

UNIVERZA V LJUBLJANI  
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA

Luka ZAJEC

**VPLIV PRAHU NA SPEKTRALNE IN  
FUNKCIONALNE LASTNOSTI LISTOV NAVADNE  
BUKVE (*Fagus sylvatica* L.)**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Ljubljana, 2016

UNIVERZA V LJUBLJANI  
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA

Luka ZAJEC

**VPLIV PRAHU NA SPEKTRALNE IN FUNKCIONALNE LASTNOSTI  
LISTOV NAVADNE BUKVE (*Fagus sylvatica* L.)**

DOKTORSKA DISERTACIJA

**THE INFLUENCE OF DUST ON SPECTRAL AND FUNCTIONAL  
PROPERTIES OF EUROPEAN BEECH LEAVES (*Fagus sylvatica* L.)**

DOCTORAL DISSERTATION

Ljubljana, 2016

Na podlagi statuta Univerze v Ljubljani ter po sklepu senata Biotehniške fakultete in sklepa 23. seje Komisije za doktorski študij z dne 7. 12. 2011 je bilo potrjeno, da kandidat izpolnjuje pogoje za neposredni prehod na doktorski Univerzitetni podiplomski študij Varstva okolja ter opravljanje doktorata znanosti. Za mentorico je bila imenovana prof. dr. Alenka Gaberščik.

Komisija za oceno in zagovor:

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

Član: prof. dr. Jože RAKOVEC  
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za matematiko in fiziko

Članica: prof. dr. Mateja GERM  
Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za biologijo

Datum zagovora:

Podpisani izjavljam, da je doktorska disertacija 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.

Luka Zajec

## KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

- ŠD** Dd  
**DK** UDK 502/504+543.275:630\*164.5:630\*176.1*Fagus sylvatica*  
L.+622.35(043.3)=163.6  
**KG** spektralne lastnosti/funkcionalne lastnosti/prah/listi/bukev/*Fagus sylvatica* L.  
**AV** ZAJEC, Luka, univ. dipl. inž. gozd.  
**SA** GABERŠČIK, Alenka (mentor)  
**KZ** SI-1000 Ljubljana, Jamnikarjeva 101  
**ZA** Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Univerzitetni podiplomski študij  
Varstva okolja  
**LI** 2016  
**IN** VPLIV PRAHU NA SPEKTRALNE IN FUNKCIONALNE LASTNOSTI  
LISTOV NAVADNE BUKVE (*Fagus sylvatica* L.)  
**TD** Doktorska disertacija  
**OP** XV, 124 str., 20 pregl., 54 sl., 4 pril., 148 vir.  
**IJ** sl  
**J1** sl/en  
**AI** Raziskovali smo vpliv prahu na spektralne in funkcionalne lastnosti listov navadne bukve (*Fagus sylvatica* L.). Vpliv prašnih delcev smo ugotavljali na treh lokacijah ob kamnolomu in ga primerjali z referenčno lokacijo v dveh rastnih sezонаh. V tretji sezoni smo izvedli poskus v delno nadzorovanih razmerah z dodajanjem prahu v dveh različnih koncentracijah. Opravili smo meritve izbranih anatomskeih, biokemijskih in fizioloških lastnosti listov. Izmerili smo odbojne in presevne spektre listov s prahom in tistih, ki smo jim prah odstranili v območju 280–880 nm. Ugotavljeni smo povezanost med prisotnostjo prahu, lastnostmi listov in optičnimi lastnostmi. Rezultati iz narave, kjer so bile koncentracije prahu nizke (največ  $0,25 \pm 0,11 \text{ mg/cm}^2$ ), so pokazali razlike v anatomskeih, biokemijskih in fizioloških lastnostih listov bukve na različnih rastiščih, kar ni bilo povezano le s prisotnostjo prahu, ampak je bilo tudi posledica okoljskih razmer na rastišču. Rezultati kratkotrajnega poskusa so pokazali, da le prisotnost apnenčastega prahu na listih bukve v visokih koncentracijah ( $8,98 \pm 4,05 \text{ mg/cm}^2$ ) močno spremeni odbojnost listov navadne bukve v vidnem in UV-spektru, medtem ko nižje koncentracije prahu na listih nimajo velikega vpliva. Prepustnost sončne svetlobe skozi list je spremenjena v vidnem in v NIR-območju. To se je odrazilo v povečani koncentraciji fotosinteznih barvil in zmanjšanju vsebnosti snovi z zaščitno vlogo: antocianov in UV-absorbirajočih snovi. Redundantna analiza je pokazala, da je koncentracija prahu v naravnih razmerah pojasnila le 16 % ( $p < 0,001$ ) variabilnosti odbojnih spektrov. V kratkotrajnem poskusu z visokimi koncentracijami prahu je prisotnost prahu razložila 67 % ( $p < 0,001$ ) variabilnosti odbojnih spektrov ter 12 % ( $p < 0,001$ ) variabilnosti presevnih spektrov.

## KEY WORDS DOCUMENTATION

**DN** Dd  
**DC** UDC 502/504+543.275:630\*164.5:630\*176.1*Fagus sylvatica*  
L.+622.35(043.3)=163.6  
**CX** spectral properties/functional properties/dust/beech/*Fagus Sylvatica* L./leaves  
**AU** ZAJEC, Luka  
**AA** GABERŠČIK, Alenka (supervisor)  
**PP** SI-1000 Ljubljana, Jamnikarjeva 101  
**PB** University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, University Postgraduate Study  
Programme in Environmental Protection  
**PY** 2016  
**TI** THE INFLUENCE OF DUST ON SPECTRAL AND FUNCTIONAL  
PROPERTIES OF COMMON BEECH LEAVES (*Fagus sylvatica* L.)  
**DT** Doctoral dissertation  
**NO** XV, 124 p., 20 tab., 54 fig., 4 ann., 148 ref.  
**LA** sl  
**AL** sl/en  
**AB** We studied the influence of limestone dust on spectral and functional properties of European beech leaves (*Fagus sylvatica* L.) at three different locations along a limestone quarry and compared them to a reference location in two growing seasons. In the third season measurements were conducted in an independent experiment under partially controlled conditions by the controlled feeding of limestone dust in two different concentrations of the dust. Measurements of anatomical and biochemical properties of the leaves were performed. The reflectance spectra of the leaves with the dust and of those where the dust was removed were measured in the range of 280–880 nm. The effect of the dust on the measured parameters was studied and correlations among the presence of dust, leaves' and spectral reflectance properties were analysed. The results from nature where the dust concentrations were low ( $\max 0,25 \pm 0,11 \text{ mg/cm}^2$ ) showed differences in anatomical, biochemical and physiological characteristics of beech leaves from different test sites. This was not only a consequence of the presence of the dust but also of the environmental conditions on the test sites. The results of the short experiment showed that only high concentrations ( $8,98 \pm 4,05 \text{ mg/cm}^2$ ) of limestone dust on beech leaves significantly changed the reflectance properties of the leaves of common beech in the visible and UV spectra, while low concentrations had no major effect on the leaves. The transmittance of the sunlight through the leaves was changed in the visible and near infrared spectra, which was reflected in the increased concentration of photosynthetic pigments and reduced substances for photoprotective function: anthocyanins and UV absorbing substances. The redundancy analysis revealed that the dust concentration in natural conditions explained only 16 % ( $p < 0,001$ ) of the variability of the reflection spectra. In the short experiment with high dust concentrations the presence of the dust explained 67 % ( $p < 0,001$ ) of the variability of the reflection spectra and 12 % ( $p < 0,001$ ) of the variability of the transmittance spectrum.

## KAZALO VSEBINE

	str.
<b>KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA</b>	<b>III</b>
<b>KEY WORDS DOCUMENTATION</b>	<b>IV</b>
<b>KAZALO SLIK</b>	<b>IX</b>
<b>KAZALO PREGLEDNIC</b>	<b>XIII</b>
<b>OKRAJŠAVE IN SIMBOLI</b>	<b>XV</b>
<b>1 UVOD</b>	<b>1</b>
<b>2 PREGLED OBJAV</b>	<b>3</b>
<b>2.1 ZNAČILNOSTI ELEKTROMAGNETNEGA VALOVANJA</b>	<b>4</b>
<b>2.2 LISTI</b>	<b>5</b>
2.2.1 Zgradba listov	5
2.2.2 List in svetloba	5
2.2.3 List in fotosinteza	7
2.2.4 Listne reže	7
<b>2.3 ASIMILACIJSKA BARVILA</b>	<b>8</b>
2.3.1 Klorofili	8
2.3.2 Karotenoidi	9
2.3.3 Antociani	10
<b>2.4 SEVANJE</b>	<b>10</b>
2.4.1 Odbojnosc (refleksivnost)	11
2.4.2 Prepuščanje (transmisivnost)	13
<b>2.5 URAVNAVANJE ABSORBCIJE SVETLOBE</b>	<b>13</b>
<b>2.6 SEZONSKA DINAMIKA OPTIČNIH LASTNOSTI</b>	<b>14</b>
<b>2.7 RASTLINE IN STRES</b>	<b>15</b>
2.7.1 Odziv rastlin na stresne dejavnike	15
<b>2.8 UPORABA OPTIČNIH LASTNOSTI ZA VREDNOTENJE RASTLINSKEGA STRESA</b>	<b>16</b>
<b>2.9 PRAH</b>	<b>17</b>
<b>2.10 PRAH IN RASTLINE</b>	<b>19</b>

2.10.1	Vpliv prahu na človeka	25
<b>3</b>	<b>MATERIALI IN METODE</b>	<b>27</b>
<b>3.1</b>	<b>OBMOČJE RAZISKAVE</b>	<b>27</b>
<b>3.2</b>	<b>PREDMET RAZISKAVE – LISTI NAVADNE BUKVE</b>	<b>31</b>
<b>3.3</b>	<b>POTEK DELA: ANALIZE IN MERITVE NA LISTIH</b>	<b>33</b>
3.3.1	Fiziološke analize	34
3.3.2	Potencialna fotokemična učinkovitost	34
3.3.3	Dejanska fotokemična učinkovitost	34
3.3.4	Jakost elektronskega transporta (ETR)	35
<b>3.4</b>	<b>OPTIČNE LASTNOSTI</b>	<b>35</b>
3.4.1	Merjenje odbojnih spektrov	35
3.4.2	Merjenje presevnosti	36
<b>3.5</b>	<b>PRISOTNOST PRAHU</b>	<b>36</b>
<b>3.6</b>	<b>ZGRADBA LISTA</b>	<b>37</b>
3.6.1	Specifična listna površina in vsebnost vode	37
3.6.2	Število in velikost listnih rež	37
3.6.3	Fotografiranje površine in prečnih prerezov listov	37
<b>3.7</b>	<b>BIOKEMIJSKE ANALIZE</b>	<b>38</b>
3.7.1	Klorofili in karotenoidi	38
3.7.2	Antociani	38
3.7.3	UV-absorbirajoče snovi	39
<b>3.8</b>	<b>STATISTIČNA OBDELAVA PODATKOV</b>	<b>39</b>
<b>4</b>	<b>REZULTATI</b>	<b>41</b>
<b>4.1</b>	<b>REZULTATI MERITEV NA LISTIH IZ NARAVNEGA OKOLJA V LETU 2012 – 1. MERITEV SEZONE</b>	<b>41</b>
4.1.1	Količina prahu na listih	41
4.1.2	Optične lastnosti listov	42
4.1.3	Anatomske lastnosti listov	45
4.1.4	Biokemijske lastnosti listov	49
4.1.5	Fiziološke lastnosti listov	51

4.1.6	Povezanost med parametri	54
4.1.6.1	Korelacije med količino prahu ter biokemijskimi, anatomske ter fiziološkimi lastnostmi listov	54
4.1.6.2	Korelacije med količino prahu ter optičnimi lastnostmi	55
4.1.6.3	Korelacije med biokemijskimi in anatomske lastnostmi odbojem	55
<b>4.2</b>	<b>REZULTATI MERITEV NA LISTIH IZ NARAVNEGA OKOLJA V LETU 2012 – 2. MERITEV SEZONE</b>	<b>56</b>
4.2.1	Količina prahu na listih	56
4.2.2	Optične lastnosti listov	57
4.2.3	Anatomske lastnosti	61
4.2.4	Biokemijske lastnosti	65
4.2.5	Fiziološke lastnosti	67
4.2.6	Povezanost med parametri	71
4.2.6.1	Korelacije med količino prahu ter biokemijskimi, anatomske ter fiziološkimi lastnostmi	71
4.2.6.2	Korelacije med količino prahu ter optičnimi lastnostmi	72
4.2.6.3	Korelacije med biokemijskimi, anatomske lastnostmi in odbojem	72
4.2.7	Povezanost med lastnostmi listov, prisotnostjo prahu in odbojnimi spektri	73
<b>4.3</b>	<b>REZULTATI MERITEV NA LISTIH Z UMETNIM NANOSOM PRAHU V DELNO NADZOROVANIH RAZMERAH V LETU 2015</b>	<b>75</b>
4.3.1	Količina prahu na listih	75
4.3.2	Optične lastnosti listov, odbojnost in presevnost lista	77
4.3.3	Anatomija lista	81
4.3.4	Biokemijske lastnosti	84
4.3.5	Fiziološke lastnosti	87
4.3.6	Povezanost med parametri	90
4.3.6.1	Korelacije med količino prahu ter biokemijskimi, anatomske ter fiziološkimi lastnostmi	90
4.3.6.2	Korelacije med količino prahu ter optičnimi lastnostmi lista	91
4.3.6.3	Povezanost med lastnostmi listov, prisotnostjo prahu in odbojnimi spektri	93
<b>5</b>	<b>RAZPRAVA</b>	<b>97</b>

<b>5.1</b>	<b>VPLIV PRAHU</b>	<b>97</b>
5.1.1	Vplivi prahu na optične lastnosti listov bukve	98
5.1.2	Vplivi prahu na anatomske lastnosti lista	99
5.1.3	Vplivi prahu na biokemijske lastnosti listov	100
5.1.4	Vplivi prahu na fiziologijo listov	101
<b>5.2</b>	<b>POVEZAVA MED LASTNOSTMI LISTOV, PRISOTNOSTJO PRAHU IN ODBOJNIMI SPEKTRI</b>	<b>103</b>
<b>5.3</b>	<b>VEGETACIJA KOT PAST ZA PRAH</b>	<b>103</b>
<b>6</b>	<b>ZAKLJUČKI</b>	<b>105</b>
<b>7</b>	<b>POVZETEK (SUMMARY)</b>	<b>107</b>
<b>7.1</b>	<b>POVZETEK</b>	<b>107</b>
<b>7.2</b>	<b>SUMMARY</b>	<b>108</b>
<b>8</b>	<b>VIRI IN LITERATURA</b>	<b>110</b>
<b>ZAHVALA</b>		
<b>PRILOGE</b>		
<b>Priloga A</b>		
<b>Priloga B</b>		
<b>Priloga C</b>		
<b>Priloga D</b>		

## KAZALO SLIK

	str.
Slika 1: Absorpcijski spekter klorofilov v vidnem delu elektromagnetskega valovanja	9
Slika 2: »Lotusov efekt«	23
Slika 3: Lokacije vzorčenja v naravi okoli kamnoloma Velika Pirešica	28
Slika 4: Živi laboratorij pod delno nadzorovanimi razmerami v drevesnici Omorika	29
Slika 5: Listi navadne bukve v naravnem okolju z vidnimi sledovi prahu	32
Slika 6: Masa prahu na enoto listne površine [ $\text{mg}/\text{cm}^2$ ] v juniju 2012	42
Slika 7: Spektri povprečnih vrednosti relativnega odboja zgornje listne površine z lokacije 1 v juniju 2012	43
Slika 8: Spektri povprečnih vrednosti relativnega odboja zgornje listne površine z lokacije 2 v juniju 2012	43
Slika 9: Spektri povprečnih vrednosti relativnega odboja zgornje listne površine z lokacije 3 v juniju 2012	44
Slika 10: Spektri povprečnih vrednosti relativnega odboja zgornje listne površine s kontrolne lokacije, junij 2012	45
Slika 11: Prečni prerez lista navadne bukve pod povečavo	45
Slika 12: Razlike v debelini zgornje kutikule med posameznimi lokacijami v juniju 2012	46
Slika 13: Razlike v debelini zgornje povrhnjice ter stebričastega in gobastega tkiva med lokacijami, junij 2012	46
Slika 14: Razlike v debelini lista med posameznimi lokacijami v juniju 2012	47
Slika 15: Razlike v razmerju med gobastim in stebričastim tkivom med posameznimi lokacijami v juniju 2012	48
Slika 16: Število listnih rež na enoto listne površine [ $\text{cm}^2$ ] pri listih bukve z različnih lokacij v juniju 2012	49
Slika 17: Razlike v vsebnosti klorofilov in karotenoidov pri listih bukve z različnih lokacij v juniju 2012	49
Slika 18: Razlike v vsebnosti UV-A in UV-B absorbirajočih snovi pri listih bukve z različnih lokacij v juniju 2012	50
Slika 19: Razlike v jakosti transpiracije pri listih bukve z različnih lokacij v juniju 2012	51
Slika 20: Razlike v dejanski fotokemični učinkovitosti (Y) pri listih bukve z različnih lokacij v juniju 2012	52
Slika 21: Masa prahu na enoto listne površine [ $\text{mg}/\text{cm}^2$ ] iz različnih lokacij, sept. 2012	57

Slika 22: Spektri povprečnih vrednosti relativnega odboja od zgornje listne površine pri listih bukve s prahom in opranih listih brez prahu z lokacije 1 - ob kamnolomu Velika Pirešica septembra 2012	58
Slika 23: Spektri povprečnih vrednosti relativnega odboja od zgornje listne površine pri listih bukve s prahom in opranih listih brez prahu z lokacije 2 - ob kamnolomu Velika Pirešica septembra 2012	58
Slika 24: Spektri povprečnih vrednosti relativnega odboja od zgornje listne površine pri listih bukve s prahom in opranih listih brez prahu z lokacije 3 - ob kamnolomu Velika Pirešica septembra 2012	59
Slika 25: Spektri povprečnih vrednosti relativnega odboja od zgornje listne površine pri listih bukve s prahom in opranih listih brez prahu s kontrolne lokacije (lokacija 4) – oddaljene 2,35 km vzhodno od kamnoloma Velika Pirešica septembra 2012	60
Slika 26: Razlike v debelini zgornje kutikule med posameznimi lokacijami, september 2012	61
Slika 27: Razlike v debelini stebričastega in gobastega tkiva ter debelini lista med posameznimi lokacijami septembra 2012	62
Slika 28: Razlike v razmerju med gobastim in stebričastim tkivom med posameznimi obravnavami septembra 2012	63
Slika 29: Število listnih rež na enoto listne površine [ $\text{cm}^2$ ] med posameznimi obravnavami septembra 2012	64
Slika 30: Razlike v vsebnosti klorofilov in karotenoidov med posameznimi obravnavami septembra 2012	65
Slika 31: Razlike v vsebnosti UV-A in UV-B absorbirajočih snovi med posameznimi obravnavami septembra 2012	66
Slika 32: Razlike v jakosti transpiracije med posameznimi lokacijami septembra 2012	67
Slika 33: Razlike v dejanski fotokemični učinkovitosti (Y) med posameznimi lokacijami septembra 2012	68
Slika 34: Razlike v potencialni fotokemični učinkovitosti (Fv/Fm) med posameznimi lokacijami septembra 2012	69
Slika 35: Ordinacijski diagram redundančne analize (RDA), ki pojasnjujejo variabilnost odbojnih spektrov, junij in september 2012	74
Slika 36: Masa prahu na enoto listne površine [ $\text{mg}/\text{cm}^2$ ] pri meritvah vzorcev v delno nadzorovanih razmerah avgusta 2015	76

Slika 37: Spektri povprečnih vrednosti relativnega odboja od zgornje listne površine listov bukve s prahom in opranih listov brez prahu pri kontroli (referenčna ploskev)	77
avgusta 2015	
Slika 38: Spektri povprečnih vrednosti relativnega odboja od zgornje listne površine listov bukve s prahom in opranih listov brez prahu pri listih z manjšo količino prahu (Prah - 1) avgusta 2015	78
Slika 39: Spektri povprečnih vrednosti relativnega odboja od zgornje listne površine listov bukve s prahom in opranih listov brez prahu pri listih z večjo količino prahu (Prah - 2) avgusta 2015	78
Slika 40: Spektri povprečnih vrednosti relativne presevnosti skozi liste bukve pri listih s prahom in opranih listih brez prahu na kontrolnih vzorcih, avgust 2015	79
Slika 41: Spektri povprečnih vrednosti relativne presevnosti skozi liste bukve pri listih s prahom in opranih listih brez prahu na vzorcih z manjšo količino prahu (Prah - 1), avgust 2015	79
Slika 42: Spektri povprečnih vrednosti relativne presevnosti skozi liste bukve pri listih s prahom in opranih listih brez prahu na vzorcih z večjo količino prahu (Prah - 2), avgust 2015	80
Slika 43: Razlike v debelini zgornje kutikule in stebričastega tkiva med posameznimi obravnavami pri listih navadne bukve s prahom, avgust 2015	81
Slika 44: Razlike v razmerju med gobastim in stebričastim tkivom vzorcev bukve med posameznimi obravnavami, avgust 2015	82
Slika 45: Razlike v specifični listni površini med posameznimi obravnavami bukve, avgust 2015	83
Slika 46: Razlike v vsebnosti klorofilov in karotenoidov med posameznimi obravnavami vzorcev bukev, avgust 2015	84
Slika 47: Razlike v vsebnosti antocianov med posameznimi obravnavami vzorcev bukve, avgust 2015	85
Slika 48: Razlike v vsebnosti UV-A in UV-B absorbirajočih snovi med posameznimi obravnavami vzorcev bukve, avgust 2015	86
Slika 49: Razlike v temperaturi bukovih listov med posameznimi obravnavami, avgust 2015	87
Slika 50: Razlike v potencialni fotokemični učinkovitosti FS II (Fm/Fv) med posameznimi obravnavami vzorcev bukve, avgust 2015	88
Slika 51: Posnetek odtisa zgornje in spodnje povrhnjice listov navadne bukve z vidnimi listnimi režami, avgust 2015	90

Slika 52: Ordinacijski diagram redundančne analize (RDA) variabilnosti odbojnih spektrov  
listov bukve, avgust 2015 95

Slika 53: Ordinacijski diagram redundančne analize (RDA) presevnosti, ki prikazuje  
statistično značilno pozitivne korelacije med biokemičnimi lastnostmi v odvisnosti  
od praha, avgust 2015 96

## KAZALO PREGLEDNIC

	str.
Preglednica 1: Količine prahu ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ ) na listih bukve iz okolice kamnoloma v juniju 2012	41
Preglednica 2: Anatomski, biokemijski in fiziološki parametri listov bukve z različnih lokacij, junij 2012	53
Preglednica 3: Korelacje med količino prahu ter biokemijskimi, anatomskimi in fiziološkimi parametri, junij 2012	54
Preglednica 4: Korelacje med količino prahu in odbojem v različnih delih spektra, junij 2012	55
Preglednica 5: Korelacje med biokemijskimi in anatomskimi lastnostmi ter odbojem v različnih delih spektra pri opranih listih bukve, junij 2012	55
Preglednica 6: Količine prahu na listih bukve na različnih lokacijah v okolici kamnoloma Velika Pirešica septembra 2012 ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ )	56
Preglednica 7: Anatomski, biokemijski in fiziološki parametri listov navadne bukve septembra 2012	70
Preglednica 8: Korelacje med količino prahu ter anatomskimi in fiziološkimi parametri listov bukve septembra 2012 - Spearmanov korelacijski koeficient ( $r$ )	71
Preglednica 9: Korelacje med količino prahu in odbojem v različnih delih spektra za september 2012 - Spearmanov korelacijski koeficient ( $r$ )	72
Preglednica 10: Statistično značilne korelacje ( $p \leq 0,05$ ) med biokemijskimi in anatomskimi lastnostmi ter odbojem v različnih delih spektra pri opranih listih bukve septembra 2012	72
Preglednica 11: Lastne vrednosti in kumulativni odstotek pojasnjene variance spektrov prvih štirih kanoničnih osi ter korelacijski koeficienti med prvimi štirimi kanoničnimi osmi, 2012	73
Preglednica 12: Parametri, ki statistično značilno razložijo variabilnost spektrov in delež pojasnjene variance, 2012.	74
Preglednica 13: Količine prahu na listih bukve ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ ) iz drevesnice Omorika avgusta 2015	75
Preglednica 14: Anatomski, biokemijski in fiziološki parametri bukovih listov med posameznimi obravnavami, avgust 2015	89
Preglednica 15: Korelacje med količino prahu ter biokemijskimi, anatomskimi in fiziološkimi parametri navadne bukve avgusta 2015 - Spearmanov korelacijski koeficient ( $r$ )	90

Preglednica 16: Korelacije med količino prahu ter presevnostjo in odbojem v različnih delih spektra, avgust 2015 - Spearmanov korelacijski koeficient (r)	91
Preglednica 17: Korelacije med biokemijskimi in anatomsksimi lastnostmi ter presevnostjo in odbojem v različnih delih spektra pri opranih listih, avgust 2015 - Spearmanov korelacijski koeficient (r)	92
Preglednica 18: Lastne vrednosti in kumulativni odstotek pojasnjene variance spektrov prvih štirih kanoničnih osi ter korelacijski koeficienti med prvimi štirimi kanoničnimi osmi, avgust 2015	94
Preglednica 19: Parametri, ki statistično značilno razložijo variabilnost spektrov in delež pojasnjene variance, avgust 2015	94
Preglednica 20: Parametri, ki statistično značilno razložijo variabilnost biokemične lastnosti in delež pojasnjene variance, avgust 2015	96

## OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

Ant	antociani
ANOVA	analiza variance
EM	elektromagnetno valovanje
ETR	jakost elektronskega transporta
FS I, II	fotosistem I, fotosistem II
$F_0$	minimalna fluorescencija klorofila <i>a</i> FS II temotno adaptiranega vzorca
$F_m$	maksimalna fluorescencija klorofila <i>a</i> FS II temotno adaptiranega vzorca
$F_v$	variabilna fluorescencija temotno adaptiranega vzorca (razlika med $F_m$ in $F_0$ )
$F_v/F_m$	potencialno fotokemično učinkovitost FS II
$F_s$	minimalna fluorescencija klorofila <i>a</i> FS II osvetljenega vzorca
$F_{ms}$	maksimalna fluorescencija klorofila <i>a</i> FS II osvetljenega vzorca
GGO	gozdnogospodarsko območje
IR	infrardeče sevanje
PAR	fotosintežno aktivni spekter sevanja (380–710 nm)
PM	trdni delci (ang. "particulate matter")
PPFD	gostota fotonskega fluksa fotosintežno aktivnega dela sevanja
Kar	karotenoidi
Kl <i>a</i> , Kl <i>b</i>	klorofil <i>a</i> , klorofil <i>b</i>
NIR	bližnje infrardeče sevanje (700–1400 nm)
P	površina vzorca
SD	standardna deviacija
SLA	specifična listna površina
SPM	suspendirani delci (ang. "suspended particulate matter")
ss	suhá masa vzorca
UV	ultravijolično sevanje (100–380 nm)
UV-A	ultravijolično sevanje A (315–380 nm)
UV-B	ultravijolično sevanje B (290–315 nm)
UV-abs	UV-absorbirajoče snovi
Y	dejanska fotokemična učinkovitost, fotokemični izplen (ang. "yield")
ZGS	Zavod za gozdove Slovenije

## 1 UVOD

*"Zares, prah si in v prah se povrneš."*

(Biblija, Stara zaveza, Geneza, 1. Mojzesova knjiga 3,1–24)

Energija sonca je vir življenja na Zemlji. Sevanje sonca dovaja toplotno energijo nanjo, uravnava kroženje in količino vode na njej ter tako ustvarja razmere, ugodne za življenje. Edini biološko pomemben proces, ki lahko izkoristi energijo sonca, je fotosinteza. Energija sevanja sonca se v procesih fotosinteze pretvarja v kemično energijo in predstavlja primarni vir energije za sintezo organskih snovi. Sevanje ima pomembno vlogo v razvojnih procesih, lahko pa predstavlja tudi stresni dejavnik za rastline. Številni fotobiološki pojavi so odvisni od časa, trajanja, smeri in spektralne sestave sončnega sevanja (Larcher, 2003). Velik delež energije na planetu je rezultat nedavne/sedanje ali starodavne (fotilna goriva) fotosintezne aktivnosti (Taiz in Zeiger, 2003).

Rastline so pogosto pod vplivom različnih stresnih dejavnikov, ki močno vplivajo na njihovo delovanje in zmožnost izkoriščanja sončne energije. Stres se v splošnem pojavi, kadar so okoljske razmere neugodne za njihovo rast. Med razmere, ki imajo za posledico stres za rastline, štejemo pomanjkanje vode (suša), ekstremen mraz in ekstremno vročino, poplave, napad žuželk, bakterijske okužbe, pomanjkanje hranil, pomanjkanje kisika, neustrezen pH tal in druge (Male in sod., 2010). Stres lahko rastlinam povzroči tudi prisotnost prahu (Kumar in Thambavani, 2012). Stresne razmere so lahko posledica delovanja naravnih razmer ali pa so rezultat antropogenega delovanja oz. rezultat človekovega delovanja. Prah, katerega vpliv na rastline proučujemo v tem doktorskem delu, nastane v različnih okoljskih razmerah, ki jih lahko povzroči narava ali človek. V našem primeru je prah posledica človekovega delovanja, in sicer pridobivanja peska iz kamnoloma apnenca. Rastline predstavljajo učinkovito sredstvo za odlaganje prahu zaradi svoje velike specifične površine listov in vej. Odlaganje prahu na rastline je rezultat kombinacije različnih okoljskih dejavnikov.

Delci prahu v zraku so iz različnih materialov, različnih oblik, velikosti in mase. Prav te razlike med njimi določajo, kako dolgo pot bodo prepotovali, preden bodo zaradi težnostnih, meteoroloških, adhezijskih ali drugih vzrokov padli na tla, na rastline in druge površine. Konstantna prisotnost prahu pri rastlinah povzroči spremembe v zgradbi, metabolizmu, rasti in rodovitnosti. Študije so pokazale, da se zmogljivost rastlin, ki rastejo na območju s konstantno prisotnostjo prahu, spreminja. Zaradi zračnega onesnaženja se zmanjša njihova rast. Obseg zmanjšanja rasti je odvisen od vrste rastline, koncentracije in porazdelitve onesnaževalcev ter od števila okoljskih dejavnikov (Chaturvedi in sod., 2012).

Prisotnost prahu v okolju pa ne vpliva negativno samo na rastlinsko populacijo, ampak tudi na zdravje ljudi. Prisotnost prahu pri ljudeh lahko povzroči različna obolenja dihal, obolenja, povezana s srčno-žilnim sistemom, različne alergije in drugo (Ram in sod., 2012).

## NAMEN DOKTORSKE DISERTACIJE

Naš namen je bil:

- Ugotoviti, ali prisotnost finih delcev v ozračju, ki se odlagajo na listne površine v obliki prahu, vpliva na:
  - zgradbo lista (debelino lista, debelino kutikule, debelino zgornje in spodnje povrhnjice, debelino stebričastega in debelino gobastega tkiva ter na število in velikost listnih rež),
  - biokemijske značilnosti lista (vsebnost klorofila *a* in klorofila *b*, vsebnost karotenoidov, antocianov in UV-absorbirajočih snovi (UV-A in UV-B)).
- Ugotoviti, ali prašni delci vplivajo na odboj svetlobe (refleksivnost).

## HIPOTEZE

- Predvidevamo, da je eden izmed dejavnikov, ki vplivajo na fotokemično učinkovitost FS II, kar lahko vodi k zmanjšanju primarne produkcije, tudi prisotnost finih trdih delcev v ozračju, ki se odlagajo na listne površine v obliki prahu, kar močno zmanjša absorpcijo svetlobe.
- Predpostavljam, da prisotnost prahu na površini lista spremeni spektralne lastnosti lista glede odbojnosti in absorptivnosti ter vodi k spremenjeni kakovosti in količini absorbiranega sevanja ter spremenjeni energijski bilanci lista.
- Predpostavljam, da fini prašni delci lahko prehajajo v listne reže in jih mašijo ter da posledično prihaja do motenj izmenjave plinov in transpiracije ter povišanja temperature listov, kar vodi v njihovo pregrevanje.
- Predpostavljam, da predstavlja rastlinska odeja učinkovit filter za odlaganje prašnih delcev, kar predstavlja odvzem prahu iz atmosfere. Prisotnost rastlinske odeje zmanjšuje vertikalno (tla–ozračje) in horizontalno gibanje prahu zaradi manjše izpostavljenosti vetru in turbulenci.

## 2 PREGLED OBJAV

Slovenija je za Finsko in Švedsko tretja najbolj gozdnata država EU, kjer letno priraste več kot 9 milijonov m<sup>3</sup> lesa. Gozdnate površine pokrivajo nekaj več kot polovico Slovenije (58,5 % površine). Ta odstotek bi bil mnogo večji (okoli 93 %), če na gozd ne bi s svojim delovanjem vplival človek (Tome, 2009). Če bi območje Slovenije prepustili naravi brez človeka, potem bi jo prerasli gozdovi. Izjema bi bili le visokogorski predeli, nad približno 1800–2000 m nadmorske višine, ter območja močvirij in barij (Kotar in Brus, 1999).

Osnovni gradniki gozda so drevesa, ki skupaj z drugimi rastlinami zaradi tekmovanja za svetlobo ustvarjajo navpično slojevitost. Od tal do vrha krošenj se neživi dejavniki, kot so količina svetlobe in vode ter temperatura, spreminjajo in ustvarjajo različna življenska okolja ter različne ekološke niše. Med drevesnimi vrstami v Sloveniji močno prevladujeta navadna bukev in navadna smreka (31,7 % v lesni zalogi) (Tome, 2009). Drevesna sestava slovenskega gozda se je v obdobju 1970–2010 znatno spremenila. Spremembe se kažejo predvsem v povečevanju pojavljanja listavcev (Poljanec in sod., 2010), regresiji jelke (Ficko in sod., 2011) ter v splošnem izboljšanju ohranjenosti naravne drevesne sestave gozdov (Poljanec, 2008). Podoben razvoj kot v preteklih desetletjih lahko pričakujemo tudi v prihodnje, saj stanje gozdov kaže, da so listavci razvojno mlajši kot iglavci. V prihodnje lahko tako zaradi sanitarnih sečenj iglavcev pričakujemo povečevanje lesne zaloge plemenitih in drugih listavcev ter bukve (ZGS, 2012). Delež bukve v končni lesni zalogi je še leta 2010, ko je bil izveden zadnji popis vseh GGO Slovenije, predstavljal kar 31,8 %. S pojavom naravnih ujm (v letu 2014 žledolom in v letu 2015 namnožitev podlubnikov) se razmerje spreminja v korist bukve. Zaradi podnebnih sprememb bo slovenski gozd v prihodnjih letih podvržen dvigu povprečnih letnih temperatur in spremenjenemu režimu padavin (izdatnejši nalivi, daljša obdobja brez padavin), kar bo negativno vplivalo na zdravstveno stanje dreves. Še posebej bo to negativno vplivalo na smreko zaradi njene nezmožnosti prilagoditve novim razmeram in plitvega koreninskega sistema ter posledično večje verjetnosti povzročitve stresa zaradi pomanjkanja vode. Zaradi splošne oslabelosti se bo nevarnost napada podlubnikov povečala. S tem se bo povečal tudi delež sanitarne sečnje v gozdovih, posledično pa bo prišlo do zmanjšanja deleža smreke v končni lesni zalogi. S počasnim izginjanjem smreke s spremenjenih in rastiščno neprimernih območij se bo delež bukve še povečeval. Poznavanje stresnih dejavnikov pri različnih drevesnih vrstah je ključnega pomena z vidika ohranjanja in varstva gozdov.

Stresni dejavniki, ki vplivajo na rast višjih rastlin, so nizke in visoke temperature, vodni stres (pomanjkanje ali čezmerna izpostavljenost vodi, npr. poplavam), slanost, obremenjenost s težkimi kovinami, toksičnost in drugi dejavniki (Taylor in Davies, 1990).

## 2.1 ZNAČILNOSTI ELEKTROMAGNETNEGA VALOVANJA

Glavni vir energije v našem osončju predstavlja sonce. V njegovi notranjosti konstantno potekajo različne jedrske reakcije, katerih energija v obliki elektromagnetnih valovanj brez večjih sprememb potuje skozi vesolje. Na poti do zemeljske površine mora elektromagnetno valovanje potovati skozi zemljino atmosfero, kjer trdni delci, molekule plinov in tekočin povzročijo sipanje, lom in absorpcijo valovanja (Larcher, 2003). Sevalna energija sonca je sestavljena iz različnih valovnih dolžin svetlobe. Elektromagnetno valovanje, ki se ne absorbira ali sipa v atmosferi, pride do zemeljskega površja (Oštir, 2006). Biosfero doseže sevanje valovnih dolžin od 290 do približno 4000 nm. Sončno sevanje krajših valovnih dolžin se absorbira v stratosferski ozonski plasti, sevanje daljših valovnih dolžin pa je odvisno od koncentracij vodne pare in ogljikovega dioksida v atmosferi. V povprečju zemeljsko površje doseže 47 % sončevega sevanja (Larcher, 2003) oz. 45 % sevanja, ki doseže zemeljsko površje in predstavlja fotosintezno aktivni del sevanja (PAR) z valovnimi dolžinami od 380 do 710 nm. Sevanje valovnih dolžin, krajših od 400 nm, predstavlja ultravijolično sevanje (UV-A 315–380 nm in UV-B 290–315 nm), še krajšim valovnim dolžinam sledijo x-žarki in žarki gama. Sevanje valovnih dolžin, daljših od 700 nm, predstavlja infrardeče sevanje (IR), z daljšanjem valovnih dolžin temu sledijo še mikrovalovi in radijski valovi (Taiz in Zeiger, 2002).

Glavni načini interakcij elektromagnetnega valovanja z zemeljskim površjem so absorpcija, prepustnost in odboj. Razmerje med njimi je odvisno od valovne dolžine svetlobe ter lastnosti in stanja površine. Odvisnost odboja od valovne dolžine tako omogoča prepoznavanje predmetov in nam daje njihov spektralni podpis. S primerjavo odziva pri različnih valovnih dolžinah lahko predmete med sabo ločimo. Spektralni odziv je lahko precej različen, celo za enake predmete, poleg tega pa se spreminja časovno in prostorsko. Za interpretacijo podatkov so pomembni poznavanje spektralno zanimivih območij, razumevanje dejavnikov, ki vplivajo na spektralni podpis, ter razumevanje načina interakcije valovanja s površjem.

Kadar valovanje pade na gladko odbojno površino, pride do zrcalnega odboja. Pri tem se skoraj vsa vpadna energija odbije od površine pod kotom, enakim vpadnemu. Razpršeni ali difuzni odboj se pojavi, kadar je ploskev groba in se valovanje odbije v vse smeri približno enako. Ali neko telo deluje kot zrcalni ali razpršeni odbojnik ali nekje vmes, je odvisno od razgibanosti njegove odbojne površine in valovne dolžine vpadnega valovanja. Če so valovne dolžine manjše od značilnih dolžin razgibanega površja ali od velikosti predmetov, ki površine sestavljajo, pride do razpršenega odboja. V primeru, ko pa je valovna dolžina večja od značilnih razdalj na površju, se zgodi zrcalni odboj. Pri prehodu valovanja med snovmi z različno optično gostoto pride do loma valovanja. Ko potuje svetloba iz optično redkejšega medija v gostejšega, se lomi proti normali (premici, pravokotni na površino). Valovanje se v gosti snovi tako upočasni in spremeni

smer. Pri prehodu iz optično gostejšega v redkejše sredstvo pa se valovanje lomi proč od normale (Oštir, 2006).

Zemljino površje, vključno z rastlinami, prejema in oddaja tudi toplotno ali dolgovalovno rdeče sevanje. Listi rastlin absorbirajo od 85 do 90 % PAR, ki se uporabi v procesih fotosinteze (Larcher, 2003), od tega se manjši del uporabi za sintezo organskih spojin.

Sevanje različnih valovnih dolžin ima različne biološke učinke, ki pa so odvisni tudi od njegove jakosti in trajanja. Fotoni PAR imajo fotosintezni učinek, poleg tega pa lahko imajo tudi fotomorfogenezni in fotodestruktivni učinek. UV-sevanje nima fotosinteznega učinka, ima pa lahko rahel fotomorfogenezni učinek in močan fotodestruktivni učinek, medtem ko ima infrardeče sevanje fotomorfogenetski in termalni učinek na rastline (Larcher, 2003).

Interakcije sončne svetlobe in rastlin so predmet številnih raziskav. Poznavanje teh interakcij ni izrednega pomena le v agrikulturi, hortikulturi in gozdarstvu, temveč se uporablja tudi za druge aplikativne namene. Poznavanje optičnih lastnosti listov je pomembno npr. pri daljinskem zaznavanju in modeliranju vpliva vegetacije na globalno segrevanje, na kroženje ogljika, pri zaznavanju stresa pri rastlinah itd. (Chandrasekharan, 2005). Največ zanimanja med optičnimi lastnostmi je namenjenega odbojnim in vpojnim lastnostim listov, ki omogočajo oceno njihove biokemične sestave. Biokemična sestava je poleg morfološke in anatomske zgradbe ključnega pomena pri razumevanju spektralnih in funkcionalnih lastnosti rastlin.

## 2.2 LISTI

### 2.2.1 Zgradba listov

Listi sočasno opravljajo različne vloge, med najpomembnejše naloge pa štejemo zbiranje sončne energije, sprejem ogljikovega dioksida in preprečevanje izgube vode iz rastline. Uravnavanje teh funkcij zagotavlja optimalno fotosintezno aktivnost, ki jo doseže rastlina s prilagajanjem listov na trenutne okoljske razmere na morfološki, anatomski, biokemijski in funkcionalni ravni. Listi kažejo veliko heterogenost pri optičnih značilnostih, ki se ne razlikujejo zgolj med vrstami, temveč so odvisne tudi od okoljskih razmer (Klančnik in sod., 2012).

### 2.2.2 List in svetloba

V povprečju zemeljsko površje doseže 47 % sončevega sevanja (Larcher, 2003). Sevalna energija sonca, ki prispe do rastline, se deloma odbije, deloma absorbira, preostanek pa

preseva skozi liste. Zgradba lista je specializirana za absorpcijo te svetlobe. Povezavo med odbojnostjo (refleksivnostjo)  $\rho(\lambda)$ , prepustnostjo (transmisivnostjo)  $\tau(\lambda)$  in vpojnostjo (absorptivnostjo)  $\alpha(\lambda)$  opisuje enačba:  $\rho(\lambda) + \tau(\lambda) + \alpha(\lambda) = 1$  (Yoshimura, 2010). Odbojnost in prepustnost sta nasprotno sorazmerni vpojnosti. Odbojnost opredeli delež tiste energije sevanja, ki se odbije (od površine lista ali od listne notranjosti) glede na vpadlo energijo. Celotna energija sevanja, ki se odbije od površine lista ali v njegovi notranjosti, predstavlja odbojnost. Propustnost predstavljajo vsi fotoni, ki prihajajo skozi list in izstopijo v okolico v prvotni smeri toka (Asner, 1998). Razlike v odbojnosti in propustnosti med listi nastanejo predvsem zaradi razlik v notranji organizaciji celičnih struktur (Knippling, 1970). Na podlagi specifičnega spektralnega območja lahko pridobimo informacije o kemični sestavi lista (Levizou in sod., 2005).

Najbolj zunanje plasti celic, celice epidermide (povrhnjice) navadno dobro prepuščajo vidno svetlogo in so pogosto konveksne oblike. Konveksno oblikovane celice lahko delujejo kot leče, ki dodatno zbirajo svetlogo, in tako je gostota energijskega toka svetlobe preusmerjena na kloroplaste. Tako je količina svetlobe, ki doseže kloroplast, lahko celo večja kot zunanja (okoljska) svetloba (Taiz in Zeiger, 2003). Preusmerjanje svetlobe celic povrhnjice je zlasti pomembno pri rastlinah, ki rastejo v senčni podrasti gozdov.

Pod zgornjo povrhnjico je stebričasto tkivo, katerega celice so nameščene v vzporednih stebrih, sestavljenih iz 1 do 3 plasti. Pod stebričastim tkivom je gobasto tkivo, sestavljeno iz celic nepravilnih oblik, ki vsebuje veliko zračnih prostorov. Zračni prostori predstavljajo od 50 do 80 % volumna gobastega tkiva in ustvarjajo stik med zrakom in vodo, ki odbija in lomi svetlogo ter s tem usmerja njen potovanje. Svetloba se na prehodih med vlažnimi celičnimi stenami in zrakom odbija in lomi, kar imenujemo tudi sipanje svetlobe. Sipanje svetlobe je v listih pomembno, saj se na ta način znatno podaljša pot potovanja fotonov znotraj lista, s čimer se poveča tudi možnost njihove absorpcije na pigmentnih molekulah. V splošnem je tako pot potovanja fotonov skozi list kar 4-krat daljša, kot če bi svetloba prehajala naravnost skozi list (Richter in Fukshansky, 1996).

Tehnologija ugotavljanja optičnih lastnosti rastlin omogoča prikaz spektralnih lastnosti, ki so povezane z zgradbo lista ali z določenim stresom, ki deluje na rastline. Za razumevanje slednjega moramo dobro poznati biokemijske in anatomske značilnosti lista, predvsem odbojnost, vpojnost in prepustnost (Liew in sod., 2008).

Poznavanje optičnih lastnosti listov je pomembno tudi pri daljinskem zaznavanju in modeliranju vpliva vegetacije na globalno segrevanje, kroženje ogljika, zaznavanju stresa pri rastlinah itd. (Chandrasekharan, 2005). Največ zanimanja je namenjenega odbojnim in absorpcijskim lastnostim listov, ki so posledica biokemičnih in morfološko-anatomskih lastnosti listov.

### 2.2.3 List in fotosinteza

Fotosintezno najaktivnejši del višjih rastlin je mezofil lista. Število plasti celic, ki sestavljajo stebričasto tkivo, se med rastlinami razlikuje in je odvisno od svetlobnih razmer. Celice vsebujejo številne kloroplaste, med njihovimi plastmi pa se ustvarjajo majhni zračni prostori, ki predstavljajo od 5 do 20 % volumna tkiva (Woolley, 1971). Stebričasto tkivo deluje kot neke vrste sito, saj klorofil znotraj celic ni enakomerno razporen, ampak je omejen v kloroplastih. Med molekulami klorofila tako prihaja tudi do senčenja, zaradi česar je absorpcija svetlobe v kloroplastih manjša, kot bi bila pri enaki količini klorofila v raztopini, kjer se klorofil enakomerno razporedi. Med kloroplasti, ki predstavljajo svetlobne ponore, nastajajo prehodi, skozi katere lahko neabsorbirana svetloba prodira tudi v globlje plasti celic v listu (Taiz in Zeiger, 2002).

Celice v mezofilu imajo veliko kloroplastov, ki vsebujejo specializirane pigmente za absorpcijo svetlobe. Fotosinteza poteka v rastlinskih organelih – kloroplastih. Znotraj kloroplastov so tilakoidne membrane s fotosinteznimi barvili, klorofilom in karotenoidi. Svetlobne reakcije fotosinteze potekajo v tilakoidnih membranah, medtem ko ogljikove reakcije fotosinteze (temotna faza) potekajo v stromi kloroplasta (Miller in Levine, 1998). V kloroplastih se svetlobna energija pretvori v kemično energijo (Taiz in Zeiger, 2003). Struktura lista je idealna za fotosintezo. V veliki večini primerov celice listov vsebujejo več kloroplastov, kot jih vsebujejo celice drugih delov rastlin (Coolidge-Stoltz in sod., 2001). Pri listih, ki so osenčeni z drugimi listi, izmerimo mnogo manjšo fotosintezno aktivnost (Taiz in Zeiger, 2003).

### 2.2.4 Listne reže

Glavna naloga listnih rež je izmenjava plinov med okolico in notranjostjo listov. Za normalen potek fotosinteze v listih je potreben ogljikov dioksid, ki iz okolice prihaja do mezofila skozi odprte listne reže. Skozi listne reže se izmenjujejo tudi produkti fotosinteze (kisik) ob hkratnem izhlapevanju vodnih hlapov iz lista. Z izparevanjem vode skozi listne reže se rastlina ohlaja, hkrati pa nastane vlek, ki poganja vodo iz korenin v višje predele rastlin. Listne reže so praviloma v spodnji povrhnjici lista. Listne celice, ki vsebujejo največ kloroplastov, so v bližini zgornje površine lista, kjer so bolj izpostavljene soncu. Klorofil v kloroplastih prestreza sončno energijo. Ogljikov dioksid prodre v list skozi odprte listne reže. Voda, ki so jo absorbirale korenine rastline, potuje po steblu (deblu) navzgor do listov po ksilemu. Sladkor in kisik nastaneta med fotosintezo iz ogljikovega dioksida in vode. Kisik zapusti list skozi odprte listne reže, sladkor pa vstopi v floem in potuje po celotni rastlini. Velika površina lista je izpostavljena zraku, zato lahko voda hitro izhlapi oz. se izgubi iz lista v ozračje. Proces izhlapevanja vode iz rastlinskih delov imenujemo transpiracija. Transpiracija skozi listne reže, katerih površina predstavlja zgolj 1 do 2 % celotne površine lista, predstavlja do 2/3 skupne evaporacije vode iz rastlin. Rastlina

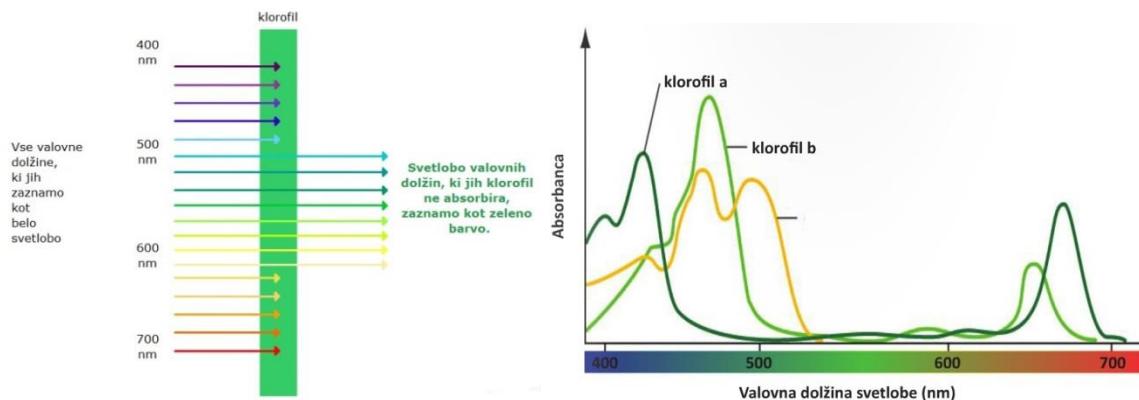
lahko z izhlapevanjem izgubi veliko vode. Brez procesov, ki bi upočasnili izhlapevanje, bi uvenela in odmrla. Rastline lahko uravnavajo odprtost listnih rež in s tem izhlapevanje. Kadar so temperature visoke in primanjkuje vode, rastline pogosto zaprejo listne reže (Coolidge-Stoltz in sod., 2001). Pogosta prisotnost prahu na listih povzroči, da so listne reže navadno malo večje od ostalih celic, pogosto napolnjene s prašnimi delci in na nekaterih mestih tudi zamašene. Delci, ki so večji od odprtih listnih rež, jih lahko zamašijo in s tem vplivajo na izmenjavo plinov ter posledično na fotosintezo, vsebnost vode, respiracijo in navsezadnje na rast rastlin (Rai in sod., 2010).

## 2.3 ASIMILACIJSKA BARVILA

Pri semenkah v tilakoidnih membranah kloroplastov lahko najdemo dve skupini asimilacijskih pigmentov: klorofile in karotenoide. Glede na izrabo svetlobe pri fotosintezi bi jih lahko razdelili v dva dela: na glavni asimilacijski pigment v reakcijskem centru (klorofil *a*) in antenske asimilacijske pigmente (preostali klorofili in karotenoidi). Glavna naloga klorofila in drugih asimilacijskih barvil je podobna nalogi sončnih celic: zbiranje svetlobne energije in njenega porabljjanja za fotosintezo (proizvodnja sladkorjev) (Coolidge-Stoltz in sod., 2001). Klorofil in drugi pigmenti v tilakoidnih membranah so vedno obdani s proteini. Prenos energije iz karotenoidov na klorofile je energetsko manj učinkovit kot prehod med klorofili. Klorofili in karotenoidi absorbirajo energijo svetlobe ter jo shranijo kot kemično energijo kemijskih vezi (Taiz in Zeiger, 2003).

### 2.3.1 Klorofili

Klorofili so glavna fotosintezna barvila, ki z absorpcijo sončne energije omogočajo proces fotosinteze. Ves klorofil je v tilakoidnih membranah, kjer potekajo svetlobne reakcije fotosinteze. Listi lahko nadzorujejo količino absorbirane svetlobe. Klorofil zelo močno absorbira v območju rdečega (750 nm) in modrega spektra (425–490 nm), prepustnost in odbojnosc sta pa doseženi v zelenem spektru (490–575 nm) – to je tudi vzrok zelene barve rastlin. Klorofil *a* absorbira pri 430 in 670–680 nm, klorofil *b* pri 460 in 650 nm (Taiz in Zeiger, 2003) (Slika 1).



Slika 1: Absorpcijski spekter klorofilov v vidnem delu elektromagnetnega valovanja (levo), [http://www.kii3.ntf.uni-lj.si/e-kemija/file.php/1/output/pomen\\_barvil/](http://www.kii3.ntf.uni-lj.si/e-kemija/file.php/1/output/pomen_barvil/) (13. 11. 2015), in asimilacijski spektri nekateri asimilacijskih pigmentov semenk (desno) (Likar, 2009)

Figure 1: The chlorophyll absorption spectra in the visible region of the electromagnetic waves (left) and the assimilation spectra of some assimilation pigments in seed plants (right) (Likar, 2009)

Najbolje lahko razkroj klorofilov opazimo pri zorenju sadja in jesenskem listju. V listih se jeseni klorofila razgradita mnogo hitreje, kot sta se spomladi tvorila. V naših klimatskih razmerah nastaja klorofil v rastочih listih od nekaj dni do nekaj tednov, nato ga listi obdržijo 4 do 5 mesecev. V jesenskem času se klorofil razgradi zgolj v 3 do 4 dneh.

### 2.3.2 Karotenoidi

V vseh zelenih rastlinah so kot pomožna fotosintežna barvila prisotni tudi karotenoidi, ki absorbirajo sončno sevanje v modrem delu spektra vidne svetlobe med 400 in 520 nm (prepoznavni trojni vrh). Ločimo dve skupini: karotene in ksantofile (derivati karotenov, ki vsebujejo kisik). Karotenoidi so rumene do rdeče barve. Najpogostejsa karotena sta  $\alpha$ - in  $\beta$ -karoten. Ksantofili so oksidacijski produkti karotenov in so najpogosteje rumenkasti. Zeleni listi npr. vsebujejo  $\beta$ -karoten (25–30 % od prisotnih karotenoidov), lutein (okoli 45 %), violaksantin (15 %) in neoksantin (15 %). Prisotne so lahko tudi manjše količine drugih karotenoidov, npr.  $\beta$ -karotena,  $\alpha$ - in  $\beta$ -criptoksantina, zeaksantina, anteraksantina in laktukaksantina (Taiz in Zeiger, 2003).

Glavna naloga karotenoidov pri fotosintezi je absorpcija svetlobe v modro zelenem delu, s katerim rastline razširijo uporabni del svetlobnega spektra. Sprejeto sončno energijo pretvorijo v energijo, ki jo preko mehanizma induktivne resonance prenesejo na klorofil a (Likar in sod., 2009). Zaradi te funkcije delujejo kot pomožna fotosintežna barvila, ki obenem klorofile varujejo pred uničenjem s premočno svetobo. Ob večji absorpciji sončne svetlobe, kot je rastlina potrebuje za fotosintezo, nastajajo zelo reaktivne oblike kisika, ki bi lahko poškodovale rastlinska tkiva. Karotenoidi lahko to preprečijo z absorpcijo presežne sončne energije.

### 2.3.3 Antociani

Antociani so najpomembnejša skupina vodotopnih rastlinskih barvil. Lahko so v različnih delih višje razvitih rastlin. Rastlinske dele obarvajo rdeče vijoličasto modro. Barva je odvisna od vrednosti pH. V kislem so rožnato rdeči, v nevtralnem in rahlo bazičnem pa vijoličasto modri (Hughes in sod., 2008). Antociani spadajo med flavonoide, najdemo jih v vakuoli. Njihova glavna funkcija je obarvanje cvetov in sadežev. Barva pomaga privlačiti opaševalce cvetov in živali, ki se prehranjujejo s plodovi. Na ta način pomagajo pri razmnoževanju rastlin. Antociani imajo tudi zaščitno funkcijo: absorpcija svetlobe v antocianskih molekulah vpliva na odvajanje odvečne energije iz sistema, kar za občutljivejše organske molekule pomeni zaščito pred fotodestrukcijo. Učinek je še posebej opazen pri kalicah in mladih delih rastlin (Taiz in Zeiger, 2003). Barve, kot so oranžna, rdeča, rožnata, vijoličasta in modra, v glavnem temeljijo na antocianih. Glede funkcije antocianov v listih je bilo postavljenih že veliko hipotez (Nikiforou in sod., 2010).

## 2.4 SEVANJE

Sevanje je oddajanje energije v obliki elektromagnetnega (EM) valovanja. Vsako telo, ki je segreto nad absolutno ničlo (0 K oz.  $-273,15^{\circ}\text{C}$ ), seva. Za biosfero pomemben del sevanja pride od sonca. Od celotnega EM-spektra pridejo do zemlje radijski valovi, ki na biosfero po dosedanjem znanju nimajo vpliva, njihova valovna dolžina pa je med 100 in 4000 nm. Rentgenske žarke in žarke gama ter velik del mikrovalov infrardečega (IR) in ultravijoličnega (UV) sevanja zadrži atmosfera (Tome, 2006).

Sevanje, ki ga zaznava človeško oko, imenujemo vidna svetloba in je del spektra EM-sevanja z valovno dolžino od 380 (vijoličasti del) do 750 (rdeči del) nm. Preostali del spektra je mavričnih barv (425–490 nm = modra, 490–575 nm = zelena, 575–585 nm = rumena, 585–650 nm = oranžna). Za rast in razvoj rastlin je pogosto omejujoč dejavnik ravno svetloba, ki se premika s hitrostjo  $3 \times 10^8$  m/s. Valovna dolžina ( $\lambda$ ) je razdalja med zaporednimi vrhovi valov. Vidni del spektra je določen na podlagi zaznavnih sposobnosti organizmov, ki ga živali in ljudje večinoma zaznamo s fotoreceptori in ga rastline uporabljajo za fotosintezo. Vse večji vpliv na biosfero imajo antropogeni viri svetlobe. Rastline pri fotosintezi uporabljajo EM-sevanje v razponu valovnih dolžin od 380 do 710 nm. Ta del svetlobe v povezavi z rastlinami imenujemo tudi fotosintezno aktivni del spektra (PAR) (Tome, 2006). Višje rastline imajo večinoma dva absorpcijska vrhova svetlobe. Prvega pri okoli 450 nm (modri del spektra) in drugega pri okoli 650 nm (rdeči del spektra). Preostala svetloba se v listih absorbira in spremeni v toploto ali pa se od njih odbije. Od vidnega dela sevanja rastline absorbirajo najmanj zelene svetlobe (490–575 nm), zato vidimo liste v zeleni barvi (Crawley, 1997, cit. po Tome,

2006). Vidno svetlobo sestavljajo fotoni različnih valovnih dolžin, pri čemer imajo fotoni z manjšo valovno dolžino večjo energijo, zato je svetloba z valovno dolžino, večjo kot 680 nm, veliko manj učinkovita kot svetloba z manjšo valovno dolžino.

Energija fotona ob stiku z molekulo barvila preda svojo energijo barvilu. Barvilo absorbirano energijo spet odda, kar lahko poteka na več načinov. Barvilo lahko absorbirano energijo odda kot toploto ali kot fluorescenco. Barvilo, ki fluorescira, absorbirano energijo odda kot foton vidne svetlobe. Ker se v procesu absorpcije in oddajanja del energije izgubi (toplota), ima oddani foton manjšo energijo (večjo valovno dolžino) kot vsrkani foton. Barvilo lahko absorbirano energijo porabi tudi za izbijanje elektronov, ki jih nato preda drugim molekulam – to npr. naredi rastlinsko barvilo klorofil med fotosintezo (Vilhar, 2006).

Pri merjenju svetlobe so zlasti pomembni trije parametri: spektralna kakovost, količina svetlobe in smer svetlobe (Taiz in Zeiger, 2003).

#### 2.4.1 Odbojnost (refleksivnost)

Odbojnost oz. refleksivnost je količina svetlobe, ki je rastlinski list ne absorbira, saj se od listne površine deloma neposredno odbije, del pa se je razprši v notranjosti lista, od koder nato prehaja nazaj v okolico. Odbojnost lista je močno odvisna od strukturiranosti kutikule in lomnega količnika med zrakom in listno površino (Knippling, 1970; Larcher, 2003). V vidnem delu spektra je odbojnost majhna in v povprečju ne preseže 10 % (Knippling, 1970). Bleščeči listi določenih drevesnih vrst lahko odbijejo od 12 do 15 % vidne svetlobe. Refleksivnostna krivulja sicer v PAR doseže vrh v zelenem delu pri valovni dolžini približno 550 nm, kjer se lahko refleksivnost lista poveča do 20 % (Larcher, 2003). Posledično zaradi večjega odboja zelene svetlobe človeško oko zaznava zeleno barvo rastlin (Knippling, 1970, Taiz in Zeiger, 2002). Rastline najmanj svetlobe odbijejo v oranžnem in rdečem delu spektra, kjer so vrednosti refleksivnosti med 3 in 10 % (Larcher, 2003). V infrardečem spektru, od 700 do 1300 nm, se odstotek odbite svetlobe poveča na približno 50 % in nato pri večjih valovnih dolžinah postopoma upada (Knippling, 1970) predvsem na račun močne absorpcije svetlobe vodnih molekul v listih (Allen in Richardson, 1968). Odbojnost v območju od 400 do 700 nm je odvisna od barvil, kot so klorofil, antociani in karotenoidi (Liew in sod., 2008), ki navadno absorbirajo v rdeči in modri svetlobi. S tem ustvarjajo močne značilnosti absorpcije pri 430 nm in 670 nm (klorofil *a*) ter 460 nm in 650 nm (klorofil *b*), in sicer z vrhom odbojnosti v zeleni barvi (500–600 nm) (Underwood in sod., 2007).

Odbita svetloba odraža stanje rastlin, kar so pokazale številne študije. Morfološke, biokemijske in/ali fizične spremembe v okolini vplivajo na način, kako rastline odbijajo

svetlobe. Odbojnost se uporablja za ugotavljanje biotskega in abiotskega stresa glede na njegove biokemijske in anatomske spremembe v lastnostih lista (Liew in sod., 2008). Dvig odbojnosti je povezan z listnimi klorozami in obolenji. Na podlagi odbite svetlobe so razvili nedestruktivne metode določanja vsebnosti klorofilov, razmerja karotenoidov do klorofila in vsebnosti vode v listih (Levizou in sod., 2005). Na podlagi meritev odbojnosti je mogoče tudi razlikovanje svežih in suhih listov. Odbojnost suhih listov je navadno večja kot svežih listov pri različnih valovnih dolžinah, tudi v IR-spektru se krivulji svežega in suhega lista precej razlikujeta, kar kaže na pomen vsebnosti vode na optične lastnosti listov (Woolley, 1971; Carter, 1991; Liew in sod., 2008; Huryna in Pokorný, 2011).

Prav tako se razlikuje refleksivnost lista na njegovi zgornji in spodnji strani. V vidnem spektru je refleksivnost na spodnji strani lista večja kot na zgornji (Carter, 1991), v predelu NIR pa ima zgornja stran lista večjo refleksivnost v primerjavi s spodnjo stranjo (Woolley, 1971). Woolley (1971) je v svoji študiji tudi ugotovil, da se refleksivnost lista povečuje s povečevanjem vpadnega kota žarka, da pa je ta pojav splošen in ni odvisen od valovne dolžine sevanja. Refleksivnost obratno korelira z absorbanco in s tem tudi s kemično sestavo listov. Večja je vsebnost vpojnih molekul, predvsem barvil, manjša bo odbojnost lista. Tako lahko intenzivnost odbojnosti v specifičnih delih spektra daje informacijo o kemični sestavi lista. Razvite so bile različne metode za oceno celokupne koncentracije klorofila, razmerja med karotenoidi in klorofili (Peñuelas in Filella, 1998; Sims in Gamon, 2002) ter za vsebnost vode v listih in krošnjah (Peñuelas in sod., 1997).

Pomembni deli v spektru odbojnosti so: modri del spektra (400–499 nm), ki je pod močnim vplivom vpojnih klorofilov in karotenoidov, prehod med modro in zeleno (500–549 nm) z najvišjim vrhom zelene regije pri 550 nm in rdeče območje (650–699 nm), ki je povezano z močno absorpcijo fotonov na klorofilnih molekulah (Liew in sod., 2008).

Stres pri rastlinah nakazujejo spremembe odbojnosti v rdečem delu spektra (650–699 nm). Odbita svetloba v območju od 700 do 1400 nm je odvisna predvsem od strukture celic, v območju od 1400 do 2000 nm pa od vsebnosti vode v tkivih. Številne raziskave so pokazale, da so spremembe v odbojnosti povezane tudi s pomanjkanjem hranil in vodnim stresom (Liew in sod., 2008).

#### 2.4.2 Prepuščanje (transmisivnost)

Med optičnimi lastnostmi listov je prepuščanje oz. transmisivnost v primerjavi z odbojnostjo in vpojnostjo obravnavana redkeje. Prepuščanje je odvisno od strukture in debeline lista. Mehki, prožni listi prepuščajo od 10 do 20 % sevanja, zelo tanki listi lahko prepuščajo več kot 40 %, medtem ko debeli listi ne prepuščajo več kot 3 % sevanja. Prepuščanje je večje pri valovnih dolžinah, kjer je tudi odbojnost večja, in sicer v zelenem in infrardečem delu spektra (Knapp in Carter, 1998; Larcher, 2003). V UV-delu spektra je prepuščanja zelo malo, so pa Barnes in sod. (2008) v svoji študiji ugotovili, da se pri rastlinah, ki so bolj izpostavljene UV-sevanju, lahko zazna diurnalna ritmika prepuščanja v UV-delu spektra. Ta je najmanjša sredi dneva, upad prepuščanja pa je izrazitejši pri mladih listih.

### 2.5 URAVNAVANJE ABSORPCIJE SVETLOBE

Na svetlobno okolje posamezne rastline vpliva tudi njena rastna oblika. Spektralne lastnosti so odvisne od velikosti, gostote ter orientacije poganjkov in listov (Underwood in sod., 2007). Večina rastlin orientira asimilatorne površine tako, da je čim manj listov nenehno izpostavljenih neposredni sončni svetlobi, tako da prejemajo bolj ali manj razpršeno svetlogo. Rastline na ta način preprečujejo čezmerno obsevanje in pregrevanje listov. Gre za odziv rastlin na svetlobne razmere in njihovo prilagajanje danim razmeram. Ravno nasprotno pa imajo rastline senčnih rastišč listne ploskve orientirane čim bolj pravokotno na smer svetlobnih žarkov, hkrati pa liste orientirajo tako, da je zasenčevanje med njimi čim manjše (Taiz in Zeiger, 2002). Zlasti pri drevesnih in grmičastih vrstah se v krošnjah oblikuje svetlobni gradient od površine proti notranjosti. Upad intenzitete svetlobe znotraj krošnje je odvisen od arhitekture in stopnje razvoja krošnje, tipa listov ter starosti rastline (Larcher, 2003). Buken spada med sencovzdržne drevesne vrste, ki so tolerantne na pomanjkanje direktnega sončnega sevanja (Brus, 2004; Kitao in sod., 2009), kar je pogost pojav v večslojnih gozdnih sestojih zaradi senčenja.

Na ravni rastlinskih organov je absorpcija svetlobe uravnavana tudi z njihovo anatomsко in morfološko zgradbo. Absorpcija svetlobe v listu je lahko uravnavana z gibanjem kloroplastov. Tako pri šibkejši jakosti sevanja opazimo premik kloroplastov bliže k površini lista, kjer se poravnajo v smeri vpadne svetlobe, kar jim omogoča povečano absorpcijo (Taiz in Zeiger, 2002). Obraten pojav se zgodi pri čezmernem obsevanju listov, kjer se kloroplasti prerazporejajo stran od svetlobe, tako da je njena absorpcija zmanjšana tudi do 15 % (Gorton in sod., 1999).

V nekaterih okoljih so rastline izpostavljene močnemu sevanju, ki je tudi škodljivo. Prav zato rastline razvijejo posebne anatomske prilagoditve, kot so laski in epikutikularni voski,

ki pripomorejo k povečani refleksivnosti na površini listov in zmanjšani absorpciji svetlobe. Tovrstne adaptacije lahko zmanjšajo absorpcijo svetlobe tudi za več kot 40 % in predstavljajo učinkovite UV-filtre za asimilacijski parenhim (Larcher, 2003). Holmes in Keiller (2002) sta potrdila povečano odbojnost listov, zaščitenih z voski, saj se je po njihovi odstranitvi odbojnost znatno zmanjšala. Prisotnost voskov ima največji vpliv na odbojnost v vidnem spektru. Tudi gostota in oblika trihomov imata vpliv na optične lastnosti listov, saj trihomi znatno spremenijo relief listne površine. Prisotnost trihomov poveča odbojnost v vidnem delu spektra. Nasprotno pa lahko imajo bolj poraščeni listi v UV-spektru celo manjšo odbojnost zaradi prisotnosti UV-absorbirajočih snovi v laskih (Holmes in Keiller, 2002). Vpliv trihomov na optične lastnosti se lahko spreminja med razvojem lista. Pri številnih rastlinskih vrstah so mladi listi gosto porasli s trihomi, z ekspanzijo listov pa njihova gostota upada. Tako je lahko odbojnost mladih listov zaradi trihomov večja in se z razvojem lista postopoma manjša (Yoshimura, 2010).

Vplive kutikule na optične lastnosti listov sta v svoji študiji raziskovala Baltzer in Thomas (2005) in ugotovila, da debelina kutikule vpliva na povečanje odbojnosti zlasti v vidnem spektru, v predelu NIR pa je njen vpliv variabilen. Vpliv kutikule na odbojnost v predelu NIR je predvidljivejši, kadar je ta debelejša od  $1\mu\text{m}$  (Slaton in sod., 2001).

Na optične lastnosti lista vpliva tudi prisotnost povrhnjice. Odstranitev zgornje povrhnjice poveča vpojnost in prepustnost lista in upad odbojnosti svetlobe valovnih dolžin med 400 in 800 nm. Odstranitev povrhnjice na spodnji strani lista, ki je obsevan z zgornje strani, povzroči majhno zmanjšanje vpojnosti in odbojnosti ter znatno povečuje prepustnost. Ob odstranitvi zgornje in spodnje povrhnjice pa se močno poveča prepustnost lista, medtem ko se odbojnost in vpojnost zmanjšata. Torej prisotnost povrhnjice poveča vpojnost v vidnem spektru (Lin in Ehleringer, 1983).

## 2.6 SEZONSKA DINAMIKA OPTIČNIH LASTNOSTI

Spektralne lastnosti rastlin se spreminjajo tudi med rastno sezono, kar je pogojeno predvsem s spremembami količine in razmerij rastlinskih pigmentov, vsebnostjo vode v listih, višino in razrastjo rastlin, naklonskim kotom listov ter z drugimi strukturnimi karakteristikami (Gilmore in sod., 2008).

Listnati gozdovi zmernega pasa kažejo številne sezonske spremembe. Sezonske spremembe listov so navadno inducirane s krajšanjem fotoperiode, ki v listih povzroči zaporedje programiranih sprememb. Te se kažejo kot izguba klorofila, zmanjšanje razmerja klorofilov  $a/b$ , upadanje fotosintezne sposobnosti, kolaps celičnih sten, spremembe v hormonskem ravovesju, asimilacijo hraničnih snovi pa nadomesti prerazporejanje le-teh. Nekatere od teh sprememb se odražajo tudi na optičnih lastnostih

listov (Castro, 2008). Listi dreves jeseni spremenijo barvo in s senescenco listov pride do sprememb optičnih lastnosti (Yoshimura, 2010).

V splošnem se pri staranju listov poveča njihova odbojnosc v vidnem delu spektra (400–700 nm), kar odraža razpadanje klorofilov (Castro, 2008). Spektralna krivulja v predelu PAR postane bolj ravna (Asner in Wessman, 1997). V NIR se odbojnosc sprva poveča z odmikanjem celične vsebine od celičnih sten in na koncu upade z nadaljnjam razpadom fotosintetskih tkiv (Castro, 2008).

## 2.7 RASTLINE IN STRES

Nihanje okoljskih dejavnikov v naravnih razmerah odločilno vpliva na rast in razvoj rastlin. V primeru prevelikega odstopanja okoljskih dejavnikov od optimalnih razmer v rastlini sproži stresno reakcijo. Dejavnike, ki to povzročajo, označujemo kot dejavnike stresa ali stresorje. Dejavnike stresa delimo na abiotske (svetloba, temperatura, voda, minerali, slanost, pH, prah) in biotske (druge rastlinske vrste, živali, mikroorganizmi). Tudi človek spreminja okolje z mehanskimi in kemičnimi posegi, ki lahko izzovejo stres (Larcher, 1994). Stresni dejavniki skoraj nikoli ne nastopajo posamezno, pogosto jih je v enem časovnem obdobju prisotnih več, ki vplivajo na rastlino (povezava suša in visoke temperature). V literaturi je ta pojav poznan kot multipli stres (Schulze in sod., 2005). Pri tem rastline pogosto kažejo navzkrižno toleranco (cross-tolerance), ko odpornost na en stresni dejavnik sproži prilagajanje na drugega (Taiz in Zeiger, 2010).

Dejavniki stresa vplivajo na celoten organizem, čeprav je neposredno prizadet le določen del rastline. Posledice se kažejo v morfoloških, biokemijskih in fizioloških spremembah.

### 2.7.1 Odziv rastlin na stresne dejavnike

Rastlina reagira na stres z različnimi sistemi aklimatizacije in adaptacije, kar se odraža na različnih ravneh od gena do celotnega organizma (mehanizem odpornosti in tolerance, strukturne spremembe, tvorba zaščitnih spojin, mehanizem popravila in prilagajanja, sinteza specifičnih molekul kot odgovor na škodo, ki jo povzroča stres) (Šircelj, 2001; Vukadinović, 1999). Kako se bo rastlinski organizem odzval na dejavnike stresa, je odvisno od genetske zasnove, fenotipskih lastnosti, starosti rastline in sezonske aktivnosti. Odziv rastline na dejavnike stresa se med posameznimi osebki lahko precej razlikuje.

Glede na prepoznavnost simptomov lahko stresne dejavnike delimo med specifične in nespecifične. Pri specifičnih simptomih se znaki kažejo kot lokalizirane spremembe glede na stresni dejavnik z dobro vidnim mestom delovanja (npr. poškodba membran in proteinov zaradi toksičnosti težkih kovin). O nespecifičnih stresnih simptomih pa

govorimo, če so vezani na intenziteto stresa in so neodvisni od stresnega dejavnika (spremenjene lastnosti membran, povečano dihanje, inhibicija fotosinteze, sprememb energetskega stanja, motnje rasti, zmanjšana fertilnost, zgodnja senescenca). Ali je rastlina podvržena določenemu stresnemu dejavniku, lahko ugotovimo le, če to novo stanje rastline primerjamo z običajnim (Larcher, 1994).

Pojav in razvoj stresa pri rastlini imata značilne modelne faze. Prvi indikator prisotnosti določenega stresnega dejavnika najprej izzove alarmno reakcijo v organizmu. Prvotni destabilizaciji sledi faza utrditve (odpornosti), kjer se stanje normalizira in stabilizira. Ob nadaljevanju prisotnosti stresnega dejavnika se poveča obremenitev na rastlino in nastopi faza izčrpavanja, ki lahko privede do trajnih poškodb ali celo odmiranja organov in celotne rastline (Stocher, 1947; Larcher, 1994).

Stresni dejavniki lahko na rastlino vplivajo destruktivno, kar lahko privede do nepopravljive škode ali celo propada rastline (distres). Lahko pa prisotnost stresnih dejavnikov vpliva na rastlino celo pozitivno (eustres). Kratkotrajna obdobja stresa lahko spodbudijo rastlino k prilagoditvi in večji odpornosti (Larcher, 1994).

## 2.8 UPORABA OPTIČNIH LASTNOSTI ZA VREDNOTENJE RASTLINSKEGA STRESA

Spektralne lastnosti svetlobe, ki se odbije od rastlin in se odraža kot barva listov, veljajo za kazalnik stresa pri rastlinah. Optične lastnosti lahko pripomorejo k razumevanju fizioloških odgovorov rastlin na rastne razmere ali njihove prilagoditve na določeno okolje ter predstavljajo praktično orodje za zaznavanje zdravja rastlin preko t. i. spektralnih podpisov, ki jih lahko povežemo z določenimi stresnimi dejavniki.

Tako obstaja širok nabor raziskav o vplivih povečanih koncentracij CO<sub>2</sub>, temperaturnega stresa, vplivov težkih kovin, UV-sevanja, vodnega stresa, vpliva škodljivcev, herbicidov idr., ki temeljijo na meritvah optičnih lastnosti listov (Liew in sod., 2008). Odzivi rastlin na stres so najpogosteje raziskovani na podlagi refleksivnosti (Carter in Knapp, 2001). Z možnostjo uporabe prenosnih, natančnih in zanesljivih spektrofotometrov je refleksivna spektroskopija postala pomemben del ekofizioloških študij, saj velja za preprosto, hitro in nedestruktivno metodo, ki omogoča meritve in spremljanje znakov stresa v času. Pogosto raziskave rastlinskega stresa vključujejo okoljske gradiente ali sezonsko dinamiko. Med drugim so razviti tudi indeksi, ki se uporabljajo za spremljanje sprememb vsebnosti barvil med razvojem listov (Gamon in Surfus, 1999; Winkel in sod., 2002) in za oceno klorotičnosti listov (Adams in sod., 1999).

Najsplošnejši odziv rastlin na stres je opazen v delu spektra od 690 do 720 nm. Povečana refleksivnost v tem delu spektra je zgodnji kazalnik stresa (Carter in Knapp, 2001). Optične lastnosti listov v delu spektra okoli 700 nm so ključnega pomena za zaznavanje rastlinskega stresa in za oceno koncentracije klorofila v listih. Optični odziv rastlin na stres v tem delu spektra je lahko pojasnjen s težnjo listov, da se v njih pri izpostavljenosti stresnim dejavnikom spremenijo razmerja med barvili in da izgubljajo klorofil (Gang in Kapoor, 1972). Poveča se količina askorbinske kisline, ki zavira staranje listov (Prajapati in Tripathi, 2008).

Zaključek številnih študij, ki so potrdile korelacije različnih stresnih dejavnikov s spremembami optičnih lastnosti listov, je, da gre za spremembe na morfološki in/ali biokemični ravni, ki se odražajo na optičnih lastnostih (Liew in sod., 2008), in sicer se navadno povečata refleksivnost in transmisivnost listov. Pri vodnem stresu se turgorski tlak v celicah zmanjša, kar povzroči povečanje površin intercelularjev in s tem povečano sisanje svetlobe (Knippling, 1970; Woolley, 1971). Prav tako je pri pomanjkanju hranil mogoče zaznati povečano odbojnost in prepustnost listov, ki pa sta najopaznejši v vidnem spektru zaradi zmanjšane vsebnosti klorofilov v listih (Mariotti in sod., 1996; Masoni in sod., 1996).

## 2.9 PRAH

Prah imenujemo različne trdne delce, ki so naravnega ali antropogenega izvora s premerom, manjšim od 0,01 mm, ter se navadno tvorijo ob procesu razpadanja (Faith in Atkisson, 1972, cit. po Chaturvedi in sod., 2013) in neposredno onesnažujejo atmosfero kot primarna onesnaževala. Združitev več primarnih onesnažil, kot so organski ali anorganski aerosoli različnih plinov, npr.  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{NH}_3$ , in drugih nasičenih organskih spojin, vodi v nova kompleksna sekundarna onesnaževala (Blanusa in sod. 2015). Prašni delci sodijo med največje onesnaževalce zraka (Arslan in Boyboy, 1990; Van Jaarsveld, 2008; Chaturvedi in sod., 2013, Weber in sod. 2015), ki negativno vplivajo na zdravstveno stanje človeka in so sestavljeni iz mešanice težkih kovin, poliklikličnih aromatskih ogljikovodikov, saj in drugih snovi iz atmosfere (Rai, 2014). Delci prahu so zelo variabilni, razlikujejo se po izvoru, velikosti, obliki, masi, fizikalnih zakonitostih, kemijski sestavi in vplivih na okolje. Ocenili so, da vsako leto v zemeljsko atmosfero vstopi okoli 30 milijonov ton prahu (Van Jaarsveld, 2008). Količinsko največji naravni izvori prašnih delcev predstavljajo vulkanski izbruhi (več kot 500 aktivnih vulkanov na svetu), preperevanje kameninske podlage in tal ter erozija. Večja količina prahu, ki se kopči na zemeljski površini, je rezultat vetrne erozije (Armbrust, 1986). Vsako leto se s pomočjo vetra transportira na milijone ton materiala. Posamezni delci prahu v zraku so s prostim očesom pogosto nevidni. Ti delci prahu, ki so večinoma sestavljeni iz različnih delčkov kamnin in drugih zemeljskih materialov, pogosto vsebujejo tudi ustrezno velike snovi

biološkega izvora, kot so virusi, bakterije, spore gliv, morske pene in cvetni prah (Oteros in sod., 2015).

Vpliv različnih človekovih dejavnosti (kamnolomi, intenzivno kmetijstvo, industrija, promet) so viri prahu in onesnaževalcev v atmosferi. Prašne delce pogosto delimo po velikosti premera (PM – particulate matter; trdni delci), vendar se v literaturi navaja različne razmejitve prašnih delcev glede na njihov premer. Tako Weber (2014) deli prašne delce na velike prašne delce s premerom, večjim od  $10 \mu\text{m}$ , grobe prašne delce velikosti med  $2,5$  in  $10 \mu\text{m}$ , fine prašne delce s premerom med  $0,1$  in  $2,5 \mu\text{m}$  in zelo fine prašne delce z velikostjo premera pod  $0,1 \mu\text{m}$ . Powe in Willis (2004) delita prašne delce na fine prašne delce (premer  $< 2,5 \mu\text{m}$ ) in zelo fine prašne delce (premer  $< 1,0 \mu\text{m}$ ), pri čemer so ti večinoma antropogenega izvora ( $1 \mu\text{m} = 0.001 \text{ mm}$ ).

Prah iz peči za proizvodnjo cementa ima večinoma (80–90 %) manjši premer kot  $30 \mu\text{m}$ . Delci prahu, ki jih proizvajajo motorna vozila, lahko variirajo med  $0,01$  in  $5.000 \mu\text{m}$ , medtem ko je cestni prah večinoma velik od  $3$  do  $100 \mu\text{m}$ . Ob makadamskih cestah se občuti naglo zmanjšanje velikosti prahu prvih  $8 \text{ m}$  od cestnega roba, kar povzroči odlaganje prašnih delcev, večjih od  $50 \mu\text{m}$ . V pasu  $30 \text{ m}$  od cestnega roba se odloži večina prašnih delcev, večjih od  $20 \mu\text{m}$ . Večja oddaljenost od cestnega roba pomeni odlaganje le še finih prašnih delcev, ki se z vetrom prenašajo tudi na večje razdalje (Farmer, 1991).

Prisotnost prahu v atmosferi vpliva na njene optične lastnosti ter lahko spremeni barvo sonca in neba ob sončnem zahodu (Ridgwell, 2002). Številne študije dokazujejo, da je v urbanem ozračju koncentracija aerosolov posledica prometa (izgorevanje fosilnih goriv, obraba avtomobilskih gum) in drugih procesov izgorevanja (nepopolno izgorevanje goriv, industrijske emisije). Aerosoli so drobni delci različnih snovi, ki lebdijo v zraku: prah, dim in meglice.

Prašni delci se iz atmosfere izločijo s pomočjo različnih mehanizmov odlaganja, kjer prevladuje mokro ali suho odlaganje. Mokra depozicija prahu se nanaša na spiranje prahu iz atmosfere s pomočjo dežja, snega ali megle. Suha depozicija (usedanje) prahu temelji na procesih težnostnega padanja in difuzivnega mešanja ter procesih, ki temeljijo na trku različnih snovi in njihovem prestrezanju (Buckett in sod., 2000). Vegetacija ima ključno vlogo pri izločanju prašnih delcev iz atmosfere v kopenskih ekosistemih. Učinkovitost usedanja prahu na drevesih je pogojena z različnimi dejavniki, kot so lastnosti krošnje, hitrost vetra, temperatura, velikost prašnih delcev in topnost plinov, pa tudi z morfologijo, velikostjo in zrelostjo lista (Buckett in sod., 2000; Hofman in sod., 2014; Weber in sod., 2014) ter higroskopičnostjo prašnih delcev (Litschke in Kuttler, 2008).

Zaradi klimatskih sprememb prihaja do večjih odklonov v temperaturnem, sevalnem in padavinskem režimu. Podaljšane in obsežne suše in poplave uničijo ali poškodujejo

vegetacijsko odejo, zaradi česar se povečujeta tudi vetrna in vodna erozija tal. Delci tal se lahko odlagajo na drugih lokacijah, tudi na asimilacijskih površinah rastlin, to pa vodi k motenosti delovanja rastlin in k zmanjšanju primarne produkcije.

Ob kamnolomu se nalaga veliko prahu, ki nastaja z različnimi dejavnostmi, te pa imajo v kamnolomu različno stopnjo onesnaženja SPM ("suspended particulate matter" suspendirani delci). Glavni vzroki so vrtanje, "razstreljevanje" (velja za takojšen vir prašnih delcev SPM), obdelovanje apnanca (tvorjenje prahu), obdelovanje rude, oblikovanje hribov in premikanje vozil (Chaulya in sod., 2001).

Prah različnih izvorov ne predstavlja le stresnega dejavnika za rastline, ampak je škodljiv tudi za ljudi in živali, saj draži dihalne poti, se nalaga v pljučnih mešičkih, povzroča astmatična in kardiovaskularna obolenja in lahko vodi celo do pljučnega raka (Cohen in sod., 2005, Hofman in sod. 2013). Delci prahu, večji od 10 µm, se prvenstveno odlagajo v ustno-žrelnem območju, delci prahu velikosti med 2,5 in 10 µm se odlagajo v območju zgornjih dihalnih poti (sapnik), fini in zelo fini delci pa lahko prodrejo do pljučnih mešičkov (Popek in sod., 2013; Weber in sod., 2014). Vpliv prašnih delcev v ozračju je torej zelo skrb vzbujajoč za zdravje ljudi, ne samo v državah v razvoju, ampak tudi v že razvitih državah.

## 2.10 PRAH IN RASTLINE

Prašni delci predstavljajo kompleksno sestavo organskih in anorganskih snovi različnih oblik in velikosti in lahko vstopajo v rastline na številne načine (Prusty in sod., 2005). Vpliv prahu na rastline je lahko fizikalni ali kemičen. Odlaganje prahu na liste rastlin lahko fizično naredi liste bolj gladke (abrazija), lahko pa maši listne reže ter s tem vpliva na njihovo funkcionalnost. Prah različnih izvorov ima različen kemizem. Kemični vpliv prahu na tla ali rastlino je lahko pomembnejši kot katerikoli fizikalni vpliv, kar je raziskoval že Farmer (1991). Večina dosedanjih raziskav je potekala z apnencem ali s kemijsko inertnim prahom. Prisotnost apnenčastega prahu lahko spremeni kemizem rastline in na daljši čas še spremembo kemizma tal, saj je apnenčev prah alkalen, kar lahko na tla deluje tudi kot gnojilo. Pri tem se različne vrste rastlin nanj različno odzovejo. Najpogostejši odziv rastlin na prah je povečana transpiracija vode, poškodovanje ali mašitev listnih rež, dvig listnega pH, simptomi poškodbe lista (kloroze/rumenenje listov, nekroze, venenje) in splošno zmanjšana prirast ter zmanjšanje rastlinskih reprodukcijskih struktur (vpliv na kalitev, cvetenje in tvorbo plodov).

Rastlinska odeja predstavlja tudi površine za usedanje delcev (filter) in ima pomembno vlogo pri zmanjševanju pretoka prašnih delcev v atmosferi (Zhao, 2011). Za učinkovito zmanjšanje onesnaževal v ozračju so zelo učinkovite tudi krošnje dreves, kar potrjujejo

številni raziskovalci, Farmer (1991), Prusty in sod. (2005), Zhao (2011), Ram in sod. (2012), pri čemer se listi rastlin obnašajo kot filtratorji onesnaženega zraka (Beckett in sod., 1998; Samal in Santra, 2002; Nowak in sod., 2006; Janhäll, 2015). To, da se listi in izpostavljeni deli rastlin obnašajo kot filtratorji onesnaženega zraka, je bilo namreč dokazano (Beckett in sod. 1998; Samal in Santra, 2002; Nowak in sod., 2006; Janhäll, 2015). Prah na listu močno zmanjša izmenjavo CO<sub>2</sub> (Naidoo in Chirkoot, 2004). Chen L. s sod. (2015) je dokazal, da se delci PM<sub>10</sub> zelo učinkovito usedajo na listne površine že pri relativno majhnem zmanjšanju hitrosti vetra in zanje predstavljajo krošnje dreves pomemben ponor. Situacija je kompleksnejša pri finih prašnih delcih PM<sub>2,5</sub>, ki so zelo občutljivi tudi na manjše turbulentno gibanje zraka. Za razliko od delcev PM<sub>10</sub> se delci PM<sub>2,5</sub> zelo redko odlagajo na listne površine, saj je zaradi tlačnih razlik znotraj krošnje pogosto prisotno minimalno gibanje zraka, kar otežuje odlaganje delcev PM<sub>2,5</sub> na listne površine, kar so raziskali Yin in sod. (2011). Ker drevesa in z njimi drevoredi in mestni gozdovi pri odstranjevanju delcev PM<sub>2,5</sub> iz atmosfere niso učinkoviti, je treba proučiti možnost povečanega odlaganja delcev PM<sub>2,5</sub> na druge zelene površine, kot so npr. grmovja, travne površine itd.

Poznavanje lastnosti in zakonitosti urbane vegetacije je ključno pri načrtovanju ekosistemskih storitev za izboljšanje kakovosti zraka v mestih. Izmenjujoča zasaditev drevesnih in grmovnih vrst različnih višin in strukture poveča možnost odlaganja prašnih delcev na različnih ravneh. Nižja vegetacija, ki je bliže mestu onesnaženja, kar v mestu predstavljajo izpusti prometa, predstavlja pomemben ponor prašnih delcev, ki se odlagajo ali razpršijo po rastlinah. V zadnjem času številni raziskovalci (Petroff in sod., 2008, Litschke in Kuttler, 2008) in krajinski arhitekti (Andersson-Skölda in sod., 2015) posvečajo veliko pozornosti urbani vegetaciji, ki v mestnih okoljih predstavlja zelo učinkovit filter zraka za različne vrste zračnih onesnažil. Pugh (2012) je z načrtнимi zasaditvami drevoredov in posameznega drevja v mestih dokazal učinkovitost zmanjšanja prašnih delcev v mestnih okoljih do 60 %. Vendar pa morajo biti drevesa ali sestoji dovolj gosti, da nudijo zadostno usedalno površino za prašne delce in dovolj porozni za zrak, da s prahom potuje skozi krošnje in ne čeznje. Strnjeni sestoji dreves, sestavljeni kot zaščitni pasovi, ki so blizu izvora prahu (promet, kamnolom), nudijo učinkovito usedalno površino za prah, saj se tako razporedi po večji površini. Zavedanje vertikalnega in horizontalnega gibanja zračnih tokov, ki prenašajo prašne delce do usedalnih površin, je pomembno pri učinkovitem načrtovanju urbane vegetacije. Sistemska zasaditev vertikalno večslojnih rastlinskih pasov je pomembna zaradi povečanja površine odlaganja, različne strukture odlagalnih površin (trava, rastlinski laski, iglice) in poroznih ovir (krošnje dreves, veje), ki ustvarijo turbulentno gibanje zraka z znižanjem tlačnega pritiska, kar poveča verjetnost odlaganja prahu na liste (Fowler, 1989). Za določitev ustrezne zelenega pasu so pomembni različni dejavniki, kot so oddaljenost od vira onesnaženja ter širina in višina zelenega pasu. Za vzpostavitev zelenega pasu potrebujemo tudi informacije o podnebju,

tleh in človeških vplivih, saj lahko le tako izberemo primerne drevesne vrste (Chaulya in sod., 2000).

Učinkovitost usedanja prahu na listno podlago je lahko pogojena tudi s higroskopičnostjo prašnih delcev, saj se hitrost usedanja prahu poveča kar za 5- do 6-krat, če se relativna vlažnost delcev spremeni s 44 % na 99 %, kar so potrdili Litschke in Kuttler (2008) ter Petroff in sod. (2008).

Liu in sod. (2013) so na primeru študije iz Guangzhoua na Kitajskem ugotovili, da lahko urbana vegetacija zadrži 8,012 tone prahu na leto, medtem ko druga študija iz Pekinga razkriva, da samo drevesa v Pekingu vsako leto iz zraka odvzamejo 772 ton prašnih delcev PM<sub>10</sub> (Yang in sod. 2005). Angleška študija Speaka in sod. (2012) zaključuje, da bi lahko v Manchestru samo zelene strehe zmanjšale koncentracijo prašnih delcev PM<sub>10</sub> za 2,3 % na leto oz. za 9,18 tone na leto. Nowak in sod. (2006) ocenjujejo, da urbana drevesa v ZDA letno odvzamejo iz atmosfere 711.000 ton prašnih delcev PM<sub>10</sub>, samo mestni gozdovi Chicaga pa 212 ton (McPherson in sod. 1994).

Z odvzemom prahu iz zraka se izboljšuje tudi kakovost lokalnega zraka. Vendar različne drevesne vrte različno učinkovito prestrežajo in zadržujejo prašne delce iz zraka. Tako so iglavci učinkovitejši kot listavci (Hwang in sod., 2011; Lin in sod., 2012) in bukev manj učinkovita kot breza. Sæbø in sod. (2012) so ugotovili, da bukev pri akumulaciji prašnih delcev PM<sub>10</sub> na povoskani listni površini učinkovito zadrži le 25 % prašnih delcev, medtem ko jih breza zadrži do 82,6 %. Dob (*Quercus robur*) velja za izredno odporno drevesno vrsto, ki uspešno prestreza prah iz zraka zaradi nižje rasti, debelejših in z dlačicami poraslih listov in čvrstih kratkih pecljev. Zaradi različne sestave prahu (organski, anorganski) so lahko posamezni prašni delci tudi hidrofilni in povečujejo omočenost listne površine, kar dodatno povečuje njihovo zmožnost sprejema prahu.

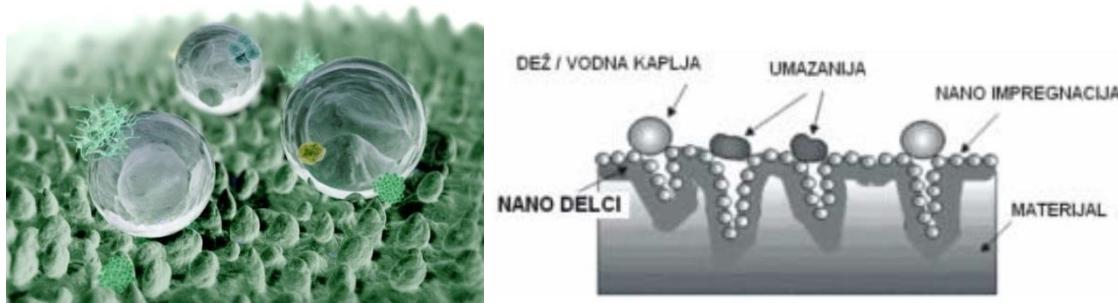
Vendar se v zadnjem desetletju s pomočjo računalniškega modeliranja povečuje zavedanje, da lahko drevesa in rastlinski koridorji v urbanem naselju zaradi zmanjšanja prevetrenosti mest v pritalnih plasteh celo povečujejo lokalno zračno onesnaževanje in s tem zmanjšujejo redčenje zračnih mas v urbanih središčih (Gromke in Ruck, 2007; Buccolieri in sod., 2009). Vranckx in sod. (2015) so v obsežni študiji dokazali, da se v urbanih središčih zaradi vegetacije koncentracije delcev PM<sub>10</sub> povečajo od 0,2 do 2,6 % (povprečje 1,4 %) in koncentracije elementarnega ogljika za 1 % do 13 % (v povprečju za 8 %), kar je nekajkrat manj, kot so nakazovale zgodnejše študije. Te so temeljile na preprostih linearnih razmerah z le prevladujočo smerjo vetra, polno olistano vegetacijo in največjo možno koncentracijo emisij zaradi prometa v prometni konici.

Številne rastline so zelo občutljive na zračno onesnaženje, saj jim onesnažila lahko poškodujejo liste, škodujejo rasti in omejujejo primarno produkcijo (Prusty in sod., 2005).

Prisotnost prahu pri bombažu povzroči zmanjšanje prevodnosti listnih rež za 30 %, kar se odraža v 28-% zmanjšanju primarne produkcije rastline. Po čiščenju listov z vodo se primarna proizvodnja povečal za 10 % v 5 dnevih. To je pogojeno z listnimi režami, ki so pri bombažu na zgornji in spodnji listni površini. Nanos prahu na zgornjo stran listne površine pri bombažu povzroči mašenje listnih rež, kar omejuje izmenjavo plinov med rastlino in njenim okolico. Posledica je dvig temperature pri listih, obremenjenih s prahom (Zia-Khan in sod., 2015). Prisotnost prahu na rastlinah negativno vpliva na možnost cvetenja in zorenja sadja (Prasad in Inamdar, 1990).

Stalna izpostavljenost onesnaževalcem (v urbanih naseljih) vodi k zmanjšanju fotosintezne aktivnosti zaradi zmanjšane absorpcijske površine, mašenja ali poškodovanja listnih rež in povzroči večjo občutljivost na sušo zaradi tanjše kutikule (Pourkhabbat in sod., 2010). Vendar pa Wijaytrante in sod. (2009) ugotavljajo pozitivno korelacijo med dvigom koncentracije prahu na listih in dvigom neto fotosintezne aktivnosti rastline ob hkratnem zmanjšanju primarne produkcije. Številni raziskovalci (Fluckiger in sod., 1979; Wijaytrante in sod., 2009; Prajapati, 2012) izpostavljajo pozitivno korelacijo med količino prahu in temperaturo lista ter med temperaturo lista in fotosintezno aktivnostjo. Darley (1966) na primeru cementnega prahu ugotavlja zmanjšanje fotosintezne aktivnosti za 73 % pri navadnem grahu ter do 90 % v primeru jablan (kar so raziskovali Cook in sod. (1981)).

Površine listov so multifunkcionalne površine med rastlino in njenim okoljem. Večina drevesnih vrst ima gladko listno kutikulo, prihaja pa do medvrstnih razlik pri mikrostrukturnih okraskih zaradi listnih dlačic, kutiklarnih gub in epikutitularnih voskov (Neinhuis in Bartholott, 1997). Prisotnost epikutitularnih voskov na listih pogosto povzroči vodoodpornost, lahko določljiv makroskopski efekt, ki sta ga intenzivno proučevala Holloway in Rentschler (1976). Številne raziskave potrjujejo soodvisnost med prisotnostjo voskov, omočljivostjo listnih površin in onesnaženostjo zraka (Huttunen, 1994). Prah, ki pada na liste rastlin, vpliva na fotosintezo, na druge procese v rastlinah, na produktivnost, barvila in metabolizem, prav tako pa povzroča tudi poškodbe lista, zmanjšuje pridelek ter vpliva na absorpcijo in akumulacijo elementov iz tal (Abdel-Rahman, 2012). Pojavijo se tudi kloroze, nekroze in venenje (Prasad, 1992). V prašnih delcih v ozračju je mešanica različnih elementov. Koliko delcev se odlaga na rastlinstvo, je odvisno od razširjenosti in porazdelitve delcev ter njihovih lastnosti. Obstoječih delcev prahu na rastlini je odvisen tudi od hravavosti listne površine (Farmer, 1991) in njene samočistilne zmožnosti z vodnim izpiranjem, t. i. lotosov efekt (Neinhuis in Bartholott, 1997). Lotosov efekt se je hitro prenesel v številne uporabne aplikacije (medicina, tekstilna industrija, nanopremazi itd.) (Huskič, 2007).



Slika 2: Lotosov efekt  
Mikroskopska slika lotosovega lista s posameznimi kapljicami vode in prahu (<http://wthielicke.gmxhome.de/bionik/indexuk.htm>, 1. 11. 2015) ter uporaba aplikacije v nanoteknologiji za nanopremaze (Huskič, 2007)

*Figure 2: "Lotus effect": a microscopic picture of a lotus leaf with individual drops of water and dust, and the use of applications in nanotechnology for nanocoatings (Huskič, 2007)*

Prah, ki se odlaga na listih rastlin, povzroči, da rastline sprejmejo manj neposredne sončne svetlobe, potrebne za fotosintezo. Posledica je dvig temperature listov, s čimer se spremenijo tudi njihove optične lastnosti (Prajapati, 2012). Prah senči liste in s tem negativno vpliva na njihove fizične lastnosti. Prašni delci se usedajo tudi na tla ter vse dele rastlin od listov, cvetov do plodov. Tako pogosto negativno vplivajo na fizične lastnosti rastlin. Tudi kemično delovanje prahu pomembno vpliva na rastline. Cementni prah in prah, ki se ustvarja ob cestah, pogosto vsebuje veliko različnih kovin, ki lahko strupeno delujejo nanje. Ob stalni prisotnosti prahu, obremenjenega s kovinami, se lahko skozi leta spremenijo lastnosti tal, kar vpliva na vitalnost rastlin. Zakisan prah ima različne vplive na vitalne procese v rastlinah od fotosinteze, metabolizma ogljikovih hidratov do vsebnosti klorofilov in karotenoidov ter različnih mineralnih snovi (Maltesika in Nanos, 2011).

Vpliv prašnih delcev na liste rastlin se spreminja glede na vrsto rastlin in vrsto prahu, velikost prašnih delcev, stopnjo onesnaženosti, značilnosti strukture listov in višino drevesne krošnje (Maltesika in Nanos, 2011). Prah se ob zmanjšanju hitrosti vetra odloži na listih rastlin (Armbrust, 1986). Hrapavost listne površine je še posebej pomembna ob močnejših vetrovih za delce, večje od 10 µm, ki ostanejo ujeti na listnih površinah (Chamberlain, 1967. cit. po Farmer, 1991). Prav tako je Chamberlain ugotovil, da mokra listna površina povzroči močnejše odlaganje prahu nanje. Čeprav lahko dež izpere del prahu iz njih, je mokra površina listov nato ponovno izpostavljena njegovemu nanisu.

Zaradi nalaganja prahu na listno površino pride do različnih sprememb v strukturi in funkciji lista (Rai in sod., 2010). Vpliv prahu na liste se kaže v njihovih optičnih lastnostih, pri odbojnosti, v vidnih in kratkovalovnih dolžinah svetlobe ter v količini svetlobe za fotosintezo (Farmer, 1991). Odlaganje prahu na listno površino lahko zmanjšuje prehajanje plinov med listi in zrakom ter pomembno vpliva na energijsko bilanco rastlin, pri čemer so

pomembne njegova velikost, struktura in barva. Sedimentacija grobih delcev navadno poteka na zgornji površini listov, medtem ko imajo manjši/finejši delci manjši vpliv na rastline. Prašni delci s premerom  $< 10 \mu\text{m}$  ali  $< 2.5 \mu\text{m}$  močno vplivajo na zdravje ljudi in ga ogrožajo (Prajapati, 2012). Najpogosteje opisane poškodbe listov z najštevilnejšimi učinki vpliva prahu na rastline sta raziskovala že Kumar in Thambavani (Kumar in Thambavani, 2012). Značilno manjši listi in manjši SLA ter bolj redke listne reže opazimo pri rastlinah, obremenjenih s prahom. V prašnih okoljih so na rastlinah vidne kloroze (rumenenje) listov in črni madeži na zgornji listni površini. Spremembe so tudi debelejše kutikule, kolaps epidermisa, temni fenolni depoziti v gobastem tkivu, relativno debele stene ksilema in rahlo odebujene floemske celice so anatomske znaki prašnih listov (El-Khatib in Youssef, 2011). Povečano izgubo vode so opazili v nočnem času, če so prah nanašali na spodnjo listno povrhnjico, pri kateri je imel fini prah največji učinek. Poleg izgube vode je prisotnost prahu omogočila tudi globljo penetracijo amonijaka v rastlino. Propustnost listov za amonijak je v povezavi s povečano koncentracijo prahu in manjšimi delci prahu. Efekt penetracije amonijaka v rastlino je trajal do 4 tedne po nanosu prahu na spodnjo listno povrhnjico (Farmer, 1991).

Prah iz odprtih peskokopov apnenca in s številnih makadamskih cest je močno alkalen z veliko koncentracijo kalcija (Everett, 1980, cit. po Farmer, 1991). Vpliv prahu na rastline se lahko kaže tudi v spremembi kemizma tal, ki ima dolgoročno največji vpliv na rastline (Scheffer in sod., 1961). Manjša koncentracija apnenčastega prahu povzroči dvig pH v tleh, povečanje koncentracije fosfatov, kalcija in magnezija (Brady, 1974). Prah iz cementnih peči povzroči na rastlinskih listih tvorjenje trde kristalizirane skorje, zaradi česar se v medcelične prostore sproščajo raztopine kalcijevega hidroksida. To povzroči plazmolizo in posledično odmiranje celic. Močno odlaganje apnenčastega prahu in prahu iz cementnih peči lahko vodi do zmanjšanja prirastka mnogih drevesnih vrst (Brandt in Rhoades, 1973, cit. po Farmer, 1991).

Listi dreves delujejo kot filtri onesnažil zaradi svoje velikosti in razmerja med površino in prostornino. Zaradi morfologije se lahko listi obnašajo kot biološke "pasti" ali receptorji za onesnažila iz zraka (Beckett in sod., 1998; Witting, 1993, Free-Smith in sod., 2004; Kocić in sod., 2014) in imajo pomembno ekološko vlogo. Rastline se razlikujejo v zmožnosti prestrezanja prahu zaradi zgradbe listne površine in njenih značilnosti, kutikule, epidermide, listnih rež in trihomov (Ram in sod., 2012). Koliko prahu se obdrži na listih, je odvisno od njihove površine, njihovih epidermalnih in kutikularnih značilnosti, starosti in višine krošnje dreves (Prajapati, 2012). Količina prahu, ki se odlaga na enoto lista, eksponentno pada z večanjem oddaljenosti od vira prahu. Za povečanje učinkovitosti prestrezanja prahu mora biti vegetacija čim bliže viru izvora prahu z največjo možno listno površino (Litschke in Kuttler, 2008). Primerjava odlaganja prahu med iglavci in listavci je pokazala večje odlaganje prahu na vejah v zgornjem delu krošnje pri gabrih in v sredinskih in spodnjih vejah pri navadni smreki (Steubing in Klee, 1970, cit. po Farmer, 1991),

medtem ko Pyatt (1973) navaja večjo prisotnost prahu na spodnjih vejah krošnje pri treh drevesnih vrstah listavcev. Fluckiger in sod. (1979) navajajo (cit. po Farmer, 1991), da za zmanjšanje aktivnosti listnih rež pri trepetliki zadostuje prisotnost  $1 \text{ mg prahu}/\text{cm}^2$  in le  $0,5 \text{ mg}/\text{cm}^2$ , da povzroči dvig listne temperature. Številne raziskave vpliva prahu na rastline ne vključujejo stopenj odlaganja prahu oz. absolutnih količin prahu. Prisotnost apnenčastega prahu na listih vinske trte in lovorja je povzročila večje število gliv in bakterij. Prah na iglicah kanadske čuge povzroči povečanje števila glivnih in zmanjšanje števila bakterijskih populacij (Manning, 1971).

Vodooodpornost listne površine predstavlja skoraj popolno samočistilno sposobnost (lotosov efekt). Različni trdi delci (glive, spore, prah) so odstranjeni (spolzijo) z listnih površin s pomočjo vodnih kapljic. Ta samočistilni efekt rastlin se zdi najpomembnejša funkcija epikutikularnih voščenih kristalov. Listi navadne bukve so gladki, se omočijo in nimajo voska skozi celotno rastno sezono, le v zgodnji rastni sezoni je zaznati manjše količine voščenih kristalov. Mladi listi so pokriti s preprostimi trihomi – dlačicami, ki kmalu izginejo zaradi abrazije (Neinhuis in Bartholott, 1997). Starejši listi obdržijo dlačice samo po listnem robu (Brus, 2004). Sezonsko spremnjanje listov bukve močno vpliva na njihovo samočistilno sposobnost.

### 2.10.1 Vpliv prahu na človeka

Za človeka sta najnevarnejša fin ( $0,1\text{--}2,5 \mu\text{m}$ ) in zelo fin (pod  $0,1 \mu\text{m}$ ) prah, saj zaradi svoje majhnosti potujeta po njegovih dihalnih organih kot plin ter se usedata v ustno-žrelne predele, sapnik in pljučne mešičke ter povzročata bolezni srca in ožilja. Tak prah lahko zaide tudi v krvni obtok in se odlaga v žilah, vendar je to odvisno od njegove kemijske sestave. Novejše raziskave dokazujejo, da prašni delci ne sprožajo napadov astme samo pri otrocih, ampak so tudi vzrok za nastanek astme pri odraslih. Raziskave iz Francije, Švice in Avstrije so pokazale, da lahko 6 % vseh smrti na leto pripisemo izpostavljenosti onesnaženemu zraku, kar je 2-krat več kot število žrtev prometnih nesreč. Izračun za Ljubljano kaže, da zaradi onesnaženega zraka letno prezgodaj umre 300 ljudi (Vpliv delcev na zdravje, 2010; Terzano in sod., 2010; Fuzzi in sod., 2015), v Londonu pa 6.500 ljudi. Poleg tega 6.400 ljudi hospitalizirajo samo zaradi izpostavljenosti delcem  $\text{PM}_{10}$  (UKCP, 2002). Slabo poznavanje negativnih učinkov prašnih delcev na ljudi in rastline je številne raziskovalce (Barber in sod., 2008; Dales in sod., 2010; Tallis in sod. 2011; Sæbø in sod. 2012 in 2015, Hofman in sod. 2013; Chen L. in sod., 2015; Chen X. in sod., 2015; Janhäll in sod., 2015) spodbudilo k načrtnejšemu in sistematičnemu zbiranju dokazov o nevarnosti vpliva prašnih delcev na človeka in rastline.

Učinkoviti načini zmanjšanja koncentracije prahu v ozračju so preprečevanje njegovega nastanka, razredčitev zračnih mas s prevetritvijo in pospeševanje odlaganja prahu na različne površine (strehe, stavbe, javne površine, zelena vegetacija). Zelena vegetacija

najučinkoviteje ujame pline, prašne delce in aerosole iz atmosfere, kar je raziskoval Tallis s sod. (2011). Drevesa, grmi in trava so učinkoviti tudi kot bioindikatorji prašnih delcev v ozračju.

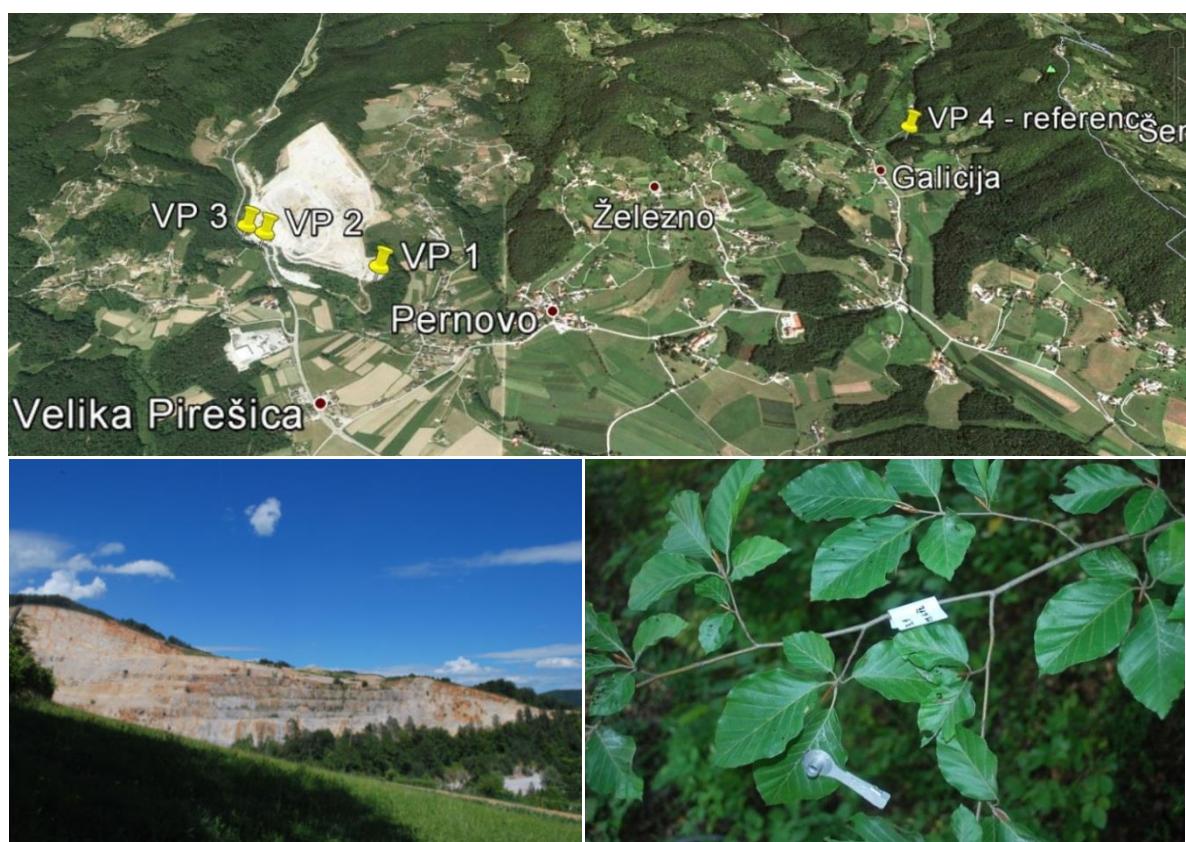
### 3 MATERIALI IN METODE

#### 3.1 OBMOČJE RAZISKAVE

Vpliv prahu na rastline smo raziskali na dveh vzorčnih območjih in v treh rastnih sezонаh. Prvo vzorčno območje je bilo pri kamnolomu Velika Pirešica v občini Žalec (Slika 3), drugo vzorčno območje pa je bila Drevesnica Omorika v občini Muta (Slika 4). Kot modelno rastlino smo uporabili navadno bukev (*Fagus sylvatica* L.).

V neposredni bližini prvega vzorčnega območja sta kamnolom in glavna cesta Arja vas–Velenje z obremenitvijo okoli 20.000 vozil na dan (DARS, 2009). Območje je močno obremenjeno s prašnimi delci različnih frakcij (prah avtomobilskih pnevmatik, izpusti iz motorjev z notranjim izgorevanjem itd.), ki obremenilno vplivajo na rastline in ljudi. Različne aktivnosti v kamnolomu imajo različno stopnjo onesnaženja SPM ("suspended particulate matter"; suspendirani delci). Izvora prahu nismo natančneje določali. Vzorčenje na prvem vzorčnem območju je bilo opravljeno na zunanjih, podstojnih, deloma senčnih listih krošenj, in sicer na različnih oddaljenostih od kamnoloma. Izbor podstojnih delov listov bukve nam je narekovala visoka višina odraslih dreves (20–25 m nad tlemi) in s tem nedosegljivost vzorcev listov brez uporabe posebnih dvigal. Vse vzorce smo pridobili od na višini od 0,5 do 2,0 m nad tlemi. Meritve na lokaciji kamnoloma Velika Pirešica smo opravili v dveh rastnih sezонаh (junij–september 2011 in junij–september 2012), na treh lokacijah, na istih rastlinah, ob kamnolomu in na referenčni lokaciji 2,5 km SV od kamnoloma.

Ekspozicija referenčne točke (lokacija številka 4) je severozahodna (zemljepisna širina: 46°17'43.99" S, zemljepisna dolžina: 15°12'27.24" V; 291,8 n. m. v.) in je zavarovana pred stalnimi zračnimi vetrovi iz smeri kamnoloma. Lokacija številka 2 (zemljepisna širina: 46°17'28.26" S, zemljepisna dolžina: 15°10'24.24" V; 267,5 n. m. v.) je od lokacije številka 3 oddaljena 0,5 km vzhodno. Lokacija številka 1 (zemljepisna širina: 46°17'19.40" S, zemljepisna dolžina: 15°10'44.92" V; 304,2 n. m. v.) je malo manj onesnažena in je od referenčne lokacije oddaljena 2,35 km vzhodno (slika 3). Na vseh lokacijah je mešani tip gozda s plitvimi, karbonatnimi tlemi. Na prisojni legi (lokacija št. 1) sestoj gozda poleg bukve in smreke tvori še navadni beli gaber, medtem ko na lokacijah št. 2 in št. 3 (osojna lega) gozd sestavljata navadna smreka in bukev. Starost dreves je na lokaciji št. 2 in št. 3 podobna (80–100 let), medtem ko so drevesa na lokaciji št. 1 mlajša (40–50 let).



Slika 3: Lokacije vzorčenja v naravi okoli kamnoloma Velika Pirešica  
VP 1 (lokacija št. 1), VP 2 (lokacija št. 2), VP 3 (lokacija št. 3), VP 4 (lokacija št. 4 – referenčna ploskev) (zgoraj) in kamnolom Velika Pirešica (spodaj levo) ter meritve na terenu (spodaj desno).

Figure 3: Locations of sampling; VP 1 (location no. 1), VP 2 (location no. 2), VP 3 (location no. 3) and VP 4 (location no. 4 – reference location) (above) and the Velika Pirešica quarry (bottom left) and field measurements (bottom right).

Drugo vzorčno območje je bila Drevesnica Omorika na Muti. Vzorčenje smo opravljali na proizvodnem polju na prostem na 2- do 3-letnih sejankah navadne bukve v obdobju julij–avgust 2015 (kratkotrajni poskus). Območje smo uporabili kot območje z delno nadzorovanimi razmerami (živi laboratorij, laboratorijski poizkus, plastični "tunelni" rastlinjak, 20 cm nad sadikami), zaščiteno pred izpiranjem prahu zaradi dežja in pred močnimi vetrovi. Za naše meritve v delno kontroliranih razmerah smo uporabili prah iz kamnoloma apnenca Velika Pirešica, ki smo ga odvzeli na sortirni liniji, ki ločuje prah od večjih delcev (pesek). Kemijskih in fizikalnih lastnosti prahu apnenca podrobnejše nismo določevali. Povprečna velikost odvzetih prašnih delcev je bila 3,4 mikrometra ( $\mu\text{m}$ ), kar smo po Webrovi velikostni lestvici prahu opredelili kot grobi prašni delci apnenca. Prah smo nato v dveh različnih koncentracijah s pomočjo fine cedilne mrežice nanašali na vzorčne rastline. Liste bukev smo pri manjši koncentraciji prahu (Prah – 1) obremenili s povprečno količino  $2,83 \pm 1,79 \text{ mg/cm}^2$  ter pri večji koncentraciji (Prah – 2) z  $8,98 \pm 4,05 \text{ mg/cm}^2$ . Na kontrolni lokaciji (Prah – kontrola) prahu nismo dodajali, njegove koncentracije so bile minimalne, in sicer  $0,08 \pm 0,04 \text{ mg/cm}^2$ . Gre za prah, ki je že naravno

prisoten v okolju, kjer smo izvajali meritve. Bukve v naravnem okolju v območju kamnoloma Velika Pirešica so bile prekrite z manjšimi količinami prahu (lokacija 1:  $0,08 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ , lokacija 2:  $0,19 \pm 0,08 \text{ mg/cm}^2$ , lokacija 3:  $0,25 \pm 0,11 \text{ mg/cm}^2$ , kontrola:  $0,04 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$ ) kot bukve, kjer smo umetno nanašali prašne delce na liste. Vsako območje koncentracije prahu (vzorci) smo razdelili na štiri enake dele (podvzorci), med katerimi ni bilo medsebojnega vplivanja (ločeni koreninski spleti). Prah v različnih koncentracijah smo nanašali na začetku julija. Vse analize listov so bile opravljene 3 tedne po njegovem nanosu.



Slika 4: Živi laboratorij pod delno nadzorovanimi razmerami v Drevesnici Omorika, občina Muta: vzorčenje na 2- do 3-letnih sejankah navadne bukve pod delno nadzorovanimi razmerami, zaščitenih pred izpiranjem zaradi dežja in močnimi vetrovi. Območje smo razdelili na 3 vzorce (različne koncentracije antropogenega dodajanja prahu) in 4 podvzorce (znotraj vsakega vzorca še 4 podvzorce).

Figure 4: A Living Lab - under partially controlled conditions in the Omorika nursery: sampling the 2-3

*year seedlings of European beech- under partially controlled conditions protected against rain and strong winds. The area was divided into 3 samples (different concentrations of anthropogenic dust particles were added) and 4 sub-samples (each sample has 4 sub-samples).*

Meritve v letu 2011 in 2012 smo izvajali v naravnem okolju – gozdu – na istih drevesih, v 2 rastnih sezонаh, vse v okolici kamnoloma Velika Pirešica, na 4 različnih transektil/lokacijah (predvidevali smo, da bodo 3 lokacije obremenjene s prahom, ena lokacija pa je bila referenčna, oddaljena 2,35 km V od kamnoloma). V letu 2011 smo izvedli vzorčenje v 2 terminih (junij, avgust) in v letu 2012 v 3 terminih (junij, avgust, september) na istih drevesnih osebkih. Skupaj smo pridobili 20 vzorcev/lokacijo, 4 lokacije/vzorčni termin, 3 termini/leto, 2 leti meritve (n = 160 vzorcev/2011 in n = 240 vzorcev/2012, skupaj 400 vzorcev v 2 letih).

Tako po prvem vzorčenju (junij 2011) je kamnolom Velika Pirešica zaradi začasnega stečaja podjetja prenehal obratovati. Posledično je prišlo do zaustavitve proizvodnje (vrtanje, miniranje kamenin, mletje peska), zaradi česar kamnolom v naslednjih treh mesecih ni proizvajal predvidene količine prahu. Vzorčili smo v različnih časovnih intervalih od zadnjega dežja, takoj po intenzivnem dežju (24 ur po nevihti 20. 6. 2011), 2 dni (18. 9. 2012) in 5 dni od zadnje nevihte (18. 6. 2012). V letu 2011 so gozdni delavci zaradi gradnje in razširitve obstoječe gozdne vlake v bližini vzorčne ploskve št. 3. posekali nekatera vzorčna drevesa, na katerih smo izvajali meritve. Leta 2011 smo tako statistično obdelali le 3 vzorčne ploskve, saj je bilo merilno mesto, na katerem so gozdni delavci izvedli rekonstrukcijo gozdne vlake, preveč poškodovano in ni zagotovljalo sledljivosti merilnih mest skozi celotno rastno sezono. V letu 2012 smo tako poškodovano merilno mesto prestavili 20 m proti JV. S tem smo spremenili numeriranje vzorčnih ploskev, saj je ploskev št. 4 leta 2012 predstavljal referenčno ploskev, ki je leta 2011 imela zaporedno št. 3. Celotno območje vseh 4 vzorčnih ploskev je bilo močno poškodovano zaradi žledoloma v februarju 2014, ki je prizadel predvsem listavce.

Zaradi nepredvidljivih in nekonsistentnih vzorcev s prahom iz naravnega okolja (v letu 2011 in 2012) smo nato celoten cikel prisotnosti prahu ponovili še v delno nadzorovanih razmerah s postopnim umetnim nanašanjem prahu na liste mladih bukev, kar smo izvedli v letu 2015 v Drevesnici Omorika na 2- do 3-letnih sejankah navadne bukve. V letu 2011 in 2012 velikosti prašnih delcev po frakcijah nismo merili neposredno. Prisotnost prahu smo kvantificirali z metodo tehtanja in fotometrično s spiranjem listov ter merjenjem motnosti suspenzije pri 700 nm na spektrofotometru.

Zaradi navedenih težav pri vzorčenju podatkov, pridobljenih v letu 2011, pri statističnih izračunih nismo upoštevali. Zaradi tega rezultate teh meritve podajamo v poglavju Priloge.

### 3.2 PREDMET RAZISKAVE – LISTI NAVADNE BUKVE

Proučevali smo vpliv prahu na rastlinsko vrsto navadna bukev (*Fagus sylvatica* L.).

Navadna bukev (*Fagus sylvatica* L.) je drevo, visoko do 40 metrov, redkeje je grm. Skorja je siva, večinoma gladka. Listi so preprosti, celorobi, sprva dlakavi, pozneje goli, do 10 cm dolgi in do 7 cm široki, zgoraj so temno zeleni in bleščeči, spodaj svetlejši (Slika 5). Deblo je ravno, s skorjo, ki je tudi pri starejših drevesih tanka, siva in gladka. Brsti so rjavi, podolgovato zašiljeni in iz vejic izraščajo pod kotom 45°. Je enodomna in vetrocvetna vrsta, moške mačice so okroglaste in pecljate, ženski cvetovi so v parih in v ovoju na koncu nekoliko debelejših pecljev. Iz vsake plodnice se razvije do 1,5 cm dolg trirob rjav orešček oz. žir. Po dva žira skupaj ležita v oleseneli skledici ali bukvici. Plod je žir skupaj z bukvico. Skledica se jeseni odpre s štirimi loputami (Martinčič in sod., 2007; Brus, 2009).

Bukev veliko prispeva k kroženju snovi v naravi, to je k delovanju gozdnega ekosistema ter k obnavljanju zaloge kisika v zemeljskem ozračju. Stoletna košata bukev ima krošnjo z volumnom 2700 m<sup>3</sup>. Ko je ta olistena, veže vsak dan 2,2 kg ogljikovega dioksida in pri tem odda v ozračje 1,6 kg kisika, to je tudi 2700-krat več kot bukova mladica, stara 5 do 10 let (Kotar in Brus, 1999). Bukev imenujemo tudi "mati slovenskih gozdov", saj je prisotna v kar 70,1 % slovenskih gozdov, najpogosteje v čistih sestojih ali v združbi jelovo bukovje (Brus, 2004).

Uvrstitev v sistem:

Deblo:	Magnoliophyta	(kritosemenke)
Razred:	Magnoliopsida	(dvokaličnice)
Red:	Fagales	(bukovci)
Družina:	Fagaceae	(bukovke)
Rod:	<i>Fagus</i>	(bukev)
Vrsta:	<i>F. sylvatica</i>	(navadna bukev)

Znanstveno ime: *F. sylvatica* L.

Bukev najbolje uspeva v svežih, globokih, s kalcijem bogatih humoznih tleh. Slabo prenaša mestno okolje, zlasti zbita tla, sol in industrijske pline. Naravno je razširjena po vsej Sloveniji razen v poplavnih nižinah panonskega sveta in na suhih rastiščih sredozemskega sveta. Les je trd, težek, elastičen in na prostem slabše obstojen z veliko ogrevalno močjo. Iz lesa bukev pridobivajo kakovostno oglje, uporaben je tudi za izdelavo pohištva, vezanih plošč in za železniške pragove. Les slabše kakovosti pogosto uporabijo

za celulozo (Brus, 2009) ali za energetske namene (proizvodnja biogoriv – drva, sekanci, lesni peleti, katran). Lesno oglje in pepelika, ki sta temeljila predvsem na bukovini, sta omogočila prvi razvoj industrializacije. V velikem delu našega območja je bukev omogočila tudi razvoj kmetijstva na osnovi gnojenja. Včasih so bukovo listje in veje uporabljali kot nastil. V hlevih so uporabljali steljo, ki je bila sestavljena iz sesekljanih vejic smreke, jelke, iz praproti, jesenske vrese ter listja bukve in gabra (Kotar in Brus, 1999).



Slika 5: Listi navadne bukve v naravnem okolju z vidnimi sledovi prahu ob glavnih in stranskih žilah (slika levo) in v laboratoriju v procesu analiz (slika desno)

*Figure 5: The leaves of European beech in natural surroundings on the tree with visible traces of dust along the main and lateral veins (picture left) and in the laboratory process analysis (picture right)*

V preteklosti je imela bukev v slovenskih gozdovih in gozdarstvu zelo različne vloge. Od nezaželene vrste v gospodarskem gozdu, kjer so jo sistematično odstranjevali, do tolerirane in zaželene dobrine v energetskem smislu v času industrijske revolucije. Sledilo je še več izmenjujočih njej naklonjenih in nenaklonjenih obdobij, ki si jih je človek sam prikrojil glede na način gospodarjenja in uporabno vrednost lesa zanj.

V slovenskih gozdovih se pomen bukve v zadnjih desetletjih povečuje predvsem zaradi zavedanja njenega pozitivnega vpliva na biološko in mehansko stabilnost gozdnih ekosistemov, dobrega naravnega pomlajevanja, ohranjenega genofonda, ugodnega vpliva na revitalizacijo degradiranih rastišč in ekonomske vrednosti (Roženbergar in sod., 2008). Zaradi velikih ekoloških in ekonomskih vrednot je najbolj zaželen listavec pri gozdnem gospodarjenju v osrednji Evropi (Diaconu in sod., 2015). Pomembnost bukve za evropske gozdove zahteva poglobljene raziskave občutljivosti in odpornosti na spreminjajoče se okoljske razmere.

### 3.3 POTEK DELA: ANALIZE IN MERITVE NA LISTIH

Meritve smo izvajali v naravnem okolju – gozdu – in v delno nadzorovanih razmerah v drevesnici ter v laboratoriju v 3 rastnih sezona. Na terenu smo sistematično nabrali vzorce listov bukve, jih označili ter pripravili za transport do laboratorija. Odvzeti listi so bili vitalni, popolnoma razviti in brez vidnih poškodb. Na posameznih listih smo že s prostim očesom opazili prisotnost prahu, predvsem v okolini listnih žil. Odvzete vzorčne liste smo pazljivo dali v zaprte plastične vrečke, jih položili v prenosni hladilni zabojošnik in jih prenesli v laboratorij (shranjene v hladilniku), kjer smo naslednje dni opravili meritve optičnih, biokemijskih in anatomskev lastnosti.

V laboratoriju Katedre za ekologijo in varstvo okolja Oddelka za biologijo Biotehniške fakultete smo najprej izmerili spektralne lastnosti listov s prahom, jih nato sprali z znano količino destilirane vode in suspenzijo izmerili s spektrofotometrom. Sledili sta ponovna meritev spektralnih lastnosti listov brez prahu in analiza anatomskev in biokemične lastnosti listov.

Število vzorcev, odvzetih v naravnem okolju – gozdu – in analiziranih v laboratoriju po rastni sezoni:

Leto 2011: 2 lista na vejo, 2 veji na drevo, 5 dreves na lokacijo (20 listov na lokacijo), 4 lokacije, skupaj 80 listov/meritev, 2 meritvi/sezono, skupaj 160 vzorcev/leto;

Leto 2012: 2 lista na vejo, 2 veji na drevo, 5 dreves na lokacijo (20 listov na lokacijo), 4 lokacije, skupaj 80 listov/meritev, 3 meritve/sezono, skupaj 240 vzorcev/leto, vendar smo 80 vzorcev zaradi poškodb v laboratoriju izločili, uporabili smo le 2 meritvi/sezono (junij in september).

Število vzorcev, odvzetih v delno nadzorovanih razmerah – v Drevesnici Omorika – in analiziranih v laboratoriju v rastni sezoni 2015:

Leto 2015: 4 listi/podvzorec, 4 podvzorci/obravnava, 3 obravnave, skupaj 48 listov – vzorcev.

V laboratoriju Katedre za ekologijo in varstvo okolja Oddelka za biologijo Biotehniške fakultete so poleti 2012, ko smo izvajali vse laboratorijske meritve številnih vzorcev, vladale izjemno visoke temperature, ki so presegale 40 °C pri nizki relativni zračni vlažnosti pod 40 % (zgodnja jutranja temperatura prostora laboratorija je bila 36–38 °C). Vzorci, shranjeni v zaprtih plastičnih vrečkah, so bili do analiz varno shranjeni v hladilniku (+4 °C). Zaradi narave dela smo potrebovali številne laboratorijske naprave, ki so dodatno ogrevale (sušilna komora na 105 °C, računalniki, aerometer, mikroskopi itd.) prostore

laboratorija, ki ni bil klimatiziran. Zaradi izjemno visokih temperatur so se vzorčeni listi s prahom in brez njega med izvajanjem meritev spektralnega odboja tako močno izsušili, da so kljub ostrom varnostnim ukrepom, od najkrajšega možnega časa meritev do pokrivanja transportnih posod z vlažno krpo itd., spremenili rezultate. Vidno izsušene vzorce smo nato zavrgli. S tem smo verjetno izgubili tudi dragocene podatke. Visoke temperature imajo negativni vpliv tudi na reaktivnost posameznih kemikalij, ki smo jih potrebovali za biokemično analizo.

### 3.3.1 Fiziološke analize

Fiziološke analize smo izvajali na terenu. V času izvajanja meritev fotokemične učinkovitosti smo na rastišču spremljali abiotiske dejavnike. Jakost sevanja smo merili s tipalom za PAR, priključenim na datalogger (LI 1000, Li-Cor, Lincoln, USA), temperaturo zraka in listov pa z digitalnim infrardečim termometrom (Fluke 62 Mini Infrared Thermometer, Washington, USA). Fotokemično učinkovitost smo merili z modulacijskim fluorometrom (PAM-2100 portable chlorophyll fluorometer, Walz, Germany). Meritve smo opravili v opoldanskem času ob sončnih dneh, ko je vrednost gostote fotonskega fluksa fotosintezno aktivnega dela sevanja (PPFD) presegala  $1200 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ .

### 3.3.2 Potencialna fotokemična učinkovitost

Ko sevanje prehaja skozi liste, se del energije porablja za fotosintezo, del za segrevanje listov, del pa se fluorescenčno izseva. Ker vsi procesi potekajo vzporedno, tako segrevanje kot fluorescencija odražata fotosintezno dejavnost. Zato smo merili potencialno fotokemično učinkovitost FS II (fotosistem 2) s pomočjo fluorescence.

Pred meritvijo smo na liste za 15 do 20 min pritrdirili ščipalke za temotno adaptacijo (Slika 3). Pri zatemnjem listu so prejemniki elektronov v FS II oksidirani (reakcijski centri so odprti). Ob osvetlitvi lahko tako sprejemajo svetlobno energijo. Na zatemnjem listu smo izmerili fluorescentni signal, ki izvira iz klorofila *b* antenskih kompleksov. Imenujemo ga osnovna ali minimalna fluorescencija temotno adaptiranega vzorca ( $F_0$ ). Meritev  $F_m$  smo izvedli s pulzom bele svetlobe saturacijske jakosti (katere posledica je  $\text{PPFD} \approx 8000 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ , trajanje 0,8 s). Po osvetlitvi se je fluorescentni signal povečal in po nekaj milisekundah ponovno upadel. Ta signal je maksimalna fluorescencija temotno adaptiranega vzorca ( $F_m$ ). Razlika med  $F_m$  in  $F_0$  je variabilna fluorescencija ( $F_v$ ). Potencialno fotokemično učinkovitost izražamo s parametrom  $F_v/F_m$ .

### 3.3.3 Dejanska fotokemična učinkovitost

Dejansko fotokemično učinkovitost FS II smo merili pri danih svetlobnih razmerah. Na vzorec smo pritrdirili ščipalko, ki je omogočala osvetlitev lista pod kotom  $60^\circ$ . Meritev smo

izvedli s pomočjo saturacijskega pulza bele svetlobe (katere posledica je  $PPFD \approx 9000 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ , trajanje 0,8 s), s katerim smo sprožili redukcijo prejemnikov elektronov v FS II. Dejansko fotokemično učinkovitost izražamo kot fotokemični izplen (yield, Y), to je količnik, ki pokaže, koliko svetlobe se je dejansko porabilo za fotokemično delo, in predstavlja razmerje med variabilno in maksimalno ( $F_{ms}$ ) fluorescenco osvetljenega vzorca ( $Y = F_{ms} - F_s / F_{ms}$ ), kjer variabilna fluorescencija predstavlja razliko med maksimalno in minimalno ( $F_s$ ) fluorescenco osvetljenega vzorca ( $F_{ms} - F_s$ ). Fotokemični izplen (Y) nam pove, kakšen je dejanski proces fotosinteze v razmerah, ki jih je izpostavljena rastlina v naravi.

### 3.3.4 Jakost elektronskega transporta (ETR)

Jakost elektronskega transporta (ETR – relativna enota) se izračuna iz vrednosti fotokemičnega izplena (Y) in jakosti sevanja;  $ETR = Y * PAR * 0,5 * 0,84$ ; kjer je PAR fotosintetski aktivni spekter sevanja [ $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ] (Schreiber in sod. 1995), zato smo v aparatu vnesli jakost sevanja v času meritve. Če nimamo podatka, koliko svetlobe list v območju PAR dejansko absorbira, uporabimo faktor 0,84, ki temelji na predpostavki, da povprečen list absorbira 0,84 % svetlobe (v območju PAR), ki sveti na list (ostalo se odbije, preide skozi list itd.). Faktor 0,5 uporabimo ob predpostavki, da se energija fotonov enakomerno razporedi v oba fotosistema v kloroplastih (FSI in FSII). Pri meritvi ETR nas dejansko zanima le tok elektronov skozi FS II, ki ga poganjajo fotonii (svetloba, ki zadeva list), zato število fotonov v PAR delimo z 2 oz. množimo s faktorjem 0,5.

## 3.4 OPTIČNE LASTNOSTI

### 3.4.1 Merjenje odbojnih spektrov

Vse meritve odbojnosti in presevnosti smo opravili s pomočjo prenosnega spektrometra (Jaz Modular Optical Sensing Suite, Ocean Optics, Inc., Dunedin, USA). Svetlobni vir UV-VIS-NIR (DH-2000, Ocean Optics, Inc., FL, ZDA) smo z optičnim kablom QP600-1-SR-BX (Ocean Optics, Inc., Dunedin, Florida, USA) povezali s sfero ISP-30-6-R (Ocean Optics, Inc., FL, USA), ki smo jo pri merjenju postavili pravokotno na zgornjo površino lista. Sfero smo z drugim optičnim kablom povezali s spektrofotometrom, tega pa smo priključili na računalnik. Najprej smo svetlobni žarek usmerili na belo ploščico (Spectralon®, Labsphere, North Sutton, USA), da smo izmerili referenčni spekter in tako umerili instrument na 100-% odbojnost. Korak z referenčno vrednostjo smo nato brez odboja (temno kontrolo) ponovili, tako da smo izklopili vir svetlobe. Nato smo začeli z meritvami odbojnih spektrov na listih. Zgornjo stran in osrednji del vzorčnega lista (blizu glavne listne žile) smo osvetljevali s svetlobnim žarkom. Meritve smo opravili na osrednjem delu listne ploskve med glavno žilo in listnim robom. Odbojni spektri so bili

izračunani kot razmerje med izmerjenim in referenčnim spektrom. Spektralne zapise smo obdelali v računalniškem programu Spectra Suite (Ocean Optics, Inc., FL, USA). Merili smo z ločljivostjo 0,3 nm v območju 280 do 880 nm. Pri statističnih analizah smo za lažjo obdelavo in primerjavo spektre razdelili na 8 različnih območij, in sicer UV-B- (280–319 nm), UV-A- (320–399 nm), vijoličasto (400–454 nm), modro (455–499 nm), zeleno (500–579 nm), rumeno (580–619 nm), rdeče (620–699 nm) in NIR-območje (700–880 nm).

Na vsakem listu smo opravili meritve optičnih lastnosti: (1) listi s prahom in (2) listi brez prahu. List smo z nežnim drgnjenjem z mehko zobno ščetko sprali s 15 ml destilirane vode. Vodo smo zbrali v petrijevko, jo pomešali s kapalko ter prenesli v posodo za vzorčenje v spektrofotometru.

### 3.4.2 Merjenje presevnosti

Spektre presevnosti smo merili na podoben način kot odbojne spektre, le da smo v tem primeru list z zgornjo površino položili na optični kabel, povezan z virom svetlobe, medtem ko smo integracijsko sfero, z optičnim kablom povezano s spektrofotometrom, položili pod spodnjo površino lista, tako da je zajela vso svetlobo, ki je prešla skozenj. Spektrometer smo na 100%-presevnost umerili s pomočjo svetlobnega žarka, ki je neposredno prehajal v notranjost integracijske sfere. Izmerili smo še dodatno (temno) kontrolo, nato pa začeli z meritvami presevnih spektrov na listih. Spektri presevnosti so bili izračunani kot razmerje med izmerjenim in referenčnim spektrom. Spektralne zapise smo obdelali v računalniškem programu Spectra Suite (Ocean Optics, Inc., FL, USA).

## 3.5 PRISOTNOST PRAHU

Prisotnost prahu smo kvantificirali z metodo tehtanja in fotometrično s spiranjem listov in merjenjem motnosti suspenzije pri 700 nm na spektrofotometru.

Znane količine prahu smo raztopili v 15 ml destilirane vode in izmerili vpojnost. S pomočjo dobljenih podatkov smo izdelali umeritveno krivuljo. Vsak list smo z nežnim drgnjenjem z mehko zobno ščetko sprali s 15 ml destilirane vode. Vodo smo zbrali v petrijevko, jo pomešali s kapalko in prenesli v kiveto za merjenje v spektrofotometru (UV/VIS spektrofotometer, Lambda 12, Perkin-Elmer, Norwalk, CT, USA). Na podlagi umeritvene krivulje in izmerjenih absorbanc smo izračunali maso prahu z vsakega lista (20 listov z vsake lokacije, 4 lokacije, 2 meritvi na rastno sezono, 2 rastni sezoni) in s pomočjo znanih površin listnih ploskev preračunali maso prahu na enoto listne površine ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ ).

### 3.6 ZGRADBA LISTA

Meritve smo opravili na osrednjem delu listne ploskve med glavno žilo in listnim robom na treh različnih mestih. Na mestu, kjer smo merili odbojnost (refleksivnost), smo z britvico naredili prečne prereze. Pod mikroskopom smo izmerili naslednje parametre:

- debelino lista ( $\mu\text{m}$ ),
- debelino zgornje in spodnje kutikule ( $\mu\text{m}$ ),
- debelino zgornje in spodnje povrhnjice ( $\mu\text{m}$ ),
- debelino stebričastega in gobastega tkiva ( $\mu\text{m}$ ).

#### 3.6.1 Specifična listna površina in vsebnost vode

Sveže nabranim listom (80 vzorcev iz 2011, 160 listov v dveh meritvah iz 2012 in 48 vzorcev iz 2015) smo v prihodnjih dnevih z areometrom ( $\Delta T$ , Cambridge, UK) izmerili površino. S pomočjo luknjača smo naluknjali krogce z znano površino ( $2r = 11 \text{ mm}$ ), jih stehtali in sušili 24 ur pri  $105^\circ\text{C}$  ter jim nato določili še suho maso. Vse vzorce smo takoj po odvzemu na terenu hranili v temperaturnem območju od 4 do  $6^\circ\text{C}$  v temi. Iz dobljenih podatkov o suhi masi smo izračunali specifično listno površino (SLA), ki je količnik med površino vzorca in njegovo suho maso [ $\text{cm}^2/\text{mg}$ ]. Vsebnost vode smo izračunali kot razliko med svežo in suho maso listov.

#### 3.6.2 Število in velikost listnih rež

Število in velikost listnih rež smo določali le na spodnji povrhnjici lista, saj jih na zgornji povrhnjici pri bukvi nismo našli. Naredili smo tudi odtise površine svežih listov. Na delček listne površine smo nanesli brezbarvni lak za nohte (S.He Style Zone), počakali, da se posuši, nato pa ga prelepili s prozornim lepilnim trakom, ki smo ga previdno odstranili in prilepili na objektno stekelce. Preparat smo nato pogledali pod svetlobnim mikroskopom (Olympus CX41, 400-kratna povečava). Z računalniškim programom Cell (CellSens, Olympus, Japan) smo prešteli število rež na petih vidnih poljih in jih preračunali na enoto listne površine ( $\text{cm}^2$ ).

#### 3.6.3 Fotografiranje površine in prečnih prerezov listov

Z mikroskopom Axioskop 2 MOT (Carl Zeiss, Goettingen, Germany), ki je bil opremljen z digitalno kamero Axiocam Mrc (Carl Zeiss, Vision, Halbergmoos, Germany) ter povezan z računalniškim programom Axio Vision 3.1, smo fotografirali površino in prečne prereze listov. Pri fotografiranju in pregledu zgornje in spodnje povrhnjice smo bili še posebej pozorni na listne reže, ki bi lahko bile zamašene z delci prahu.

### 3.7 BIOKEMIJSKE ANALIZE

Vzorce za biokemijske analize smo pripravili s pomočjo luknjača z znanim premerom (2r = 11 mm), s katerim smo naluknjali sveže liste in dobili vzorce (krožce) z znano površino. Te smo do uporabe zamrznili in shranili v zamrzovalniku. Določali smo vsebnosti klorofilov, karotenoidov, antocianov in UV-absorbirajočih snovi.

#### 3.7.1 Klorofili in karotenoidi

Vsebnosti klorofilov *a* in *b* ter karotenoidov smo določili po metodi, ki sta jo opisala Lichtenthaler in Buschmann (2001a, b). Ta temelji na dejstvu, da klorofil *a*, klorofil *b* in karotenoidi absorbirajo sevanje pri nekaterih valovnih dolžinah, pri drugih pa ne. Zato meritev absorptivnosti pri določenih valovnih dolžinah pove, koliko je v listih pigmentov. Vzorce smo strli v terilnici, ekstrahirali v 5 ml acetona (100 % (v/v)), centrifugirali (4000 rpm, 4 °C, 4 min) (Sigma 2pri -16 PK, Germany) in odčitali dejanske volumne ekstraktov. Ekstinkcije (absorbanco) smo zmerili s spektrometrom UV/VIS (Lambda 25, Perkin-Elmer, Norwalk, CT, USA) pri valovnih dolžinah 470, 645 in 662 nm, kjer so obsorbcijski vrhovi posameznega barvila. Vsebnosti klorofilov (Kl *a*, *b*) in karotenoidov (Kar) smo izrazili na suho maso in listno površino (m<sup>2</sup>) po empirični enačbi (Formula 1):

Formula 1:

$$Kl\ a [mg\ m^{-2}] = c_a * V * 10^{-3} * P^{-1} = (11,24 A_{662} - 2,04 A_{645}) * V * 10^{-3} * P^{-1} \quad \dots (1)$$

$$Kl\ b [mg\ m^{-2}] = c_b * V * 10^{-3} * P^{-1} = (20,13 A_{645} - 4,19 A_{662}) * V * 10^{-3} * P^{-1} \quad \dots (2)$$

$$Kar [mg\ m^{-2}] = (1000 A_{470} - 1,9 c_a - 63,14 c_b) * V * 10^{-3} * P^{-1} / 214 \quad \dots (3)$$

c<sub>a,b</sub> – koncentracija (točneje volumska gostota – g/m<sup>3</sup>) klorofila *a* oz. *b*

V – volumen ekstrakta [ml]

P – površina vzorca [m<sup>2</sup>]

A – absorpcija pri izbrani valovni dolžini

#### 3.7.2 Antociani

Vsebnost antocianov smo določili po Khareju in Guruprasadu (1993). Vzorce smo strli v terilnici, ekstrahirali v 5 ml ekstrakcijskega medija (metanol : HCl (37 %) = 99 : 1 (v/v)), centrifugirali (4 min, 4 °C, 4000 obratov) (Sigma 2-16 PK, Germany) ter odčitali dejanske volumne ekstraktov in jih za 24 ur shranili v temi (3–5 °C). Ekstinkcije pri 530 nm smo izmerili s spektrometrom UV/VIS (Lambda 25, Perkin-Elmer, Norwalk, CT, USA). Vsebnost antocianov (Ant) smo izrazili v relativnih enotah na listno površino (m<sup>2</sup>) (Formula 2).

Formula 2:

$$Ant \text{ (relativna enota)} = E_{530} * V * P^{-1} \quad \dots (4)$$

$E_{530}$  – absorpcija pri valovni dolžini 530 nm

V – prostornina ekstrakta [ml]

P – površina vzorca [ $m^2$ ]

### 3.7.3 UV-absorbirajoče snovi

Vsebnosti UV-B- in UV-A-absorbirajočih snovi smo določali po Caldwellu (1968). Vzorce smo strli v terilnici, ekstrahirali v 5 ml ekstrakcijskega medija (metanol : destilirana voda : HCl (37 %) = 79 : 20 : 1 (v/v/v)) in jih 20 minut inkubirali v temi. Vzorce smo nato centrifugirali (4000 rpm, 10 °C, 10 min) (Sigma 2-16 PK, Germany) in odčitali prostornine ekstraktov. S pomočjo spektrometra UV/VIS (Lambda 12, Perkin-Elmer, Norwalk, CT, USA) in kvarčnih kivet smo izmerili absorbance v spektralnem razponu od 280 do 319 (UV-B) in od 320 do 400 (UV-A) nm. Vsebnost UV-B- in UV-A-absorbirajočih snovi smo izračunali kot integral ekstinkcijskih vrednosti in jo nato izrazili v relativnih enotah na listno površino ( $m^2$ ) (Formula 3):

Formula 3:

$$UV-abs \text{ (relativna enota)} = I * V^I * P^I \quad \dots (5)$$

I – integral absorpcijskih vrednosti v intervalu 280–319 nm (UV-B-abs) ter 320–400 nm (UV-A-abs)

V – prostornina ekstrakta [ml]

P – površina vzorca [ $m^2$ ]

## 3.8 STATISTIČNA OBDELAVA PODATKOV

Osnovne podatke smo uredili s pomočjo programa Microsoft Excel Professional Plus 2013 ter izračunali povprečja. Preračunane podatke smo za namen primerjav med obravnavami statistično obdelali s programom XLSTAT (version 2014.0.03; Addinsoft, Inc., Brooklyn, NY, USA) ter jih predstavili v tabelah in grafikonih. Normalnost podatkov smo testirali s Shapiro-Wilkovim testom. Kadar so bili podatki normalno porazdeljeni, smo uporabili test ANOVA s post-hoc testom Tukey, za nenormalno porazdeljene podatke smo uporabili test Kruskal-Wallisova ANOVA (neparametrična ANOVA) in Dunnov test mnogoterih

primerjav. Za ugotavljanje korelacije med posameznimi parametri smo uporabili program za statistično obdelavo PAST (Hammer in sod., 2001) ter izračunali Spearmanov koeficient korelacije.

Povezave med okoljskimi dejavniki (parametri prahu ter listne biokemije in anatomije) in različnimi deli spektra odboja oz. presevnosti smo ugotavljali z multivariantno redundantno analizo (RDA) s pomočjo programa CANOCO for Windows 4.5 (Ter Braak, 1986). Statistično značilnost povezav smo testirali s permutacijskim testom Monte Carlo. Pojasnjevalne spremenljivke smo vključevali postopno po principu dodajanje naprej (forward selection), da bi se izognili kolinearnosti med njimi.

Verjetnost značilnih razlik smo označili kot: \*  $p \leq 0,05$ ; \*\*  $p \leq 0,01$ . Ničelno hipotezo smo zavrnili, kadar je bil  $p \leq 0,05$  (statistično značilna razlika) oz.  $p \leq 0,01$  (močno statistično značilna razlika).

Rezultate meritev leta 2011 zaradi motenega procesa meritve spektralnega odboja podajamo v poglavju Priloge.

## 4 REZULTATI

V tem delu navajamo rezultate meritev ločeno po načinu pridobivanja vzorcev (podatki iz narave in iz delno nadzorovanih razmer) ter rezultate analiz vpliva prahu na modelno rastlino navadno bukev, ki je glavni gradnik slovenskih gozdov.

Zaradi nepredvidljivih in nekonsistentnih vzorcev s prahom iz naravnega okolja (v letu 2011 in 2012) smo nato celoten cikel ugotavljanja vplivov prisotnosti prahu na navadno bukev ponovili še v delno nadzorovanih razmerah s postopnim umetnim nanašanjem prahu na liste mladih bukev, kar smo izvedli v letu 2015 v Drevesnici Omorika na 2- do 3-letnih sejankah navadne bukve. Zaradi metodoloških težav podajamo rezultate meritev za prvo sezono meritev (leto 2011) v poglavju Priloge. Rezultati meritev 2012, vzorčenih v naravnem okolju, in meritev 2015 v delno nadzorovanih razmerah Drevesnice Omorika so predstavljeni v nadaljevanju.

### 4.1 REZULTATI MERITEV NA LISTIH IZ NARAVNEGA OKOLJA V LETU 2012 – 1. MERITEV SEZONE

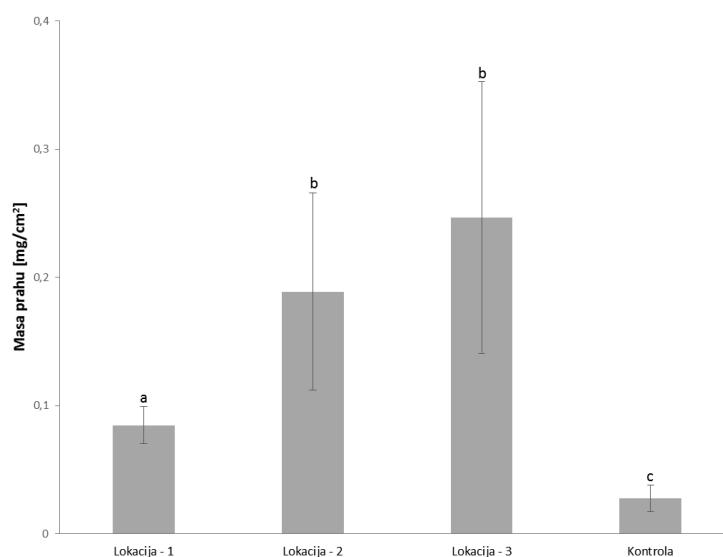
#### 4.1.1 Količina prahu na listih

Lokaciji ob kamnolому Velika Pirešica z numeričnim zaporedjem sledi referenčna lokacija (kontrola). V povprečju je bilo največ prahu na lokaciji 3 in najmanj na referenčni lokaciji (preglednica 11). Podatki v tem podpoglavlju se nanašajo na 1. meritev sezone, ki je potekala 18. 6. 2012 na istih drevesih kot vse predhodne meritve v letu 2011 in kasnejše meritve v letu 2012.

Preglednica 1: Količine prahu ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ ) na listih bukve iz okolice kamnoloma junija 2012  
Črke a, b, c označujejo statistično značilne razlike.

Table 1: Quantities of dust on the beech leaves from different locations around the quarry Velika Pirešica in June 2012 ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ ). The letters a, b and c indicate statistically significant differences.

Lokacija: kamnolom Velika Pirešica - 1. meritev sezone	Količina prahu ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ )	SD
Lokacija 1	0,08 <sup>a</sup>	$\pm 0,01$
Lokacija 2	0,19 <sup>b</sup>	$\pm 0,08$
Lokacija 3	0,25 <sup>b</sup>	$\pm 0,11$
Kontrola	0,04 <sup>c</sup>	$\pm 0,05$



Slika 6: Masa prahu na enoto listne površine [mg/cm<sup>2</sup>] junija 2012

Podatki so prikazani kot povprečne vrednosti ± SD. Obravnave za posamezni parameter, ki si ne delijo iste črke, so med seboj statistično značilno različne ( $p \leq 0,05$ ; neparametrična ANOVA in Dunnov test mnogoterih primerjav).

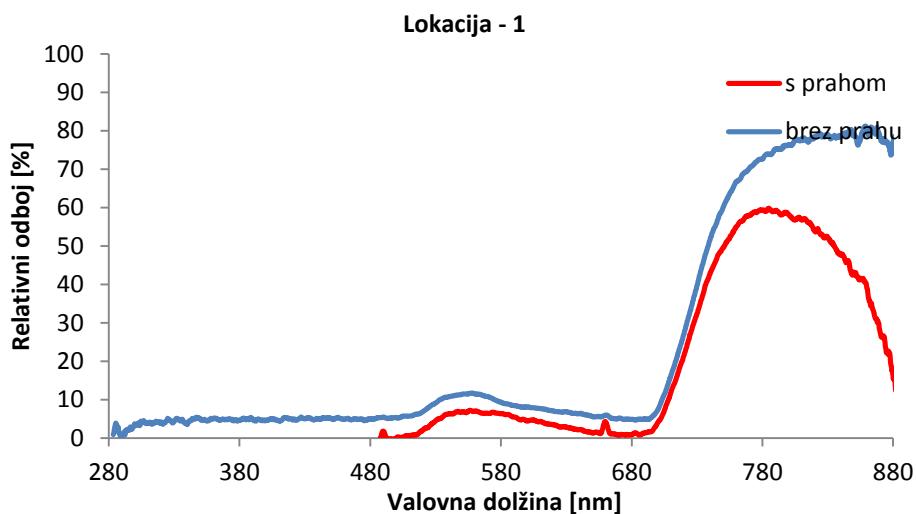
*Figure 6: The mass of dust per leaf area unit [mg / cm<sup>2</sup>], June 2012. The data are shown as mean values ± SD. The readings for each parameter that do not share the same letters are statistically significantly different ( $p \leq 0.05$ , Kruskal-Wallis and Dunn post-hoc test).*

Masa prahu na enoto listne površine je najmanjša na kontrolni lokaciji in se razlikuje od mase prahu na lokacijah 1, 2 in 3 ( $p < 0,001$  za vse primerjave; neparametrična ANOVA in Dunnov test mnogoterih primerjav). Statistično značilna je tudi razlika med maso prahu na lokaciji 1 ter lokacijama 2 in 3 ( $p < 0,001$  za obe primerjavi) (Slika 17; preglednica 12).

#### 4.1.2 Optične lastnosti listov

Odbojne spektre listov s prahom in brez njega, ki smo jih testirali, smo dobili s 4 različnih lokacij, pri katerih je lokacija 4 predstavljala referenčno lokacijo (kontrola). Vsaka lokacija je bila vzorčena  $n = 20$ .

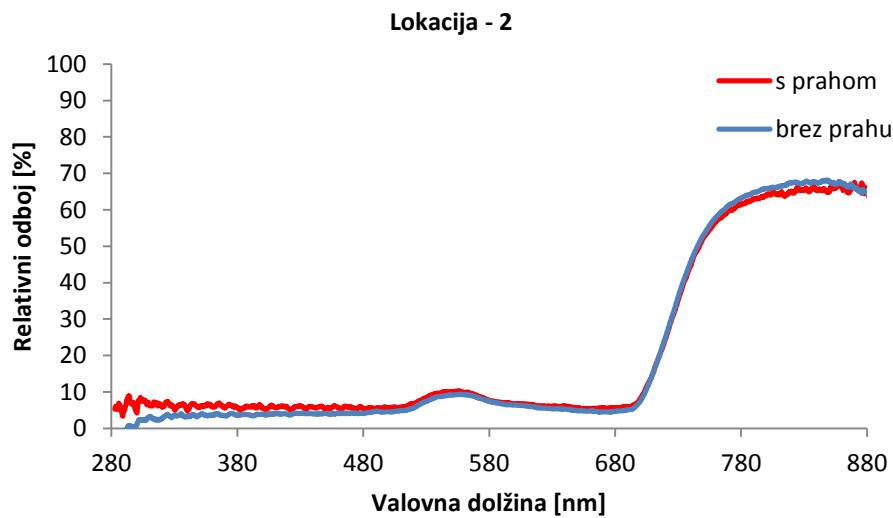
Prikaz povprečnih vrednosti relativnega odboja pri listih s prahom in brez prahu na lokaciji 1. Akumulacija prahu na listih je bila  $0,08 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ .



Slika 7: Spektri povprečnih vrednosti relativnega odboja od zgornje listne površine z lokacije 1 junija 2012  
 Prikazan je odboj pri listih s prahom in opranih listih brez prahu. Podatki so povprečja 5-nm intervalov ( $n = 20$ ).

*Figure 7: The spectra of the average value of the relative reflection from adaxial beech leaf surface from location no. 1 in June 2012 - the Velika Pirešica quarry. The reflection of the leaves with the dust (line below) and without the dust is shown. The data are in the average of 5-nm intervals ( $n = 20$ ).*

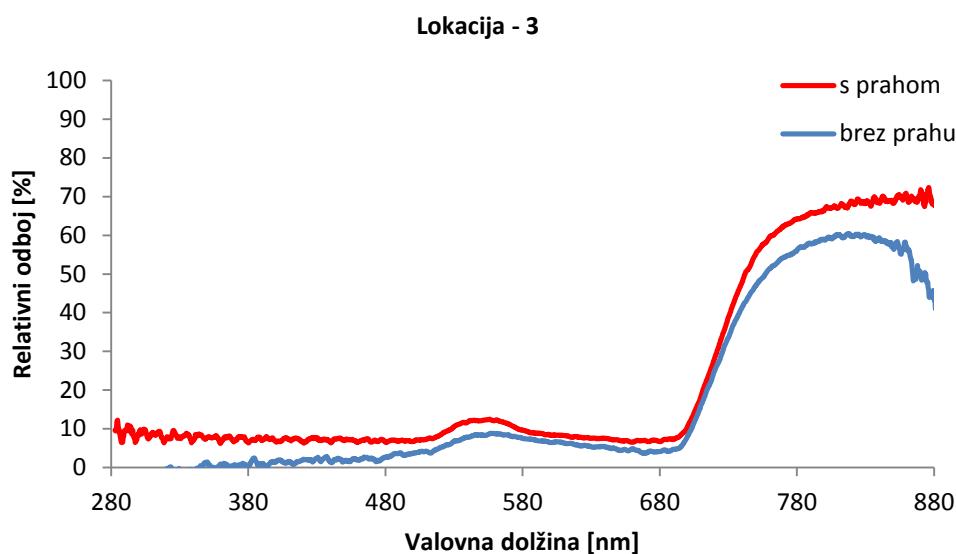
Prikaz povprečnih vrednosti relativnega odboja pri listih s prahom in brez prahu na lokaciji 2 kaže na ujemanje krivulje odboja skozi celoten odbojni spekter z manjšim odstopanjem le v UV-delu spektra. Akumulacija prahu na listih je bila  $0,19 \pm 0,08 \text{ mg/cm}^2$ .



Slika 8: Spektri povprečnih vrednosti relativnega odboja od zgornje listne površine z lokacije 2 junija 2012  
 Prikazan je odboj pri listih s prahom in opranih listih brez prahu. Podatki so povprečja 5-nm intervalov ( $n = 20$ ).

*Figure 8: The spectra of the average value of the relative reflection from adaxial beech leaf surface from location no. 2 in June 2012 - the Velika Pirešica quarry. The reflection of the leaves with the dust (line below) and without the dust is shown. The data are in the average of 5-nm intervals ( $n = 20$ ).*

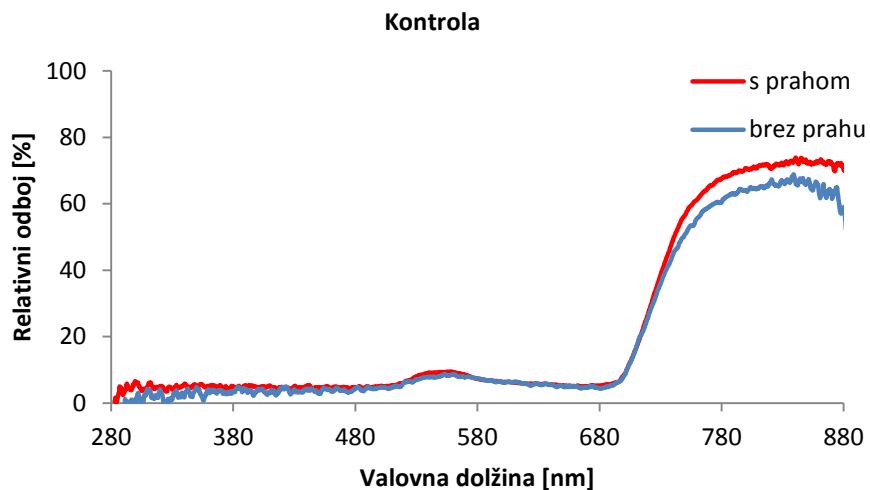
Prikaz povprečnih vrednosti relativnega odboja pri listih s prahom in brez prahu na lokaciji 3 kaže na ujemanje krivulje odboja skozi celoten odbojni spekter od modrega do rdečega spektra z večjimi odstopanjimi v spektrih UV in NIR. Akumulacija prahu na listih je bila  $0,25 \pm 0,11 \text{ mg/cm}^2$  in je predstavljala lokacijo, najbolj obremenjeno s prahom.



Slika 9: Spektri povprečnih vrednosti relativnega odboja od zgornje listne površine z lokacije 3 junija 2012. Prikazan je odboj pri listih s prahom in opranih listih brez prahu. Podatki so povprečja 5-nm intervalov ( $n = 20$ ).

*Figure 9: The spectra of the average value of the relative reflection from adaxial beech leaf surface from location no. 3 in June 2012 - the Velika Pirešica quarry. The reflection of the leaves with the dust (upper line) and without the dust is shown. The data are in the average of 5-nm intervals ( $n = 20$ ).*

Primerjava rezultatov meritev odbojnosti listov s prahom in brez prahu s kontrolne lokacije kaže, da referenčna lokacija (kontrola) ni bila obremenjena s prahom ( $0,04 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$ ), kar dokazuje tudi ujemanje spektralnega odboja v celotnem spektru z manjšimi odstopanjimi le v spektru NIR.



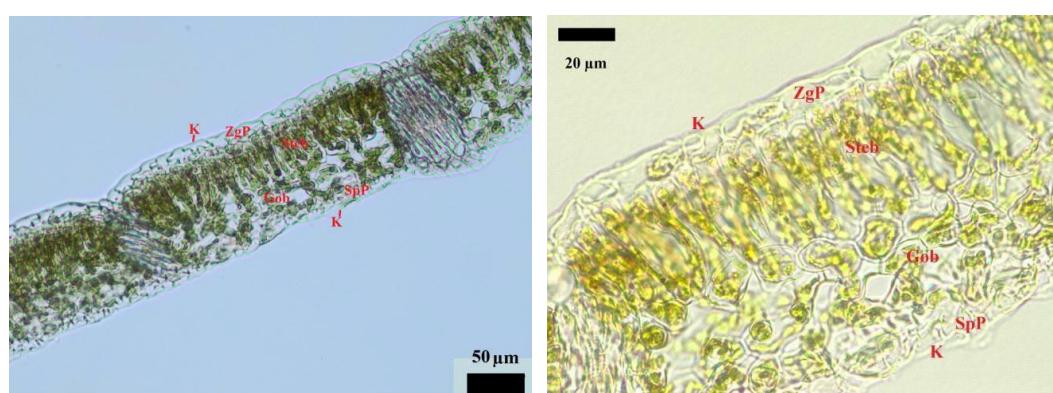
Slika 10: Spektri povprečnih vrednosti relativnega odboja od zgornje listne površine s kontrolne lokacije junija 2012

Prikazan je odboj pri listih s prahom in opranih listih brez prahu. Podatki so povprečja 5-nm intervalov ( $n = 20$ ).

*Figure 10: The spectra of the average value of the relative reflection from adaxial beech leaf surface of the control location (no. 4) – the distance of 2.35 km east of the Velika Pirešica quarry in June. The reflection of the leaves with the dust (red line) and without the dust (blue line) is shown. The data are in the average of 5-nm intervals ( $n = 20$ ).*

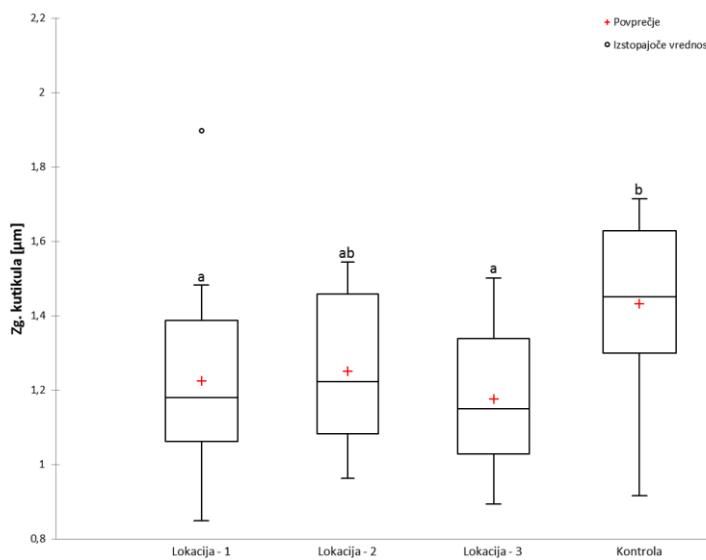
#### 4.1.3 Anatomske lastnosti listov

Na prečnih prerezih listov navadne bukve je vidna zgradba tipičnega bifacialnega lista s kutikulo, zgornjo in spodnjo povrhnjico ter stebričastim in gobastim tkivom (Slika 11).



Slika 11: Prečni prerez lista navadne bukve pod desetkratno povečavo (levo) in štiridesetkratno povečavo (desno); K = kutikula, ZgP = zgornja povrhnjica, Steb. = stebričasto tkivo, Gob. = gobasto tkivo, SpP = spodnja povrhnjica

*Figure 11: The cross-section of leaves of European beech under 10-fold magnification (left) and 40-fold magnification (right); K = cuticle, ZgP = adaxial epidermis, Steb. = palisade tissue, Gob. = spongy tissue, SpP = abaxial epidermis*

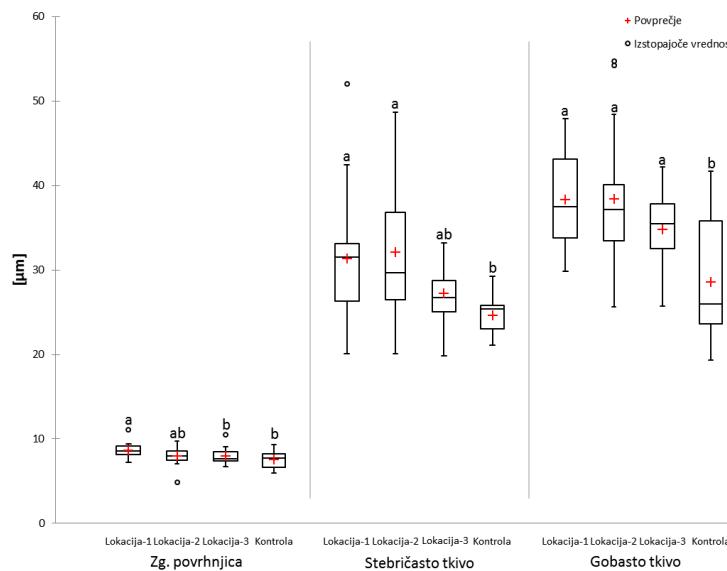


Slika 12: Razlike v debelini zgornje kutikule med posameznimi lokacijami junija 2012

Kvantilni diagrami prikazujejo mediane, okvirje, kjer je 50 % vseh vrednosti, ter ročaje z neizstopajočimi podatki. Obravnave, ki si ne delijo iste črke, so med seboj statistično značilno različne ( $p \leq 0,05$ ; ANOVA in post-hoc Tukey test).

*Figure 12: The differences of adaxial cuticle thickness among different locations in June 2012. The quantile diagrams show the medians, the frames presenting 50 % of the total data and the handles with non-rising data. The readings that do not share the same letters are statistically significantly different ( $p \leq 0.05$ ; ANOVA and post-hoc Tukey test).*

Debelina zgornje kutikule je največja na kontrolni lokaciji in se statistično značilno razlikuje od debeline na lokacijah 1 in 3 ( $p = 0,030$  oz.  $p = 0,005$ ; ANOVA in post-hoc Tukey test). Med ostalimi obravnavami ni statistično značilnih razlik (Slika 13, Preglednica 2).

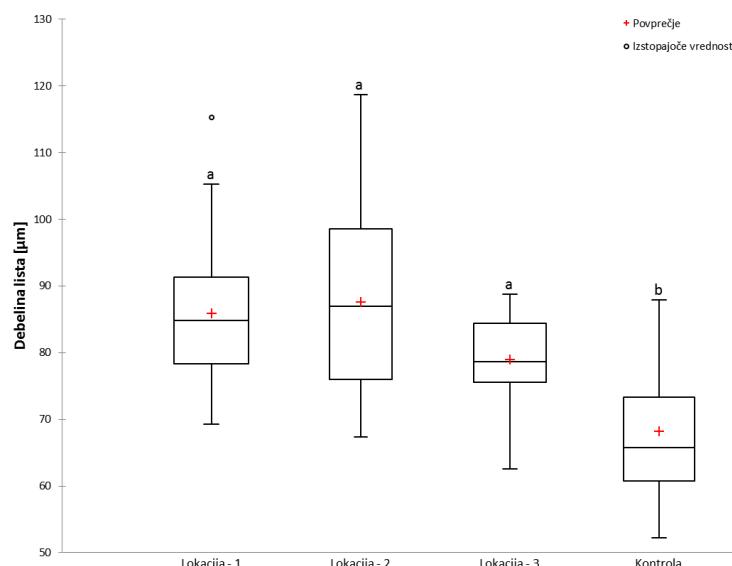


Slika 13: Razlike v debelini zgornje povrhnjice ter stebričastega in gobastega tkiva med lokacijami junija 2012

Kvantilni diagrami prikazujejo mediane, okvire, kjer je 50 % vseh vrednosti, ter ročaje z neizstopajočimi podatki. Obravnave za posamezni parameter, ki si ne delijo iste črke, so med seboj statistično značilno različne ( $p \leq 0,05$ ; ANOVA in post-hoc Tukey test za stebričasto tkivo ter Kruskal-Wallisova ANOVA in Dunnov test mnogoterih primerjav za gobasto tkivo in zgornjo povrhnjico).

*Figure 13: The differences of adaxial epidermis thickness and palisade/spongy parenchyma ratio among different locations in June 2012. The quantile diagrams show the medians, the frames presenting 50 % of the total data and the handles with non-rising data. The readings that do not share the same letters are statistically significantly different ( $p \leq 0,05$ ; ANOVA and post-hoc Tukey test for palisade parenchyma and Kruskal Wallis, Dunn's post-hoc test for spongy parenchyma and adaxial epidermis).*

Povprečna debelina tako zgornje povrhnjice kot stebričastega in gobastega tkiva je najmanjsa na kontrolni lokaciji. Debelina zgornje povrhnjice je statistično značilno različna, če primerjamo lokacijo 1, lokacijo 3 in kontrolno lokacijo ( $p = 0,010$  oz.  $p = 0,002$ ; Kruskal-Wallisova ANOVA in Dunnov test mnogoterih primerjav). Debelina stebričastega tkiva je statistično različna pri listih kontrolne lokacije in lokacij 1 in 2 ( $p = 0,005$  oz.  $p = 0,001$ ; ANOVA in post-hoc Tukey test). Debelina gobastega tkiva je različna med kontrolno lokacijo in lokacijami 1, 2 in 3 ( $p < 0,001$ ,  $p = 0,005$  in  $p = 0,012$ ; Kruskal-Wallisova ANOVA in Dunnov test mnogoterih primerjav) (Slika 13; Preglednica 2)

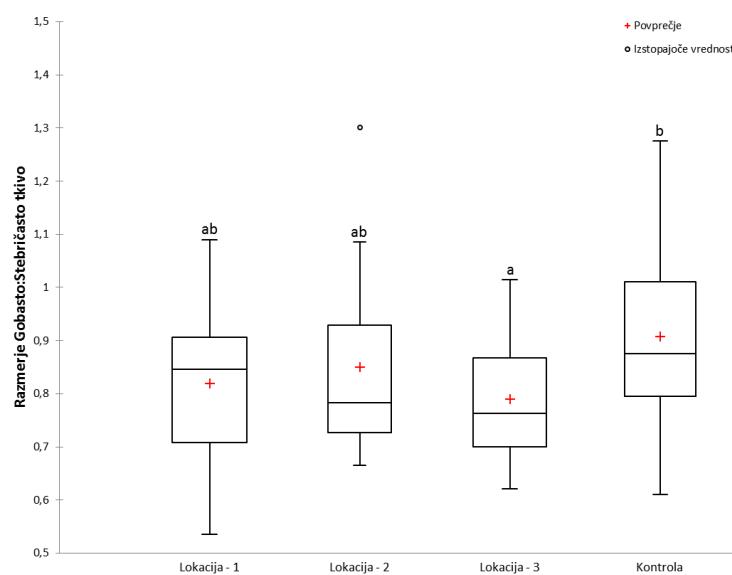


Slika 14: Razlike v debelini lista med posameznimi lokacijami junija 2012

Kvantilni diagrami prikazujejo mediane, okvire, kjer je 50 % vseh vrednosti, ter ročaje z neizstopajočimi podatki. Obravnave, ki si ne delijo iste črke, so med seboj statistično značilno različne ( $p \leq 0,05$ ; ANOVA in post-hoc Tukey test).

*Figure 14: The differences of leaf thickness among different locations in June 2012. The quantile diagrams show the medians, the frames presenting 50 % of the total data and the handles with non-rising data (boxplot). The readings that do not share the same letters are statistically significantly different ( $p \leq 0,05$ ; ANOVA and post-hoc Tukey test).*

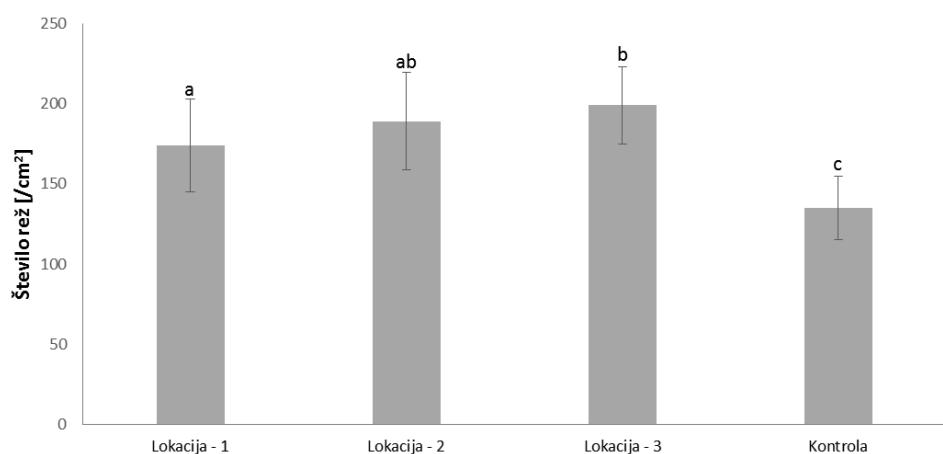
Debelina lista je najmanjša na kontrolni lokaciji in je statistično značilno različna od debelini na lokacijah 1, 2 in 3 ( $p < 0,001$ ,  $p < 0,001$  in  $p = 0,036$ ; ANOVA in post-hoc Tukey test). Med ostalimi lokacijami ni statistično značilnih razlik (Slika 14; Preglednica 2).



Slika 15: Razlike v razmerju med gobastim in stebričastim tkivom med posameznimi lokacijami junija 2012. Kvantilni diagrami prikazujejo mediane, okvire, kjer je 50 % vseh vrednosti, ter ročaje z neizstopajočimi podatki. Obravnave, ki si ne delijo iste črke, so med seboj statistično značilno različne ( $p \leq 0,05$ ; Kruskal-Wallisova ANOVA in Dunnov test mnogoterih primerjav).

*Figure 15: The differences of palisade/spongy parenchyma ratio among different locations in June 2012. The quantile diagrams show the medians, the frames presenting 50 % of the total data and the handles with non-rising data. The readings that do not share the same letters are statistically significantly different ( $p \leq 0.05$ ; Kruskal-Wallis and Dunn's post-hoc test).*

Razmerje med gobastim in stebričastim tkivom je najmanjše na lokaciji 3, kjer je bilo na listih največ prahu, in največje na kontrolni lokaciji, kjer je bilo najmanj prahu. To pomeni, da je pri listih z največ prahu relativno največ gobastega tkiva v odnosu na stebričasto tkivo. Razlika med omenjenima lokacijama je statistično značilno različna ( $p = 0,038$ ; Kruskal-Wallisova ANOVA in Dunnov test mnogoterih primerjav). Med ostalimi obravnavami ni statistično značilnih razlik (Slika 15; Preglednica 2).

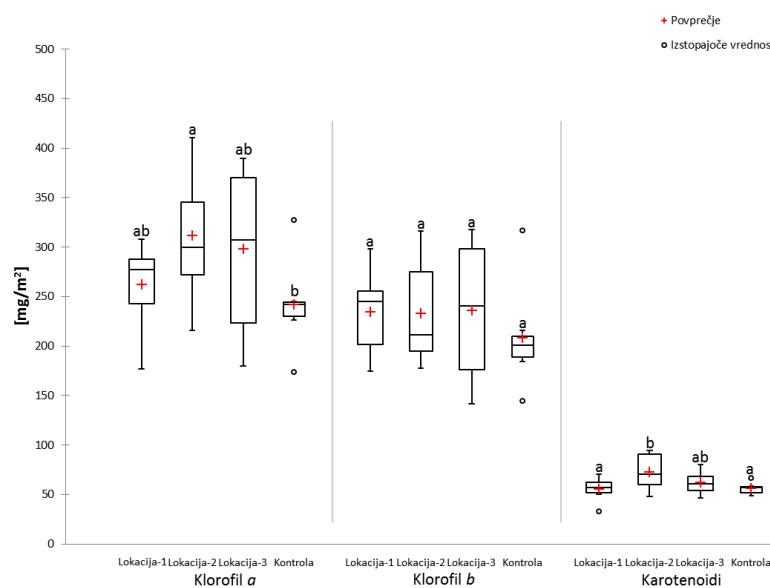


Slika 16: Število listnih rež na enoto listne površine [cm<sup>2</sup>] pri listih bukve z različnih lokacij junija 2012  
 Podatki so prikazani kot povprečne vrednosti  $\pm$  SD. Obravnave za posamezni parameter, ki si ne delijo iste črke, so med seboj statistično značilno različne ( $p \leq 0,05$ ; ANOVA in post-hoc Tukey test).

*Figure 16: The number of leaf stomata per unit leaf area [cm<sup>2</sup>] of beech leaves from different locations in June 2012. The data are shown as mean values  $\pm$  SD. The readings for each parameter that do not share the same letters are statistically significantly different ( $p \leq 0.05$ ; ANOVA and post-hoc Tukey test)*

Število rež je najmanjše na kontrolni lokaciji in se statistično značilno razlikuje od števila na lokacijah 1, 2 in 3 ( $p < 0,001$  za vse primerjave; ANOVA in post-hoc Tukey test). Statistično značilna je tudi razlika med lokacijama 1 in 3, kjer je število rež največje ( $p = 0,03$ ) (Slika 16, Preglednica 2).

#### 4.1.4 Biokemijske lastnosti listov

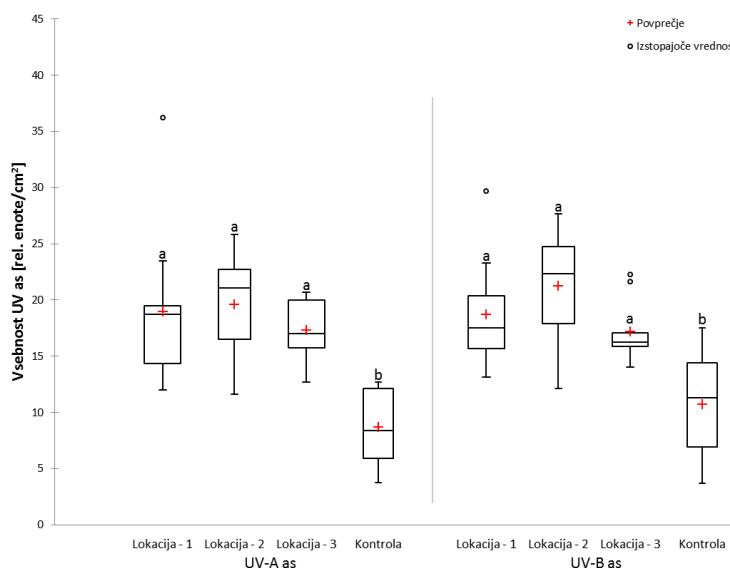


Slika 17: Razlike v vsebnosti klorofilov in karotenoidov pri listih bukve z različnih lokacij junija 2012  
 Kvantilni diagrami prikazujejo mediane, okvire, kjer je 50 % vseh vrednosti, ter ročaje z neizstopajočimi podatki. Obravnave za posamezni parameter, ki si ne delijo iste črke, so med seboj statistično značilno

različne ( $p \leq 0,05$ ; Kruskal-Wallisova ANOVA in Dunnov test mnogoterih primerjav za Kl a in ANOVA in post-hoc Tukey test za Kl b in karotenoide).

*Figure 17: The differences in chlorophylls and carotenoids content in beech leaves from different locations in June 2012. The quantile diagrams show the medians, the frames presenting 50 % of the total data and the handles with non-rising data. The readings that do not share the same letters are statistically significantly different ( $p \leq 0,05$ ; Kruskal-Wallis and Dunn's post-hoc test for Kl a, ANOVA and post-hoc Tukey test for Kl b and carotenoids).*

Povprečna vsebnost vseh treh pigmentov je najmanjša pri kontrolni lokaciji. Razlike v vsebnosti klorofila b med lokacijami niso statistično značilne, medtem ko je razlika v vsebnosti klorofila a med lokacijo 2 in kontrolno lokacijo statistično značilna ( $p = 0,038$ ; Kruskal-Wallisova ANOVA in Dunnov test mnogoterih primerjav). Vsebnost karotenoidov je največja na lokaciji 2 in se statistično značilno razlikuje od vsebnosti na lokaciji 1 in kontrolni lokaciji ( $p = 0,026$  oz.  $p = 0,028$ ; ANOVA in post-hoc Tukey test). Med ostalimi lokacijami ni statistično značilnih razlik (Slika 17; Preglednica 2).



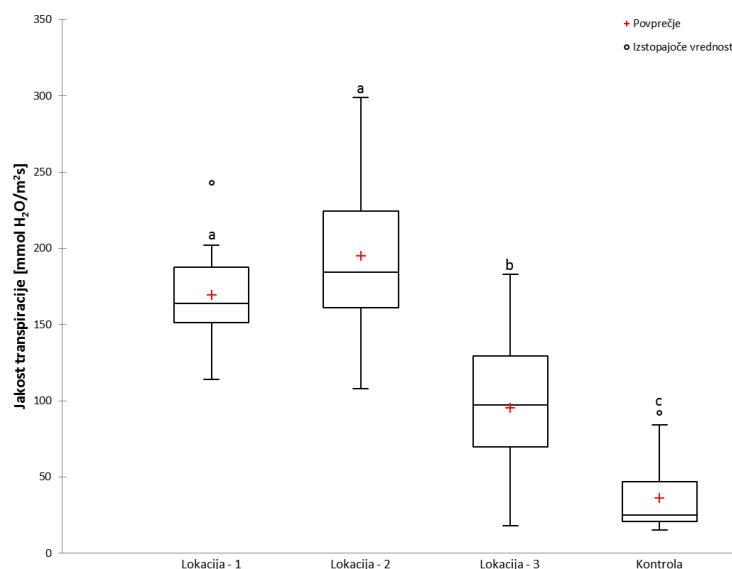
Slika 18: Razlike v vsebnosti UV-A- in UV-B-absorbirajočih snovi pri listih bukve z različnih lokacij junija 2012

Kvantilni diagrami prikazujejo mediane, okvire, kjer je 50 % vseh vrednosti, ter ročaje z neizstopajočimi podatki. Obravnave za posamezni parameter, ki si ne delijo iste črke, so med seboj statistično značilno različne ( $p \leq 0,05$ ; Kruskal-Wallisova ANOVA in Dunnov test mnogoterih primerjav).

*Figure 18: The differences in UV-A and UV-B absorbing substances content of beech leaves form different locations in June 2012. The quantile diagrams show the medians, and the handles with non-rising data. The readings that do not share the same letters are statistically significantly different ( $p \leq 0,05$ ; Kruskal-Wallis and Dunn's post hoc test).*

Vsebnosti UV-A- in UV-B-absorbirajočih snovi so največje na kontrolni lokaciji in so statistično različne od vsebnosti na lokacijah 1, 2 in 3 ( $p = 0,003$ ,  $p = 0,005$  in  $p < 0,001$  za UV-A in  $p = 0,010$ ,  $p = 0,007$  in  $p = 0,013$  za UV-B; Kruskal-Wallisova ANOVA in Dunnov test mnogoterih primerjav). Statistično značilnih razlik med ostalimi lokacijami ni (Slika 18; Preglednica 2).

#### 4.1.5 Fiziološke lastnosti listov

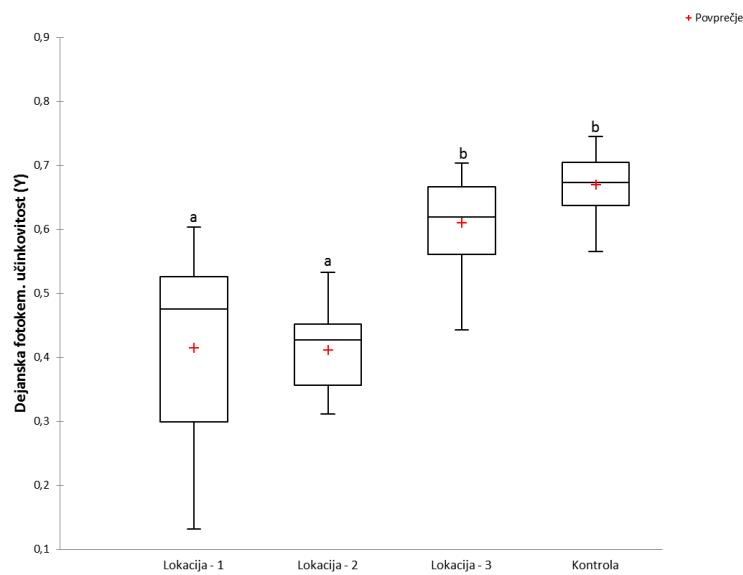


Slika 19: Razlike v jakosti transpiracije pri listih bukve z različnih lokacij junija 2012

Kvantilni diagrami prikazujejo mediane, okvire, kjer je 50 % vseh vrednosti, ter ročaje z neizstopajočimi podatki. Obravnave, ki si ne delijo iste črke, so med seboj statistično značilno različne ( $p \leq 0,05$ ; Kruskal-Wallisova ANOVA in Dunnov test mnogoterih primerjav).

*Figure 19: The differences in the intensity of transpiration for beech leaves from different locations in June 2012. The quantile diagrams show the medians, the frames presenting 50 % of the total data and the handles with non-rising data (boxplot). The readings that do not share the same letters are statistically significantly different ( $p \leq 0.05$ ; Kruskal-Wallis and Dunn's post-hoc test).*

Najmanjša transpiracija listov je bila izmerjena na kontrolni lokaciji in se statistično razlikuje od transpiracije, izmerjene na lokacijah 1, 2 in 3 ( $p < 0,001$  za vse primerjave; Kruskal-Wallisova ANOVA in Dunnov test mnogoterih primerjav). Statistično značilna je tudi razlika med transpiracijo na lokaciji 3 in lokacijama 1 in 2 ( $p < 0,001$ ) (Slika 19; Preglednica 2).



Slika 20: Razlike v dejanski fotokemični učinkovitosti (Y) pri listih bukve z različnih lokacij junija 2012  
Kvantilni diagrami prikazujejo mediane, okvire, kjer je 50 % vseh vrednosti, ter ročaje z neizstopajočimi podatki. Obravnave, ki si ne delijo iste črke, so med seboj statistično značilno različne ( $p \leq 0,05$ ; Kruskal-Wallisova ANOVA in Dunnov test mnogoterih primerjav).

*Figure 20: The differences in actual photochemical efficiency (Y) of beech leaves from different locations. The quantile diagrams show the medians, the frames presenting 50 % of the total data and the handles with non-rising data. The readings that do not share the same letters are statistically significantly different ( $p \leq 0,05$ ; Kruskal-Wallis and Dunn's post hoc test).*

Dejanska fotokemična učinkovitost listov je bila največja na kontrolni lokaciji in je bila statistično značilno različna od dejanske fotokemične učinkovitosti na lokacijah 1 in 2 ( $p < 0,001$ ; Kruskal-Wallisova ANOVA in Dunnov test mnogoterih primerjav). Statistično značilna razlika je tudi med lokacijo 3 in lokacijama 1 in 2 ( $p < 0,001$ ) (Slika 20; Preglednica 2).

Preglednica 2: Anatomski, biokemijski in fiziološki parametri listov bukve z različnih lokacij junija 2012  
Vrednosti so povprečja  $\pm$  SD. Obravnave, ki si ne delijo iste črke, so med seboj statistično značilno različne ( $p \leq 0,05$ ; ANOVA in post-hoc Tukey test ob normalni razporeditvi podatkov ter Kruskal-Wallisova ANOVA in Dunnov test mnogoterih primerjav ob nenormalni razporeditvi;  $n=20$  oz.  $n=10$  pri biokemijskih parametrih).

*Table 2: The anatomical, biochemical and physiological parameters of beech leaves from different locations in June 2012. The data are shown as mean values  $\pm$  SD. The readings that not share the same letters are statistically significantly different ( $p \leq 0,05$ ; ANOVA and post-hoc Tukey test for a normal distribution of data; Kruskal-Wallis and Dunn's post-hoc test for non-normal distribution of data,  $n = 20$ ;  $n = 10$  for biochemical parameters).*

Značilnosti listov	LOKACIJA	LOKACIJA	LOKACIJA	KONTROLA
	1	2	3	
<b>Anatomski parametri</b>				
Debelina zg. kutikule ( $\mu\text{m}$ )	1,23 $\pm$ 0,25 <sup>a</sup>	1,25 $\pm$ 0,20 <sup>ab</sup>	1,18 $\pm$ 0,19 <sup>a</sup>	1,36 $\pm$ 0,34 <sup>b</sup>
Debelina zg. povrhnjice ( $\mu\text{m}$ )	8,66 $\pm$ 0,86 <sup>a</sup>	7,98 $\pm$ 1,24 <sup>ab</sup>	7,95 $\pm$ 0,91 <sup>b</sup>	7,23 $\pm$ 1,78 <sup>b</sup>
Debelina stebričastega tkiva ( $\mu\text{m}$ )	31,38 $\pm$ 7,47 <sup>a</sup>	32,13 $\pm$ 7,96 <sup>a</sup>	27,24 $\pm$ 3,32 <sup>ab</sup>	23,72 $\pm$ 5,29 <sup>b</sup>
Debelina gobastega tkiva ( $\mu\text{m}$ )	38,34 $\pm$ 5,87 <sup>a</sup>	38,39 $\pm$ 8,82 <sup>a</sup>	34,84 $\pm$ 4,33 <sup>a</sup>	27,65 $\pm$ 9,05 <sup>b</sup>
Debelina sp. povrhnjice ( $\mu\text{m}$ )	7,17 $\pm$ 0,85	6,92 $\pm$ 0,88	6,85 $\pm$ 0,91	6,21 $\pm$ 1,58
Debelina sp. kutikule ( $\mu\text{m}$ )	0,69 $\pm$ 0,11 <sup>a</sup>	0,87 $\pm$ 0,09 <sup>b</sup>	0,94 $\pm$ 0,20 <sup>b</sup>	1,02 $\pm$ 0,32 <sup>b</sup>
Debelina lista ( $\mu\text{m}$ )	85,94 $\pm$ 11,66 <sup>a</sup>	87,57 $\pm$ 15,86 <sup>a</sup>	78,97 $\pm$ 6,48 <sup>a</sup>	65,68 $\pm$ 17,73 <sup>b</sup>
Gobasto : stebričasto tkivo	0,82 $\pm$ 0,14 <sup>ab</sup>	0,85 $\pm$ 0,18 <sup>ab</sup>	0,79 $\pm$ 0,12 <sup>a</sup>	0,86 $\pm$ 0,26 <sup>b</sup>
SLA ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	791,98 $\pm$ 386,77	970,63 $\pm$ 517,28	575,93 $\pm$ 222,91	597,20 $\pm$ 217,39
Gostota listnih rež (/ $\text{cm}^2$ )	173,78 $\pm$ 28,93 <sup>a</sup>	189,09 $\pm$ 30,52 <sup>ab</sup>	198,97 $\pm$ 24,25 <sup>b</sup>	132,97 $\pm$ 33,66 <sup>c</sup>
<b>Biokemijski parametri</b>				
Klorofil a ( $\text{mg}/\text{m}^2$ )	262,46 $\pm$ 40,29 <sup>ab</sup>	311,44 $\pm$ 66,73 <sup>a</sup>	297,91 $\pm$ 80,97 <sup>ab</sup>	230,17 $\pm$ 70,77 <sup>b</sup>
Klorofil b ( $\text{mg}/\text{m}^2$ )	234,61 $\pm$ 39,58	233,18 $\pm$ 53,9	235,85 $\pm$ 69,54	196,06 $\pm$ 66,55
Karotenoidi ( $\text{mg}/\text{m}^2$ )	55,83 $\pm$ 10,15 <sup>a</sup>	72,92 $\pm$ 17,80 <sup>b</sup>	62,10 $\pm$ 10,32 <sup>ab</sup>	51,58 $\pm$ 16,45 <sup>a</sup>
Antociani (rel. enote/ $\text{cm}^2$ )	0,54 $\pm$ 0,15	0,43 $\pm$ 0,07	0,38 $\pm$ 0,15	0,43 $\pm$ 0,22
UV-A-as (rel. enote/ $\text{cm}^2$ )	18,99 $\pm$ 7,08 <sup>a</sup>	19,64 $\pm$ 4,84 <sup>a</sup>	17,31 $\pm$ 2,82 <sup>a</sup>	9,01 $\pm$ 4,90 <sup>b</sup>
UV-B-as (rel. enote/ $\text{cm}^2$ )	18,72 $\pm$ 4,95 <sup>a</sup>	21,25 $\pm$ 5,23 <sup>a</sup>	17,18 $\pm$ 2,67 <sup>a</sup>	10,56 $\pm$ 5,77 <sup>b</sup>
<b>Fiziološki parametri</b>				
Transpiracija ( $\text{mmol H}_2\text{O}/\text{m}^2\text{s}$ )	169,45 $\pm$ 30,17 <sup>a</sup>	195,00 $\pm$ 49,69 <sup>a</sup>	95,53 $\pm$ 45,37 <sup>b</sup>	39,27 $\pm$ 24,76 <sup>c</sup>
Dejanska fotokem. učinkovitost - Y	0,41 $\pm$ 0,16 <sup>a</sup>	0,41 $\pm$ 0,06 <sup>a</sup>	0,61 $\pm$ 0,08 <sup>b</sup>	0,64 $\pm$ 0,14 <sup>b</sup>
Poten. fotokem. učinkovit. - Fv/Fm	0,66 $\pm$ 0,03	0,66 $\pm$ 0,02	0,65 $\pm$ 0,05	0,63 $\pm$ 0,14
<b>Prah</b>				
Masa prahu ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ ) as – absorbirajoče snovi	0,08 $\pm$ 0,01 <sup>a</sup>	0,19 $\pm$ 0,08 <sup>b</sup>	0,25 $\pm$ 0,11 <sup>b</sup>	0,04 $\pm$ 0,05 <sup>c</sup>

#### 4.1.6 Povezanost med parametri

##### 4.1.6.1 Korelacije med količino prahu in biokemijskimi, anatomskimi ter fiziološkimi lastnostmi listov

Preglednica 3: Korelacije med količino prahu in biokemijskimi, anatomskimi ter fiziološkimi parametri junija 2012 (Spearmanov korelačijski koeficient ( $r$ ); \*  $p \leq 0,05$ ; \*\*  $p \leq 0,01$ ; n = 35 pri biokemijskih parametrih, n = 70 pri anatomskih parametrih in n = 75 pri fizioloških parametrih)

*Table 3: The correlations among the amount of dust and biochemical, anatomical and physiological parameters in June 2012 (Spearman correlation coefficient ( $r$ ); \*  $p \leq 0,05$ ; \*\*  $p \leq 0,01$ ; n = 35 for biochemical parameters, n = 70 for anatomical parameters and n = 75 for physiological parameters)*

Parametri listov	Prah
<b>Biokemijski parametri</b>	
klorofil a	0,334*
karotenoidi	0,387*
<b>Anatomski parametri</b>	
zg. kutikula	-0,385**
gobasto : stebričasto tkivo	-0,292*
število rež	0,535**
<b>Fiziološki parametri</b>	
transpiracija	0,391**
dejanska fotokem. učinkovitost	-0,309**

Koncentracije klorofila *a* ter karotenoidov so v pozitivni korelaciji s količino prahu in najmanjšo koncentracijo dosežejo pri listih z najmanj prahu (kontrolna lokacija) (Slika 17; Preglednica 3).

Anatomski parametri, ki kažejo statistično značilne korelacje s količino prahu, so debelina zgornje kutikule, razmerje med gobastim in stebričastim tkivom ter število rež. S povečevanjem količine prahu se zmanjšuje debelina zgornje kutikule, ki je najtanja na lokaciji z največ prahu (lokacija 3) in najdebelejša na lokaciji z najmanj prahu (kontrolna lokacija). Enako velja za razmerje med gobastim in stebričastim tkivom, kar pomeni, da debelina gobastega tkiva s povečevanjem količine prahu vse bolj prevladuje nad stebričastim tkivom, ki ga je relativno manj pri listih z največ prahu. Število listnih rež se povečuje z večanjem količine prahu in jih je največ na lokaciji 3 (Slike 12, 15 in 16; Preglednica 3).

Od fizioloških parametrov kažeta korelacijsko s količino prahu transpiracija ter dejanska fotokemična učinkovitost. Prva je v pozitivni korelaciji s količino prahu in je najmanjša na kontrolni lokaciji, druga je v negativni korelaciji in na kontrolni lokaciji doseže največjo povprečno vrednost (Slike 19 in 20; Preglednica 3).

#### 4.1.6.2 Korelacje med količino prahu in optičnimi lastnostmi

Preglednica 4: Korelacje med količino prahu in odbojem v različnih delih spektra junija 2012 (Spearmanov korelacijski koeficient (r); \*  $p \leq 0,05$ ; \*\*  $p \leq 0,01$ ; n = 76).

*Table 4: The correlations between the amount of dust and reflectance in different parts of the spectra in June 2012 (Spearman correlation coefficient (r) \*  $p \leq 0,05$ ; \*\*  $p \leq 0,01$ ; n = 76)*

	Spektri	Prah
ODBOJNOST	UV-B	0,521**
	UV-A	0,555**
	vijoličasta	0,575**
	modra	0,578**
	zelena	0,489**
	rumena	0,452**
	rdeča	0,472**
	NIR	-0,120

Količina prahu kaže pozitivno korelacijo z vsemi deli odbojnega spektra, izjema je le območje NIR. To pomeni, da se s količino prahu povečuje tudi odboj, povezava pa je najbolj izražena pri krajših valovnih dolžinah (UV-A-spekter, UV-B- spekter, vijoličasti in modri del spektra) (Preglednica 4).

#### 4.1.6.3 Korelacje med biokemijskimi in anatomske lastnostmi ter odbojem

Preglednica 5: Korelacje med biokemijskimi in anatomske lastnosti ter odbojem v različnih delih spektra pri opranih listih bukve junija 2012

(Spearmanov korelacijski koeficient (r); \*  $p \leq 0,05$ ; \*\*  $p \leq 0,01$ ; n = 35 pri biokemijskih in n = 70 pri anatomskih parametrih)

*Table 5: The correlations among biochemical and anatomical characteristics and reflection in different parts of spectra from the dust-free beach leaves in June 2012 (Spearman correlation coefficient (r) \*  $p \leq 0,05$ ; \*\*  $p \leq 0,01$ ; n = 35 in the biochemical and n = 70 in anatomical parameters)*

	Klorofil b	Karotenoidi	Zg. kutikula	Število l. rez
ODBOJNOST	UV-B		0,246*	-0,289*
	UV-A		0,269*	-0,243*
	vijoličasta			-0,235*
	modra	-0,392*		
	zelena		-0,373*	-0,272*
	rumena			
	rdeča	-0,376*		
	NIR			-0,400**

Biokemijski parametri, ki kažejo statistično značilno korelacijo z odbojnimi spektri, so klorofil b in karotenoidi. Vsi so v negativni korelaciji, v primeru klorofila b z modrim in

rdečim delom spektra in v primeru karotenoidov z zelenim delom spektra. To pomeni, da se z večanjem koncentracije teh barvil odboj v omenjenih delih spektra zmanjšuje.

Izmed anatomskih parametrov kažeta statistično značilno korelacijsko z odbojnimi spektri debelina zgornje kutikule in število rež. Debelina zgornje kutikule je v pozitivni korelacijski z odbojem v UV-delu spektra – odboj se z debelino kutikule povečuje. Število rež je v negativni korelacijski – odbojnost se v UV-, vijoličastem, zelenem in NIR-delu spektra zmanjšuje s povečevanjem števila rež (Preglednica 5).

## 4.2 REZULTATI MERITEV NA LISTIH IZ NARAVNEGA OKOLJA V LETU 2012 – 2. MERITEV SEZONE

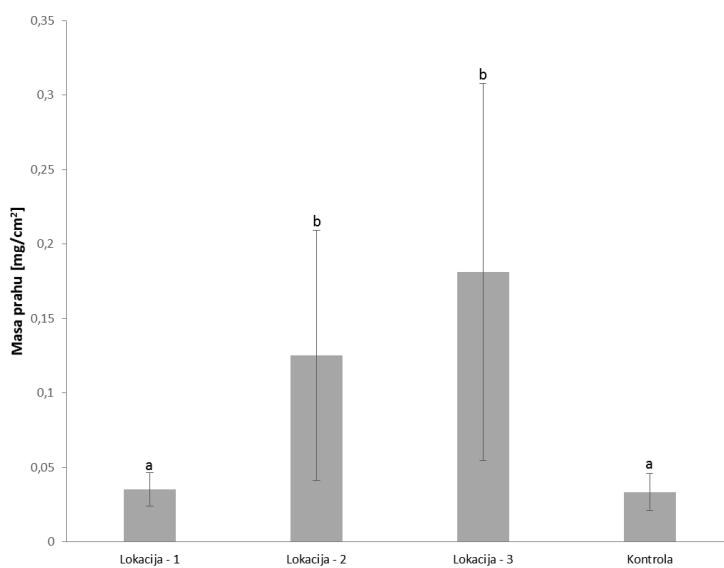
### 4.2.1 Količina prahu na listih

Poimenovanje različnih obravnav glede na lokacijo ob kamnolому Velika Pirešica in referenčno lokacijo (kontrola). V povprečju je bilo največ prahu na lokaciji 3 in najmanj na referenčni lokaciji – kontrola (Preglednica 6). Podatki v tem podoglavlju se nanašajo na 2. meritve sezone, ki je potekala 18. 9. 2012 na istih drevesih kot vse predhodne meritve v letih 2011 in 2012.

Preglednica 6: Količine prahu na listih bukve na različnih lokacijah v okolici kamnoloma Velika Pirešica septembra 2012 ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ ) Črke a, b, c označujejo statistično značilne razlike.

*Table 6: The quantities of dust on the beech leaves from different locations around the Velika Pirešica quarry in September 2012 ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ ). The letters a, b and c indicate statistically significant differences.*

Lokacije: kamnolom Velika Pirešica, 2. meritve sezone (18. 9. 2012)	Količina prahu ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ )	SD
Lokacija 1	0,04 <sup>a</sup>	± 0,01
Lokacija 2	0,13 <sup>b</sup>	± 0,08
Lokacija 3	0,18 <sup>b</sup>	± 0,13
Kontrola	0,03 <sup>a</sup>	± 0,01



Slika 21: Masa prahu na enoto listne površine [ $\text{mg}/\text{cm}^2$ ] iz različnih lokacij septembra 2012

Podatki so prikazani kot povprečne vrednosti  $\pm$  SD. Obravnave za posamezni parameter, ki si ne delijo iste črke, so med seboj statistično značilno različne ( $p \leq 0,05$ ; Kruskal-Wallisova ANOVA in Dunnov test mnogoterih primerjav).

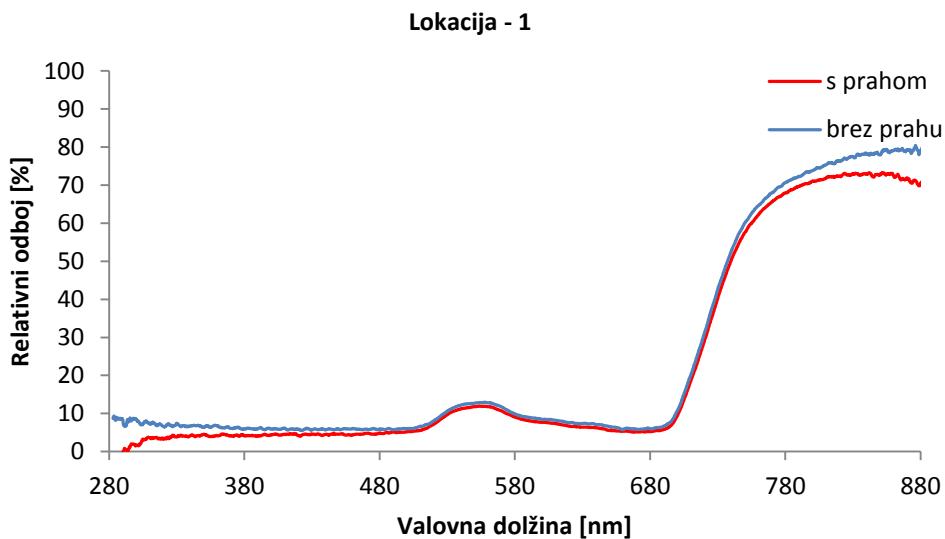
*Figure 21: The mass of dust per leaf area unit [ $\text{mg}/\text{cm}^2$ ]. The data are shown as mean values  $\pm$  SD. The readings for each parameter that do not share the same letters are statistically significantly different ( $p \leq 0.05$ , Kruskal-Wallis and Dunn post-hoc test).*

Povprečna masa prahu na enoto listne površine je na lokaciji 1 le neznatno večja kot na kontrolni lokaciji. Največja povprečna teža prahu je na lokaciji 3, vendar ni statistično značilne razlike z lokacijo 2. Obe lokaciji se statistično značilno razlikujeta od kontrolne lokacije in lokacije 1 ( $p < 0,001$  za vse statistično značilne razlike; Kruskal-Wallisova ANOVA in Dunnov test mnogoterih primerjav) (Slika 21; Preglednica 17).

#### 4.2.2 Optične lastnosti listov

Odbojne spektre listov s prahom in brez njega, ki smo jih testirali, smo dobili s 4 različnih lokacij, pri čemer je lokacija 4 predstavljala referenčno lokacijo (kontrola). Vsaka lokacija je bila vzorčena  $n = 20$ .

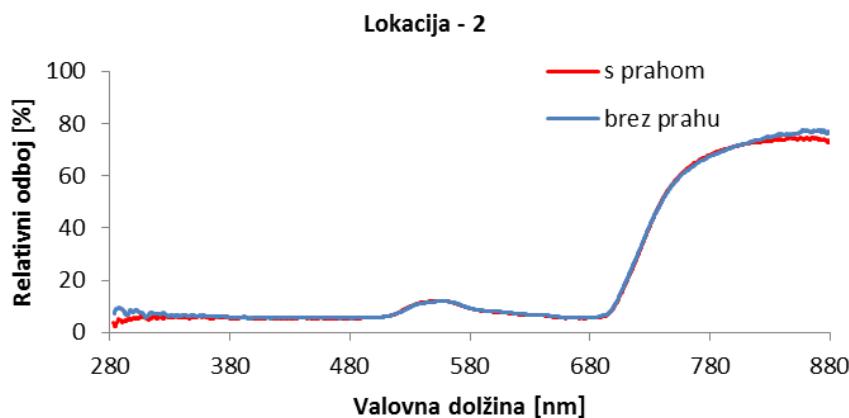
Prikaz povprečnih vrednosti relativnega odboja pri listih s prahom in brez njega na lokaciji 1 kaže na specifično ujemanje krivulje skozi celoten spekter vidne svetlobe (380–750 nm) z večjimi razhajanji v spektrih UV in NIR. Akumulacija prahu na listih je bila  $0,04 \pm 0,01 \text{ mg}/\text{cm}^2$  (Slika 22).



Slika 22: Spektri povprečnih vrednosti relativnega odboja od zgornje listne površine pri listih bukve s prahom in opranih listih brez prahu z lokacije 1 – ob kamnolomu Velika Pirešica septembra 2012  
 Podatki so povprečja 5-nm intervalov (n=20).

*Figure 22: The spectra of the average value of the relative reflection from adaxial beech leaf surface of the location no. 1 - the Velika Pirešica quarry in September 2012. The reflection of the leaves with dust (red line) and the dust free-leaves (blue line) is shown. The data are in the average of 5-nm intervals (n = 20).*

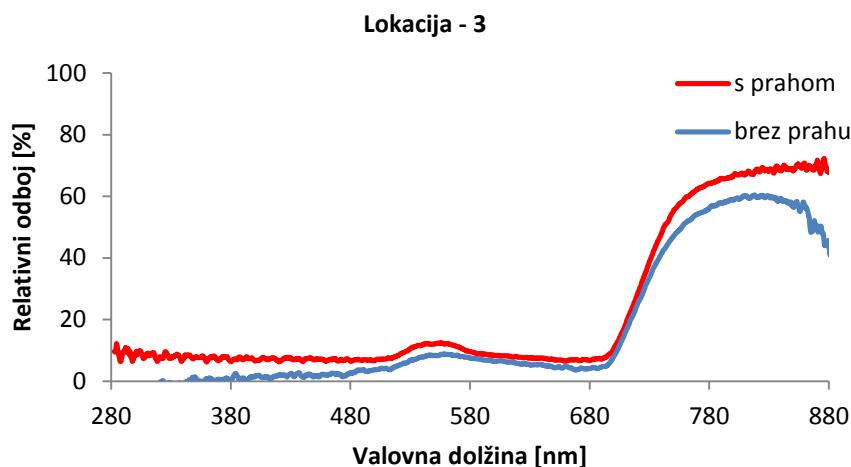
Prikaz povprečnih vrednosti relativnega odboja pri listih s prahom in brez njega na lokaciji 2 kaže na ujemanje krivulje odboja skozi celoten odbojni spekter z manjšim odstopanjem le v UV- in IR-delu spektra. Lokacija 2 je bila obremenjena s prahom  $0,13 \pm 0,08 \text{ mg/cm}^2$  (Slika 23).



Slika 23: Spektri povprečnih vrednosti relativnega odboja od zgornje listne površine pri listih bukve s prahom in opranih listih brez prahu z lokacije 2 – ob kamnolomu Velika Pirešica septembra 2012  
 Prikazan je odboj pri listih s prahom in opranih listih brez prahu. Podatki so povprečja 5-nm intervalov (n = 20).

*Figure 23: The spectra of the average value of the relative reflection from adaxial beech leaf surface of the location no. 2 - at the Velika Pirešica quarry in September 2012. The reflection of the leaves with dust (red line) and the dust-free leaves (blue line) is shown. The data are in the average of 5-nm intervals (n = 20).*

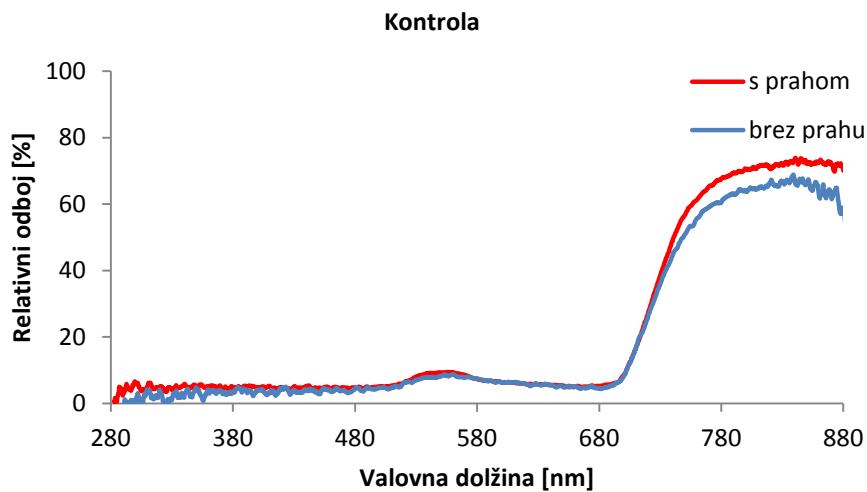
Prikaz povprečnih vrednosti relativnega odboja pri listih s prahom in brez njega na lokaciji 3 kaže na specifično ujemanje krivulje odboja skozi celoten odbojni spekter od modrega do rdečega spektra z večjimi odstopanjmi v spektrih UV in NIR. Akumulacija prahu na listih je bila  $0,18 \pm 0,13 \text{ mg/cm}^2$  in je predstavljala najbolj obremenjeno lokacijo s prahom v vseh meritvah (v letu 2011 in 2012) (Slika 24).



Slika 24: Spektri povprečnih vrednosti relativnega odboja od zgornje površine pri listih bukve s prahom in opranih listih brez prahu z lokacije 3 – ob kamnolому Velika Pirešica septembra 2012  
Podatki so povprečja 5-nm intervalov ( $n = 20$ ).

*Figure 24: The spectra of the average value of the relative reflection from adaxial beech leaf surface of the location no. 3 - at the Velika Pirešica quarry in September 2012. The reflection of the leaves with dust (red line) and the dust-free leaves (blue line) is shown. The data are in the average of 5-nm intervals ( $n = 20$ ).*

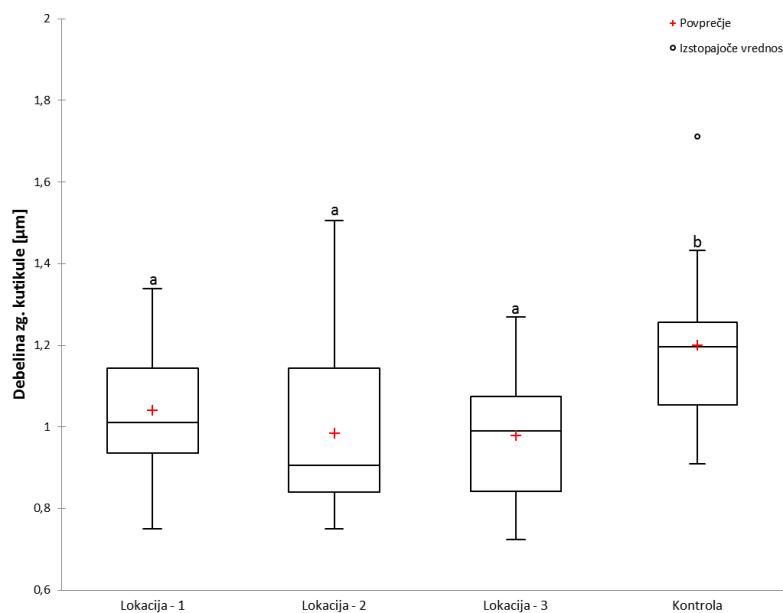
Primerjava rezultatov meritev s kontrolne lokacije kaže, da referenčna lokacija (kontrola) ni bila obremenjena s prahom ( $0,03 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ ), kar dokazuje tudi ujemanje spektralnega odboja v celotnem spektru z odstopanjii le v spektru NIR (Slika 25).



Slika 25: Spektri povprečnih vrednosti relativnega odboja od zgornje listne površine pri listih bukve s prahom in opranih listih brez prahu s kontrolne lokacije (lokacija 4) – oddaljene 2,35 km vzhodno od kamnoloma Velika Pirešica septembra 2012  
Podatki so povprečja 5-nm intervalov ( $n = 20$ ).

*Figure 25: The spectra of the average value of the relative reflection from adaxial beech leaf surface of the control location (no. 4) – the distance of 2.35 km east of the Velika Pirešica quarry in September 2012. The reflection of the leaves with dust (red line) and the dust-free leaves (blue line) is shown. The data are in the average of 5-nm intervals ( $n = 20$ ).*

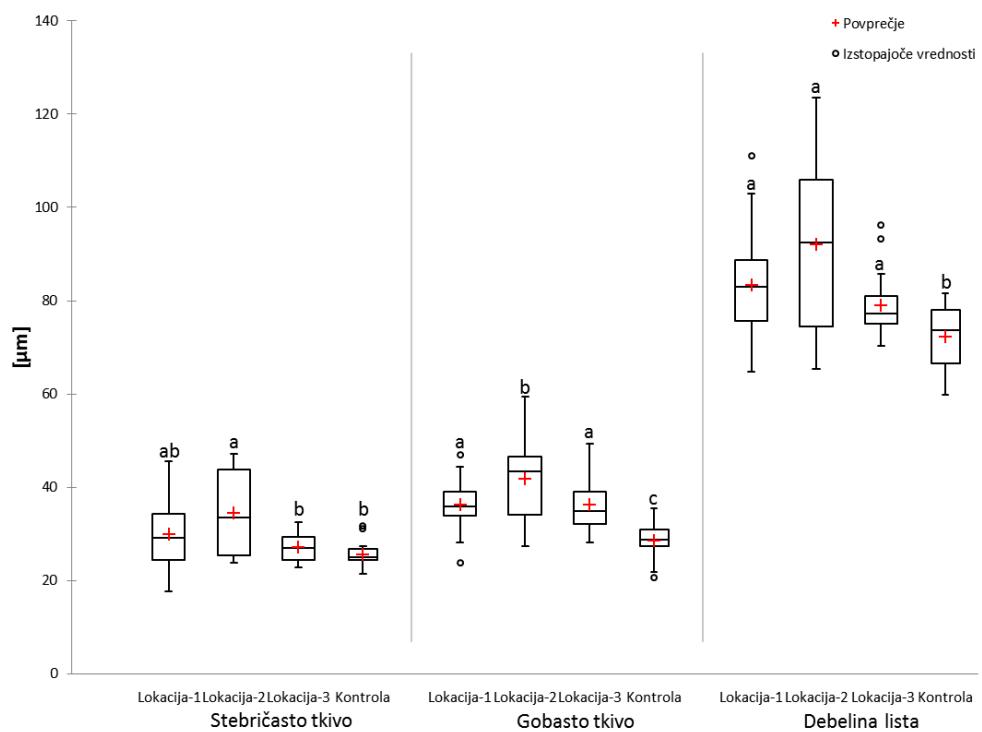
#### 4.2.3 Anatomske lastnosti



Slika 26: Razlike v debelini zgornje kutikule med posameznimi lokacijami septembra 2012  
Kvantilni diagrami prikazujejo mediane, okvire, kjer je 50 % vseh vrednosti, ter ročaje z neizstopajočimi podatki. Obravnave, ki si ne delijo iste črke, so med seboj statistično značilno različne ( $p \leq 0,05$ ; Kruskal-Wallisova ANOVA in Dunnov test mnogoterih primerjav).

*Figure 26: The differences of adaxial cuticle thickness among different locations. The quantile diagrams show the medians, the frames presenting 50 % of the total data and the handles with non-rising data (boxplot). The readings that do not share the same letters are statistically significantly different ( $p \leq 0.05$ ; ANOVA and post-hoc Tukey test).*

Debelina zgornje kutikule je največja na kontrolni lokaciji in se statistično značilno razlikuje od debeline na lokacijah 1, 2 in 3 ( $p = 0,017$ ,  $p = 0,006$  in  $p = 0,002$ ; Kruskal-Wallisova ANOVA in Dunnov test mnogoterih primerjav). Med ostalimi obravnavami ni statistično značilnih razlik (Slika 26, Preglednica 7).

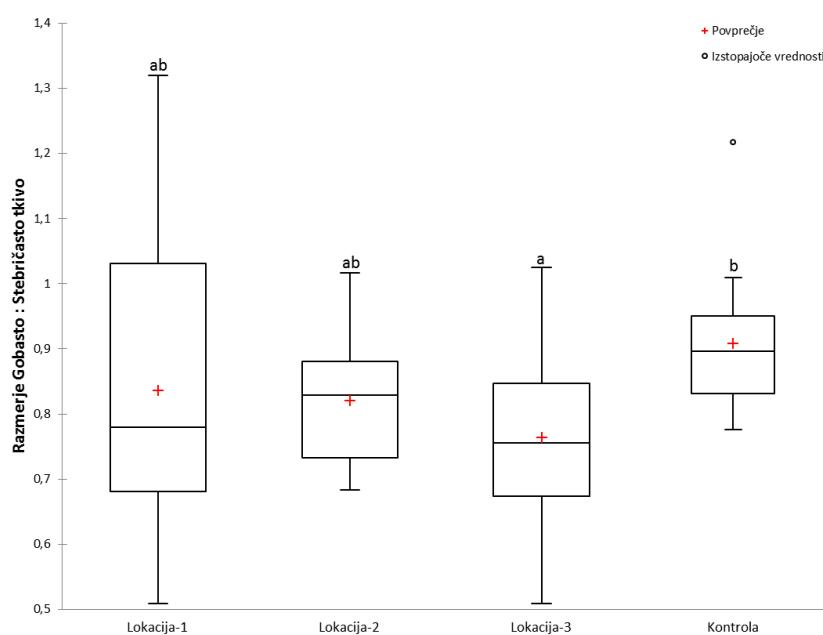


Slika 27: Razlike v debelini stebričastega in gobastega tkiva ter debelini lista med posameznimi lokacijami septembra 2012

Kvantilni diagrami prikazujejo mediane, okvire, kjer je 50 % vseh vrednosti, ter ročaje z izstopajočimi podatki. Obravnave za posamezni parameter, ki si ne delijo iste črke, so med seboj statistično značilno različne ( $p \leq 0.05$ ; ANOVA in post-hoc Tukey test za stebričasto tkivo ter Kruskal-Wallisova ANOVA in Dunnov test mnogoterih primerjav za gobasto tkivo in debelino lista).

*Figure 27: The differences of palisade and spongy tissue thickness and leaf thickness among different locations. The quantile diagrams show the medians, the frames presenting 50 % of the total data and the handles with non-rising data. The readings that do not share the same letters are statistically significantly different ( $p \leq 0.05$ ; ANOVA and post-hoc Tukey test for palisade parenchyma and Kruskal Wallis, Dunn's post-hoc test for spongy parenchyma and leaf thickness).*

Povprečna debelina tako stebričastega in gobastega tkiva kot celotnega lista je največja na lokaciji 2 in najmanjša na kontrolni lokaciji. Debelina stebričastega tkiva je statistično različna med lokacijo 2 in lokacijo 3 ter kontrolno lokacijo ( $p = 0,018$  oz.  $p = 0,001$ ; ANOVA in post-hoc Tukey test). Debelina gobastega tkiva je statistično značilno različna med kontrolno lokacijo in lokacijami 1, 2 in 3 ( $p = 0,004$ ,  $p < 0,001$  in  $p = 0,004$ ; Kruskal-Wallis in post-hoc Dunnov test). Statistično značilna je tudi razlika med lokacijo 2 ter lokacijama 1 in 3 ( $p = 0,037$  oz.  $p = 0,038$ ). Debelina lista je pri kontroli statistično značilno različna od debeline na vseh ostalih lokacijah ( $p = 0,005$ ,  $p = 0,003$  in  $p = 0,003$  za lokacije 1, 2 in 3; Kruskal-Wallisova ANOVA in Dunnov test mnogoterih primerjav (Slika 27; Preglednica 7).

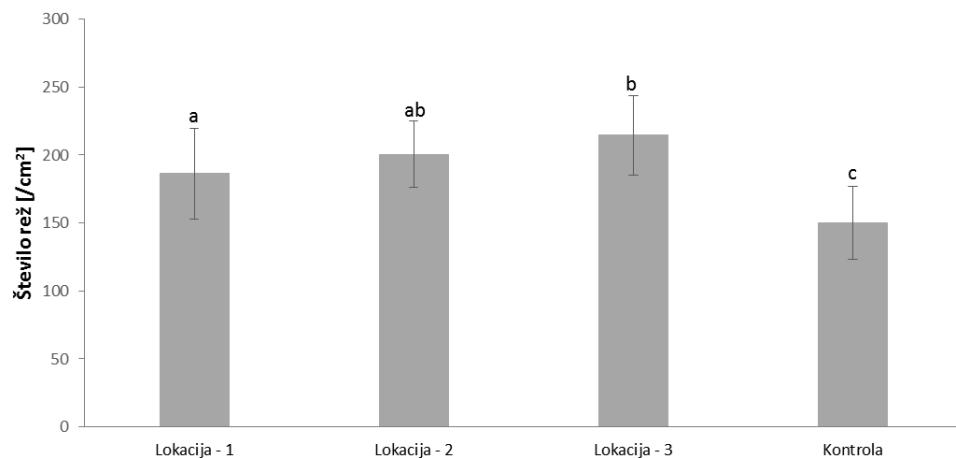


Slika 28: Razlike v razmerju med gobastim in stebričastim tkivom med posameznimi obravnavami septembra 2012

Kvantilni diagrami prikazujejo mediane, okvire, kjer je 50 % vseh vrednosti, ter ročaje z neizstopajočimi podatki. Obravnave, ki si ne delijo iste črke, so med seboj statistično značilno različne ( $p \leq 0,05$ ; ANOVA in post-hoc Tukey test).

*Figure 28: The differences of the palisade/spongy parenchyma ratio between different locations. The quantile diagrams show the medians, the frames presenting 50 % of the total data and the handles with non-rising data. The readings that do not share the same letters are statistically significantly different ( $p \leq 0.05$ ; ANOVA and post-hoc Tukey test).*

Razmerje med gobastim in stebričastim tkivom je najmanjše na lokaciji 3, kjer je bilo na listih največ prahu, in največje na kontrolni lokaciji, kjer ga je bilo najmanj. To pomeni, da je pri listih z največ prahu relativno največ gobastega tkiva v odnosu na stebričasto tkivo. Razlika med omenjenima lokacijama je statistično značilno različna ( $p = 0,021$ ; ANOVA in post-hoc Tukey test). Med ostalimi obravnavami ni statistično značilnih razlik (Slika 28; Preglednica 7).

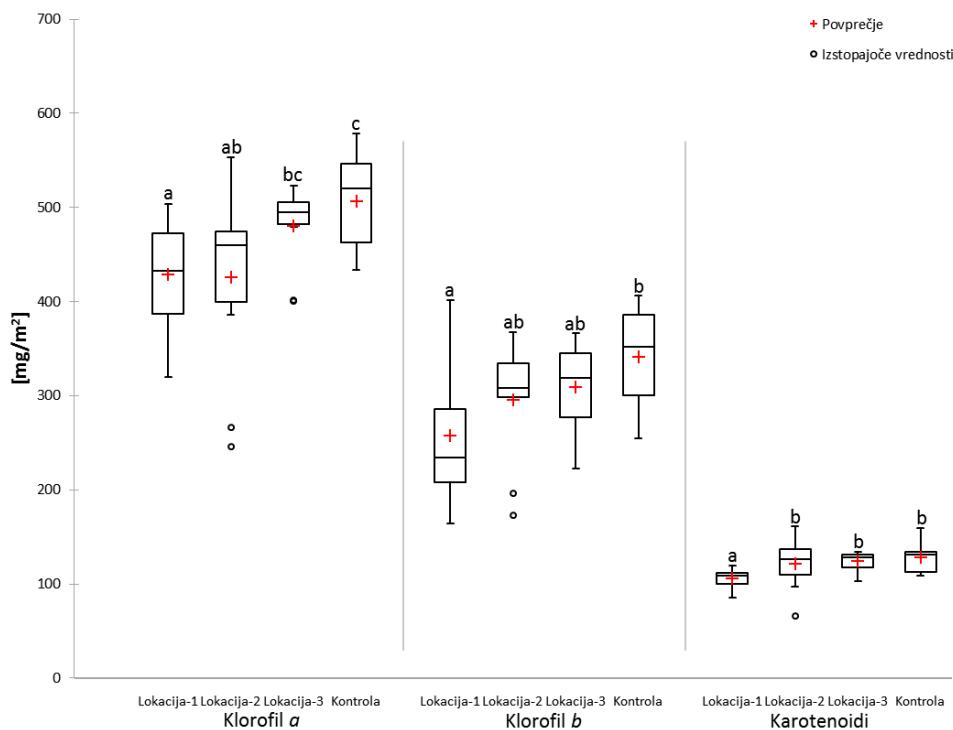


Slika 29: Število listnih rež na enoto listne površine [cm<sup>2</sup>] med posameznimi obravnavami septembra 2012  
Podatki so prikazani kot povprečne vrednosti  $\pm$  SD. Obravnave za posamezni parameter, ki si ne delijo iste črke, so med seboj statistično značilno različne ( $p \leq 0,05$ ; Kruskal-Wallisova ANOVA in Dunnov test mnogoterih primerjav).

*Figure 29: The number of leaf stomata per leaf area unit [cm<sup>2</sup>] of beech leaves from different locations.  
The data are shown as mean values  $\pm$  SD. The readings for each parameter that do not share the same letters are statistically significantly different ( $p \leq 0,05$ ; Kruskal Wallis and Dunn's post-hoc test).*

Število rež je najmanjše na kontrolni lokaciji in se statistično značilno razlikuje od števila na lokacijah 1, 2 in 3 ( $p = 0,002$ ,  $p < 0,001$  in  $p < 0,001$ ; Kruskal-Wallisova ANOVA in Dunnov test mnogoterih primerjav). Statistično značilna je tudi razlika med lokacijo 1 in lokacijo 3, kjer je število rež največje ( $p = 0,014$ ) (Slika 29, Preglednica 7).

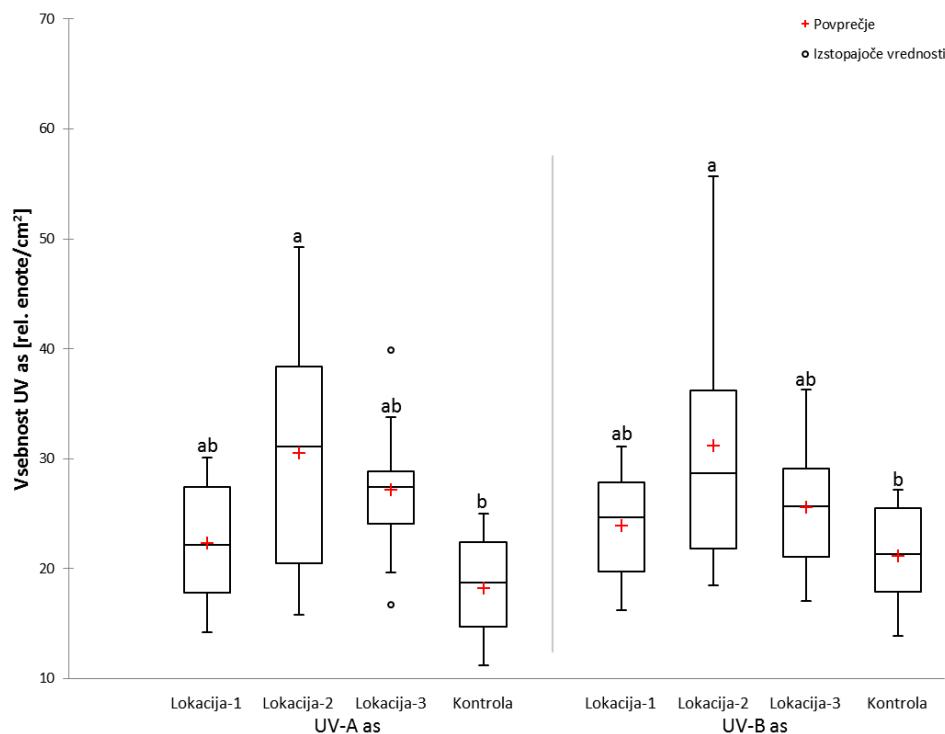
#### 4.2.4 Biokemijske lastnosti



Slika 30: Razlike v vsebnosti klorofilov in karotenoidov med posameznimi obravnavami septembra 2012  
 Kvantilni diagrami prikazujejo mediane, okvire, kjer je 50 % vseh vrednosti, ter ročaje z neizstopajočimi podatki. Obravnave za posamezni parameter, ki si ne delijo iste črke, so med seboj statistično značilno različne ( $p \leq 0,05$ ; Kruskal-Wallisova ANOVA in Dunnov test mnogoterih primerjav).

*Figure 30: The chlorophylls and carotenoids differences in beech leaves from different locations. The quantile diagrams show the medians, the frames presenting 50 % of the total data and the handles with non-rising data. The readings that do not share the same letters are statistically significantly different ( $p \leq 0,05$ ; Kruskal-Wallis and Dunn's post-hoc test).*

Povprečna vsebnost vseh treh barvil je največja na kontrolni lokaciji, vendar v primeru klorofila *a* ni statistično značilne razlike z lokacijo z največ prahu (lokacija 3), v primeru klorofila *b* in karotenoidov pa tudi z lokacijo 2. Najmanjša povprečna vrednost klorofila *a* je na lokacijah 1 in 2. Lokacija 1 se statistično značilno razlikuje od lokacije 3 in kontrolne lokacije ( $p = 0,046$  in  $p = 0,011$ ; Kruskal-Wallisova ANOVA in Dunnov test mnogoterih primerjav). Lokacija 2 se statistično značilno razlikuje od kontrolne lokacije ( $p = 0,034$ ). Najmanjša povprečna vsebnost klorofila *b* je na lokaciji 1 in je statistično značilno različna od kontrolne lokacije ( $p = 0,005$ ; Kruskal-Wallisova ANOVA in Dunnov test mnogoterih primerjav). Prav tako je na lokaciji 1 najmanjša povprečna koncentracija karotenoidov in se statistično značilno razlikuje od vseh ostalih lokacij ( $p = 0,024$ ,  $p = 0,009$  in  $p = 0,003$ ; Kruskal-Wallisova ANOVA in Dunnov test mnogoterih primerjav) (Slika 30; Preglednica 7).



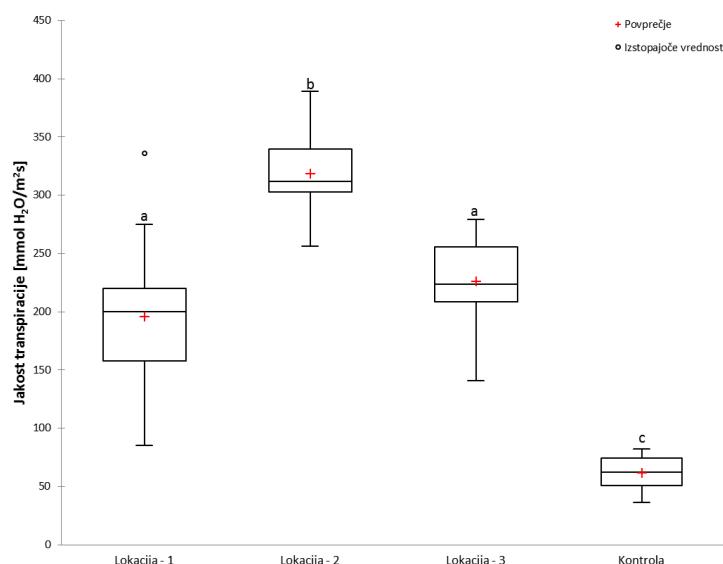
Slika 31: Razlike v vsebnosti UV-A- in UV-B-absorbirajočih snovi med posameznimi obravnavami septembra 2012

Kvantilni diagrami prikazujejo mediane, okvire, kjer je 50 % vseh vrednosti, ter ročaje z neizstopajočimi podatki. Obravnave za posamezni parameter, ki si ne delijo iste črke, so med seboj statistično značilno različne ( $p \leq 0,05$ ; ANOVA in post-hoc Tukey test).

*Figure 31: The differences in content of UV-A and UV-B absorbing substances of beech leaves from different locations. The quantile diagrams show the medians, the frames presenting 50 % of the total data and the handles with non-rising data. The readings that do not share the same letters are statistically significantly different ( $p \leq 0.05$ ; ANOVA and post-hoc Tukey test).*

Vsebnosti UV-A- in UV-B-absorbirajočih snovi so statistično značilno različne le med kontrolno lokacijo, kjer so najmanjše, in lokacijo 2, kjer so največje ( $p = 0,004$  za UV-A in  $p = 0,028$  za UV-B-as; ANOVA in post-hoc Tukey test) (Slika 31; Preglednica 7).

#### 4.2.5 Fiziološke lastnosti

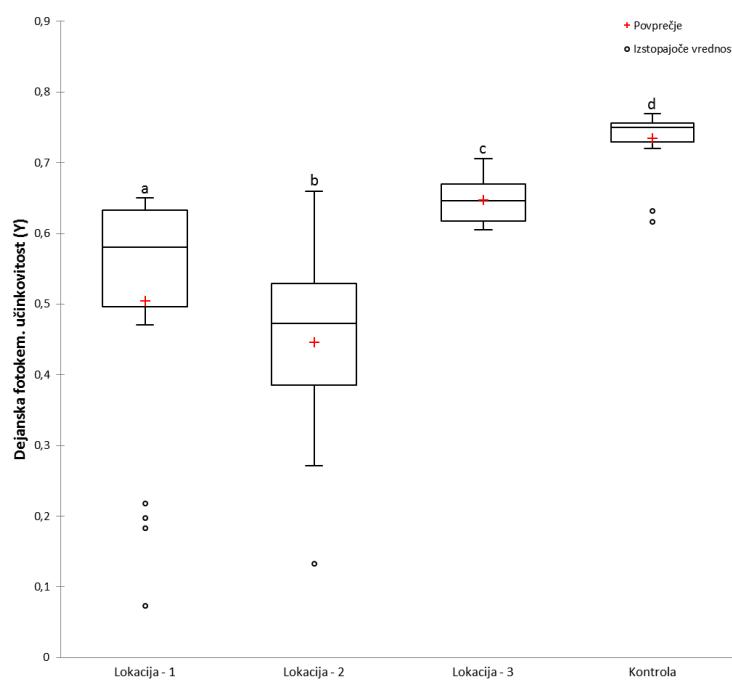


Slika 32: Razlike v jakosti transpiracije med posameznimi lokacijami septembra 2012

Kvantilni diagrami prikazujejo mediane, okvire, kjer je 50 % vseh vrednosti, ter ročaje z neizstopajočimi podatki. Obravnave, ki si ne delijo iste črke, so med seboj statistično značilno različne ( $p \leq 0,05$ ; ANOVA in post-hoc Tukey test).

*Figure 32: The differences in the intensity of transpiration for beech leaves from different locations. The quantile diagrams show the medians, the frames presenting 50 % of the total data and the handles with non-rising data. The readings that do not share the same letters are statistically significantly different ( $p \leq 0.05$ ; ANOVA and post-hoc Tukey test).*

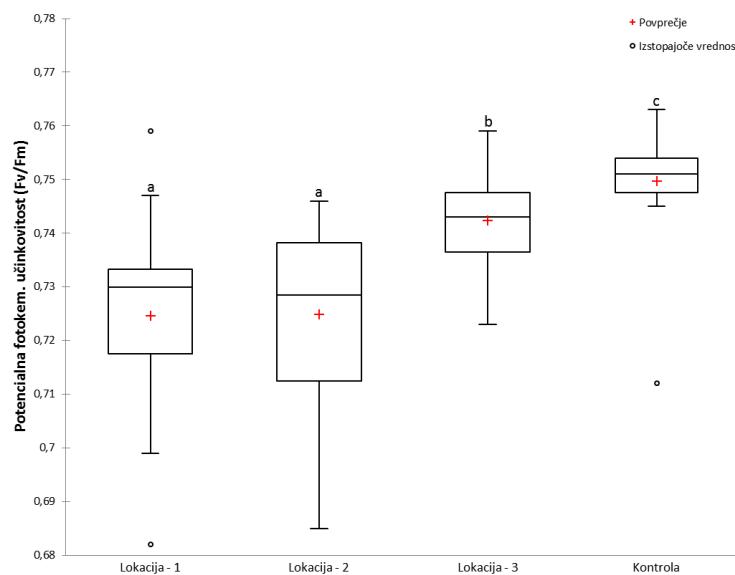
Najmanjsa transpiracija je bila izmerjena na kontrolni lokaciji in se statistično razlikuje od transpiracije, izmerjene na lokacijah 1, 2 in 3 ( $p < 0,001$  za vse primerjave ( $p \leq 0,05$ ; ANOVA in post-hoc Tukey test). Statistično značilna je tudi razlika med transpiracijo na lokaciji 2 in lokacijama 1 in 3 ( $p < 0,001$  za obe primerjavi) (Slika 32; Preglednica 7).



Slika 33: Razlike v dejanski fotokemični učinkovitosti (Y) med posameznimi lokacijami septembra 2012  
 Kvantilni diagrami prikazujejo mediane, okvire, kjer je 50 % vseh vrednosti, ter ročaje z neizstopajočimi podatki. Obravnave, ki si ne delijo iste črke, so med seboj statistično značilno različne ( $p \leq 0,05$ ; Kruskal-Wallisova ANOVA in Dunnov test mnogoterih primerjav).

*Figure 33: The differences in the actual photochemical efficiency (Y) of beech leaves from different locations. The quantile diagrams show the medians, the frames presenting 50 % of the total data and the handles with non-rising data. The readings that do not share the same letters are statistically significantly different ( $p \leq 0,05$ ; Kruskal-Wallis and Dunn's post-hoc test).*

Dejanska fotokemična učinkovitost je bila največja na kontrolni lokaciji in je bila statistično značilno različna od dejanske fotokemične učinkovitosti na lokacijah 1, 2 in 3 ( $p < 0,001$ ; Kruskal-Wallisova ANOVA in Dunnov test mnogoterih primerjav). Statistično značilna je bila tudi razlika med lokacijo 3 in lokacijama 1 in 2 ( $p < 0,001$  za obe primerjavi) ter med lokacijama 1 in 2 ( $p = 0,031$ ) (Slika 33; Preglednica 7).



Slika 34: Razlike v potencialni fotokemični učinkovitosti ( $Fv/Fm$ ) med posameznimi lokacijami septembra 2012

Kvantilni diagrami prikazujejo mediane, okvire, kjer je 50 % vseh vrednosti, ter ročaje z neizstopajočimi podatki. Obravnave, ki si ne delijo iste črke, so med seboj statistično značilno različne ( $p \leq 0,05$ ; Kruskal-Wallisova ANOVA in Dunnov test mnogoterih primerjav).

*Figure 34: The differences in the potential photochemical efficiency ( $Fv/Fm$ ) of beech leaves from different locations. The quantile diagrams show the median, the frames presenting 50 % of the total data and the handles with non-rising data. The readings that do not share the same letters are statistically significantly different ( $p \leq 0,05$ ; Kruskal-Wallis and Dunn's post-hoc test).*

Potencialna fotokemična učinkovitost je bila največja na kontrolni lokaciji in je bila statistično značilno različna od dejanske fotokemične učinkovitosti na lokacijah 1, 2 in 3 ( $p < 0,001$ ,  $p < 0,001$  in  $p = 0,004$ ; Kruskal-Wallisova ANOVA in Dunnov test mnogoterih primerjav). Statistično značilna razlika je bila tudi razlika med lokacijo 3 in lokacijama 1 in 2 ( $p = 0,001$  za obe primerjavi) (Slika 34; Preglednica 7).

Preglednica 7: Anatomski, biokemijski in fiziološki parametri listov navadne bukve septembra 2012  
Vrednosti so povprečja ± SD. Obravnave, ki si ne delijo iste črke, so med seboj statistično značilno različne (p ≤ 0,05; ANOVA in post-hoc Tukey test ob normalni razporeditvi podatkov ter Kruskal-Wallisova ANOVA in Dunnov test mnogoterih primerjav ob nenormalni razporeditvi; n = 20 oz. n = 10 pri biokemijskih parametrih).

*Table 7: The anatomical, biochemical and physiological parameters of beech leaves from different locations in September 2012. The data are shown as mean values ± SD. The readings that do not share the same letters are statistically significantly different (p ≤ 0.05; ANOVA and post-hoc Tukey test for a normal distribution of data; Kruskal-Wallis and Dunn's post-hoc test for non-normal distribution of data, n = 20; n = 10 for the biochemical parameters).*

Značilnosti listov	LOKACIJA 1	LOKACIJA 2	LOKACIJA 3	KONTROLA
<b>Anatomski parametri</b>				
Debelina zg. kutikule (µm)	1,04 ± 0,16 <sup>a</sup>	0,98 ± 0,22 <sup>a</sup>	0,98 ± 0,19 <sup>a</sup>	1,20 ± 0,20 <sup>b</sup>
Debelina zg. povrhnjice (µm)	8,53 ± 0,82 <sup>a</sup>	8,08 ± 0,92 <sup>ab</sup>	7,90 ± 0,71 <sup>ab</sup>	7,68 ± 1,00 <sup>b</sup>
Debelina stebričastega tkiva (µm)	30,05 ± 8,08 <sup>ab</sup>	34,44 ± 8,78 <sup>a</sup>	27,21 ± 3,00 <sup>b</sup>	25,63 ± 2,91 <sup>b</sup>
Debelina gobastega tkiva (µm)	36,28 ± 5,22 <sup>a</sup>	41,86 ± 8,93 <sup>b</sup>	36,31 ± 5,78 <sup>a</sup>	28,52 ± 4,21 <sup>c</sup>
Debelina sp. povrhnjice (µm)	7,39 ± 0,96 <sup>ab</sup>	7,83 ± 0,91 <sup>a</sup>	6,88 ± 0,89 <sup>b</sup>	7,16 ± 0,92 <sup>ab</sup>
Debelina sp. kutikule (µm)	0,62 ± 0,11 <sup>ab</sup>	0,67 ± 0,11 <sup>a</sup>	0,61 ± 0,07 <sup>ab</sup>	0,58 ± 0,04 <sup>b</sup>
Debelina lista (µm)	83,47 ± 11,80 <sup>a</sup>	92,01 ± 18,23 <sup>a</sup>	79,09 ± 6,66 <sup>a</sup>	72,22 ± 7,34 <sup>b</sup>
Gobasto : stebričasto tkivo	0,84 ± 0,22 <sup>ab</sup>	0,82 ± 0,10 <sup>ab</sup>	0,76 ± 0,13 <sup>a</sup>	0,91 ± 0,11 <sup>b</sup>
SLA (cm <sup>2</sup> /g)	310,70 ± 27,70 <sup>a</sup>	349,74 ± 83,66 <sup>ab</sup>	368,22 ± 31,94 <sup>b</sup>	378,09 ± 53,08 <sup>b</sup>
Gostota listnih rež (/cm <sup>2</sup> )	186,25 ± 33,68 <sup>a</sup>	200,42 ± 24,49 <sup>ab</sup>	214,46 ± 29,30 <sup>b</sup>	150,28 ± 26,92 <sup>c</sup>
<b>Biokemijski parametri</b>				
Klorofil a (mg/m <sup>2</sup> )	428,41 ± 58,28 <sup>a</sup>	426,08 ± 99,57 <sup>ab</sup>	480,29 ± 43,49 <sup>bc</sup>	506,93 ± 49,89 <sup>c</sup>
Klorofil b (mg/m <sup>2</sup> )	257,65 ± 75,17 <sup>a</sup>	295,51 ± 62,36 <sup>ab</sup>	309,35 ± 48,21 <sup>ab</sup>	341,54 ± 55,64 <sup>b</sup>
Karotenoidi (mg/m <sup>2</sup> )	106,27 ± 10,47 <sup>a</sup>	121,85 ± 26,97 <sup>b</sup>	124,16 ± 10,45 <sup>b</sup>	127,88 ± 16,61 <sup>b</sup>
Antociani (rel. enote/cm <sup>2</sup> )	0,55 ± 0,8	0,51 ± 0,10	0,60 ± 0,19	0,48 ± 0,14
UV-A-as (rel. enote/cm <sup>2</sup> )	22,37 ± 5,71 <sup>ab</sup>	30,49 ± 11,20 <sup>a</sup>	27,22 ± 6,60 <sup>ab</sup>	18,23 ± 4,89 <sup>b</sup>
UV-B-as (rel. enote/cm <sup>2</sup> )	23,92 ± 5,02 <sup>ab</sup>	31,22 ± 12,24 <sup>a</sup>	25,59 ± 6,00 <sup>ab</sup>	21,13 ± 4,91 <sup>b</sup>
<b>Fiziološki parametri</b>				
Transpiracija (mmol H <sub>2</sub> O/m <sup>2</sup> s)	195,65 ± 60,44 <sup>a</sup>	318,50 ± 34,14 <sup>b</sup>	226,00 ± 37,23 <sup>a</sup>	61,47 ± 14,08 <sup>c</sup>
Dejanska fotokem. učinkovitost - Y	0,50 ± 0,18 <sup>a</sup>	0,45 ± 0,12 <sup>b</sup>	0,65 ± 0,03 <sup>c</sup>	0,73 ± 0,04 <sup>d</sup>
Poten. fotokem. učinkovit. – Fv/Fm	0,72 ± 0,02 <sup>a</sup>	0,72 ± 0,02 <sup>a</sup>	0,74 ± 0,01 <sup>b</sup>	0,75 ± 0,01 <sup>c</sup>
<b>Prah</b>				
Masa prahu (mg/cm <sup>2</sup> )	0,04 ± 0,01 <sup>a</sup>	0,13 ± 0,08 <sup>b</sup>	0,18 ± 0,13 <sup>b</sup>	0,03 ± 0,01 <sup>a</sup>
as – absorbirajoče snovi				

#### 4.2.6 Povezanost med parametri

##### 4.2.6.1 Korelacje med količino prahu ter biokemijskimi, anatomskimi in fiziološkimi lastnostmi

Preglednica 8: Korelacje med količino prahu ter anatomskimi in fiziološkimi parametri listov bukve septembra 2012 – Spearmanov korelacijski koeficient (r)

(Spearmanov korelacijski koeficient (r); \*  $p \leq 0,05$ ; \*\*  $p \leq 0,01$ ; n = 75 pri anatomskih parametrih in n = 80 pri fizioloških parametrih)

*Table 8: The correlation among the amount of dust and biochemical, anatomical and physiological parameters of beech leaves in September 2012 (Spearman correlation coefficient (r); \*  $p \leq 0.05$ ; \*\*  $p \leq 0.01$ ; n = 750 for anatomical parameters and n = 80 for physiological parameters)*

Parametri listov	Prah
<b>Anatomski parametri</b>	
zg. kutikula	-0.345**
gobasto tkivo	0,256*
gobasto : stebričasto tkivo	-0.272*
število rež	0.349**
<b>Fiziološki parametri</b>	
transpiracija	0.591**
dejanska fotokem. učinkovitost	-0.331**

Statistično značilne korelacje anatomskih parametrov s količino prahu so debelina zgornje kutikule, debelina gobastega tkiva, razmerje med gobastim in stebričastim tkivom ter število rež. S povečevanjem količine prahu se zmanjšuje debelina zgornje kutikule, ki je najtanja na lokaciji z največ prahu (lokacija 3) in najdebelejša na lokaciji z najmanj prahu (kontrolna lokacija). Enako velja za razmerje med gobastim in stebričastim tkivom, kar pomeni, da debelina gobastega tkiva s povečevanjem količine prahu vse bolj prevladuje nad stebričastim tkivom, ki ga je najmanj pri listih z največ prahu. Debelina gobastega tkiva je največja na lokaciji 2 in je v pozitivni korelacji ter narašča z večanjem teže prahu. Prav tako se z večanjem količine prahu povečuje število rež, ki jih je največ na lokaciji 3 (Slika 29; Preglednica 8).

Od fizioloških parametrov kažeta korelacijsko s količino prahu transpiracija ter dejanska fotokemična učinkovitost. Prva je v pozitivni korelacijski s količino prahu in je najmanjša na kontrolni lokaciji, druga je v negativni korelacijski in na kontrolni lokaciji doseže največjo povprečno vrednost (Slike 32, 33 in 34; Preglednica 8).

#### 4.2.6.2 Korelacje med količino prahu ter optičnimi lastnostmi

Preglednica 9: Korelacje med količino prahu in odbojem v različnih delih spektra septembra 2012 – Spearmanov korelacijski koeficient (r)  
(\*  $p \leq 0,05$ ; \*\*  $p \leq 0,01$ ; n = 76).

Table 9: The correlations among the amount of dust and reflectance in different parts of the spectra in September 2012, (Spearman correlation coefficient (r) \*  $p \leq 0,05$ ; \*\*  $p \leq 0,01$ ; n = 76).

	<b>Spektri</b>	<b>Prah</b>
<b>ODBOJNOST</b>	UV-B	
	UV-A	
	vijoličasta	0,275*
	modra	0,429**
	zelená	0,536**
	rumena	0,531**
	rdeča	0,501**
	NIR	-0,242*

Količina prahu kaže korelacijo z vsemi deli odbojnega spektra, izjema je le območje UV. V vseh primerih, z izjemo NIR, je korelacija pozitivna, kar pomeni, da se s količino prahu povečuje tudi odboj, povezava pa je najbolj izražena v zelenem, rumenem in rdečem delu spektra (Preglednica 9).

#### 4.2.6.3 Korelacie med biokemijskimi in anatomskimi lastnostmi ter odbojem

Preglednica 10: Statistično značilne korelacie ( $p \leq 0,05$ ) med biokemijskimi in anatomskimi lastnostmi ter odbojem v različnih delih spektra pri opranih listih bukve septembra 2012  
(Spearmanov korelacijski koeficient (r); n = 40 pri biokemijskih in n = 75 pri anatomskih parametrih)

Table 10: The correlations among biochemical, anatomical characteristics and reflection in different parts of the spectra from the dust-free beach leaves in September 2012; (Spearman correlation coefficient (r) \*  $p \leq 0,05$ ; \*\*  $p \leq 0,01$ ; n = 40 in the biochemical and n = 75 in anatomical parameters).

	<b>klorofil a</b>	<b>klorofil b</b>	<b>karotenoidi</b>	<b>antociani</b>	<b>zg. kutikula</b>	<b>stebričasto tkivo</b>	<b>debelina lista</b>	<b>razmerje gobasto : stebričasto tkivo</b>
<b>ODBOJNOST</b>	UV-B				-0,381			
	UV-A				-0,447	-0,222	-0,269	
	vijoličasta			-0,301	-0,432	-0,316	-0,358	
	modra				-0,410	-0,217	-0,250	
	zelená	-0,496	-0,448	-0,502	-0,403			-0,252
	rumena	-0,314	-0,311	-0,332	-0,371			-0,328
	rdeča				-0,365	-0,292	-0,254	-0,342
	NIR	-0,429	-0,393	-0,418	-0,322			

Biokemijski parametri, ki kažejo statistično značilno korelacijo z odbojnimi spektri, so klorofila *a* in *b*, karotenoidi in antociani. Vse korelacije so negativne, s klorofili in karotenoidi v zelenem, rumenem in NIR-delu spektra, z antociani pa v vijoličastem delu spektra. Odboj se v omenjenih delih spektra z večanjem koncentracije pigmentov zmanjšuje.

Anatomski parametri, ki kažejo statistično značilno korelacijo z odbojnimi spektri, so debelina zgornje kutikule in stebričastega tkiva, debelina lista ter razmerje med debelino gobastega in stebričastega tkiva. Zgornja kutikula je v negativni korelaciiji z vsemi deli odbojnega spektra, stebričasto tkivo pa z vijoličastim, modrim, zelenim in rdečim delom spektra – odboj v teh delih spektra narašča z večanjem debeline. Prav tako je negativna korelacija med razmerjem gobasto : stebričasto tkivo in odbojem v zelenem, rumenem in rdečem delu spektra, kar pomeni, da bolj kot prevladuje gobasto tkivo nad stebričastim, večji je odboj (Preglednica 10).

#### 4.2.7 Povezanost med lastnostmi listov, prisotnostjo prahu in odbojnimi spektri

Z multivariantno redundantno analizo (RDA) smo preizkušali, kateri parameter značilno vpliva na variabilnost odbojnih spektrov (refleksivnost). RDA je pokazala, da je prah dejavnik, ki ima signifikanten vpliv na variabilnost odbojnih spektrov. Največ variabilnosti odbojnega spektra smo pojasnili s količino prahu (16 %,  $p < 0,01$ ), karotenoidi (7 %,  $p < 0,01$ ) in klorofilom *b* (2 %,  $p < 0,01$ ). Skupaj smo razložili 26,5 % njihove variabilnosti (Preglednici 11 in 12) med vsemi izmerjenimi morfološkimi in biokemijskimi lastnostmi skupaj (Slika 30). Drugi merjeni parametri niso imeli značilnega vpliva na odbojne spektre. Pozitivna korelacija med količino prahu, karotenoidi ter klorofilom *b* nakazuje pomemben vpliv biokemičnih lastnosti listov (Slika 30).

Preglednica 11: Lastne vrednosti in kumulativni odstotek pojasnjene variance spektrov prvih štirih kanoničnih osi ter korelačijski koeficienti med prvimi štirimi kanoničnimi osmi septembra 2012

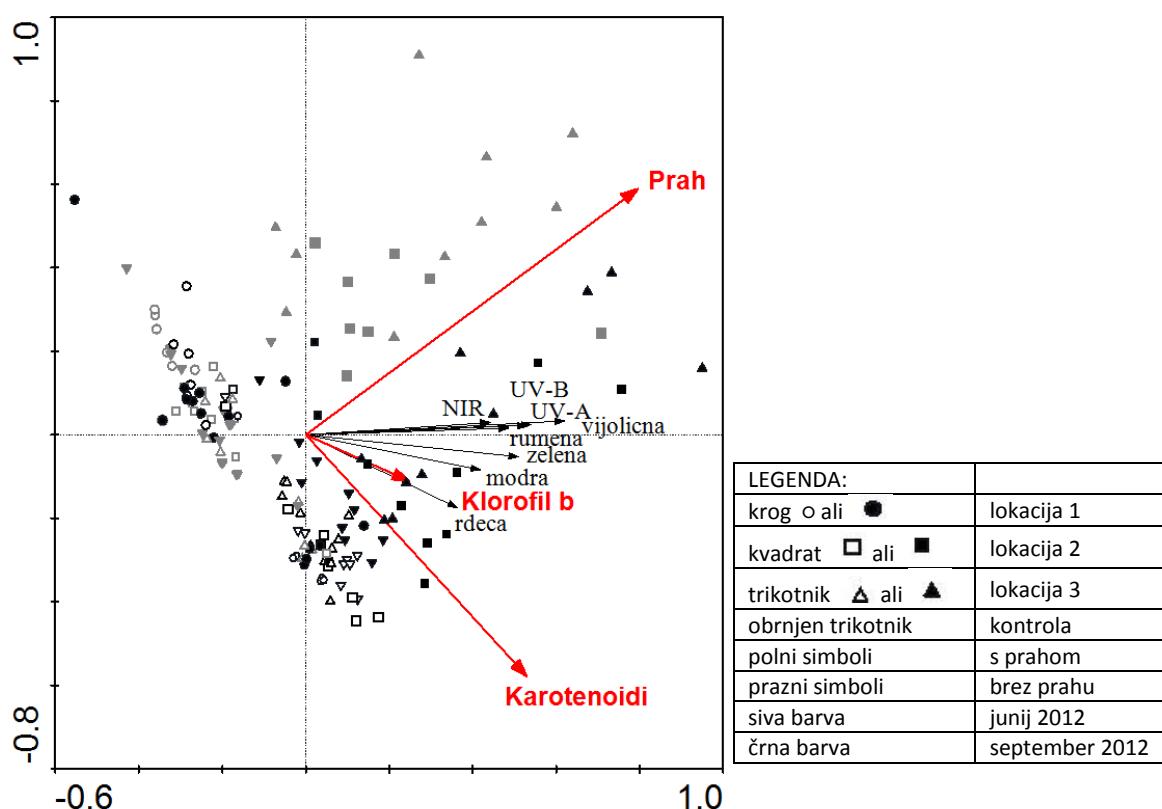
Table 11: The eigenvalues and cumulative percentage of explained variance spectra of the first four canonical axes and the correlation coefficients between the first four canonical axes, September 2012.

Osi	1	2	3	4	Skupna varianca
Lastne vrednosti	0,253	0,009	0,002	0,000	1,000
Odnos spektri-lastnosti	0,572	0,310	0,262	0,084	
Kumulativni % variance spektrov	5,3	26,2	26,5	26,5	
Kumulativni % odnosa spektri-lastnosti	95,5	99,0	99,9	100,0	
Vsota vseh lastnih vrednosti					1,000
Vsota vseh kanoničnih lastnih vrednosti					0,265

Preglednica 12: Parametri, ki statistično značilno razložijo variabilnost spektrov in delež pojasnjene variance, 2012

Table 12: The parameters that significantly explain the variability of the spectra and the proportion of the explained variance, 2012

Parameter	Delež pojasnjene variance (%)	Lambda A	P	F
prah	16	0,16	0,000	27,11
karotenoidi	7	0,07	0,000	13,37
klorofil b	2	0,02	0,027	4,08



Slika 35: Ordinacijski diagram redundantne analize (RDA), ki prikazuje statistično značilne parametre ( $p < 0,01$ ), ki pojasnjujejo variabilnost odbojnih spektrov, junija in septembra 2012  
Lastne vrednosti prvih 3 osi so 0,16; 0,07 in 0,02. Količina prahu na  $\text{cm}^2$  in količina karotenoidov in klorofila b.

Figure 35: The redundancy analysis (RDA) shows statistically significant parameter ( $p < 0.01$ ), explaining the variability of the reflectance spectra. The eigenvalues of the first 3 axes are 0.16; 0.07 and 0.02. The amount of dust per  $\text{cm}^2$  and the amount of carotenoids and chlorophyll b.

Ko smo želeli variabilnost spektrov razložiti s fiziološkimi odzivi rastline in količino prahu, nam je RDA pokazala, da fiziološki parametri niso značilno vplivali na spremembe optičnih lastnosti.

RDA-analiza biokemičnih lastnosti v odvisnosti od prahu pojasni skupaj 26,5 % variabilnosti spektrov. Od značilnih parametrov največji delež razloži prah (16 %,  $p < 0,01$ ), sledijo karotenoidi (7 %,  $p < 0,01$ ) in klorofil *b* (2 %,  $p < 0,01$ ). Značilne spremenljivke so med seboj v pozitivni korelaciji (Slika 35).

#### 4.3 REZULTATI MERITEV NA LISTIH Z UMETNIM NANOSOM PRAHU V DELNO NADZOROVANIH RAZMERAH V LETU 2015

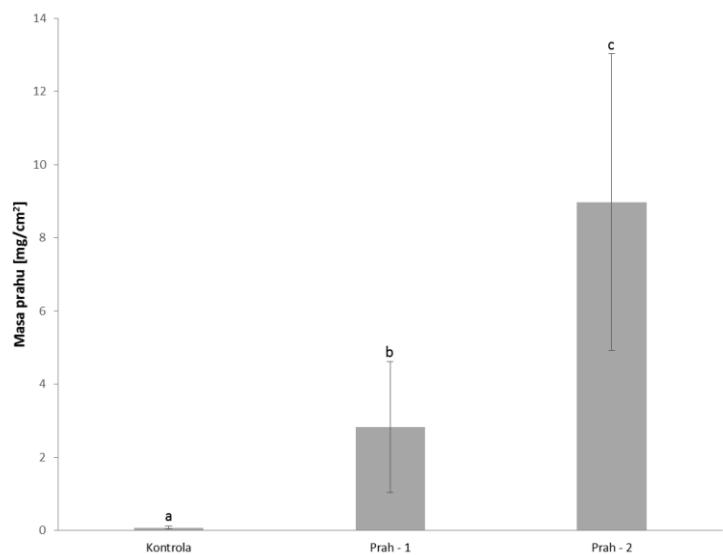
##### 4.3.1 Količina prahu na listih

Poimenovanje različnih obravnav glede na koncentracijo dodatno umetno nanesenega prahu pomeni: kontrola – listi brez dodatnega nanosa prahu, veljajo kot referenčni listi; Prah – 1 – listi z dodatnim nanosom manjše koncentracije prahu; Prah – 2 – listi z dodatnim nanosom večje koncentracije prahu. V povprečju je bilo največ prahu na listih z lokacije Prah – 2 in najmanj na referenčni lokaciji – kontrola (Preglednica 13).

Preglednica 13: Količine prahu na listih bukve ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ ) iz Drevesnice Omorika avgusta 2015  
Črke a, b, c označujejo statistično značilne razlike.

Table 13: The quantities of dust particles on beech leaves ( $\text{mg} / \text{cm}^2$ ) from Omorika nursery in August 2015.  
The letters a, b and c indicate statistically significant differences.

Lokacija: Drevesnica Omorika – koncentracije prahu (2015)	Količina prahu	SD
Prah – kontrola – referenca	0,08 <sup>a</sup>	$\pm 0,04$
Prah – 1	2,83 <sup>b</sup>	$\pm 1,79$
Prah – 2	8,98 <sup>c</sup>	$\pm 4,05$



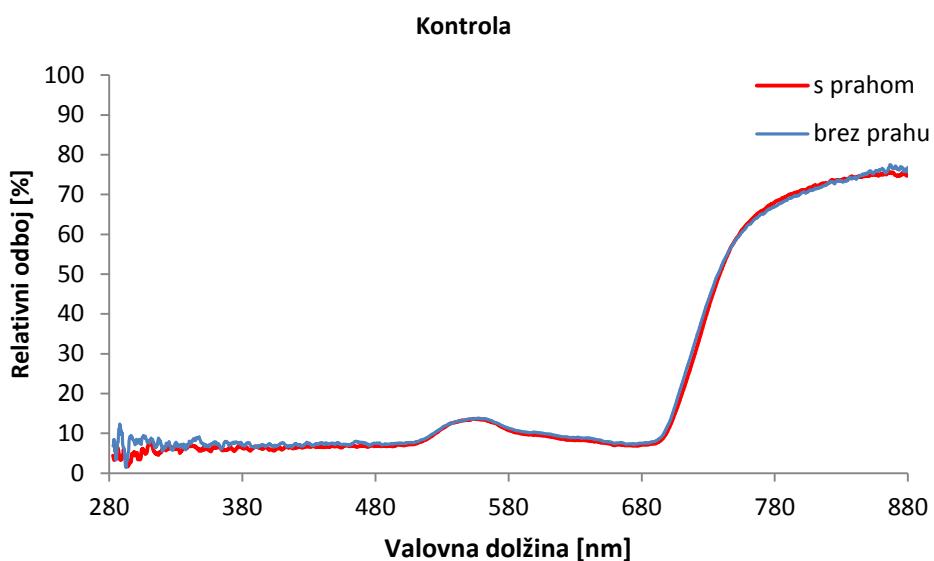
Slika 36: Masa prahu na enoto listne površine [mg/cm<sup>2</sup>] pri meritvah vzorcev v delno kontroliranih razmerah avgusta 2015

Podatki so prikazani kot povprečne vrednosti  $\pm$  SD. Obravnave za posamezni parameter, ki si ne delijo iste črke, so med seboj statistično značilno različne ( $p \leq 0,05$ ; Kruskal-Wallisova ANOVA in Dunnov test mnogoterih primerjav).

*Figure 36: The mass of dust per leaf area unit [mg / cm<sup>2</sup>]. The data are shown as mean values  $\pm$  SD. The readings for each parameter that do not share the same letters are statistically significantly different ( $p \leq 0.05$ , Kruskal-Wallis and Dunn post-hoc test).*

#### 4.3.2 Optične lastnosti, odbojnost in presevnost listov

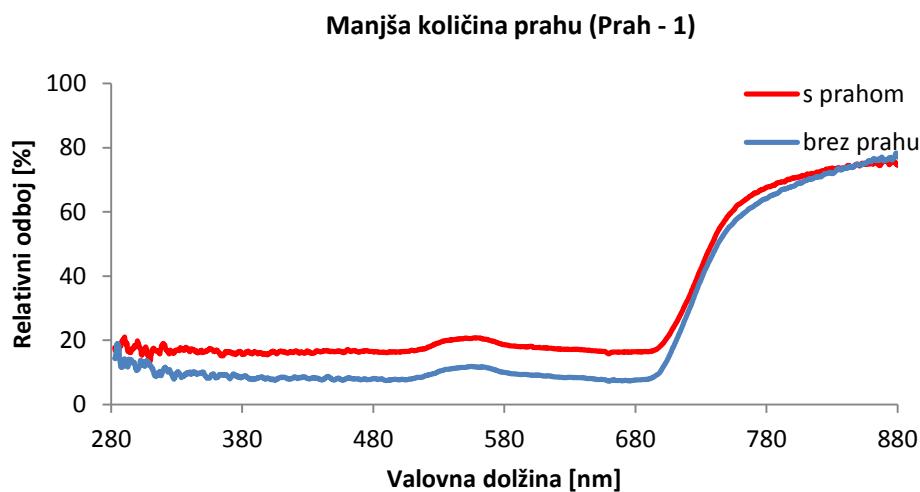
Primerjava rezultatov meritev, pridobljenih pri kontroliranem nanosu prahu, kaže, da referenčna lokacija (kontrola) ni bila obremenjena s prahom ( $0.08 \pm 0.04 \text{ mg/cm}^2$ ) oz. je bila ta količina prahu prisotna na listih že pred začetkom testiranja.



Slika 37: Spektri povprečnih vrednosti relativnega odboja od zgornje listne površine listov bukve s prahom in opranih listov brez prahu pri kontroli (referenčna ploskev) avgusta 2015  
Prikazan je odboj listov s prahom (rdeča) in opranih listov brez prahu (modra). Podatki so povprečja 5-nm intervalov ( $n = 16$ ).

*Figure 37: The spectra of the average value of the relative reflection from adaxial beech leaf surface of the control location. The data are in the average of 5-nm intervals ( $n = 16$ ); red line-dusted leaves, blue line-washed leaves*

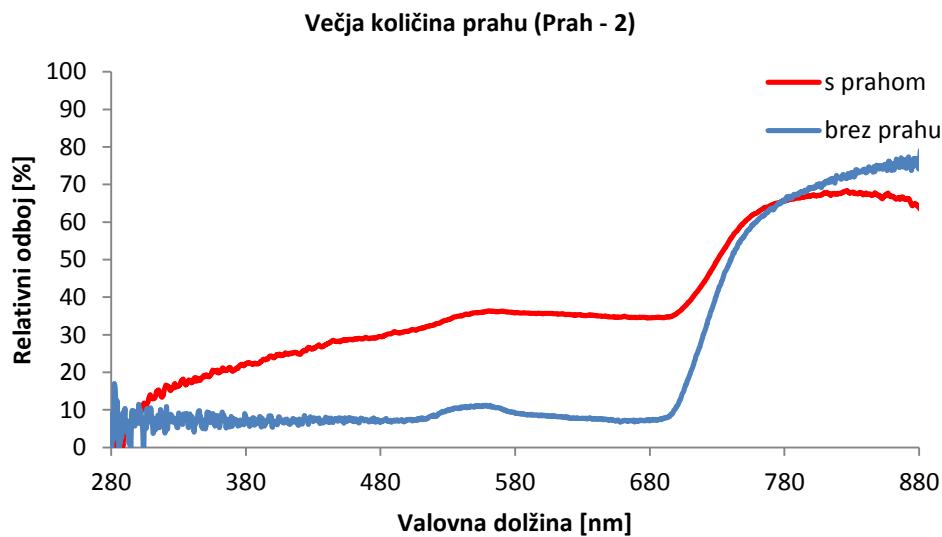
Lokacijo z manjšo koncentracijo prahu (Prah – 1) smo obremenili z nanosom prahu ( $2.83 \pm 1.79 \text{ mg/cm}^2$ ) ter dokazali pozitivno korelacijo med količino prahu in odbojnostjo v celotnem delu spektra. Izjema je le območje NIR, kjer korelacije nismo mogli potrditi.



Slika 38: Spektri povprečnih vrednosti relativnega odboja od zgornje površine listov bukve s prahom in opranih listov brez prahu pri listih z manjo količino prahu (Prah – 1) avgusta 2015  
 Prikazan je odboj listov s prahom (rdeča) in opranih listov brez prahu (modra). Podatki so povprečja 5-nm intervalov ( $n = 16$ ).

*Figure 38: The spectra of the average value of the relative reflection from adaxial beech leaf surface dusted with smaller concentration of dust particles in August 2015. The reflection of the leaves with dust and the dust-free leaves is presented; red line-dusted leaves, blue line-washed leaves. The data are in the average of 5-nm intervals ( $n = 16$ ).*

Lokacijo z največjo koncentracijo prahu (Prah – 2) smo obremenili z nanosom prahu ( $8,98 \pm 4,05 \text{ mg/cm}^2$ ) ter dokazali pozitivno korelacijo med količino prahu in odbojnostjo v celotnem spektru. Izjema je le območje NIR, kjer korelacije nismo mogli potrditi.

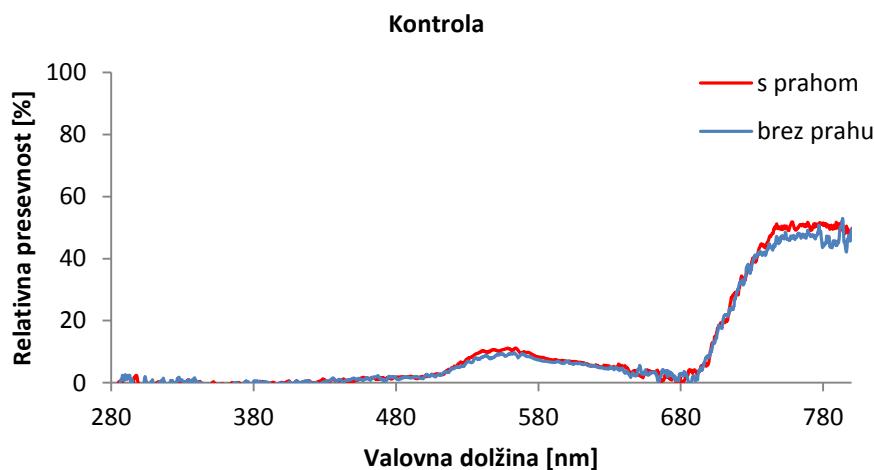


Slika 39: Spektri povprečnih vrednosti relativnega odboja od zgornje površine listov bukve s prahom in opranih listov brez prahu pri listih z večjo količino prahu (Prah – 2) avgusta 2015  
 Prikazan je odboj listov s prahom (rdeča) in opranih listov brez prahu (modra). Podatki so povprečja 5-nm intervalov ( $n = 16$ ).

*Figure 39: The spectra of the average value of the relative reflection from adaxial beech leaf surface dusted by bigger concentration of dust particles in August 2015. The reflection of the leaves with dust and*

*dust-free leaves is presented; red line-dusted leaves, blue line- washed leaves. The data are in the average of 5-nm intervals (n = 16).*

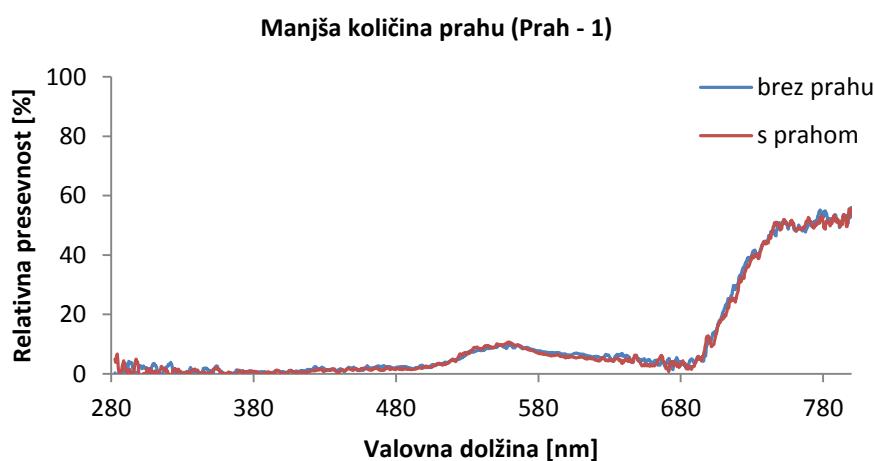
Na referenčni lokaciji (kontrola) in lokaciji z manjšo koncentracijo prahu (Prah – 1) kaže količina prahu močno korelacijo s skoraj vsemi deli spektra presevnosti (Slika 40 in Slika 41), izjema sta le vijoličasti del spektra, kjer je korelacija nekoliko šibkejša, ter UV-del spektra, kjer je nismo mogli potrditi. V vseh primerih je korelacija negativna, kar pomeni, da se z večanjem količine prahu presevnost zmanjšuje, povezava pa je najbolj izražena v zelenem, rumenem ter NIR-delu spektra.



Slika 40: Spektri povprečnih vrednosti relativne presevnosti skozi liste bukve pri listih s prahom in opranih listih brez prahu na kontrolnih vzorcih avgusta 2015

Prikazana je presevnost listov s prahom (rdeča) in opranih listov brez prahu (modra). Podatki so povprečja 5-nm intervalov (n = 16).

*Figure 40: The spectra of the average values of the relative transmittance through the leaves of the control samples in August 2015. The transmittance of the leaves with dust (red), the washed leaves and the dust-free leaves (blue) is presented. The data are in the average of 5-nm intervals (n = 16).*

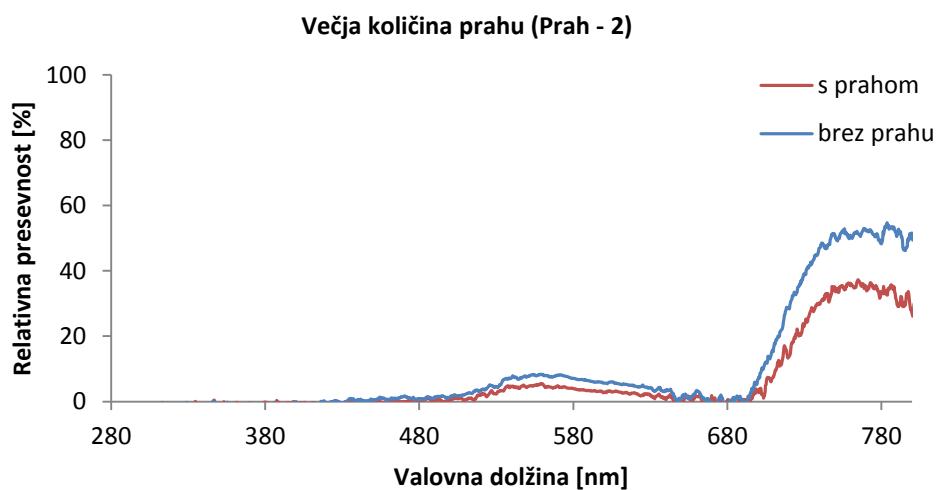


Slika 41: Spektri povprečnih vrednosti relativne presevnosti skozi liste bukve pri listih s prahom in opranih listih brez prahu na vzorcih z manjšo količino prahu (Prah – 1) avgusta 2015

Prikazana je presevnost listov s prahom (rdeča) in opranih listov brez prahu (modra). Podatki so povprečja 5-nm intervalov (n = 16).

*Figure 41: The spectra of the average values of the relative transmittance through the leaves by small dust particles concentration samples. The transmittance of the leaves with dust (red), the washed leaves and the dust-free leaves (blue) is presented. The data are in the average of 5-nm intervals (n = 16).*

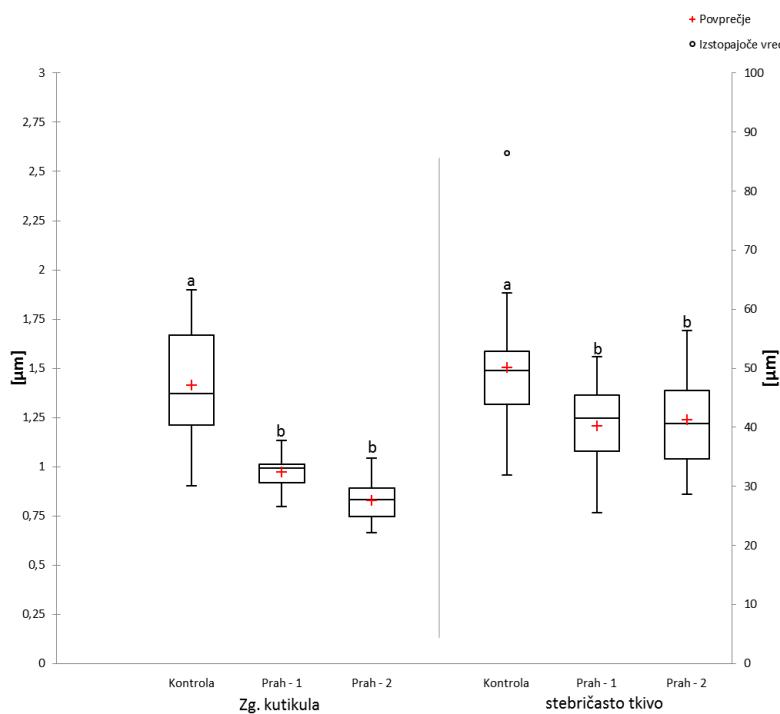
Na lokaciji z največjo koncentracijo prahu (Prah – 2) kaže količina prahu močno korelacijo s skoraj vsemi deli spektra presevnosti (Slika 42), izjema sta le vijoličasti del spektra, kjer je korelacija nekoliko šibkejša, ter UV-del spektra, kjer je nismo mogli potrditi. V vseh primerih je korelacija negativna, kar pomeni, da se z večanjem količine prahu presevnost zmanjšuje, povezava pa je najbolj izražena v zelenem, rumenem ter NIR-delu spektra.



Slika 42: Spektri povprečnih vrednosti relativne presevnosti skozi liste bukve pri listih s prahom in opranih listih brez prahu na vzorcih z večjo količino prahu (Prah – 2) avgusta 2015  
Prikazana je presevnost listov s prahom (rdeča) in opranih listov brez prahu (modra). Podatki so povprečja 5-nm intervalov (n = 16).

*Figure 42: The spectra of the average values of the relative transmittance through the beach leaves dusted by bigger dust concentration, sampled in August 2015. The transmittance of the leaves with dust (red), the washed leaves and the dust-free leaves (blue) is presented. The data are in the average of 5-nm intervals (n = 16).*

#### 4.3.3 Anatomija lista

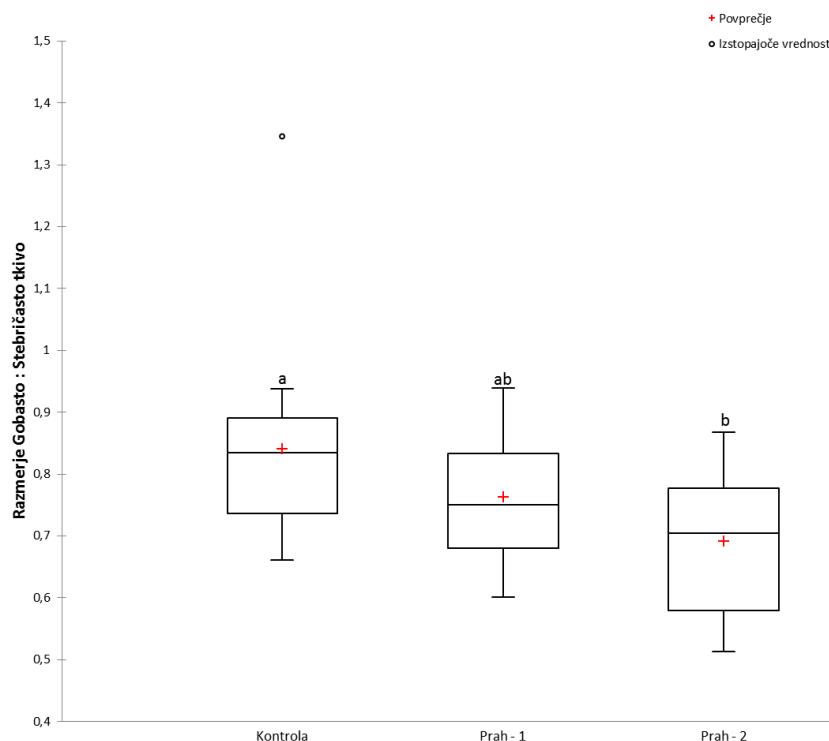


Slika 43: Razlike v debelini zgornje kutikule in stebričastega tkiva med posameznimi obravnavami pri listih navadne bukve s prahom avgusta 2015

Kvantilni diagrami prikazujejo mediane, okvire, kjer je 50 % vseh vrednosti, ter ročaje z neizstopajočimi podatki. Obravnave za posamezni parameter, ki si ne delijo iste črke, so med seboj statistično značilno različne ( $p \leq 0,05$ ; ANOVA in post-hoc Tukey test za zgornjo kutikulo ter Kruskal-Wallisova ANOVA in Dunnov test mnogoterih primerjav za stebričasto tkivo). Obravnave: Kontrola – listi brez dodatnega nanosa prahu kot referenčni listi; Prah – 1 – listi z nanosom manjše koncentracije prahu; Prah – 2 – listi z nanosom večje koncentracije prahu.

*Figure 43: The differences of the adaxial cuticle thickness and the thickness of palisade parenchyma among different concentrations treatments in August 2015. The quantile diagrams show the medians, the frames presenting 50 % of the total data and the handles with non-rising data. The readings that do not share the same letters are statistically significantly different ( $p \leq 0,05$ ; ANOVA and post-hoc Tukey test).*

Debelina zgornje in spodnje kutikule je največja pri kontrolnih vzorcih (rastline brez dodanega prahu) in se statistično značilno razlikuje od obeh obravnav s prahom (Prah – 1 in Prah – 2) ( $p < 0,001$  za obe primerjavi, velja tako za zgornjo kot spodnjo kutikulo; ANOVA in post-hoc Tukey test za zgornjo ter Kruskal-Wallisova ANOVA in Dunnov test mnogoterih primerjav za spodnjo kutikulo). Enako velja za stebričasto tkivo ( $p = 0,008$  oz.  $p = 0,03$ ; Kruskal-Wallisova ANOVA in Dunnov test mnogoterih primerjav). Med obravnavama s prahom (Prah – 1 in Prah – 2) ni pri nobenem od omenjenih parametrov statistično značilnih razlik (Slika 43; Preglednica 14).

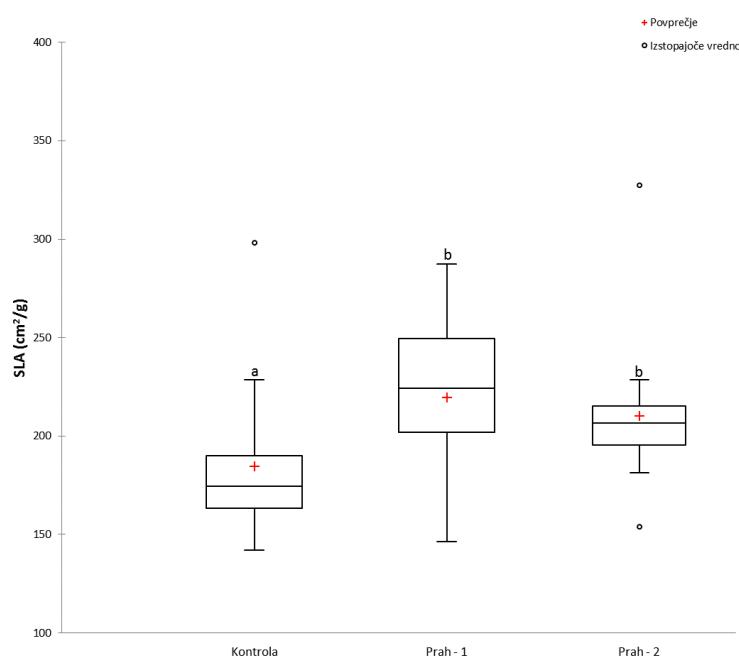


Slika 44: Razlike v razmerju med gobastim in stebričastim tkivom vzorcev bukve med posameznimi obravnavami avgusta 2015

Kvantilni diagrami prikazujejo mediane, okvire, kjer je 50 % vseh vrednosti, ter ročaje z neizstopajočimi podatki. Obravnave, ki si ne delijo iste črke, so med seboj statistično značilno različne ( $p \leq 0,05$ ; Kruskal-Wallisova ANOVA in Dunnov test mnogoterih primerjav).

*Figure 44: The differences of the spongy/palisade parenchyma ratio among different dust concentration treatments. The quantile diagrams show the medians, the frames presenting 50 % of the total data and the handles with non-rising data. The readings that do not share the same letters are statistically significantly different ( $p \leq 0,05$ ; Kruskal-Wallis and Dunn's post-hoc test).*

Razmerje med gobastim in stebričastim tkivom se zmanjšuje od kontrole proti listom z največ prahu, kar pomeni, da je pri listih z največ prahu relativno manj gobastega tkiva v odnosu na stebričasto tkivo. Razlika med kontrolo in obravnavo Prah – 2 je statistično značilno različna ( $p = 0,008$ ; Kruskal-Wallisova ANOVA in Dunnov test mnogoterih primerjav). Med ostalimi obravnavami ni statistično značilnih razlik (Slika 44; Preglednica 14).

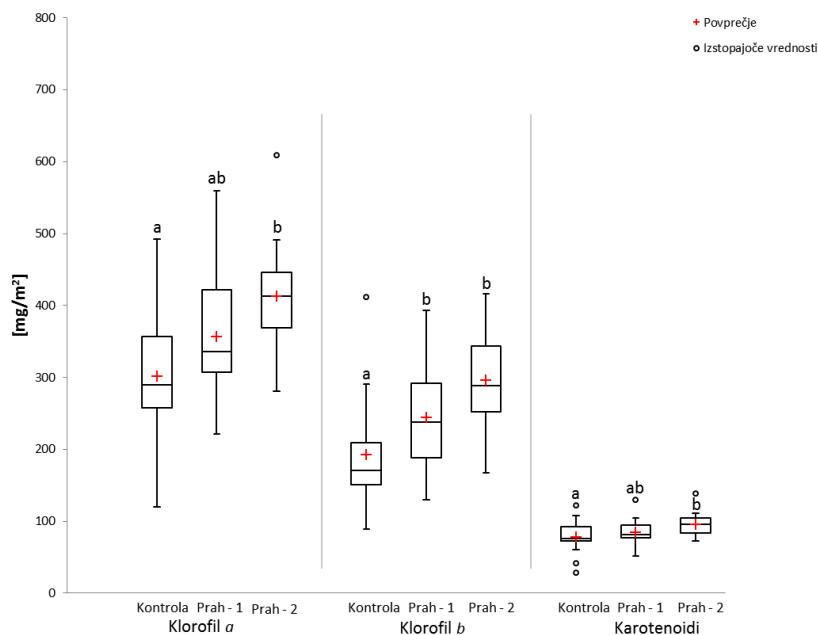


Slika 45: Razlike v specifični listni površini med posameznimi obravnavami bukve avgusta 2015  
Kvantilni diagrami prikazujejo mediane, okvire, kjer je 50 % vseh vrednosti, ter ročaje z neizstopajočimi podatki. Obravnave, ki si ne delijo iste črke, so med seboj statistično značilno različne ( $p \leq 0,05$ ; Kruskal-Wallisova ANOVA in Dunnov test mnogoterih primerjav).

*Figure 45: The differences of the specific leaf area among different dust concentration treatments. The quantile diagrams show the medians, the frames presenting 50 % of the total data and the handles with non-rising data. The readings that do not share the same letters are statistically significantly different ( $p \leq 0.05$ ; Kruskal-Wallis and Dunn's post-hoc test).*

Specifična listna površina (SLA) je najmanjša pri kontroli, ki je imela tudi najdebelejše liste. Med kontrolo in obema obravnavama s prahom (Prah – 1 in Prah – 2) je statistično značilna razlika ( $p = 0,017$  oz.  $p = 0,038$ ; Kruskal-Wallisova ANOVA in Dunnov test mnogoterih primerjav) (Slika 45; Preglednica 14).

#### 4.3.4 Biokemijske lastnosti

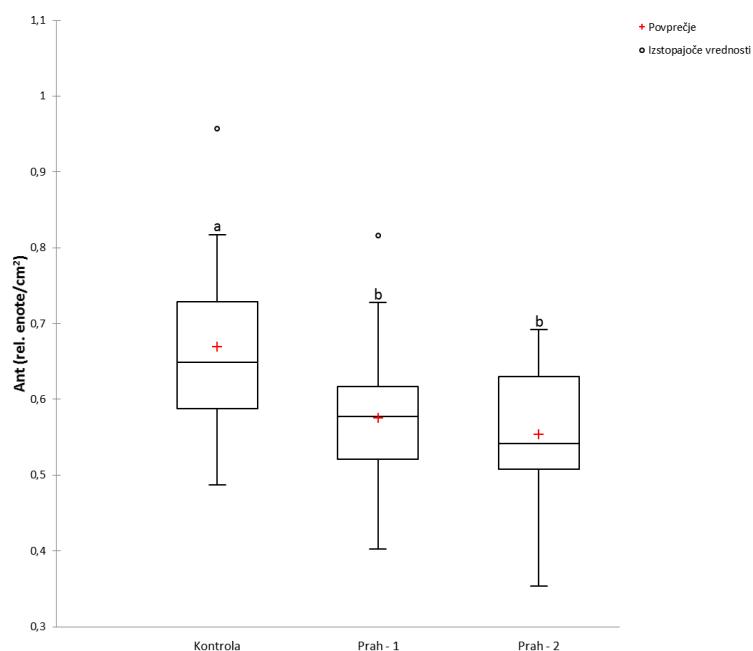


Slika 46: Razlike v vsebnosti klorofilov in karotenoidov med posameznimi obravnavami vzorcev bukev avgusta 2015

Kvantilni diagrami prikazujejo mediane, okvire, kjer je 50 % vseh vrednosti, ter ročaje z neizstopajočimi podatki. Obravnave za posamezni parameter, ki si ne delijo iste črke, so med seboj statistično značilno različne ( $p \leq 0,05$ ; ANOVA in post-hoc Tukey test za KI a in karotenoide ter Kruskal-Wallisova ANOVA in Dunnov test mnogoterih primerjav za KI b).

*Figure 46: The differences in chlorophylls and carotenoids content of beech leaves from different dust concentration treatments in August 2015. The quantile diagrams show the medians, the frames presenting 50 % of the total data and the handles with non-rising data. The readings that do not share the same letters are statistically significantly different ( $p \leq 0,05$ );*

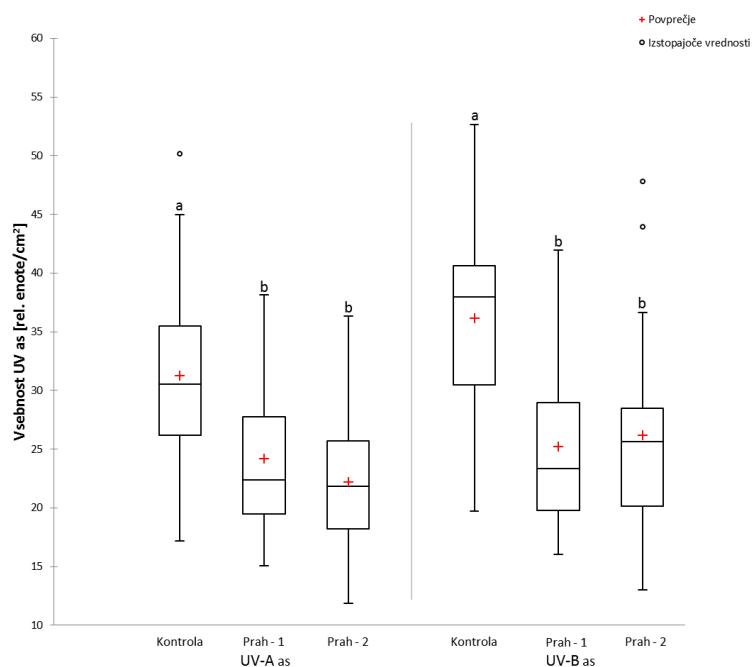
Vsebnost klorofila a in karotenoidov se statistično značilno razlikuje med kontrolo ter obravnavo Prah – 2 ( $p = 0,002$  oz.  $p = 0,044$ ; ANOVA in post-hoc Tukey test) in je večja pri listih s prahom. Med ostalimi obravnavami ni statistično značilnih razlik. Vsebnost klorofila b je statistično značilno različna med kontrolo in drugima dvema obravnavama (Prah – 1 in Prah – 2) ( $p = 0,044$  oz.  $p \leq 0,001$ ; Kruskal-Wallisova ANOVA in Dunnov test mnogoterih primerjav) in je večja pri obeh obravnavah s prahom. Med obravnavama Prah – 1 in Prah – 2 ni statistično značilne razlike (Slika 46; Preglednica 14).



Slika 47: Razlike v vsebnosti antocianov med posameznimi obravnavami vzorcev bukve avgusta 2015  
Kvantilni diagrami prikazujejo mediane, okvire, kjer je 50 % vseh vrednosti, ter ročaje z neizstopajočimi podatki. Obravnave, ki si ne delijo iste črke, so med seboj statistično značilno različne ( $p \leq 0,05$ ; ANOVA in post-hoc Tukey test).

*Figure 47: The differences in anthocyan content among different dust concentration treatments in August 2015. The quantile diagrams show the medians, the frames presenting 50 % of the total data and the handles with non-rising data. The readings that do not share the same letters are statistically significantly different ( $p \leq 0,05$ ; ANOVA and post-hoc Tukey test).*

Vsebnost antocianov je statistično značilno različna med kontrolo in drugima dvema obravnavama (Prah – 1 in Prah – 2) ( $p = 0,031$  oz.  $p = 0,007$ ; ANOVA in post-hoc Tukey test) in je največja pri kontroli (Slika 47; Preglednica 14).



Slika 48: Razlike v vsebnosti UV-A- in UV-B-absorbirajočih snovi med posameznimi obravnavami vzorcev bukev avgusta 2015

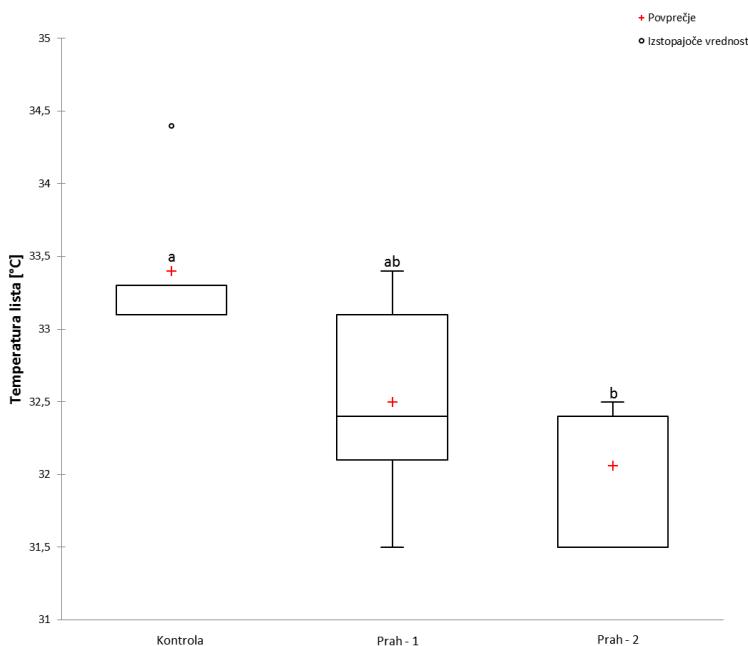
Kvantilni diagrami prikazujejo mediane, okvire, kjer je 50 % vseh vrednosti, ter ročaje z neizstopajočimi podatki. Obravnave za posamezni parameter, ki si ne delijo iste črke, so med seboj statistično značilno različne ( $p \leq 0,05$ ; ANOVA in post-hoc Tukey test za UV-A ter Kruskal-Wallisova ANOVA in Dunnov test mnogoterih primerjav za UV-B absorbirajoče snovi).

*Figure 48: The differences in the UV-A and UV-B absorbing substances content of beech leaves from different dust concentration treatments in August 2015. The quantile diagrams show the medians, the frames presenting 50 % of the total data and the handles with non-rising data. The readings that do not share the same letters are statistically significantly different ( $p \leq 0.05$ ).*

Vsebnosti UV-A- in UV-B-absorbirajočih snovi so največje pri kontroli in so statistično različne od vsebnosti pri obeh obravnavah s prahom (Prah – 1 in Prah – 2) ( $p = 0,030$  oz.  $0,004$ ; ANOVA in post-hoc Tukey test, za UV-A-as in  $p = 0,004$  oz.  $p = 0,014$ ; Kruskal-Wallisova ANOVA in Dunnov test mnogoterih primerjav, za UV-B-as). Statistično značilnih razlik med obravnavama Prah – 1 in Prah – 2 ni (Slika 48; Preglednica 14).

#### 4.3.5 Fiziološke lastnosti

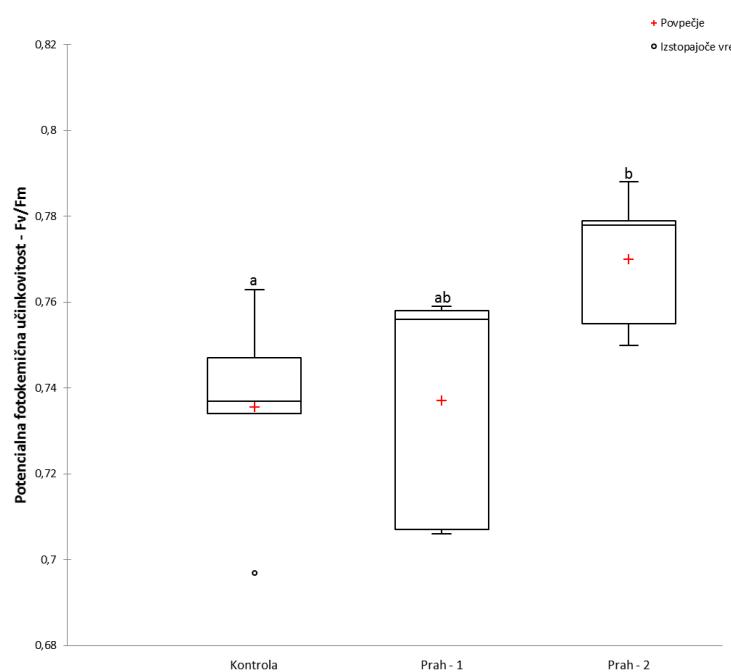
Fiziološke meritve smo opravili ob sončnem vremenu v opoldanskem času, ko je bila vrednost fotosinteznega aktivnega spektra sevanja med 1700 in 2000  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ , sončnega sevanja 723–868  $\text{Wm}^{-2}$ , relativne zračne vlažnosti 40–65 % in temperature zraka 27,1–30,4 °C.



Slika 49: Razlike v temperaturi bukovih listov med posameznimi obravnavami avgusta 2015  
Kvantilni diagrami prikazujejo mediane, okvire, kjer je 50 % vseh vrednosti, ter ročaje z neizstopajočimi podatki. Obravnave, ki si ne delijo iste črke, so med seboj statistično značilno različne ( $p \leq 0,05$ ; Kruskal-Wallisova ANOVA in Dunnov test mnogoterih primerjav)(n=48).

Figure 49: The differences of the leaf temperature among different dust concentration treatments. The quantile diagrams show the medians, the frames presenting 50 % of the total data and the handles with non-rising data. The readings that do not share the same letters are statistically significantly different ( $p \leq 0.05$ ).

Najnižja temperatura je bila izmerjena pri listih z največ prahu (Prah – 2) in je bila statistično različna od temperature listov pri kontroli ( $p = 0,011$ ; Kruskal-Wallisova ANOVA in Dunnov test mnogoterih primerjav). Med ostalimi obravnavami ni bilo statistično značilnih razlik (Slika 49; Preglednica 14). Vzrok nižjih temperatur listov, obremenjenih s prahom, je možno iskati v povečanem spektralnem odboju (albedo) zaradi prahu belo sive barve, ki ščiti liste pred povečanim sončnim sevanjem.



Slika 50: Razlike v potencialni fotokemični učinkovitosti ( $Fm/Fv$ ) med posameznimi obravnavami vzorcev bukev avgusta 2015

Kvantilni diagrami prikazujejo mediane, okvire, kjer je 50 % vseh vrednosti, ter ročaje z neizstopajočimi podatki. Obravnave, ki si ne delijo iste črke, so med seboj statistično značilno različne ( $p \leq 0,05$ ; ANOVA in post-hoc Tukey test).

*Figure 50: The differences in the potential photochemical efficiency ( $Fm/Fv$ ) of beech leaves from different dust concentration treatments in August 2015. The quantile diagrams show the medians, the frames presenting 50 % of the total data and the handles with non-rising data. The readings that do not share the same letters are statistically significantly different ( $p \leq 0,05$ ).*

Potencialna fotokemična učinkovitost je bila največja pri listih z največ prahu (Prah – 2) in je statistično značilno različna od potencialne fotokemične učinkovitosti pri kontroli ( $p = 0,037$ ; ANOVA in post-hoc Tukey test). Med ostalimi obravnavami ni bilo statistično značilnih razlik (Slika 50; Preglednica 14).

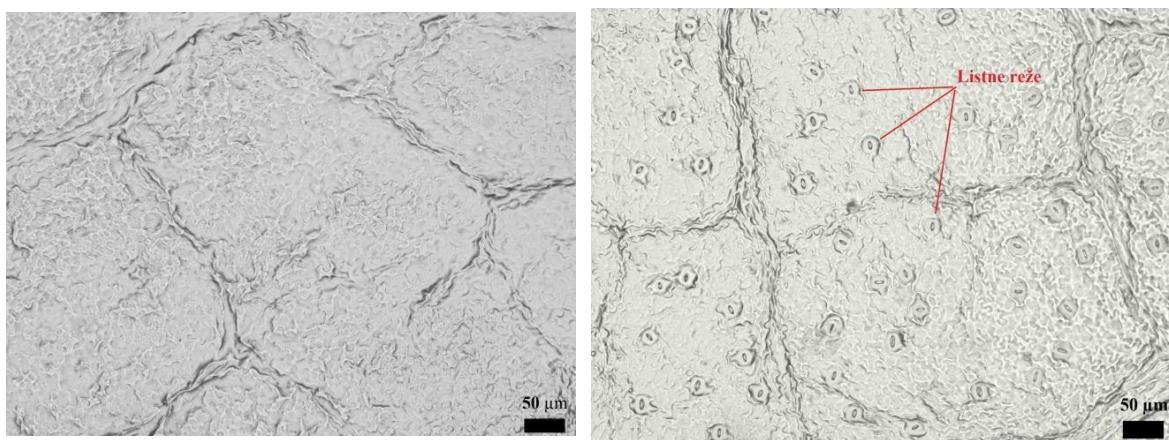
Preglednica 14: Anatomski, biokemijski in fiziološki parametri bukovih listov med posameznimi obravnavami avgusta 2015

Vrednosti so povprečja  $\pm$  SD. Obravnave, ki si ne delijo iste črke, so med seboj statistično značilno različne ( $p \leq 0,05$ ; ANOVA in post-hoc Tukey test ob normalni razporeditvi podatkov ter Kruskal-Wallisova ANOVA in Dunnov test mnogoterih primerjav ob nenormalni razporeditvi;  $n = 16$  oz.  $n = 5$  pri fizioloških parametrih).

*Table 14: The anatomical, biochemical and physiological parameters of beech leaves from different dust concentrations treatments in August 2015. The data are shown as mean values  $\pm$  SD. The readings that do not share the same letters are statistically significantly different ( $p \leq 0,05$ ; ANOVA and post-hoc Tukey test for a normal distribution of data; Kruskal-Wallis and Dunn's post-hoc test for non-normal distribution of data,  $n = 16$ ;  $n = 5$  for physiological parameters).*

Značilnosti listov	KONTROLA	PRAH – 1	PRAH – 2
<b>Anatomski parametri</b>			
Debelina zg. kutikule ( $\mu\text{m}$ )	$1,42 \pm 0,28^{\text{a}}$	$0,97 \pm 0,09^{\text{b}}$	$0,83 \pm 0,10^{\text{b}}$
Debelina zg. povrhnjice ( $\mu\text{m}$ )	$12,83 \pm 3,38$	$11,10 \pm 2,27$	$12,44 \pm 2,80$
Debelina stebričastega tkiva ( $\mu\text{m}$ )	$50,11 \pm 12,52^{\text{a}}$	$40,22 \pm 7,60^{\text{b}}$	$41,30 \pm 8,18^{\text{b}}$
Debelina gobastega tkiva ( $\mu\text{m}$ )	$60,25 \pm 13,18$	$53,04 \pm 9,75$	$61,43 \pm 16,84$
Debelina sp. povrhnjice ( $\mu\text{m}$ )	$8,28 \pm 1,35$	$8,43 \pm 1,07$	$9,09 \pm 1,55$
Debelina sp. kutikule ( $\mu\text{m}$ )	$0,78 \pm 0,12^{\text{a}}$	$0,60 \pm 0,09^{\text{b}}$	$0,56 \pm 0,09^{\text{b}}$
Debelina lista ( $\mu\text{m}$ )	$135,44 \pm 30,19^{\text{a}}$	$113,76 \pm 16,98^{\text{b}}$	$126,38 \pm 25,45^{\text{a}}$
Razmerje gobasto : stebričasto tkivo	$0,84 \pm 0,16^{\text{a}}$	$0,76 \pm 0,10^{\text{b}}$	$0,69 \pm 0,12^{\text{b}}$
SLA ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	$184,70 \pm 38,03^{\text{a}}$	$219,48 \pm 38,38^{\text{b}}$	$195,22 \pm 70,36^{\text{b}}$
Gostota listnih rež (reža/ $\text{cm}^2$ )	$265,74 \pm 84,96$	$268,95 \pm 98,64$	$266,95 \pm 153,37$
<b>Biokemijski parametri</b>			
Klorofil a ( $\text{mg}/\text{m}^2$ )	$301,96 \pm 87,58^{\text{a}}$	$357,13 \pm 86,41^{\text{ab}}$	$412,88 \pm 78,72^{\text{b}}$
Klorofil b ( $\text{mg}/\text{m}^2$ )	$192,76 \pm 76,47^{\text{a}}$	$244,77 \pm 78,43^{\text{b}}$	$295,98 \pm 62,98^{\text{b}}$
Karotenoidi ( $\text{mg}/\text{m}^2$ )	$78,42 \pm 22,99^{\text{a}}$	$84,95 \pm 18,86^{\text{ab}}$	$95,87 \pm 17,57^{\text{b}}$
Antociani (rel. enote/ $\text{cm}^2$ )	$0,67 \pm 0,11^{\text{a}}$	$0,58 \pm 0,11^{\text{b}}$	$0,55 \pm 0,09^{\text{b}}$
UV-A-as (rel. enote/ $\text{cm}^2$ )	$31,28 \pm 8,66^{\text{a}}$	$24,19 \pm 7,00^{\text{b}}$	$22,19 \pm 6,94^{\text{b}}$
UV-B-as (rel. enote/ $\text{cm}^2$ )	$36,16 \pm 9,19^{\text{a}}$	$25,23 \pm 7,78^{\text{b}}$	$26,19 \pm 9,89^{\text{b}}$
<b>Fiziološki parametri</b>			
Vodni potencial ( $\text{MPa}$ )	$-1,99 \pm 0,20$	$-2,16 \pm 0,17$	$-1,87 \pm 0,19$
Jakost transpiracije ( $\text{mmol H}_2\text{O}/\text{m}^2\text{s}$ )	$200,38 \pm 45,57$	$206,40 \pm 47,37$	$201,20 \pm 24,33$
Temperatura lista ( $^{\circ}\text{C}$ )	$33,40 \pm 0,57^{\text{a}}$	$32,50 \pm 0,76^{\text{ab}}$	$32,06 \pm 0,51^{\text{b}}$
Dejanska fotokem. učinkovitost – Y	$0,22 \pm 0,05$	$0,18 \pm 0,08$	$0,28 \pm 0,05$
Potencialna fotokem. učinkovitost – Fv/Fm	$0,74 \pm 0,02^{\text{a}}$	$0,74 \pm 0,03^{\text{ab}}$	$0,77 \pm 0,02^{\text{b}}$
<b>Prah</b>			
Masa prahu ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ )	$0,08 \pm 0,04^{\text{a}}$	$2,83 \pm 1,79^{\text{b}}$	$8,98 \pm 4,05^{\text{c}}$
as – absorbirajoče snovi			

Na zgornji povrhnjici lista pri meritvah nismo opazili prisotnosti listnih rež, na spodnji povrhnjici pa v številu listnih rež ni bilo statistično značilnih razlik. Prav tako nismo opazili listnih rež, zamašenih s prahom (Sliki 11 in 51). Vzrok za zamašitev listnih rež bi bila prisotnost finega prahu na spodnjem delu lista v času, ko so listne reže odprte.



Slika 51: Posnetek odtisa zgornje in spodnje povrhnjice listov navadne bukve z vidnimi listnimi režami avgusta 2015, kjer na zgornji povrhnjici ne opazimo listnih rez (levo), in posnetek odtisa spodnje povrhnjice z vidnimi listnimi režami (desno); oboje pod desetkratno povečavo.

*Figure 51: A snapshot of the adaxial and abaxial epidermis footprint on the leaves of common beech in August 2015, where no leaf stomata was found (left, adaxial epidermis) and the footprint of the abaxial epidermis with visible leaf stomata under tenfold magnification (right).*

#### 4.3.6 Povezanost med parametri

##### 4.3.6.1 Korelacije med količino prahu in biokemijskimi, anatomskimi ter fiziološkimi lastnostmi

Preglednica 15: Korelacije med količino prahu in biokemijskimi, anatomskimi ter fiziološkimi parametri navadne bukve avgusta 2015 – Spearmanov korelacijski koeficient ( $r$ )  
 $((r); * p \leq 0,05; ** p \leq 0,01; n = 48$  oz.  $n = 15$  pri fizioloških parametrih).

*Table 15: The correlations among the amount of dust and the biochemical, anatomical and physiological parameters in August 2015 (Spearman correlation coefficient ( $r$ ); \*  $p \leq 0.05$ ; \*\*  $p \leq 0.01$ ;  $n = 48$  and  $n = 15$  for physiological parameters).*

Parametri listov	Prah
<b>Biokemijski parametri</b>	
klorofil a	0.428**
klorofil b	0.489**
antociani	-0.510**
UV-A-as	-0.401**
UV-B-as	-0.327*
<b>Anatomski parametri</b>	
zg. kutikula	-0.829**
sp. kutikula	-0.687**
stebričasto : gobasto tkivo	-0.333*
<b>Fiziološki parametri</b>	
temperatura	-0,566*

as – absorbirajoče snovi

Večina biokemijskih parametrov kaže močno statistično značilno korelacijo s količino prahu. Medtem ko so fotosintezni pigmenti v pozitivni korelaciiji s količino prahu in dosežejo največjo koncentracijo pri listih z največ prahu, so antociani ter UV-absorbirajoče snovi v negativni korelaciiji s količino prahu in dosežejo največjo koncentracijo pri listih z najmanj prahu (kontrola) (Sliki 47 in 48; Preglednica 15).

Anatomski parametri, ki kažejo statistično značilne korelacije s količino prahu, so obe kutikuli ter razmerje med gobastim in stebričastim tkivom. S povečevanjem količine prahu se zmanjšuje debelina obeh kutikul, obenem pa debelina gobastega tkiva vse bolj prevladuje nad stebričastim tkivom, ki ga je relativno manj pri listih z največ prahu (Prah – 2) (Slika 44; Preglednica 15).

Od fizioloških parametrov kaže korelacijo s prahom le temperatura lista, ki se zmanjšuje s povečevanjem količine prahu in je najnižja pri listih z največ prahu (Prah – 2) (Slika 49; Preglednica 15).

#### 4.3.6.2 Korelacje med količino prahu ter optičnimi lastnostmi lista

Preglednica 16: Korelacje med količino prahu ter presevnostjo in odbojem v različnih delih spektra avgusta 2015 – Spearmanov korelacijski koeficient ( $r$ )

(r) \*  $p \leq 0,05$ ; \*\*  $p \leq 0,01$ ; n = 48

Table 16: The correlations between the amount of dust and the reflectance in different parts of the spectra (Spearman correlation coefficient (r) \*  $p \leq 0,05$ ; \*\*  $p \leq 0,01$ ; n = 48).

	<b>Spektri</b>	<b>Prah</b>
PRESEVNOST	UV-B	-0,087
	UV-A	-0,107
	vijoličasta	-0,325*
	modra	-0,513**
	zelena	-0,637**
	rumena	-0,671**
	rdeča	-0,409**
ODBOJNOST	NIR	-0,667**
	UV-B	0,544**
	UV-A	0,698**
	vijoličasta	0,894**
	modra	0,920**
	zelena	0,875**
	rumena	0,876**
	rdeča	0,902**
	NIR	0,092

Količina prahu kaže močno korelacijo s skoraj vsemi deli spektra presevnosti, izjema sta le vijoličasti del spektra, kjer je korelacija nekoliko šibkejša, ter UV-del spektra, kjer je

nismo mogli potrditi. V vseh primerih je korelacija negativna, kar pomeni, da se z večanjem količine prahu presevnost zmanjšuje, povezava pa je najbolj izražena v zelenem, rumenem ter NIR-delu spektra.

Korelacija z odbojnimi spektri je močno statistično značilna za vse dele spektra, izjema je le območje NIR, kjer je nismo mogli potrditi. V vseh primerih je korelacija pozitivna, kar pomeni, da se z večanjem količine prahu veča tudi odboj, povezava pa je najbolj izražena v modrem in rdečem delu spektra, nekoliko šibkejša je v vijoličastem, rumenem in zelenem ter najšibkejša v območju UV (Preglednica 17).

Preglednica 17: Korelacije med biokemijskimi in anatomsksimi lastnostmi ter presevnostjo in odbojem v različnih delih spektra pri opranih listih avgusta 2015 – Spearmanov korelačijski koeficient (r)  
(r) \*  $p \leq 0,05$ ; \*\*  $p \leq 0,01$ ; n = 48

*Table 17: The correlations among the biochemical and anatomical characteristics and the reflection-transmittance in different parts of the spectra from the dust-free beach leaves in August 2015 (Spearman correlation coefficient (r) \*  $p \leq 0,05$ ; \*\*  $p \leq 0,01$ ; n = 48).*

	kl a	kl b	kar	ant	SLA	zg. kutikula	zg. povrhnjica	gobast. tkivo	sp. kutikula	debelina lista
PRESEVNOST										
UV-B										
UV-A										
vijoličasta										
modra							0,30*	0,31*		
zelena	-0,50**	-0,30*	-0,51**	-0,40**			0,35*	0,31*		
rumena	-0,55**	-0,32*	-0,55**	-0,42**			0,32*			
rdeča										
NIR							0,32*			
ODBOJNOST										
UV-B					0,38**				-0,29*	
UV-A					0,45**		-0,34*	-0,31*		-0,41**
vijoličasta					0,40**					
modra	-0,39**	-0,32*	-0,36*					0,36*		
zelena	-0,54**	-0,40**	-0,44**			0,34*		0,58**		
rumena	-0,58**	-0,45**	-0,44**			0,38**		0,58**		
rdeča	-0,54**	-0,46**	-0,42**			0,34*		0,54**		
NIR									0,37**	

Biokemijski parametri, ki kažejo statistično značilno korelacijsko s presevnostjo, sta klorofila *a* in *b*, karotenoidi in antociani. V negativni korelaciji so le v zelenem in rumenem delu spektra. To pomeni, da se z večanjem koncentracije teh pigmentov presevnost v omenjenih delih spektra zmanjšuje.

Izmed anatomskih parametrov kaže sta statistično značilno korelacijsko s presevnostjo debelina zgornje povrhnjice in debelina gobastega tkiva. Zgornja povrhnjica je v pozitivni korelaciji s presevnostjo v modrem, zelenem in rumenem delu spektra, gostota gobastega tkiva pa v pozitivni korelaciji s presevnostjo v modrem, zelenem in NIR-delu spektra – presevnost v teh delih spektra narašča z večanjem debeline lista.

Biokemijski parametri, ki kažejo statistično značilno korelacijsko s odbojnimi spektri, sta klorofila *a* in *b* ter karotenoidi. Vse korelacije so negativne z odbojnostjo v modrem, zelenem, rumenem in rdečem delu spektra. Odboj se v omenjenih delih spektra z večanjem koncentracije pigmentov zmanjšuje.

Izmed anatomskih parametrov kažejo statistično značilno korelacijsko s odbojnimi spektri SLA, debelina zgornje in spodnje kutikule, zgornja povrhnjica, debelina gobastega tkiva in debelina lista. SLA je v pozitivni korelaciji z odbojnostjo v UV- in vijoličastem delu spektra. Debelina zgornje in spodnje kutikule je v pozitivni korelaciji z odbojnostjo v zelenem, rumenem in rdečem delu spektra, spodnja kutikula pa še z odbojnostjo v modrem delu spektra. Zgornja povrhnjica in gobasto tkivo sta v negativni korelaciji z odbojnostjo le v UV-A-delu spektra, debelina lista pa je v negativni korelaciji z odbojnostjo v UV- in NIR-delu spektra, kar pomeni, da večja je debelina lista, manjši je odboj v teh delih spektra (Preglednica 17).

#### 4.3.6.3 Povezanost med lastnostmi listov, prisotnostjo prahu in odbojnimi spektri

Z multivariantno redundantno analizo (RDA) smo preizkušali, kateri parameter značilno vpliva na variabilnost odbojnih spektrov (refleksivnost) in presevnost (transmisivnost). RDA je pokazala, da vpliv prahu vedno signifikantno vpliva na razlaganje odbojnih spektrov. Če se prah pojavlja kot eden izmed parametrov ali le kot kovariabla, je vedno signifikanten. RDA je pokazala, da je prah ultimativen dejavnik za odbojne spekture. Največ variabilnosti odbojnega spektra smo pojasnili s količino prahu (67 %,  $p < 0,01$ ) in debelino zgornje povrhnjice (1 %,  $p < 0,05$ ) in razložili 68 % njihove variabilnosti (Preglednici 18 in 19) med vsemi izmerjenimi morfološkimi in biokemijskimi lastnostmi skupaj (Slika 53). Drugi merjeni parametri niso imeli značilnega vpliva na odbojne spekture. Pozitivna korelacija med odbojnimi spektri, količino prahu ter debelino zgornje povrhnjice nakazuje pomemben vpliv strukture lista (Slika 52).

Preglednica 18: Lastne vrednosti in kumulativni odstotek pojasnjene variance spektrov prvih 4 kanoničnih osi ter korelacijski koeficienti med njimi, avgust 2015

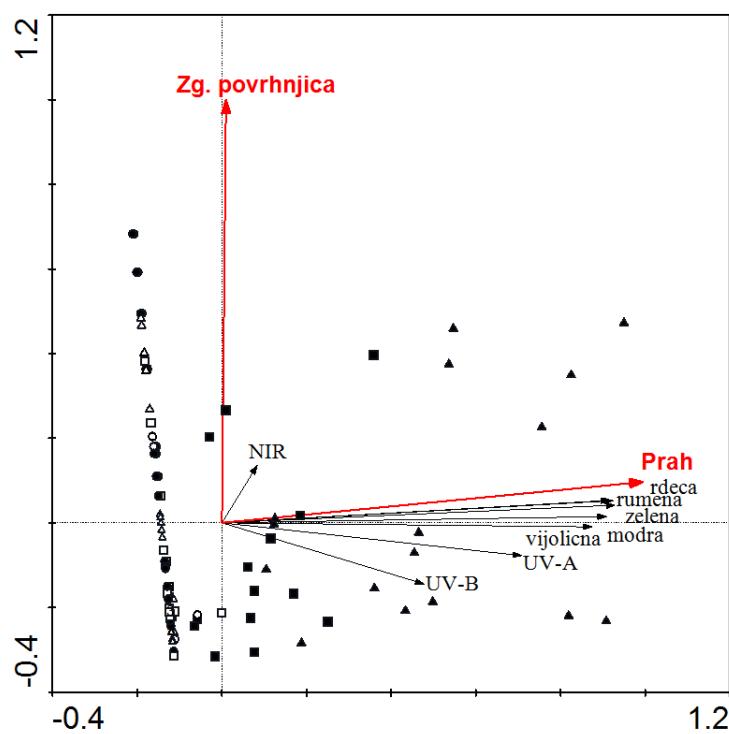
*Table 18: The eigenvalues and cumulative percentage of the explained variance of the spectra of the first four canonical axes and the correlation coefficients among the first four canonical axes I August 2015.*

Osi	1	2	3	4	Skupna varianca
Lastne vrednosti	0,679	0,005	0,250	0,051	1,000
Odnos spektri-lastnosti	0,888	0,215	0,000	0,000	
Kumulativni % variance spektrov	67,9	68,4	93,4	98,5	
Kumulativni % odnosa spektri-lastnosti	99,2	100,0	0,0	0,0	
Vsota vseh lastnih vrednosti					1,000
Vsota vseh kanoničnih lastnih vrednosti					0,684

Preglednica 19: Parametri, ki statistično značilno razložijo variabilnost spektrov in delež pojasnjene variance, avgust 2015

*Table 19: The parameters that significantly explain the variability of the spectra and the proportion of the explained variance*

Parameter	Delež pojasnjene variance (%)	Lambda A	P	F
Prah	67	0,67	0,000	193,11
Zg. povrhnjica	1	0,01	0,047	3,46

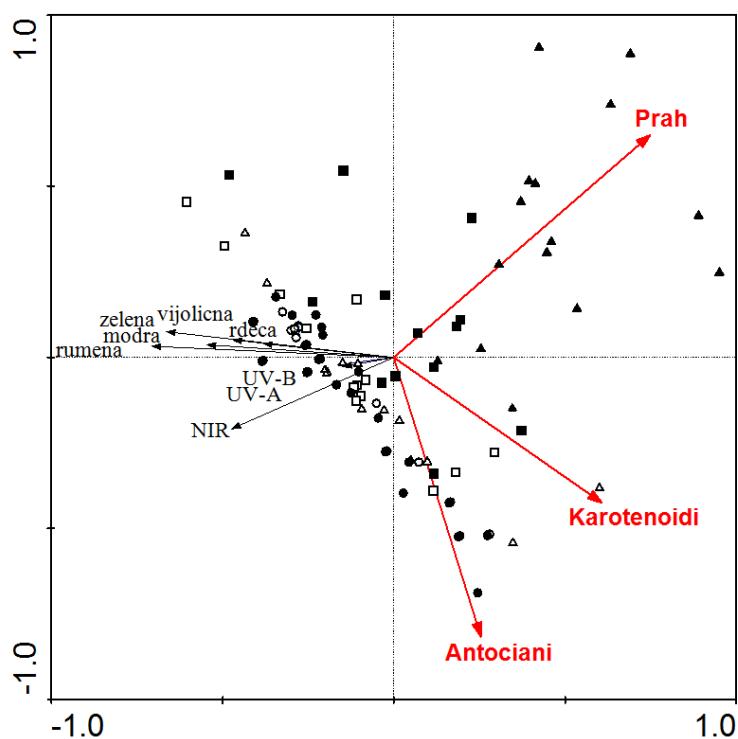


Slika 52: Ordinacijski diagram redundantne analize (RDA) variabilnosti odbojnih spektrov listov bukve, avgust 2015  
RDA prikazuje statistično značilne parametre ( $p < 0,01$ ). Lastne vrednosti prvih 2 osi sta 0,67 in 0,01. Količina prahu na  $\text{cm}^2$  in debelina zgornje povrhnjice.

*Figure 52: The redundancy analysis (RDA) shows the statistically significant parameter ( $p < 0,01$ ), explaining the variability of the reflectance spectra in August 2015. The eigenvalues of the first 2 axes are 0.67 and 0.01. The amount of dust per  $\text{cm}^2$  and adaxial epidermis.*

Ko smo želeli variabilnost spektrov razložiti s fiziološkimi odzivi rastline in količino prahu, nam je RDA pokazala, da fiziološki parametri niso značilno vplivali na spremembe optičnih lastnosti.

RDA-analiza biokemičnih lastnosti v odvisnosti od prahu je razložila skupaj 21 % variabilnosti spektrov. Od značilnih parametrov največji delež razloži prah (12 %,  $p < 0,01$ ), sledijo karotenoidi (6 %,  $p < 0,01$ ) in antociani (3 %,  $p < 0,01$ ) (Preglednica 20). Značilne spremenljivke so med seboj v pozitivni korelaciji (Slika 52). Ordinacijski diagram redundantne analize (RDA) presevnosti prikazuje statistično značilno pozitivne korelacije med biokemičnimi lastnostmi (karotenoidi in antociani) v odvisnosti od prahu (Slika 53).



Slika 53: Ordinacijski diagram redundantne analize (RDA) presevnosti, ki prikazuje statistično značilno pozitivne korelacije med biokemičnimi lastnostmi v odvisnosti od prahu, avgust 2015

*Figure 53: The redundancy analysis (RDA) shows statistically positive correlation of the transmittance spectra between biochemical traits and dust concentrations.*

Preglednica 20: Parametri, ki statistično značilno razložijo variabilnost biokemične lastnosti in delež pojasnjene varianc, avgust 2015

*Table 20: The parameters that statistically prove the variations of biochemical traits and the proportion of explained variance in August 2015.*

Parameter	Delež pojasnjene varianc (%)	Lambda A	P	F
Prah	12	0,12	0,000	12,43
Karotenoidi	6	0,06	0,003	7,08
Antociani	3	0,03	0,024	3,75

## 5 RAZPRAVA

Raziskave, povezane z vplivom prahu na okolje, so v zadnjem desetletju postale pogosteje predvsem zaradi izredno škodljivih vplivih prahu na zdravstveno stanje človeka, živali in rastlin (Barber in sod., 2008, Dales in sod. 2010, Chaturvedi in sod. 2013, Weber in sod. 2015).

V literaturi zasledimo raziskave vpliva prahu na vegetacijo, omejene predvsem na sušna območja (Egipt, Indija, Kitajska, Republika Južna Afrika, ZDA, itd.), kjer je težava preobremenitve s prahom velika tudi v urbanih naseljih. Zelo malo raziskav je omejenih na evropski prostor. Nobena raziskava ni vključevala vpliva prahu na navadno bukev, ki je najpomembnejši gradnik slovenskega gozda.

### 5.1 VPLIV PRAHU

Rezultati naših raziskav vpliva apnenčastega prahu na spektralne in funkcionalne lastnosti listov navadne bukve so pokazali, da le visoka koncentracija prahu na listih spremeni spektralne in odbojne lastnosti listov navadne bukve v celotnem vidnem in UV-spektru, medtem ko nižje koncentracije prahu na listih nimajo velikega vpliva. Prepustnost sončne svetlobe skozi bukov list, obremenjen s prahom, se spremeni le v vidnem in NIR-območju. Preučevanje vpliva apnenčastega prahu na liste navadne bukve je razkrilo tudi pozitivno vlogo prahu na temperaturo lista in potencialno fotokemično učinkovitost FS II v razmerah visokih temperatur poleti. Zmanjšanje anatomske in biokemične zaščite lista zaradi prahu predstavlja tveganje za rastlinska tkiva zaradi močnega sončnega sevanja, če je prah zaradi dežja ali vetra naenkrat odstranjen z listnih površin. Listi navadne bukve predstavljajo tudi učinkovito površino za odlaganje prahu iz atmosfere, s čimer izboljšujejo kakovost zraka. Bučev spada med sencovzdržne drevesne vrste, ki so tolerantne na pomanjkanje neposrednega sončnega sevanja, zato prisotnost prahu na njenih listih nima večjega negativnega učinka, saj jih učinkovito senči. Odzivi rastlin na prisotnost prahu na njihovih listih zelo variirajo. Odzivnost je posledica vrste prahu, njegove velikosti, strukture, kemijske sestave in fizikalnih parametrov ter stanja listov (Farmer, 1991).

Prisotnost prahu na listih vpliva na celostni razvoj rastline, kar se odraža tudi na anatomske, biokemijske in fiziološke odzivnosti rastlin ob spremenjenih spektralnih lastnostih prejete svetlobe (Prajapati in Tripathi, 2008). Različne rastlinske vrste se različno odzivajo na stalno ali občasno prisotnost prahu.

### 5.1.1 Vplivi prahu na optične lastnosti listov bukve

Vpliv prahu na spremenjene optične lastnosti lista je lahko neposreden zaradi nanosa prahu ali posreden zaradi zmanjšanja prejete sončne svetlobe in spremenjenih lastnosti listov (Baldini in sod., 1997).

Naše meritve vpliva prahu na liste bukve so pokazale, da le prisotnost visokih koncentracij prahu močno spremeni optične lastnosti listov v vseh merjenih delih spektrov (280–880 nm). Sprememba je odvisna od količine prahu, ki se je odložil na liste. Dokazali smo pozitivno korelacijo med količino prahu in odbojnostjo v celotnem delu spektra. Izjema je le območje NIR, kjer korelacije nismo mogli potrditi (Rezultati, poglavje 4.3.2). Prisotnost prahu spremeni spektralne lastnosti lista, predvsem odbojnost in vpojnost (absorptivnost) za svetlogo, kar vodi k spremenjeni kakovosti in količini absorbiranega sevanja, ki le za malenkost spremeni obliko krivulje odbojnega spektra. Posledica povečane odbojnosti zaradi prahu ima za posledico spremenjeno energijsko bilanco lista, saj list sprejme manj energije svetlobnega sevanja, kot so pokazali že drugi avtorji (Hirono in sod. (1995) in Wijaytrante in sod. (2009)). Del sevanja se zaradi prahu na površini lista odbije od prašne podlage (odvisno tudi od barve in velikosti prašnih delcev), del ga prah吸收ira in ponovno odda nazaj v ozračje (spremenjen valovna dolžina – dolgovalovno sevanje), del sevanja pa prah prepusti, da pride do listne površine. Posledici dolgovalovnega (infrardečega) sevanja sta fotomorfogenezi in termalni učinek na rastline s pogostim dvigom temperature listov, kar so raziskovali že Fluckiger in sod. (1979), Wijaytrante in sod. (2009) ter Prajapati (2012). To pa je v nasprotju z našimi ugotovitvami pri kratkotrajnem delno nadzorovanem poskusu. Ugotovili smo, da prisotnost večje mase apnenčevega prahu na listih bukve ob polni sončni osvetljenosti pomeni nižjo temperaturo lista in večjo transpiracijo.

Meritve v naravi so pokazale tudi na izjemno ujemanje odbojnih spektrov na lokaciji 2 v obeh meritvah leta 2012. Vzrok so lahko razmeroma nizke koncentracije prahu in visoke temperature, ki so vladale v času izvajanja meritev v laboratoriju, zaradi katerih se je merjeni list kljub zaščitnim ukrepom med izvajanjem meritev izsušil, kar je povečalo odboj svetlobe.

Med raziskavami odbojnosti lista smo pri meritvah vzorcev iz delno nadzorovanih razmer med sabo primerjali odbojne spektre spranih listov (liste brez prahu) in listov s prahom z dveh različnih obravnavanj. Prišli smo do ugotovitve, da je odbojnost pri listih s prahom večja kot pri tistih, ki smo jim ga odstranili (Sliki 38 in 39). Spremembe so vidne v celotnem delu spektra. Izjema je le območje NIR, kjer korelacije nismo mogli potrditi. Raziskave so pokazale, da je odbojnost lista v relativno ozkem pasu spektra okoli 700 nm pomemben podatek za določitev stresa in povečane vsebnosti klorofila (Carter in Knapp, 2001). Doživljjanje stresa pri rastlinah skozi daljše obdobje se odraža v rasti rastlin,

zmanjšani vsebnosti vode ali v zmanjšani koncentraciji klorofila v listih. To lahko vodi do tega, da na obremenjenih območjih obstoječe rastline zamenjajo tolerantnejše vrste rastlin (Male in sod., 2010). Tudi mi smo merili prisotnost stresa z merjenjem klorofilne fluorescence in ugotovili, da sta potencialna in dejanska fotokemična učinkovitost značilno manjši pri listih kontrolnih bukev kot pri bukvah z največjo koncentracijo prahu na listih, kar lahko pripisemo pozitivnemu učinku prahu na temperaturo lista zaradi manjše fotoinhicije. Študije rastlin vodnih ekosistemov so pokazale, da odlaganje apnenca na listne površine in kalcifikacija lahko privедeta do manjše neselektivne absorpcije fotosinteznega aktivnega sevanja (Losee in Wetzel, 1983), kar smo dokazali tudi v naši študiji.

### 5.1.2 Vplivi prahu na anatomske lastnosti lista

V našem poskusu v delno kontroliranih razmerah (kratkotrajni poskus, meritve 3 tedne po nanosu prahu) smo dokazali stanjšanje zgornje kutikule, manjšo debelino stebričastega tkiva in manjše razmerje med stebričastim in gobastim tkivom na račun gobastega tkiva. SLA pri kontrolnih vzorcih se statistično razlikuje od drugih dveh obravnav in nakazuje povečanje listne površine na enoto mase pri vzorcih, obremenjenih s prahom. Vse omenjene spremembe so se pojavile v 3 tednih po nanosu prahu. Meritve iz narave (meritve leta 2011 in 2012), kjer je bila prisotnost prahu daljša, dodatno dokazujejo še povečanje debeline listov, obremenjenih s prahom in zmanjšanje števila listnih rež, kar dokazujejo tudi avtorji El-Khatib in Youssef (2011), a je v nasprotju z rezultati naših meritov pod delno nadzorovanimi razmerami (meritve 2015), kjer se je debelina lista zmanjševala v odvisnosti od količine prahu. Prilagoditev rastlin na prisotnost prahu odraža senčne razmere (več gobastega tkiva v primerjavi s stebričastim, večji SLA, tudi več karotenoidov in klorofila *b*), kar lahko razložimo s trditvijo, da prah odbija in absorbira velik del svetlobe. Prah predstavlja tudi zaščito pred UV-sevanjem, zato je UV-absorbirajočih snovi manj (čeprav rezultati meritov v letih 2011 in 2012 niso konsistentni, kar je posledica rastnih razmer, različne debeline listov itd., vsekakor pa to velja za meritve leta 2015). Vse meritve (2011, 2012 in 2015) kažejo zmanjšanje debeline zgornje kutikule pri rastlinah, obremenjenih s prahom, ki je v negativni odvisnosti od količine prahu na listih bukve, kar potrjujeta tudi El-Khatib in Youssef (2011). Na rastlini so zaradi prisotnosti prahu že 3 tedne po nanosu na njene liste vidne morfološke spremembe.

Prisotnost prahu na listih vpliva na celostni razvoj rastline, kar se odraža tudi na morfologiji rastlin. Različne rastlinske vrste se različno prilagodijo na konstantno ali samo občasno prisotnost prahu. Najvidnejše prilagoditve rastlin, ki so dlje izpostavljene prahu, v primerjavi z rastlinami, ki živijo v njegovi odsotnosti, so manjši listi z manjšo specifično listno površino (SLA), manjša gostota listnih rež, vidna listna razbarvanja v obliki listnih kloroz/rumenenja ali temni madeži na zgornji listni površini. Viri (El-Khatib in Youssef, 2011) navajajo tudi pojavljanje odebujene kutikule, stanjšanje (kolaps) epidermisa,

prisotnost fenolnih snovi v gobastem tkivu, relativno debele stene ksilema in rahlo odebujene celice floema. Zia-Khan in sod. (2015) so dokazali, da prisotnost prahu na primeru bombaža povzroči zmanjšanje prevodnosti listnih rež za 30 %, kar se odraža v 28-% zmanjšanju primarne produkcije rastline. Po čiščenju listov z vodo sta se primarna proizvodnja in prirastek povečala za 10 % v 5 dneh.

Pri meritvah iz narave je na debelino lista vplivala tudi lega posamezne vzorčne ploskve. Lokacija 1 je imela prisojno lego, kjer se je posamezno pojavljal tudi gaber, zaradi česar lahko sklepamo, da je prejemala več sončnega sevanja. Debelina lista pa je verjetno povezana tudi z obliko in gostoto drevesne krošnje ter ontogenetsko stopnjo razvoja dreves (Prajapati, 2012), ki je bila na lokaciji 1 najmanjša. Ponovno so bile največje razlike med referenčno lokacijo in lokacijo 1, kjer so bila tkiva debelejša od tistih na drugih lokacijah. Ti rezultati pa so v korelaciji s SLA, ki je največja na referenčni lokaciji in najmanjša na lokaciji 1, česar ne moremo pripisati le prisotnosti prahu, ampak tudi drugim okoljskim dejavnikom, kot sta prisojna lega in sušnost rastišča.

Listnih rež na zgornji povrhnjici nismo opazili. Ugotovili smo, da se njihovo število pri rastlinah v naravnem okolju, ki so pod vplivom prahu, povečuje. Statistično značilne razlike se pojavijo pri primerjavi z referenčno lokacijo, kjer je listnih rež najmanj, vendar so te daljše in širše kot na lokacijah, ki so izpostavljene prahu. Nekateri avtorji navajajo, da so listne reže na območju vpliva prahu navadno nekoliko večje od ostalih celic (Rai in sod., 2009), česar pa v našem primeru nismo zaznali.

### 5.1.3 Vpliv prahu na biokemijske lastnosti listov

Prisotnost prahu vpliva na povečanje vsebnosti klorofilov *a* in *b* ter karotenoidov in zmanjšanje skupnih UV-absorbirajočih snovi pri meritvah, ki smo jih izvedli v delno kontroliranih razmerah. Po drugi strani pa nam meritve v naravnem okolju nakazujejo povečanje vsebnosti klorofilov *a* in *b* ter povečanje UV-absorbirajočih snovi zaradi prisotnosti prahu. Razloge lahko iščemo v učinkih senčenja, ki so jim bili podvrženi listi na kontrolni lokaciji pri meritvah v naravnem okolju, kar je v nasprotju s trditvami številnih avtorjev (Singh in Rao, 1981; Shukla in sod., 1990; Farmer, 1993; Rai in Panda, 2014; Zia-Khan in sod., 2015). Avtorji dokazujojo, da se vsebnost klorofila v listu zmanjša zaradi učinka senčenja, ki ga povzroči prah, vendar so Shukla in sod. (1990) na primeru kapusnic dokazali, da se lahko vsebnost klorofila v obdobju 4 tednov po nanosu prahu tudi kratkotrajno poveča, nato pa se zmanjša. Naše meritve so potekale 3 tedne po nanosu prahu, zato lahko povečanje vsebnosti klorofila razložimo zaradi učinka senčenja. Listi, senčeni zaradi prahu, lahko zmanjšanje svetlobe ublažijo z izboljšanjem njenega izkoristka, in sicer s povečanjem vsebnosti klorofilov na listno površino (Lambers in sod., 2008). Vsebnost antocianov in UV-absorbirajočih snovi je v negativni korelaciji s količino prahu.

Antociani se pogosto akumulirajo v zgornjih listnih plasteh in učinkujejo na zmožnost preživetja rastline pod različnimi stresnimi razmerami (Lee in Collins, 2001). Imajo tudi zaščitno vlogo ter zmanjšujejo tveganje zaradi fotoinhibicije, ki se lahko pojavi v okoljih z velikim sončnim sevanjem (Manetas in sod., 2002; Liakopoulos in sod., 2006). UV-absorbirajoče snovi se akumulirajo v epidermisu in zmanjšujejo prehod UV-sevanja v globlja listna tkiva, s čimer zmanjšujejo poškodbe listnih tkiv zaradi škodljivih UV-fotonov (Rozeman in sod., 2002). Izследki naših raziskav nakazujejo, da zmanjšanje svetlobe zaradi odloženega prahu na listih bukve zmanjša potrebo po proizvodnji antocianov in UV-absorbirajočih snovi.

Kutikula navadne bukve je zelo tanka, kar smo tudi dokazali v naši raziskavi, zato nudi slabšo zaščito lista pred izgubo vode, kar sta raziskovala že Riederer in Schreiber (2001). Namens kutikule kot zunajcelične hidrofobne plasti je večfunkcijski: med drugim je tudi zaščita pred izgubo vode in pred okoljskimi stresorji (Yeats in Rose, 2013). Kutikula je neposredno izpostavljena odlaganju prašnih delcev. Vzrok značilno negativnega učinka prahu na debelino kutikule je verjetno motnja procesa izgradnje kutikule in erozije kutikularnih voskov (Shepherd in Griffiths, 2006). Listi imajo samočistilni potencial, ki je odvisen od njihovih značilnosti, te pa se med vrstami močno razlikujejo (Neinhuis in Barthlott, 1997). Te samočistilne površine preprečujejo akumulacijo prahu na listih, kar bi negativno vplivalo na fotosintezo (Yeats in Rose, 2013). Rastline z debelo kutikulo in grobo listno površino z nazobčanimi listnimi robovi bodo akumulirale več prahu kot rastline z gladko in ravno listno površino (Rai in Panda, 2014). Polno razviti listi navadne bukve nimajo trihomov in papil, kot je to značilno za druge vrste rodu bukev (Cho in sod. 2014). Listi navadne bukve imajo trihome le v zgodnji razvojni fazni na začetku rastne sezone (Brus, 2001).

#### **5.1.4 Vplivi prahu na fiziologijo listov**

Prisotnost prahu na listih rastlin povzroči, da rastlina sprejme manj sončne svetlobe, ki jo potrebuje za fotosintezo. Fini prah na listih rastlin lahko maši listne reže in preprečuje izmenjavo plinov med rastlino in okolico, če je bil vnos prahu opravljen v času, ko so bile listne reže odprte (Hirano in sod., 1995). Zmanjšana prevodnost listnih rež zaradi prahu negativno vpliva na primarno proizvodnjo in prirastek, kar so dokazali Zia-Khan in sod. (2015). V naši kratkotrajni raziskavi primarne produkcije neposredno nismo merili, vendar nam vrednosti meritev potencialne in dejanske fotokemične učinkovitosti FS II nakazujejo, da so njihove vrednosti značilno manjše pri kontrolnih bukvah kot pri bukvah, obremenjenih z največ prahu. Rezultati bi bili verjetno drugačni, če bi bila izpostavljenost daljša. V našem primeru nismo zaznali nobene reže, ki bi bila zamašena s prahom, pri rastlinah v naravnem in delno kontroliranem okolju, kjer smo prah nanašali le na zgornjo stran listne površine, kjer pa bukev nima listnih rež (Cho in sod., 2014). Prah smo nanašali v nevetrovnih razmerah, s čimer smo izločili možnost njegovega prenosa na spodnjo

površino drugih listov. Prisotnost prahu na listu močno zmanjša možnost absorpcije svetlobe za rastlino, s čimer se zmanjša razpoložljiva energija, ki jo rastlina potrebuje za proces fotosinteze (Hirano in sod., 1995). Prah del prejete sončne svetlobe odbije nazaj v okolico (odvisno tudi od njegove barve in strukture), del je absorbira, del pa prepusti (Wijayratne in sod., 2009). Tok energije, ki ga prah prepusti, da potuje naprej v list rastline, je osiromašen valovnih dolžin, ki bi jih rastlina potrebovala za razvoj. Prisotnost prahu na rastlini skozi daljše časovno obdobje se odraža tudi v manjših listih, obremenjenih s prahom, s čimer se zmanjša primarna produkcija rastlin, kar so dokazali tudi Farmer (1991), El-Khatib in Youssef (2011), Kumar in Thambavani (2012) ter Chen (2015). Rast poganjkov vrste puščavskega grahovca (*Astragalus jaegerianus* Munz) se zmanjšuje s povečevanjem koncentracije prahu, vendar se skupna sezonska neto fotosinteza povečuje (Wijayratne in sod., 2009). To lahko nastane kot posledica odsotnosti fotoinhicije pri zmanjšani intenziteti svetlobe, kar je razvidno tudi iz naših meritov potencialne fotokemične učinkovitosti FS II, ki pri vzorčenih listih ni nakazal stresnih razmer. Naši rezultati nakazujejo, da je bila potencialna fotokemična učinkovitost FS II blizu teoretičnemu maksimumu 0,84 (Björkman in Demmig, 1987), ki nakazuje nemoteno izkoriščanje sončne energije. Kljub temu so bile zaradi visokih okoljskih temperatur vse rastline podvržene prehodnemu stresu, kot nakazuje fotokemična učinkovitost FS II, ki je bila v splošnem zelo majhna, le za liste, obremenjene z višjo koncentracijo prahu, je bila nekoliko večja.

Rastline, obremenjene s prahom temnejših barv, imajo značilno večjo absorpcijo sončnega sevanja, kar lahko vodi do pregrevanja in dviga temperature listov. Količina sprejete sončne energije zaradi prahu pa je odvisna tudi od njegove barve. Že Eller (1977) je dokazal pozitivno korelacijo med temperaturo lista in količino cestnega prahu (temno sive barve). Učinek dviga temperature listov je še posebej negativen pri višjih temperaturah zaradi manjšanja oddajanja vode iz rastline. Vendar pa naše meritve v delno nadzorovanih razmerah nakazujejo znižanje temperature listov pri rastlinah z večjo obremenjenostjo s prahom, kar lahko razlagamo s povečanim odbojem (albedo) in z zmanjšano absorpcijo sončnega sevanja v listnih tkivih zaradi spremenjenih optičnih lastnosti listov ter zaradi prahu belo sive barve, ki ščiti liste pred povečanim sončnim sevanjem. Že Hirano (1994) je izpostavil pomembnost barve prahu za dvig ali znižanje temperature listov, obremenjenih s prahom. Prah bele ali svetlo sive barve bo imel večji albedo (vrednost odboja 0,3–0,6; absorpcija skoraj 0) kot prah črne barve (vrednost absorpcije 1, albedo 0).

Količina prahu vpliva tudi na povečanje oddajanja vode iz listov. To so pokazali rezultati meritov v naravnem okolju, česar pa ne moremo potrditi za lokacijo 3, ki je bila najbolj obremenjena s prahom. Preproste interpretacije povezave med količino prahu in transpiracijo vode ne moremo podati, saj je transpiracija odvisna še od številnih drugih, tudi neizmerjenih dejavnikov. Odvisna je od trenutnih okoljskih razmer v času meritve (in samega časa meritve), od fiziološkega stanja rastline, števila rež pri posameznem listu,

stresa, starosti posameznega lista itd. Morda je lahko transpiracija pri najbolj obremenjenih listih manjša zaradi povečanega odboja svetlobe in posledično zmanjšanja temperature listov, kot so pokazali rezultati meritev pod delno nadzorovanimi razmerami.

## 5.2 POVEZAVA MED LASTNOSTMI LISTOV, PRISOTNOSTJO PRAHU IN ODBOJNIMI SPEKTRI

Optične lastnosti listov rastlin so rezultat njenih specifičnih anatomskeih in biokemičnih lastnosti (Klančnik in sod., 2014) ter lastnosti in koncentracije prahu. Multivariantna redundantna analiza (RDA) je pokazala, da je prah dejavnik, ki ima signifikanten vpliv na variabilnost odbojnih spektrov. Če se prah pojavlja kot eden izmed parametrov ali če je le kot kovariabla, je vedno signifikanten. RDA je pokazala, da je prah ultimativen dejavnik za odbojne spektre. Analiza je pokazala, da ima vpliv prahu na odbojnost lista večji učinek kot skupne listne značilnosti, kar je skladno s predhodnimi študijami vpliva neposrednega sočnega sevanja in listne odbojnosti (Holmes in Keiller, 2002; Klančnik in sod., 2012, 2014b). Koncentracija prahu v kratkotrajnem poskusu je pojasnila 67 % ( $p < 0,001$ ) variabilnosti odbojnega spektra in 12 % ( $p < 0,001$ ) presevnosti. To je lahko posledica velike variabilnosti merjenih spektrov. Analiza je pokazala, da 9 % merjenih spektrov razložimo s karotenoidi in antociani, ki imajo značilno zaščitno funkcijo pred premočnim sončnim sevanjem. Korelacije med količino prahu ter nekaterimi anatomskeimi parametri meritev v naravnem okolju so sicer signifikantne, vendar nizkih vrednosti, kar pomeni, da z vplivom prahu lahko razložimo le majhen del variabilnosti rezultatov.

## 5.3 VEGETACIJA KOT PAST ZA PRAH

Rastline predstavljajo zelo učinkovito sredstvo za prestrezanje prahu iz zraka in lahko delujejo kot učinkovit filter za prašne delce. Vendar različne drevesne vrte različno učinkovito prestrezajo in zadržujejo prašne delce iz zraka. Hwang in sod. (2011) ter Lin in sod. (2012) dokazujejo, da so iglavci pri prestrezanju in zadrževanju prahu učinkovitejši kot listavci, vendar so tudi med njimi razlike. Tako je družina cipresovk pri prestrezanju prahu iz zraka manj učinkovita kot predstavniki družine borovk (Beckett in sod., 2000). Listavci s krajsimi peclji in grobimi listnimi površinami prestrezajo prašne delce iz zraka učinkoviteje kot listavci z daljšimi peclji in gladkimi listnimi površinami, ki močneje nihajo v vetru in dežju in tako pogosteje odstranjujejo prašne depozite. Sæbø in sod. (2012) so ugotovili, da bukev pri akumulaciji prašnih delcev  $PM_{10}$  na povoskani listni površini učinkovito zadrži le 25 % prašnih delcev, medtem ko jih breza zadrži do 82,6 %. Fowler in sod. (2004) so ugotovili, da je v strnjениh sestojih gozda hitrost usedanja prašnih delcev trikrat hitrejša kot na travnatih površinah, preračunano na listno površino. Učinkovitost prestrezanja prahu je odvisna od različnih dejavnikov: od oblike in razraščenosti krošnje,

velikosti in starosti drevesa do strukture in geometrije listov ter zunanjih listnih priveskov, kot so dlačice, kutikula in voski. Kljub temu lahko listi dreves omogočajo biomonitoring kot bioabsorberji ali filtri za različne vrste zračnih onesnažil. Chen L. in sod. (2015) so dokazali, da se delci PM<sub>10</sub> zelo učinkovito usedajo na listne površine že pri relativno majhnem zmanjšanju hitrosti vetra in zanje predstavljajo krošnje dreves pomemben ponor prašnih delcev. Yin in sod. (2011) so raziskovali fine prašne delce PM<sub>2,5</sub>, ki so za razliko od delcev PM<sub>10</sub> zelo občutljivi tudi na manjše turbulentno gibanje zraka, ki se pojavi zaradi tlačnih razlik znotraj krošnje, kar otežuje njihovo odlaganje na listne površine in olajša premeščanje že odloženega prahu.

Že Beckett in sod. (1998), Witting (1993), Free-Smith in sod. (2004), Kocić in sod. (2014) ter številni drugi raziskovalci so spoznali, da se lahko drevesa in njihovi listi obnašajo kot biološke "pasti" ali receptorji za številna onesnažila iz zraka, s čimer imajo pomembno ekološko vlogo pri zmanjševanju koncentracije prašnih delcev v njem. Listi dreves delujejo kot filtri onesnažil zaradi svoje velikosti in razmerja med površino in prostornino. Rastlinske vrste se med sabo razlikujejo tudi v zmožnosti prestrezanja prahu zaradi zgradbe listne površine in njenih značilnosti, kutikule, epidermide, listnih rež in trihomov. Koliko prahu se obdrži na listih, je odvisno od njihove površine, njihovih epidermalnih in kutikularnih značilnosti, starosti in višine krošnje dreves, kar je raziskoval že Prajapati (2012).

Bukev slabo prenaša mestno okolje, zlasti zbita tla, sol in industrijske pline (Brus, 2004), zato je kot filter za prašne delce v strogih urbanih naseljih, kjer rastejo drevesa samostojno na malem rastnem prostoru, manj primerna. Primerna pa je za mestne parke in mestne gozdove. Stoletna bukev z volumnom krošnje okoli 2700 m<sup>3</sup> predstavlja veliko usedalno površino za številne prašne delce iz okolice. Naše meritve v naravi nakazujejo, da bukev učinkovito zadrži tudi do 6-kratno povečanje mase prahu glede na kontrolno lokacijo in do 123-kratno maso prahu iz meritev, izvedenih pod delno nadzorovanimi razmerami, pri čemer so njeni odzivi zelo podobni pri merjenih anatomskeih in biokemijskih parametrih. Vpliv prahu (kemijsko inertnega) na bukev nima večjega negativnega učinka, saj učinkovito senči liste, bukev pa spada med sencovzdržne drevesne vrste, ki so zelo tolerantne na pomanjkanje direktnega sončnega sevanja (Brus, 2004; Kitao in sod., 2009).

## 6 ZAKLJUČKI

V doktorski disertaciji smo preverjali različne hipoteze in jih potrdili oz. zavrnili:

- Predvidevali smo, da je eden izmed dejavnikov, ki vplivajo na fotokemično učinkovitost FS II, kar lahko vodi k zmanjšanju primarne produkcije, tudi prisotnost finih trdih delcev v ozračju, ki se odlagajo na listne površine v obliki prahu, kar močno zmanjša absorpcijo svetlobe.

Hipoteza je potrjena (glej poglavje 4.3.2). Prisotnost prahu na listu močno zmanjša možnost absorpcije svetlobe za rastlino, kar se je odražalo v povečani koncentraciji fotosintezi pigmentov in zmanjšanju snovi z zaščitno funkcijo: antocianov in UV-absorbirajočih snovi, s čimer se zmanjša razpoložljiva energija, ki jo rastlina potrebuje za proces fotosinteze. V naši kratkotrajni raziskavi primarne produkcije neposredno nismo merili, vendar nam vrednosti meritev potencialne in dejanske fotokemične učinkovitosti FS II nakazujejo ravno nasprotno, saj so bile značilno manjše pri kontrolnih bukvah kot pri bukvah, obremenjenih z največ prahu.

- Predpostavljalci smo, da prisotnost prahu na površini lista spremeni spektralne lastnosti lista glede odbojnosti in absorptivnosti ter vodi k spremenjeni kakovosti in količini absorbiranega sevanja ter spremenjeni energijski bilanci lista.

Hipoteza je potrjena (glej poglavje 4.3.2). Prah del prejete sončne svetlobe odbije nazaj v okolico (odvisno tudi od barve in strukture prahu), del je absorbira, del pa prepusti. Tok energije, ki ga prah prepusti do rastlinskega lista, je osiromašen valovnih dolžin v vidnem in UV-spektru, ki bi jih rastlina potrebovala za fotosintezo in razvoj. Rezultati so pokazali, da prisotnost apnenčastega prahu na listih bukve močno spremeni spektralne odbojne lastnosti listov navadne bukve v vidnem in UV-spektru, medtem ko je prepustnost sončne svetlobe skozi list spremenjena v vidnem in v NIR-območju. Prisotnost prahu na listih zmanjša absorpcijo sončne svetlobe, kar se je odražalo v povečani koncentraciji fotosintezi pigmentov in zmanjšanju vrednosti snovi z zaščitno vlogo: antocianov in UV-absorbirajočih snovi.

- Predpostavljalci smo, da fini prašni delci lahko prehajajo v listne reže in jih mašijo ter da posledično prihaja do motenj izmenjave plinov in transpiracije ter povišanja temperature listov, kar vodi k njihovemu pregrevanju.

Hipoteza ni potrjena (glej poglavje 4.3.5, str. 87). Te hipoteze ne moremo potrditi, saj nismo našli nobene zamašene listne reže. Literatura navaja, da prah lahko maši listne reže, če je njegov vnos v času, ko je listna reža odprta. Zato je lahko motena izmenjava plinov, posledično pa sta zmanjšani fotosinteza in transpiracija. Meritve temperature listov v delno

nadzorovanih razmerah so pokazale, da je bila temperatura listov najnižja pri listih z največ prahu. Vzrok nižjih temperatur listov, obremenjenih s prahom, je možno iskati v povečanem odboju (albedo) in transpiraciji ter v zmanjšani absorpciji zaradi prahu belo sive barve, ki ščiti liste pred povečanim sončnim sevanjem.

- Predpostavljni smo, da pomeni rastlinska odeja učinkovit filter za odlaganje prašnih delcev, kar predstavlja odvzem prahu iz atmosfere. Prisotnost rastlinske odeje zmanjuje vertikalno (tla–ozračje) in horizontalno gibanje prahu zaradi manjše izpostavljenosti vetru in turbulenci.

Hipoteza je potrjena (glej poglavji 4.2.1 in 4.3.1). Bukve predstavljajo zelo učinkovito sredstvo za prestrezanje prahu iz zraka in lahko delujejo kot učinkovit filter za prašne, predvsem večje delce ( $PM_{10}$ ), kar smo dokazali tudi z meritvami različnih koncentracij prahu na listih bukve. Naše meritve v naravi nakazujejo, da bukev zadrži tudi do 6-kratno povečanje mase prahu glede na kontrolno lokacijo, pri čemer se značilno poveča SLA. Z vertikalnimi večlojnimi in horizontalnimi zasaditvami rastlinskih pasov se povečuje različna struktura usedalnih površin za prah (trava, grmovni in drevesni sloji, rastlinski laski, iglice) s poroznimi ovirami (krošnje dreves, veje), ki dodatno ustvarijo turbulentno gibanje zraka z zmanjšanjem tlačnega pritiska, kar poveča verjetnost odlaganja prahu na liste.

## 7 POVZETEK (SUMMARY)

### 7.1 POVZETEK

Človekove dejavnosti in okoljske globalne spremembe povzročajo povečanje koncentracije prahu v atmosferi, kar vpliva tudi na zmožnost izkoriščanja sočne svetlobe, spremenjeni energijski bilanci ter razpoložljivi vodi za rastline. Rastline so pogosto pod vplivom različnih stresnih dejavnikov, ki močno vplivajo na njihovo delovanje. Med stresne dejavnike za rastline štejemo tudi prisotnost prahu na njihovih listih, ki lahko spremeni optične in funkcionalne lastnosti rastlin. Prah, katerega vpliv na rastline proučujemo v tem doktorskem delu, je posledica človekovega delovanja, in sicer pridobivanje peska iz kamnoloma apnenca. V svojem delu smo proučevali vpliv apnenčastega prahu na spektralne odbojne in funkcionalne lastnosti listov navadne bukve (*Fagus sylvatica* L.). Horizontalno orientirani listi bukve z listnimi režami na spodnji strani predstavljajo učinkovito sredstvo za odlaganje prahu. Vpliv prašnih delcev na liste bukve smo ugotavljal na treh lokacijah ob kamnolому in ga primerjali z referenčno lokacijo v dveh rastnih sezonyah. V tretji sezoni meritev smo izvedli še neodvisen kratkotrajni poskus pod delno nadzorovanimi razmerami s kontroliranim dovajanjem prahu (povprečna velikost prašnih delcev: 3,4 mikrometra –  $\mu\text{m}$ ) v treh različnih koncentracijah. Opravili smo meritve anatomskeih in biokemijskih parametrov listov ter preučevali vpliv prahu kot stresnega dejavnika za rastlino. Izmerili smo odbojne spektre listov s prahom in tistih, ki smo jim prah odstranili v območju 280–880 nm. Proučevali smo vpliv količine prahu na spremenjanje merjenih parametrov ter iskali korelacije med prisotnostjo prahu, lastnostmi listov in odbojnimi spektri.

Rezultati iz narave, kjer so bile koncentracije prahu nizke (največ  $0,25 \pm 0,11 \text{ mg/cm}^2$ ), so pokazali razlike v anatomskeih (tanjsa zgornja kutikula, debelejši listi, več gobastega tkiva v odnosu na stebričasto tkivo, povečanje števila listnih rež), biokemijskih (večja vsebnost klorofila *a/b* in karotenoidov, zmanjšanje antocianov in UV-A- ter UV-B-absorbirajočih snovi) in fizioloških (zmanjšanje transpiracije listov, zmanjšanje dejanske fotokemične učinkovitosti listov in zmanjšanje potencialne fotokemične učinkovitosti) lastnostih listov bukve na različnih rastiščih, kar ni bilo povezano le s prisotnostjo prahu, ampak je bilo tudi posledica okoljskih razmer na rastišču.

Rezultati kratkotrajnega poskusa so pokazali, da le prisotnost apnenčastega prahu na listih bukve v visokih koncentracijah ( $8,98 \pm 4,05 \text{ mg/cm}^2$ ) močno spremeni odbojnost listov navadne bukve v vidnem in UV-spektru, medtem ko nižje koncentracije prahu na listih nimajo velikega vpliva. Prepustnost sončne svetlobe skozi list je spremenjena v vidnem in v NIR-območju. To se je odrazilo v povečani koncentraciji fotosinteznih barvil in zmanjšanju vsebnosti snovi z zaščitno vlogo: antocianov in UV-absorbirajočih snovi.

Redundantna analiza je pokazala, da je koncentracija prahu v naravnih razmerah pojasnila le 16 % ( $p < 0,001$ ) variabilnosti odbojnih spektrov. V kratkotrajnem poskusu z visokimi koncentracijami prahu je prisotnost prahu razložila 67 % ( $p < 0,001$ ) variabilnosti odbojnih spektrov ter 12 % ( $p < 0,001$ ) variabilnosti presevnih spektrov.

Prepustnost sončne svetlobe skozi list je spremenjena v vidnem in v NIR-območju. Prah na listih bukve negativno vpliva na debelino zgornje kutikule ter spremeni razmerje med stebričastim in gobastim tkivom pri različnih koncentracijah. Prisotnost prahu na listih zmanjša absorpcijo sončne svetlobe, kar se je odražalo v povečani koncentraciji fotosintezičnih pigmentov in zmanjšanju snovi z zaščitno funkcijo: antocianov in UV-absorbirajočih snovi.

Preučevanje vpliva apnenčastega prahu na liste navadne bukve iz kratkotrajnega poskusa je razkrilo tudi pozitivno vlogo prahu na temperaturo lista in potencialno fotokemično učinkovitost FS II v razmerah visokih temperatur poleti. Zmanjšanje anatomске in biokemične zaščite lista zaradi prahu predstavlja tveganje za rastlinska tkiva zaradi močnega sončnega sevanja, če je zaradi dežja ali vetra prah naenkrat odstranjen z listnih površin. Listi navadne bukve predstavljajo tudi učinkovito površino za odlaganje prahu iz atmosfere, s čimer izboljšujejo kakovost zraka. Bukev spada med sencovzdržne drevesne vrste, ki so tolerantne na pomanjkanje direktnega sončnega sevanja, zato prisotnost prahu na njihovih listih nima večjega negativnega učinka, saj jih ta učinkovito senči.

## 7.2 SUMMARY

Human activities and global environment changes result in increased concentrations of mineral dust in the atmosphere, which can impact light harvesting in plants, their energy balance and water management. Plants are often under the influence of various stress factors that greatly affect their performance. One of the plant stress factors is the presence of dust particles on plants' leaves which may alter the optical and functional properties of leaves. Dust, which impact on the plants is studied in this PhD thesis, is a result of human activity of the extraction of sand from a limestone quarry. In our work we investigated the influence of limestone dust on the optical spectral reflectance and functional properties of the leaves of European beech (*Fagus sylvatica* L.). The horizontally oriented, hypostomatal leaves of common beech present an efficient trap for dust particles. The impact of limestone dust particles on beech leaves was studied at three different locations along the quarry and compared to a reference location in two growing seasons. In the third season measurements were also conducted in an independent short-term experiment under partially controlled conditions by the controlled spraying/dusting of limestone dust (median particle size, 3.4  $\mu\text{m}$ ) in three different concentrations. We performed measurements of anatomical and biochemical properties of leaves and studied the

influence of the dust as a stress factor for the plant. The reflectance spectrum of the leaves with the dust and of those where the dust was removed was measured in the range of 280-880 nm. The effect of the amount of the dust was studied between changing the measured parameters and correlations between the presence of the dust on leaves, leaves' characteristics and spectral reflectance properties were searched for. The results from nature, where the dust concentrations were low (maximum of  $0.25 \pm 0.11 \text{ mg/cm}^2$ ) showed differences in anatomical (lower adaxial cuticle thickness, thicker leaves, higher palisade/spongy parenchyma ratio, higher stomata density), biochemical (higher concentrations of chlorophyll *a/b* and carotenoids, lower concentrations of anthocyanins and UV absorbing compounds) and physiological (lower leaf transpiration, decreased actual photochemical efficiency and potential photochemical efficiency of PSII) characteristics of beech leaves on different locations, which was not only correlated to the presence of dust, but also a consequence of environmental conditions on the locations. The results of the short-term experiment showed that only high concentrations ( $8.98 \pm 4.05 \text{ mg/cm}^2$ ) of limestone dust on leaves significantly changed reflectance properties of the leaves of common beech in the visible and UV spectrum, while lower concentrations of dust have minimum effect on leaves. The transmittance of sunlight is changed in visible and near-infrared spectrum, which was reflected in the increased concentration of photosynthetic pigments and reduced substances for the protective function: anthocyanins and UV absorbing substances. The redundancy analysis of the dust concentration in natural conditions explained only 16 % ( $p < 0.001$ ) of the variability of the reflection spectrum. In the short-term experiment with high concentration of dust the presence of the dust explained 67 % ( $p < 0.001$ ) of the variability of the reflection spectrum and 12 % ( $p < 0.001$ ) of the transmittance spectrum. The transmittance of sunlight through leaves was changed in visible and near-infrared spectrum. The dust on the leaves was negatively correlated with adaxial cuticle thickness and palisade/spongy parenchyma ratio for different dust concentrations. The presence of dust on leaves decreased the transmittance of the sunlight, which was reflected in the increased concentration of photosynthetic pigments and reduced substances for the protective function: anthocyanins and UV absorbing substances. The analysis of the effect of limestone dust on leaves of common beech in the short-term experiment revealed positive effects of dust on leaf temperature and on the potential photochemical efficiency of photosystem II during high summer temperatures. Sudden removal of the dust from the leaf surface by wind or water presents the risk of overexposure to strong solar radiaton, because anatomical and biochemical leaf protection is reduced. Leaves of common beech represent an effective surface area for the deposition of dust from the atmosphere in order to improve air quality. Common beech is one of the shade-tolerant tree species that are highly tolerant to lacking direct sunlight, so the presence of dust on the leaves of the beech does not have a significantly negative effect, as dust effectively shades the beech leaves.

## 8 VIRI IN LITERATURA

- Abdel-Rahman, A.M. 2012. Effect of cement dust pollution on the yield and quality of *Ficus carica* L. fruits. Journal of Life Sciences, 6: 276–281
- Andersson-Skölda Y., Thorsson S., Rayner D., Lindberga F., Janhällc S., Jonssond A., Mobacke U., Bergmanf R., Granberg M. 2015. An integrated method for assessing climate-related risks and adaptation alternatives in urban areas. Climate Risk Management, 7: 31-50
- Anko B. 1993. Vpliv motenj na gozdnih ekosistemov in na gospodarjenje z njimi. Zbornik gozdarstva in lesarstva, 42: 85–109
- Armbrust D. V. 1986. Effect of particulates (Dust) on cotton growth, photosynthesis, and respiration. Agronomy Journal, 78: 1078–1081
- Arslan M., BoyBay M. 1990. A study on the characterization of dust fall. Atmospheric Environment, 24, 10: 2667–2671
- Asner G. P. 1998. Biophysical and Biochemical Sources of Variability in Canopy Reflectance. Remote Sensing of Environment, 64: 234–253
- Baldini E., Facini O., Nerozzi F., Rossi F., Rotondi A. 1997. Leaf characteristics and optical properties of different woody species. Trees, 12: 73–81
- Barber D., de La Torre F., Feo F., Florido F., Guardia P., Moreno C., Quiralte J., Lombardero M., Villalba M., Salcedo G., Rodríguez R. 2008. Understanding patient sensitization profiles in complex pollen areas: a molecular epidemiological study. Allergy, 63: 1550–1558
- Barnes P. W., Flint S.D., Slusser J.R., Gao W., Ryel R.J. 2008. Diurnal changes in epidermal UV transmittance of plants in naturally high UV environments. Physiologia Plantarum, 133: 363–372
- Beckett, K. P., Freer-Smith, P.H., Taylor, G. 1998. Urban woodlands: their role in reducing the effect of particulate pollution. Environmental Pollution, 99: 347–360
- Beckett K. P., Freer-Smith P.H., Taylor G. 2000. Effective tree species for local air quality management. Journal of arboriculture, 26, 1: 12–19

- Björkman O., Demmig B. 1987. Photon yield of O<sub>2</sub> evolution and chlorophyll fluorescence characteristics at 77 K among vascular plants of diverse origins. *Planta*, 170: 489–504
- Blanusa T., Fantozzi F., Monaci F., Bargagli R. 2015. Leaf trapping and retention of particles by holm oak and other common tree species in Mediterranean urban environments. *Urban Forestry & Urban Greening*, 14: 1095–1101
- Brady N. C. 1974. The nature and properties of soils. New York, MacMillan
- Brown M. T., Ulgiati S. 2005. Emergy, transformity, and ecosystem health. V: Handook of ecological indicators for assessment of eco system health. Jørgensen S.E., Costanza R., Xu F.-L. (ur.). CRC Press: 333–335
- Brus R. 2004. Drevesne vrste na slovenskem. Ljubljana, Mladinska knjiga Založba: 399 str.
- Buccolieri R., Gromke C., Di Sabatino S., Ruck R. 2009. Aerodynamic effects of trees on pollutant concentration in street canyons. *Science of the Total Environment*, 407: 5247–5256
- Castro K. L. Sanchez-Azofeifa G. A. 2008. Changes in Spectral properties, chlorophyll Content and Internal Mesophyll Structure of senescing *Populus balsamifera* and *Populus tremuloides* Leaves. *Sensors*, 8: 51–69
- Chandrasekharan R. 2005. Optical properties of leaves. PHY 598 OS, Final Report. <http://www.docstoc.com> (28. 1. 2013)
- Chaturvedi R. K., Prasad S., Rana, S., Obaidullah S.M., Pandey V., Singh H. 2013. Effect of dust load on the leaf attributes of the tree species growing along the roadside. *Environmental Monitoring and Assessment*, 185: 383–391
- Chaulya S. K., Chakraborty M.K., Singh R.S. 2001. Air pollution modelling fir a proposed limestone quarry. *Water, Air, & Soil Pollution*, 126: 171–191
- Chen L., Liu C., Zou R., Yang M., Zhang Z. 2015. Experimental examination of effectiveness of vegetation as bio-filter of particulate matters in the urban environment. *Environmental Pollution*, 208: 198–208.
- Chen X., Zhou Z., Teng M., Wang P., Zhou L. 2015. Accumulation of three different sizes of particulate matter on plant leaf surfaces: effect on leaf traits. *Archives of Biological Sciences*, 67: 1257–1267

- Cho S. H., Jeong K. S., Kim S. H., Pak J. H. 2014. Leaf cuticle micromorphology of *Fagus* L. (*Fagaceae*) species. *Journal of Asia-Pacific Biodiversity*, 7: 378–387
- Cohen A. J., Ross Anderson H., Ostro B., Pandey K.D., Krzyzanowski M., Künzli N., Gutschmidt K., Pope A., Romieu I., Samet J.M., Smith K. 2005. The global burden of disease due to outdoor air pollution. *Journal of Toxicology and Environmental Health*, 68: 1301–1307
- Cook R. J., Barron J.C., Papendick R., Williams G.J. 1981. Impact on agriculture of the Mount St. Helens Eruptions. *Science*, 211: 16–21
- Coolidge-Stoltz, E., Graff-Haight D., Jenner J., Cronkite D., Holtzclaw F., Jones C. L. 2001. *Science explorer, Life Science*. New Jersey, Prentice-Hall: 874 str.
- Costanza R., Mageau M. 1999. What is a healthy ecosystem? *Aquatic Ecology*, 33, 1: 105–115
- Dales R., Ruest K., Guay M., Marro L., Miller D. 2010. Residential fungal growth and incidence of acute respiratory illness during the first two years of life. *Environmental Research*, 110: 692–698
- Darley E. F. 1966. Studies on the effect of cement-kiln dust on vegetation. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 16: 145–150
- Diaconu D., Kahle H. P., Spiecker H. 2015. Tree- and Stand-Level Thinning Effects on Growth of European Beech (*Fagus sylvatica* L.) on a Northeast- and a Southwest-Facing Slope in Southwest Germany. *Forests*, 6: 3256–3277
- El-Khatib A., Youssef N. 2011. Bio-monitoring of Airborne Dust Particles Pollutants by Morpho-anatomical Reactions of Urban Tree Leaves Under Dry Climate. *Egyptian Journal of botany*, 51: 1
- Farmer A. M. 1991. The effect of dust on vegetation – a review. *Environmental Pollution*, 79: 63–75
- Ficko A., Poljanec A., Bončina A. 2011. Do changes in spatial distribution, structure and abundance of silver fir (*Abies alba* Mill.) indicate its decline? *Forest Ecology and Management*, 261: 844–845

- Fowler D., Cape J.N., Unsworth M.H., Mayer H., Crowther J.M., Jarvis P.G., Gardiner B., Shuttleworth W.J. 1989. Deposition of Atmospheric Pollutants on Forests. Philosophical Transactions of the Royal Society B, 324: 1223
- Free-Smith P.H., ElKhatib A.A., Taylor G. 2004. Capture of particulate pollution by trees: a comparison of species typical of semi-arid areas (*Ficus nitida* and *Eucalyptus globulus*) with European and North American species. Water, Air and Soil Pollution, 14/4: 173-187
- Fuzzi S., Baltensperger U., Carslaw K., Decesari S., Denier van der Gon H., Facchini M.C., Fowler D., Koren I., Langford B., Lohmann U., Nemitz E., Pandis S., Riipinen I., Rudich Y., Schaap M., Slowik J.G., Spracklen D.V., Vignati E., Wild M., Williams M., Gilardoni S. 2015. Particulate matter, air quality and climate: lessons learned and future needs. Atmospheric Chemistry and Physics, 15: 8217-8299
- Garg O.P., Kapoor V. 1972. Retardation of leaf senescence by ascorbic acid. Journal of Experimental Botany, 23: 699-703
- Gilmore M.S., Wilson E.H., Barrett N., Civco D.L., Prisloe S., Hurd J.D., Chadwick C. 2008. Integrating multi-temporal spectral and structural information to map wetland vegetation in a lower Connecticut River tidal marsh. Remote Sensing of Environment, 112: 4048-4060
- Gitelson A.A., Zur Y., Chivkunova O.B., Merzlyak M.N. 2002. Assessing carotenoid content in plant leaves with reflectance spectroscopy. Journal of Photochemistry and Photobiology B, 75: 272-281.
- Grobelšek Ž., 2013. Vpliv prahu na optične lastnosti listov pri bukvi. Univerza v Ljubljani, Pedagoška fakulteta, Ljubljana: 33
- Grobéty B., Gieré R., Dietze V., Stille P. 2010. Airborne particles in the urban environment. Elements, 6: 229-234.
- Gorton H.L., Williams W.E., Vogelmann T.C. 1999. Chloroplast movement in *Alocasia macrorrhiza*. Physiologia Plantarum, 106: 421-428
- Gromke C., Ruck B., 2007. Influence of trees on the dispersion of pollutants in an urban street canyon—Experimental investigation of the flow and concentration field. Atmospheric Environment, 41: 3287–3302

Hirano T., Kiyota M., Aiga I. 1995. Physical effects of dust on leaf physiology of cucumber and kidney bean plants. Environmental Pollution, 89: 255-261

Hofman J., Stokkaer I., Snauwaert L., Samson R. 2013. Spatial distribution assessment of particulate matter in an urban street canyon using biomagnetic leaf monitoring of tree crown deposited particles. Environmental Pollution, 183: 123-32

Holmes M.G., Keiller D.R. 2002. Effects of pubescence and waxes on the reflectance of leaves in the ultraviolet and photosynthetic wavebands: a comparison of a range of species. Plant, Cell and Environment, 25: 85-93

Hughes N.M., Vogelmann C.T., Smith K.W. 2008. Optical Effects of abaxial anthocyanin on absorption of red wavelengths by understorey species: revisiting the back-scatter hypothesis. Journal of Experimental Botany, 59, 12: 3435–3442

Huskić M. (ur.). 2007. Polimerni nanokompoziti.

<http://nanosvet.com/Nanotehnologija/polimerni-nanokompoziti.htm> (07. 03. 2007)

Huttunen S. 1994. Effect of air pollution on epicuticular wax structure. Berlin, Springer: 81-96

Hwang H.E., Yook S.J., Ahn K.H. 2011. Experimental investigation of submicron and ultrafine soot particle removal by tree leaves. Atmospheric Environment, 45, 38: 6987-6994

Janhäll S. 2015. Review on urban vegetation and particle air pollution – deposition and dispersion. Atmospheric Environment, 105: 130-137

Jonozovič M., Marenče M. 2012. Gozdnogospodarski in lovsko upravljavski načrti območij za obdobje 2011 – 2020: povzetek za Slovenijo. Ljubljana, Zavod za gozdove Slovenije: 111 str.

Klančnik K., Mlinar M., Gaberščik A. 2012. Heterophylly results in a variety of "spectral signatures" in aquatic plant species. Aquatic botany, 98: 20-26

Klančnik K., Pančić M., Gaberščik A. 2014a. Leaf optical properties in amphibious plant species are affected by multiple leaf traits. Hydrobiologia, 737: 121-130

Klančnik K., Vogel-Mikuš K., Gaberščik A. 2014b. Silicified structures affect leaf optical properties in grasses and sedge. Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology, 130: 1-10

Knapp A.K., Carter G. A. 1998. Variability in leaf optical properties among 26 species from a broad range of habitants. American Journal of Botany, 85: 940-946

Knipling E.B. 1970. Physical and Physiological Basis for the Reflectance of Visible and Near-Infrared Radiation from Vegetation. Remote Sensing of Environment, 1: 155-159

Kocić K., Spasić T., Aničić Urošević M., Tomašević M. 2014. Trees as natural barriers against heavy metal pollution and their role in the protection of cultural heritage. Journal of Cultural Heritage, 15: 227-233

Kotar M., Brus R. 1999. Naše drevesne vrste. Ljubljana, Slovenska matica v Ljubljani: 320 str.

Kumar S.R., Thambavani S.D. 2012. Effect of cement dust deposition on physiological behaviors of some selected plant species. International Journal of Scientific & Technology Research, 1: 98-104

Lambers H., Chapin III F.S., Pons T.L. 2008. Plant physiological ecology. 2nd ed. New York, Springer: 610 str.

Larcher W. 1994. Ökophysiologie der Pflanzen: Leben, Leistung und Stressbewältigung der Pflanzen in ihrer Umwelt. 5. Aufl. Stuttgart, Eugen Ulmer: 394 str.

Larcher W. 2003. Physiological Plant Ecology. 4th Ed. Berlin, Springer: 513 str.

Lee D.W., Collins T.M. 2001. Phylogenetic and ontogenetic influences on the distribution of anthocyanins and betacyanins in leaves of tropical plants. International Journal of Plant Sciences, 162: 1141-1153

Lequy E., Conil S., Turpault M.P. 2012. Impacts of Aeolian dust deposition on European forest sustainability: a review. Forest Ecology and Management, 267: 240-252

Levizou E., Drilias P., Psaras, G.K., Manetas Y. 2005. Nondestructive assessment of leaf chemistry and physiology through spectral reflectance measurements may be misleading when changes in trichome density co-occur. New Phytologist, 165: 463-472

Liakopoulos G., Nikolopoulos D., Klouvatou A., Vekkos K-A., Manetas Y., Karabourniotis G. 2006. The photoprotective role of epidermal anthocyanins and surface pubescence in young leaves of grapevine (*Vitis vinifera*). Annals of Botany, 98: 257-265

Lichtenthaler H.K., Buschmann C. 2001a. Extraction of photosynthetic tissues: Chlorophylls and carotenoids. Current Protocols in Food Analytical Chemistry. New York, John Wiley in Sons, 1: F4.2.1 – F4.2.6

Lichtenthaler H.K., Buschmann C. 2001b. Chlorophylls and carotenoids: Measurement and characterisation by UV-VIS Spectroscopy. Current Protocols in Food Analytical Chemistry. New York, John Wiley in Sons, 1: F4.3.1 - F4.3.8

Liew O.W., Chong J.C.P., Li B., Asundi A.K. 2008. Signature Optical Cues: Emerging Technologies for Monitoring Plant Health. Sensors, 8: 3205-3239

Likar M., Vogel Mikuš K., Regvar M. 2009. Praktikum fitofiziologije rastlin. Ljubljana, Biotehniška fakulteta: 49 str.  
[http://www.kii3.ntf.uni-lj.si/e-kemija/file.php/1/output/pomen\\_barvil/](http://www.kii3.ntf.uni-lj.si/e-kemija/file.php/1/output/pomen_barvil/) (13. 11. 2015)

Lin Z.F., Ehleringer J. 1983. Epidermis effects on spectral properties OF leaves OF four herbaceous species. Physiologia Plantarum, 59: 91-94

Lin M., Katul G.G., Khlystov A. 2012. A branch scale analytical model for predicting the vegetation collection efficiency of ultrafine particles. Atmospheric Environment, 51: 293–302

Litschke T., Kuttler W. 2008. On the reduction of urban particle concentration by vegetation – a review. Meteorologische Zeitschrift, 17: 229-240

Losee R.F., Wetzel R.G. 1983. Selective light attenuation by the periphyton complex. V: Wetzel R.G. (ed). Periphyton of freshwater ecosystems. The Hague, Dr W. Junk Publishers: 89-96

Male E.J., Pickles W.L., Silver E.A., Hoffman G.D., Lewicki J., Apple M., Repasky K., Burton E. A. 2010. Using hyperspectral plant signatures for CO<sub>2</sub> leak detection during the 2008 ZERT CO<sub>2</sub> sequestration experiment in Bozeman, Montana. Environmental Earth Sciences, 60: 251–261

Maletsika P.A., Nanos G.D. 2011. Effects of particulate matter contamina on Apple, Peach and Olive tree leaf characteristics and Olive leaf inorganic element composition. The annals of "Valahia" University of Targoviste, Lab. of Pomology, School of Agricultural Sciences, University of Thessaly: 9-13

Manetas Y., Drinia A., Petropoulou Y. 2002. High contents of anthocyanins in young leaves are correlated with low pools of xanthophyll cycle components and low risk of photoinhibition. *Photosynthetica*, 40: 349-354

Manning W.J. 1971. Effect of limestone dust on leaf condition, foliar disease incidence, and leaf surface microflora of native plants. *Environmental Pollution*, 2: 69-76

McPherson G.E., Nowak D.J., Rountree R.A., 1994. Chicago's urban forest ecosystem: results of the Chicago Urban Forest Climate Project. Gen. Tech. Rep. NE-186. Radnor, PA, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station: 201 str.

Miller R.K., Levine J. 1998. Biology. 4th Ed. New Jersey, Prentice-Hall Co: 1077 str.

Vpliv delcev na zdravje. 2010. Ljubljana, Nacionalni inštitut za javno zdravje  
<http://www.nizj.si/sl/vpliv-delcev-na-zdravje#> (20. 2. 2016)

Neinhuis C., Barthlott W. 1997. Characterization and distribution of water-repellent, self-cleaning plant surfaces. *Annals of Botany*, 79: 667-677

Neinhuis C., Bartholott W. 1998. Seasonal changes of leaf surface contamination in beech, oak and ginko in relation to leaf micromorphology and wettability. *New Phytologist*, 138: 91-98

Nikoforou C., Zeliou K., Kytridis V.P., Kyzeridou A., Manetas Y. 2010. Are red leaf phenotypes more or less fit? The case of winter leaf reddening in *Cistus creticus*. *Environmental and Experimental Botany*, 67: 509-514

Nowak D.J., Daniel E.C., Stevens J.C. 2006. Air pollution removal by trees and shrubs in the United States. *Urban Forestry and Urban Greening*, 4, 3-4: 115-123

Oštir K. 2006. Daljinsko zaznavanje. Ljubljana, Založba ZRC: 250 str.

Oteros J., García-Mozo H., Alcazar P., Belmonte J., Bermejo D., Boi M., Cariñanos P., Díaz de la Guardia C., Fernandez-Gonzalez D., Gonzalez-Minero F., Gutierrez-Bustillo A.M., Moreno-Grau S., Perez-Badía R., Rodríguez-Rajo F.J., Ruiz-Valenzuela L., Suarez-Perez J., Trigo M.M., Domínguez-Vilches E., Galan C. 2015. A new method for determining the sources of airborne particles. *Journal of Environmental Management*, 155: 212-218

- Park S.S., Kim Y.J. 2005. Source contributions to fine particulate matter in an urban atmosphere. *Chemosphere*, 59, 2: 217-22
- Peñuelas J., Filella I. 1998. Visible and near-infrared reflectance techniques for diagnosing plant physiological status. *Trends in Plant Science*, 3: 151-156
- Petroff A., Mailliat A., Amielh M., Anselmet F. 2008. Aerosol dry deposition on vegetative canopies: Part I: review of present knowledge, *Atmospheric Environment*, 42, 16: 3625–3653
- Poljanec A. 2008. Strukturne spremembe gozdnih sestojev v Sloveniji v obdobju 1970-2005: doktorska disertacija. (Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire). Ljubljana: 126 str.
- Poljanec A., Fincko, A., Bončina, A. 2010. Spatio temporal dynamic of European beech (*Fagus sylvatica* L.) in Slovenia. *Forest Ecology and Management* 259, 11: 2183-2190
- Prajapati S.K., Tripathi B.D. 2008. Seasonal variation of leaf dust accumulation and pigment content in plant species exposed to urban particulates pollution. *Journal of Environmental Quality*, 37: 865–870.
- Prajapati S.K. 2012. Ecological effect of airborne particulate matter on plants. *Environmental Skeptics and Critics*, 1, 1: 12–22
- Prasad M.S. V., Inamdar J.A. 1990. Effect of cement kiln dust pollution on black gram (*Vigna mungo* (L.) Hepper). *Plant Science*, 100: 435-443
- Pugh T.A.M., MacKenzie A.R., Whyatt J.D., Hewitt C.N. 2012. Effectiveness of Green Infrastructure for Improvement of Air Quality in Urban Street Canyons. *Environmental Science & Technology*, 46: 7692–7699
- Rai A., Kulshreshtha K., Srivastav P.K., Mohanty C.S. 2010. Leaf surface structure alterations due to particulate pollution in some common plants. *Environmentalist*, 30: 18-23
- Rai P.K., Panda L.L.S. 2014. Dust capturing potential and air pollution tolerance index (APTI) of some road side tree vegetation in Aizawl, Mizoram, India: An Indo-Burma hot spot region. *Air Quality Atmosphere & Health*. 7, 1: 93-101

Rai P.K., Panda L.L.S. 2014. Leaf dust deposition and its impact on Biochemical aspect of some Roadside Plants of Aizawl, Mizoram, North East India. International Research Journal of Environment Sciences, 3, 11: 14-19

Ram S.S., Majumder S., Chaudhuri P., Chanda S., Santra S.C., Maiti P.K., Sudarshan M., Chakraborty A. 2012. Plant canopies: bio-monitor and trap for re-suspended dust particulates contaminated with heavy metals. Dordrecht, Springer Science+Business Media: 1-8

Richter T., Fukshansky L. 1996. Optics of a bifacial leaf: 1. A novel combined procedure for deriving the optical parameters. Photochemistry and photobiology, 63: 507-516

Ridgwell A.J. 2002. »Dust in the Earth system: the biogeochemical linking of land, air and sea.« School of Environmental Sciences, University of East Anglia, Norwich NR4 7TJ, UK; Tyndall centre for Climate Change Research, University of East Anglia, Norwich NR4 7TJ, UK; Now at Department of Earth Sciences, University of California, Riverside, CA 92521, USA; A.Ridgwell@uea.ac.uk: 3-5 (osebni vir)

Riederer M., Schreiber L. 2001. Protecting against water loss: analysis of the barrier properties of plant cuticles. Journal of Experimental Botany, 52: 2023-2032

Rozema J., Björn L.O., Bornman J.F., Gaberščik A., Häder D.P., Trošt T., Germ M., Klisch M., Groniger A., Sinha R.P., Lebert M., He Y.Y., Buffoni-Hall R., de Bakker N.V., van de Staaij J., Meijkamp B.B. 2002. The role of UV-B radiation in aquatic and terrestrial ecosystems - an experimental and functional analysis of the evolution of UV-absorbing compounds. Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology, 66: 2-12

Roženberger D., Ficko A., Daci J. 2008. Sodobno gojenje bukovih gozdov. Zbornik gozdarstva in lesarstva, 87: 77-87

Sæbø A., Popek R., Nawrot B., Hanslin H.M., Gawronska H., Gawronski S.W. 2012. Plant species differences in particulate matter accumulation on leaf surfaces. Science of the Total Environment, 428: 347-354

Sæbø A., Hanslina H.M., Torpa T., Lierhagenb S., Gawronskac H., Dzierzanowskic K., Gawronskic S. 2015. Chemical composition of vegetation along urbanisation gradients in two European cities. Environmental Pollution, 198: 116–125

- Salmond J.A., Williams D.E., Laing G., Kingham S., Dirks K., Longley I., Henshaw G.S. 2013. The influence of vegetation on the horizontal and vertical distribution of pollutants in a street canyon. *Science of the Total Environment*, 443: 287–298
- Samal, A.C., Santra, S.C. 2002. Air quality of Kalyani township and its impact on surrounding vegetation. *Indian journal of environmental health*, 44: 71-76
- Scheffer F., Prezmeck E., Wilms W. 1961. Untersuchungen über den Einfluss von Zementofen-Flugstaubg auf Boden und Pflanzen. *Staub*, 21: 251-254
- Schrieber U., Bilger W., Neubauer C. 1995. Chlorophyll fluorescence as a nonintrusive indicator for rapid assessment of in vivo photosynthesis. V: *Ecophysiology of photosynthesis*. Schulze E.D., Caldwell M.M. (eds.). Berlin, Springer: 49-61
- Schulze E.D., Beck E., Müller-Hohenstein K. 2005. *Plant ecology*. Berlin, Heidelberg, Springer: 702 str.
- Shepherd T., Griffiths W. 2006. The effects of stress on plant cuticular waxes. *New Phytologist*, 171: 469-499
- Shukla J., Pandey V., Singh S.N., Yunus M., Singh N., Ahmad K.J. 1990. Effect of cement dust on the growth and yield of *Brassica campestris* L. *Environmental Pollution*, 66: 81-88
- Singh S.N., Rao D.N. 1981. Certain responses of wheat plants to cement dust pollution. *Environ. Pollution Series A, Ecological and Biological*, 24, 1: 75-81
- Slaton, M.R., Hunt R.E., Smith W.K. 2001. Estimating near-infrared leaf reflectance from leaf structural characteristics. *American Journal of Botany*, 88: 278-284
- Speak A.F., Rothwell J.J., Lindley S.J., Smith C.L. 2012. Urban particulate pollution reduction by four species of green roof vegetation in a UK city. *Atmospheric Environment*. 61: 283–293
- Sternberg T., Viles H., Cathersides A., Edwards M. 2010. Dust particulate absorption by ivy (*Hedera helix* L.) on historic walls in urban environments. *Science of the Total Environment*, 409: 162-168.
- Šircelj H. 2001. Ugotavljanje sušnega stresa pri jablani (*Malus domestica* Borkh.) z izbranimi biokemičnimi in fiziološkimi kazalci: doktorska disertacija. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo: 164 str.

Stocker O. 1947. Probleme der pflanzlichen Dürerreristenz. Naturwissenschaften, 34: 362-371

Taiz L., Zeiger, E. 2003. Plant Physiology. 5th ed. Massachusetts, Sinauer Associates: 778 str.

Tallis M., Taylor G., Sinnett D., Freer-Smith P. 2011. Estimating the removal of atmospheric particulate pollution by the urban tree canopy of London, under current and future environments. Landscape and Urban Planning, 103, 2: 129-138

Taylor G., Davies W.J. 1990. Root growth of *Fagus sylvatica*: Impact of air quality and drought at a site in southern Britain. New Phytologist, 166: 457-464

Terzano C., Di stefano F., Conti V., Graziani E., Petroianni A. 2010. Air pollution ultrafine particles: toxicity beyond the lung. European Review for Medical and Pharmacological Sciences, 14: 809-821

Tome D. 2006. Ekologija, organizmi v prostoru in času. Ljubljana, Tehniška založba Slovenije: 344. str.

Tyler G., Olsson T. 2006. The importance of atmospheric deposition, charge and atomic mass to the dynamics of minor and rare elements in developing, ageing, and wilted leaves of beech (*Fagus sylvatica* L.). Chemosphere, 65: 250-260

UKCIP02 - Climate Change Scenarios for the United Kingdom: The UKCIP02 Scientific Report. Norwich, Tyndall Centre, School of Environmental Sciences, University of East Anglia

[www.espace-project.org/part1/publications/reading/espace/docs/UKCIP02.pdf](http://www.espace-project.org/part1/publications/reading/espace/docs/UKCIP02.pdf) (08. 11. 2015)

Underwood E.C., Ustin L.S., Ramirez M.C. 2007. A comparison of spatial and spectral image resolution for mapping invasive plants in coastal California. Environmental Management, 39: 64-65

Valliuns, M., Janssen, N. A., Heinrich, J. 2005. Sources and elemental composition of ambient PM (2.5) in three European cities. Science of the Total Environment, 33, 1-3: 147-162

- Van der Maaten E. 2013. Intra- and interannual growth responses of european beech (*Fagus sylvatica* L.) to climate, aspect and thinning in the Swabian Alb—southwestern Germany: Ph.D. thesis. Freiburg im Breisgau, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
- Van der Maaten E. 2012. Climate sensitivity of radial growth in European beech (*Fagus sylvatica* L.) at different aspects in southwestern Germany. *Trees*, 26: 777–788
- Van Jaarsveld F. 2008. Characterising and mapping of wind tranported sediment associated with opencast gypsum mining: thesis for the degree of Master of Science. South Africa, University of Stellenbosch
- Vilhar B. 2006. Fotosinteza pri pouku naravoslovja: seminar za učitelje naravoslovja. Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za biologijo: 54 str.
- Vranckx S., Vos P., Maiheu B., Janssen S. 2015. Impact of trees on pollutant dispersion in street canyons: a numerical study of the annual average effects in Antwerp, Belgium. *Science of the Total Environment*, 532: 474–483
- Vukadinović V. 1999. Ekofiziologija: interna skripta. Osijek, Poljoprivredni fakultet Osijek: 74 str.  
<http://ishranabilja.com.hr/literatura/ekofiziologija/ekofiziologija.pdf> (6. 6. 2013)
- Weber F., Kowarik I., Säumel I. 2014. Herbaceous plants as filters: Immobilization of particulates along urban street corridors. *Environmental Pollution*, 186: 234-240
- Wijayratne U.C., Scoles-Sciulla S.J., Defalco L.A. 2009. Dust Deposition Effects on Growth and Physiology of the Endangered *Astragalus jaegerianus* (Fabaceae). California Botanical Society. *Madrone*, 56, 2: 81-88
- Wittig R. 1993. General aspects of biomonitoring heavy metals by plants. V: Markert B. (ed). *Plants as biomonitor: indicators for heavy metals in the terrestrial environment*. Weinheim, Verlag Chemie: 3-27
- Wolch J.R., Byrne J., Newell J.P. 2014. Urban green space, public health, and environmental justice: the challenge of making cities »just green enough«. *Landscape and Urban Planning*, 125: 234–244
- Wuytack T., Verheyen K., Wuyts K., Kardel F., Adriaenssens S., Samson R. 2010. The potential of biomonitoring of air quality using leaf characteristics of white willow (*Salix alba* L.). *Environmental Monitoring and Assessment*, 171: 197-204

Yan X., Shi W., Zhao W., Luo N., 2015. Mapping dustfall distribution in urban areas using remote sensing and ground spectral data. *Science of the Total Environment*, 506-507: 604-612

Yang J., McBride J., Zhou J., Sun Z., 2005. The urban forest in Beijing and its role in air pollution reduction. *Urban Forestry & Urban Greening*, 3, 2: 65-78

Yeats T.H., Rose J.K.C. 2013. The formation and function of plant cuticles. *Plant Physiology*, 161: 5-20

Yin S., Shena Z., Zhouc Z., Zoua X., Chec S., Wang W. 2011. Quantifying air pollution attenuation within urban parks: An experimental approach in Shanghai, China. *Environmental Pollution*, 159: 2155–2163

Yoshimura H., Zhu H., Wu Y., Ma R. 2009. Spectral properties of plant leaves pertaining to urban landscape design of broad-spectrum solar ultraviolet radiation reduction. *International Journal of Biometeorology*, 54: 179–191

Younis U., Bokhari T.Z., Malik S.A., Ahmad S., Raja R. 2013. Variations in leaf dust accumulation, foliage and pigment attributes in fruiting plant species exposed to particulate pollution from Multan. *International journal of academic scientific research*, 3, 3: 1-12.

Zia-Khan S., Spreer W., Pengnian Y., Zhao X., Othmanli H., He X., Müller J. 2015. Effect of dust deposition on stomatal conductance and leaf temperature of cotton in Northwest China. *Water*, 7: 116-131

## ZAHVALA

Pričujoče delo ne bi nikoli ugledalo luči sveta brez vizije, vztrajnosti, potrpljenja, trdega dela in spodbud resnično srčne mentorice. Vsa zahvala, da sem vedno videl luč na koncu tunela, gre prof. dr. Alenki Gaberščik. Če bi moral sam prehoditi to pot, bi me že zdavnaj pokril prah. Resnično, hvala vam!

Za pomoč pri delu se zahvaljujem vsem sodelujočim s Katedre za ekologijo in varstvo okolja, Oddelka za biologijo, Biotehniške fakultete. Hvala za spodbude, konstruktivne razprave in pomoč pri delu v laboratoriju, statistični obdelavi podatkov, tolmačenju rezultatov in vzorčenju na terenu pod žgočim soncem, tudi v primeru, ko so se nam resnično majala tla pod nogami (miniranje v peskokopu Velika Pirešica). Še posebej bi se zahvalil dr. Katji Klančnik, Davidu Gradinjanu in Draganu Abramu. Brez vaše pomoči in podpore bi ta "misija" skoraj zagotovo postala – "misija nemogoče".

Zahvaljujem se kolektivu Drevesnice Omorika, še posebej direktorici Mariji Herman Planinšek in Vladimirju Planinšku za odstopljen prostor in strokovno pomoč pri izvedbi poskusa vpliva prahu na sadike bukve pod delno nadzorovanimi razmerami na proizvodnem polju drevesnice.

Zahvaljujem se tudi vsem članom komisije za oceno in spremljanje zagovora mojega podiplomskega dela, za njihov korekten in znanstven pristop s filigransko natančnostjo, s čimer so bistveno izboljšali preglednost vsebine dela in "tok besede".

Le slutim lahko, koliko odrekanja, prilagajanja, potrpljenja in ljubezni mi je darovala družina v obdobju, ko sem potreboval čas zase in za poglobljeno raziskovalno delo ... Tega verjetno ne bom nikoli popolnoma doumel. Vem, da mi je v času pisanja naloge pri starših (hotel Mama \*\*\*\*\*) sin Oskar skoraj odrasel (star 2 leti in pol) in žena Špela preživelu zimo in pomlad kot mati samohranilka. Vendar, kjer je volja, tam je pot. Zavedam pa se, da sem v času nastajanja tega dela tudi osebnostno zelo dozorel, in vem, da se bodo njegovi sadovi odražali pri mojem nadaljnjem delu.

To pot sem zaključil, pred menoj so novi izzivi življenja ... In "lažjih nog naokrog" jim vodim.

## PRILOGE

### Priloga A

#### REZULTATI MERITEV LETA 2011

V povprečju je bilo največ prahu na listih na lokaciji št. 2 in najmanj na referenčni lokaciji (lokacija št. 3) (Preglednica 1).

Preglednica 1: Količine prahu na listih bukev ( $\text{mg}/\text{dm}^2$ ) leta 2011

Črke a, b, c označujejo statistično značilne razlike.

<i>Lokacija: kamnolom Velika Pirešica - sezona 2011</i>	<i>Količina prahu (<math>\text{mg}/\text{cm}^2</math>)</i>	<i>SD</i>
1	0,01 <sup>b</sup>	$\pm 0,01$
2	0,09 <sup>a</sup>	$\pm 0,05$
3	0,001 <sup>c</sup>	$\pm 0,005$

## Priloga B

Povprečne vrednosti merjenih parametrov  $\pm$  standardna deviacija, n = 20, SLA – specifična listna površina

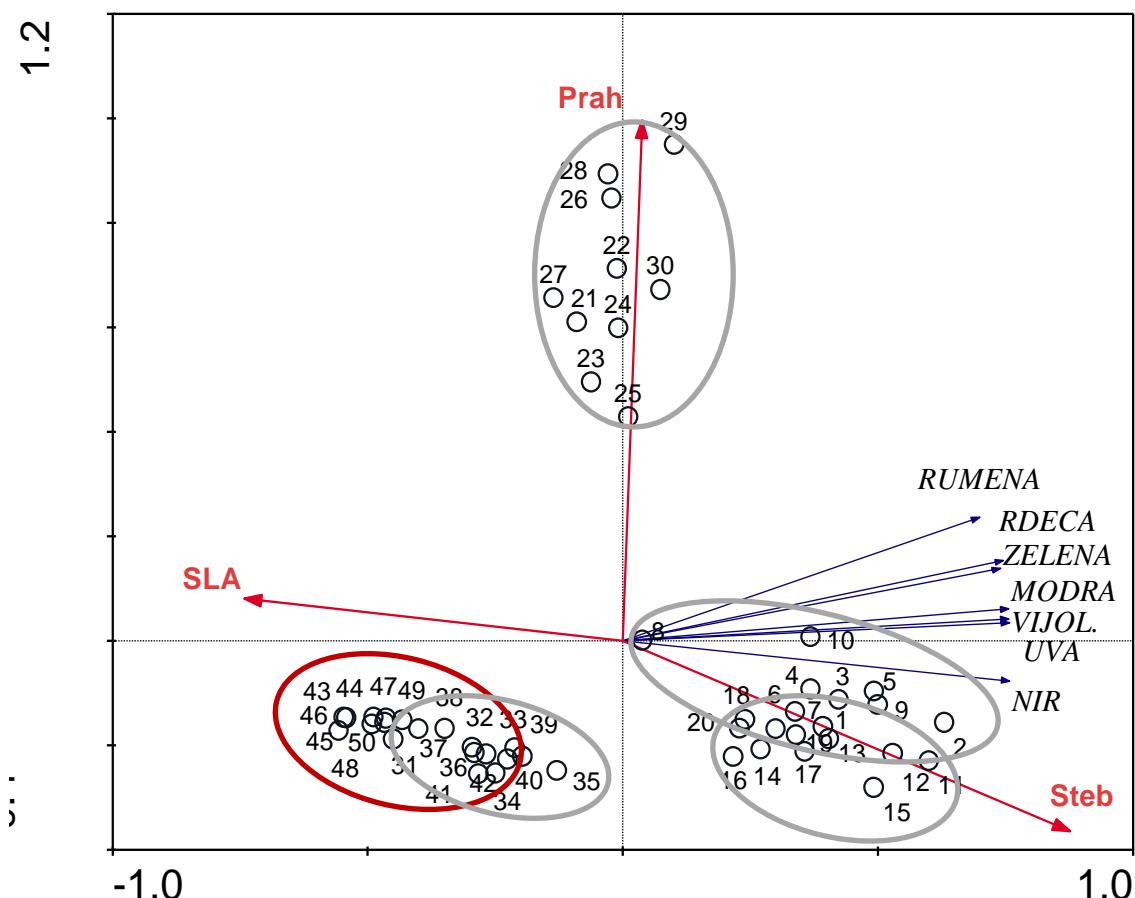
Parameter/lokacija	Lokacija 1	Lokacija 2	Lokacija 3
<b>ANATOMSKI PARAMETRI</b>			
Debelina lista (µm)	101 $\pm$ 10,3	84,8 $\pm$ 8,76	75,9 $\pm$ 14,1
Debelina kutikule (µm)	2,83 $\pm$ 0,51	2,86 $\pm$ 0,50	2,80 $\pm$ 0,66
Debelina zg. povrhnjice (µm)	9,77 $\pm$ 1,09	8,38 $\pm$ 1,47	7,18 $\pm$ 1,11
Debelina sp. povrhnjice (µm)	7,81 $\pm$ 0,58	7,85 $\pm$ 1,54	8,65 $\pm$ 0,85
Stebričasto tkivo (µm)	35,3 $\pm$ 5,92	28,6 $\pm$ 4,44	26,6 $\pm$ 4,25
Gobasto tkivo (µm)	45,5 $\pm$ 6,09	37,2 $\pm$ 5,41	30,8 $\pm$ 9,25
SLA (cm <sup>2</sup> /g)	230 $\pm$ 63,9	281 $\pm$ 45,6	360 $\pm$ 72,6
<b>Zgornja povrhnjica</b>			
Število listnih rež na mm <sup>2</sup>	2,11 $\pm$ 3,82	0,32 $\pm$ 1,42	-
Širina listnih rež (µm)	1,29 $\pm$ 2,59	0,13 $\pm$ 0,59	-
Dolžina listnih rež (µm)	1,22 $\pm$ 2,39	0,19 $\pm$ 0,85	-
<b>Spodnja povrhnjica</b>			
Število listnih rež na mm <sup>2</sup>	206 $\pm$ 30,2	199 $\pm$ 54,3	137 $\pm$ 30,4
Širina listnih rež (µm)	14,1 $\pm$ 1,95	14,5 $\pm$ 1,89	19,5 $\pm$ 1,54
Dolžina listnih rež (µm)	17,7 $\pm$ 3,49	17,6 $\pm$ 2,69	22,3 $\pm$ 1,15
<b>BIOKEMIJSKI PARAMETRI</b>			
Antociani na površino vzorca (relativna enota mg dm <sup>-2</sup> )	39,2 $\pm$ 4,79	33,1 $\pm$ 9,83	78,5 $\pm$ 30,6
Antociani na maso vzorca (relativna enota/SS (mg)	89,6 $\pm$ 22,1	94,3 $\pm$ 21,9	104 $\pm$ 22,3
Klorofil a na površino vzorca (mg dm <sup>-2</sup> )	2,16 $\pm$ 0,36	1,78 $\pm$ 0,66	1,28 $\pm$ 0,38
Klorofil a na maso vzorca (mg/g SS)	4,96 $\pm$ 1,44	4,94 $\pm$ 1,56	4,55 $\pm$ 1,30
Klorofil b na površino vzorca (mg dm <sup>-2</sup> )	0,96 $\pm$ 0,29	0,68 $\pm$ 0,23	0,54 $\pm$ 0,17
Klorofil b na maso vzorca (mg/g SS)	2,26 $\pm$ 0,80	1,85 $\pm$ 0,76	1,92 $\pm$ 0,67
Karotenoidi na površino vzorca (mg dm <sup>-2</sup> )	0,65 $\pm$ 0,15	0,46 $\pm$ 0,11	0,36 $\pm$ 0,13
Karotenoidi na maso vzorca (mg/g SS)	1,40 $\pm$ 0,32	1,31 $\pm$ 0,36	1,28 $\pm$ 0,41
UV-A-absorbirajoče snovi na površino vzorca (relativna enota cm <sup>-2</sup> )	9,46 + 1,80	9,20 + 3,06	7,41 + 2,05
UV-A-absorbirajoče snovi na maso vzorca (relativna enota/ SS (mg)	2,22 $\pm$ 0,64	2,59 $\pm$ 0,58	2,89 $\pm$ 1,53
UV-B-absorbirajoče snovi na površino vzorca (relativna enota cm <sup>-2</sup> )	9,38 $\pm$ 2,38	9,20 $\pm$ 3,06	7,41 $\pm$ 2,05
UV-B-absorbirajoče snovi na maso vzorca (relativna enota/ SS (mg)	2,11 $\pm$ 0,62	2,53 $\pm$ 0,64	2,11 $\pm$ 0,95

## Priloga C

Razlike med pari različnih lastnosti listov bukve (*Fagus sylvatica* L.) na izbranih lokacijah, podane s Tukeyjevim testom oz. neparametričnim Kruskal-Wallisovim testom; \*  $p \leq 0,05$ , \*\*  $p \leq 0,01$ , ns – ni statistično značilnih razlik, SLA – specifična listna površina.

Parameter/primerjani tereni	1 in 2	1 in 3	2 in 3
<b>ANATOMSKI PARAMETRI</b>			
Debelina lista	**	**	*
Debelina kutikule	ns	ns	ns
Debelina zg. povrhnjice	**	**	*
Debelina sp. povrhnjice	ns	ns	ns
Stebričasto tkivo	**	**	ns
Gobasto tkivo	**	**	**
SLA	ns	**	*
<b>Zgornja povrhnjica</b>			
Število listnih rež	ns	ns	ns
Širina listnih rež	ns	ns	ns
Dolžina listnih rež	ns	ns	ns
<b>Spodnja povrhnjica</b>			
Število listnih rež	ns	**	**
Dolžina listnih rež	n	**	**
Širina listnih rež	s	**	**
<b>BIOKEMIJSKI PARAMETRI</b>			
Antociani na površino vzorca	*	**	**
Antociani na maso vzorca	ns	ns	ns
Klorofil <i>a</i> na površino vzorca	**	**	**
Klorofil <i>a</i> na maso vzorca	ns	ns	ns
Klorofil <i>b</i> na površino vzorca	*	**	ns
Klorofil <i>b</i> na maso vzorca	ns	ns	ns
Karotenoidi na površino vzorca	**	**	**
Karotenoidi na maso vzorca	ns	ns	ns
UV-A-absorbirajoče snovi na površino vzorca	ns	*	ns
UV-A-absorbirajoče snovi na maso vzorca	ns	ns	ns
UV-B-absorbirajoče snovi na površino vzorca	ns	*	ns
UV-B-absorbirajoče snovi na maso vzorca	ns	ns	ns

## Priloga D



Slika 54: Ordinacijski diagram redundantne analize (RDA) variabilnosti odbojnih spektrov vzorcev bukev leta 2011 (Grobelšek, 2013)  
 RDA prikazuje statistično značilne parametre, ki pojasnjujejo variabilnost odbojnih spektrov (1–10: lokacija 1 (list s prahom), 11–20: lokacija 1 (list brez prahu), 21–30: lokacija 2 (list s prahom), 31–40: lokacija 2 (list brez prahu), 41–50: lokacija 3 – referenčna lokacija).

*Figure 54: The redundancy analysis (RDA) shows statistically significant parameter ( $p < 0.01$ ) explaining the variability of the reflectance spectra in 2011.*

Redundantna analiza je pokazala, da 3 od merjenih parametrov značilno vplivajo na variabilnost odbojnih spektrov in skupaj razložijo 58 % njihove variabilnosti (Preglednici 3 in 4). Pri tem debelina stebričastega tkiva razloži 44 %, prisotnost prahu na listu 9 % in specifična listna površina 5 % variabilnosti spektrov. Pri razporeditvi različnih skupin listov vzdolž parametrov se nakazuje tudi obremenjenost različnih lokacij s prahom. Pozitivna korelacija med spektri in debelino stebričastega tkiva ter obratno sorazmerje s SLA nakazujeta pomemben vpliv strukture lista (Slika 54).