

GDK 881.2+2 : 539

Prispelo / Received: 09. 03. 1999

Sprejeto / Accepted: 21. 04. 1999

Pregledni znanstveni članek  
Review scientific paper

## MERITVE SONČNEGA SEVANJA V GOZDU - I. PRESOJA METOD IN INSTRUMENTOV

Jurij DIACI\*

### Izvleček

Energija sonca napaja ekosisteme na zemlji, zato so meritve sevanja temelj ekoloških raziskav v gozdovih. Vsaj osnovne zakonitosti porazdelitve sevanja v vegetaciji mora poznati tudi praktik gojitelj. Na področju meritev sončnega sevanja smo priča hitremu razvoju metod in instrumentov. Prispevek uvodoma predstavlja sončno sevanje kot enega najpomembnejših ekoloških dejavnikov ter njegov pomen za gojenje gozdov. Osrednji del članka predstavlja in ocenjuje uveljavljene metode za merjenje in ocenjevanje sončnega sevanja v gozdovih. Na podlagi primerjave metod ugotavljamo, da je za zahtevnejše raziskave gozdne vegetacije zelo primerna uporaba več PUR (Photosynthetically Usable Radiation - fotosintetsko uporabno sevanje) tipal, krmiljenih z računalnikom. Obetavno bodočnost ima tudi metoda ocenjevanja sevanja z analizo fotografije nebesnega svoda. Na tem principu deluje tudi stabilni horizontoskop, katerega uporaba je še posebej priporočljiva za praktično gojenje gozdov.

Ključne besede: sončno sevanje, meritve sevanja, gojenje gozdov, fotosinteza,  
fotosintetsko aktivno sevanje, fotosintetsko uporabno sevanje

## SOLAR RADIATION MEASUREMENTS IN FORESTS - I. EVALUATION OF METHODS AND INSTRUMENTS

### Abstract

Solar energy sustains ecosystems on earth, therefore solar radiation measurements are the basis for ecological research in forests. Silviculturists in particular should be aware at least of the basic principles of radiation distribution in forest vegetation. There has been a rapid development of methods and devices in the field of solar radiation measurement. In the paper, solar radiation is presented as one of the most important ecological resources and factors. The author demonstrates how significant this knowledge is in silviculture. The main topic is the presentation of recognized methods for solar radiation measurement and estimation in forests. Comparing these different methods we find Photosynthetically Usable Radiation (PUR) sensors to be very appropriate for complex research in forest vegetation. It is advantageous to use multiple PUR sensors connected to a computer for data processing. Another method for estimating radiation which has great potential is the one using hemispherical photography. The same principle is applied in a fixed horizontoscope which is particularly appropriate in silvicultural practice.

Key words: solar radiation, radiation measurements, silviculture, photosynthesis,  
photosynthetically active radiation, photosynthetically usable radiation

\* doc., dr., Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire,  
Večna pot 83, 1000 Ljubljana, SVN

**VSEBINA**  
**CONTENTS**

<b>1</b>	<b>UVOD</b>	
	INTRODUCTION.....	107
<b>2</b>	<b>MERJENJE IN OCENJEVANJE SONČNEGA SEVANJA V GOZDU</b>	
	MEASUREMENT AND ESTIMATION OF SOLAR RADIATION IN A FOREST.....	117
<b>3</b>	<b>PRIMERNOST METOD UGOTAVLJANJA SONČNEGA SEVANJA ZA GOZDOSLOVNE RAZISKAVE IN PRAKSO</b>	
	SUITABILITY OF SOLAR RADIATION MEASUREMENT METHODS FOR USE IN THE FOREST ECOLOGY AND SILVICULTURE .....	126
<b>4</b>	<b>POVZETEK.....</b>	128
<b>5</b>	<b>SUMMARY.....</b>	130
<b>6</b>	<b>VIRI</b>	
	REFERENCES.....	132
<b>7</b>	<b>ZAHVALA</b>	
	ACKNOWLEDGEMENTS .....	138

## 1 UVOD INTRODUCTION

Vodilne osebnosti pri oblikovanju gojenja gozdov so se že pred dobrimi dvesto leti zavedale, kako pomembno je poznati svetlobne razmere<sup>1</sup> v gozdu za razvoj novo nastale znanstvene discipline. Takrat sta bila v ospredju pozornosti vidik naravnega pomlajevanja in vidik tekmovalnih razmer med drevesnimi vrstami. Tako je na primer Hartig pri razvoju zastornega gospodarjenja z bukovimi gozdovi natančno določil vrste in zaporedje sečenj na osnovi uravnavanja svetlobnih razmer v sestoji in reakcije pomladka (HARTIG 1791 cit. po BURSCHEL / HUSS 1987).

Zaradi ponavljajočih se naravnih katastrof so ob koncu prejšnjega stoletja na področju Alp pričeli opuščati golosečno gospodarjenje in uvajati sonaravne koncepte gojenja gozdov. S tem korakom stopi znova v ospredje poznavanje ekologije gozda in svetlobnih razmer (GAYER 1882, 1886). Kmalu je namreč prevladalo spoznanje, da je brez dobrega poznavanja svetlobnih razmer naravna obnova neuspešna, še posebej pri spremenjenih gozdovih in sukcesijskem razvoju pritalne vegetacije. Tako prof. Engler, eden od klasikov omenjenega obdobja, opisuje boljše pomlajevanje na sestojnih robovih. Meni, da pomladek drevesnih vrst bolje izkorišča svetlobo od strani (nem.: Seitenlicht), kot ostala konkurenca v pritalni vegetaciji (ENGLER 1900). Zelišča in trave naj bi bili bolj prilagojeni na svetlobo od zgoraj (nem.: Oberlicht). Nekako v istem času zasledimo že tudi prve meritve sevanja v gozdovih (WIESNER 1893 cit. po CIESLAR 1904, CIESLAR 1904) ter ocenjevanje svetlobnih razmer na podlagi fotografij krošenj (FRIEDRICH 1895 cit. po CIESLAR 1904).

Ugotavljanje svetlobnih razmer v gozdovih je bilo vse do današnjih dni časovno in finančno zahtevno. Natančne meritve so izvajali predvsem v raziskovalne namene. Gojitelji praktiki so se zadovoljili z bolj ali manj grobimi in pristranskimi ocenami. Danes postajajo metode ugotavljanja svetlobnih razmer v sestojih vse bolj dosegljive, hkrati pa z malopovršinskim gospodarjenjem narašča tudi potreba po poznavanju mozaika svetlobnih razmer bolj kot kdajkoli prej, še posebej tam, kjer so razmere za uspevanje gozdov zaostrene, na primer na gozdni meji ali v spremenjenih gozdovih.

<sup>1</sup>V nadaljevanju članka bomo pod svetlobnimi razmerami razumeli porazdelitev za človeka vidne svetlobe v sestoji (380-780 nm) in tudi sevanja ostalih valovnih dolžin. Izraz sevalne razmere je sicer primernejši, vendar ga manj uporabljajo.

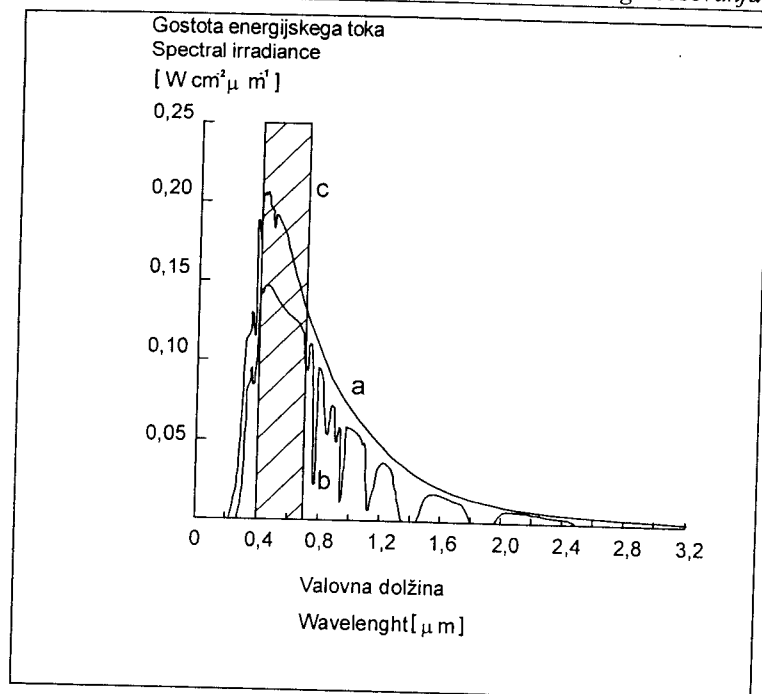
Instrumenti za natančne meritve sončnega sevanja v gozdovih so že od nekdaj nepogrešljiv pripomoček za raziskovalca ekologije gozda. Raziskave pa kažejo, da bodo zaradi časovno in prostorsko spremenljive svetlobne klime sestojev vsaj metode nepristranskega ocenjevanja svetlobnih razmer, npr. s horizontoskopom, morale postati del redne prakse gozdarja operativca.

Osnovni namen prispevka je s primerjavo prikazati lastnosti posameznih metod in instrumentov ter priporočiti najprimernejše za gozdnogojitvene raziskave in za praktično gojenje gozdov. Prispevek je sestavljen iz dveh člankov. V prvem članku (I. Presoja metod in instrumentov) obravnavamo teoretične osnove meritev sevanj v gozdovih. V drugem članku (v naslednji številki Zbornika) pa predstavljamo izboljšavo ocenjevanja sevanja s horizontoskopom in primerjalne meritve z drugimi instrumenti.

V uvodnem delu prvega članka podajamo nekatere osnovne zakonitosti porazdelitve sončnega sevanja v vegetaciji. V nadaljevanju predstavljamo nekaj novejših dosežkov raziskav ekologije pomlajevanja in opozarjamo na pomen poznavanja svetlobnih razmer v gozdovih za gojitelja raziskovalca in tudi za praktika. Osrednji del prispevka je namenjen predstavitvi in oceni že uveljavljenih ter novejših metod za merjenje in ocenjevanje sončnega sevanja v gozdovih.

### **1.1 SONČNO SEVANJE KOT EKOLOŠKI DEJAVNIK V GOZDU** **SOLAR RADIATION AS AN ECOLOGICAL FACTOR IN FORESTS**

Sončno sevanje je eden najpomembnejših naravnih virov in ekoloških dejavnikov. Pomeni edini vir energije, ki ga zelene rastline lahko uporabijo v procesih metabolizma (BEGON / HARPER / TOWNSEND 1996). Jakost in kakovost sevanja uravnava mnoge fiziološke in vedenjske pojave pri rastlinah in živalih (LARCHER 1995). Poleg tega sončno sevanje neposredno vpliva na ostale ekološke dejavnike, npr. toploto zraka in tal, vlažnostne razmere v zraku in tleh ipd. (KREČMER 1966, KUNZ 1983). Posredno pa vpliva skoraj na vse dejavnike žive in nežive narave, od oblike humusa, porazdelitve flore in favne v prsti do zimovališč velikih rastlinojedov.



Grafikon 1: Spektralna porazdelitev gostote energijskega toka: a) na gornji meji atmosfere in b) na morski gladini ob jasnem vremenu; c) območje vidne svetlobe je šrafirano (prirejeno po BIGGS 1984)

Graph 1: Spectral distribution of the solar irradiation a) outside atmosphere b) at the sea level at clear sky; c) the visible light range is hachured (op. cit. BIGGS 1984, modified)

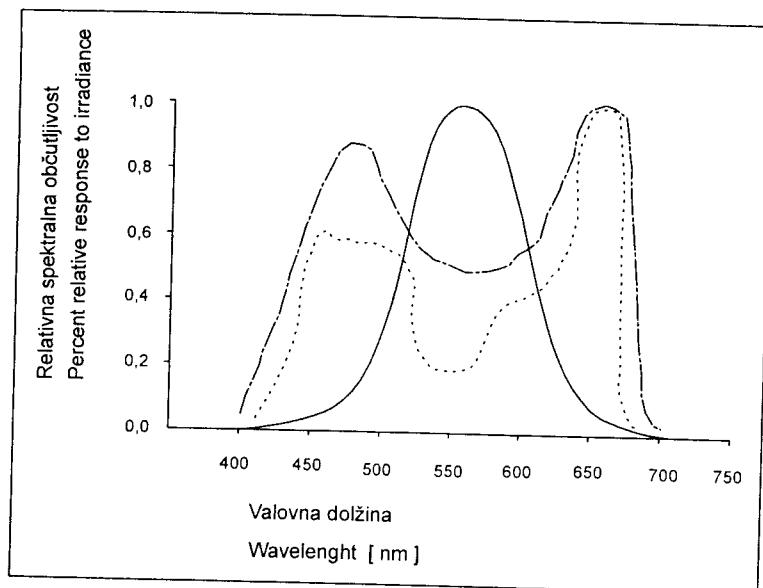
Sončno sevanje, ki dospe na zemeljsko površino, je v primerjavi z vpadnim sevanjem na zgornji meji atmosfere oslajeno zaradi vpijanja in razpršitve v atmosferi (grafikon 1). Slabitev sevanja ni enakomerna po valovnih dolžinah. Sončno sevanje, ki dospe na proučevano površino, delimo na direktno sončno sevanje in na difuzno oziroma razpršeno sončno sevanje (BIGGS 1984, KOLIĆ 1988). Pri popolni oblačnosti prihaja do zemeljske površine samo difuzno sevanje. Sestavljeno je iz direktnega sončnega sevanja, ki se je razpršilo pri prehodu skozi oblake, in iz difuznega sevanja atmosfere nad oblaki in pod njimi.

Direktno sončno sevanje je sevanje, ki ga oddaja sončni disk in ga sprejema površina, pravokotna na os sončnih žarkov. Sestavlja ga predvsem nerazpršeno in neodbito sončno sevanje (BIGGS 1984). Odvisno je od položaja sonca na nebu, ki določa vpadni kot sončnih žarkov. Zato se vrednosti spreminjajo preko dneva in preko leta (BRUNNER 1994). Velik vpliv na direktno sončno sevanje ima oblačnost. Zato ločimo efektivno možno ali potencialno direktno sončno sevanje brez upoštevanja oblačnosti in absolutno direktno sončno sevanje z upoštevanjem dejanske oblačnosti (KUNZ 1983).

Razmerje med direktnim in razpršenim sončnim sevanjem se časovno in prostorsko izrazito spreminja glede na dnevni in letni položaj sonca in glede na splošne klimatske razmere. Med obema vrstama sevanja je težko potegniti mejo, saj lahko v sestojih tudi ob popolnoma zastrtem nebu opazujemo bolj ali manj jasne sence, pač odvisno od jakosti sevanja in homogenosti oblakov (DOHRENBUSCH 1987).

Globalno sončno sevanje je skupna količina direktne komponente sončnega sevanja in difuzne komponente sevanja nebesnega svoda, ki jo prejme horizontalna površina. Fizikalno opredelimo omenjene tri oblike sončnega sevanja z gostoto energijskega (svetlobnega) toka, ki ima mersko enoto  $W m^{-2}$  (BIGGS 1984).

Pri ekoloških raziskavah nas velikokrat zanima, kolikšno je razmerje med sončnim sevanjem na prostem in sončnim sevanjem na določenem mestu v sestoju. To količino imenujemo relativna osvetljenost (nem. relative Beleuchtungsstärke) v sestoju in jo podajamo v % (CIESLAR 1904, MITSCHERLICH / KÜNSTLE 1967). Nanaša se lahko na delež direktnega in delež difuznega sončnega sevanja v sestoju v primerjavi s sevanjem na prostem. Kadar namesto osvetljenosti v sestoju in na prostem merimo in primerjamo celotno sevanje, govorimo o relativnem obsevanju (nem. relative Bestrahlungsstärke).



Grafikon 2: Primerjava relativne spektralne občutljivosti: a) črtkane krivulje so za različne rastlinske vrste ter b) polna črta za človeško oko (prirejeno po BIGGS 1984, DOHRENBUSCH 1995)

Graph 2: Comparison of characteristic spectral response curves: a) dashed and dotted curves represent different species of green plants, and b) solid curve for human eye (op. cit. BIGGS 1984, DOHRENBUSCH 1995)

Od celotnega spektra sončnega sevanja, ki dospe na zemeljsko površino (280-3000 nm; grafikon 1), lahko zelene rastline uporabijo le manjši del. Ta del med 380 nm in 710 nm valovne dolžine<sup>2</sup> imenujemo fotosintetsko aktivno sevanje (angl. Photosynthetically Active Radiation - v nadaljevanju PAR; LARCHER 1995). Zelene rastline bi lahko potencialno izrabile le 44-45 % celotnega sončnega sevanja, ki dospe na zemeljsko površino (BEGON / HARPER / TOWNSEND 1996, LARCHER 1995).

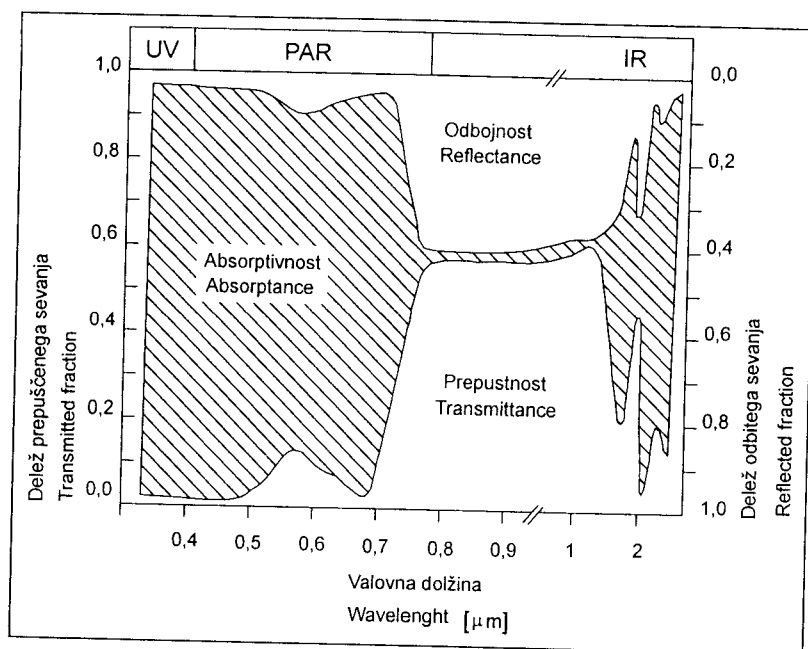
<sup>2</sup>V literaturi najdemo v definiciji PAR tudi druge valovne dolžine. Občutljivost zelenih rastlin na sevanje je namreč odvisna od rastlinske vrste, poleg tega občutljivost narašča in pojemca zvezno (grafikon 2). V ameriški literaturi je bolj uveljavljena definicija za PAR z valovnimi dolžinami med 400 nm in 700 nm (BIGGS et al. 1971).

Zelene rastline sončnega sevanja v okviru spektra PAR ne izkoriščajo enakovredno (FEDERER / TANNER 1966 a). Raziskave fotosinteze različnih rastlinskih vrst so razkrile, da so za fotosintezo najpomembnejše valovne dolžine pri 450 nm (modra svetloba) in 650 nm (rdeča svetloba). Pri valovnih dolžinah 550 nm (zelena svetloba) je fotosintetska učinkovitost rastlin slabša, kajti zelene rastline fotone zelenega spektralnega območja nadpovprečno prepuščajo in odbijajo (FEDERER / TANNER 1966 b; grafikona 2 in 3). V novejšem času raziskovalci omenjeno selektivnost rastlinskih pigmentov pri meritvah sončnega sevanja vse bolj upoštevajo. V tem primeru govorijo o fotosintetsko uporabnem sevanju (angl. Photosynthetically Usable Radiation - v nadaljevanju PUR), oz. sevanju, ki ga rastlinski pigmenti resnično izkoristijo (McCREE 1972 v DOHRENBUSCH 1995).

PAR se v valovnih dolžinah sicer delno pokriva s svetlobo, vidno človeškemu očesu (380 nm - 780 nm), vendar v okviru omenjenega spektra obstajajo velike razlike med največjo občutljivostjo človeškega očesa in fotosintetsko učinkovitostjo zelenih rastlin (grafikon 2). Občutljivost človeškega očesa je prilagojena kakovosti svetlobe, ki jo prepušča rastlinska odeja, in jakosti svetlobnega toka.

Svetlobno sevanje, ki ga rastlina ne absorbira, se bodisi odbije od površine listov (refleksija) ali ga listi prepustijo (transmisija) v nižje plasti gozda (grafikon 3). Pritalna plast gozda prejme zato manjšo jakost sončnega sevanja, ki je kakovostno najbolj osiromašeno v fotosintetsko najbolj učinkovitem delu spektra. V gozdu govorimo torej o spektralnih in količinskih spremembah sončnega sevanja v časovnem in prostorskem merilu (EIMERN, J. von / EHRHARDT 1986). Poleg letnih ciklov sonca in spreminjanja zunanje zgradbe vegetacije na porazdelitev sončnega sevanja značilno vpliva tudi variabilnost spektralnih lastnosti listov preko vegetacijske sezone (TANNER / ELLER 1986). Količinska in kakovostna spremenljivost sevanja zaradi nehomogenosti vegetacijske odeje otežuje meritve sevanja v gozdovih (OKER - BLOM 1986, BRUNNER 1994).





Grafikon 3: Značilna spektralna odbojnost, prepustnost in absorptivnost poprečnega zelenega lista (absorptivnost = 1-prepustnost-odbojnost) (prirejeno po MONTEITH 1965 v OKER-BLOM 1986 in LARCHER 1995)

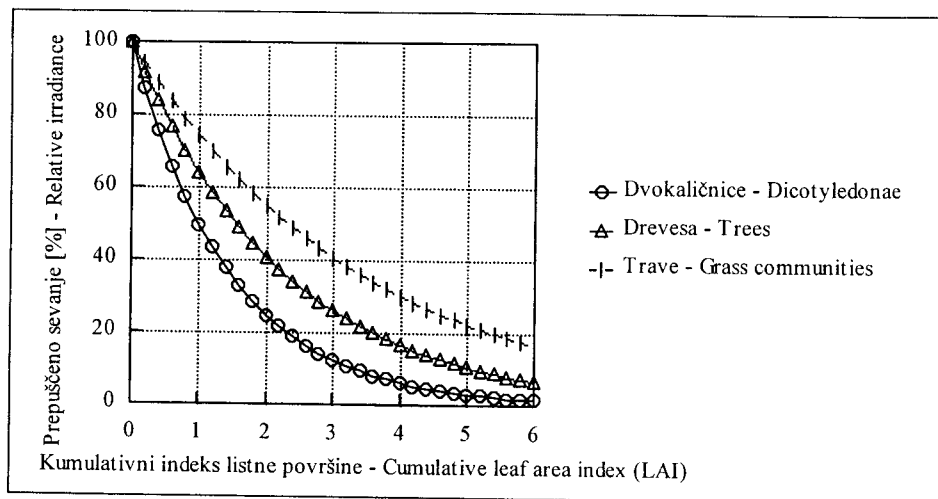
Graph 3: Typical plot of reflectance, transmittance, and absorptance of an 'average' green leaf (Absorptance = 1-Transmittance-Reflectance) (from MONTEITH 1965 in OKER-BLOM 1986 and LARCHER 1995)

Pojemanje sončnega sevanja pri prehodu skozi vegetacijsko odejo je odvisno od gostote listov (asimilacijskih organov), njihove specifične propustnosti in razporeditve. V tem procesu poteka upadanje intenzivnosti sončnega sevanja v eksponencialni odvisnosti z naraščajočo debelino vegetacijske odeje, v skladu z "Lambert-Beerovim zakonom pojemanja" (PERRY / ELLERS / BLANCHARD 1969). Če predpostavimo, da predstavljajo plasti vegetacije homogeno telo, potem lahko prepuščeno sevanje pod zastorom vegetacije ocenimo po modificirani enačbi za pojemanje sevanja (MONSI / SAEKI 1953 cit. po LARCHER 1995):

$$I = I_0 \cdot e^{-k \cdot LAI} \quad (1)$$

- $I$  ... Prepuščeno sevanje na določeni višini pod vegetacijsko odejo  
 $I_0$  ... Vpadno sevanje na zgornji plasti vegetacijske odeje  
 $k$  ... Koeficient pojemanja (extinction coefficient) za različne rastlinske združbe  
 $LAI$  ... Kumulativni indeks listne površine

Prepuščeno sevanje je poleg vpadnega sevanja in kumulativnega indeksa listne površine odvisno od koeficienta pojemanja, ki je specifičen za vsako posamezno rastlinsko vrsto. Za ilustracijo lahko posplošimo, da je v rastlinskih združbah dvokaličnic pojemanje sevanja zelo intenzivno tudi pri majhnih vrednostih kumulativnega LAI, medtem ko je pri združbah trav pojemanje bolj postopno. Gozdni sestoji so nekje med obema skupinama (grafikon 4).



Grafikon 4: Eksponencialno pojemanje jakosti sevanja pri prehodu skozi vegetacijsko odejo različnih rastlinskih združb v odvisnosti od indeksa listne površine. Kumulativni LAI je vsota LAI za posamezne horizontalne plasti listov (prirejeno po LARCHER 1995)

Graph 4: The exponential decrease of light intensity in different stands of plants as a function of leaf area index (from LARCHER 1995, modified)

Dodatno težavo meritvam sevanja v gozdu povzročajo sončne pege (angl. sunflecks) (MITSCHERLICH 1971, KOLIĆ 1988, CHAZDON 1988). To so prameni direktnega sončnega sevanja, ki občasno prodrejo skozi krošnje v sestoj ali do gozdnih tal. Njihovo pojavljanje je ponavadi kratkotrajno, premikajo se skladno s potjo sonca na nebu. Imajo veliko več energije kot razpršeno sončno sevanje, poleg tega niso osiromašene v fotosintetsko aktivnem delu spektra. Vloga sončnih peg v fiziologiji rastlin ni dovolj raziskana. Njihov vpliv je lahko od primera do primera zelo različen (WAYNE / BAZZAZ 1993). Kadar prevladujejo skromne svetlobne razmere, je njihov vpliv navadno ugoden. Na sušnih rastiščih je lahko vpliv sončnih peg tudi neugoden (HOLBO / CHILDS / McNABB 1985), še posebej, kadar gre za jakosti sevanja, ki so veliko večje od vrednosti, ki jih senčni listi še lahko uporabijo za fotosintezo (USTIN et al. 1984, SELLENBERG 1996). Pri meritvah sončnega sevanja lahko vrednosti sončnih peg zajamemo le z zelo natančnimi zveznimi meritvami (CANHAM et al. 1994).

Instrument za merjenje v ekoloških študijah vegetacije naj bo glede kakovosti sončnega sevanja prilagojen občutljivosti rastlin na sevanje:

- 1) Občutljiv naj bo na območje valovnih dolžin med 400 nm in 700 nm (prim. grafikon 2).
- 2) V omenjenem območju naj ima občutljivost, ki je linearna funkcija valovne dolžine (konstantni kvantni izkoristek). Pogoje 1 in 2 ustrezajo PAR tipala.
- 3) Upoštevati mora padec izkoristka sevanja za rastline v zelenem delu spektra (prim. grafikon 2). Vsem trem pogojem ustrezajo PUR tipala.

## **1.2 POMEN PROUČEVANJA SONČNEGA SEVANJA ZA GOJENJE**

### **GOZDOV**

#### **IMPORTANCE OF SOLAR RADIATION STUDIES FOR SILVICULTURE**

Gozd je zapleten ekosistem, kjer na življenjske procese vplivajo številni okoljski dejavniki, eni manj, drugi bolj značilni in vplivni. V tako kompleksnih razmerah za naše dojetje pomeni dobro poznavanje svetlobnih razmer določen pregled nad celotnim spletom ekoloških dejavnikov. Sevanje namreč zaradi svojega posrednega ali neposrednega vpliva dobro nakazuje veliko ostalih ekoloških dejavnikov. Tako so Hari in sodelavci (1981) pri proučevanju pomladka rdečega bora samo z upoštevanjem

svetlobnih razmer v modelu pojasnili kar 90 % variabilnosti neto fotosinteze. Ko so upoštevali še temperaturo, se je zanesljivost modela povečala na 94 %.

Večina negovalnih ukrepov, ki jih izvajamo v življenju sestoja, je usmerjena v večanje rastnega prostora dreves oz. v povečevanje dotoka svetlobe. Poznavanje svetlobnih razmer je odločilno pri proučevanju in tudi za prakso naravne obnove gozdov. S posegom v sestoj gojitelj najbolj neposredno vpliva na spremembo svetlobnih razmer v sestoju. Hkrati spreminja tudi druge ekološke dejavnike, kot so padavine, konkurenca, vlažnost, vendar nobenega tako izrazito kot prav sončno sevanje.

S počasnim, vendar vztrajnim uveljavljanjem sonaravnega gojenja gozdov narašča potreba po poznavanju malopovršinske spremenljivosti sevanja v sestojih in vrzelih. Sončno sevanje je namreč glavni dejavnik, ki vpliva na nastanek različnih mikrorastišč v vrzelih. Zaradi sončnih peg so svetlobne razmere izrazito spremenljive tudi pod relativno enakomerno zastrtim sestojem.

Poznavanje svetlobnih razmer pride do izraza še posebej tam, kjer so razmere za uspevanje gozda iz različnih vzrokov zaostrene. Na zgornji gozdni meji je toplota v zgornjem sloju tal odločilnega pomena za razvoj mladja oz. za rast korenin (IMBECK / OTT 1987, FREHNER 1989, LÜSCHER 1990). Direktno sončno sevanje je v visokogorskem gozdu zato odločilno za naravno pomlajevanje. Ugotovitve švicarskih raziskovalcev za subalpski smrekov gozd v Graubündnu nakazujejo, da se smrekov pomladek na severni ekspoziciji lahko uspešno razvija le na mikrorastiščih z najmanj poldrugo uro direktnega sončnega obsevanja preko poletja (OTT et al. 1991, IMBECK / OTT 1987, FREHNER 1989, BRANG 1996 b). Za uspešen razvoj nasemenitve smreke na južni ekspoziciji pa je, glede na ugotovitve Branga (1996 a), potrebno najmanj pol ure direktnega sončnega sevanja. Brang dalje ugotavlja, da lahko zaradi izsušitve zgornje plasti humusa že poldruga ura sevanja deluje zaviralno na pomlajevanje smreke na južnem pobočju. Prav zadnja ugotovitev nakazuje pomen poznavanja in zahtevno nalogo optimiranja svetlobnih razmer za gojitelja.

Tudi "večne težave" z naravno obnovo gozdov na bogatih rastiščih gre bolj pripisati nepoznavanju svetlobnih razmer v sestojih in nepremišljenemu dodajanju sončnega

sevanja, kot pa "plevelu". Bujno razvita pritalna vegetacija je namreč bolj posledica gojitvenih napak kot pa vzrok problemom s pomlajevanjem.

V spremenjenih gozdovih, predvsem v smrekovih nasadih, je poznavanje porazdelitve sončnega sevanja v sestojih in sestojnih odprtinah ključno za naravno obnovo, pospeševanje listavcev in prevzgojo sestojev v naravnejše stanje (DIACI 1997, GOBEC 1998). Zagotavljanje ustreznega razmerja med sencozdržnimi in svetloljubnimi drevesnimi vrstami v pomladku je mogoče le s temeljitim poznavanjem svetlobnih razmer.

Kljub povedanemu je zanimivo, da so meritve sevanja v sestojih, z izjemo Švice ter delno Nemčije, Francije in ZDA, še do nedavnega bolj poredko uporabljali v raziskavah ekologije pomlajevanja gospodarskih gozdov. Verjetno sta najpomembnejša vzroka v prevladujočem velikopovršinskem golosečnem gospodarjenju, ki takšnih informacij pač ne potrebuje, ter v še do nedavnega težko dostopnih in dragih instrumentih.

## **2 MERJENJE IN OCENJEVANJE SONČNEGA SEVANJA V GOZDU**

### **MEASUREMENT AND ESTIMATION OF SOLAR RADIATION IN A FOREST**

Prve meritve svetlobnih razmer v gozdnih sestojih zasledimo konec prejšnjega stoletja. Takrat je bil najbolj znan postopek Wiesnerja (1893 cit. po CIESLAR 1904), ki je metodo Bunsena in Roscoe-a izpopolnil in poenostavil, tako da je bila primerna tudi za obsežnejša snemanja v gozdovih. Metoda temelji na uporabi fotografskega papirja, ki so ga izpostavili sončnemu sevanju v sestoju. Iz časa, ki je bil potreben, da je osvetljeni papir dosegel enako stopnjo obarvanja kot "normalno črn" papir, so sklepali na intenzivnost sončnega sevanja na mestu meritve. Cieslar (1904) je metodo uporabil za obsežne ekološke študije o porazdelitvi sončnega sevanja v različno redčenih sestojih, o vplivu sevanja na proizvodnjo lesne mase ter na porazdelitev zaplat pritalne vegetacije in o sevanju ter sukcesijskih spremembah vegetacije.

Od takrat do danes so razvili številne metode in instrumente. Razvoj na področju metod meritev sevanja v gozdnih sestojih je šel v dveh smereh. Po eni strani so znanstveniki razvijali vedno popolnejše, bolj točne, vendar tudi dražje postopke, po drugi strani pa tudi

enostavnejše in cenejše z omejeno natančnostjo. V splošnem bi lahko principe ocen, meritev in sestave instrumentov, uporabljene do danes, strnili v naslednje skupine (LUESCHER 1986): princip deformacije kovin, destilacija, fotokemične metode, termoelektrične metode, fotoelektrične metode, ocenjevanje in posredno ugotavljanje sončnega sevanja v gozdu ter ocenjevanje svetlobnih razmer na podlagi preslikave hemisfere in sončnih poti.

Glede na uporabljen postopek merimo različne komponente sončnega sevanja: globalno sevanje, direktno sevanje, difuzno sevanje, fotosintetsko aktivno sevanje, fotosintetsko uporabno sevanje, vidno svetlobo, trajanje osončenja. Z uporabo različnih metod in instrumentov je vedno povezana tudi spremenljivost spektralnih območjih in občutljivost instrumentov glede na spekter sevanja. Vse omenjene parametre je zato potrebno vedno natančno opisati.

Omenjene komponente sončnega sevanja lahko načelno merimo na tri različne načine, zato ločimo (LUESCHER 1986, DOHRENBUSCH 1995): zvezno registrirne meritve, integrativne meritve in trenutne meritve.

- i) Pri zveznih meritvah se vrednosti sevanja trajno zapisuje, tako da lahko zajamemo trenutne vrednosti sevanja pa tudi vsote sevanja čez daljša časovna razdobja. Za izvedbo potrebujemo računalnik, ki krmili snemanja in beleži podatke, zato je za daljše časovno razdobje postavljen na teren. Ker nas večinoma zanimajo podatki z več prostorsko ločenih položajev v sestoji, je potrebno na centralno krmilno enoto priključiti več tipal. To metodo bolj razvijajo šele v zadnjem času z uporabo prenosnih računalnikov, je zahtevna in draga. Podatki so zelo natančni, vendar je za praktično uporabo pri gojenju gozdov manj primerna, saj zahteva računalniško podporo, stalen vir energije, zaščito aparatov na terenu itd.
- ii) Pri integrativnih meritvah vrednosti sevanja sproti seštevamo, tako da zajamemo le vsote glede na opazovana časovna razdobja.
- iii) Trenutne meritve zajamejo le hipne vrednosti sevanja. Metoda je manj zahtevna in zato bolj primerna za uporabo pri gojenju gozdov. Vendar ima mnoge pomanjkljivosti. Ocenjujemo lahko le difuzno sončno sevanje, saj je direktno sevanje preveč časovno variabilno, da bi bile trenutne meritve uporabne. Ponavadi opravimo simultano snemanje z dvema senzorjema, pri čemer je eden od obeh na točki meritve v sestoji, drugi pa kot kontrola v bližnji okolici na prostem. Zelo pomembno je, da

snemamo ob enakomerno zastrttem nebu, kajti direktno sončno sevanje lahko popači rezultate. Vendar se tudi pri povsem zastrttem nebu svetlobne razmere spreminjajo na kratkih razdaljah. Tako naj bi bila referenčna ploskev oddaljena samo kakih 50 - 80 m. Metoda ne upošteva za rastline fiziološko pomembne energije manjših sončnih peg. Če se zadovoljimo samo z vrednostmi relativne osvetljenosti oz. relativnega obsevanja, so trenutne meritve povsem ustrezne za gozdoslovne raziskave. Uporabljati pa moramo kakovostna tipala, ker lahko neujemanje občutljivosti tipal povzroči grobe napake. Poleg tega je potrebno upoštevati, da se sprejemni elementi sčasoma obrabijo (DOHRENBUSCH 1987).

Možne so tudi številne kombinacije omenjenih treh načinov meritev sevanja. Kakovost meritev v splošnem pojema od zvezno registriranih preko integrativnih do trenutnih meritev, pri čemer tudi stroški meritev pojemajo v istem vrstnem redu. Razumljivo je, da so pri ekoloških študijah v gozdu še do nedavnega zaradi časovnih in materialnih omejitev največ posegali po zadnji skupini metod, ki zaradi prej omenjenih pomanjkljivosti niso najustreznejše.

Glede na variabilnost metod, postopkov in načinov meritev sončnega sevanja ter nenazadnje zaradi zahtevnosti je razumljivo, da je potrebno zelo natančno opredeliti kaj, kdaj in kako merimo. V nadaljevanju zato navajamo kratek pregled in presojo različnih metodologij z vidika uporabnosti za gozdoslovne raziskave.

## **2.1 OCENJEVANJE IN POSREDNO UGOTAVLJANJE SONČNEGA SEVANJA** ESTIMATION AND INDIRECT ASSESSMENT OF SOLAR RADIATION

Najstarejše in pogosto uporabljene metode za ocenjevanje sončnega sevanja v gozdu temeljijo na oceni deleža s krošnjami nezastrtga neba. Ta ocena je lahko izražena v odstotkih, če ocenjujemo skupno zastiranje drevesnih vrst. Kadar pa ocenjujemo zastiranje posameznih drevesnih vrst, lahko izrazimo kumulativni odstotek zastiranja, ki lahko preseže 100 % (DENGLER / RÖHRIG / BARTSCH 1992, MLINŠEK 1992).

Bolj natančne ocene zastiranja krošenj dobimo z uporabo karte tlorisov projekcij krošenj (BONNOR 1967, RÖHLE / HUBER 1985, RÖHLE 1986). Metodo so v preteklosti

pogosto uporabljali, vendar le na manjših referenčnih objektih, ker je zahtevna in časovno zamudna. Primernost omenjene metode za manjše objekte je tudi v tem, da daje še mnoge druge informacije o razmerah v sestoji, npr. o strukturi, konkurenčnih razmerah, prostorski porazdelitvi dreves. Danes je mogoče karte krošenj z nekaterimi dodatnimi parametri s pridom uporabiti za modeliranje razvoja gozda na podlagi individualnih rastnih modelov (KOOP 1989, PRETZSCH 1992, CESCATTI 1997 b) pa tudi za modeliranje svetlobnih razmer ter porazdelitev ostalih ekoloških dejavnikov (KOOP 1989, CESCATTI 1997 a). Objektivnejšo oceno zastiranja s krošnjami je mogoče pridobiti tudi na podlagi interpretacije aerofotoposnetkov (KOOP 1989).

Ocena svetlobnih razmer je izvedljiva tudi posredno z enostavno merljivimi dendrometrijskimi parametri, kot so gostota osebkov, temeljnica ali lesna zaloga, ker so odvisni od svetlobnih razmer (PERRY / SELLERS / BLANCHARD 1969, McLAUGHLIN 1978, KUUSIPALO 1985).

Zavedati pa se moramo omejenosti teh preprostih metod. Lahko so delno uspešne v precej enomernih sestojih. Njihova uporabnost je veliko manjša za ocenjevanje svetlobnih razmer v večslojnih mešanih sestojih, še posebej z listavci in bukvijo, ki še dolgo v starost ohranjajo sposobnost reagiranja na povečan dotok svetlobe. V listnatih gozdovih po redčenju krošnja in z njo indeks listne površine veliko hitreje naraščata kot temeljnica sestoja (EULE 1959). Tudi pri proučevanju ekologije pomlajevanja si s temi metodami ne moremo pomagati, saj so svetlobne razmere v vrzelih prostorsko in časovno zelo spremenljive. Prav tako so omenjene metode neuporabne v prebiralnih gozdovih. V enomernejših borealnih gozdovih ali sestojih bora pa je odvisnost med temeljnico sestoja in relativnim sevanjem tesnejša in zato uporabnost metod večja.

## **2.2 PRINCIP DEFORMACIJE BIMETALA** PRINCIPLE OF BIMETALL DEFORMATION

Starejši instrument, ki deluje po omenjenem principu, se imenuje Fuess-Robitzschejev aktinograf (LÜSCHER 1986). Sprejemni element instrumenta je dvobarvna bimetalna ploščica. Zaščitena je s stekleno polkroglo in se pod vplivom sončnega sevanja krivi. Deformacije se preko mehanizma prenašajo na pisalo, ki spremembe beleži na papirnati trak. Instrument reagira na spremembe sevanja počasi, je nenatančen in relativno drag



(HOČEVAR / PETKOVŠEK 1977, LÜSCHER 1986). Z njim je možno izvajati le integrativne meritve.

### **2.3 DESTILACIJA DISTILLATION**

Na principu destilacije deluje Bellanijev piranometer. Sestavljen je iz dveh koncentričnih steklenih krogel, spojenih s stekleno cevko, na kateri je ustrezna skala. Tekočina (alkohol) iz počrnjene notranje krogle pod vplivom sevanja izpareva v zunanjo kroglo in tam kondenzira. Količina alkohola, ki je prešla iz notranje v zunanjo kroglo in je v cevki kondenzirala, je sorazmerna absorbirani sončni energiji (HOČEVAR / PETKOVŠEK 1977). Instrument je zasnovan v obliki krogle, zato z njim merimo vsoto direktnega in difuznega sevanja ter tudi od tal odbito sevanje (cirkumglobalno sevanje). Z njim so možne le integrativne meritve, v okviru katerih daje zelo natančne dnevne vrednosti. Bistvena pomanjkljivost omenjenega instrumenta je tesna odvisnost rezultatov od temperature okolice. Danes je mogoče meriti globalno sončno sevanje tudi z mnogo cenejšimi fotoelektričnimi tipali, na primer s piranometrom LI-200 SA ameriškega proizvajalca LI-COR. Vendar proizvajalec opozarja, da tipala niso primerna za meritve pod vegetacijo, ker so umerjena glede na spekter dnevne svetlobe.

### **2.4 FOTOKEMIČNE METODE PHOTOCHEMICAL METHODS**

Fotokemične metode meritve sončnega sevanja so razvili konec prejšnjega stoletja (CIESLAR 1904) in so prve metode, s katerimi so uspešno merili svetlobno sevanje v gozdovih. Metode temeljijo na analizi fotokemične razgradnje različnih spojin v raztopinah (npr. klorofil, hidrosil celuloza, antracen, fotografski papir, uranil-oksalat, uranil-nitrat itd.), ki smo jih poprej izpostavili sončnemu sevanju. Razgradnja poteka v linearni ali eksponencialni odvisnosti od trajanja in jakosti sevanja. Za vrednotenje rezultatov oz. izdelavo kontrolne krivulje je zato potrebna dodatna meritev sevanja na eni ali več meritvenih točkah s termoelektričnimi ali fotoelektričnimi merilci sevanja (PERRY / SELLERS / BLANCHARD 1969). Metode omogočajo meritve dnevni vrednosti sevanja. Z ustreznimi ponovitvami ob različnih mesecih je mogoče relativno

natančno zajeti časovno in prostorsko komponento porazdelitve sevanja v gozdu. Prednosti omenjenih metod (LUESCHER 1986) so naslednje:

- omogočajo veliko število ponovitev in (enostavno) uporabo,
- so robustne in cenene,
- ne zahtevajo vira energije,
- dobro se ujemajo s termoelektričnimi ali fotoelektričnimi merilci in
- imajo majhno temperaturno odvisnost v srednjem temperaturnem območju (5-30 °C).

Bistvene pomanjkljivosti so naslednje (*ibid.*):

- spektralna občutljivost je bistveno drugačna od PAR (izjema je klorofil),
- pri visokih in nizkih temperaturah je razgradnja spojin v tesni odvisnosti od temperature.

## **2.5 TERMOELEKTRIČNE METODE** THERMOELECTRIC METHODS

Instrumenti delujejo na principu meritve temperaturnih razlik med črno in belo površino s termoelementi. Primera instrumentov sta Kipp-Zonenov ali Eppleyev pirheliometer (LUESCHER 1986) oz. solarigraf (HOČEVAR / PETKOVŠEK 1977). Električna napetost, ki jo merimo na sistemu termoelementov, je sorazmerna energiji globalnega sončnega sevanja. Z instrumentom lahko izvajamo zvezne meritve globalnega in difuznega sevanja. Posredno pa lahko izračunamo tudi direktno sončno sevanje. Meritve so zelo natančne, vendar je instrument drag, poleg tega potrebujemo tudi stalen vir energije na terenu.

## **2.6 FOTOELEKTRIČNE METODE** PHOTOELECTRIC METHODS

Instrumenti v tej skupini delujejo na principu meritve potencialnih razlik na mejni plasti med kovino in polkovino. Z instrumenti lahko opravljamo trenutne, integrativne pa tudi zvezne meritve. Večina instrumentov ima spektralno občutljivost prilagojeno človeškemu

očesu, vendar so možne korekcije z uporabo različnih filtrov. V ekoloških študijah je najbolj pogosta uporaba naslednjih skupin instrumentov:

### 2.6.1 Luksmetri (fotometri) Photometric sensors

Prednost luksmetroev je v cenenosti, saj jih masovno proizvajajo za fotooptične namene. V preteklosti so sprejemne elemente izdelovali na osnovi selena (Se), danes praviloma uporabljajo silicij (Si) ali kadmijev sulfid (CdS). Glavna pomanjkljivost teh instrumentov je spektralna občutljivost, ki je prilagojena človeškemu očesu (grafikon 2). Za rastlinsko ekološke študije v današnjem času niso več primerni (DOHRENBUSCH 1995). Zaradi cenenosti so jih v preteklosti pogosto uporabljali. Z njihovo pomočjo so razvili mnoge zanimive pristope merjenja svetlobnih razmer v gozdovih (BURSCHEL / SCHMALTZ 1965, RÖHRIG 1967, KOLIĆ 1988), ki jih z izpopolnjenimi tipali lahko uporabljamo še danes.

### 2.6.2 PAR tipala Quantum Sensors

Velik napredek na področju meritev sončnega sevanja pri ekoloških študijah zelenih rastlin so naredili v šestdesetih letih z razvojem tipal za PAR (FEDERER / TANNER 1966 a). Skupina znanstvenikov, zbrana na univerzi v Nebraski, je leta 1967 pričela s petletnim projektom o razvoju pridelave sirka (*Sorghum*). V prvi fazi projekta so razvili tipalo in instrument za učinkovito merjenje količine sevanja, ki ga rastline porabijo za fotosintezo (BIGGS *et al.* 1971). Tako imenovana kvantna oziroma PAR tipala delujejo na naslednjem principu: iz ekofiziologije rastlin vemo, da je fotosinteza fotokemična reakcija, pri kateri se fotoni kot nosilci energije absorbirajo v rastlinskih pigmentih (LARCHER 1995). Za potek fotosinteze je pomembno, koliko fotonov fotosintetsko aktivnega spektra sončnega sevanja pade v časovni enoti na določen del listne površine. Zanima nas torej meritev gostote toka fotonov (angl. Photosynthetic Photon Flux (Density) - PPF(D)). Splošno uporabljene enote so moli, einsteini, fotoni in kvanti ( $1\mu\text{ mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2} = 1\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1} = 6.02\times 10^{-17}\text{ fotonov s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2} = 6.02\times 10^{-17}\text{ kvantov s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ ) (BIGGS 1984).

Meritev gostote toka fotonov je danes tehnično izvedljiva le posredno z meritvijo energije. Poleg tega PAR senzorji upoštevajo tudi različno vsebnost energije pri različnih valovnih dolžinah svetlobnega spektra. Te razlike preko svetlobnega spektra izravnavajo posebni filtri. Merilci sevanja na osnovi omenjenega principa, npr. LI-190SA ameriškega podjetja LI-COR (Lambda instruments Corp.), katerega predsednik je William Biggs, eden od konstruktorjev prvih PAR tipal, danes prevladujejo v rastlinskoekoloških študijah.

Pomanjkljivost omenjenih senzorjev je v tem, da ne upoštevajo manjše izrabe sevanja pri zelenih rastlinah v zelenem delu spektra sončnega sevanja (prim. grafikon 2). Ravno pod zastorom vegetacije pa zeleni spekter sončnega sevanja prevladuje. V procesih fotosinteze je slabše izkoristljiv, zato so vrednosti sevanja, izmerjene s PAR tipali, pod zastorom prevelike, saj niso v sorazmerju s fiziološkim učinkom prepuščenega sevanja. Pri uporabi PAR tipal pri gozdoslovnih proučevanjih, ki se odvijajo pretežno pod sklenjenim zastorom, npr. pri ekologiji naravnega pomlajevanja, je zato potrebna določena previdnost pri interpretaciji rezultatov.

Novejša tipala zato poleg spektra fotosintetsko aktivnega sevanja ter različne energetske vrednosti fotonov pri različnih valovnih dolžinah svetlobnega spektra upoštevajo še manjšo izrabo sevanja pri zelenih rastlinah v okviru zelenega dela spektra sončnega sevanja. V tem primeru govorimo o PUR tipalih, oz. tipalih za merjenje fotosintetsko uporabnega sevanja (DOHRENBUSCH 1995, DOHRENBUSCH / KRANIGK / PRYOR 1995). Vrednosti sevanja na prostem, pridobljene s PAR in PUR tipali, so primerljive, pod zastorom pa lahko pričakujemo večja odstopanja.

## **2.7 PRESLIKAVA NEBESNEGA SVODA IN SONČNIH POTI HEMISPHERICAL PHOTOGRAPHY**

Nenatančnost trenutnih, zahtevnost zveznih meritev sevanja v gozdovih ter velika variabilnost sevanja so glavni vzroki, ki so pripeljali do razvoja ideje o posrednem ocenjevanju sončnega sevanja na osnovi fotografije krošenj dreves na celotni hemisferi. Prve poskuse s fotografiranjem drevesnih krošenj najdemo že konec prejšnjega stoletja, ko je Friedrich (1895 cit. po CIESLAR 1904) s sestavljanjem serij fotografij krošenj ocenjeval zastiranje oz. osvetljenost sestojev na raziskovalnih ploskvah. Na podoben

način, vendar z risanjem tlorisov krošenj, je Böhmerle (1900 cit. po CIESLAR 1904) že v osemdesetih letih prejšnjega stoletja analiziral poskuse z redčenji.

Ideja se precej kasneje ponovno pojavi na angleškem govornem področju, kjer sta zamisel uporabila Evans in Coombe (1959) v študiju ekologije gozda. Vendar metoda ni prav zaživela zaradi zahtevnega združevanja več fotografij delov hemisfere v enotno projekcijo. Po navezavi stikov z R. Hillom, ki je že leta 1924 razvil fotografski objektiv "ribje oko" za študij oblakov, se je metodologija začela hitro uveljavljati na področju ekologije gozda. Objektiv "ribje oko" je omogočil projekcijo celotnega nebesnega svoda na ravno podlago (fotografski papir).

Princip ocenjevanje sončnega sevanja v gozdu na podlagi preslikave nebesnega svoda in sončnih poti je naslednji: Celotni nebesni svod, ki je bolj ali manj prekrit s krošnjami dreves v gozdu, projiciramo na ravno podlago. Na projekcijo nebesnega svoda s krošnjami dreves prenesemo projekcijo sončnih poti za različne mesece (dneve) na določeni geografski širini in preštejemo število ur, ko sonce ni skrito za krošnjami dreves. Na ta način dobimo oceno relativnega trajanja potencialnega direktnega sončnega sevanja na mestu meritve v primerjavi z direktnim sevanjem na prostem (angl. Direct-Site-Factor, DIRSF, po ANDERSON 1964). Na isto projekcijo nebesnega svoda s krošnjami dreves lahko prenesemo tudi t.i. "pajkovo mrežo" za ocenjevanje deleža difuznega sevanja na mestu meritve v primerjavi z razmerami na prostem (angl. Diffuse-Site-Factor, DIFFSF, po ANDERSON 1964).

Deleže direktnega in difuznega sevanja v sestoji lahko pomnožimo z vrednostmi kontrolnih meritev na prostem in tako dobimo vsote direktnega in difuznega sončnega sevanja na izbrano časovno enoto. Te realne vrednosti sevanja že upoštevajo podatke o oblačnosti. Namesto referenčnih meritev na prostem je mogoče uporabiti tudi standardne meteorološke enačbe za izračunavanje sevanja (GREIS / KELLOMÄKI 1981, LÜPKE 1982, WAGNER / NAGEL 1992), ki omogočajo tudi oceno za PAR (WAGNER 1996). Za preračunavanje deleža potencialnega direktnega sevanja v absolutno lahko uporabimo tudi podatke o oblačnosti iz bližnje meteorološke postaje (IMBECK / OTT 1987).

Do danes so se na principu fotografije hemisfere uveljavile tri metode. Najstarejša je fotografiranje nebesnega svoda z objektivom ribje oko. Skoraj istočasno so razvili opto-

grafično poenostavitev omenjene metode s horizontoskopom (TONNE 1954), ki so jo od začetka uporabljali predvsem v arhitekturi.

Poskusna snemanja s horizontoskopom v gozdnih sestojih so bila nezadovoljiva. Zato smo na Katedri za gojenje gozdov razvili pripravo, ki omogoča pritrditev horizontoskopa na fotografski stativ in prerinjanje zastrtega dela neba na prosojni papir (DIACI 1993). S tako imenovanim "stabilnim horizontoskopom" je mogoče precej natančnejše ocenjevanje svetlobnih razmer, zato se metoda vse bolj uveljavlja pri gozdoslovnih raziskavah in v praksi gojenja gozdov (SCHÜTZ / BRANG 1995, DIACI 1997). Thormann (1996) ugotavlja, da je mogoče z uporabo stabilnega horizontoskopa in izurjenega ocenjevalca doseči tesno odvisnost med ocenami sevanja s horizontoskopom in s fotografijami z objektivom "ribje oko" ( $R^2 = 0,96$ ). Stabilni horizontoskop je manj zanesljiv v razmerah difuzno presvetljenih krošenj oz. zelo majhnih vrzeli.

Novejši instrument, ki simulira objektiv "ribje oko" z uporabo več krožno razporejenih silicijevih fotoelektričnih tipal, je LI-2000 Plant Canopy Analyzer, podjetja LI-COR (WELLES / NORMAN 1991). Instrument omogoča poleg deleža difuznega sevanja še nedestruktivno oceno indeksa listne površine, oceno povprečnega kota nagiba listov krošnje in oceno površine listov krošnje na kubični meter volumna krošnje.

Na principu beleženja sončnih poti temelji tudi metoda neposrednega zapisa sončnih žarkov na papirnati trak. Instrument se imenuje Campell-Stokesov heliograf. Z njim merimo trajanje direktnega sončnega sevanja. Metoda je v gozdu zaradi zapletenega poteka horizonta nenatančna in praktično neuporabna.

### **3 PRIMERNOST METOD UGOTAVLJANJA SONČNEGA SEVANJA ZA GOZDOSLOVNE RAZISKAVE IN PRAKSO** **SUITABILITY OF SOLAR RADIATION MEASUREMENT METHODS FOR USE IN THE FOREST ECOLOGY AND SILVICULTURE**

Novejše raziskave potrjujejo ključni pomen poznavanja porazdelitve sončnega sevanja v gozdovih za razumevanje razvoja vegetacije. Tudi gojitelji v operativi že uporabljajo instrumente za ocenjevanje svetlobnih razmer, saj je poznavanje le teh nujno pri večini

ukrepov, še najbolj pa pri uvajanju sestojev v obnovo. Poznavanje zakonitosti sevanja v sestojih lahko gojitelja obvaruje pred marsikatero napako.

Iz primerjave uveljavljenih metod je razvidno, da so starejše metode, ki temeljijo na ocenjevanju zastiranja krošenj, natančne in zato manj uporabne. Ocene na podlagi natančnih projekcij krošenj so primernejše, vendar jih zaradi zahtevnosti dela uporabljamo samo za manjše referenčne objekte. Poleg ocen o sevanju nam modeli krošenj nudijo vpogled v zgradbo sestojev. V zadnjem času na osnovi individualnih rastnih modelov razvijajo tudi različne simulacije porazdelitve ekoloških dejavnikov v sestojih, tako da bodo metode tlorisov krošenj ohranile svojo vrednost.

Glede na kakovost sončnega sevanja (pogl. 1.1) ugotavljamo, da mora sodoben instrument za uporabo v ekoloških študijah gozdov ustrezati spektru PAR. V tem območju mora upoštevati naraščanje vsebnosti energije pri različnih valovnih dolžinah svetlobnega spektra ter padec izkoristka sevanja za rastline v zelenem delu spektra. Vsem trem zahtevam ustrezajo tipala, ki zaznavajo fotosintetsko uporabno sevanje (PUR). Danes so omenjena tipala dovolj dostopna, da jih je smiselno uporabljati pri zahtevnejših študijah gozdne vegetacije.

Za trenutne meritve sončnega sevanja se danes odločamo le redko. Rezultati večinoma niso primerljivi, razen na področju deleža difuznega sevanja. Če želimo v gozdu zajeti časovno in prostorsko spreminjanje sončnega sevanja, potem se odločamo za zvezne meritve sevanja. Zanje potrebujemo sočasno na različnih mestih v sestoju (vrzeli) več tipal, ki so povezana z računalnikom. Omenjeni pristop je drag, časovno zahteven, poleg tega tipala dajejo veliko podatkov, ki jih je šele potrebno primerno ovrednotiti. S pocenitvijo prenosnih računalnikov postaja omenjena metoda dostopnejša in zato primerna za podrobnejše študije ekologije gozda.

Na področju manj zahtevnih ekoloških študij ima veliko prihodnost metoda ocenjevanja sevanja z uporabo fotografije nebesne svoda. Metoda daje dokaj natančne ocene sevanja, če uporabljamo profesionalno razvito programsko in računalniško opremo (WAGNER / NAGEL 1992). Na istem principu deluje tudi horizontoskop, katerega uporaba je še posebej priporočljiva za praktično gojenje gozdov. Horizontoskop, pritrjen na fotografski stativ, daje z nekaj vaje ocenjevalca rezultate, ki so povsem primerljivi z

rezultati fotografske različice. Za manj zahtevne ekološke študije in prakso gojenja gozdov je zelo uporaben tudi LI-COR 2000. Glavni pomanjkljivosti instrumenta sta zaenkrat visoka nabavna cena in manjkajoče vrednosti za direktno sevanje.

#### **4 POVZETEK**

Sončno sevanje je eden najpomembnejših ekoloških virov in dejavnikov. Pomeni edini vir energije, ki ga zelene rastline lahko uporabijo v procesih metabolizma. Jakost in kakovost sevanja uravnava mnoge fiziološke in vedenjske pojave pri rastlinah in živalih. Poleg tega sončno sevanje neposredno vpliva na ostale ekološke dejavnike, npr. temperaturo zraka in tal, vlažnostne razmere v zraku in tleh ipd. Posredno pa vpliva praktično na vse dejavnike žive in nežive narave, od oblike humusa, porazdelitve flore in favne v prsti do zimovališč velikih rastlinojedov.

Razumljivo je, da proučevanje svetlobnih razmer pomeni eno temeljnih raziskovalnih področij za ekologijo gozdov. Meritve sončnega sevanja v vegetacijski odeji so izjemno zahtevne. Nehomogenost vegetacijske odeje povzroča časovno in prostorsko spremenljivost jakosti in kakovosti sončnega sevanja. Uporaba fizikalnih zakonov za opisovanje sprememb sevanja v vegetaciji je omejena.

Ugotavljanje svetlobnih razmer v gozdovih je bilo vse do današnjih dni časovno in finančno zahtevno. Natančne meritve so uporabljali predvsem v raziskovalne namene. Gojitelji praktiki so se zadovoljili z bolj ali manj grobimi in pristranskimi ocenami. Danes postajajo metode ugotavljanja svetlobnih razmer v sestojih vse bolj dosegljive, hkrati pa z malopovršinskim gospodarjenjem narašča tudi potreba po poznavanju mozaika svetlobnih razmer bolj kot kdajkoli prej. Še posebej tam, kjer so razmere za uspevanje gozdov zaostrene, npr. na gozdni meji ali v spremenjenih gozdovih. Raziskave kažejo, da bodo zaradi časovno in prostorsko spremenljive svetlobne klime sestojev vsaj metode nepristranskega ocenjevanja svetlobnih razmer, npr. s horizontoskopom, morale postati del redne prakse gozdarja operativca.



Osnovni namen prispevka je s primerjavo prikazati lastnosti metod in instrumentov za merjenje in ocenjevanje sončnega sevanja in jih priporočiti za meritve sevanja pri raziskavah ekologije gozda in tudi neposredno pri praktičnem gojenju gozdov.

Glede na uporabljen postopek merimo različne komponente sončnega sevanja: globalno sevanje, direktno sevanje, difuzno sevanje, fotosintetsko aktivno sevanje, fotosintetsko uporabno sevanje, vidno svetlobo, trajanje osončenja. Z uporabo različnih metod in instrumentov je vedno povezana tudi variabilnost spektralnih območij in občutljivost instrumentov na spekter sevanja. Pri meritvah je potrebno vse omenjene parametre natančno opisati. Sončno sevanje lahko merimo na tri različne načine, zato ločimo zvezno registrirane meritve, integrativne meritve in trenutne meritve.

V splošnem bi lahko metodologijo in ustrezne instrumente za merjenje in ocenjevanje sončnega sevanja strnili v naslednje skupine: princip deformacije kovin, destilacija, fotokemične metode, termoelektrične metode, fotoelektrične metode, ocenjevanje in posredno ugotavljanje sončnega sevanja v gozdu ter ocenjevanje svetlobnih razmer na podlagi preslikave hemisfere in sončnih poti.

Instrument za merjenje v ekoloških študijah vegetacije naj bo glede kakovosti sončnega sevanja prilagojen občutljivosti rastlin na sevanje:

- 1) Občutljiv naj bo le na območje valovnih dolžin med 400 nm in 700 nm.
- 2) V omenjenem območju naj ima občutljivost, ki je linearna funkcija valovne dolžine (konstantni kvantni izkoristek). Pogoje 1 in 2 ustrezajo PAR tipala.
- 3) Upoštevati mora padec izkoristka sevanja za rastline v zelenem delu spektra.

Na podlagi primerjave metod ugotavljamo, da samo PUR (fotosintetsko uporabno sevanje) tipala ustrezajo vsem trem zahtevam. Danes so PUR tipala dovolj dostopna, zato jih je smiselno uporabljati pri zahtevnejših raziskavah gozdne vegetacije. Odločamo se za zvezne meritve, pri čemer namestimo na raziskovalnem objektu več tipal, krmiljenih z računalnikom.

Na področju manj zahtevnih ekoloških študij ima veliko prihodnost metoda ocenjevanja sevanja z uporabo fotografije nebesne svoda. Metoda daje dokaj natančne ocene sevanja, če uporabljamo profesionalno razvito programsko in računalniško opremo.

Na istem principu deluje tudi horizontoskop, katerega uporaba je še posebej priporočljiva za praktično gojenje gozdov. Na katedri za gojenje gozdov smo razvili stabilni horizontoskop, ki omogoča izris horizontogramov in uporabo fotografskega stativa. Z nekaj vaje ocenjevalca so ocene sončnega sevanja s stabilnim horizontoskopom povsem primerljive z rezultati fotografske različice.

Za manj zahtevne ekološke študije in prakso gojenja gozdov je zelo uporaben tudi LICOR 2000, ki postaja kar nekakšen standard na tem področju. Glavni pomanjkljivosti instrumenta sta visoka nabavna cena in manjkajoče vrednosti za direktno sevanje.

## 5 SUMMARY

*Solar radiation is one of the most important ecological resources and factors. It is the only source of energy used in plant metabolism. The intensity and quality of solar radiation regulates many physiological and behavioural events in plants and animals. Besides this, solar radiation directly influences practically other ecological factors, e.g. air and soil temperature, air and soil moisture etc. It influences all factors of dead and living nature indirectly, i.e. forms of humus, distribution of flora and fauna in soils, winter resorts of large herbivores etc.*

*It is therefore quite clear that in forest ecology a research into radiation conditions is a primary study area. In a vegetation layer solar radiation measurement is highly demanding. Heterogeneous vegetation layers cause changes in intensity and quality of solar radiation, subject to time and space. There are limitations to defining radiation changes in vegetation by the laws of physics.*

*In the past it was time consuming and expensive to measure the radiation climate in forests. Precise measurements were used for scientific purposes only. Silviculturists had to be satisfied with more or less subjective and rough assessments. Today more than ever before knowledge of the methods of radiation evaluation in forest stands is easily accessible, and there is also a greater need to learn about the radiation climate mosaic due to small scale forest management. This knowledge is useful in areas where forest growing conditions are not favourable, e.g. the upper timber line or in man-made forests.*

*The research results show that foresters will have to use at least the methods for estimating objective radiation conditions in their daily work (e.g. using a horizonscope), due to the changing radiation climate which is subject to time and space in forest stands.*

*The main concern of this paper is to give recommendations for radiation measurement methods to be used in forest ecology research and in silvicultural practice. These recommendations are based on a comparison of methods and on the characteristics of instruments for solar radiation measurement and estimation.*

*According to the method used, different elements of solar radiation are measured - e.g. global solar radiation, direct solar radiation, diffused solar radiation, photosynthetically active radiation, photosynthetically usable radiation, visible radiation, duration of solar radiation exposure. Depending on the variety of the spectrum band, different methods and instruments are used, and instrument sensitivity determines the radiation wavelength range that can be measured. All the elements mentioned have to be described when radiation is being measured. Solar radiation measurements can be carried out in three different ways: long-term monitoring, integrative measurements and momentary measurements.*

*In general, methods and appropriate instruments for solar radiation measurements can be divided into the following groups: the principle of bimetallic deformation, distillation, photochemical methods, thermoelectric methods, photoelectric methods, and estimation and indirect assessment of solar radiation by hemispherical photography.*

*Taking solar radiation quality into consideration, an instrument used in forest vegetation ecological studies should be adapted to plant sensitiveness to radiation, and therefore should conform to the following requirements:*

- 1) Its spectral sensitivity should be calibrated to wavelengths between 400 nm and 700 nm.*
- 2) In this range the spectral sensitivity should be a linear function of the wavelength (Ideal Quantum Response). The requirements 1) and 2) are met by using PAR sensors.*

- 3) *An instrument has to be adapted to lesser solar radiation absorptance of green plants in the green light wavelength range of radiation.*

*All the methods were compared and analysed, and our conclusion is that only PUR sensors meet all three requirements. Nowadays PUR sensors are easily obtained and therefore very appropriate for complex forest vegetation research. Continuous measurements are possible especially with multiple sensors distributed on a research plot and connected to a computer processor.*

*In the field of less complex ecological studies there is a great future for the radiation measurement and assessment method which uses hemispherical photography. This method provides relatively precise radiation evaluations when professional hardware and software is utilised.*

*The same principle is applied by using a horizontoscope, which is strongly recommended in silvicultural practice. A fixed horizontoscope on a tripod was developed at The Chair for Silviculture in Ljubljana. A horizontoscope enables us to draw horizontographs, and some experience in solar radiation evaluation on a fixed horizontoscope gives adequate results compared to those obtained by hemispherical photography.*

*LI-COR 2000 is very useful to the silviculturist and for less complex ecological studies. LI-COR 2000 is becoming the accepted standard in this field. The main drawback with this instrument are its high purchase price and the absence of measurement values for direct radiation.*

## **6 VIRI REFERENCES**

- ANDERSON, M. C., 1964. Studies of woodland light climate I. The photographic computation of light conditions.- *J. Ecology*, 52, s. 27-41.
- BEGON, M. / HARPER, J. L. / TOWNSEND, C. R., 1996. *Ecology: individuals, populations, and communities.*- Boston, Blackwell Scientific Publications, 1068 s.

- BIGGS, W., 1984. Radiation Measurement.- V: Gensler, W. G. (ur.). Proceedings of the NATO Advanced Study Institute on "Advanced Agricultural Instrumentation". Dodrecht, Martinus Nijhoff Publishers, 5 s.
- BIGGS, W. W. / EDISON, R. A. / EASTIN, J. D. / BROWN, K. W. / MARANVILLE, J. W. / CLEGG, M. D., 1971. Photosynthesis light sensor and meter.- *Ecology*, 52, s. 125-131.
- BONNOR, G. M., 1967. Estimation of Ground Canopy Density from Ground Measurements.- *J. of Forestry*, 65, s. 544-547.
- BRANG, P., 1996 a. Ansamungsgunst und Verteilung der Direktstrahlung in schlitzförmigen Bestandesöffnungen zwischenalpiner Fichtenwälder.- *Schweiz. Z. Forstwes.*, s. 761-784.
- BRANG, P., 1996 b. Experimentelle Untersuchungen zur Ansamungsökologie der Fichte im zwischenalpinen Gebirgswald.- Diss. ETH Zürich Nr. 11243. *Schweiz. Z. Forstwes.*, Beih. Nr. 77, 375 s.
- BRUNNER, A., 1994. Ökologische Lichtmessung im Wald.- *Forstarchiv*, 65, s. 133-138.
- BURSCHEL, P. / SCHMALTZ, J., 1965. Die Bedeutung des Lichtes für die Entwicklung junger Buchen.- *Allg. Forst- F.- u. J.-Ztg.*, 136, 9, s. 193-210.
- BURSCHEL, P. / HUSS, J., 1987. Grundriss des Waldbaus: Ein Leitfaden für Studium und Praxis.- Hamburg und Berlin, Verlag Paul Parey, 352 s.
- CANHAM, C. D. / FINZI, A. C. / PACALA, S. W. / BURBANK, D. H., 1994. Causes and consequences of resource heterogeneity in forests: interspecific variation in light transmission by canopy trees.- *Can. J. For. Res.*, 24, 2, s. 337-349.
- CESCATTI, A., 1997 a. Modelling the radiative transfer in discontinuous canopies of asymmetric crowns. I Model structure and algorithms.- *Ecol. Modelling*, 101, 2-3, s. 263-274.
- CESCATTI, A., 1997 b. Modelling the radiative transfer in discontinuous canopies of asymmetric crowns. II. Model testing and application in a Norway spruce stand.- *Ecol. Modelling*, 101, 2-3, s. 275-284.
- CHAZDON, R. L., 1988. Sunflecks and their importance to forest understory plants.- *Adv. Ecol. Res.*, 18, s. 1-63.
- CIESLAR, A., 1904. Die Rolle des Lichtes im Walde.- *Mitteilungen aus dem forstlichen Versuchswesen Österreichs*, 30, s. 1-105.

- DENGLER, A. / RÖHRIG, E. / BARTSCH, N., 1992. Waldbau auf ökologischer Grundlage. Band I: Der Wald als Vegetationsform und seine Bedeutung für den Menschen.- Hamburg, Berlin, Verlag Paul Parey, 350 s.
- DIACI, J., 1993. Vloga gorskega javorja (*Acer pseudoplatanus* L.) pri naravnem pomlajevanju smrekovih nasadov na rastišču jelovo-bukovega gozda na Krašici, nazarsko območje.- V:Prezrte drevesne vrste (Kotar, M., ur.), Dolenjske Toplice, Slovenija, s. 210-235.
- DIACI, J., 1997. Experimentelle Felduntersuchungen zur Naturverjüngung künstlicher Fichtenwäldern auf Tannen-Buchenwaldstandorten (*Homogyno sylvestris*-Fagetum) in den Savinja-Alpen (Slowenien) mit besonderer Berücksichtigung der Ansamlungsphase und unter dem Einfluss der Faktoren Licht, Vegetation, Humus und Kleinsäuger.- Schweiz. Z. Fortswes., Beih. Nr. 80, 197 s.
- DOHRENBUSCH, A., 1987. Kann die "relative Beleuchtungsstärke" die Lichtverhältnisse im Wald zuverlässig charakterisieren?- Forstarchiv, 58, s. 24-27.
- DOHRENBUSCH, A., 1995. Ueberlegungen zur Optimierung der Strahlungsmessung im Wald. - Allg. Forst- u. J.-Ztg., 166, s. 109-114.
- DOHRENBUSCH, A. / KRANIGK, J. / PRYOR, D., 1995. Entwicklung und Bau eines Lichtmessgerätes zur Erfassung der photosynthetisch nutzbaren Strahlung.- All. Forst- und J. Ztg., 166, s. 154-160.
- EIMERN, J. von / EHRHARDT, O., 1986. Zur tages- und jahreszeitlichen Veränderlichkeit der Globalstrahlung und ihrer Komponenten über und in einem Buchenwald.- Forstarchiv, 57, s. 86-92.
- ELLENBERG, H., 1996. Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen in ökologischer, dynamischer und historischer Sicht.- Stuttgart, Verlag Eugen Ulmer, 1095 s.
- ENGLER, A., 1900. Wirtschaftsprincipien für die natürliche Verjüngung der Waldungen mit besonderer Berücksichtigung der verschiedenen Standortsverhältnisse der Schweiz.- Schweiz. Z. Forstwes., 51, s. 264-274 in s. 300-310.
- EULE, H. W., 1959. Verfahren zur Baumkronenmessung und Beziehungen zwischen Kronengrösse, Stammstärke und Zuwachs bei Rotbuche, dargestellt an einer nordwestdeutschen Durchforstungsversuchsreihe.- Allg. Forst- u. J.-Ztg., 130, 7, s. 185-201.
- EVANS, G. C. / COOMBE, D. E., 1959. Hemispherical and woodland canopy photography and the light climate.- J. Ecology, 47, s. 103-113.

- FEDERER, C. A. / TANNER, C. B., 1966 a. Sensors for measuring light available for photosynthesis.- *Ecology*, 47, 4, s. 654-657.
- FEDERER, C. A. / TANNER, C. B., 1966 b. Spectral distribution of light in the forest.- *Ecology*, 47, 4, s. 555-560.
- FREHNER, M., 1989. Beobachtungen zur Einleitung der Naturverjüngung an einem nordexponierten Steilhang im subalpinen Fichtenwald.- *Schweiz. Z. Forstwes*, 140, s. 1013-1022.
- GAYER, K., 1882. *Der Waldbau*.- Berlin, Verlag von Paul Parey, 592 s.
- GOBEC, J., 1998. Pomlajevanje nasadov smreke (*Picea abies* Karst.) na Rudnici pri Podčetrtku.- *Diplomska naloga BTF, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire*, Univerza v Ljubljani, 64 s.
- GREIS, I. / KELLOMÄKI, S., 1981. Crown Structure and Stem Growth of Norway Spruce Undergrowth under Varying Shading.- *Silva Fennica*, 15, 3, s. 306-322.
- HARI, P. J. / HALLMANN, E. / SALMINEN, R. / VAPAAVUORI, E., 1981. Evaluation of factors controlling net photosynthesis rate in Scots pine seedlings under field conditions without water stress.- *Oecologia (Berl.)*, 48, s. 186-189.
- HOČEVAR, A. / PETKOVŠEK, Z., 1977. *Meteorologija - osnove in nekatere aplikacije*.- Ljubljana, Partizanska knjiga, 219 s.
- HOLBO, H. R. / CHILDS, S. W. / McNABB, D. H., 1985. Solar radiation at seedling sites below partial canopies.- *Forest Ecology and Management*, 10, 1, 2, s. 115-124.
- IMBECK, H. / OTT, E., 1987. Verjüngungsökologische Untersuchungen in einem hochstaudenreichen subalpinen Fichtenwald, mit spezieller Berücksichtigung der Schneeablagerung.- *Mitteilungen des Eidgenössischen Institutes für Schnee- und Lawinenforschung*, 42, 202 s.
- KOLIĆ, B., 1988. *Šumarska ekoklimatologija sa osnovama fizike atmosfere*.- Beograd, Naučna knjiga, 397 s.
- KOOP, H., 1989. *Forest Dynamics; SILVI STAR: A Comprehensive Monitoring System*.- Berlin, Heidelberg, Springer Verlag, 229 s.
- KREČMER, V., 1966. Das Mikroklima der Kieferlochkahlschläge. - I. Teil: Einleitung, Strahlung.- *Wetter und Leben*, 18, 7-8, s. 133-141.
- KUNZ, S., 1983. Anwendungsorientierte Kartierung der Besonnung im regionalen Masstab.- *Geogr. Bernensia*, 19, 87 s.
- KUUSIPALO, J., 1985. On the use of tree stand parameters in estimating light conditions below the canopy.- *Silva Fennica*, 19, s. 185-196.

- LARCHER, W., 1995. Physiological plant ecology: ecophysiology and stress physiology of function groups.- Berlin, Springer Verlag, 506 s.
- LÜSCHER, F., 1986. Zur Methodik der Strahlungsmessung im Walde - ein Literaturstudium und Ergebnisse eines Versuches mit Chlorophyllextrakt.- Interner Bericht des Institutes für Wald- und Holzforschung, ETH, Zürich, 25 s.
- LÜSCHER, F., 1990. Untersuchungen zur Höhenentwicklung der Fichtennaturverjüngung im inneralpinen Gebirgswald.- Professur für Waldbau der ETH, Zürich, 83 s.
- LÜPKE, B. V., 1982. Versuche zur Einbringung von Lärche und Eiche in Buchenbeständen.- Schriften aus der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen, 74, 123 s.
- McLAUGHLIN, S. P., 1978. Overstory Attributes, Light, Throughfall, and the Interpretation of Overstory - Understory Relationships.- Forest Science, 24, 4, s. 550-553.
- MITSCHERLICH, E. / KÜNSTLE, 1967. Ein Beitrag zur Frage der Beleuchtungsstärke im Bestände.- Allg. Forst- u. J.-Ztg., 138, 10, s. 213-223.
- MITSCHERLICH, G., 1971. Wald, Wachstum und Umwelt. Bd. II: Waldklima und Wasserhaushalt.- Sauerländer, 365 s.
- MLINŠEK, D., 1992. Gojenje gozdov I in II.- Biotehniška fakulteta, VTOZD za gozdarstvo, Ljubljana, 474 s. in 425 s.
- OKER - BLOM, P., 1986. Photosynthetic radiation regime and canopy structure in modeled forest stands.- Acta Forestalia Fennica, 197, s. 1-44.
- OTT, E. / LÜSCHER, F. / FREHNER, M. / BRANG, P., 1991. Verjüngungsökologische Besonderheiten im Gebirgsfichtenwald im Vergleich zur Bergwaldstufe.- Schweiz. Z. Forstwes., 142, 11, s. 879-904.
- PERRY, T. O. / SELLERS, H. E. / BLANCHARD, C. O., 1969. Estimation of photosynthetically active radiation under a forest canopy with chlorophyll extracts and from basal area measurements.- Ecology, 50, s. 39-44.
- PRETZSCH, H., 1992. Modellierung der Kronenkonkurrenz von Fichte und Buche in Rein- und Mischbeständen.- Allg. Forst- u. J.-Ztg., 163, s. 203-213.
- RÖHLE, H. / HUBER, W., 1985. Untersuchungen zur Methode der Ablotung von Kronenradien und der Berechnung von Kronengrundflächen.- Forstarchiv, 56, s. 238-243.



- RÖHLE, H., 1986. Vergleichende Untersuchungen zur Ermittlung der Genauigkeit bei der Ablotung von Kronenradien mit dem Dachlot und durch senkrechtes Anvisieren des Kronenrandes (Hochblick - Messung). - Forstarchiv, 57, s. 67-71.
- RÖHRIG, E., 1967. Wachstum junger Laubholzpflanzen bei unterschiedlichen Lichtverhältnissen.- Allg. Forst- u. J.-Ztg., 138, 10, s. 224 - 240.
- SCHÜTZ, J. Ph. / BRANG, P., 1995. L'horizontoscope: un étonnant outil pratique de sylviculture, notamment en haute montagne.- Bull. Techn. ONF.
- TANNER, V. / ELLER, B. M., 1986. Veränderungen der spektralen Eigenschaften der Blätter der Buche (*Fagus sylvatica* L.) von Laubaustrieb bis Laubfall.- Allg. Forst- u. J.-Ztg., 157, 6, s. 108-117.
- THORMANN, J. J., 1996. Erfahrungen mit einfachen Methoden zur Strahlungserfassung im Wald: z.B. das Horizontoskop und der LAI-2000 Plant Canopy Analyser.- V: 11. Arbeitstagung der Sektion Waldbau im deutschen Verband forstlicher Forschungsanstalten in Schopfheim-Weichs (D), s. 1-9.
- TONNE, F., 1954. Besser bauen mit Besonnungs- und Tageslicht- planung.- Stuttgart, Verlag Karl Hofmann, 41 s.
- USTIN, S. L. / WOODWARD, R. A. / BARBOUR, M. G. / HATFIELD, J. L., 1984. Relationships between sunfleck dynamics and red fir seedling distribution.- Ecology, 65, 5, s. 1420-1428.
- WAGNER, S. / NAGEL, J., 1992. Ein Verfahren zur PC-gesteuerten Auswertung von Fish-eye-Negativfotos für Strahlungsschätzungen.- Allg. Forst- u. J.-Ztg., 163, s. 110-116.
- WAGNER, S., 1996. Übertragung strahlungsrelevanter Wetterinformation aus punktuellen PAR-Sensordaten in grössere Versuchsflächenanlagen mit Hilfe hemisphärischer Fotos.- Allg. Forst- u. J.-Ztg., 167, 1-2, s. 34-40.
- WAYNE, P. M. / BAZZAZ, F. A., 1993. Birch seedling responses to daily time courses of light in experimental forest gaps and shadehouses.- Ecology, 74, 5, s. 1500-1515.
- WELLES, J. M. / NORMAN J. M., 1991. Instrument for Indirect Measurement of Canopy Architecture.- Agronomy Journal, 83, s. 818-825.

**7 ZAHVALA**  
**ACKNOWLEDGEMENTS**

Za pregled članka in koristne pripombe se zahvaljujem doc. dr. Janezu Diaciju ter recenzentoma prof. dr. Francu Batiču in doc. dr. Hojki Kraigher. Prispevek je nastal v okviru raziskovalnih projektov J4-0513 ter L4-8570, ki ju financira Ministrstvo za znanost in tehnologijo RS.

---