, a še vedno je bila na tej razdalji vsebnost Na v tleh največja. Opazno je bilo tudi zmanjševanje Ca^{2+} na gradientu oddaljenosti od ceste, ki je bila očitna, tako spomladi kot jeseni, medtem, ko je bil za Mg^{2+} takšen trend opazen le jeseni. Vrednosti elektroprevodnosti se na različnih razdaljah ne spreminjajo veliko, so pa v primerjavi z obema obdobjema merjenja, jeseni vrednosti nekoliko nižje (Slika 10).

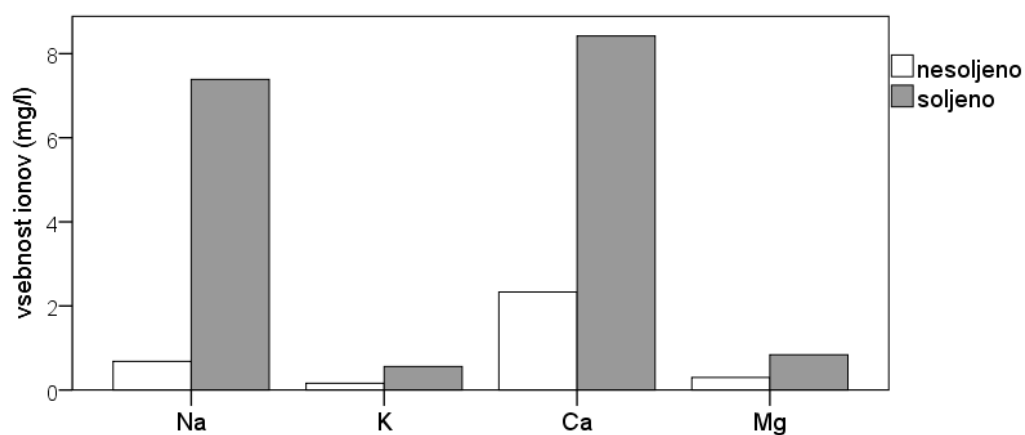




Slika 10: Primerjava vsebnosti K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} in Na^+ ter elektroprevodnosti v tleh na soljenih vzorčnih mestih v spomladanskem in jesenskem času na različnih oddaljenostih od ceste (4m, 10 m, 25 m in 50 m).

Figure 10: Comparison of the content of K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} and Na^+ in the soil, as well as the electrical conductivity of the soil in salted sampling sites in spring and autumn at different distances from the road (4m, 10 m, 25 m and 50 m).

V vzorcih snega, ki smo jih odvzeli na nesoljenih in soljenih vzorčnih mestih smo primerjali vsebnost K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} in Na^+ . Na soljenih mestih smo izmerili približno 7-krat večje koncentracije Na^+ in 3-krat več Ca^{2+} , kot na nesoljenih rastiščih, medtem, ko so bile vrednosti K^+ in Mg^{2+} bolj ali manj enake na obeh mestih (Slika 11). Zaradi premajhnega števila meritev nismo mogli izračunati potencialnih statistično značilnih razlik.



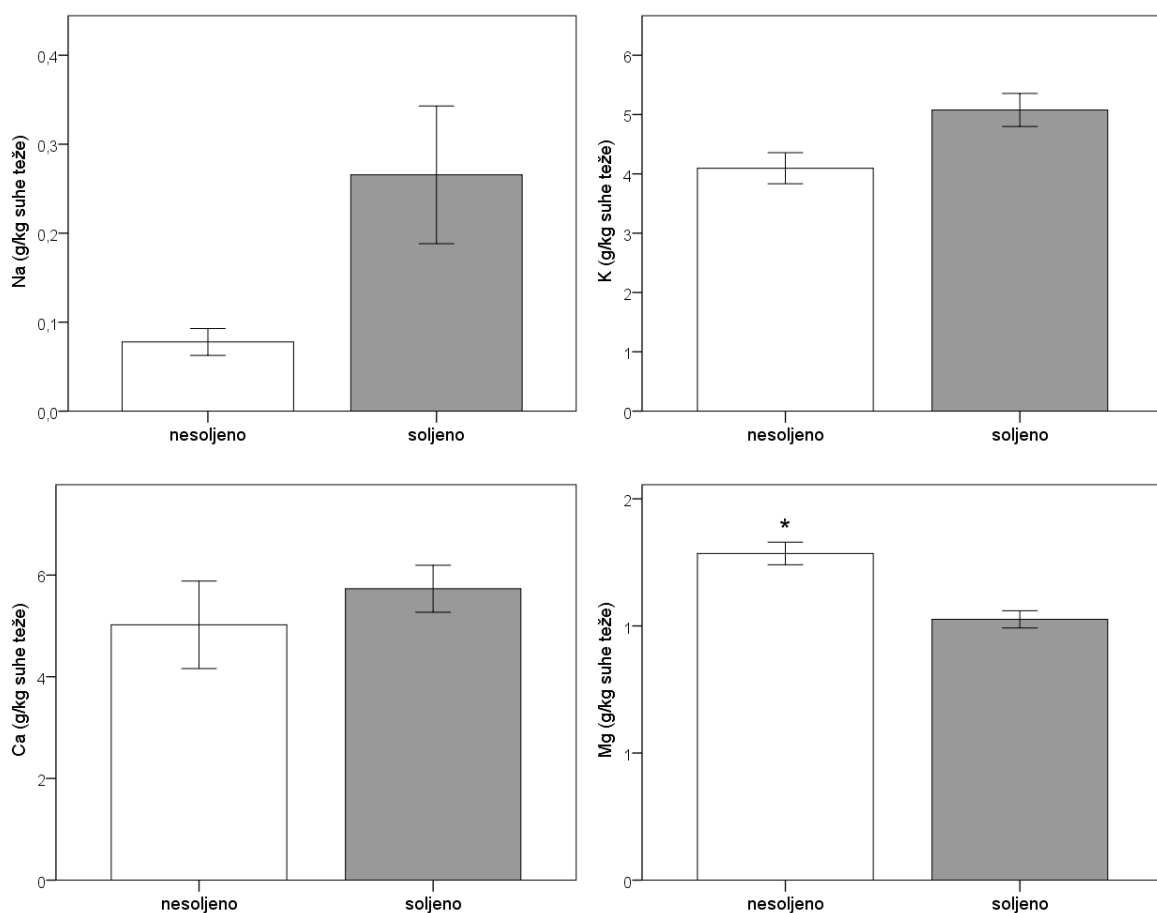
Slika 11: Primerjava vsebnosti K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} in Na^+ v snegu odvzetem 26. 5. 2009 na nesoljenih in soljenih vzorčnih mestih (4m).

Figure 11: Comparison of the content of K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} and Na^+ in the snow sampled on May 26th 2009, in unsalted and salted sampling sites (4m)

4.2 VSEBNOST IONOV V IGLICAH

Pri primerjavi vsebnosti Na^+ , K^+ , Ca^{2+} in Mg^{2+} v iglicah na soljenih in nesoljenih vzorčnih mestih smo izračunali statistično značilne razlike le za vsebnost Mg^{2+} , ki so bile manjše na soljeni lokaciji (T-test, $*p < 0,05$) (Preglednica 6, Slika 12).

Pri primerjavi vsebnosti Na^+ , K^+ , Ca^{2+} (Slika 13) v enoletnih in dvoletnih iglicah, smo ugotovili, da so bile koncentracije K^+ v enoletnih iglicah večje kot v dvoletnih, s tem, da so bile statistično značilno večje na soljenem rastišču. Vsebnost Ca^{2+} pa je bila večja v dvoletnih iglicah kot v enoletnih. Tudi v tem primeru je bila vsebnost večja na soljenem rastišču.



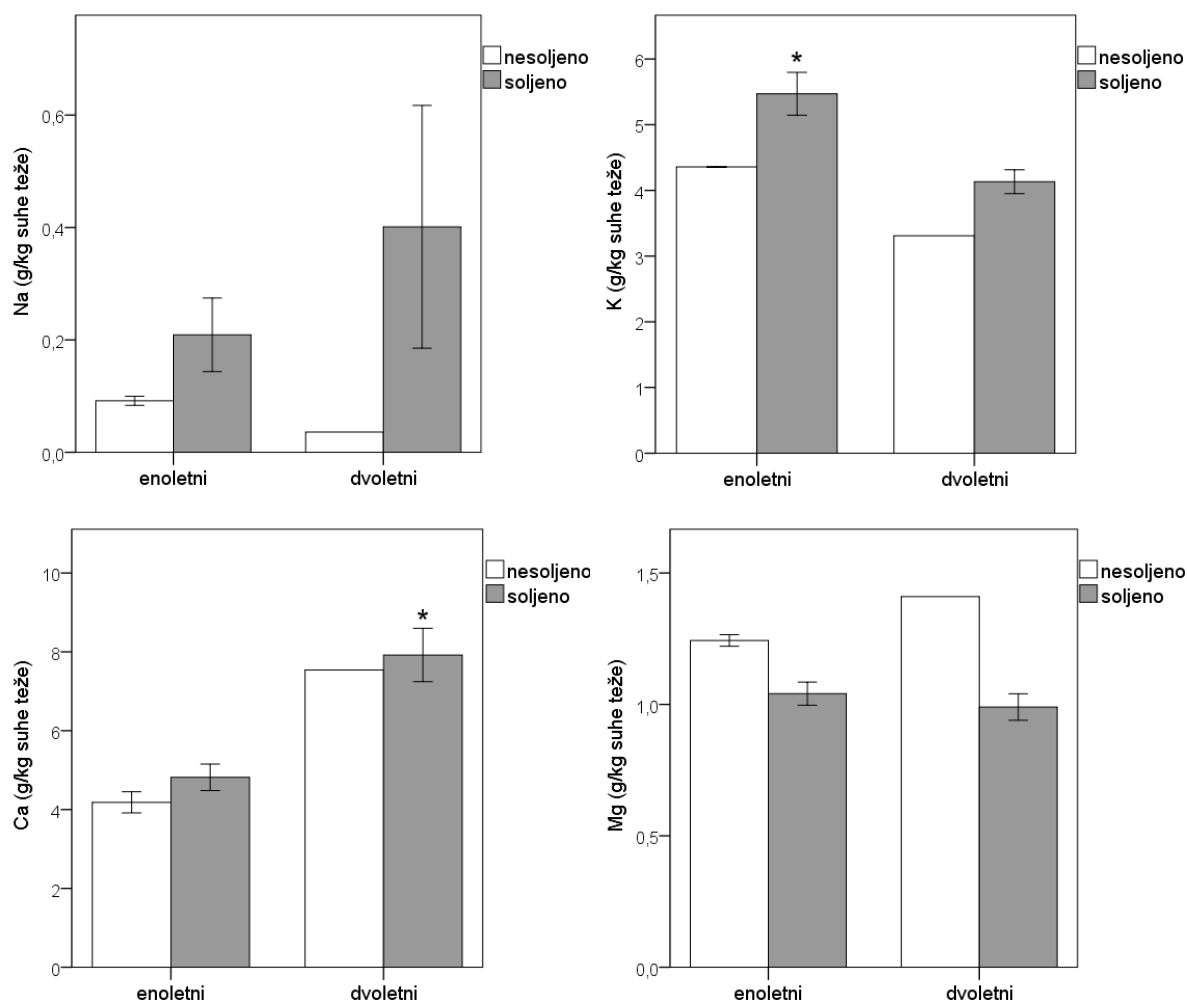
Slika 12: Vsebnost Na^+ , K^+ , Ca^{2+} in Mg^{2+} v iglicah smreke na soljenih in nesoljenih vzorčnih mestih (T-test, $*p < 0,05$).

Figure 12: The content of Na^+ , K^+ , Ca^{2+} and Mg^{2+} in the needles of Norway spruce in salted and unsalted sampling sites (T-test, $*p < 0.05$).

Preglednica 6: Vsebnost ionov (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} in Mg^{2+}) v iglicah (povprečje $\pm$ SD, T-test, $*p < 0,05$) (ST=suha teža).

Table 6: The content of ions (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} and Mg^{2+}) in the needles (mean $\pm$ SD, T-test, $*p < 0.05$) (ST = dry weight).

Na (g/kg ST)		K (g/kg ST)		Ca (g/kg ST)		Mg (g/kg ST)	
nesoljeno	Soljeno	nesoljeno	soljeno	nesoljeno	soljeno	nesoljeno	Soljeno
0,08 $\pm$ 0,03	0,3 $\pm$ 0,3	4,1 $\pm$ 0,5	5,08 $\pm$ 1,1	5,0 $\pm$ 1,7	5,7 $\pm$ 1,9	1,3 $\pm$ 0,09 *	1,0 $\pm$ 0,1



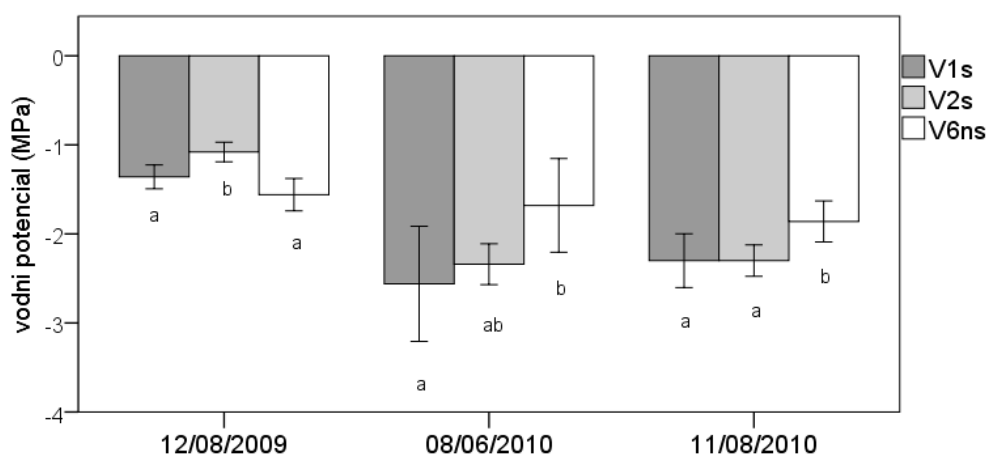
Slika 13: Vsebnost Na^+ , K^+ , Ca^{2+} in Mg^{2+} v enoletnih in dvoletnih iglicah smreke na soljenih in nesoljenih vzorčnih mestih (T-test, $*p < 0,05$).

Figure 13: The content of Na^+ , K^+ , Ca^{2+} and Mg^{2+} in 1-year and 2-year old Norway spruce needles in salted and unsalted sampling sites (T-test, $*p < 0.05$).

4.3 FIZIOLOŠKE MERITVE

4.3.1 Vodni potencial

Vrednosti vodnega potenciala (Ψ_w) so bile v avgustu 2009 statistično različne na V2s od tistih na V1s in V6ns. V juniju in avgustu 2010 so bile absolutne vrednosti na vseh soljenih lokacijah manjše. Junija 2010 so bile vrednosti na enem od soljenih rastišč (V1s) statistično značilno manjše od tistih na nesoljenem (V6n), v avgustu pa na obeh soljenih (V1s, V2s). Vrednosti na soljenih vzorčnih mestih so nekoliko manjše na začetku vegetacijske sezone (v juniju) (Slika 14).



Slika 14: Vodni potencial (Ψ_w) na treh vzorčnih mestih (4m) (povprečje $\pm$ SD, $n=15$). Enosmerna ANOVA, Scheffe *post-hoc* test. Različne črke označujejo statistično značilno razliko pri $p<0,05$ med ploskvami znotraj istega datuma (a in b, pri čemer je najmanjša vrednost označena z »a«).

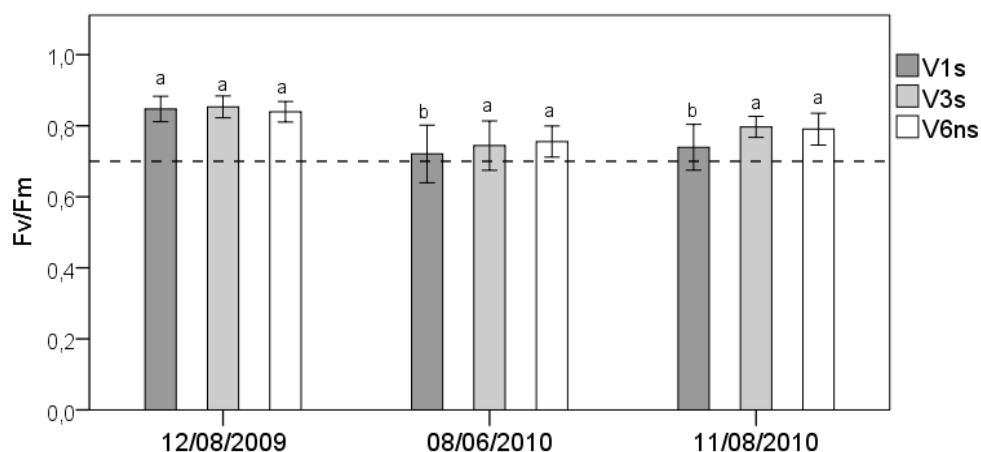
Figure 14: Water potential (Ψ_w) in three sampling sites (4m) (mean $\pm$ SD, $n = 15$). One-way ANOVA, Scheffe *post-hoc* test. Different letters indicate statistically significant difference at $p<0,05$ between the sites within the same date (a and b, where the lowest value is indicated by »a«).

Vrednosti vodnega potenciala na različnih oddaljenostih od ceste so bile v obeh mesecih izvajanja meritev približno enake (Slika A. 2), oziroma nismo izračunali statistično značilnih razlik znotraj gradienta.

Pri primerjavi vodnega potenciala in količine padavin (Slika 5) smo izračunali pozitivno korelacijo med obema parametroma (vodni potencial je večji pri večji količini padavin) (Dvosmerni Pearsonov test korelacije: $p\leq 0,05$, **) (Priloga B).

4.3.2 Fotokemična učinkovitost

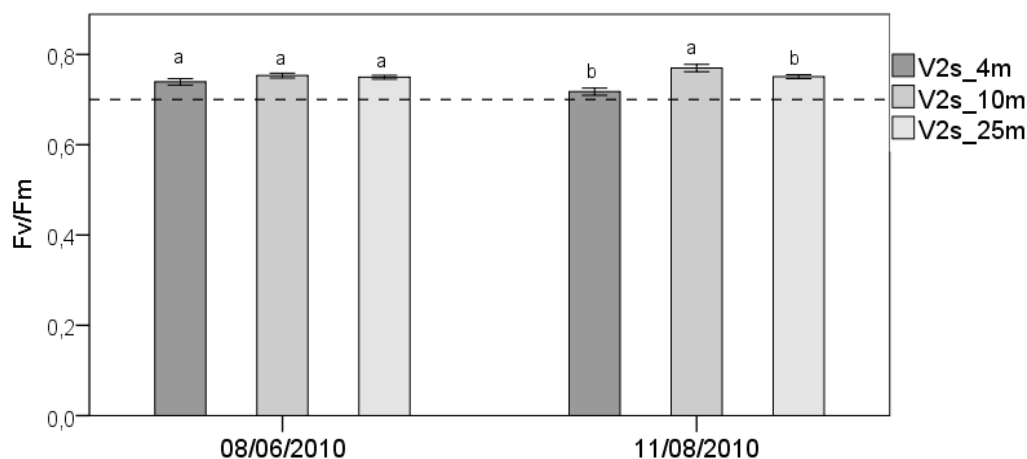
Vrednosti potencialne fotokemične učinkovitosti PS2 (F_v/F_m) so bile v avgustu 2009 približno enake na vseh treh vzorčnih mestih. Junija in avgusta 2010 so bile vrednosti statistično značilno manjše na V1s od tistih na V3s (soljeno) in V6ns (nesoljeno). Vrednosti v letu 2010 so na vseh vzorčnih mestih povprečno manjše od 0,8. Na začetku vegetacijske sezone, v juniju so bile na vseh treh ploskvah vrednosti najmanjše, v avgustu pa smo v obeh letih zabeležili večje vrednosti (Slika 15).



Slika 15: Potencialna fotokemična učinkovitost PS2 (F_v/F_m) na treh vzorčnih mestih (4m) (povprečje $\pm$ SD, $n=45$). Enosmerna ANOVA, Scheffe *post-hoc* test. Različne črke označujejo statistično značilno razliko pri $p<0,05$ med ploskvami znotraj istega datuma (a in b, pri čemer je največja vrednost označena z »a«).

Figure 15: Potential photochemical efficiency of PS2 (F_v / F_m) at three sampling sites (4m) (mean $\pm$ SD, $n = 45$). One-way ANOVA, Scheffe *post-hoc* test. Different letters indicate statistically significant difference at $p<0,05$ between the sites within the same date (a and b, where the highest value is indicated by »a«).

Vrednosti potencialne fotokemične učinkovitosti PS2 (F_v/F_m) smo leta 2010 na soljenem vzorčnem mestu (V2s) izmerili tudi na različnih oddaljenostih od ceste (4m, 10m in 25m). V juniju so bile vrednosti na vseh mestih enake, v avgustu pa so bile vrednosti na 10 m razdalji statistično različne ($p < 0,05$), oziroma večje od tistih na oddaljenosti 4 in 25 m (Slika 16).



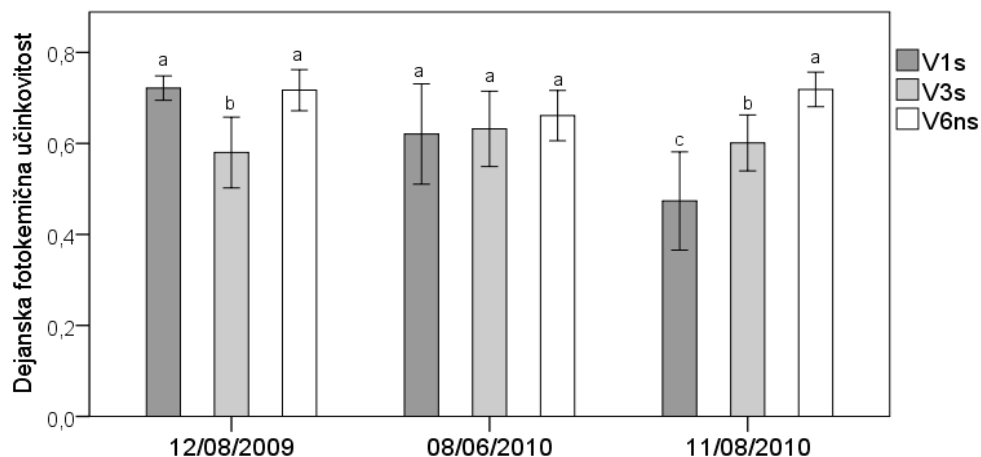
Slika 16: Potencialna fotokemična učinkovitost PS2 (Fv/Fm) na treh vzorčnih mestih različno oddaljenih od ceste (4m, 10m, 25m) (povprečje $\pm$ SD, n=45). Enosmerna ANOVA, Scheffe *post-hoc* test. Različne črke označujejo statistično značilno razliko pri $p < 0,05$ med ploskvami znotraj istega datuma (a in b, pri čemer je največja vrednost označena z »a«).

Figure 16: Potential photochemical efficiency of PS2 (Fv / Fm) in three different sampling sites at different distances from the road (4m, 10m, 25m) (mean $\pm$ SD, n = 45). One-way ANOVA, Scheffe *post-hoc* test. Different letters indicate statistically significant difference at $p < 0,05$ between the sites within the same date (a and b, where the highest value is indicated by »a«).

Pri primerjavi potencialne fotokemične učinkovitosti PS2(Fv/Fm) in količine padavin (Slika 5) smo izračunali pozitivno korelacijo med obema parametroma (Dvosmerni Pearsonov test korelacije: $p \leq 0,05$, **) (Priloga B).

Vrednosti dejanske fotokemične učinkovitosti so bile avgusta 2009 statistično različno majše V3s od tistih na V1s in V6ns. Junija 2010 razlik med posameznimi mesti ni bilo, avgusta pa so bile vrednosti značilno različne na vseh treh mestih. Vrednosti so bile na obeh soljenih mestih (V1s, V3s) manjše od tistih na nesoljenem mestu (V6ns) (Slika 17).

Vrednosti potencialne fotokemične učinkovitosti PS2 (Fv/Fm) smo leta 2010 na soljenem vzorčnem mestu (V2s) izmerili tudi na različnih oddaljenostih (4m, 10m in 25m). Pri tem nismo izračunali statistično značilnih razlik v vrednostih z vseh treh mest. Enako velja za primerjavo med različnimi obdobji merjenja (Slika A. 3).



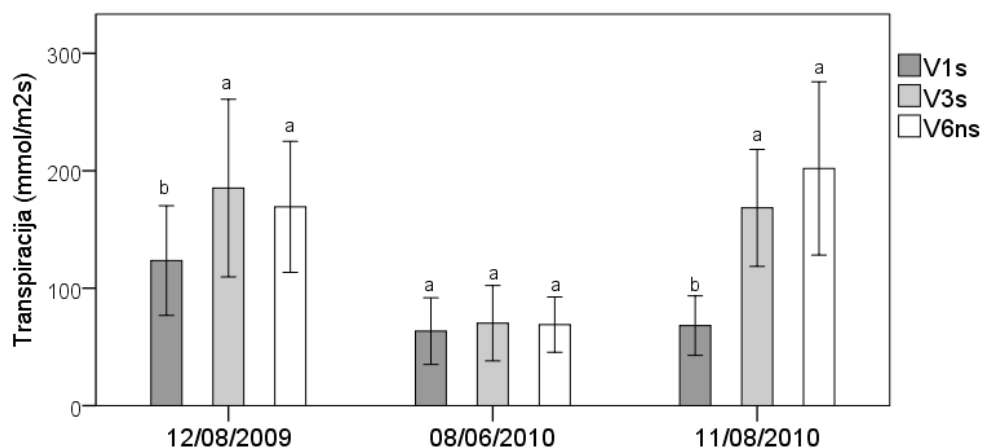
Slika 17: Dejanska fotokemična učinkovitost PSII na treh vzorčnih mestih (4m) (povprečje $\pm$ SD, $n=45$). Enosmerna ANOVA, Scheffe *post-hoc* test. Različne črke označujejo statistično značilno razliko pri $p<0,05$ med ploskvami znotraj istega datuma (a, b in c, pri čemer je največja vrednost označena z »a«).

Figure 17: Effective quantum yield of PSII in three sampling sites (4m) (mean $\pm$ SD, $n = 45$). One-way ANOVA, Scheffe *post-hoc* test. Different letters indicate statistically significant difference at $p<0,05$ between the sites within the same date (a, b and c, where the highest value is indicated by »a«).

Pri primerjavi dejanske fotokemične učinkovitosti PS2 (Y) in količine Na^+ v iglicah smo izračunali negativno korelacijo med obema parametroma (vrednosti dejanska fotokemične učinkovitosti so manjše pri večji vsebnosti Na^+ v iglicah) (Dvosmerni Pearsonov test korelacije: * $p \leq 0,05$) (Priloga B).

4.3.3 Transpiracija

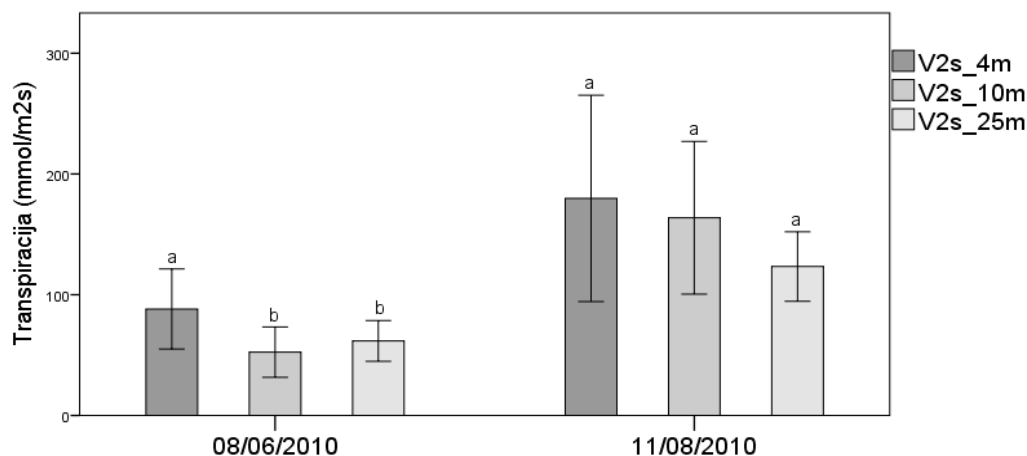
Vrednosti transpiracije so bile manjše ($p < 0,05$) v mesecu avgustu leta 2009 in 2010 na V1s v primerjavi z V3s in V6ns. V juniju 2010 med vrednostmi na vse treh mestih ni bilo opaznih razlik, obenem pa so bile junijske vrednosti manjše od avgustovskih vrednosti. Časovni potek na vzorčnih mestih V3s in V6ns kaže na najmanjše vrednosti transpiracije v juniju (Slika 18).



Slika 18: Transpiracija na treh vzorčnih mestih (4 m) (povprečje $\pm$ SD, $n=60$). Enosmerna ANOVA, Scheffe *post-hoc* test. Različne črke označujejo statistično značilno razliko pri $p<0,05$ med ploskvami znotraj istega datuma (a, in b, pri čemer je največja vrednost označena z »a«).

Figure 18: Transpiration rate in three sampling sites (4 m) (mean $\pm$ SD, $n = 60$). One-way ANOVA, Scheffe *post-hoc* test. Different letters indicate statistically significant difference at $p<0,05$ between the sites within the same date (a and b, where the highest value is indicated by »a«).

Vrednosti transpiracije vzdolž gradienta oddaljenosti od ceste, so v juniju 2010 na 4m statistično značilno večje od tistih na 10 in 25 m. V avgustu so vrednosti v povprečju še vedno večje ob cesti in upadajo z oddaljenostjo, vendar razlike niso več statistično značilne (Slika 19).



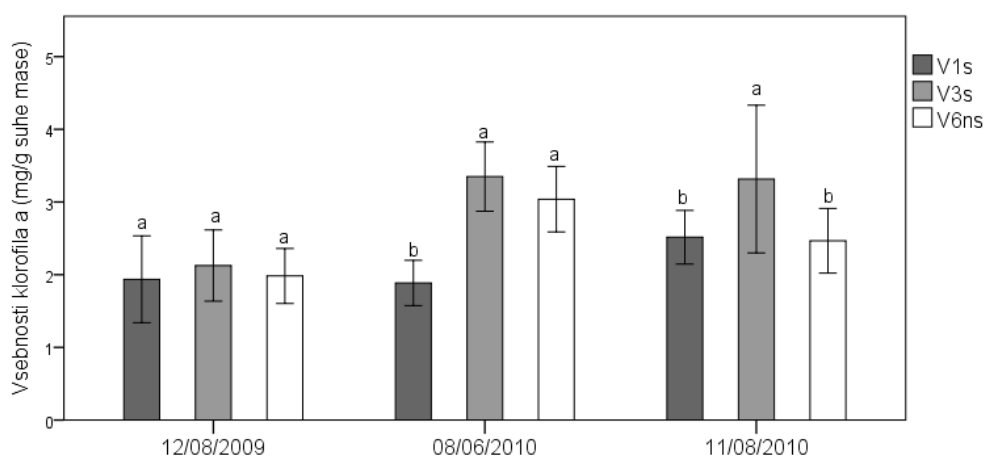
Slika 19: Transpiracija na treh vzorčnih mestih različno oddaljenih od ceste (4m, 10m, 25m) (povprečje $\pm$ SD, $n= 60$). Enosmerna ANOVA, Scheffe *post-hoc* test. Različne črke označujejo statistično značilno razliko pri $p<0,05$ med ploskvami znotraj istega datuma (a in b, pri čemer je največja vrednost označena z »a«).

Figure 19: Transpiration rate at three sampling plots at different distances from the road (4m, 10m, 25m) (mean $\pm$ SD, $n = 60$). One-way ANOVA, Scheffe *post-hoc* test. Different letters indicate statistically significant difference at $p < 0,05$ between the sites within the same date (a and b, where the highest value is indicated by »a«).

Pri primerjavi transpiracije in količine padavin (Slika 5) smo izračunali pozitivno korelacijo med obema parametroma (Dvosmerni Pearsonov test korelacije: $p\leq 0,05$, **) (Priloga B).

4.4 VSEBNOST FOTOSINTEZNIH BARVIL

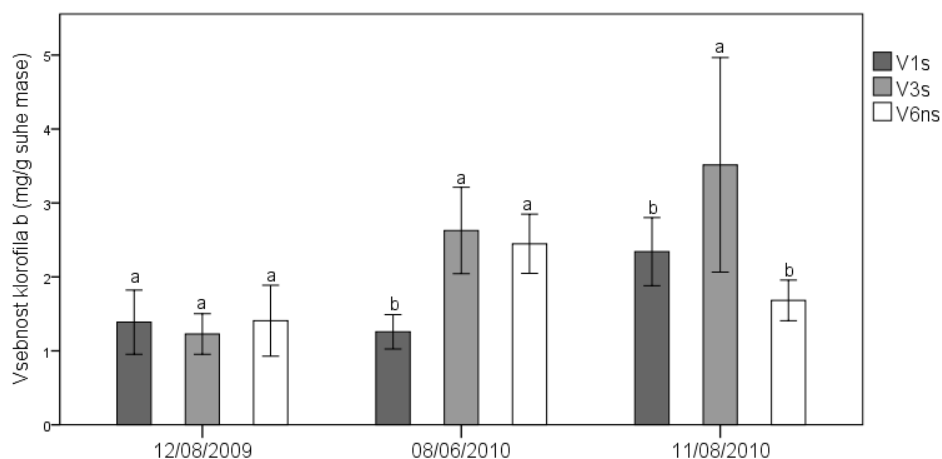
Vrednosti klorofila *a* so bile v avgustu 2009 najmanjše na vseh treh vzorčnih mestih, vendar med njimi ni bilo statistično značilnih razlik. V letu 2010 so bile vsebnosti klorofila *a* med soljenimi in soljenimi lokacijami statistično različne v juniju in avgustu na Vs1, v avgustu pa tudi na V6ns. V avgustu 2009 so bile izmerjene najmanjše vrednosti, med vzorčnimi mesti pa ni bilo statističnih razlik. V letu 2010 so bile v obeh mesecih izmerjene največje vrednosti na V3s (Slika 20).



Slika 20: Vsebnost klorofila *a* na treh vzorčnih mestih (4 m) (povprečje $\pm$ SD, $n=45$). Enosmerna ANOVA, Scheffe *post-hoc* test. Različne črke označujejo statistično značilno razliko pri $p<0,05$ med ploskvami znotraj istega datuma (a, in b, pri čemer je največja vrednost označena z »a«).

Figure 20: The content of chlorophyll *a* in the three sampling sites (4 m) (mean $\pm$ SD, $n = 45$). One-way ANOVA, Scheffe *post-hoc* test. Different letters indicate statistically significant difference at $p<0,05$ between the sites within the same date (a and b, where the highest value is indicated by »a«).

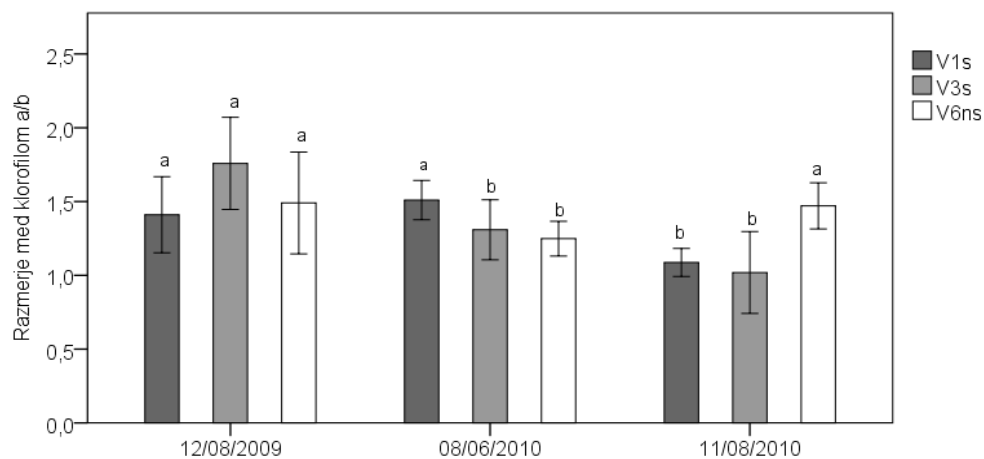
Vsebnosti klorofila *b* so bile najmanjše v avgustu 2009, med vzorčnimi mesti ni bilo značilnih razlik. V letu 2010 so razlike v juniju med V1s in V3s ter V1s in V6ns, v avgustu med V1s V3s ter V3s in V6ns. Opazno je povečanje klorofila *b* na soljenih vzorčnih v avgustu 2010 v primerjavi z avgustom 2009 (Slika 21).



Slika 21: Vsebnost klorofila *b* na treh vzorčnih mestih (4 m) (povprečje $\pm$ SD, $n=45$). Enosmerna ANOVA, Scheffe *post-hoc* test. Različne črke označujejo statistično značilno razliko pri $p<0,05$ med ploskvami znotraj istega datuma (a, in b, pri čemer je največja vrednost označena z »a«).

Figure 21: The content of chlorophyll *b* at three sampling sites (4 m) (mean $\pm$ SD, $n = 45$). One-way ANOVA, Scheffe *post-hoc* test. Different letters indicate statistically significant difference at $p<0,05$ between the sites within the same date (a and b, where the highest value is indicated by »a«).

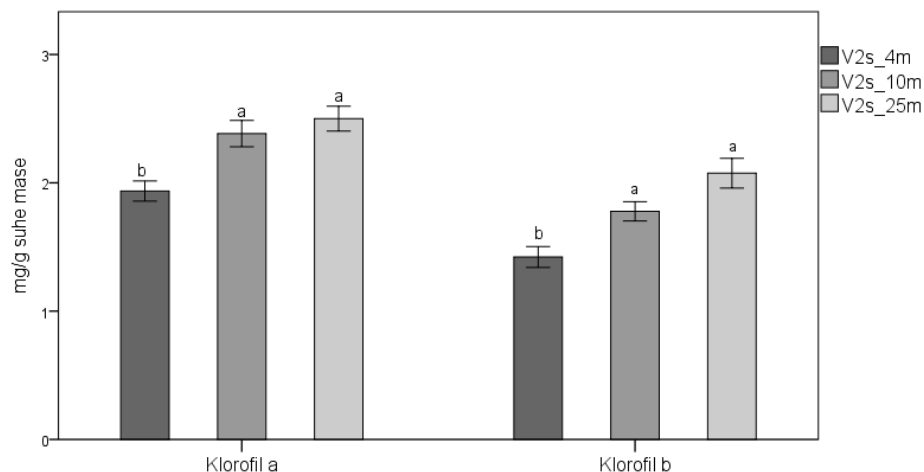
Za razmerje med vsebnostjo klorofila *a* in *b* (razmerje *a/b*) smo za leto 2010 izračunali statistično značilne razlike med vzorčnimi mesti. Na soljenih mestih so bile vrednosti v juniju večje, v avgustu pa manjše kot na nesoljenih. Statistične razlike so bile v juniju med V1s in V3s ter V6ns, v avgustu pa med nesoljenim in obema soljenima mestoma (Slika 22).



Slika 22: Razmerje vsebnosti klorofilov *a/b* na treh vzorčnih mestih (4m) (povprečje $\pm$ SD, $n=45$). Enosmerna ANOVA, Scheffe *post-hoc* test. Različne črke označujejo statistično značilno razliko pri $p<0,05$ med ploskvami znotraj istega datuma (a, in b, pri čemer je največja vrednost označena z »a«).

Figure 22: The ratio of the content of chlorophyll *a/b* at three sampling sites (4m) (mean $\pm$ SD, $n = 45$). One-way ANOVA, Scheffe *post-hoc* test. Different letters indicate statistically significant difference at $p < 0,05$ between the sites within the same date (a and b, where the highest value is indicated by »a«).

Vsebnosti klorofila *a* in *b* v iglicah so z oddaljenostjo od ceste na soljenem rastišču naraščale. Vsebnosti klorofilov *a* in *b* sta bili na razdalji 4 m statistično značilno manjši kot na razdalji 10 in 25 m (Slika 23).



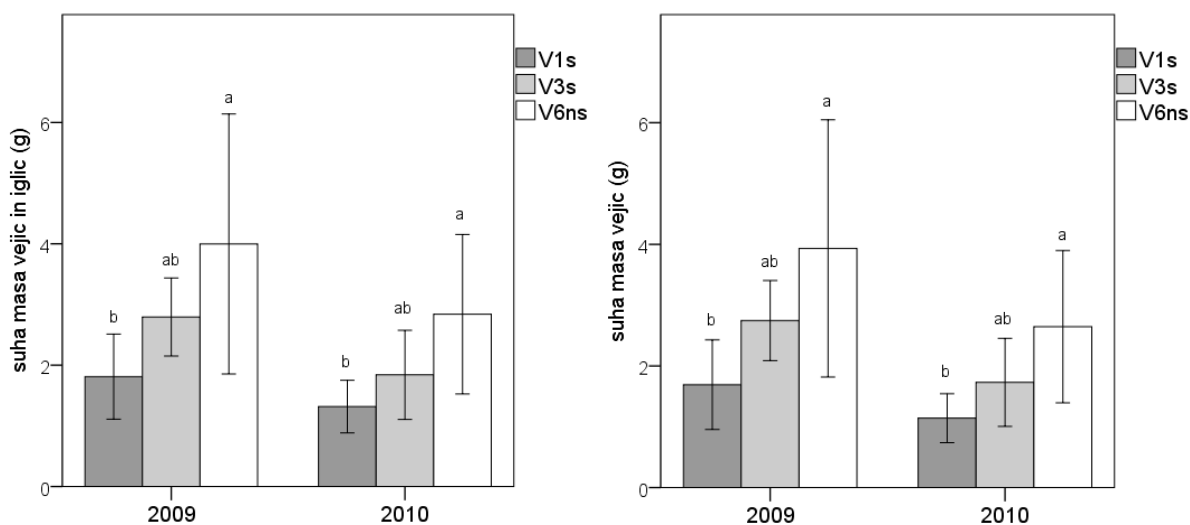
Slika 23: Vsebnost klorofila *a* in *b* na treh vzorčnih mestih različno oddaljenih od ceste (4m, 10m, 25m) (povprečje $\pm$ SD, $n = 45$). Enosmerna ANOVA, Scheffe *post-hoc* test. Različne črke označujejo statistično značilno razliko pri $p < 0,05$ med ploskvami znotraj istega datuma (a in b, pri čemer je največja vrednost označena z »a«).

Figure 23: The content of chlorophyll *a* and *b* in three sampling plots at different distances from the road (4m, 10m, 25m) (mean $\pm$ SD, $n = 45$). One-way ANOVA, Scheffe *post-hoc* test. Different letters indicate statistically significant difference at $p < 0,05$ between the sites within the same date (a and b, where the highest value is indicated by »a«).

4.5 BIOMASA

Za primerjavo rasti in razvoja rastlin na soljenih (V1s, V3s) in nesoljenih vzorčnih mestih (V6ns) smo primerjali dolžino osrednje osi vejic ter suho težo osrednje osi vejic in pripadajočih iglic od leta 2009 do 2014.

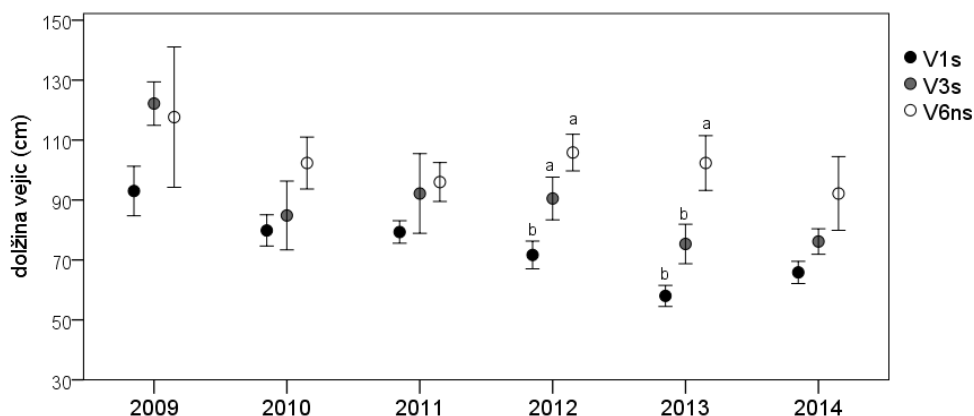
Posebej smo primerjali leti 2009 in 2010, ko smo opravili tudi druge kemijske in fiziološke meritve (Slika 24). Pri merjenju suhe mase vejic in iglic smo v obeh letih ugotovili statistično večje vrednosti na nesoljenem rastišču (V6ns) v primerjavi z nesoljenim V1s. Soljeno vzorčno mesto (V3s) se ni značilno razlikovalo drugih dveh mest (V1s, V6ns). Enak trend se je pokazal pri suhi masi vejic, medtem ko v dolžini vejic in masi iglic med letoma 2009 in 2010 ni bilo statističnih razlik (Slika A. 1).



Slika 24: Primerjava suhe mase vejic in iglic na treh vzorčnih mestih (4 m)(povprečje $\pm$ SD, $n=6$). Enosmerna ANOVA, Sheffe *post-hoc* test. Različne črke označujejo statistično značilno razliko pri $p<0,05$ med ploskvami znotraj istega leta (a in b, pri čemer je največja vrednost označena z »a«).

Figure 24: Comparison of the dry mass of twigs and needles from the three sampling sites (4 m) (mean $\pm$ SD, $n = 6$). One-way ANOVA, Sheffe *post-hoc* test. Different letters indicate statistically significant difference at $p<0,05$ between the sites within the same year (a and b, where the highest value is indicated by »a«).

V primerjavi dolžin vejic od leta 2009 do 2014 (Slika 25) smo izmerili povprečno nekoliko večje vrednosti skoraj v vseh letih na nesoljenem mestu (V6ns). Statistično značilno večje pa so bile vrednosti le v letu 2012 in 2013.

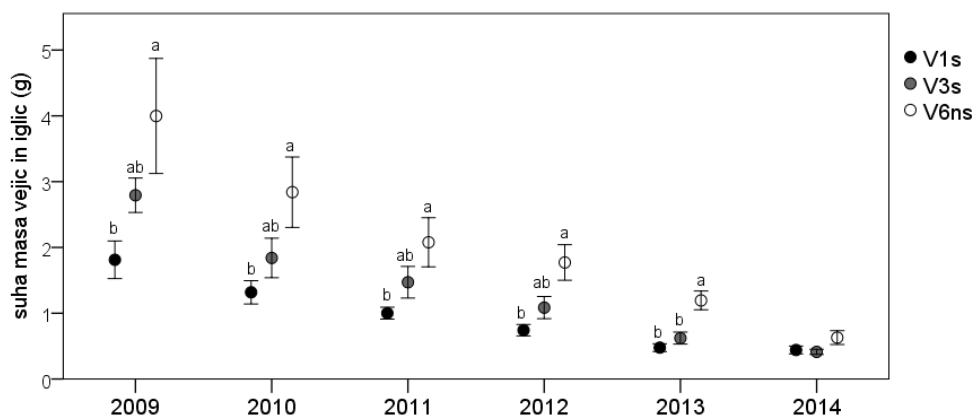


Slika 25: Primerjava dolžine vejic na treh vzorčnih mestih (4 m) v zadnjih šestih letih (povprečje $\pm$ SD, $n=6$). Enosmerna ANOVA, Sheffe *post-hoc* test. Različne črke označujejo statistično značilno razliko pri $p<0,05$ med ploskvami znotraj istega leta (a in b, pri čemer je največja vrednost označena z »a«).

Figure 25: Comparison of the length of twigs from the three sampling sites (4 m) during the last six years (mean $\pm$ SD, $n = 6$). One-way ANOVA, Sheffe *post-hoc* test. Different letters indicate statistically significant difference at $p<0,05$ between the sites within the same year (a and b, where the highest value is indicated by »a«).

Pri meritvah suhe mase vejic in iglic so bile vrednosti od leta 2009 do 2012 večje na nesoljenem mestu in statistično različne od soljenega mesta V1s, medtem, ko ni bilo statističnih razlik med nesoljenim mestom in V3s (soljeno). Leta 2013 smo izmerili statistično

različne vrednosti med soljenim in obema nesoljenima rastiščema, v letu 2014 pa ni bilo nobenih razlik (Slika 26).

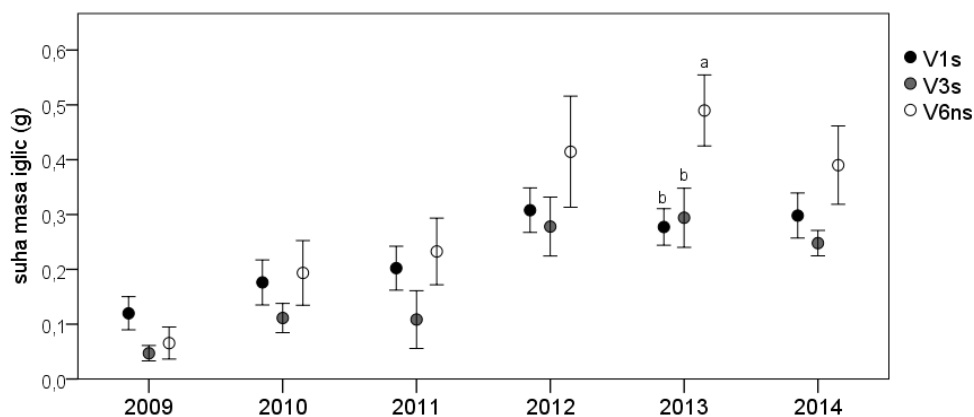


Slika 26: Primerjava suhe mase vejic in iglic na treh vzorčnih mestih (4 m) v zadnjih šestih letih (povprečje $\pm$ SD, $n=6$). Enosmerna ANOVA, Sheffe *post-hoc* test. Različne črke označujejo statistično značilno razliko pri $p<0,05$ med ploskvami znotraj istega leta (a in b, pri čemer je največja vrednost označena z »a«).

Figure 26: Comparison of the dry mass of twigs and needles from the three sampling sites (4 m) during the last six years (mean $\pm$ SD, $n = 6$). One-way ANOVA, Sheffe *post-hoc* test. Different letters indicate statistically significant difference at $p<0,05$ between the sites within the same year (a and b, where the highest value is indicated by »a«).

Vrednosti suhe mase iglic so bile največje na najmlajših vejicah in so padale s starostjo vejic.

V zadnji treh letih so bile vrednosti na nesoljenem mestu nekoliko večje kot na nesoljenih, statistično značilno večje pa le leta 2013 (Slika 27).

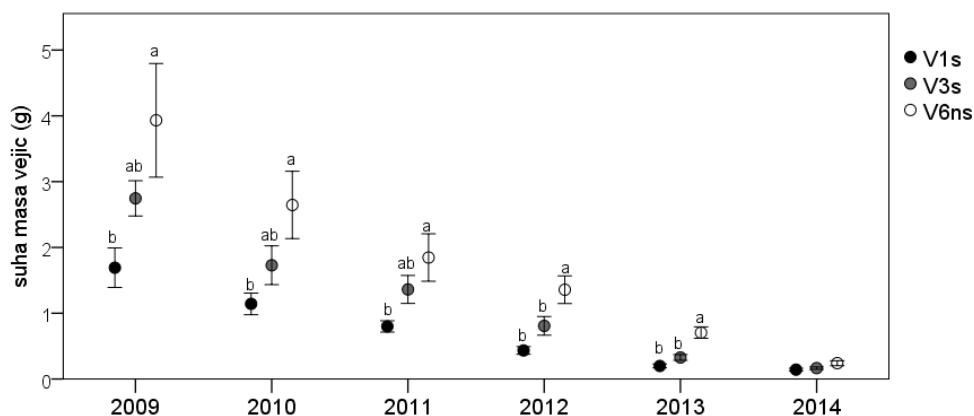


Slika 27: Primerjava suhe mase iglic na treh vzorčnih mestih (4 m) v zadnjih šestih letih (povprečje $\pm$ SD, $n=6$). Enosmerna ANOVA, Sheffe *post-hoc* test. Različne črke označujejo statistično značilno razliko pri $p<0,05$ med ploskvami znotraj istega leta (a in b, pri čemer je največja vrednost označena z »a«).

Figure 27: Comparison of the dry mass of needles from the three sampling sites (4 m) during the last six years (mean $\pm$ SD, $n = 6$). One-way ANOVA, Sheffe *post-hoc* test. Different letters indicate statistically significant difference at $p<0,05$ between the sites within the same year (a and b, where the highest value is indicated by »a«).

Pri meritvah suhe mase vejic je izrazit trend naraščanja mase s starostjo vejic na vseh treh lokacijah. V primerjavi nesoljenega in soljenih rastišč so se v letih 2009, 2010 in 2011

pokazale statistično značilno večje vrednosti na V6ns v primerjavi z V1s, v letih 2012 in 2013 pa tudi v primerjavi z V3s. V letu 2014 razlik ni bilo (Slika 28).



Slika 28: Primerjava suhe mase vejic na treh vzorčnih mestih (4 m) v zadnjih šestih letih (povprečje $\pm$ SD, $n=6$). Enosmerna ANOVA, Sheffe *post-hoc* test. Različne črke označujejo statistično značilno razliko pri $p<0,05$ med ploskvami znotraj istega leta (a in b, pri čemer je največja vrednost označena z »a«).

Figure 28: Comparison of the dry mass of twigs from the three sampling sites (4 m) during the last six years (mean $\pm$ SD, $n = 6$). One-way ANOVA, Sheffe *post-hoc* test. Different letters indicate statistically significant difference at $p<0,05$ between the sites within the same year (a and b, where the highest value is indicated by »a«).

5 RAZPRAVA IN SKLEPI

5.1 RAZPRAVA

Sol, ki se uporablja za soljenje cest, se v okolje širi s spiranjem, vetrom in pluženjem (Blomqvist in Johansson, 1999). Pomembni dejavniki pri širjenju soli iz cest so količina padavin, smer in hitrost vetrov ter temperaturne razmere (Blomqvist in Johansson, 1999). V našem primeru je glavni način prenosa soli s ceste na smreke pluženje, v manjši meri pa pršenje zaradi prometa. Ker so vsa vzorčna mesta v gozdni, oziroma gozdnati krajini, je vpliv vetra zanemarljiv. Zanemarljivo je tudi spiranje staljenega snega s cestišča, saj je med cesto in preučevanimi smrekami obcestni jarek, kjer ta voda ponikne v prepustno podlago.

Vsebnost ionov v tleh in snegu

Koncentracije soli v obcestnem prostoru merimo v vzorcih tal in snega (Pedersen in sod., 2000). V naši raziskavi smo vzorce tal odvzetih na soljenih vzorčnih mestih primerjali z vzorci odvzetimi na nesoljenih vzorčnih mestih. Razlika med soljenimi in nesoljenimi mesti se je pokazala v vsebnosti Na^+ v pomladanskem obdobju, ki je bila na soljenih mestih značilno večja medtem, ko so bile vrednosti jeseni podobne, oziroma ni bilo več statistično značilnih razlik. To kaže na velik vpliv dežja, ki v poletnem času izpere ione iz zgornjih plasti tal. Nekateri avtorji omenjajo, da se vpliv soljenja zmanjša, če letna količina padavin presega 490 mm (Appleton in sod., 2003). Na Pokljuki je bila na padavinski postaji Rudno polje povprečna letna količina padavin 1930 mm (Bogataj, 2010), kar je 4-5x več od navedene količine. Slanost tal določamo z merjenjem električne prevodnosti. Izmerjene vrednosti so bile 91-620 $\mu\text{S}/\text{cm}$ in tako niso presegale 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, kar pomeni, da tla niso slana (Rowell, 1994). Kljub veliki količini uporabljene soli na preučevanem odseku, ki je pozimi 2008/09 znašala 24,1 tone/km ceste, pozimi 2009/10 pa 10,9 t/km, omenjena meja tako ni bila dosežena. To nakazuje tudi verjetnost, da znaten del negativnega vpliva na fiziološke parametre povzroči neposreden prenos soli na rastlino, s pluženjem snega.

Vpliv soljenja se z oddaljenostjo od ceste močno zmanjšuje. Zato smo na vseh vzorčnih mestih vzorce tal in preučevane rastline izbrali na oddaljenosti približno 4 m od ceste. Izjema je vzorčno mesto v2s, kjer smo meritve opravili vzdolž gradienta oddaljenosti od ceste, in sicer še na razdalji 10, 25 in 50 m. Na neporaščenih območjih se sol po zraku prenaša več sto

metrov od ceste (Kelsey in Hootman, 1992), na gozdnatih območjih pa se 90 % soli prenese na razdalji 2-40 m od ceste (Blomquist in Johansson, 1999).

Največje koncentracije Na^+ v tleh smo izmerili na razdalji 25 m od ceste, čeprav smo pričakovali največje koncentracije na najmanjši oddaljenosti od ceste in zmanjševanje koncentracije z oddaljenostjo. Povečane koncentracije na tej razdalji so verjetno posledica čiščenja cest s plužnimi stroji (rolbe), ki mečejo sneg daleč od ceste. Mnogi avtorji ugotavljajo, da na širjenje soli vplivajo tudi stalni vetrovi, ki povečujejo koncentracije na privetnih straneh (Blomqvist, 2001). V našem primeru so večje koncentracije Na^+ na vzorčnem mestu na južni strani ceste lahko posledica nekoliko nižje vegetacije ter S in SV vetrov, ki so v zimskem času pogosti na Pokljuki.

Vpliv prometa na razsip soli zaradi pršenja je na Pokljuki razmeroma majhen, največ do 4 m, saj hitrosti niso velike, prometa pa je tudi malo v primerjavi z avtocesto, kjer so tovrstne vplive preučevali Kayama in sod. (2003). V času visokega snega pa lahko ta vpliv izničimo, saj debela snežna odeja preprečuje odletavanje soli s ceste.

V vzorcih snega smo prav tako merili vsebnost Ca, Mg, K in Na. Na soljenih vzorčnih mestih je bila koncentracija Na^+ 7-krat večja kot na nesoljeni. V raziskavi, ki je bila opravljena na Japonskem, so bile vrednosti Na^+ tudi do 12 x večje (Kayama in sod., 2003). Na soljenih mestih so bile izrazito povečane tudi vrednosti Ca^{2+} , kar je verjetno posledica uporabe drobirja (Preglednica 4, 9,4 m³ na km ceste), medtem ko ni bilo razlik v koncentracijah K in Mg.

Vsebnost ionov v iglicah

Poškodbe, ki jih povzroča solni stres so povezane s toksičnim in antagonističnim delovanjem Na^+ in Cl^- (Greenway in Munns, 1980; Marschner, 1995; Larcher, 1995). Ioni vstopajo v rastlino na dva načina: iz tal preko koreninskega sistema ali preko slanega prša, ki se useda na rastline (Pedersen in sod., 2000). Raziskave na smreki kažejo na povečane vsebnosti Na^+ , predvsem v starejših iglicah, medtem ko se količine K^+ zmanjšajo (Kayama in sod., 2003). V naši raziskavi smo zaznali razliko le v vsebnosti Mg^{2+} , ki je bila na nesoljenih vzorčnih mestih statistično značilno večja, medtem ko pri Na^+ kljub v povprečju večjim vsebnostim razlike niso statistično značilne. Manjše vsebnosti Mg^{2+} na soljenih mestih so lahko tudi razlog za manjše vsebnosti klorofila a in b (Savengor in sod., 2011). Meritve vsebnosti klorofila a in b vzdolž gradienta oddaljenosti od ceste (na lokaciji V2s) so pokazale, da je bila

vsebnost statistično značilno manjša na rastišču 4 m od ceste kot na rastiščih 10 in 25 m od ceste.

Pri primerjavi enoletnih in dvoletnih iglic smo ugotovili razlike v vsebnosti K^+ v enoletnih in Ca^{2+} v dvoletnih iglicah. Vsebnost K^+ je bila manjša v dvoletnih poganjkih kot v enoletnih, pri Ca pa je bilo ravno obratno. Tudi druge raziskave potrjujejo povečanje Ca^{2+} in zmanjševanje K^+ v starejših iglicah (Kayama in sod., 2003). Manjše koncentracije K^+ so tudi posledica translokacije v mlade poganjke, kjer je K^+ potreben za razvoj novih iglic in vejic (Bogemans in sod., 1988). Neznačilne razlike in majhne vrednosti v vsebnosti Na^+ ugotovljene v naši raziskavi so posledica hitrega izpiranja ionov iz tal, ki jih rastline ne absorbirajo. Povečane koncentracije Na^+ iglicah so namreč povezane tudi z večjimi koncentracijami v tleh (Viskari in Kärenlampi, 2000). Ugotovili smo tudi, da vsebnost Na^+ preko poletja upade, kar navajajo že Lumis in sod. (1976). Vidne poškodbe, ki smo jih opazili na soljenih mestih, lahko pripišemo slanemu pršu, oziroma slanemu snegu, ki na smreke pade ob pluzenju. Nekateri avtorji sicer navajajo, da ima večji negativni vpliv na rastline sol, ki jo rastline posrkajo iz tal (Forczek in sod., 2011), drugi pripisujejo večji vpliv slanemu pršu (Viskari in Kärenlampi, 2000).

Bryson in Barker (2002) trdita, da so iglavci zaradi velike površine v primerjavi z volumnom iglic ter zaradi fizioloških aktivnosti v sezoni soljenja bolj občutljivi na sol, ki se na njih useda iz zraka. Rastline so prizadete zaradi toksičnosti ionov ter osmotskega stresa, ki ga povzroči izguba vode in plazmoliza celic. Posledica so nekroze in prezgodnje odpadanje iglic, kar smo opazili tudi na naših vzorčnih mestih (Slika 2). Raziskave kažejo, da sol prehaja v drevesa boljše preko neolesenelih delov (iglice) kot preko olesenelih (Dobson, 1991). Velik vpliv imajo tudi velika nihanja v temperaturi zraka (Viskari in Kärenlampi, 2000), ki pa na Pokljuki niso tako izrazita.

Fiziološki parametri

Solni stres vpliva na fiziološke procese v rastlinah. Takojšen odziv je povezan z vodnim stresom, oziroma slabšo dostopnostjo vode v tleh ali kasnejšim na katerega vplivajo akumulirani ioni v rastlini (Bethke in Drew, 1992). Motnje se kažejo v fotosintezi, transpiraciji, sintezi proteinov in nukleinskih kislin, v delovanju encimov in v hormonskem ravnovesju (Kozłowski, 1997). Raziskave kažejo, da ima večji vpliv na fotosintezo sol, ki vstopa preko korenin (Romero-Aranda in Syvertsen, 1996). Ugotovljeno je bilo tudi, da

izpostavljenost rastlin rahlemu slanemu pršu, vpliva na fiziološke procese minimalno (McCune, 1991).

Sol v tleh zmanjšuje dostopnost vode rastlinam (Brady in Weil, 2008). Rastline morajo za preživetje ohranjati manjši vodni potencial kot je v tleh za kar porabijo veliko energije (Parvaiz in Satyawati, 2008). Raziskave kažejo, da se je vodni potencial pri smrekah na soljenih mestih zmanjšal do 100 % v primerjavi z nesoljenimi mesti (Kayama in sod., 2003). V naši raziskavi smo potrdili signifikantne razlike med soljenima vzorčnima mestoma v primerjavi z nesoljenim. Razlike so bile očitne junija in avgusta 2010, medtem, ko so bile avgusta 2009 bolj izenačene, oziroma so bile vrednosti celo večje na soljenem rastišču. Izstopa soljeno vzorčno mesto (V1s), kjer je bil vodni potencial junija in avgusta 2010 značilnomanjši kot na nesoljenem rastišču (Slika 14). Verjetno je to tudi posledica bolj plitvih tal, saj raziskave kažejo, da so rastline bolj prizadete na peščenih tleh, oziroma na tleh, ki slabo zadržujejo vodo, od tistih na ilovnati ali šotni podlagi (Fostad in Pedersen, 2000). Na majhen vodni potencial lahko vpliva tudi suša (Munns, 2005). Pri analizi padavin tri tedne pred posameznim merjenjem smo ugotovili, da je bilo julija in avgusta 2009 veliko več padavin v primerjavi z tritedenski obdobji pred obema merjenjema v letu 2010 (Slika 5). Glede na to vpliva padavin ne moremo popolnoma izključiti, kar kažejo tudi rezultati povezanosti obeh dejavnikov (Priloga B).

Iglavci se na zmanjšanje vodnega potenciala odzovejo s takojšnjim zapiranjem listnih rež (Kyparissis in Manetas, 1993), kar privede do zmanjšanja fotosinteze in transpiracije. Solni stres deluje na številne gradnike in procese v kloroplastih, zato pod vplivom povečanih koncentracij NaCl lahko pride do zmanjšane potencialne in dejanske fotokemične učinkovitosti FS II (Kayama in sod., 2003). Na splošno je manjša fotokemična učinkovitost povezana z vodnim stresom, ki je posledica povečanih količin soli v zemlji (Larcher, 1995) ter s toksičnem delovanjem Na^+ in Cl^- (Kayama in sod., 2003). Možni dejavnik za zmanjšanje pa je tudi prah, ki se širi iz ceste in se nabira na iglicah (Kayama in sod., 2003). Na prisotnost stresnih dejavnikov kažejo vrednosti, ki so manjše od 0,72 (Critchley, 1998). Pri naših meritvah na nobenem rastišču povprečna vrednost tega parametra ni bila pod omenjeno mejo, smo pa ugotovili razlike med vzorčnimi mesti. Vrednosti so bile v juniju in avgustu 2010 značilnomanjše na soljenem vzorčnem mestu V1s, kar se ujema z meritvami vodnega potenciala (Slika 14). Tudi vrednosti transpiracije so bile najmanjše na tem soljenem rastišču V1s. Na transpiracijo vplivajo trenutne razmere na rastišču, kot so vlažnost in temperatura zraka ter gibanje zračnih mas v okolici iglic (Larcher, 2003). Ko so rastline izpostavljene

solnemu stresu, zmanjšajo stomatalno prevodnost za vodno paro in s tem upočasnijo transpiracijo (Pagter in sod., 2005). Podnebni dejavniki, kot so temperatura zraka in sončno sevanje, so pomembni regulatorji transpiracije, saj vplivajo na razpoložljivost vode (Gazal in sod., 2006). Transpiracija se sezonsko spreminja glede na razmere na rastišču in vitalnost rastline. V naši raziskavi smo najmanjše vrednosti na vseh mestih izmerili spomladi, kar lahko deloma pripišemo tudi suši (Slika 5). Majhne vrednosti izmerjene poleti na V1s so lahko posledica solnega stresa ali višjih temperature, kar je povzročilo opoldansko zapiranje rež in zmanjšanje transpiracije (Pagter in sod., 2005).

Fotosintezna barvila

Kvantitativne in kvalitativne spremembe fotosinteznih pigmentov so eden od pokazateljev vitalnosti rastline (Lichtenthaler, 1983). Solni stres povzroči zmanjšanje vsebnosti fotosinteznih pigmentov v asimilacijskih tkivih. Raziskave v kontroliranih razmerah kažejo, da se pri rastlinah, ki so izpostavljene NaCl, zmanjšajo vsebnosti klorofila *a* in *b* ter karotenoidov v starejših iglicah (Renault, 2005). Zmanjšanje vsebnosti klorofila je lahko posledica povečane razgradnje ali zmanjšane sinteze klorofila. Med procesom razgradnje klorofila je klorofil *b* pretvorjen v klorofil *a*, kar rahlo poveča razmerje med klorofilom *a* in *b* (Santos, 2004). Razmerje vsebnosti klorofilov *a/b* se v povprečju giblje okoli 3 (Larcher, 2003). V naši raziskavi so bile vrednosti razmerja med 1 in 2. Razlike med soljenimi in nesoljenimi mesti so bile izrazite junija 2010, ko so bile na soljenih mestih izmerjene najmanjše vrednosti. Junija 2010 so bile razlike med rastiščem V1s in nesoljenim rastiščem statistično značilne. V avgustu 2009 ni bilo razlik, v avgustu 2010 pa je bila vsebnost na rastišču V3s celo večja kot na nesoljenem rastišču. Rezultatov ne moremo pripisati vplivu soli. Demmig-Adams in Adams (1992) razlagata zmanjšanje vsebnosti klorofila *a* in povečanje vsebnosti klorofila *b* kot del zaščitnega mehanizma, ki varuje fotosintezni aparat pred fotooksidacijskimi poškodbami. Correia in sod. (1999) razlagajo manjše razmerje klorofilov *a/b* pri rastlinah, ki so izpostavljene povečanemu UV-B sevanju. V takih razmerah je klorofil *b* bolj stabilen v primerjavi s klorofilom *a*. Pri vsebnostih klorofila *a* in *b* nismo ugotovili jasnih povezav s soljenjem. Leta 2009 so bile vsebnosti klorofila na vseh mestih enako majhne, medtem, ko leta 2010 izstopa V1s z manjšimi vrednostmi v juniju v primerjavi z V2s in V6ns, medtem, ko so bile avgusta vrednosti majhne tudi na nesoljenem mestu.

Biomasa

Motnje fizioloških procesov povzročijo slabšo rast rastline (Allakhverdiev in sod., 2000). Z merjenjem biomase iglic in vejic ter dolžino vejic smo ugotovili večje vrednosti na nesoljenem mestu (V6ns) v primerjavi z nesoljenima (V1s, V3s), signifikantne razlike pa se kažejo večinoma le na mestu V1s. To lahko povežemo tudi s slabšo kakovostjo tal na vzorčnem mestu V3s, kjer so tla plitvejša, oziroma bolj skeletna. Izstopa leto 2013, ko so vrednosti vseh parametrov značilno manjše na obeh soljenih lokacijah. V zimi 2012/13 je bilo na cesti Mrzli studenec - Rudno polje posuto največ soli v vseh letih naših merenj (Preglednica 4). To kaže, da ima količina porabljene soli izrazit vpliv na rast rastlin. Negativen vpliv soli na rast je tako očiten, kljub veliki količini padavin, ki je na letni ravni 4x večja od 490 mm, ki jo kot količino pod katero se pojavijo negativni učinki soljenja na rast navajajo Appleton in sod. (2003). V letu 2013 so bile razmere takšne, da je najverjetneje prišlo do redukcije rasti na soljenih rastiščih na račun občasnega osmotskega stresa, kar kot razlog navajajo tudi Brady in sod. (2001) ter Bois in sod. (2006). Omenjeni avtorji so ugotovili, da se je z naraščajočo koncentracijo soli v tleh biomasa poganjkov signifikantno zmanjševala.

Drugi vplivi

Poleg soljenja je obcestna vegetacija izpostavljena različnim drugim vplivom. Do sredine devetdesetih let prejšnjega stoletja je bil zelo problematičen svinec. Z zmanjševanjem in odpravljanjem svinčenih dodatkov bencinu so se emisije tega elementa bistveno zmanjšale. Vendar je dandanes vegetacija vzdolž cest in tudi širše še vedno izpostavljena različnim organskim in anorganskim onesnažilom, kot so dušikovi oksidi, ogljikov monoksid, lahko hlapni ogljikovodiki, prašni delci in težke kovine. Nekateri od omenjenih vplivov bi sicer lahko negativno vplivali na vitalnost in rast na soljenih lokacijah, saj je na teh odsekih tudi veliko več prometa, vendar ne toliko in je to vseeno še vedno razmeroma neokrnjeno naravno okolje in tako sol verjetno edini vzrok za slabše rastiščne razmere za rast smreke, kot navajajo tudi Larcher (2003) ter Kayama in sod. (2003).

Poleg tega je vegetacija izpostavljena tudi različnim fizičnim motnjam kot so različna vzdrževalna dela (Kozłowski, 1997). V letu 2010, so vzdolž ceste opravljali zemeljska dela, zaradi izgradnje električnega omrežja, v letu 2011 pa so preplastili dele odsekov ceste med Mrzlim Studencem in Rudnim poljem.

5.2 SKLEPI

Na osnovi postavljenih hipotez in naših rezultatov, podajamo naslednje sklepe:

- *Predvidevamo, da se bodo pokazale razlike med vzorčnimi mesti, ki so izpostavljena vplivu soli in tistimi, kjer vpliva soli ni v količini soli v tleh in snegu v odvisnosti od časa merjenja (začetek ali konec sezone) in od oddaljenosti vzorčnih ploskev od ceste.*

Rezultati potrjujejo prvo hipotezo. Pri analizi tal so se razlike med soljenimi in nesoljenimi vzorčnimi mesti pokazale v vsebnosti Na^+ v spomladanskem obdobju, medtem ko jeseni razlik ni bilo več. To kaže na velik vpliv dežja, ki sčasoma spere omenjene ione iz zgornje plasti tal. Največ soli smo izmerili na oddaljenosti 25 metrov od ceste, ki je posledica zimskega čiščenja cest (rolbanje). Sklepamo, da ima sol največji negativni vpliv na smreke v spomladanskem času ter tudi v zimskem zaradi slanega prša. Velika poraba soli na Pokljuki se kaže tudi v povečani vsebnosti Na^+ v snegu ob soljenih cestah.

- *Predvidevamo, da se bodo pokazale razlike med vzorčnimi mesti, ki so izpostavljena vplivu soli in tistimi, kjer vpliva soli ni v kemijskih lastnostih tal in fizioloških odzivih rastlin.*

Rezultati v primeru fizioloških parametrov le delno potrjujejo hipotezo. Analiza fizioloških odzivov rastlin kaže na manjši vodni potencial pri rastlinah na soljenih rastiščih, medtem ko so ostali parametri ne kažejo posebnosti in so povezani s trenutnimi dnevnimi razmerami. Na vodni potencial vpliva poleg soli tudi količina dežja in na podlagi podatkov o padavinah v treh tednih pred merjenji sklepamo, da tega dejavnika ne moremo izključiti. Na fiziološko aktivnost rastlin vpliva tudi kvaliteta tal in prisotnost drugih stresnih dejavnikov

- *Predvidevamo, da bo rast rastlin na soljenih zmanjšana in, da bodo tudi opazne vidne poškodbe.*

Rezultati potrjujejo tretjo hipotezo. Merjenje rasti rastlin je pokazalo, da rastline najslabše rastejo na soljenem vzorčnem mestu (V1s), medtem, ko je rast na drugem soljenem mestu (V3s) sicer upočasnjena, vendar ne značilno različna od rasti rastlin na nesoljenem mestu (V6ns). Izstopa leto 2013, ko se je pokazala izrazita redukcija v rasti na obeh soljenih mestih. Sklepamo, da je na rast rastlin vplivala količina porabljene soli, ki je bila v tem letu največja.

Za zmanjšanje negativnih vplivov soljenja bi bilo potrebno zmanjšati količino porabljene NaCl ali jo zamenjati z drugimi manj škodljivimi posipnimi sredstvi.

6 POVZETEK (SUMMARY)

Soljenje cest vpliva na kemijske lastnosti tal, rast in fiziološke aktivnosti rastlin v obcestnem prostoru. Na Pokljuki (Triglavski narodni park) je poraba soli zaradi specifičnih klimatskih razmer (mrzoliščni značaj), lege planote (nadmorska višina od 1200 do 1340 m) ter velikega števila obiskovalcev in turistov, razmeroma velika. Kljub veliki porabi soli na tem območju, pa je zelo malo znanega o vplivih na prst in vegetacijo.

Namen magistrske naloge je bil primerjati kemijske parametre tal in snega na soljenih in nesoljenih rastiščih ter obenem primerjati izbrane fiziološke in biokemijske značilnosti (vodni potencial, fotokemično učinkovitost fotosistema II, transpiracijo, vsebnost fotosinteznih barvil, itd.) pri smreki na soljenih in nesoljenih rastiščih in na osnovi rezultatov sklepati kakšen je vpliv soljenja. Raziskave smo opravili na smreki (*Picea abies* (L.) Karsten), ki je najpogostejša in dominantna drevesna vrsta v gozdni združbi na izbranem območju preučevanja. Poleg fizioloških parametrov, ki kažejo zgolj trenutno stanje, smo želeli primerjati tudi rast rastlin na soljenih in nesoljenih rastiščih. Na osnovi predhodnega opazovanja smo predvidevali, da soljenje negativno vpliva na rast in obstoj smreke in s tem tudi drugih vrst, z izsledki teh raziskav pa smo želeli prispevati k znanju o vplivih soljenja cest na okolje ter k nadzorovani in zmanjšani uporabi v zavarovanem območju.

Za ugotavljanje vpliva soljenja na smreko, smo izbrali vzorčna mesta, ki se nahajajo ob intenzivno soljenem cestnem odseku in referenčno mesto brez tega vpliva. Odvzem vzorcev in meritve smo opravili na različnih oddaljenostih od soljenega cestnega odseka, v spomladanskem in jesenskem obdobju v letih 2009 in 2010. Z oddaljenostjo od ceste in s pretekom določenega časa od soljenja se namreč vplivi soljenja zmanjšujejo.

Merili smo naslednje fiziološke parametre: fotokemično učinkovitost PS II, vodni potencial, transpiracijo, vsebnost klorofila *a* in *b* ter vsebnost kationov (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} in Mg^{2+}) v iglicah. Na teh vzorčnih mestih smo odvzeli tudi vzorce tal in snega. Analizirali smo kemijske lastnosti in sicer, električno prevodnost (EC) in kationsko izmenjalno kapaciteto (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+).

Pri analizi tal so se razlike med soljenimi in nesoljenimi vzorčnimi mesti pokazale v vsebnosti Na^+ v spomladanskem obdobju, medtem ko jeseni razlik ni bilo. To kaže na velik vpliv dežja, ki sčasoma spere razmeroma dobro topne Na^+ ione iz tal. Največjo koncentracijo soli smo izmerili na oddaljenosti 25 metrov od ceste, ki je posledica zimskega čiščenja cest (rolbanje). Sklepamo, da ima sol največji negativen vpliv na smreke v spomladanskem ter tudi v zimskem obdobju zaradi slanega prša, ki nastaja zaradi vozil. V času zimskih športnih prireditev na Rudnem polju in ob koncih tedna je namreč na preučevanem območju povečan promet. Velika poraba soli na Pokljuki se kaže tudi v povečani vsebnosti Na^+ v snegu ob soljenih cestah.

Analiza fizioloških odzivov rastlin kaže na manjši vodni potencial pri rastlinah na soljenih rastiščih, medtem ko so ostali parametri ne kažejo posebnosti in so povezani s trenutnimi dnevnimi razmerami. Na vodni potencial vpliva poleg soli tudi količina dežja. Na podlagi podatkov o padavinah pred merjenji sklepamo, da tega dejavnika ne moremo izključiti. Na fiziološko aktivnost rastlin vpliva tudi kvaliteta tal in prisotnost drugih stresnih dejavnikov. Na vzorčnem mestu V1s, kjer so tla plitvejša, smo pri večjem številu fizioloških parametrov izračunali statistično značilne razlike z referenčnim rastiščem (V6ns), saj so razmere tam za rast smreke manj ugodne, vpliv soljenja pa se zaradi manjše kapacitete tal za vodo prej odrazi.

Merjenje rasti rastlin je pokazalo, da rastline najslabše rastejo na soljenem vzorčnem mestu (V1s), medtem, ko je rast na drugem soljenem mestu (V3s) sicer upočasnjena, vendar ne statistično značilno nižja od rasti rastlin na nesoljenem mestu (V6ns). Izstopa leto 2013, ko se je pokazala izrazita redukcija v rasti na obeh soljenih mestih. Sklepamo, da je na rast rastlin vplivala velika količina porabljene soli, ki je bila v zimskem obdobju pred rastno sezono 2013 dejansko največja med leti 2008 in 2014.

Za zmanjšanje negativnih vplivov soljenja bi bilo potrebno zmanjšati količino porabljene NaCl ali jo zamenjati z drugimi manj škodljivimi posipnimi sredstvi.

SUMMARY

Application of de-icing salt for road maintenance affects the chemical properties of the soil, growth and physiological activity of plants in the road-side areas. On the Pokljuka plateau (Triglav National Park), the consumption of salt is relatively large, due to the specific climatic conditions (extremely low temperatures), the position of the plateau (altitude 1200-1340 m) and a high number of visitors and tourists. Despite the intense use of de-icing salt, the knowledge on the impacts on soil and surrounding vegetation is scarce.

The aims of the Master thesis were, to compare the chemical properties of the soil and snow in the salted and unsalted sites and concurrently, to measure selected physiological and biochemical characteristics of Norway spruce (water potential, photochemical efficiency of photosystem II, transpiration, content of photosynthesizing pigments, etc.) in order to reveal the influence of de-icing salt. The study was carried out on Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karsten), which is the most common and dominant tree species in forest communities of the study area. Beside the physiological parameters, which indicate more the current condition of the plants, the growth of plants was compared between salted and unsalted sites. On the basis of preliminary observations, the negative impact of de-icing salt on growth and condition of Norway spruce and other species was assumed. With this study we wanted to contribute to better knowledge on the effects of de-icing salt on the environment and to provide guidelines for controlled and reduced use in the protected areas.

To reveal the influence of de-icing salt on the Norway spruce, and environment, respectively, we selected sampling sites that are exposed to intensive use of de-icing salt and a reference site without this influence. Samples were taken and measurements were carried out at different distances from the road and in the spring and autumn time in the years 2009 and 2010. We predicted that with the distance from the road and with time, the effects of de-icing salt application are decreasing.

The following physiological parameters were measured: the photochemical efficiency of PS II, water potential, transpiration, the content of chlorophyll *a* and *b* and the cations (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} and Mg^{2+}) in the needles. On these sample sites samples of soil and snow were taken. We analyzed the chemical properties, namely, the electrical conductivity (EC) and the cation exchange capacity (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+).

Analysis of the soil revealed the differences between salted and unsalted sampling sites in the content of Na^+ in the spring period. In autumn no significant differences were detected. This indicates the great influence of the rain, which eventually washes out relatively well soluble Na ions from the soil. The highest concentration of salt was measured at a distance of 25 meters from the road as a result of snow ploughing. We concluded that the de-icing salt has the most negative impact on the Norway spruce in the spring and in the winter time because of the salty spray caused by vehicles, which increase in number during the weekends and larger winter sport events at Rudno polje. High consumption of de-icing salt on the Pokljuka plateau is reflected also in the increased levels of Na^+ in the snow at impacted sites.

Analysis of physiological responses of plants indicates a lower water potential in plants at salted sites, while the other parameters do not show specific response to salt and are related more to other environmental conditions. The plant water potential depends also on the amount of rainfall and soil characteristics. The data on the amount of the rainfall before the measurements showed that this factor cannot be excluded. The physiological activity of the plants is affected also by the quality of the soil and the presence of other stress factors. At the site V1s, where the soil was shallower, a large number of physiological parameters significantly differ from the reference site. At this site (V1s), where the conditions for spruce are less favourable, due to the lower water capacity of the soil, the impact of salting is pronounced.

Measurements of plant growth showed statistically significant lower rates at the impacted V1s site. The growth rate in the second impacted site (V3s) was also lower than in the reference site (V6ns), but the difference was not statistically significant. The exception was the year 2013, when marked reduction in growth was observed at both impacted sites. We conclude that the reason was a large amount of salt applied in this year, which was the greatest over a period between 2008 and 2014.

To reduce the negative effects of the use of de-icing salt, the amounts of applied NaCl should be reduced or other less harmful de-icing agents should be used.

7 VIRI

- Arhiv meteoroloških podatkov. Ljubljana, Agencija Republike Slovenije za okolje. http://kpv.arso.gov.si/welcome/Metadata_search/Metadata_report/report_metadata?DOC_ID=338&NODE_ID=418&L1=302&L2=94 (20. dec. 2011)
- Allakhverdiev S. I., Sakamoto A., Nishiyama Y., Inaba M., Murata N. 2000. Ionic and osmotic effects of NaCl-induced inactivation of photosystems I and II in *Synechococcus* sp. *Plant Physiology*, 123: 1047-1056
- Akbar K. F., Headley A., Hale W. H. G., Athar M. 2006. A comparative study of de-icing salts (sodium chloride and calcium magnesium acetate) on the growth of some roadside plants of England. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 10, 1: 67-71
- Appleton B., Greene V., Smith A., French S. 2003. Trees and Shrubs that Tolerate Saline Soils and Salt Spray Drift. Virginia State University. <http://www.ext.vt.edu/pubs/trees/430-031/430-031> (12. feb. 2014)
- Bäckström M., Karlsson S., Bäckman L., Folkeson L., Lind B. 2004. Mobilisation of heavy metals by deicing salts in a roadside environment. *Water Research*, 38, 3: 720-732
- Bernhardt-Römermann M., Kirchner M., Kudernatsch T., Jakobi G., Fischer A. 2006: Changed vegetation composition in coniferous forests near to motorways in Southern Germany: The effects of traffic-born pollution. *Environmental Pollution*, 143: 572-581
- Bethke P. C., Drew M. C. 1992. Stomatal and nonstomatal components to inhibition of photosynthesis in leaves of *Capsicum annuum* during progressive exposure to NaCl salinity. *Plant Physiology*, 99: 219-226
- Beyschlag W., Ryel R. J., Ullmann I. 1992. Experimental and Modelling Studies of Competition for Light in Roadside Grasses. *Botanica Acta*, 105: 285-291
- Blomqvist G. 2001. De-icing salt and the roadside environment: Air-borne exposure, damage to Norway spruce and system monitoring [dissertation]. <http://kth.divaportal.org/smash/record.jsf?searchId=1&pid=diva2:8905> (20. dec. 2011)
- Blomqvist G. 1998. Impact of de-icing salt on roadside vegetation. a literature review. VTI Rapport 427A, Linköping, Swedish National Road and Transport Research Institute: 35 str.
- Blomqvist G., Johansson E.-L. 1999. Airborne spreading and deposition of de-icing salt – a case study. *Science of The Total Environment*, 235, 1–3: 161-168
- Bogataj J. 2010. Geografske in zgodovinske vsebine v izobraževalnih programih Triglavskega narodnega parka: diplomsko delo. (Univerza v Ljubljani, Filozofska fakulteta, Oddelek za geografijo in Oddelek za zgodovino). Ljubljana, samozal.: 171 str.
- Bogemans J., Neirinckx L., Stassart J.M., 1989. Effect of deicing chloride salts on ion accumulation in spruce (*Picea abies* (L.) sp.). *Plant and Soil*, 113: 3-11
- Bois G., Bigras F.J., Bertrand A., Piché Y., Fung M. Y. P., Khasa D.P. 2006: Ectomycorrhizal fungi affect the physiological responses of *Picea glauca* and *Pinus banksiana* seedlings exposed to an NaCl gradient. *Tree Physiology*, 26: 1185-1196

- Brady N. C., Weil R. R. 2008. The nature and properties of soils. 14th edition. Upper Saddle River, Pearson Prentice Hall: 960 str.
- Brady, Nyle C., Ray, Weil R. 2001. The Nature and Properties of Soils. 13th edition. Upper Saddle River, Prentice Hall: 975 str.
- Correia C.M., Torres-Pereira M.S., Torres-Pereira J.M.G. 1999. Growth, photosynthesis and UV-B absorbing compounds of Portuguese Barbela wheat exposed to ultraviolet-B radiation. *Environmental Pollution*, 104: 383-388
- Cramer G.R., Lynch J., LaEuchli A., Epstein E. 1987. Influx of Na^+ , K^+ , and Ca^{2+} into roots of salt-stressed cotton seedlings. Effects of supplemental Ca^{2+} . *Plant Physiology*, 83: 510-516
- Čotar M. 2010. Vpliv soljenja na obcestno drevje iglavcev v Ljubljani: diplomsko delo (Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive vire). Ljubljana, samozal.: 32 str.
- Davison A. W. 1971. The Effects of De-Icing Salt on Roadside Verges. I. Soil and Plant Analysis. *Journal of Applied Ecology*, 8, 2: 555-561
- Demmig-Adams B., Adams W.W. 1992. Photoprotection and other responses of plants to high light stress. *Annual Review of Plant physiology and Plant Molecular Biology*, 43: 599-626
- Fitzgerald B.J., Janssen E.D. 2004. Winter deicing Agents for the Homeowner. Cooperative Extension, Institute of Agriculture and natural resources, University of Nebraska-Lincoln.
<http://ianrpubs.unl.edu/horticulture/g1121.htm> (20. dec. 2011)
- Forczek S.T., Benada O., Kofroňová O., Sigler K., Matucha M. 2011. Influence of road salting on the adjacent Norway spruce (*Picea abies*) forest. *Plant, Soil and Environment*, 57, 7: 344-350
- Fostad O., Pedersen P.A. 2000. Container-grown tree seedling responses to sodium chloride applications in different sub-strates. *Environmental Pollution*, 109: 203-210
- Gams I., Ramovš A. 1990. Julijske Alpe. V: Enciklopedija Slovenije. Zv. 4: Hac-Kare. Javornik M. (ur.) Ljubljana, Mladinska knjiga: 352-354
- Gazal M.R., Scott R.L., Goodrich C.D., Williams G.D. 2006. Controls on transpiration in a semiarid riparian cottonwood forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 137: 56-67
- Gorše J., Vuk D. 2008. Posodobitev obstoječega sistema preventivnega posipanja vozišč: diplomsko delo. (Univerza v Mariboru, Fakulteta za organizacijske vede). Kranj, samozal.: 57 str.
- Hansen J.K., Saxe H., Raebild A., Nielsen C.N., Simonsen J.P., Larsen J.B., Wellendorf H. 1998. Decline and physiological response to foliar-deposited salt in Norway spruce genotypes: a comparative analysis. *Canadian Journal of Forest Research*, 28: 1879-1889
- Hasegawa P.M., Bressan R.A, Zhu J.K., Bohnert H.J. 2000. Plant cellular and molecular responses to high salinity. *Annual Review of Plant physiology and Plant Molecular Biology*, 51:463-499
- Hautala E.L., Wulff A., Oksanen J. 1992: Effects of deicing salt on visible symptoms, element concentrations and membrane damage in 1st-year needles of roadside Scots pine (*Pinus sylvestris*). *Annales Botanici Fennici*, 29: 179-185

- Horvat-Marolt S., 1984. Kakovost smrekovega mladja v subalpskem smrekovem gozdu Julijskih Alp. Zbornik gozdarstva in lesarstva, 24: 5-64
- Houska C. 2007. Deicing salt – Recognising the corrosion threat. International Molybdenum Association, Pittsburgh, TMR Consulting : 1-11
- Jayasundara H., Thomson B., Tang C. 1998. Responses of cool season grain legumes to soil abiotic stresses. Advances in agronomy, 63: 77-151
- Kayama M., Qureshi A.M., Kitaoka S., Kitahashi Y., Sakamoto Y., Maruyama Y., Kitao M., Koike T. 2003. Effects of Deicing Salt on the Vitality and Health of Two Spruce Species, *Picea abies* Karst., and *Picea glehnii* Masters Planted along Roadsides in Northern Japan. Environmental pollution, 124, 1: 127-137
- Kelsey P. D., Hootman R. G. 1992. Deicing salt dispersion and effects on vegetation along highways . case study: deicing salt deposition on the morton arboretum. in: chemical deicers and the environment.
<http://trid.trb.org/view.aspx?id=363858> (20. dec. 2011)
- Kodrič M. 1958. Opis glavnih talnih enot na pokljuški planoti. V: Kompleksna raziskovanja smrekovih sestojev na Pokljuki. Tregubov V. (ur.). Ljubljana, Inštitut za gozdno in lesno gospodarstvo Slovenije: 63-72.
- Kozlowski T. T. 1997. Responses of Woody Plants to Flooding and Salinity. Tree Physiology Monograph, 1: 1-29
- Lajevec D. 2008. Analiza vplivov onesnaženja voda s soljo iz cestišč na vodno okolje in čiščenje na komunalnih čistilnih napravah : diplomska naloga. (Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo). Ljubljana, samozal.: 66 str.
- Larcher W. 2003. Physiological Plant Ecology: Ecophysiology and Stress Physiology of Functional Groups. Berlin, Springer: 514 str.
- Larcher W., 1995. Physiological Plant Ecology. 5th edition. Berlin, Springer-Verlag, 506 str.
- Lerner B.R. 2001. Roadside De-Icing Salts and Ornamental Plants. Purdue University, Cooperative Extension service.
<http://www.greentreeboro.com/roadsaltplants.pdf> (20. marec 2014)
- Levanič T., Oven P. 2002. Prirastne in anatomske značilnosti rdečega bora (*Pinus sylvestris* L.), izpostavljenega solem za posipanje cestišč. Zbornik gozdarstva in lesarstva, 69: 237-258
- Lichtenthaler, H.K., Wellburn, A.R., 1983. Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents. Biochemical Society Transactions, 11: 591-592
- Lumis G. P., Hofstra G., Hall R. 1976. Roadside woody plant susceptibility to sodium and chloride accumulation during the winter and spring. Canadian Journal of Plant Science, 56: 853-859
- Marschner H., 1995. Mineral Nutrition of Higher Plants. 2nd edition. New York, Academic Press: 862 str.
- McCune D. C. 1991. Effects of airborne saline particles on vegetation in relation to variables of exposure and other factors. Environmental Pollution, 74, 3:176-203
- Melik A. 1954. Slovenski alpski svet. Ljubljana, Slovenska matica: 607 str.

- Moxley, L., Davidson, H., 1973. Salt Tolerance of Various Woody and Herbaceous Plants (Horticultural Report). East Lansing, Michigan, Department of Horticulture, Michigan State University: 25 str.
- Munns R. 2005. Genes and salt tolerance: bringing them together. *New Phytologist*, 167, 3: 645-663
- National Research Council (U.S.), & Committee on the Comparative Costs of Rock Salt and Calcium Magnesium Acetate (CMA) for Highway Deicing. (1991). Highway deicing: comparing salt and calcium magnesium acetate. Washington, D.C.: Transportation Research Board, National Research Council of exposure and other factors. *Environmental Pollution*, 74: 176-203
- Oškinis V., Kasperovičius T. 2005. Impact of road maintenance salts on water ecosystems according to diatom flora investigation. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 13,1: 51-55
- Oven P. 2000. Poškodbe mestnega drevja zaradi soli. *Proteus*, 63, 4: 177-179
- Pagter M., Bragato C., Brix H. 2005. Tolerance and physiological responses of *Phragmites australis* to water deficit. *Aquatic Botany*, 81: 285-299
- Panahi, B. 2009. Effects of osmotic and salt stresses on water relation parameters of pistachio seedlings. *Journal of Plant Ecophysiology*, 1,1: 1-8
- Parvaiz A., Satyawati S. 2008. Salt stress and phyto-biochemical responses off plants – a review. *Plant, Soil and Environment*, 54: 89-99
- Paschka M. G., Ghosh R. S., Dzombak D. A. 1999. Potential water-quality effects from iron cyanide anticaking agents in road salt. *Water Environment Research*, 6: 1235-1239
- Poljanec M. 2014. Podatki o zimskem vzdrževanju cest na Pokljuki. Kranj, Gorenjska gradbena družba. (neobjavljeno)
- Pravilnik o pitni vodi. Ur.l. RS št. 19/04, 35/04 in 26/06
- Prus T., Lobnik F., Omerza-Premru V., Andolšek L. 1989. Pedološke raziskave v logaškem drevoredu z navodili za preprečitev nadaljnega propadanja-1. faza. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, VTOZD za agronomijo: 9 str.
- Prus T., Lobnik F., Omerza-Premru V., Andolšek L. 1990. Pedološke raziskave v logaškem drevoredu z navodili za preprečitev nadaljnega propadanja-2. faza. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, VTOZD za agronomijo: 5 str.
- Raghavendra A. S. 2000. *Photosynthesis: A Comprehensive Treatise*. Cambridge, Cambridge University Press: 394 str.
- Ramakrishna D. M., Viraraghavan T. 2005. Environmental impact of chemical deicers—a review. *Water, Air, and Soil Pollution*, 166, 1-4: 49-63
- Renault S. 2005. Tamarack response to salinity: effects of sodium chloride on growth and ion, pigment, and soluble carbohydrate levels. *Canadian Journal of Forest Research*, 35: 2806-2812
- Rodošek V., Lipičnik M., Žmavc J. 1998. Racionalizacija zimskega vzdrževanja cest: magistrsko delo. (Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo). Maribor, samozal.: 248str.

- Romero-Aranda R., Syvertsen J. P. 1996. The influence of foliarapplied urea nitrogen and saline solutions on net gas exchange of Citrus leaves. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 121,3: 501-506
- Rowell D. L. 1994. *Soil Science: Methods and Applications*. New York, Longman group,: 350 str.
- Scheffer F., Schachtschabel P. 2002. *Lehrbuch der Bodenkunde*. Heidelberg, Spektrum: 570 str.
- Sevengor S., Yasar F., Kusvurans S. 2011. The effect of salt stress on growth, chlorophyll content, lipid peroxidation and antioxidative enzymes of pumpkin seedling. *African Journal of Agricultural Research*, 6, 21: 4920-4924
- Slabu C., Jitareanu C.-D., Toma L.-D., Robu T., Marta A.-E., Radu M. 2009. Ecological impact of de-icing salt on *Tilia cordata* mill. plants from roadside environment. *Lucrări Științifice, Universitatea de Științe Agricole Și Medicină Veterinară "Ion Ionescu de La Brad" Iași, Seria Agronomie*, 52, 2: 57-62
- Stavarek S.J., Rains D.W. 1983. Mechanisms for salinity tolerance in plants. *Iowa State Journal of Research*, 57, 457-476
- Thorburn P.J., Walker G. R., Jolly I. D. 1995. Uptake of saline groundwater by plants: an analytical model for semi-arid and arid areas. *Plant and Soil*, 175, 1: 1-11
- Thunqvist E.-L. 2004. Regional increase of mean chloride concentration in water due to the application of deicing salt. *Science of The Total Environment*, 325, 1-3: 29-37
- Townsend A.M., 1980. Response of selected tree species to sodium chloride. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 105: 878-883
- Townsend A.M., 1984. Effect of sodium chloride on tree seedlings in two potting media. *Environmental Pollution* 34, A: 333-344
- Trahan N., Peterson C. M., 2007. Factors Impacting the Heath of Roadside Vegetation. Report No. CDOT-DTD-R-2005-12. Colorado, Department of Transportation Research Branch: 264 str.
- Tregubov V. 1958. Sklepi glede gospodarjenja z gozdovi in gozdnogojitvene tehnike V: Kompleksna raziskovanja smrekovih sestojev na Pokljuki. Tregubov V. (ur.). Ljubljana, Inštitut za gozdno in lesno gospodarstvo Slovenije: 140-151
- Urancar B. 2007. Zimsko vzdrževanje na državnih cestah gorenjske regije: diplomsko delo. (B&B, Višja strokovna šola). Kranj, samozal.: 56 str.
- Verbovšek Judež V., Švegl F. 2005. Sproščanje onesnaževalcev v tla in vode ob cestiščih. Ljubljana, Družba za raziskave v cestni in prometni stroki Slovenije: 35 str.
- Viskari E.L., Kärenlampi L. 2000. Roadside Scots pine as an indicator of de-icing salt use: a comparative study from two consecutive winters. *Water, Air and Soil Pollution* 122, 3-4: 405-419
- Weissflog L., Krüger G.H.J., Forczek S.T., Lange C.A., Kotte K., Pfennigsdorff A., Rohlenová J., Fuksová K., Uhlířová H., Matucha M., Schröder P. 2007. Oxidative biotransformation of tetrachloroethene in the needles of Norway spruce (*Picea abies* L.). *South African Journal of Botany*, 73: 89-96
- White P.J., Broadley M.R. 2001. Chloride in soils and its uptake and movement within the plant: A review. *Annals of Botany*, 88: 967-988

- Wraber M. 1969. Pflanzengeographische Stellung und Gliederung Sloweniens.- Vegetatio, The Hague, 17, 1-6: 176-199
- Završnik K., Prus T., Grčman H. 2004. Ugotavljanje slanosti tal na območju mestne občine Ljubljana: diplomsko delo. (Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo). Ljubljana, samozal.: 52 str.
- Zimsko vzdrževanje cest 2008-09:radio za novinarje. 2008. Republika Slovenija, Ministrstvo za promet, Direkcija RS za ceste in DARS.
www.dc.gov.si (13. nov. 2008)

ZAHVALA

Najlepše se zahvaljujem mentorju doc. dr. Igorju Zelniku za vso strokovno pomoč, kritičen pregled naloge ter za vse spodbudne besede.

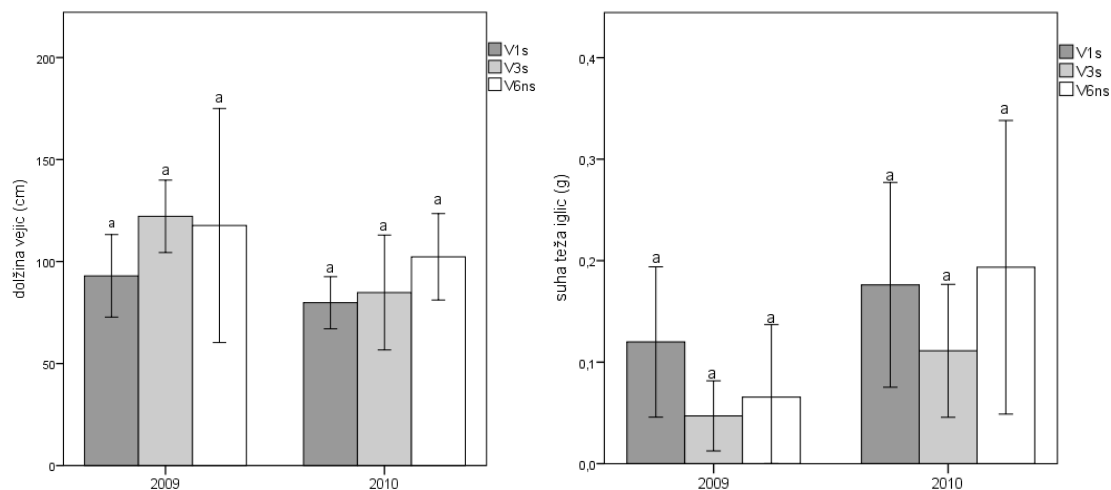
Prof. dr. Alenki Gaberščik hvala za usmeritve in strokoven pregled naloge. Za strokoven pregled naloge se zahvaljujem tudi prof. dr. Francu Batiču.

Draganu Abram se zahvaljujem za tehnično pomoč na terenu in v laboratoriju.

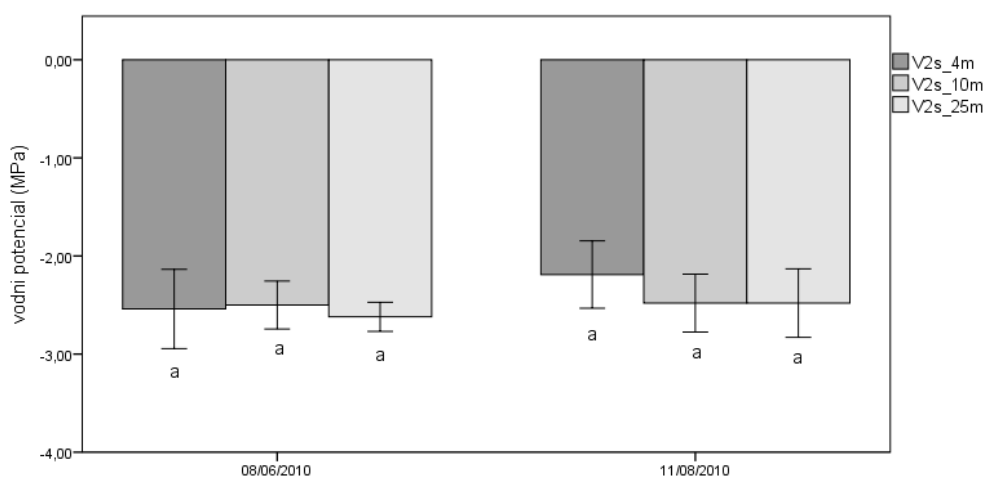
Hvala tudi Jeri, Mojci in Jakobu, ki so mi pomagali pri nabiranju vzorcev in pri nekaterih meritvah, ter Nataši, ki mi je priskočila na pomoč pri prevodu v angleščino.

PRILOGE

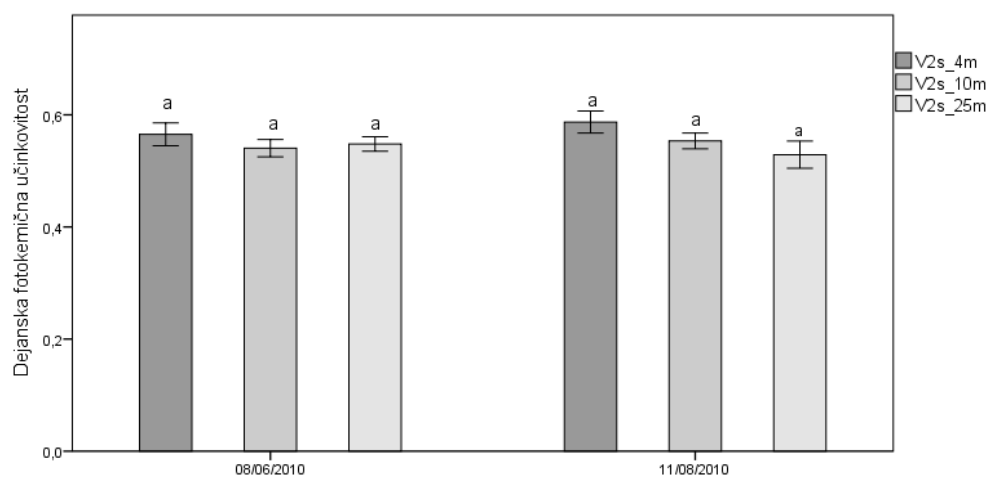
Priloga A: Grafični prikazi preiskovanih parametrov pri katerih nismo ugotovili statističnih razlik.



Slika A. 1: Primerjava dolžine vejic in suhe teže iglic v letih 2009 in 2010 na treh vzorčnih mestih (povprečje $\pm$ SD, $n=6$). Enosmerna ANOVA, Sheffe post-hoc test. Različne črke označujejo statistično značilno razliko pri $p<0,05$ med ploskvami znotraj istega leta ($\gg a \ll$).



Slika A. 2: Vodni potencial (Ψ_w) na treh vzorčnih mestih različno oddaljenih od ceste (4m, 10m, 25m) (povprečje $\pm$ SD, $n=15$). Enosmerna ANOVA, Holm-Sidak post-hoc test. Različne črke označujejo statistično značilno razliko pri $p<0,05$ med ploskvami znotraj istega datuma ($\gg a \ll$).



Slika A. 3: Dejanska fotokemična učinkovitost PS2 (Yield) na treh vzorčnih mestih različno oddaljenih od ceste (4m, 10m, 25m) (povprečje $\pm$ SD, $n=45$). Enosmerna ANOVA, Scheffé *post-hoc* test. Različne črke označujejo statistično značilno razliko pri $p<0,05$ med ploskvami znotraj istega datuma (»a«).

Priloga B: Povezanost med fiziološkimi parametri (vodni potencial (Ψ_w), potencialna fotokemična učinkovitost FS II (Fv/Fm), dejansko fotokemično učinkovitost FS II (Y), transpiracija (Trans)), vsebnostjo Na⁺ v iglicah (Na_iglice) in v tleh (Na_tla) ter količino padavin v obdobju 3 tednov pred merjenjem (Pad). Dvosmerni Pearsonov test korelacije: nz $p > 0,05$, * $p \leq 0,05$, ** $p \leq 0,01$, *** $p \leq 0,001$.

	Ψ_w	Fv/Fm	Y	Trans	Na_iglice	Na_tla	Pad
Ψ_w	1,00	0,685**	nz	0,328*	nz	nz	0,602**
Fv/Fm		1,00	0,268**	,536**	nz	nz	0,801**
Y			1,00	,244**	nz	-,448*	nz
Trans				1,00	nz	nz	0,525**
Na_iglice					1,00	nz	
Na_tla						1,00	nz
Pad							1,00