

UPORNOSTNI MERILNIK DREVESNE KONDICIJE IN BIOLOŠKEGA RAZKROJA
LESA

ALTERNATE -CURRENT RESISTANCE METER TO DETERMINE TREE CONDITION
AND BIODETERIORATION OF WOOD

Industrijsko razvojni projekt
Šifra projekta: B-375-(42-0862-92)

Financerji:

Ministrstvo za znanost in tehnologijo

Gozdno gospodarstvo Kočevje

Gozdno gospodarstvo Ljubljana

Izvajalci:

Univerza v Ljubljani, BF, Lesarski oddelek, Katedra za tehnologijo lesa

Iskra - Merilna elektronika, Industrija merilne elektronske tehnike

Gozdno gospodarstvo Kočevje

Gozdno gospodarstvo Ljubljana

Vodja projekta:

prof. dr. Niko TORELLI

Raziskovalna skupina projekta:

Niko TORELLI
Bojan BUČAR
Katarina ČUFAR
Martin ZUPANČIČ
Franci POHLEVEN
Željko GORIŠEK
Dušan ROBIČ
Aleš VRHOVEC
Anton PRELESNIK

Pri iskanju metode za objektivno določitev drevesne ravnosti in kondicije ter zaznavanje zgodnjih stadijev razkroja, je bila predlagana metoda merjenja električne upornosti. Razvitih je bilo več instrumentov npr. "Shigometer" - Osmose Wood Preserving Co., Inc., Buffalo, NY, USA in "Conditometer" - Bollmann Elektronik Systeme, Rielasingen, FRG. Glavno oviro pri uvajanju metode so predstavljale težave pri interpretiranju odčitkov. Dolgoletne bioelektrične meritve, ki jih izvajamo v Katedri za tehnologijo lesa so omogočile zadovoljivo interpretacijo značaja variacij ER v živem drevju in razkrajajočem se lesu. V sodelovanju z Iskro - Merilna elektronika ter GG Ljubljana in GG Kočevje, je bil skonstruiran naprednejši lasten merilni instrument - Tree Tester.

1. PRINCIP

Električna upornost (ER) je odvisna predvsem od molske koncentracije v apoplastni raztopini po kateri teče električni tok (Fensom 1966, Tattar et al. 1977). Tree Tester je v bistvu kationski detektor in ne vlagomer. Za razliko od električnih merilnikov vlage ki delujejo v higroskopskem območju, deluje nad točko nasičenja celičnih sten. Kalijev ion (K⁺) je najpogostejši kation v rastlinskih tkivih in je zelo mobilan. Njegova koncentracija je domnevno glavni faktor, ki vpliva na električno prevodnost oz. upornost.

V vaskularni kambijevi coni (VKC) in tkivih, ki vsebujejo žive celice (parenhimske in diferencirajoče se celice, t.j. celice s protoplastom) je ER nizka in obratno.

V razkrajajočem lesu pride do ionizacije še preden postanejo spremembe vidne, ter pred izgubo mase in trdnosti. V lesu, ki ga razkrajja bela trohnoba je zmanjšan ER posledica povečane koncentracije kalijevega iona, v lesu ki ga razkrajja rjava trohnoba pa posledica povečane koncentracije vodikovega iona (Shortle 1982).

Na ravnost in kondicijo drevja in s tem na izmerjeno ER, lahko vplivajo številni faktorji kot: rodovitnost rastišča, cenotski status (dominanca, supresija oz. prevladanost) in različni škodljivi vplivi (npr. napad insektov, bolezni, onesnaženje zraka, mehanske poškodbe itd.).

Poudariti je treba, da interpretacija rezultatov ni enostvna. Shigo (1986) pravi: "Pomemben in zahteven del metode predstavlja interpretacija odčitkov. Zato je potrebna praksa in izurjenost. Ko metodo usvojimo lahko dobimo mnogo informacij... Skušati napisati in razložiti kako uporabljati merilnik je tako kot če bi želeli napisati kako igrati na klavir. Ljudje, ki jih metoda res zanima se jo bodo naučili uporabljati, drugim pa to odsvetujemo!".

Na osnovi lastnih obširnih raziskav bo Katedra za tehnologijo lesa pripravila kurze za pravilno uporabo instrumenta.

2. MERILNIK "TREE TESTER"

Merilnik Tree Tester so izdelali v Iskri - Merilna elektronika.

TT sestoji iz:

- a) merilnega instrumenta,
- b) dvojne igelne elektrode in
- c) žične elektrode.

Tree Tester je mikroprocesorski merilnik prevodnosti in temperature ter je namenjen analitičnim meritvam, ki zahtevajo veliko točnost, stabilnost in zanesljivost meritev. Merilni instrument se odlikuje z izredno širokim področjem uporabnosti in je primeren tako za terenske kakor tudi laboratorijske meritve.

Moderna elektronska zasnovanost instrumenta omogoča enostavno uporabo (sl. 1). S kalibriranim instrumentom lahko opravljamo meritve hitro in zanesljivo. Kalibriranje instrumenta izvaja uporabnik sam z vnosom parametrov ali z zagonom podprograma za kalibracijo. Pogostnost kalibriranja določi uporabnik po svoji presoji. Merilna območja za posamezne merjene fizikalne parametre izvede instrument avtomatično glede na optimalno točnost (autoranging). Parametri, ki jih lahko merimo so naslednji:

- specifična prevodnost κ
- upornost R in specifična upornost $1/\kappa$
- temperatura in
- koncentracija monoelektrolita

V instrumentu je vgrajen generator zelo čistega izmeničnega sinusnega merilnega signala (sliki 2 in 3) tako, da v merjeni snovi med samo meritvijo ne pride do izredno moteče polarizacije. Slednja povzroči v okolici elektrod nastanek koncentracijskega gradienta, ki vpliva na prevodnost elektrolita. Pri večjih koncentracijah postane vpliv elektrostatskih sil med ioni v raztopini občuten.

Veliko prednost instrumenta predstavlja avtomatsko izločevanje kapacitivnosti merilne sonde s priključnim kablom tako, da lahko uporabljamo različne merilne sonde (sl. 4). Instrument ima vgrajeno kompenzacijo vpliva paralelne kapacitivnosti C_p , ki je izredno moteča pri nizkih koncentracijah.

2. 1. OSNOVE MERJENJA SPECIFIČNE PREVODNOSTI RAZTOPIN

Električna prevodnost snovi pri temperaturi T $G(T)$ je obratno sorazmerna z električno upornostjo $R(T)$, ki je premosorazmerna upor, ki ga nudi snov s temperaturo T gibajočim se nosilcem električnega naboja.

V splošnem izražamo specifično upornost elektrolitov z zvezo

$$\kappa = F \sum z_i c_i u_i$$

pri čemer je F Faradayeva konstanta, u_i in c_i pa predstavljata gibljivost oziroma koncentracijo ionov z nabojem z_i .

Specifična prevodnost $\alpha(T)$ je premosorazmerna prevodnosti $G(T)$, premosorazmernost pa določa konstanta merilne celice oziroma sonde CC , ki je odvisna od geometrijskih lastnosti celice.

$$CC = \frac{\alpha(T)}{G(T)}$$

Zaradi vpliva temperature na specifično električno prevodnost (sl. 5), je potrebno za vsak merjenec določiti temperaturni koeficient TC , ki vsebuje referenčno temperaturo in ga izražamo v obliki

$$TC = \frac{G(T) - G(T_{ref})}{G(T_{ref}) (T - T_{ref})} \cdot 100\%$$

Ob upoštevanju konstante celice CC in temperaturnega koeficienta TC lahko zapišemo specifično upornost $\alpha(T)$ v obliki

$$\alpha(T) = \frac{G(T) \cdot CC}{1 + TC \cdot (T_{ref} - T)} \cdot 100\%$$

2.2. MERJENJE TEMPERATURE

Za merjenje temperature se uporablja uporovni termometer Pt 1000 razreda A, ki zadostuje predpisani točnosti $\pm 0,5$ °C. Upornost termometra Pt 1000 merimo posredno preko padca napetosti na priključnih sponkah pri vsiljenem konstantnem toku. Instrument izračunava temperaturo preko aproksimirane funkcijske zveze med upornostjo Pt 1000 in temperaturo.

3. UPORABA - DEJAVNIKI KI VPLIVAJO NA ER

Metodo lahko uporabimo za:

1. določitev drevesne ravnosti in kondicije, z zabadanjem dvojnih igelnih elektrod skozi skorjo in VKC v les;
2. nadzor lesne notranjosti (na stoječem drevju, hlodih, drogovih in drugih lesnih izdelkih), z namenom zaznavanja diskoloracij, razkroja in drugih sprememb; tako izvrtane luknje "otipamo" z zvitima žičnima elektrodama;
3. ugotavljanje zgodnjih stadijev razkroja na koncu sveže odžaganih hlodov in na površini lesnih izdelkov, z zabadanjem dvojnih igelnih elektrod.

Na živih drevesih v prsni višini zabodemo igelni elektrodi, z iglama drugo nad drugo, skozi skorjo in vaskularno kambijevo cono pri čemer elektrodi prebadata (Sl. 6): (a) ritidom (=zunanja ali mrtva skorja, =lubje) (R), če je prisoten, (b) neprevodni (skladiščni) floem (NPF), (c) prevodni floem (PF) in (d) vaskularno kambijevo cono (VKC). Pri pravilni uporabi se igli ustavi na kasnem lesu najperifernejše branike. VKC je tukaj definirana kot cona ki sestoji iz kambijevih inicialk, ksilemskih in floemskih materinskih celic in vseh nediferenciranih floemskih in ksilemskih celic.

Ko elektroda prebada skorjo in VKC, poškoduje membrane živih celic (t.j. celic s protoplastom), ioni prodrejo v apoplastno raztopino (Blanchard et al. 1983). Ritidom (lubje) je električno nekativen. Relativni prispevek VKC (kjer so vse celice žive) k električni upornosti oz. prevodnosti je najvišji, prispevek starejšega močno skleroziranega neprevodnega floema pa najnižji (prim. sl. 7-10). Na splošno debelejša živa tkiva z večjim deležem parenhimskih in nediferenciranih celic, oddajo več ionov iz poškodovanih celic, kar prispeva k nižji ER (Imagawa 1982, Blanchard et al. 1983).

Na splošno vsi dejavniki, ki vplivajo na širino VKC in žive skorje vplivajo tudi na ER.

V osnovi odrasla dominantna ali prostorastoča drevesa na rodovitnih tleh, ki imajo najširše VKC, PF in NPF izkazujejo najnižje vrednosti ER in obratno, prevladana (supresirana) drevesa na nerodovitnih tleh z ozkima VKC in živo skorjo izkazujejo najvišje vrednosti ER.

Navpična porazdelitev kambijeve rasti v drevesu je navadno odvisna od listne površine in njene navpične porazdelitve (relativne dolžine krošnje). Vpliv supresije se kaže v zmanjšanju ksilemskega in floemskega prirastka in v spremembi njune porazdelitve vzdolž drevesnega debla in vej (sl. 11). Te spremembe so lahko posledica pozne aktivacije kambijeve rasti in njenega zgodnjega prenehanja v vegetacijskem obdobju ter zmanjšanja hitrosti rasti zaradi močne konkurence. Ksilemski in floemski prirastek je na splošno zmanjšan vzdolž debla, pri čemer se več ksilema in floema odlaga v zgornjem delu debla (prim. Kozlowski, 1970).

Iz fizioloških razlogov do rastne depresije pride najprej v največji oddaljenosti od krošnje, t.j. v prsni višini, kjer merimo ER. Zelo supresirana ali prizadeta drevesa na bazi ne priraščajo več. S prevladanostjo (supresijo) in/ali prizadetostjo zaradi polucije, se pojavljajo neskljenjene branike ali njihov izpad vse više v deblu.

Med razvojem sestoja so drevesa podvržena konkurenci, ki se odraža v različnem cenotskem statusu posameznih dreves (sl. 12).

Odčitki ER variirajo tudi po obodu debla kar je posledica različne radialne rasti, zlasti v primeru nastjanja reakcijskega lesa (tenzijskega lesa pri listavcih in kompresijskega lesa pri iglavcih) (sl. 13 in 14).

Variacija ER po obodu drevesa (v tangencialni smeri) je v manjši meri odvisna tudi od neenakomerne debeline žive skorje zaradi konfiguracije in časovno-prostorskega razvoja ritidoma (transformacije žive v mrtvo skorjo) kot ga narekuje nastanek novih anastomozirajočih peridermov.

Zlasti pri drevesih z luskasto skorjo (bori, hrasti, jelke, smreke itd., glej sl. 15 in 16) širina žive skorje variira zaradi neenakega odrezovanja žive skorje z novimi globinskimi peridermi. ER merimo v razpokah skorje.

Pri centričnih drevesih s prvim (t.j. površinskim) peridermom je variacija širine žive skorje po obodu debla minimalna ali zanemarljiva. Da bi eliminirali vpliv variabilne debeline žive skorje na ER, ga merimo na več (navadno štirih) mestih po obodu.

Širina VKC se spreminja med sezono (t.j. tekom vegetacijske dobe) in je odvisna od mitotske aktivnosti kambijevega inicialnega in materinskega celic, ki je večja pri hitrorastočem drevju. Število celic, ki sestavljajo kambijevo cono se spreminja in zdi se da odraža ravnovesje med hitrostjo celičnih delitev in hitrostjo diferenciacije novih derivatov. Ko se kambij spomladi aktivira, je proces delitve hitrejši od procesa diferenciacije, tedaj debelina VCZ narašča. Ko se začne diferenciacija, se vzpostavi ravnovesje med hitrostjo delitev in diferenciacije tako da širina kambijeve cone ostaja dlje časa bolj ali manj konstantna. Ko se zmanjša delitvena hitrost, se kambijeva cona začne tanjšati (prim. Wilson 1966). Sezonska variacija ER sovпада s sezonsko variacijo debeline VKC. Verjetno spremenljivo stanje skorje tudi prispeva k sezonski variaciji ER (sl. 17 in 18).

Najrazličnejši polutanti znatno zmanjšujejo hitrost kambijeve rasti, kar se odraža v zvišanju ER. Zračna polucija bolj vpliva na debelinsko kot na višinsko rast (Torelli et al. 1986). Učinki polutantov na rast se odražajo v spremembi fizioloških procesov in presnove. Polutanti inhibirajo sintezo klorofila in fotosintezo, vplivajo na delovanje listnih rež, permeabilnost celičnih membran, količino rezervnih ogljikovih hidratov in proteinov ter na aktivnost encimov (Kozlowsky et al. 1991) (sl. 19 in 20).

Učinki supresije in polucije so primerljivi, ker v obeh primerih pride do drastične redukcije listne površine in fotosintezne aktivnosti.

Meritve električne upornosti so odvisne od razpoložljivih ionov v rastlinskih tkivih, vendar ker so ti omejeni na območje apoplasta, nanje vplivajo tudi vodni potenciali in suša (MacDougall et al. 1987). Zdrava drevesa se odzivajo bolj konzistentno od prizadetih. Slednja ki ne morejo uravnati svoje oskrbe z vodo tako učinkovito, se odzivajo bolj spremenljivo. Opazovano povečanje električne upornosti pri prizadetih drevesih v izjemno suhem poletju 1992 (sl. 19 in 20) utegne biti posledica suše.

Na drugi strani bi lahko padec ER pri močno prizadetih in mrtvih drevesih pripisali razkrojnim procesom.

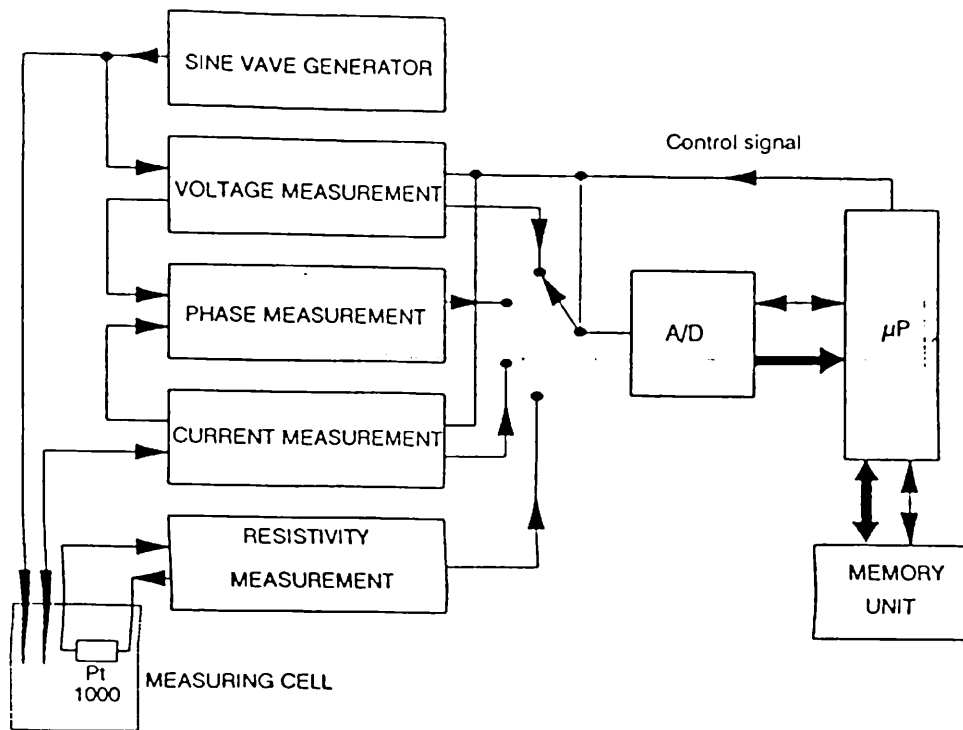
Glede na spremenljivo širino žive skorje je metoda uporabna predvsem za (a) dolgotrajno spremljanje stanja posameznih dreves ter za ovrednotenje njihove prizadetosti zaradi insektov, bolezni, dolgotrajnih klimatskih sprememb in onesnaženja okolja ter (b) za enkratne meritve v enodobnih sestojih za določitev cenotskega statusa in prognoziranja preživetvenih možnosti dreves v razvijajočem se sestoj.

Z meritvami ER je mogoče napovedati tudi ojedritev, diskoloracije, mokrine in razkroj v (a) notranjščini stoječega drevja, hlodov in lesnih izdelkov. V ta namen se izvrtajo drobne luknje in "otipajo" z žično elektrodo. Spremembe je mogoče dokazovati tudi (b) površinsko s kratkima igelnima elektrodama (sl. 21 -23).

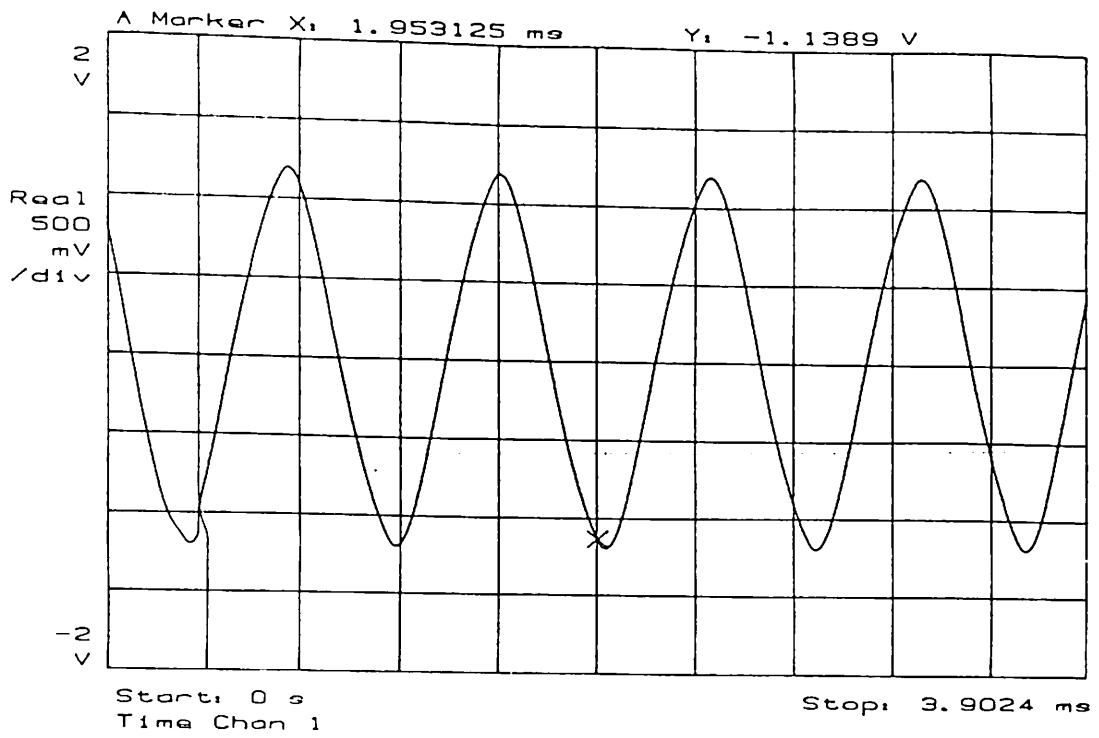
Za zgodnje stadije bele trohnobe je značilna akumulacija kalijevih in drugih baznih kationov (Shortle 1982), za rjavo trohnobo pa porast koncentracije vodikovih ionov (zmanjševanje pH). Hitre spremembe v koncentraciji ionov se odražajo kot padec ER. Spremembe v ER se pojavijo pred vidnimi znaki razkroja, pa tudi preden pride do zmanjšanja mase lesa in njegove trdnosti. Tudi diskoloracije spremlja izrazit porast koncentracije ionov (Shigo 1976).

LITERATURA

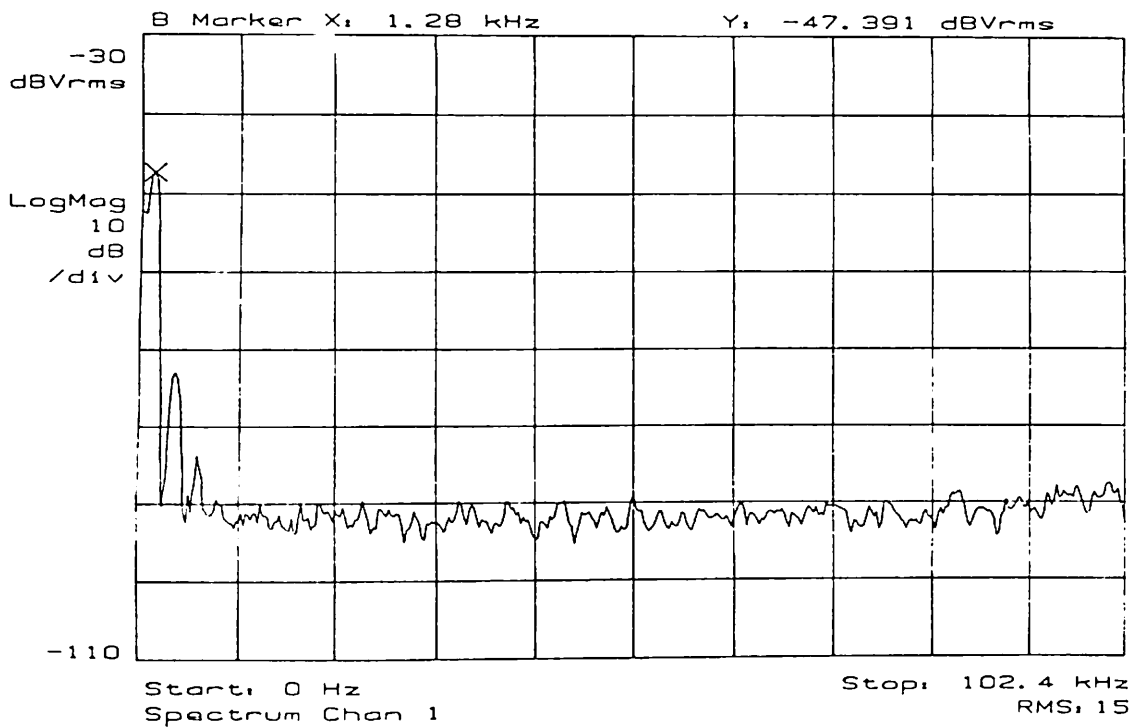
- Blanchard R. O.; W. C. Shortle & W. Davis. 1983. Mechanism relating cambial electrical resistance to periodic growth rate of balsam fir. *Can. For. Res.* 13: 472-480.
- Fensom, D. S. 1966. On measuring electrical resistance *in situ* in higher plants. *Can. J. Plant. Sci.* 46: 157-169.
- Imagawa, H. & Ishida S. 1982. Preliminary experiment on relationship between electrical resistance and state of cells in *Pinus luchuensis* stems. Original not seen, from Forestry Abstracts.
- Kozlowsky, T. T. 1971. Growth and development of trees. Vol. II. Acad. Press. 514 p.
- Kozlowsky, T.T.; Kramer, P. J. & S. G. Pallardy. 1991. The physiological ecology of woody plants. Acad. Press, INC. 657 p.
- MacDougall, R. G.; Thompson, R. G. & H. Piene. 1987. Stem electrical capacitance and resistance measurements as related to total foliar biomass of balsam fir trees. *Can. J. For. Res.* 17: 1071 - 1074.
- Shigo, A. L. 1976. Mineral stain. *The Northern Logger and Timber Processor*: 18-19.
- Shigo, A. L. 1986. *A New Tree Biology*. Shigo and Trees Associates, Durham, NH. 595 p.
- Shortle, W. C. 1982. Decaying Douglas-fir wood: ionization associated with resistance to a pulsed electric current. *Wood. Sci.* 15 (1): 29-32.
- Tattar T. A.; A. L. Shigo & T. Chase. 1972. Relationship between the degree of resistance to a pulsed electric current and wood in progressive stages of discolouration and decay in living trees. *Can. J. For. Res.* 2: 236 - 243.
- Torelli N.; K. Čufar & D. Robič. 1986. Some wood anatomical, physiological and silvicultural aspects of silver fir dieback on Slovenia (NW Yugoslavia). *IAWA Bull.* 7(4): 343-350.
- Wilson, B. F. 1966. Mitotic activity in the cambial zone of *Pinus strobus*. *Am. J. Bot.* 53: 364 - 372.



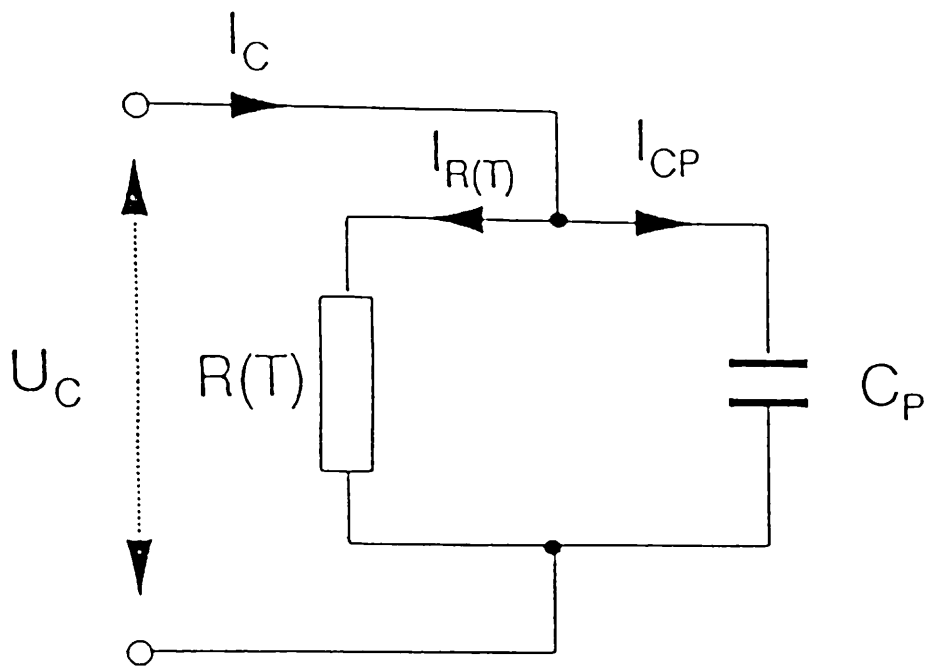
Slika 1.- Shematski prikaz zasnovanosti instrumenta. (sine vave generator = generator sinusne napetosti, voltage measurement = merjenje napetosti, phase measurement = merjenje faze, current measurement = merjenje toka, resistivity measurement = merjenje upornosti, measuring cell = merilna celica, control signal = krmilni signal, memory unit = spominska enota).



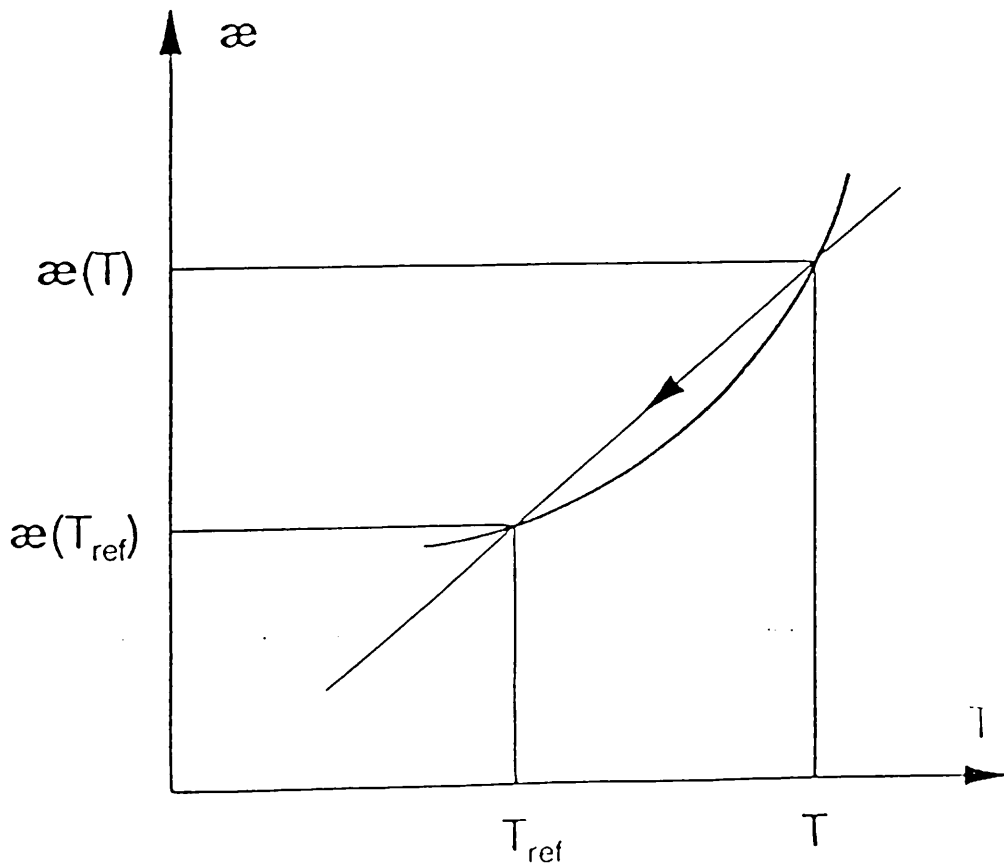
Slika 2.- Merilni signal v časovnem prostoru.



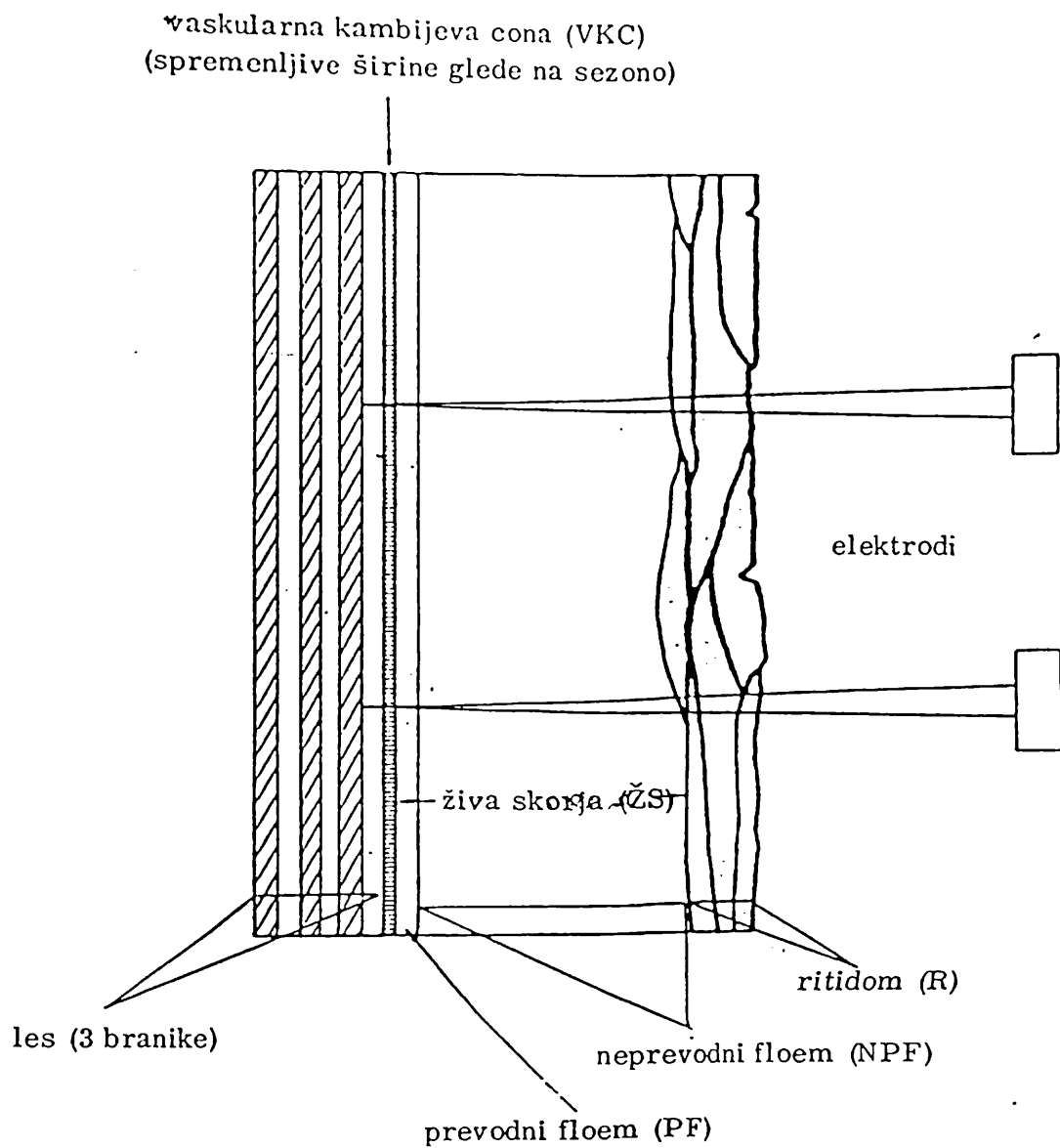
Slika 3.- Merilni signal v frekvenčnem prostoru.



Slika 4.- Nadomestna shema merilne celice.



Slika 5.- Specifična prevodnost v odvisnosti od temperature.



Slika 6. - Jelka (*Abies alba* Mill.): merjenje ER za določitev drevesne ravnosti in kondicije - shematski prikaz.

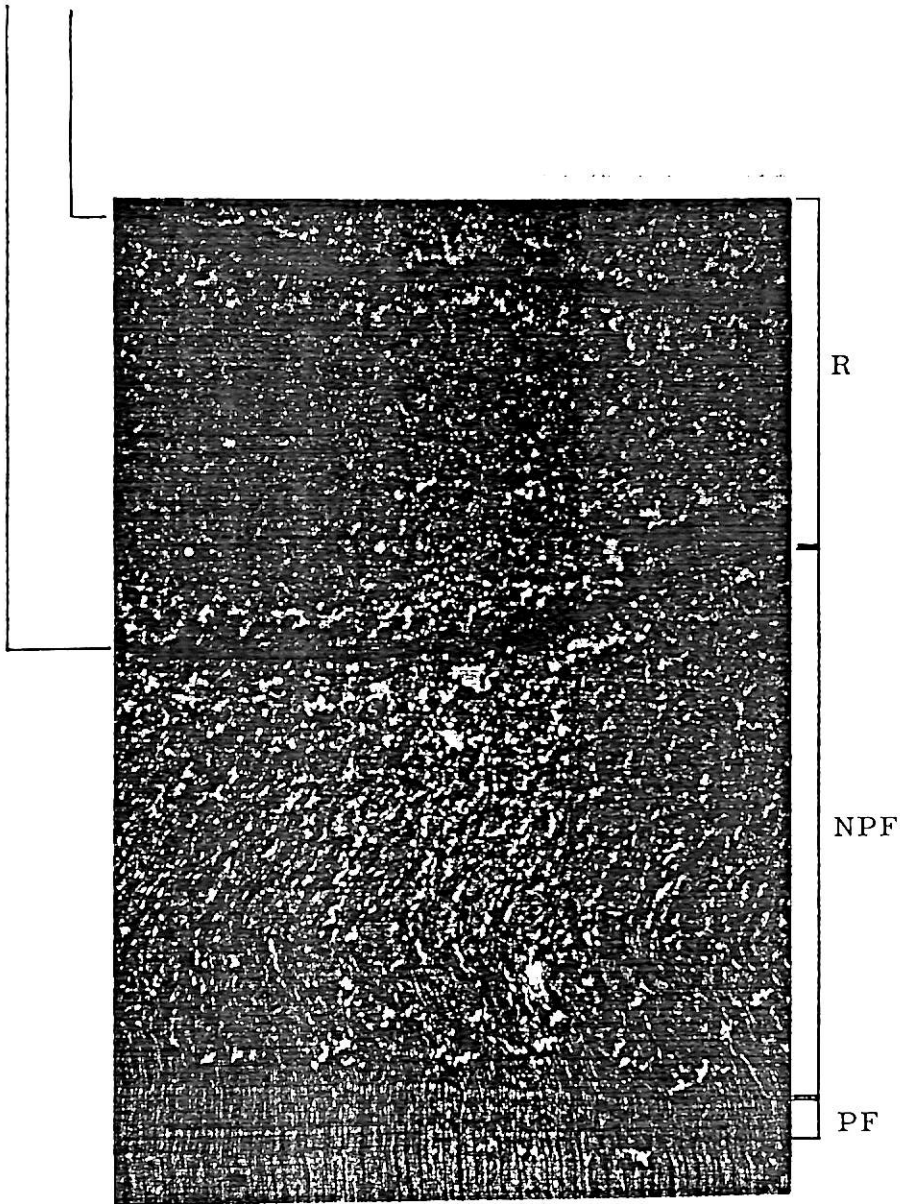


sklerenhimska
gnezda

┌ 100 μ m

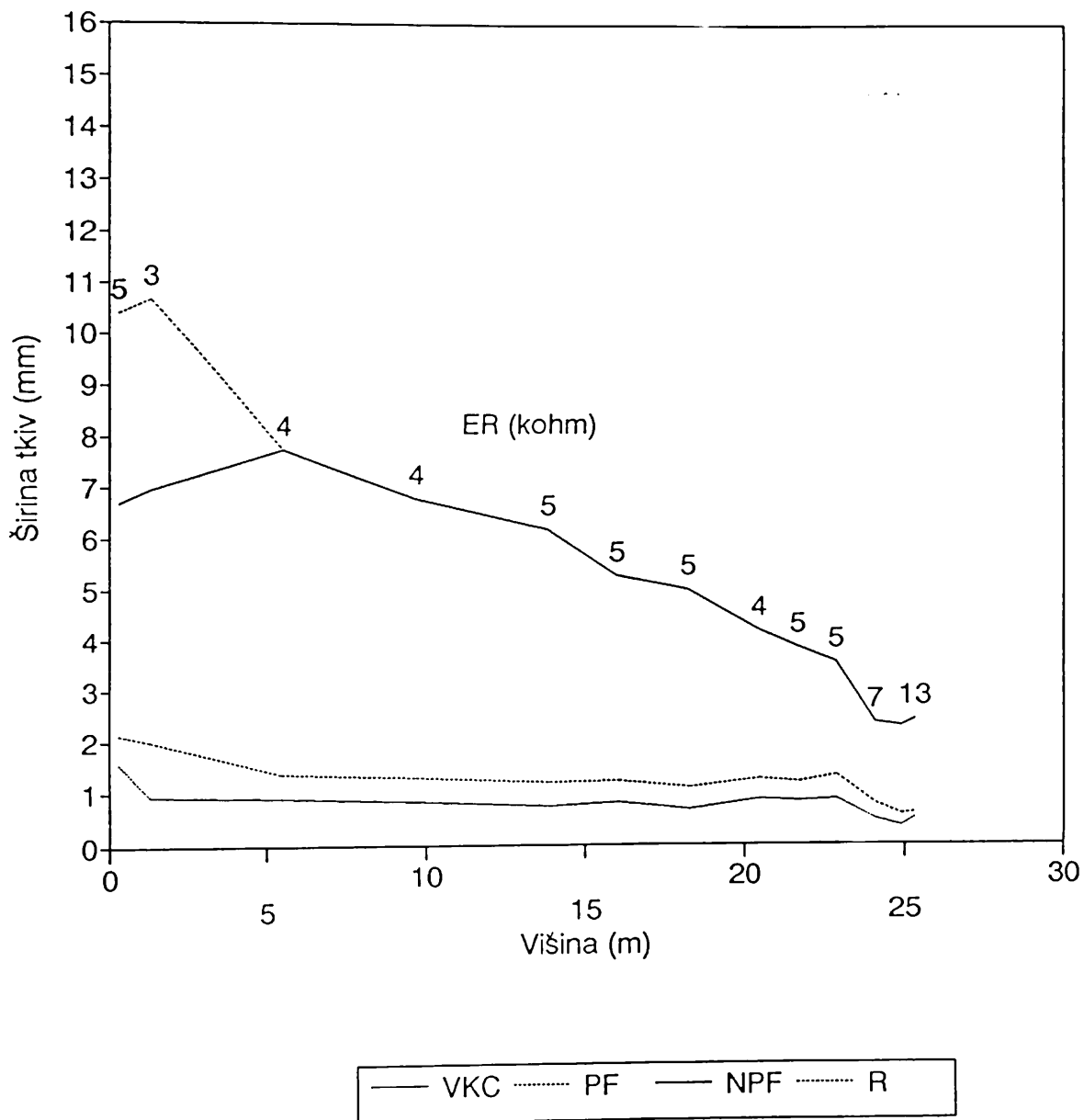
Slika 7.- Bukev (*Fagus silvatica* L.): prečni prerez skorje. Bukova skorja ne vsebuje ritidoma (lubja). Glej sklerenhimska gnezda v neprevodni (skladiščni) skorji.

globinska periderma

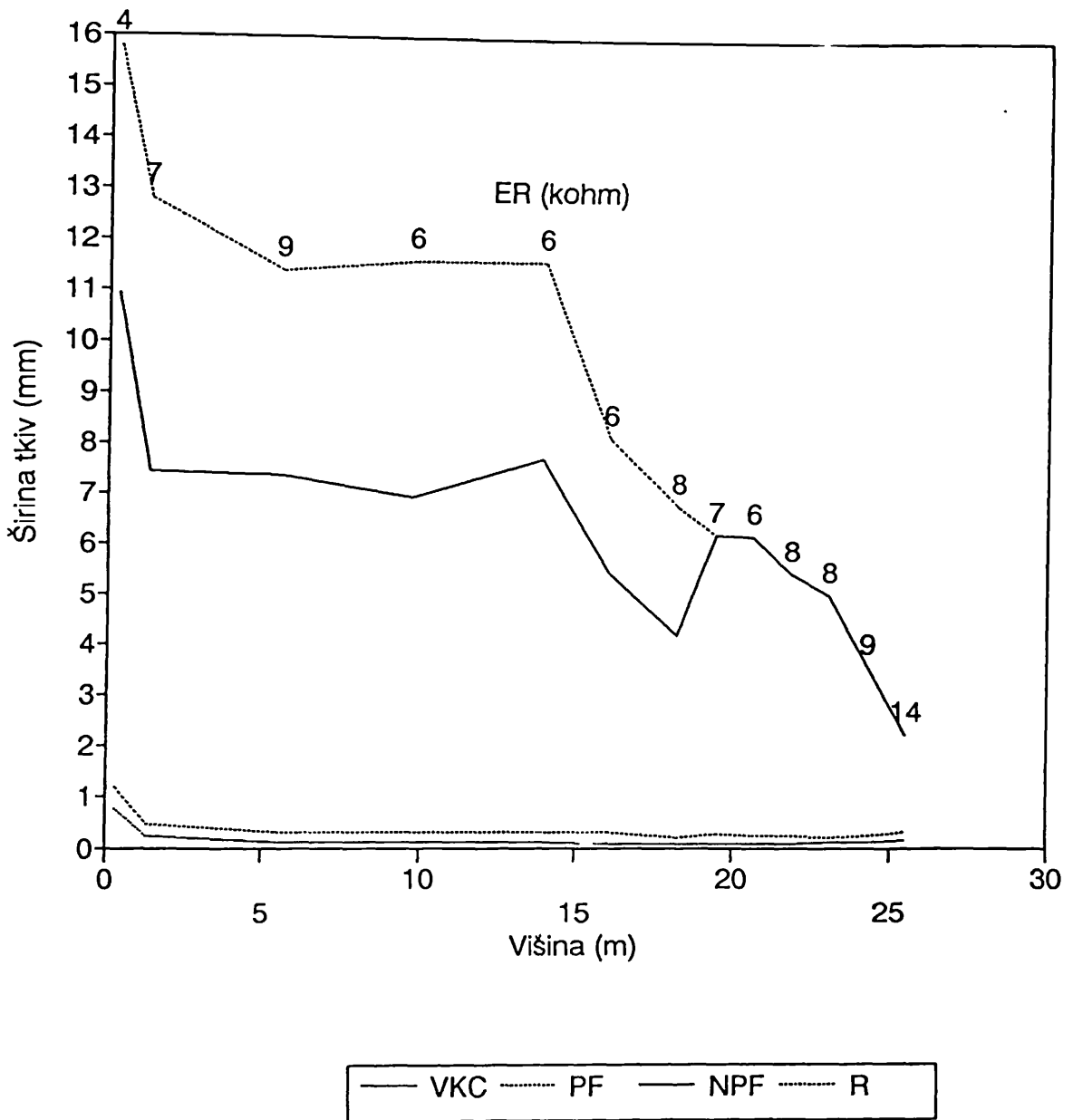


100 μ m

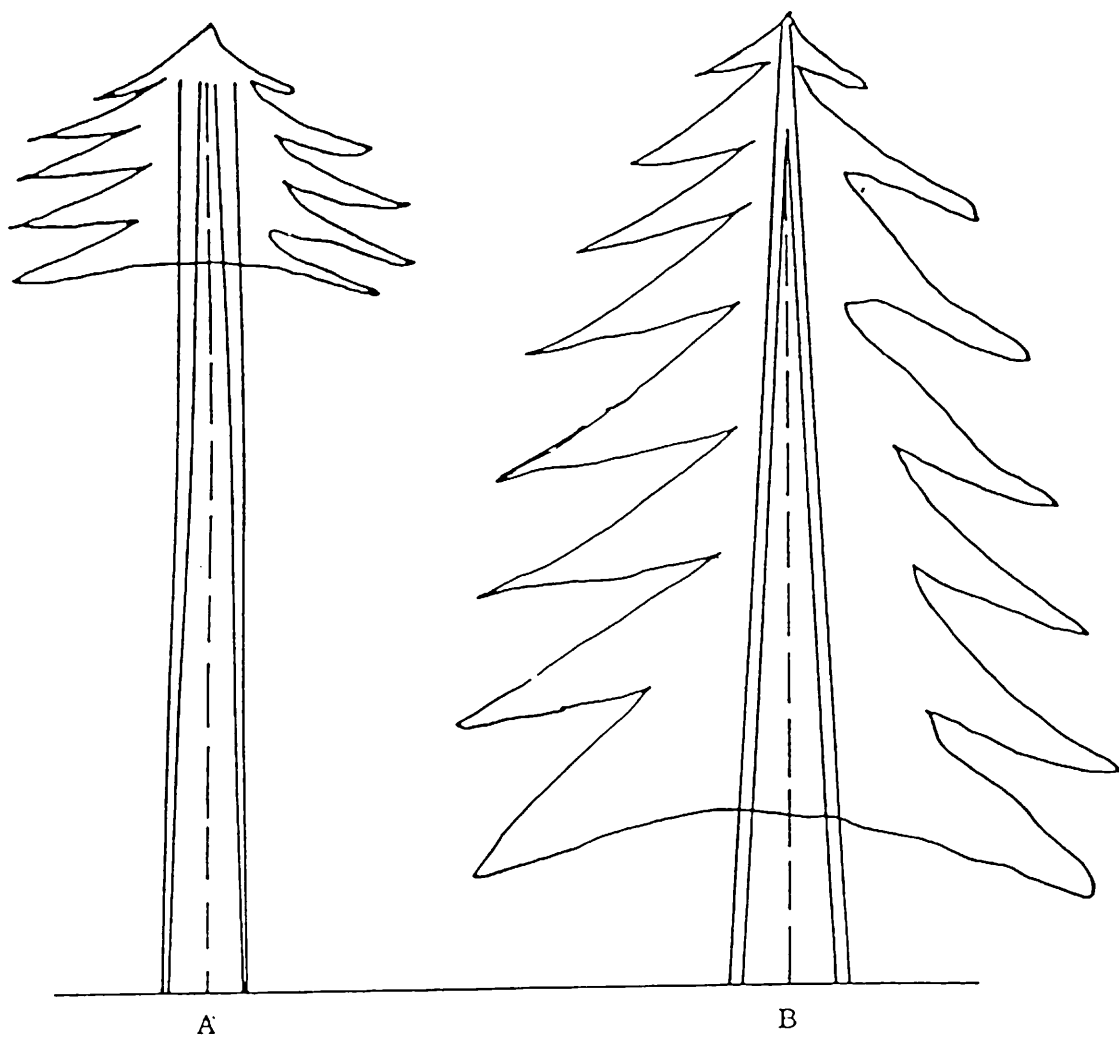
Slika 8.- Jelka (*Abies alba* Mill.): prečni prerez skorje. Najmlajši t.j. najglobji periderm ločuje živo skorjo od ritidoma (=lubja) (R). Živa skorja sestoji iz prevodnega floema (PF) in sklerificiranega neprevodnega (=skladiščnega) floema (NPF). Glej globinske periderme.



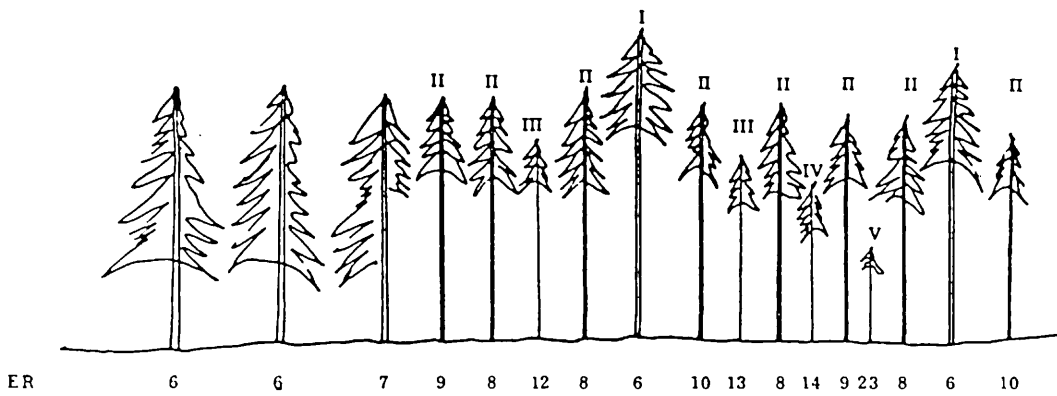
Slika 9.- Neprizadeta jelka (*Abies alba* Mill.): vertikalna variacija ER v odvisnosti od distribucije živih tkiv. VKC - vaskularna kambijeva cona, PF - prevodni floem, NPF - neprevodni (skladiščni) floem, R - ritidom (lubje).



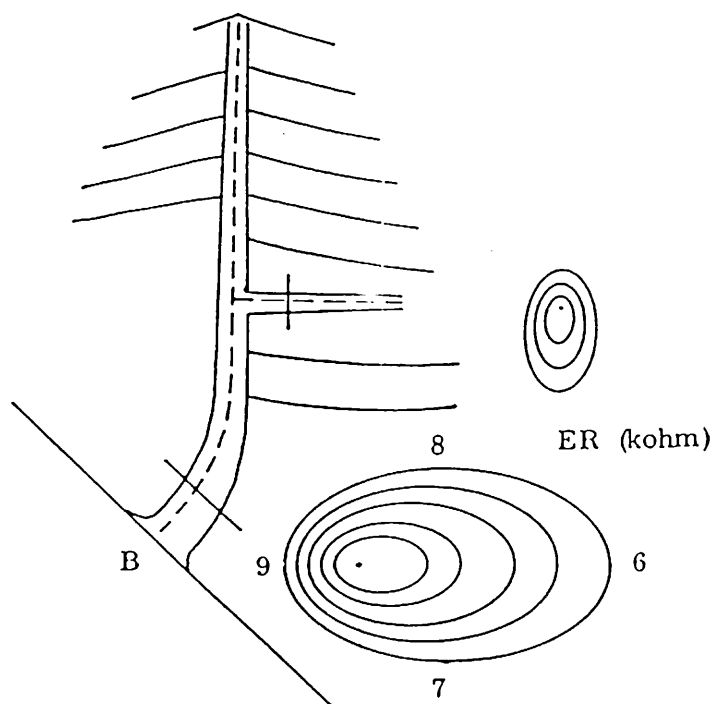
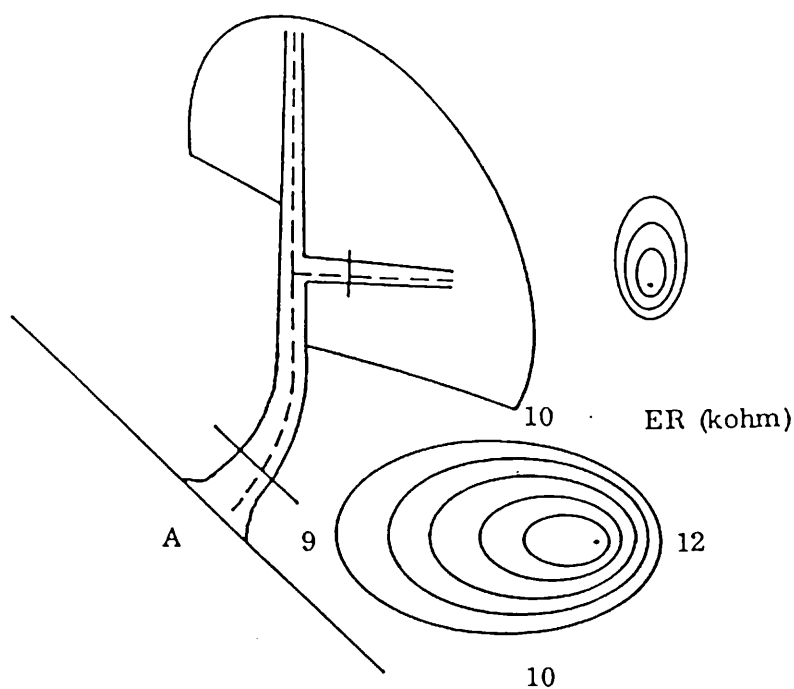
Slika 10.- Zelo prizadeta jelka (*Abies alba* Mill.): vertikalna variacija ER v odvisnosti od distribucije živih tkiv. VKC - vaskularna kambijeva cona, PF - prevodni floem, NPF - neprevodni (skladiščni) floem, R - ritidom (lubje).



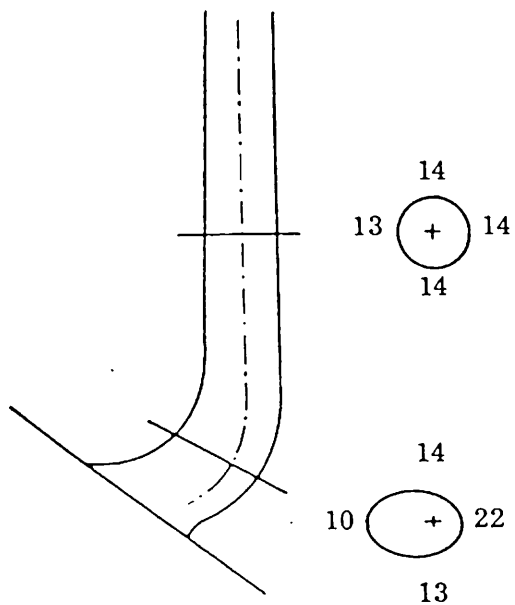
Slika 11.- Idealiziran diagram, ki kaže navpično porazdelitev širine VKC (zelo pretirano!) v odvisnosti od relativne dolžine krošnje. (A) Drevo s kratko krošnjo v gostem sestoju (intenzivno "čiščenje" vej!): širina VKC narašča akropetalno. (B) Prostorastoče drevo z globoko (dolgo) krošnjo: širina VKC vzdolž debla je praktično nespremenjena. V obeh primerih se od nivoja, kjer se pojavi drugi (t.j. prvi globinski) periderm, širina žive skorje akropetalno (t.j. z manjšajočo se starostjo) zmanjšuje, bazipetalno pa ostaja bolj ali manj konstantna. Na splošno ER na določenem nivoju odvisi hkrati od navpične porazdelitve VKC in žive skorje (Prim. sl. 9 in 10).



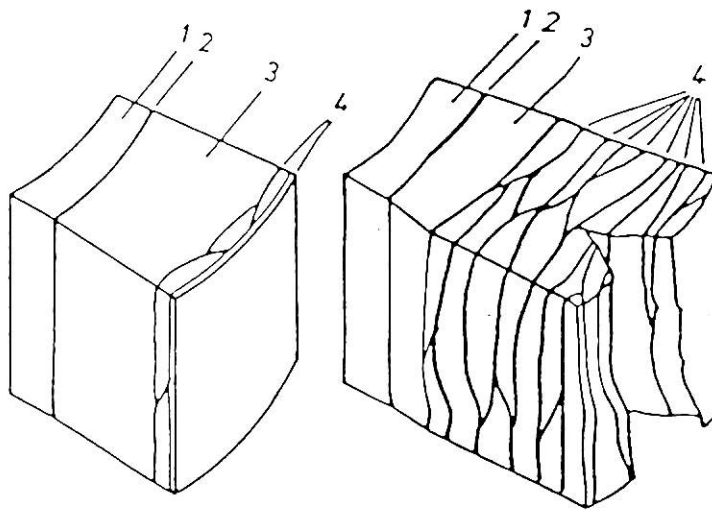
Slika 12.- Smreka (*Picea abies* Karst.) - subalpinski smrekov gozd (*Rhytidiadelpho* Lorei - *Piceetum* M. Wraber 1953), Pokljuka: vpliv cenotskega statusa (klasifikacija pro Kraftu 1884) na ER v prsni višini.



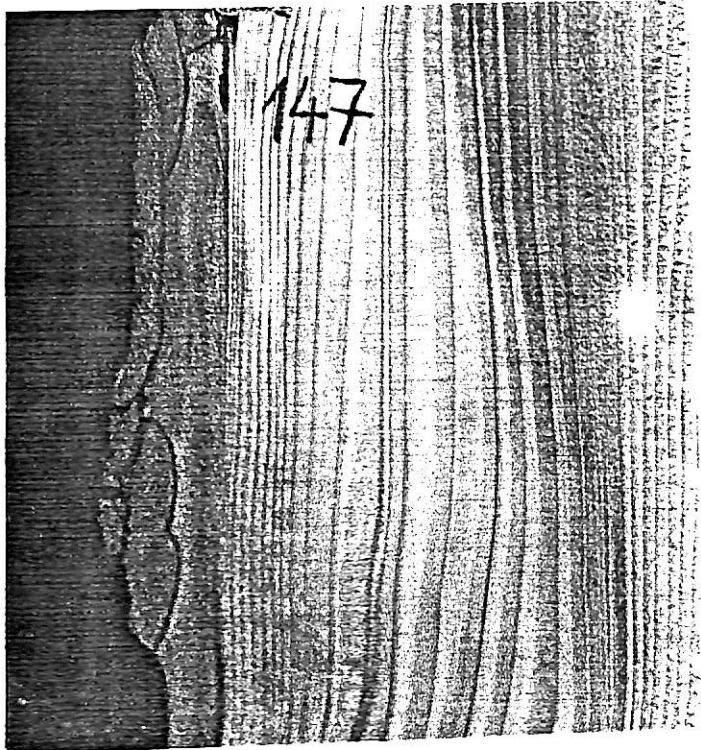
Slika 13.- Idelaizirana slika prečnih prerezov dreves na strmih pobočjih s pripadajočo ER zaradi različne rasti, ki spremlja nastanek reakcijskega lesa. (A) pri listavcu (črni gaber, *Ostrya carpinifolia* Scop.); normalen les na spodnji in tenzijski les na zgornji strani debla. (B) pri iglavcu (smreka, *Picea abies* Karst.); normalen les na zgornji in tenzijski les na spodnji strani debla.



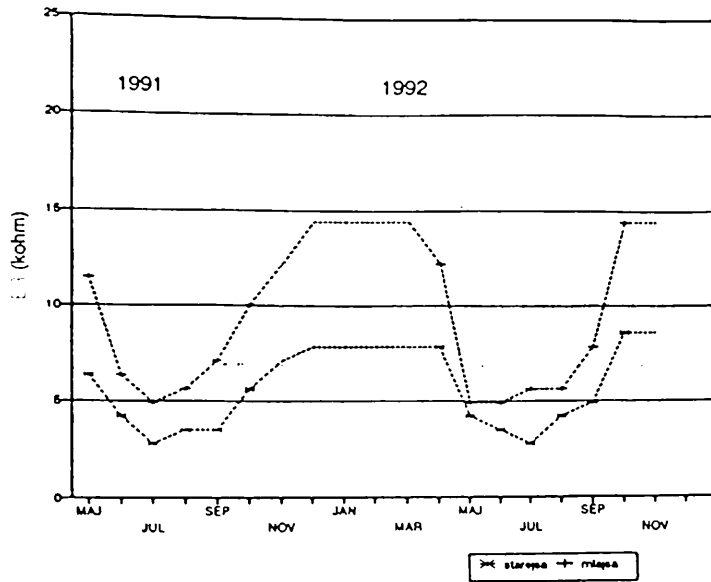
Slika 14.- Bukev (*Fagus silvatica* L.): ER na ukrivljeni bazi drevesa in na centričnem delu debla v prsni višini.



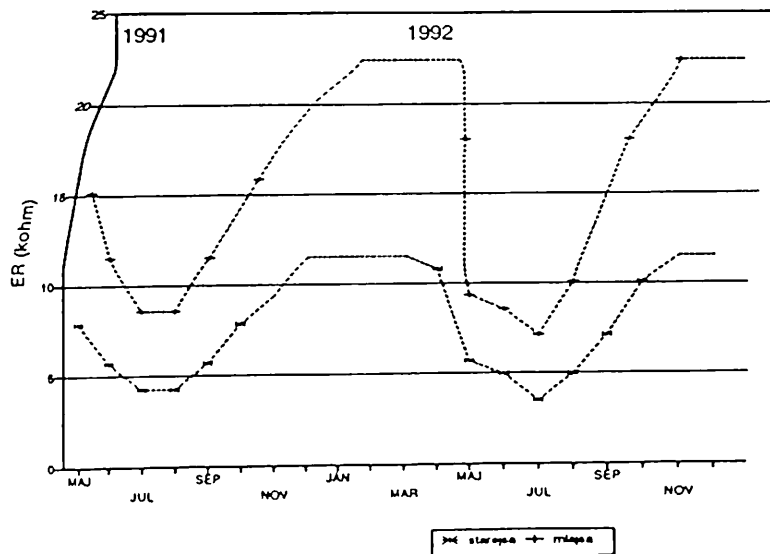
Slika 15.- Nastanek in razvoj luskaste skorje pri (A) mlajšem drevesu s prvim peridermom in (B) pri starejšem drevesu z več peridermi. 1 - les, 2 - VKC (vaskularna kambijeva cona), 3 - živa skorja, 4 - peridermi.



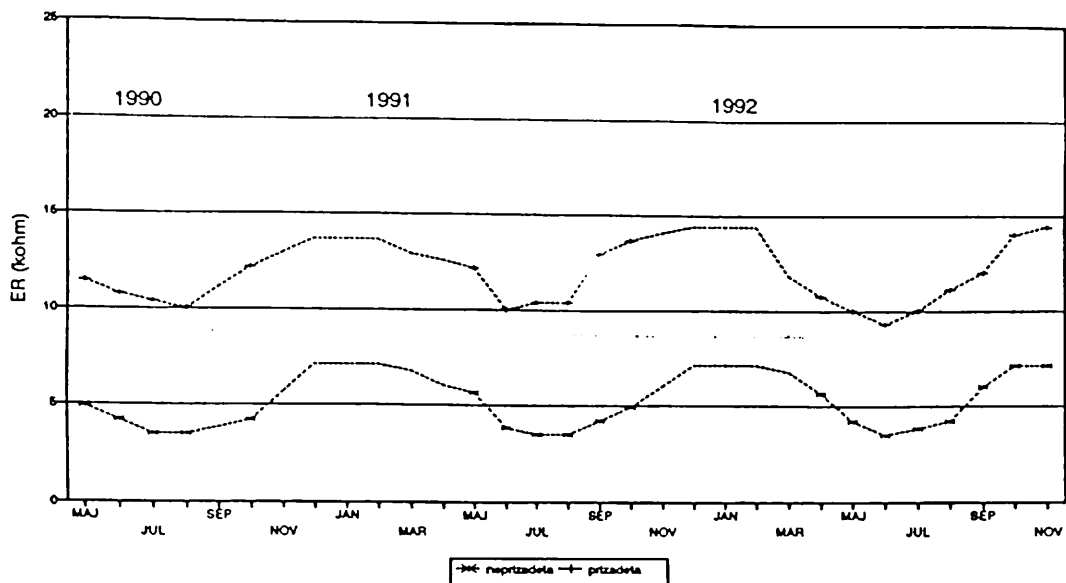
Slika 16.- Jelka (*Abies alba* Mill.): anastomozirajoči globinski peridermi v skorji: najmlajši (t.j. najgloblji) periderm ločuje živo skorjo od ritidoma (lubja).



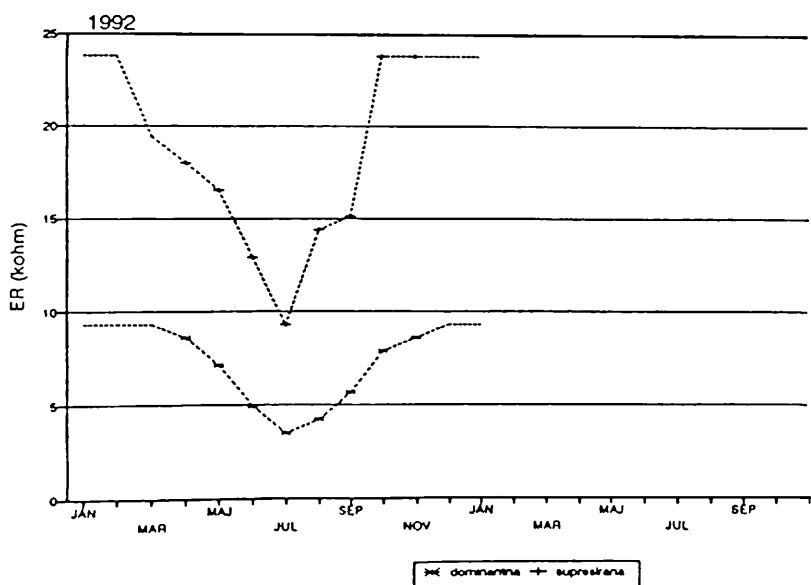
Slika 17.- Jelka (*Abies alba* Mill.): načelen potek sezonske variacije ER pri mlajših in starejših neprizadetih drevesih.



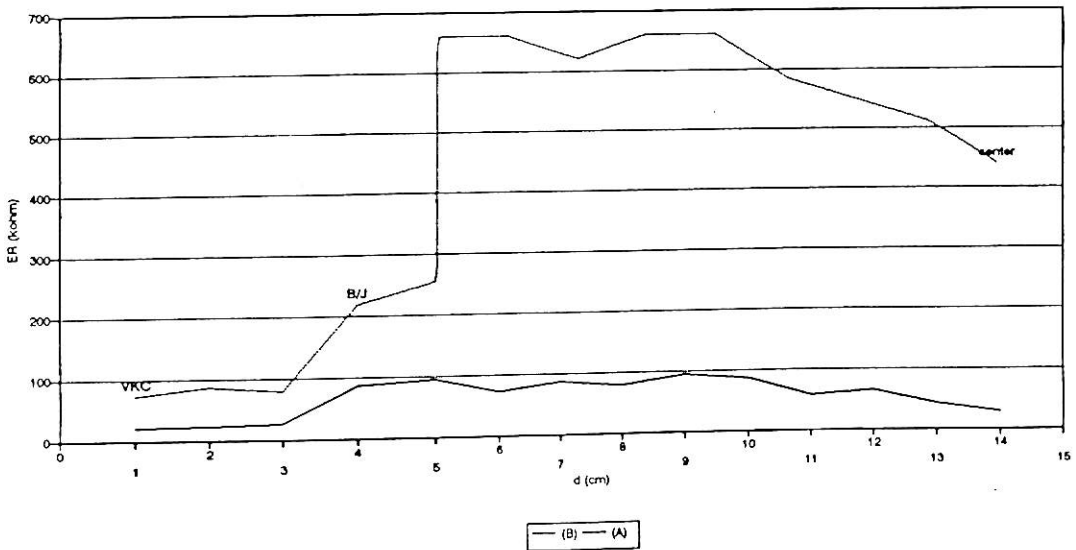
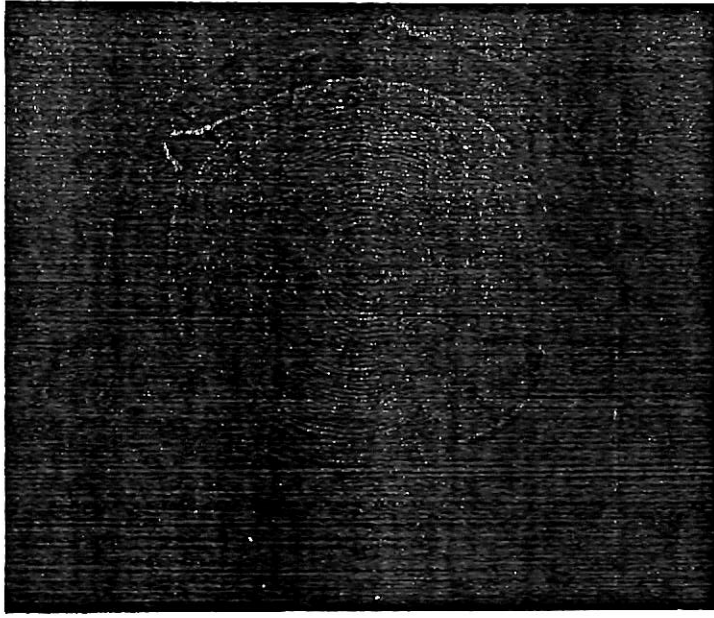
Slika 18.- Bukev (*Fagus silvatica* L.): načelen potek sezonske variacije ER pri mlajših in starejših neprizadetih drevesih.



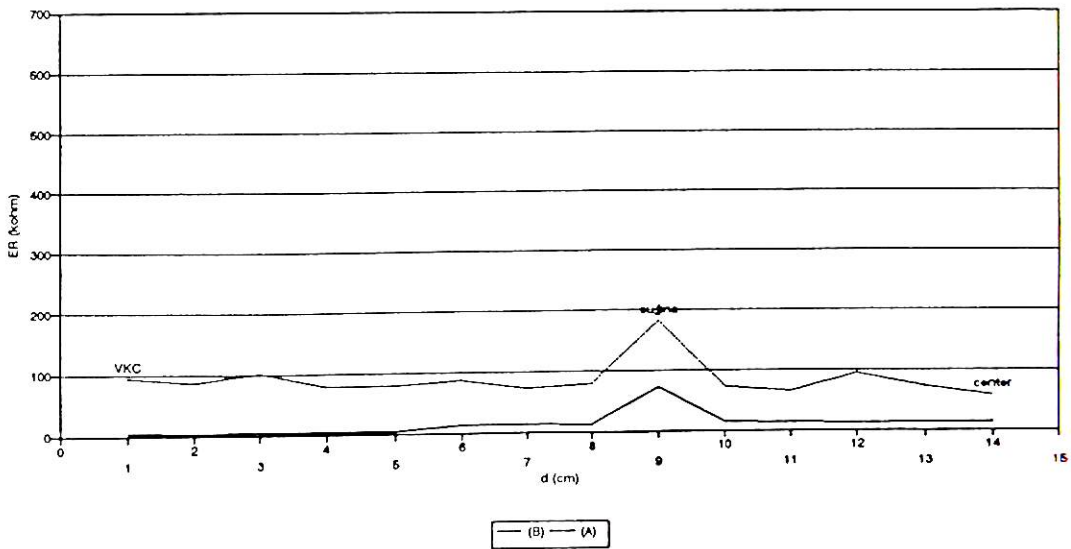
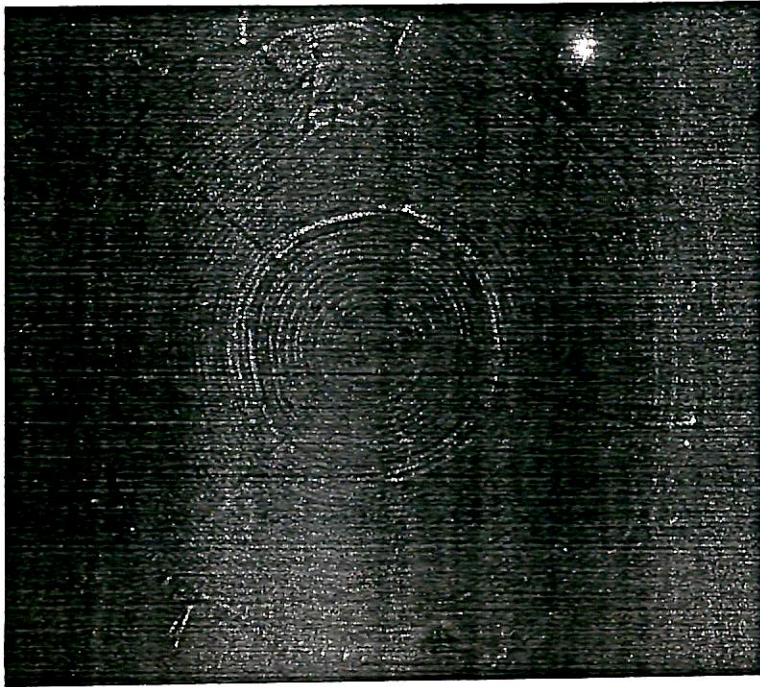
Slika 19.- Jelka (*Abies alba* Mill.): načelen potek sezonske variacije ER pri neprizadetih in zelo prizadetih drevesih.



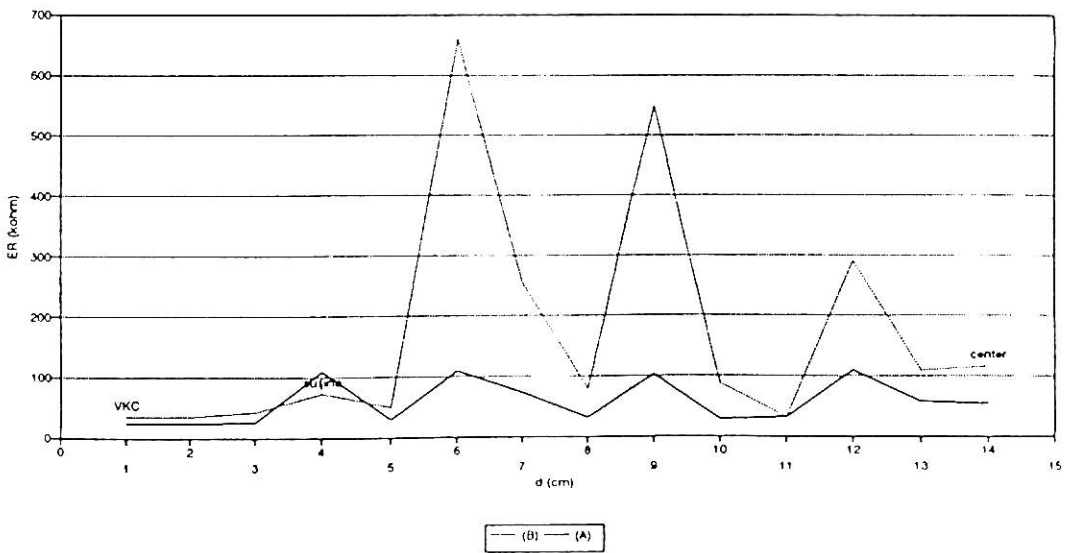
Slika 20.- Jelka (*Abies alba* Mill.): načelen potek sezonske variacije ER pri dominantnih in supresiranih drevesih.



Slika 21.- Jelka (*Abies alba* Mill.), kolot z neobarvano jedrovino, načelen potek ER v smeri označene črte: (A) na površini kolota izmerjen s kratkimi igelnimi elektrodami in (B) v izvrtini izmerjen z žično elektrodo. B/J meja med beljavo in jedrovino.



Slika 22.- Jelka (*Abies alba* Mill.), kolot z "normalnim" mokrim srcem, načelen potek ER v smeri označene črte: (A) na površini kolota izmerjen s kratkimi igelnimi elektrodami in (B) v izvrtini izmerjen z žično elektrodo.



Slika 23.- Jelka (*Abies alba* Mill.), kolut z "anomalnim" mokrim srcem ki radiira v beljavo, načelen potek ER v smeri označene črte: (A) na površini koluta izmerjen s kratkimi igelnimi elektrodami in (B) v izvrtini izmerjen z žično elektrodo.