

GDK: 425.1+101--015.4(497.12 Šoštanj)(045)

Prispelo / Received: 04. 04. 2006

Sprejeto / Accepted: 26. 09. 2006

Izvirni znanstveni članek

Original scientific paper

BIOMONITORING GOZDNEGA EKOSISTEMA V IMISIJSKEM OBMOČJU TERMoeLEKTRARNE ŠOŠTANJ

Samar AL SAYEGH PETKOVŠEK¹, Franc BATIČ², Cvetka RIBARIČ LASNIK³

Izvleček

Z dolgoletnimi raziskavami gozdnega ekosistema smo želeli oceniti fiziološko stanje smreke (*Picea abies* (L.) Karst.) na osnovi meritev fizioloških parametrov v iglicah smrek vplivnega območja Termoelektrarne Šoštanj (TEŠ). V članku prikazujemo rezultate meritev celokupnega žvepla, fotosintetskih pigmentov, askorbinske kisline (vitamin C) in α -tokoferola (vitamin E) v iglicah tekočega letnika sedmega vretena 60- do 100-letnih smrek, vzorčenih v jesenskem obdobju tekočega leta. Izbranih je bilo 10 različno onesnaženih vzorčnih mest: Lajše, Topolšica, Laze, Veliki Vrh, Graška gora, Zavodnje, Brneško sedlo, Kramarica, Kope in Smrekovec, izpostavljenih predvsem imisijam žveplovega dioksida, dušikovega oksida in ozonu. Rezultati so pokazali, da se stanje smreke izboljšuje zaradi zgrajenih čistilnih naprav na bloku 4 (1995) in 5 TEŠ (2000). Del nepojasnjenih nihanj vrednosti preučevanih parametrov je po vsej verjetnosti posledica delovanja klimatskih razmer v tem obdobju.

Ključne besede: iglice smrek, celokupno S v iglicah, askorbinska kislina, α -tokoferol, klorofil a in b, termoelektrarna Šoštanj, emisije SO₂

BIOMONITORING OF FOREST ECOSYSTEM IN THE EMISSION AREA OF THE THERMAL POWER PLANT ŠOŠTANJ

Abstract

The aim of the long standing forest ecosystem research was to assess the physiological state of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) on the basis of the needle biochemical parameters in the area influenced by sulphur emissions from the Šoštanj Thermal Power Plant (ŠTPP). The total sulphur content, photosynthetic pigments, ascorbic acid (vitamin C) and α -tocopherol (vitamin E) were analysed in current and one year old needles from the seventh whorl from the top in five 60-100 year old spruce trees in autumn every year; the results of current needles are presented in this paper. Ten differently polluted sampling plots were selected in profile: Lajše, Topolšica, Laze, Veliki Vrh, Graška gora, Zavodnje, Brneško sedlo, Kramarica, Kope and Smrekovec. Dominant air pollutants were sulphur dioxides, nitrogen oxides and ozone. Results show that the condition of Norway spruce has improved since 1995 and particularly since 2000 due to installation of desulphurization devices on Units 4 and 5 of the TPPŠ, part of unexplained fluctuations in investigated parameters are most probably consequences of variations in climatic conditions.

Key words: needles of Norway spruce, total sulphur, ascorbic acid, α -tokoferol, photosynthetic pigments, Šoštanj Thermal Power Plant, emissions of SO₂

INTRODUCTION

UVOD

Sredi osemdesetih let prejšnjega stoletja so tudi v Šaleški dolini zaznali propadanje gozdov, še zlasti iglavcev (KOLAR 1989, FERLIN 1990, RIBARIČ LASNIK 1991). Propadanje gozdov enačimo s pojemanjem vitalnosti oziroma rastne moči gozdov in z zmanjševanjem sposobnosti gozdnega ekosistema za opravljanje vseh svojih ekoloških, proizvodnih in socialnih

funkcij (JURC / BOGATAJ 1994, HOČEVAR / MAVSAR / KOVAČ 2002). Težko ga je ločiti od naravnega odmiranja, drugih poškodb in bolezni, zato lahko učinke onesnaženega okolja prepoznamo predvsem z dolgotrajnim opazovanjem gozdnega ekosistema. Drevje propada posamično, poleg propadajočih dreves najdemo zdrava drevesa, le redko propadajo celotni sestoji, celoten proces pa ni omejen le na bližino virov onesnaževanja, temveč ima globalen značaj. Zdravstveno sta-

¹ mag., S.A.P, ERICo Velenje, Inštitut za ekološke raziskave, Koroška 58, 3320 Velenje, e-mail: samar.petkovsek@erico.si

² prof. dr. F.B., Univerza v Ljubljani, Biotehniška Fakulteta, Oddelek za agronomijo, Jamnikarjeva 101, 1000 Ljubljana

³ doc. dr. C.R.L., Inštitut za okolje in prostor, Ipavčeva 18, 3000 Celje

nje gozdov ni odvisno le od okolja, marveč ga oblikuje tudi gozdar-gojitelj z redno in sanitarno sečnjo najbolj poškodovanih dreves in varstvenimi ukrepi (HOČEVAR / MAVSAR / KOVAČ 2002). Stres, ki nastane zaradi onesnaženega zraka (antropogeni stres), je bistveni dejavnik pri umiranju gozdov. Ne vemo natančno, ali je stres sprožilni dejavnik propadanja gozdov, ali tisti, zaradi katerega postane drevo občutljivejše na druge stresne dejavnike (JURC / BOGATAJ 1994, BATIČ 2005). Za ocenjevanje in spremljanje stanja gozdnega ekosistema v okolici Termoelektrarne Šoštanj (TEŠ) je bila izbrana smreka (*Picea abies* (L.) Karst.), kot najpogostejša in najbolj poškodovana drevesna vrsta v Šaleški dolini in kot uspešno uporabljen kazalec vpliva onesnaženega zraka na gozdove (BATIČ 1994, 1997, BERMADINGER-STABENTHEINER 1995, RIBARIČ LASNIK *et al.* 1999 a,b, 2001, VIDERGAR GORJUP / STRNIŠA / BATIČ 2000, BATIČ *et al.* 1995, 2001, SIMONČIČ 1996, 2001, FÜRST / SMIDT / HERMAN 2003, MODRZYNSKI 2003).

Termoelektrarna Šoštanj je največji proizvajalec električne energije v Sloveniji. Zgradili so jo v neposredni bližini premogovnika Velenje na 300 m nadmorske višine, na dnu predalpske doline v osrednjem delu Slovenije. Zahodna pobočja doline dosežejo 1550 m, medtem ko so vzhodna precej nižja in dosežejo le 900 m nadmorske višine. Dolina je dobro prezračena. Zrak ostane nepremešan samo v času stabilnih anticiklonskih vremenskih razmer. Pojavlja se prizemna temperaturna inverzija od 100 – 150 m nad dnom doline in temperaturna inverzija na višini od 1000 do 1200 m (LEŠNJAK *et al.* 1989, RIBARIČ LASNIK 1996). Termoelektrarna proizvaja električno energijo že dobrih štirideset let, hkrati pa onesnažuje okolje predvsem z SO₂, težkimi kovinami, NO_x in prašnimi delci. Zaradi izredno velikih emisij SO₂ iz TEŠ (ki so se v letih od 1990-1995 gibale med 80.000 in 90.000 t SO₂, v letu 1983 pa so dosegle celo 120.000 t) je bil sprejet ekološki sanacijski program, katerega najpomembnejši fazi sta bili graditev popolnega razžveplanja dimnih plinov bloka 4 v letu 1995 in bloka 5 v letu 2000 (VRTAČNIK / RIBARIČ LASNIK 2001). Letna emisija SO₂ se je po postavitvi razžvepljevalne naprave na bloku 4 zmanjšala na 51.000 ton, po postavitvi čistilne naprave na bloku 5 pa se je zmanjšala na okoli 8.000 t v letu 2004.

Raziskave gozdnega ekosistema vplivnega območja TEŠ potekajo od leta 1988. V prvem sklopu raziskav (1988 – 1990) je bilo izbranih 22 vzorčnih mest, ki spadajo v imi-

sijsko območje TEŠ. Poleg 10 stalnih vzorčnih mest (preglednica 1) so bile dodane še naslednje lokacije: Komisija, Razbor, Smrekovec - koča, Paški Kozjak - Špik, Brloška planota, Slanica, Mrakovnik, Stanovšek, Lokovica, Šmiklavž, Podgorje in Adraž nad Polzelo. V obdobju do leta 1991 so bile v iglicah smrek opravljene analize vsebnosti celokupnega žvepla, fotosinteznih pigmentov (klorofil a, b, karotenoidi, feofitin a, b), poškodovanost biomembran pa so določili z meritvami električne prevodnosti vodne raztopine, v kateri so stresali smrekove iglice (RIBARIČ LASNIK 1991). Po letu 1991 smo nekatere parametre izpustili (feofitini), druge pa dodali (askorbinska kislina, zeaksantin, lutein, vodotopni tioli, encim peroksidaza). V članku prikazujemo rezultate za parametre, ki smo jih izbrali glede na dokazano primernost (podatki iz lastne raziskave) za spremljanje stanja gozdnega ekosistema in glede na dolgo obdobje, za katero smo pridobili podatke o omenjenih parametrih (celokupno žveplo, klorofil a in b, askorbinska kislina in α -tokoferol).

MATERIAL IN METODE MATERIAL AND METHODS

V imisijskem območju Termoelektrarne Šoštanj smo na desetih lokacijah, ki se razlikujejo po nadmorski višini, oddaljenosti od TEŠ, razmerju hranil v iglicah, rodovitnosti tal in stopnji poškodovanosti gozdov (preglednica 1), vzorčili iglice smreke v jesenskem obdobju po metodologiji, opisani v priporočilih ICP-Forest (ANONYMOUS 1987). Na omenjenih lokacijah smo letno spremljali stanje smreke kot bioindikatorskega organizma z merjenjem vsebnosti antioksidantov (vitamin C in E) in drugih parametrov (celokupno žveplo, klorofil a in b) v iglicah tekočega letnika in enoletnih iglicah, nabranih z vej sedmega vretena izbranih smrek (po pet vitalnih smrek v starosti od 60 do 100 let na posamezno lokacijo). V članku predstavljamo rezultate analiz fizioloških parametrov v iglicah tekočega letnika smrek in skupne razrede žvepla za tekoči letnik in enoletne iglice. Iglice smo ločili po letnikih, jih liofilizirali in zmleli. Vsebnosti klorofilov, vitamina C in E so bile izmerjene z metodo gradientne visokoločljive tekočinske kromatografije HPLC (High Performance Liquid Chromatography) po metodah, opisanih v PFEIFHOFER (1989), BUI-NGUYEN (1980), WIMANLASIRI / WILLS (1983) in GRILL / ESTERBAUER (1973). Celokupno žveplo (S) smo

Preglednica 1: Opis vzorčnih lokacij (vir: RIBARIČ LASNIK 1996)

Table 1: Description of sampling sites.

Lokacija / Location	Lega glede na TEŠ (km) / Position	Nadmorska višina (m) / Altitude	N/S v iglicah (1992)*** / N/S in needles	Rodovitnost tal (1992) / Soil fertility	Osutost smrek (%)*; (1993) / Defoliation of spruce
Lajše	3,7 (SV)	400	5,4	dobra	54,2
Topolšica	5,4 (SZ)	400	5,4	dobra	37,5
Laze	5,7 (JZ)	460	8,1	dobra	8,3
Veliki Vrh	3,5 (JV)	570	4,4	dobra	II. razred**
Graška gora	7,6 (SV)	730	7,3	srednje-slabša	II. razred**
Zavodnje	7,6 (SZ)	760	6,0	srednja	50,0
Brneško sedlo	18,1 (SV)	1030	8,7	slabša	75,0
Kramarica	12,7 (SZ)	1070	6,1	srednja	29,2
Kope	17,5 (SV)	1400	10,8	slabša	29,2
Smrekovec	14,6 (SZ)	1555	8,6	slaba	41,6

Legenda: * Z indeksom je prikazan povprečen delež očitno osutih smrek (nad 25 %) za leto 1993 (vir: RIBARIČ LASNIK 1996); ** II. razred poškodovanosti pomeni, da so v sestojih znatne poškodbe (povprečna osutost med 26 % in 60 %) (vir: KOLAR 1989). *** Razmerje N/S > 8 je normalno razmerje med N in S v smrekovih iglicah.

Note: *Defoliation index represents the average percentage of trees with defoliation above 25 % in the year 1993 (RIBARIČ LASNIK 1996). **II. class (the second defoliation grade) - considerable defoliation of spruce stand (the percentage of defoliation is between 26 and 60) (KOLAR 1989). *** The ratio value N/S > 8 is normal for Norway spruce needles.

določili z AOK-S analizatorjem z metodo kulometrične titracije (EUROGLASS RESEARCH 1998).

Rezultati za posamezno lokacijo vključujejo povprečje 5 smrek, vzorčenih na izbranih lokacijah. Za izračun povprečnih vrednosti, standardnih odklonov (SD) in izris grafov smo uporabili računalniški program *Microsoft Excel*. Soodvisnosti med parametri smo izračunali s programskim paketom *Statistica for Windows 5.5* (STATSOFT 1999), z izračunom *Spearmanovega koeficienta linearne regresije (r)* kot statistično značilno smo privzeli rezultate, če je bila velikost statističnega tveganja $p < 0,05$.

REZULTATI IN RAZPRAVA RESULTS AND DISCUSSION

VSEBNOSTI CELOKUPNEGA ŽVEPLA TOTAL SULPHUR CONTENT

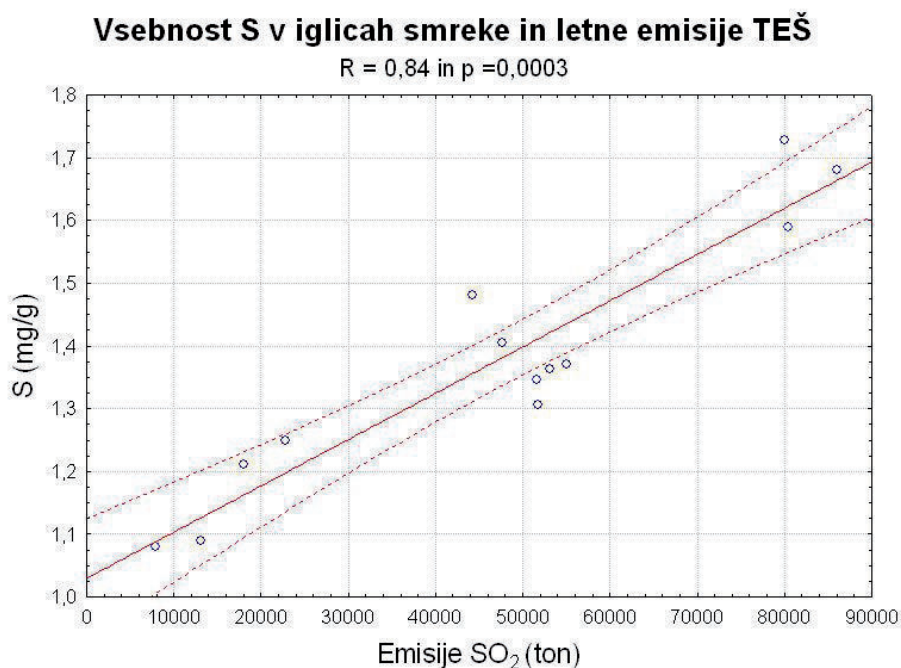
Z merjenjem celokupnega žvepla v iglicah smreke lahko spremljamo in dokažemo obremenjenosti okolja z žveplivim dioksidom. Z izračunom povprečnih letnih vsebnosti ugotovljamo trende v onesnaženosti, saj je soodvisnost med letnimi emisijami SO₂ iz TEŠ (1991-2004) in povprečnimi letnimi

vsebnostmi S v iglicah tekočega letnika smrek, vzorčenih v imisijskem območju TEŠ, visoko značilna (slika 1).

Glede na celokupno vsebnost žvepla v iglicah, drevesa smrek razvrščamo v štiri razrede. Iglice smrek, ki so v 1. razredu, imajo naravno vsebnost žvepla (< 0,97 mg/g); pri drevesih v 2. razredu je naravna vsebnost nekoliko povečana in še ne pričakujemo poškodb drevja zaradi žveplivih spojin (0,97 mg/g-1,24 mg/g); v 3. (1,24-1,58 mg/g) in 4. razredu (>1,58 mg/g) (označeno v grafu 2) pa so te poškodbe že pričakovane in pogostejše (KALAN / KALAN / SIMONČIČ 1995).

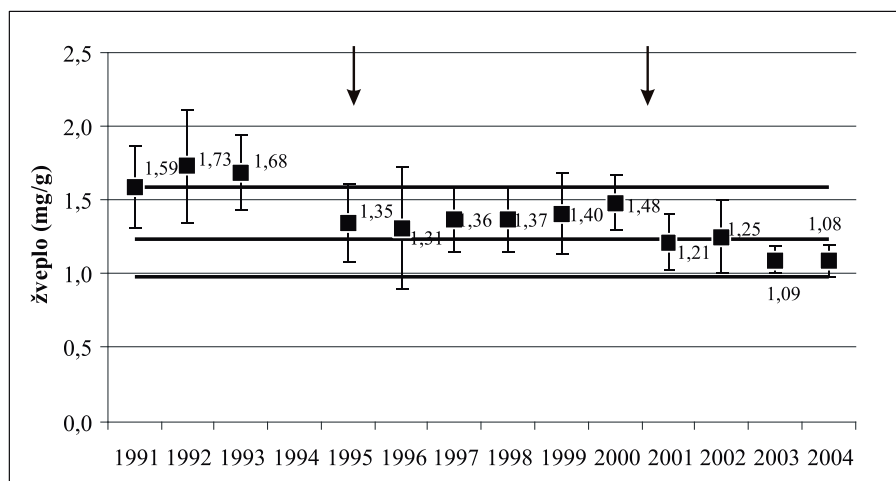
Pred začetkom obratovanja čistilne naprave na 4. bloku TEŠ so bile letne povprečne vsebnosti celokupnega žvepla v 4. razredu, med letoma 1995 do 2000 v 3. razredu in nato po ponovnem zmanjšanju emisij SO₂ v 2. razredu, kjer pa vsebnosti celokupnega žvepla še vedno presegajo naravno vsebnost žvepla (slika 2). Pregled uvrstitev posameznih lokacij v razrede prikazujemo v preglednici 2, kjer se kaže vpliv uspešnega obratovanja čistilnih naprav na zmanjšanje kopičenja žvepla v iglicah smrek, vzorčenih na posameznih lokacijah. Najbolj obremenjene lokacije v vseh letih raziskav so v neposredni bližini TEŠ (Lajše, Topolšica, Veliki Vrh) in na območju zgornje temperaturne inverzije (Zavodnje).

V letu 2004 ni bila nobena od izbranih lokacij uvrščena v 4. razred. V tretjem razredu so lokacije Lajše, Topolšica in



Slika 1: Linearna korelacija med letnimi emisijami SO_2 iz TEŠ in povprečnimi vsebnostmi žvepla v iglicah tekočega letnika za obdobje 1991-2003 ($n = 13$).

Fig. 1: The correlation between the average annual emissions of SO_2 and the average annual sulphur content in current-year needles in the 1991-2003 period.



Slika 2: Povprečna letna vsebnost celokupnega žvepla v iglicah tekočega letnika s standardnim odklonom (SD). S puščicama smo označili začetek obratovanja čistilne naprave na 4. bloku (februar 1995) in 5. bloku TEŠ (november 2000). S črtami so označene mejne vsebnosti glede na celokupno žveplo v iglicah tekočega letnika (I. razred: $< 0,97$ mg/g; II. razred: $0,97$ - $1,24$ mg/g; III. razred: $1,24$ - $1,58$ mg/g; IV. razred: $> 1,58$ mg/g).

Fig. 2: Annual mean concentration and standard deviation (SD) of total sulphur in current-year needles from spruce trees sampled in the 1991-2004 period in the emission area of Šoštanj Thermal Power Plant. The arrows mark the years in which desulphurization devices were installed (Unit 4 in February 1995 and Unit 5 in November 2000). The limit levels of sulphur content classes in current-year spruce needles are presented with lines (I. class: $< 0,97$ mg/g; II. class: $0,97$ - $1,24$ mg/g; III. class: $1,24$ - $1,58$ mg/g; IV. class: $> 1,58$ mg/g).

Preglednica 2: Skupni razredi žvepla v iglica smreke na posamezni lokaciji v obdobju 1991-2004.

Table 2: Common classes of total sulphur content in current and one year old needles on selected sampling sites in the 1991-2004 period.

Lokacija (Location) / Letnica (Year)	91	92	93	95	96	97	98	99	00	01	02	03	04
Lajše	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	3	3
Topolšica	4	4	4	4	3	3	3	4	4	3	3	3	3
Laze	3	3	4	2	3	3	3	1	2	1	2	1	1
Veliki Vrh	4	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	3	2
Graška gora	3	3	4	-	-	3	3	3	3	2	2	2	3
Zavodnje	4	4	4	4	4	3	3	3	4	3	3	3	2
Brneško sedlo	3	3	3	2	3	3	2	2	3	2	2	1	1
Kramarica	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	2	2	1
Kope	3	3	3	1	3	3	2	2	2	3	2	1	1
Smrekovec	3	3	3	2	3	2	2	3	2	2	2	2	2

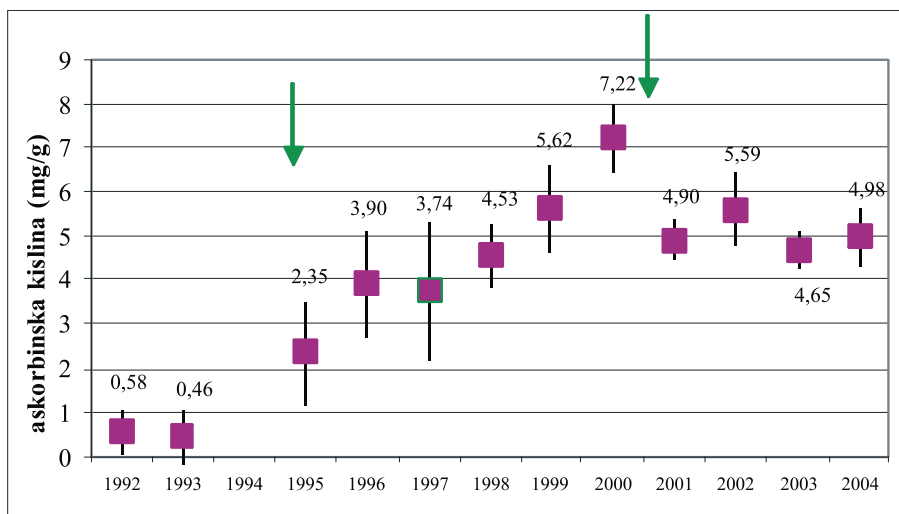
Legenda: oznaka – pomeni, da ni podatka. Note: - indicates that no measurements were made.

Graška gora, območja povečanih imisij, kjer se že pojavljajo vidne poškodbe na drevju. Veliki Vrh in Zavodnje sta v letu 2004 prvič uvrščena v 2. razred, in sicer zaradi manjših imisij SO₂ v primerjavi z letom poprej. V prvem razredu so Kramarica, Brneško sedlo, Kope in Laze; torej analizirane smreke s teh lokacij v iglicah ne kopičijo žvepla.

VSEBNOST ANTIOKSIDANTOV

THE ANTIOXIDANT CONTENT

Za določitev stresa v iglicah so uporabne meritve antioksidantov, ki so zgodnji, občutljivi in specifični bioindikatorji stresnih razmer (MEHLHORN *et al.* 1986, LARCHER 1995,



Slika 3: Povprečna vsebnost askorbinske kisline s standardnim odklonom (SD) v iglicah tekočega letnika smrek, vzorčenih v imisijskem območju TEŠ v obdobju 1991-2004. S puščicama smo označili začetek obratovanja čistilnih naprav (1995 in 2000).

Fig. 3: The annual mean concentration of ascorbic acid with standard deviation (SD) in current-year spruce needles sampled in the 1992-2004 period in the emission area of ŠTTP. The arrows mark the years in which desulphurization devices were installed (Unit 4 in February 1995 and Unit 5 in November 2000).

CROSS *et al.* 1998, PERL-TREVES / PERL 2002, FRÄNZLE 2003). Stres povzročajo stresni dejavniki antropogenega (zračno onesnaževanje) in naravnega izvora (suša, bolezni...). V grafih 3 in 4 prikazujemo izmerjene vsebnosti askorbinske kisline (vitamin C) in α -tokoferola (vitamin E). Med emisijami SO_2 in povprečnimi vsebnostmi askorbinske kisline obstaja statistično visoko značilna negativna soodvisnost ($r = -0,78$ in $p = 0,007$). Vsebnost askorbinske kisline z zmanjšanjem emisij narašča, kar je nasprotno od pričakovanega. Praviloma velja, da rastline v stresu povečujejo svojo obrambno sposobnost s povečano tvorbo antioksidantov; poročajo tudi o izjemah, ko so se vsebnosti antioksidantov pod vplivom SO_2 zmanjševale (GRILL / ESTERBAUER / WELT 1979, BERGMADINGER / GUTTENBERGER / GRILL 1990).

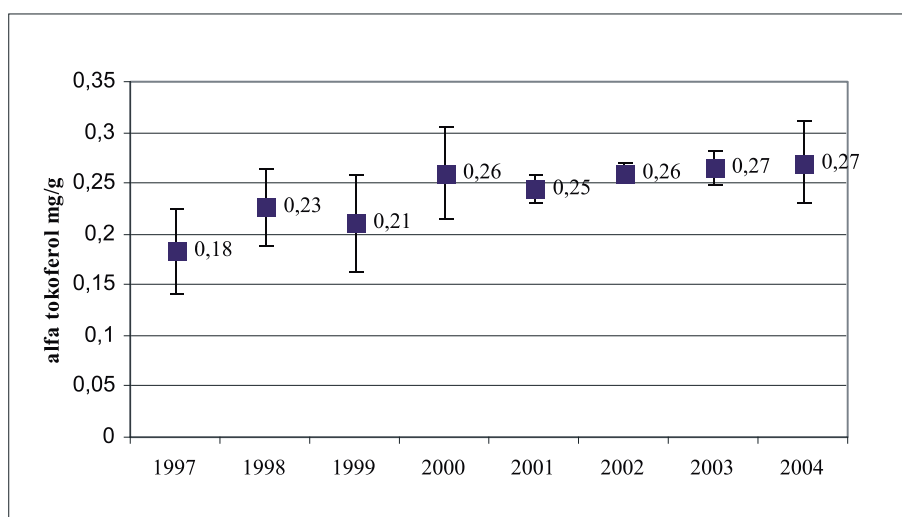
V iglicah smrek imisijskega območja TEŠ so bile vsebnosti askorbinske kisline do postavitve prve čistilne naprave izredno majhne, kar kaže na hud stres, pri katerem se spremeni mehanizem obrambnih aktivnosti. Šele po zmanjšanju emisij SO_2 za 30.000 ton letno (po letu 1995) je prišlo do naraščanja obrambnih sposobnosti smreke; po letu 2001 se je vrednost stabilizirala med 4-5 mg/g (slika 3). Netipični odziv askorbinske kisline kaže na dolgotrajno izpostavljenost smrek zelo velikim emisijam SO_2 (BATIČ *et al.* 2001).

Vsebnosti drugega antioksidanta (α -tokoferola) z leti nekoliko naraščajo ($r = -0,78$; $p = 0,03$; $n = 7$). Tudi razmer-

je med obema antioksidantoma je večje od 10, kar kaže na učinkovitejšo obrambno sposobnost smreke od 1997 dalje (za obdobje prej nimamo podatkov za α -tokoferol).

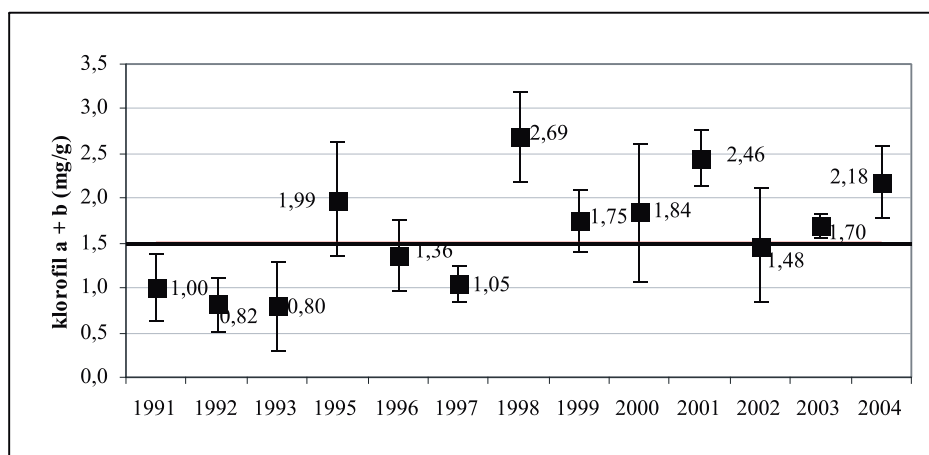
VSEBNOST FOTOSINTEZNIH PIGMENTOV THE CONTENT OF PHOTOSYNTHETIC PIGMENTS

Poleg vsebnosti antioksidantov nam fiziološko stanje smreke dobro prikazuje vsebnost klorofilov. Pod vplivom zračnih onesnaževalcev in drugih stresnih dejavnikov (npr. vpliv nadmorske višine) se vsebnosti klorofila a in b zmanjšujejo (KÖSTNER *et al.* 1990, BATIČ *et al.* 2001). Pri tem je odločilni stresni dejavnik SO_2 , kar potrjuje korelacija med letnimi emisijami SO_2 in vsoto obeh klorofilov ($r = -0,61$; $p = 0,03$ in $n = 13$). Podrobnejša analiza rezultatov s posameznih lokacij, za katere so na voljo ustrezni podatki istega obdobja, kaže, da povečane imisije SO_2 statistično vplivajo na manjšo vsebnost klorofilov na lokaciji Zavodnje in Graška gora (Zavodnje: $r = -0,68$; $p = 0,021$; $n = 11$, Graška gora: $r = -0,81$; $p = 0,05$; $n = 6$). Povprečne letne vsebnosti vsote obeh klorofilov nad 1,5 mg/kg dokazujejo dobro vitalnost smrek (KÖSTNER / CZYGAN / LANGE 1990) (slika 5). Od leta 1998 vsota klorofilov presega omenjeno vrednost (z izjemo leta 2002).



Slika 4: Povprečne letne vsebnosti α -tokoferola s standardnimi odkloni (SD) v iglicah tekočega letnika smrek, vzorčenih v imisijskem območju TEŠ v obdobju 1991-2004.

Fig. 4: The annual mean concentration and standard deviation (SD) of α -tocopherol in current-year needles from spruce sampled in the 1997-2004 period in the emission area of ŠTTP.



Slika 5: Povprečne letne vsebnosti vsote klorofilov (a + b) s standardnimi odkloni (SD) v iglicah tekočega letnika smreke. S črto je označena mejna vrednost (1,5 mg/g).

Fig. 5: The annual mean concentration of total chlorophyll (a + b) and standard deviation (SD) in current-year needles in the emission area of ŠTPP. The limit value is presented with line (1.5 mg/g).

ZAKLJUČKI CONCLUSIONS

Z raziskavo vsebnosti fizioloških parametrov v iglicah smrek, rastočih na 10 lokacijah vplivnega območja TEŠ, smo v obdobju 1991–2004 spremljali fiziološko stanje smreke in posledično učinkovitost delovanja čistilnih naprav. Zmanjšanje emisij SO₂ se je kazalo v manjših vsebnostih celokupnega žvepla v iglicah. V razredu z največjo vsebnostjo žvepla (4. razred) v zadnjih dveh letih (2003 in 2004) nimamo uvrščene nobene lokacije več. Še vedno so z imisijami SO₂ obremenjene lokacije v neposredni bližini termoelektrarne (Topolšica, Lajše, Veliki Vrh), kar potrjujejo naše meritve in dokazujejo ekološko upravičenost dokončne ekološke sanacije tehnološko dotrajanih blokov (1-3).

Štiri lokacije (Laze, Brneško sedlo, Kramarica in Kope) sodijo v razred z naravno vsebnostjo žvepla. Če bodo tudi v nadaljnjih letih v istem razredu, bomo lahko z veliko verjetnostjo trdili, da se vplivno območje TEŠ, ki se širi tudi v sosednjo Avstrijo (FÜRST / SMIDT / HERMAN 2003), zmanjšuje.

V obdobju zmanjšanja emisij SO₂ in težkih kovin smo zaznali spremembe v fizioloških parametrih opazovanih smrek. Spremljali smo vsebnosti antioksidantov in pigmentov, ki sta kazalca stresnih razmer. V obdobju največjega onesnaževanja (do leta 1995) smo izmerili zelo majhne vsebnosti askorbinske

kislina, kar kaže na porušenje normalnega obrambnega mehanizma in majhne vsebnosti klorofilov, ki so rezultat slabše vitalnosti preučevanih smrek. V soodvisnosti od zmanjševanja emisij (v obdobju, ko so se le-te ustalile na okoli 50.000 ton letno) so vsebnosti askorbinske kisline naraščale. Ugotovitev sicer ni skladna s pričakovanim odzivom na stresne razmere, ki povečujejo tvorbo antioksidantov, vendar dokazuje, da so bile opazovane smreke vendarle sposobne revitalizacije, oziroma da so bile poškodbe še v okviru njihove reakcijske sposobnosti (elastične reakcije na stres). Vsota klorofila a in b po letu 1997 presega mejno vrednost (1,5 mg/g) in potrjuje njihovo povečano vitalnost. Zaključimo lahko, da je fiziološko stanje smrek ugodnejše, smreke so vitalnejše in njihova obrambna sposobnost večja.

V petnajstih letih opravljanja raziskav smo le-te preoblikovali v biomonitoring. Na desetih stalnih mestih v imisijskem območju TEŠ letno spremljamo izbrane fiziološke parametre. Za vse izbrane parametre in še zlasti za celokupno žveplo smo dokazali soodvisnost med njihovo vsebnostjo v iglicah in emisijami SO₂. Celokupno žveplo v iglicah je neposreden kazalec obremenjenosti okolja z SO₂ in odličen pripomoček za spremljanje trendov v onesnaževanju. Drugi parametri (antioksidanti, pigmenti) predvsem opisujejo fiziološko stanje smreke, ki je skupek vseh vplivov in ne le onesnažena zrak. Prednost izbranih bioindikatorjev je sintezni prikaz vpliva vseh stresnih dejavnikov, tako naravnih kot antropoge-

nih. V prihodnje pričakujemo povečane vsebnosti S v iglicah na nekaterih lokacijah v bližini TEŠ, ki jih lahko spremljajo spremembe v vsebnosti pigmentov in antioksidantov, še zlasti v kombinaciji s potencialnimi neugodnimi klimatskimi spremembami (suša, zmrzal, boleznimi...). Slednje povečuje pomen nadaljnega biomonitoringa gozdnega ekosistema v vplivnem območju TEŠ.

SUMMARY

Antioxidants, photosynthetic pigments and total sulphur content were measured in current-year needles of Norway spruce in the 1991-2004 period to assess the physiological state of Norway spruce and consequently the condition of forest ecosystem, considering that Norway spruce needles are a suitable bioindicator of air pollution impact on trees (SO_2 , NO_x in O_3). ŠTTP is the largest Slovene thermal power plant, which emitted 80,390 t of SO_2 in the year 1991. The area influenced by ŠTTP extends to Austria. Due to the ecological improvement programme of the ŠTTP installation of desulphurization devices on Units 4 and 5, the emission of SO_2 was reduced to 10% of the emission in the year 1991 (7,950 t in the year 2004).

The sulphur impact on the environment could be proved by measuring the total sulphur content in foliage of evergreen trees. The average annual sulphur content in needles of Norway spruce shows similar trends with environmental pollution by sulphur dioxide. This statement was proved in our study with highly significant correlation between the average annual emissions of SO_2 (in the 1991-2004 period) and the average annual sulphur content in current-year needles of Norway spruce ($r = 0.80$; $p = 0.002$, $n = 12$). Analyses of annual needles in years confirm the sulphur content is the highest at sites close to the power plant (Veliki Vrh, Topolšica, and Lajše) and areas which are frequently within thermal inversion (Zavodnje).

For plant stress assessment, measurements of antioxidants (ascorbic acid, α -tocopherol) are especially important since they are sensitive, early, specific and unspecific bioindicators of stress caused by anthropogenic (air pollution) and natural stressors (climatic conditions, disease, altitude etc). There is a negative correlation between high emission of SO_2 and the annual level of ascorbic acid ($r = -0.78$, $p = 0.007$), indica-

ting that defence mechanism of plants has been exhausted. The content of ascorbic acid increased again with reduction of emissions. Normally plants increase their defence capabilities by production of antioxidants, but in limited dose. Only few studies have reported a decrease of antioxidants in Norway spruce needles meaning that investigation had not been carried out in much polluted areas. The contents of α -tocopherol have been measured since 1997; the annual content slightly increased as SO_2 fell. The ratio between ascorbic acid and α -tocopherol was always higher than 10, indicating more effective defence capabilities in spruce.

The physiological condition of plants is well indicated by their photosynthetic pigment content. Oxidative stress reduces chlorophyll contents, especially chlorophyll a. The principal (leading) stress factor in this case is most probably SO_2 , since Spearman's coefficient between emissions of SO_2 and total chlorophyll (a + b) was highly significant. Statistical analyses performed for locations close to the power plant (Zavodnje, Graška gora) indicated that emissions decreased the pigment content in needles. An annual content of total chlorophyll measured in spruce needles above 1.5 mg/g indicated good vitality of studied trees. Better vitality of spruce sampled in the emission area of ŠTTP has been observed since 1998 (with the exception in the year 2002).

VIRI REFERENCES

- ANONYMOUS, 1987. Manual and methodologies and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analyses of the effect of air pollution on forests. - ECE/NEP for Europe, Geneva.
- BATIČ, F., 1994. Bioindikacija onesnaženosti zraka in njen pomen pri vzpostavitvi integralnega monitoringa.- V: BATIČ, F. (Ur.). Varstvo zraka – stanje in ukrepi za izboljšanje zraka v Sloveniji. Ljubljana, Zavod za tehnično izobraževanje: 12/1-12/10.
- BATIČ, F., 1997. Pomen bioindikacije pri spremljanju stanja okolja.- V: DEJANOVIČ, B. / RIBARIČ LASNIK, C. (Ur.). Sanacija termoelektrskih objektov. Velenje, Termoelektrarna Šoštanj-CEE-ERICo: 291-294.
- BATIČ, F., 2005. Propadanje gozdov – glavni dejavnik za sanacijo virov onesnaževanja v Sloveniji in Evropi.- Ekološka sanacija termoelektrskih objektov in uporaba bioindikacijskih metod. Zbornik povzetkov mednarodne konference, Velenje 25., 26. avgust 2005, s. 12.
- BATIČ, F. / GRILL, D. / KALAN, P. / RIBARIČ LASNIK, C., 1995. Impact of emission gases from the thermal power plant in Šoštanj on the biochemical structure of Norway spruce needles (*Picea abies* (L.) Karst.).- Acta Pharm. 45, No. 2, suppl. I: 191-197.
- BATIČ, F. / VIDERGAR-GORJUP, N. / ŠIRCELJ, H. / SIMONČIČ, P. / TURK, B., 2001. The analyses of photosynthetic pigments, ascorbic acid

- and macronutrients – a tool for evaluation of the effect of air pollution in Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.).- J. FOR. SCI. 47: 39-48.
- BERMADINGER, E. / GUTTENBERGER, H. / GRILL, D., 1990. Physiology of Young Norway Spruce.- Environmental Pollution 68: 319-330.
- BUI-NGUYEN, H.M., 1980. Application of high-performance liquid chromatography to the separation of ascorbic acid to the isoascorbic acid.- I. Chromatogr. 196: 163-165.
- BURMANDIGER-STABENTHEINER, E., 1995. Stress-Physiological Investigation on Spruce Trees (*Picea abies* (L.) Karst.) from the "Achenkirch Altitude Profiles".- Phytol. 29(3): 255-301.
- CROSS, C. E. / VAN DER VLIET, A. / LOUIE, S. / THIELE, J.J. / HALLIWELL, B., 1998. Oxidative stress and antioxidants at biosurfaces: plants, skin, and respiratory tract surface. Environ.- Health Perspect, 106: 1241-1251.
- EUROGLASS RESEARCH & APPLICATION LABORATORY 1998. Determination of total sulphur in spruce needle samples by ECS 1600/3000, analyses report.
- FERLIN, F., 1990. Vpliv onesnažebnega zraka na rastno obnašanje in rastno zmogljivost odraslih smrekovih sestojev.- Magistrsko delo. University Edvard Kardelj of Ljubljana, Biotechnical faculty, VTOZD for forestry, 142 s.
- FRÄNZLE, O., 2003. Bioindicators and environmental stress assessment.- In: MERKET, B.A. / BREURE, A.M. / ZECHMEISTER, H.G. (Ur.) Trace Metals and other Contaminants in the Environment 6: Bioindicator & Biomonitor. Principles, concepts and applications: 41-85.
- FÜRST, A. / SMIDT, S. / HERMAN, F., 2003. Monitoring the impact of sulphur with the Austrian Bioindicator Grid.- Environmental Pollution 125: 13-19.
- GRILL, D. / ESTERBAUER, H., 1973. Quantitative Bestimmung wasserloslicher Sulphydrylverbindung in gesunden und SO₂-geschädigten Nadeln von *Picea abies*.- Phytol. (Austria) 15: 87-101.
- GRILL, D. / ESTERBAUER, H. / WELT, R., 1997. Einfluss von SO₂ auf das Ascorbinsäuresystem der Fichtenndeln.- Phytopath. Z. 96: 361-368.
- HOČEVAR, M. / MAVSAR, R. / KOVAČ, M., 2002. Zdravstveno stanje gozdov v Sloveniji v letu 2000.- ZbGL 67: 119-157.
- JURC, B. / BOGATAJ, N., 1994. Preučevanje propadanja gozdov v Sloveniji.- V: Varstvo zraka – stanje in ukrepi za izboljšanje stanja v Sloveniji. Bled, Zavod za tehnično izobraževanje, s. 10/1-10/8.
- KALAN, J. / KALAN, P. / SIMONČIČ, P., 1995. Bioindikacija onesnaženosti gozdov z žveplom na podlagi vsebnosti v asimilacijskih delih gozdnega drevoja.- ZbGL 47: 85-116.
- KOLAR, I., 1989. Umiranje smreke v gozdovih Šaleške doline.- ZbGL 34: 121-198.
- KÖSTNER, B. / CZYGAN, F.C. / LANGE, O.L., 1990. An analysis of needle yellowing in the healthy and chlorotic Norway spruce (*Picea abies*) in a forest decline area of the Fichtelgebirge (NE: Bavaria).- Trees 4: 55-67.
- KUNERT, K. J. / EDERER, M., 1985. Leaf aging and lipid peroxidation: The role of antioxidant vitamin C and E.- Physiol. Plant. 65: 85-88.
- LARCHER, W., 1995. Physiological Plant ecology. Ecophysiology and Stress Physiology of Functional Groups.- Springer Verlag Berlin Heidelberg, 506 s.
- LEŠNJAK, M. / HRČEK, D. / BATIČ, F. / ŠOLAR, M. / KOLAR, I. / FERLIN, F., 1989. Air pollution and damage on vegetation near TE Šoštanj thermal power plant in Slovenia.- 8th World Clean Air Congress, Haag.
- MEHLHORN, H. / SEUFERT, G. / SCHMIDT, A. / KUNERT, K. J., 1986. Effects of SO₂ and O₃ on production of antioxidantts in conifers.- Plant Physiology 82: 336-338.
- MODRZYNSKI, J., 2003. Defoliation of older Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) stands in the polish Sudety and Carpatian mountains.- Forest Ecology and Management 181: 289-299.
- PERL-TREVES, R. / PERL, A., 2002. Oxidative Stress: An introduction.- V: INZE, D. / VAN MONTAGU, M. (Ur.). Oxidative stress in Plants. Taylor & Francis Inc, New York, 321 s.
- PFEIFHOFER, H. W., 1989. On the pigment content of Norway spruce needles infected with *Chrysomyxa rhododendri*, and the carotenoids of the fungus Aeciospores.- Eur. J. For Path., 19: 363-369.
- RIBARIČ LASNIK, C., 1991. Ekofiziološke lastnosti smreke (*Picea abies* (L.) Karsten) na vplivnem območju Termoelektrane Šoštanj.- Magistrska naloga. Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, VTOZD za biologijo, 126 s.
- RIBARIČ LASNIK, C., 1996. Ugotavljanje stresa pri smreki (*Picea abies* (L.) Karsten) na osnovi biokemičnih analiz iglic na vplivnem območju Termoelektrane Šoštanj.- Doktorska disertacija. Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za biologijo, 197 s.
- RIBARIČ LASNIK, C. / TURK, B. / BATIČ, F. / GRILL, D., 1999a. Antioxidants in Norway Spruce Needles at Field Plots in the Vicinity of a Thermal Power Plant in Slovenia.- Phytol. (Horn), Vol. 39: 175-182.
- RIBARIČ LASNIK, C. / BATIČ, F. / DEJANOVIČ, B. / SIMONČIČ, P., 1999b. Change in the condition of Norway spruce forest after the installation of desulphurization devices at the Šoštanj Thermal Power Plant.- J. FOR. SCI. 45: 217-222.
- RIBARIČ LASNIK, C. / BIENELLI KALPIČ, A. / BATIČ, F. / VRTAČNIK, J., 2001. Biomonitoring of forest ecosystem in areas influenced by the Šoštanj and Trbovlje Thermal Power Plants.- J. FOR. SCI. 47: 61-67.
- ROTNIK, U., 2005. Bilten TEŠ.- Poročilo o proizvodnji, vzdrževanju in ekoloških obremenitvah okolja TE Šoštanj v letu 2004. AV Studio d.o.o., Velenje.
- SIMONČIČ, P., 1996. Odziv gozdnega ekosistema na vplive kislih odločin s poudarkom na preučevanju prehranskih razmer za smreko (*Picea abies* (L.) Karsten) in bukev (*Fagus sylvatica* L.) v vplivnem območju TEŠ.- Doktorska disertacija, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo, 156 s.
- SIMONČIČ, P., 2001. Nutrient condition for spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) in the area affected by a Thermal Power Plant in Slovenia.- J. FOR. SCI. 47: 67-72.
- STATSOFT INC., 1999. Statistica for Windows 5.5 (99 Edition).- Tulsa, StatSoft: CD-ROM.
- VIDERGAR GORJUP, N. / STRNIŠA, A. / BATIČ, F., 2000. Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) damage in the Zasavje district of Slovenia evaluated by two methods.- ZbGL 61: 27-47.
- VRTAČNIK, J. / RIBARIČ LASNIK, C., 2001. Ekološka sanacija TEŠ: 1987-2000.- ERICo Velenje, 76 s.
- WIMANLASIRI, P. / WILLS, R.B., 1983. Simultaneous analyses of acorbic acid in fruit and vegetables by high performance liquid chromatography.- J. Chromatogr. 256: 368-371.

ZAHVALA ACKNOWLEDGEMENTS

Raziskavo je financirala Termoelektrarna Šoštanj; ob tej priložnosti se toplo zahvaljujemo njenemu vodstvu. Članek je bil pripravljen v okviru projekta Phare Termoelektrarna Šoštanj in prekomejno onesnaževanje zraka 1987-2004 (št. 4908701-02-01-0009).