

OSNOVE DENDROKRONOLOGIJE

Doc.dr. Tom LEVANIČ
Gozdarski inštitut Slovenije

Stanje november 2012

Ljubljana, november 2012

KAZALO VSEBINE

1	UVOD.....	1
2	RAST V VIŠINO IN DEBELINO.....	3
2.1	Višinska rast	3
2.2	Debelinska rast.....	7
2.3	Vplivi okolja na braniko	9
2.4	Posebne pojavne oblike branike	12
3	DEFINICIJA DENDROKRONOLOGIJE	17
4	SEDEM KLJUČNIH NAČEL DENDROKRONOLOGIJE.....	18
5	OMEJITVE DENDROKRONOLOGIJE.....	22
6	DREVESNE VRSTE V DENDROKRONOLOGIJI	23
7	METODE V DENDROKRONOLOGIJI.....	25
7.1	Vzorčenje	25
7.1.1	Vzorci živih dreves	26
7.1.2	Vzorci vgrajenega suhega lesa.....	28
7.1.3	Vzorčenje mokrega lesa	29
7.1.4	Vzorci oglja	29
7.2	Priprava vzorcev.....	30
7.2.1	Odrežovanje z ostrimi rezili.....	30
7.2.2	Brušenje	30
7.3	Problem ohranjenosti periferije vzorcev in predhodna raba lesa.....	33
7.4	Merjenje & kontrola meritev	36
7.4.1	Ročno merjenje.....	36
7.4.2	Merjenje z merilno mizico	37
7.4.3	Avtomatsko prepoznavanje branik in merjenje širine branik	38
7.5	Vizualna primerjava / sinhronizacija / datacija / podaljševanje kronologij	39
7.5.1	Konstrukcija grafa odvisnosti širine branike od časa	39
7.5.2	Vizualna primerjava dveh kronologij	41
7.5.3	Sinhronizacija zaporedij širin branik	41
7.5.4	Datiranje.....	42
7.5.5	Podaljševanje kronologij v preteklost (izdelava dolgih kronologij za posamezne drevesne vrste)	43
7.6	Statistične metode v dendrokronologiji	44
7.6.1	Določanje potrebne velikosti vzorca	44
7.6.2	Korelacija med vzorci.....	45
7.6.3	Studentov t.....	46

Osnove dendrokronologije

7.6.4	Koeficienta t po Baillie-Pilcherju	46
7.6.5	Koeficient časovne skladnosti (Gleichläufigkeit)	47
7.6.6	Indeks navzkrižnega datiranja (CDI)	48
7.6.7	Srednja stopnja občutljivosti (Mean sensitivity)	49
7.6.8	Avtokorelacijska analiza	49
7.6.9	Analiza glavnih komponent (PCA)	49
7.6.10	Standardizacija dendrokronoloških časovnih vrst.....	49
7.7	Nesklenjene časovne vrste.....	51
7.7.1	<i>Kazalci vezani na eno drevo</i>	<i>52</i>
7.7.2	<i>Kazalci vezani na skupino dreves.....</i>	<i>53</i>
7.8	Terenska, laboratorijska in programska oprema v dendrokronologiji	53
7.8.1	Terenska oprema in oprema delavnice.....	53
7.8.2	Laboratorijska oprema.....	56
7.8.3	Programska oprema.....	58
8	POVEZANOST DENDROKRONOLOGIJE Z DRUGIMI VEDAMI.....	66
9	ZGODOVINA DENDROKRONOLOGIJE	68
10	RAZVOJ DREVESA (PALEOBOTANIKA RASTI DREVESA).....	72
10.1	Izvor drevesnega habitusa	72
10.2	Variabilnost v debelinski rasti	74
10.3	Vpliv dolgih poganjkov	76
10.4	Izvor debelinske rasti	77
11	LITERATURA	79

1 Uvod

Grški filozof in mislec Heraklit (550-480 pr.n.št.) je ugotovil, da »vse teče«, za živo naravo pa bi lahko rekli, da »vse raste in se razvija«. Iz semena zraste rastlina, iz embria se razvije odrasla žival ali človek. Da organizem zraste je potreben čas - od nekaj minut do nekaj deset, sto ali celo tisoč let. Včasih je rast neodvisna od letnega časa, včasih pa je z njim močno povezana. V rastlinskem svetu, predvsem v območju zmerne klime¹ na Zemlji, je rast rastlin prekinjena z obdobji mirovanja, ki so posledica za rast neugodnih razmer. Od vseh rastlin, ki na Zemlji rastejo, so drevesa in grmovnice zmernih klimatskih pasov eni od redkih organizmov, ki tvorijo jasno definirane letne prirastne plasti imenovane branike. To omogoča raziskovalcem, da jih raziskujejo in preučujejo njihov odziv na okoljske spremembe in dražljaje.

Pričujoča skripta je namenjena dodiplomskim študentom predmeta Dendrokronologija in podiplomskim študentom, ki tega predmeta na dodiplomskem študiju niso poslušali. Knjigo sestavljajo štiri deli, v prvem delu so predstavljene najnujnejše osnove lesne anatomije in drevesne fiziologije, ki jih mora dober dendrokronolog vedno poznati, v drugem delu knjige se bomo spoznali z dendrokronologijo in osnovnimi tehnikami, ki jih v dendrokronologiji uporabljamo, v tretjem delu so opisane različne veje dendrokronologije, njihova uporaba in kratka zgodovina dendrokronologije. V zadnjem delu knjige je bolj kot zanimivost dodano poglavje, ki obravnava razvoj oblike drevesa in pojav branike (to poglavje in del, ki govori o rasti drevesa v višino in širino sem povzel po knjigi Philipa Moreya »How trees grow« {Morey, 1978 #803}).

¹ Zmerna klimatska cona je območje na Zemlji kjer za rast ugodno obdobje prekine daljše obdobje za rast neugodnega obdobja - v naših razmerah je to zima, kje drugje je to lahko daljše sušno obdobje.

2 Rast v višino in debelino

Rast drevesa je proces povečevanja višine z apikalno ali višinsko rastjo in povečevanja debeline z debelinsko rastjo. Rast je posledica aktivnosti meristemskih tkiv na dveh različnih koncih rastline. V vršičku drevesa (čisto v vrhu) apikalni meristemi formirajo primarna tkiva, ki podaljšujejo deblo, hkrati pa lateralni meristemi formirajo sekundarna tkiva (kambij), ki so odgovorna za sekundarno debelinsko rast.

Rast drevesa je v zmernih klimatskih conah ciklični pojav. Spomladi, ko nastopijo za rast ugodne razmere, se v popkih aktivirajo rastni hormoni in rast različnih delov drevesa se lahko začne. Rast drevesa poteka v dveh glavnih smereh - v debelino in višino. Rast v debelino imenujemo **debelinska rast**, v višino pa **višinska rast**. Za debelinsko rast je "odgovoren" **vaskularni kambij**. Vaskularni kambij ali preprosto kambij je sloj aktivno delečih se celic, ki navzven proizvajajo **sekundarni floem** (skorjo), navznoter pa **sekundarni ksilem** (les). Kambij z delitvijo celic v radialni in tangencialni smeri vzdržuje sklenjen kambijev obroč ne glede na to kako debelo je deblo.

2.1 Višinska rast

Pri drevesih zmernih klimatskih območij lahko razločimo štiri vzorce letne višinske rasti (Zimmermann in Brown 1971). Pri prvem tipu višinska rast poteče v enem samem sunku. Tak rastni ritem imajo na primer javor, jesen, jelka in nekateri bori (npr. *Pinus lambertiana*). Prezimujoči terminalni popek vsebuje vse potrebne organe primordija v embrionalnem stanju. Spomladi se popek odpre, dokonča rast in dozori. Normalna rast tega tipa dreves je omejena na eno samo rastno obdobje - na začetek vegetacijske sezone. Za razliko od tega ritma rasti pa nekateri bori, kot npr. *Pinus taeda*, v višini rastejo v dveh ali več sunkih skozi celotno vegetacijsko dobo. Fazam rasti sledijo obdobja počitka - mirovanja. Tretji vzorec rasti je kontinuiran, pojavlja se pri drevesih kot je npr. *Ginkgo biloba*, kjer zorenju poganjka takoj sledi rast in razvoj novih listov. Zadnja, četrta oblika višinske rasti terminalnega poganjka pa se pojavlja pri drevesih kot so npr. brest (*Ulmus sp.*) in robinija (*Robinia pseudacacia*). Ko se pri tem tipu dreves popek odpre in nekaj malega zraste, skoraj po pravilu odpade. Odpadli vršiček nadomestijo najbližje ležeči popki. Posledica take rasti, so veje v obliki črke Y ali strokovno, simpodialna razrast.

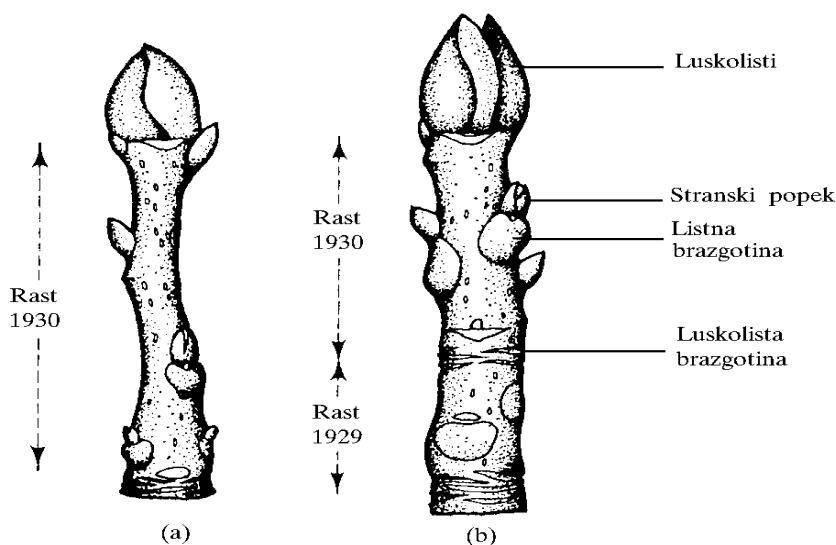
V nadaljevanju si bomo podrobneje ogledali vse razvojne stopnje v razvoju popka črne hikorije (osrednji del ZDA), jelke in bora (oba primerka iz vzhodnega dela ZDA). Vse tri drevesne vrste kažejo prvega od zgoraj omenjenih rastnih ritmov - en sunek rasti na začetku vegetacijske dobe.

Črna hikorija (*Carya buckleyi* var. *arkansana*) odganja monopodialno, jasno izraženo, v obliki glavnega stebela. Na glavnem stebelu so kratke lateralne (stranske) vejice, ki se nahajajo malce pod terminalnim vršičkom. Glavna os poganjka je znana kot dolgi poganjek, medtem ko se lateralni poganjki imenujejo kratki poganjki. Terminalni popek dolgega poganjka je sestavljen (od zunaj navznoter) iz 9-11 popkovih lusk, 5-11 lističev listnih zasnov, ki ležijo pod apikalnim meristemom in 2 majhnih zasnov za luske popka

(Foster 1931). Luske popka ali luskolisti (Niederblatt - spodnji listi; Romberger 1963) so modificirani listi, katerih glavna vloga je, da preprečujejo izsušitve prezimujočega popka, takrat, ko je voda v tleh zamrznjena in tako nedostopna koreninam. Predeli tesno skupaj postavljenih luskolistnih brazgotin se pojavljajo v intervalih, kar kaže na letno višinsko rast (Slika 1). Znatna razlika med listnimi režami dolgega poganjka pa kaže intenzivno rast členka med dvema zaporedno si sledečima listoma.

Prezimujoči zimski popki kratkega poganjka črne hikorije so sestavljeni iz 9 zunanjih luskolistov, 4 listnih zasnov in 2 zasnov za luskoliste. Takšna zgradba je naravnost idealna za natančno opazovanje (Foster 1939).

Terminalni popek kratkega poganjka, se začne 22. marca napenjati, od tedaj pa do 22. aprila, se zunanji luskolisti postopoma ukrivljajo navzven in razkrivajo v notranjosti ležeče, še neodvite liste. Sredi aprila so členki že tako podaljšani in listi že tako razviti, da lahko luskolisti odpadejo. V tem obdobju vidne rasti poganjkov se apikalni meristem izredno hitro razvija. Konec marca, ko se vršiček odpira, dva tik pod vršičkom ležeča primordija dozorita in postaneta luskolista. Ta dva bosta naslednjo zimo ščitila terminalni popek. Sedem dodatnih luskolistov se razvije v sredini aprila. Razvijejo se tudi štirje listni primordiji, ki jim sledita še dve majhni zasnovi za luskoliste.

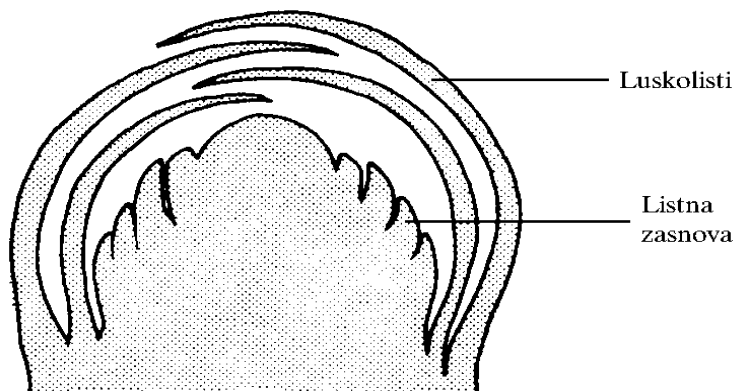


Slika 1: Morfologija dolgega in kratkega poganjka črne hikorije. (a) Dolgi poganjek; 1.05x povečan. (b) Kratki poganjek, prikazuje 2 leti rasti. Členki so bistveno krajši kot pri dolgem poganjku 1.8x povečano. (Vir: Foster 1931, Fig 1 in 2)

Do sredine maja je na vrhu letošnjega poganjka že razvit nov terminalni popek, ki ima po pričakovanju 9 luskolistov, 4 listne primordije (zasnove) in 2 zasnovi za luskoliste. Organogeneza terminalnega popka se sedaj ustavi do naslednje pomladi. Oblikovanje terminalnega popka pri črni hikoriji poteče v približno dveh mesecih (od sredine marca do sredine maja), kar predstavlja le manjši del celotne vegetacijske dobe v Oklahomi.

Pri dolgoigličasti jelki (*Abies concolor*) je prezimujoči popek sestavljen iz 20-30 luskolistov, ki obkrožajo teleskopsko zložen popek in 50-60 igličnih primordijev (Slika 2, Parke 1959). Popek se odpre v začetku aprila s podaljševanjem listnih členkov v teleskopsko zloženem popku. Luskolisti, ki so trdno pritisnjeni ob popek se zaradi podaljševanja listnih členkov odmaknejo in počasi odpadejo.

Ko je novi poganjek dolg nekaj centimetrov, se aktivira apikalni meristem, ki začne s svojo organotvorno funkcijo. Najprej se iz zasnov oblikujejo luskolisti, to traja približno do sredine junija, ko začnejo nastajati iglični primordiji. Prehod iz nastanka zasnov za luskoliste na nastajanje zasnov za iglice je povezan s podaljševanjem apikalnega meristema in s postopnim prenehanjem rasti letošnjega popka. V septembru je novi terminalni popek že oblikovan in vsebuje 50-60 teleskopsko zloženih igličnih primordijev ter 20-30 luskolistov. Za razliko od črne hikorije, traja organogeneza pri dolgoigličasti jelki relativno dolgo (skoraj celotno vegetacijsko sezono) in ni povezana z rastno aktivnostjo lestošnjega popka.

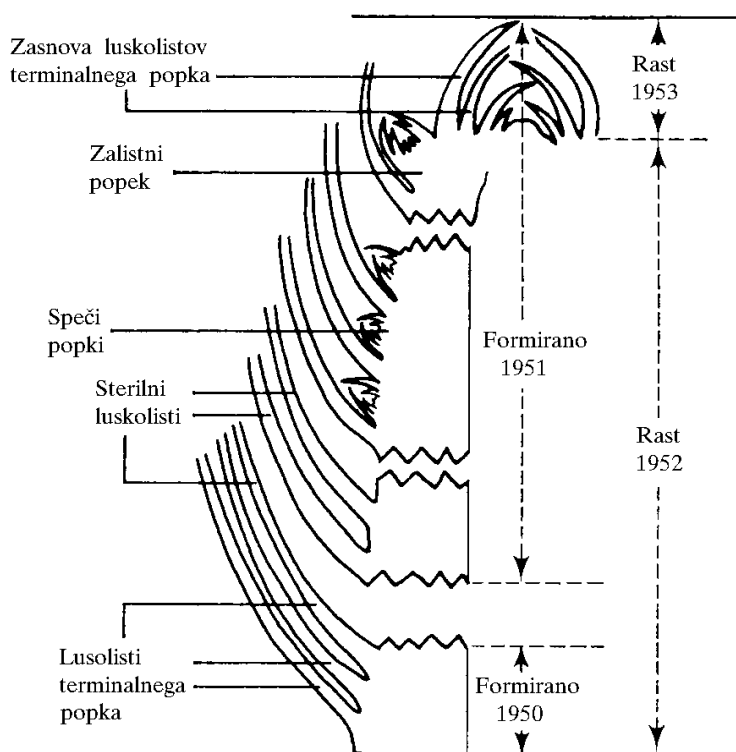


Slika 2: Longitudinalni (vzdolžni) prerez terminalnega poganjka dolgoigličaste jelke, ki prikazuje zasnove iglic in luskolistov.

Zimski popek sladkornega bora (*Pinus lambertiana*) je sestavljen približno enako kot zimski popek dolgoigličaste jelke, z nekaterimi ključnimi morfološkimi razlikami. Iglice ne nastanejo neposredno na glavni osi poganjka. Apikalni meristem je sprožil nastanek luskolistov, ki se razvijejo vedno od spodaj navzgor, na nerazvitem popku (Sacher 1954). Zimski popek je obdan z večjim številom spiralno nameščenih sterilnih luskolistov (brez aksilarnih ali zalistnih popkov), od katerih se tisti skrajno zunaj imenujejo luske terminalnega popka (Slika 3). Spodnja serija luskolistov pa v zalistjih skriva zalistne popke, na katerih so že oblikovani iglični primordiji. Lateralne veje nerazvitega terminalnega popka izhajajo prav iz zalistnih popkov, ki leže malo pod vršnim popkom. Okoli apikalnega meristema pa najdemo večje število sterilnih luskolistov, ki bodo naslednjo zimo ščitili terminalni popke. Rast sladkornega bora se začne v začetku aprila, ko se začno podaljševati členki na glavni osi in podaljševati ter dozorevati iglični primordiji na kratkih poganjkih. Proti koncu aprila prične rasti tudi apikalni meristem in oblikuje nove sterilne luskoliste. Luskolisti in novonastale luske terminalnega popka dozorevajo celo vegetacijsko sezono. Luskolisti in luske bodo varovale terminalni popek naslednjo zimo. Ko nastanejo sterilni luskolisti, sledi razvoj luskolistov na vznožju katerih nastajajo kratki

poganjki. Takoj nato se sproži rast luskolistov ob katerih ob katerih bodo nastali lateralni popki.

Ko rastna aktivnost apikalnega meristema popusti (pozno poleti), nastanejo še majhne zasnove sterilnih luskolistov. Eno leto kasneje bodo le-ti postali luske terminalnega popka.

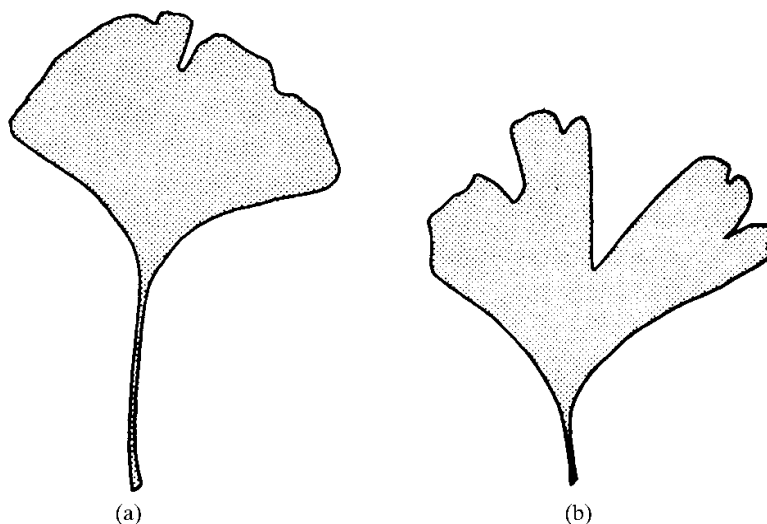


Slika 3: Zgradba nerazvitega terminalnega poganjka rodu Pinus. Skrajno zunanji sterilni (brez aksilarnih struktur) luskolisti se imenujejo luske terminalnega popka. Luskolisti, ki se nahajajo blizu vršička, nosijo kratke poganjke in lateralne popke. Luske terminalnega popka se pojavljajo poleg apikalnega meristema. Pomislite na to, da se luske terminalnega popka tvorijo dve leti preden se razvijejo. (Vir: Sacher 1954, Fig. 2 str. 750)

Pri nekaterih drevesnih vrstah (npr. *Ginkgo* in *Populus*), ki raste v zmernih klimatih, se pojavlja določen zamik pri nastanku terminalnih popkov, rast poganjkov pa se nadaljuje proti koncu vegetacijske sezone. Na dolgem poganjku dvokrpega ginka (*Ginkgo biloba*) se listi, ki se razvijejo zgodaj spomladi, bistveno razlikujejo od tistih, ki se na isti veji razvijejo poleti. Prve imenujemo zgodnji listi, slednje pa pozni listi (Critchfeld 1970). Ta pojav imenujemo heterofilija. Zgodnji listi pri ginku so dvokrpati, medtem ko so pozni listi, globoko nasekani (Slika 4). Zanimivo je, da listi sejancev ginka, kažejo značilnosti poznih listov.

Na dolgih in kratkih poganjkih ginka nastajajo listne zasnove in zimski popki v zalistju zgodnjih listov. Šele ko se popek odpre in rast začne vidimo ali se bo razvil dolg ali kratek poganjek. Zaprt popek pa v ničemer ne nakazuje kaj bo iz njega zraslo. Rast dolgega poganjka v dolžino se nadaljujejo pozno v poletje in šele takrat nastajajo novi terminalni zimski popki. Listi, ki so se razvili zaradi delovanja apikalnega meristema in zorijo

v vegetacijski sezoni so globoko krpati, pozni listi. Critchfield (1970) je poudaril, da heterofilijo najlaže razložimo z listno ontogenezo oz. razvojem lista. Za pozne liste pri odraslem ginku in tudi pri sejancih, je značilen neprekinjen razvoj od odprtja popka do dozorelosti lista, po drugi strani pa je razvoj zgodnjih listov prekinja perioda neaktivnosti, ki je vrinjena med odprtje popka in zorenje lista.

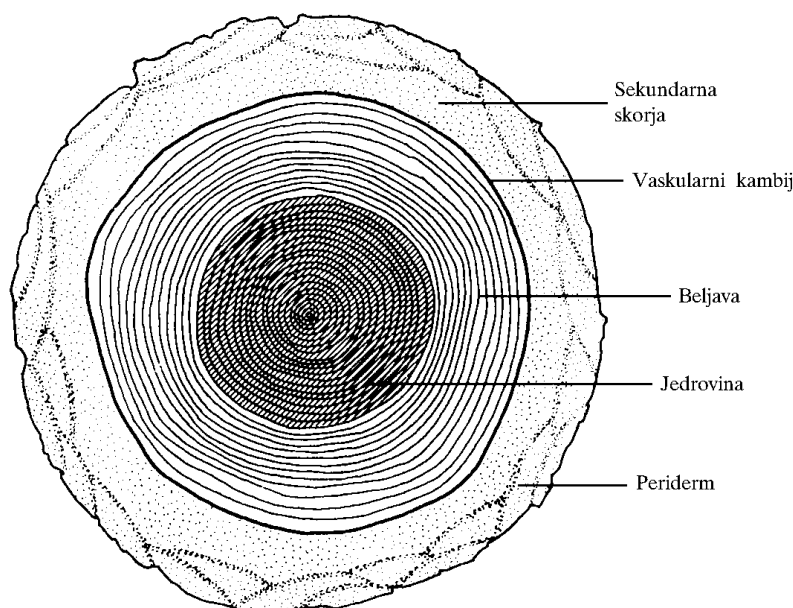


Slika 4: Zgodnji (a) in pozni (b) listi dvokrpega ginka (*Ginkgo biloba*). Listna površina poznega lista je globoko nasekana

Heterofilija se pojavlja tudi pri drevesih, za katere je značilen unimodalen rastni ritem. Pod nenavadnimi ravnimi razmerami (npr. obilne padavine) se lahko rast ponovno sproži. Poganjki, ki se tako pojavijo, se imenujejo kresni poganjki (kres je 23. junija). Listi kresnih poganjkov se razlikujejo od normalnih listov predvsem v obliki in barvi. Heterofilija nastopi v tem primeru zaradi različnega razvoja lista.

2.2 Debelinska rast

Sekundarno rastlinsko telo, katerega večino predstavlja les, nastaja zaradi delovanja meristemov, še posebej pa dveh lateralnih meristemov - vaskularnega kambija in felogena ali plutnega kambija. Opazovanje debla v prečnem prerezu nam da grob vtis o sestavi debla (Slika 5). Les, ki predstavlja največji del prereza, ločuje od skorje vaskularni kambij. Fuziformne in trakovne inicialke vaskularnega kambija tvorijo les in skorjo s pomočjo tangencialne delitve in bočne rasti osnovne celice.



Slika 5: Prečni prerez olesenelega stebra s poudarjenimi glavnimi elementi lesa in skorje

Skorja je izraz, ki se nanaša na vsa tkiva zunaj vaskularnega kambija, vključujoč sekundarni floem in periderem. Kjer se pojavlja več peridermov vključuje tudi ritidom ali lubje. Samo zelo tanka plast floema, tista, ki se je diferencirala kot zadnja opravlja svojo polno funkcijo in prevaja organske snovi - asimilate. Druga sestavina skorje - periderm, je produkt felogena ali plutnega kambija in ima pomembno vlogo pri zaščiti drevesa pred škodljivimi zunanjimi vplivi. Skorja z vidika dendrokronologije in datiranja ni pretirano pomembna saj ne vsebuje letnic. Po drugi strani je prisotnost skorje na vzorcu garancija, da nobena od branik ne manjka in da je ugotovljeni datum, dejansko tudi datum poseka drevesa

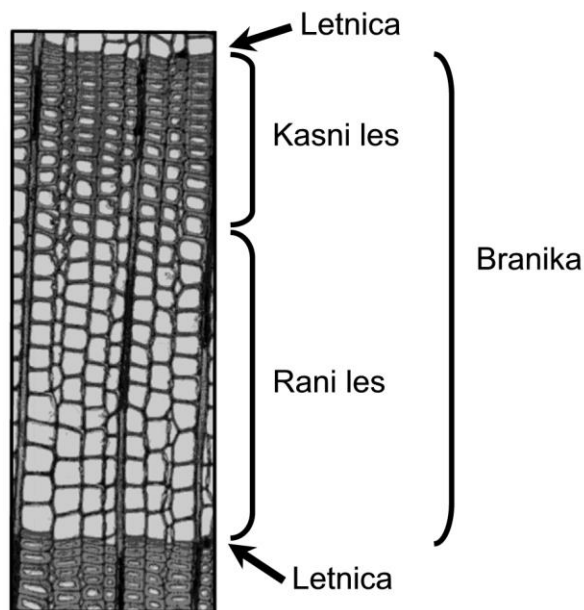
Les nekaterih drevesnih vrst se da ločiti v temnejšo jedrovino in svetlejšo beljava. Beljava je fiziološko aktivna, shranjuje hranilne snovi in prevaja vodo z minerali iz korenin v asimilacijski aparat. Jedrovina ne vsebuje živih celic in nima nobene fiziološke vloge razen mehanske - dajanje opore drevesu.

Les sestavljata dva sistema celic - aksialni (vzdolžni) in radialni. Vse celice aksialnega sistema (traheje, traheide, vlakna in parenhim) nastanejo iz fuziformnih inicialk. Celice radialnega sistema (trakovi tudi strženovi trakovi) nastanejo iz trakovnih inicialk vaskularnega kambija. Celice radialnega sistema so pri večini drevesnih vrst sestavljene iz parenhima, razen pri nekaterih borih, kjer se pojavljajo trakovne traheide.

Les iglavcev je strukturno bolj homogen saj kar 90% aksialnih elementov predstavljajo traheide. Listavci so pravo nasprotje iglavcev, ker so glede zgradbe lesa mnogo bolj heterogeni. Njihov les vsebuje traheje, vlakna in včasih tudi traheide (npr. dob). Celična zgradba lesa iglavcev in listavcev je različna, razen tega se kažejo tudi zanimive razlike v razvoju določenih aksialnih celic. Traheide iglavcev so dolge približno 3-4 mm, medtem ko so vlakna listavcev v splošnem mnogo krajša, le 1-1.5 mm. Razlika med iglavci

in listavci je očitna ne samo v končni dimenziji določenih celic, ampak tudi v samem razvoju teh celic iz fuziformnih inicialk.

Kambijeva aktivnost se v rastni in med rastnimi sezonami spreminja, pozimi pa, v zmernih klimatskih conah tudi popolnoma miruje. Rezultat takšne rasti je tipičen vzorec, ki ga na prečnem prerezu vidimo v obliki bolj ali manj jasno vidnih kolobarjev – **branik**. Branika je posledica sezonske rasti kambija lesnatih rastlin. Meja med dvema branikama se imenuje **letnica** (Torelli 1990) (Slika 6).



Slika 6: Normalna zgradba branike iglavca. Vidni so rani in kasni les, celotna branika in meja med dvema branikama - letnica.

Rezultat višinske in debelinske rasti so debla, ki lahko dosežajo izjemne višine (110 in več metrov) in debeline (premer debla do nekaj metrov). Na prečnem prerezu debla se rezultat delovanja kambija vidi v obliki koncentričnih krogov - branik. Na osnovi širine branik lahko posredno sklepamo v kakšnih razmerah je v določenem letu deloval kambij oz. je raslo drevo in to dejstvo s pridom izkorišča veda, ki se imenuje **dendrokronologija**.

2.3 Vplivi okolja na braniko

Rast in razvoj drevesa je tesno povezan z okoljem v katerem drevo raste. Širina branike, ki nastane v določenem letu je odvisna od rastnih pogojev v tem in predhodnem letu. Na širino branike in na njeno anatomsko zgradbo (rani, kasni les, pojav smolnih kanalov...) vplivajo številni dejavniki okolja, ki se med seboj dopolnjujejo ali izključujejo in na ta način menjajo ritem rasti drevesa. Ostali dejavniki okolja, ki vplivajo na rast drevesa so še intenzivnost svetlobe, temperatura, padavine, defoliacija itd. V področjih kjer je pogosta suša lahko postane talna vlaga omejujoč dejavnik, ki zavre rast poganjkov in povzroči nastanek kasnega lesa. Če so vplivi okolja zelo negativni se lahko zgodi, da pride do anomalnih oblik branike. Ker je rast

drevesa zelo vezana na okoljske dejavnike se lahko zgodi, da se v zelo spremenljivih okoliščinah za rast pojavi tudi več branik v enem letu. Pri drugih drevesih, ki jih tudi odlikuje zelo variabilna rast branike, se pojavljajo izklinjene branike v obliki leč. To se zgodi tam, kjer se kambijev obroč ni aktiviral na celotnem obodu ampak le na nekaterih mestih. V primeru dolgotrajne suše ali kakega drugega neugodnega dejavnika (npr. onesnaževanje) pa se lahko zgodi, da branika v določenem letu sploh ne nastane. V nadaljevanju so najpomembnejši vplivni dejavniki nekoliko bolj natančno razloženi.



Slika 7: Na širino branike vplivajo številni okoljski dejavniki. Zaradi interakcije med vplivi je težko izločiti enega samega, najpomembnejšega. Na sliki so prikazani samo najpomembnejši.

Širina branike je odvisna od številnih dejavnikov (Slika 7). V prvi vrsti vpliva na širino branike v določenem letu **klima**, če je bilo leto sušno in vroče, bo branika po vsej verjetnosti zelo ozka, če pa je bilo toplo a z dovolj padavinami lahko pričakujemo široko braniko. Tu kaže opozoriti na zanimivo dejstvo. Ni nujno, da suho in vroče leto povzroči nastanek ozke branike. V letu 2003, ki je bilo izrazito sušno in vroče je pri smreki v nižinah, na Sorškem polju, dejansko nastala zelo ozka branika, tudi višinska rast dreves je bila močno zavrta. Za razliko od tega pa so smreke na Pokljuki v taistem letu bistveno bolje rasle kot v hladnejših in bolj vlažnih letih. Tu je postalo očitno, da je rast na višjih nadmorskih višinah pogojena s temperaturo, v nižjih pa s padavinami in da suho in vroče leto ni nujno neugodno za rast dreves.

V Sloveniji, pa tudi v Evropi, moramo dendrokronologi upoštevati tudi **vpliv gospodarjenja z gozdom**. Z evropskimi gozdovi bolj ali manj uspešno gospodarimo že vsaj 250 let. Vpliv gospodarjenja se kaže v relativno nizkih starostih dreves (večina okoli 150, največ 250 let), in zmanjšani biotski pestrosti gozdnih ekosistemov. Z vidika debelinskega prirastka in širine branike pa lahko gospodarjenje z gozdom, predvsem pa redčenje in spravilo lesa iz gozda znatno vplivata na pojavno obliko branike. V prvem primeru redčenje vpliva na širino branike tako, da se po redčenju (ali poseku) širina branik preostalih dreves skokovito poveča in nato počasi izzveneva, v drugem primeru pa se zaradi poškodb pri spravilu lesa iz gozda pojavilo kalusne tvorbe na deblu, smolni kanali in reakcijske cone. V vseh od naštetih primerov, gre za začasno povečevanje ali zmanjševanje

debelinskega prirastka (v bližini kalusa za povečevanje, nekoliko bolj stran se pojavijo barijerne cone ali povečano število smolnih kanalov).

Onesnaževanje okolja je eden od dejavnikov, ki vse bolj vpliva na rast dreves in posledično na širino branike. V začetku 20. stoletja je prišlo zaradi industrijske revolucije do znatnega povečevanja škodljivih izpustov v okolje. V tem času je šlo predvsem za žveplov dioksid, ki je nastajal s kurjenjem premoga, le-ta je reagiral z vodo (vlago) v zraku in s padavinami je na tla začela padati šibka žveplova kislina, ki je začela spreminjati razmere v tleh in vplivati na asimilacijski aparat prizadetih dreves. Posledica tega je bilo velikoprostorsko propadanje gozdov in odmiranje celih gozdnih kompleksov. Učinek »kislega dežja« je bil odvisen od bližine industrijskih središč in smeri prevladujočih vetrov. V 80. letih 20. stoletja je prišlo zaradi velikih političnih sprememb v vzhodni Evropi in okoljske ozaveščenosti do redukcije izpustov SO₂, do uporabe bolj čistih premogov z manjšo vsebnostjo žvepla in do nameščanja odžvepljevalnih naprav na termoelektrarnah. Zaradi vseh teh ukrepov se je začel izpust SO₂ zmanjševati, pojavil pa se je nov problem povezan z naraščajočim prometom. V zraku so se začele pojavljati večje količine dušikovih oksidov in ozona. Posledica pojava dušikovih oksidov in njihovih depozitov v gozdnih sestojih je povzročilo t.i. »gnojilni efekt«, ki je kratkoročno povečal rast, na dolgi rok pa to siromaši naravno rodovitnost gozdnega ekosistema. Posledice so naraščanje prirastka in nato njegov upad.

Mesto odvzema vzorca je bolj natančno obdelano kasneje, bistveno pa je, da bližina oz. oddaljenost krošnje in korenin bistveno vplivata na širino branike, zato je zelo pomembno kje vzamem vzorec za dendrokronološko analizo. Včasih na mesto odvzema ne moremo vplivati, kljub temu pa je pomembno, da se zavedamo dejstva, da je mesto odvzema vzorca nadvse pomemben parameter.

Rastišče je poleg klime eden od dejavnikov na katerega imajo dendrokronologi najmanj vpliva. Širina branike se močno spreminja med rastišči, na boljših rastiščih je branika širša, na slabših ožja. Vpliv rastišča lahko s primerno zastavljenim raziskovalnim načrtom – vzorce odvezamemo na dobrem in slabem rastišču in izdelamo povprečno krivuljo za več rastišč. Razlike v **genetski zasnovi** drevesa vplivajo predvsem na dejstvo, da različna drevesa iste drevesne vrste na enakem rastišču ob enakih klimatskih razmerah drugače rastejo. Na genetsko zasnovi drevesa ne moremo vplivati, dobro pa je da se zavedamo dejstva, da popolne podobnosti med drevesi iste vrste na podobnem rastišču ni. So si le bolj ali manj podobni prirastni ritmi.

Vpliv **konkurence med drevesi** je tesno povezan z gospodarjenjem oz. negospodarjenjem v sestoji. Večja ko je konkurenca med drevesi ožje bodo branike. V redčenih sestojih so branike vsaj kmalu po redčenju nekoliko širše, potem pa učinek redčenja počasi izzveni in branike postajajo zopet ožje. Za dendrokronologa je predvsem pomembno dejstvo, da je učinek konkurence v zaporedjih širin branik viden in da je to z vidika dendrokronologije motnja, ki zahteva dodatna vedenja in razlage.

Zaradi kompleksnega vpliva okoljskih dejavnikov na rast drevesa je dendrokronolog soočen s težko nalogo, ko želi iz kompleksnega vpliva

dejavnikov izločiti samo enega ali pa največ dva, ki odločilno vplivata na rast drevesa v določenem letu. Problem je rešljiv s primerno oblikovanim načrtom vzorčenja - več dreves na več lokacijah.

Pri preučevanju spreminjanja širine branike v odvisnosti od časa in okoljskih dejavnikov se bomo pri analizi meritev srečali s številnimi uveljavljenimi strokovnimi izrazi za kazalce, ki opisujejo prirastni odziv posameznega drevesa ali skupine dreves na zunanje dražljaje v določenem območju. Tako lahko kazalce razdelimo na tiste, ki so vezani na prirastni odziv enega drevesa in na tiste, ki so odraz odziva večih dreves na nek skupni dražljaj.

2.4 Posebne pojavne oblike branike

Dendrokronologi se pri svojem delu srečajo z normalnimi in anomalnimi branikami. Večini dendrokronologov prepoznavanje normalnih branik in identifikacija letnic ne povzroča velikih težav. Problemi pa se začnejo pri prepoznavanju anomalnih branik.

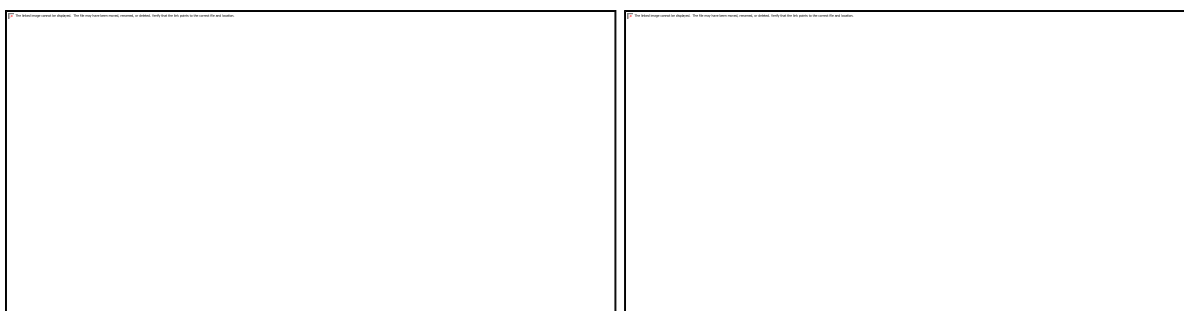
Največji problem predstavljajo v dendrokronologiji **lažne branike**, to so tiste branike, ki niso posledica prekinitve rasti zaradi zime ampak je prišlo do prekinitve rasti zaradi neugodnih rastni razmer v vegetacijski dobi (npr. huda suša, napad insektov), potem pa se je rast nadaljevala. Pri mnogih drevesnih vrstah lahko v neugodnih razmerah ali pa zaradi hudega okoljskega stresa pride do **izpadlih branik** ali do **izklinjenih branik**. Izpadle branike so popolnoma manjkajoče branike, to pomeni, da kambij v tistem letu na celotnem obodu ni deloval in priraščal. Da kambij ne bi deloval na celotnem obodu drevesa se le redkokdaj zgodi, zato smo večkrat priča **izklinjenim branikam**, kot pa popolnoma izpadlim. Izklinjena branika nastane takrat, ko se kambij aktivira samo na enem delu oboda debla na drugem pa ne. Izpadle oz. izklinjene branike se pojavljajo tudi vzdolž debla. Razlogov za izpad oz. izklinjenje branike je veliko, večinoma so povezani z vitalnostjo drevesa, posebnimi rastnimi razmerami v letu nastanka in s kambijevo (ne)aktivnostjo.

Med bolj redkimi pojavi v branikah so t.i. **light rings**, to so branike, ki so sicer bolj ali manj enako široke kot okoliške branike vendar z izrazito malo kasnega lesa. V primerjavi s sosednjimi branikami so precej svetlejše. Takšne branike najdemo v različnih drevesnih vrstah in so posledica relativno hladnih in precej mokrih let. Takšna leta so lahko posledica močnejših vulkanskih izbruhov, ko večje količine pepela onesnažijo atmosfero in preprečijo dostop sončnim žarkom do tal. Tako na primer, je branika, ki je nastala v letu 1992, po eksploziji vulkana Pinatubo na Filipinih, bistveno svetlejša kot branike pred ali po tem dogodku. Leto 1816 so v analih zapisali kot »leto brez poletja«. Takšno poletje je bilo posledica močnega izbruha vulkana Tambora v Indoneziji v letu 1815.

Ena ob bolj pogostih anomalnih branik je **mrazna branika** (an. frost ring). Mrazna branika je posledica vpliva kasnega mraza na kambijevo cono. Pojavi se takrat, ko kmalu po začetku vegetacijske sezone rast prekine krajše zelo mrzlo obdobje in komaj odgnali vršički se posušijo posledica je ozek pas kasnega lesa v komaj nastali braniki. Ko drevo ponovno odžene se

pojavi pas ranega lesa ki nato počasi preide v kasni les in ras se normalno zaključí s prvimi jesenskimi ohladitvami.

Branike, ki nastanejo na mestu poškodb kambijevega obroča imajo nekaj posebnosti za katere je dobo, da jih dendrokronologi poznajo. Odziv drevesa na poškodbo je specifičen (Oven / Torelli 1994; Torelli / Čufar 1995). Na mestu poškodbe pride do odmrta kambija. Posledica tega je, da na tem mestu kambij preneha z rastjo in branika ne more nastati. V letih ki sledijo kambij od strani preraste poškodbo, pri tem pa v lesu ostane poškodba, ki je trajna in se jo da datirati (Slika 8). Branike, ki nastanejo nad ali blizu poškodbe so ponavadi drugače orientirane kot branike pod poškodbo, v večini primerov so tudi nekoliko širše, na mestih blizu poškodbe se pojavi večje število smolnih kanalov, travmatski smolni kanali ali barierne cone (pri listavcih), pri listavcih so pogosta tudi različna obarvanja.



Slika 8: Poškodbo, ki je nastala v lesu se da datirati in ugotoviti kdaj je nastala (vzorec smrekovine – levo – arhiv oddelka za gozdno tehniko GIS, vzorec bukovine – desno – ksilotomska zbirka BF lesarstvo).

Pri makroskopskem opazovanju lesa se dostikrat srečamo s posebnostmi (anomalijami) branik, ki so vezane na različne biotske in abiotske dejavnike. Te pojave lahko interpretiramo v smislu nesklenjenih časovnih vrst in jih ustrezno statistično ovrednotimo. Najpogostejše posebnosti branik so zbrane v preglednici 1 (Schweingruber et al. 1990; Kaennel / Schweingruber 1995).

Preglednica 1: Najpogostejše anomalije v branikah primerne za dendrokronološko datiranje

Posebnosti branike	
Iglavci	Listavci
smolni kanali	gumozni depoziti
smolni žepi	"kino vein"
travmatski smolni kanali	tenzijski les
kompresijski les	
kalusno tkivo, mrazne branike, netipičen rani in kasni les, nihanje gostote lesa v braniki, branike z neizrazitim kasnim lesom ("light rings"), branike z izrazitim kasnim lesom ("dark rings")	

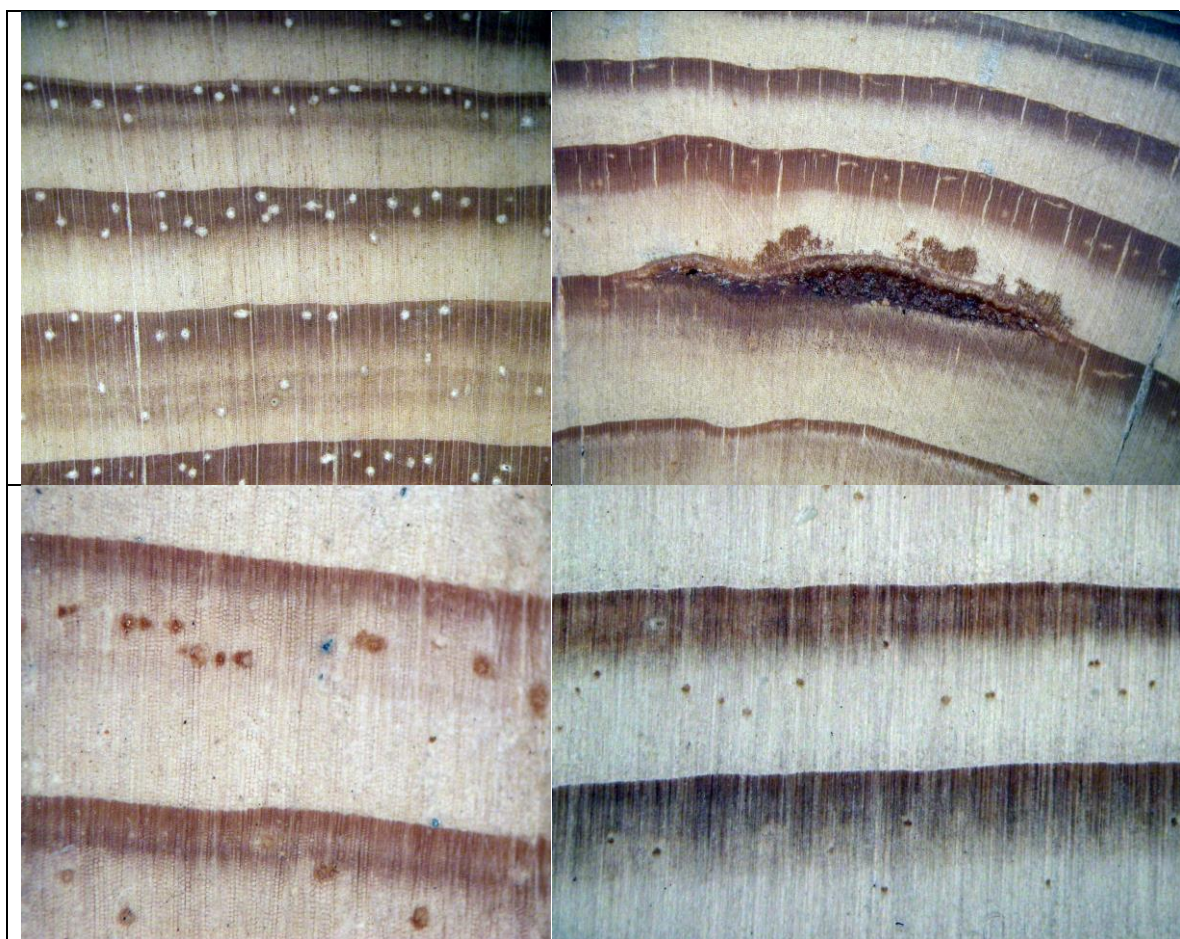
Smolni kanali in smolni žepi

Smolni kanali so reden pojav v lesu nekaterih iglavcev. Imajo jih vsi bori, smreka in macesen. Pri nekaterih iglavcih pa so le občasen pojav, ki je posledica odziva drevesa na poškodovanja (npr. jelka). Pojav povečanega

števila smolnih kanalov v lesu iglavcev je znak, da se je z drevesom nekaj zgodilo, oz. da je bilo drevo v rasti moteno.

Tako na primer so ugotavljali, da se število smolnih kanalov v lesu borov močno poveča v tistem letu, ko je sestoj prizadel požar ali v sušnem letu (Wimmer / Grabner 1997), jelka se na izrazito slabe rastne razmere ali poškodovanja kambija odziva s tvorbo travmatskih smolnih kanalov. Bori se na ekstremno topla (in sušna) leta odzivajo s povečanim številom smolnih kanalov na enoto površine v braniki, medtem ko v ekstremno vlažnih letih tega ne moremo zanesljivo trditi (Levanič 1999). Večina iglavcev se na velike poškodbe kambija odzove s povečanim nastankom smolnih kanalov in smolnih žepov (Oven / Torelli 1994).

Z dendrokronološkega vidika je pojav smolnih kanalov lahko zanimiv kazalec, ki nam pove nekaj o posebnostih leta v katerem je branika z več smolnimi kanali nastala, kar so pokazale nekatere študije (Wimmer / Grabner 1997; Levanič 1999). V Ameriki pojav smolnih žepov in povečanega števila smolnih kanalov v braniki povezujejo s frekvenco požarov v posameznih letih in ta kazalec uporabljajo za rekonstrukcijo pogostnosti pojavljanja požarov v preučevanih sestojih.



Slika 9: Smolni kanali v lesu črnega bora (zgoraj levo) in smolni žep v lesu macesna (zgoraj desno), travmatski smolni kanali pri jelki (spodaj levo) in smolni kanali pri smreki (spodaj desno).

Kompresijski in tenzijski les

Pojav kompresijskega pri iglavcih in tenzijskega lesa v deblu pri listavcih je vezan na težnjo drevesa po vzdrževanju vertikalne smeri rasti. Vsak odklon od vertikale večji od 4 stopinj povzroči nastanek reakcijskega lesa.

V primeru, da drevo ne more rasti povsem pokončno, se postopno reorientira v rasti. Ta sprememba vpliva, da se oblikuje les posebne (netipične) strukture in kemične zgradbe. Tak les imenujemo reakcijski les in nastaja enostransko glede na smer v kateri se popravlja rast. Lahko se pojavi na tisti strani kjer se popravlja smer rasti, lahko pa se pojavi ravno na nasprotni strani. Drevo smer rasti popravlja z raztezanjem ali s krčenjem rastočega tkiva. Če vpliva na smer ni več, se stanje lahko popravi oz. reakcijski les ne nastaja več. Do prenehanja tvorbe reakcijskega lesa lahko pride le pri sejancih lesnatih rastlin, medtem ko odrasla drevesa le redkokdaj uspejo nagnjeno deblo popolnoma izravnati. Reakcijski les dobro poznajo predelovalci lesa, saj gre za zelo resno napako v lesu, ki povzroča znatne aksialne skrčke pri sušenju. Miza narejena iz reakcijskega lesa se prav grdo krči, zvija in poka.

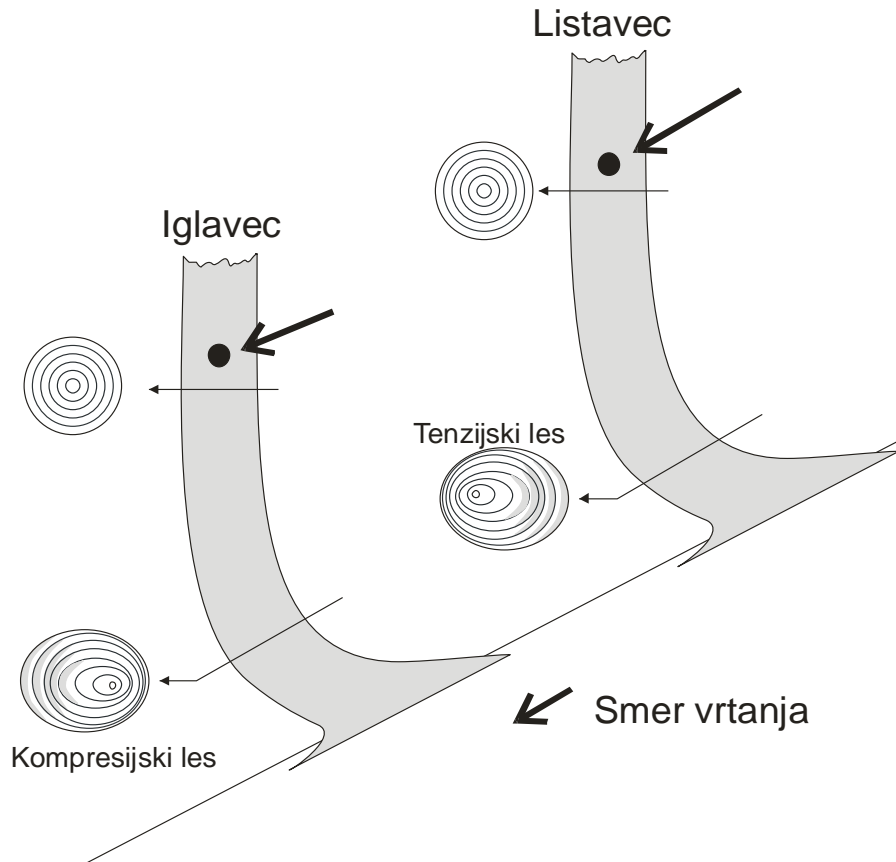
Reakcijski les listavcev, imenovan tudi tenzijski les, nastaja na zgornji strani in povzroča spremembo smeri s krčenjem tkiva na tem mestu. Tenzijski les zlahka prepoznamo po volnati površine sveže odžagane deske. Volnatost se pojavi zaradi tega, ker se vlakna tenzijskega lesa bistveno bolj upirajo žaginemu listu kot pa normalna vlakna. Takšen les povzroča težave ne samo pri žaganju ampak tudi pri končni obdelavi. Tenzijski les ima še eno slabo lastnost, ki se pokaže takoj pri poseku. Zaradi tenzijskega lesa hlod takoj ko pade na tla, počí. Tako se sprostijo napetosti v deblu.

Značilnost tenzijskega lesa je visok odstotek celuloze in majhen odstotek lignina, v primerjavi z normalnim lesom. V tenzijskem lesu je manj trahej, če pa so, so bistveno ožje (slika 2a). Vlakna tenzijskega lesa, imenovana tudi želatinasta vlakna, imajo gosto želatinozno sekundarno celično steno (sloj S(G)). Sloj S(G) se lahko pojavi kot dodatek ostalim trem slojem sekundarne celične stene, lahko pa nadomesti sloj S3 ali pa sloj S2 in S3. Celulozna plast S(G) je vzporedno orientirana z daljšo osjo vlakna. Celice tenzijskega lesa vsebujejo zelo malo lignina. V tenzijskem lesu je višja ali nižja vsebnost celuloze oz. lignina v glavnem odvisna od kemijske zgradbe S(G) plasti.

Pri iglavcih se reakcijski les imenuje kompresijski les in nastaja na spodnji strani upognjenih debel. Kompresijski les nastaja v deblu in vejah zaradi aksialnega tlačenja (=kompresije). Njegov nastanek je povezan z raztezanjem spodnje strani debla. Tudi pri iglavcih je kompresijski les zelo resna napaka. Glavna lastnost kompresijskega lesa je velika trdota in gostota, ki je nekajkrat večja kot pri normalnem lesu. Tudi žebli v tako trdem in gostem lesu slabo držijo.

Reakcijski les velja za anomalijo pri nastajanju lesa in ni povezan z normalno rastjo drevesa. Velja si zapomniti da reakcijski les ne nastaja pri normalno rastočem drevesu, obstajajo pa določene izjeme. Takšna izjema je kanadska čuga (*Tsuga canadensis*), kjer se terminalni poganjek spomladi, ko odžene, zvija in krivi v vetru, šele nekje sredi poletja se poganjek učvrsti in to ravno zaradi nastanka kompresijskega lesa. Sezonski ritem rasti

terminalnega poganjka je genetsko pogojen, tako da je kompresijski les v primeru kanadske čuge povsem normalen pojav.



Slika 10: Pojav kompresijskega lesa pri iglavcih (levo) in tenzijskega lesa pri listavcih (desno) (Torelli, os. komunikacija)

3 Definicija dendrokronologije

Dendrokronologija je veda, ki na osnovi širine branike, gostote lesa v braniki ali izotopske zgradbe branike sklepa na razmere v katerih je drevo v določenem času raslo. Ime dendrokronologija je sestavljeno iz grških besed, ki pomenijo drevo, čas in veda oz. znanje (Kaennel / Schweingruber 1999). Raziskovalci, ki se ukvarjajo z dendrokronologijo se imenujejo **dendrokronologi**.

Dendrokronologija je edina absolutna metoda datiranja lesa in lesenih predmetov. Zaradi tipičnega zaporedja širin branik lahko s postopkoma imenovanima **datacija** in **sinhronizacija** določimo leto nastanka določene branike.

Z razvojem dendrokronologije se je iz osnovne vede razvila cela vrsta aplikacij dendrokronologije v drugih vedah. Tako na primer se povezava ekologije in dendrokronologije imenuje **dendroekologija**, povezava klimatologije in dendrokronologije **dendroklimatologija**, s povezavo seizmologije in dendrokronologije pa dobimo dendroseizmologijo, vedo, ki preko pojava reakcijskega lesa v deblu dreves sklepa na seizmične dejavnike v širši okolici. Nadalje je dendrokronologija uporabna tudi v glaciologiji, kjer s pomočjo lesnih ostankov rekonstruiramo premikanje ledenikov, fluvioologiji, kjer s pomočjo lesnih ostankov v rečnih strugah sklepamo na premikanja meandrov in sipin in podobno. Zaradi svoje univerzalnosti je dendrokronologija uporabna povsod tam, kjer rastejo drevesa, ki formirajo branike in kjer si raziskovalci zastavljajo vprašanja na katere lahko dendrokronolog morebiti odgovori.

4 Sedem ključnih načel dendrokronologije

Osnovni princip dendrokronologije temelji na sedmih načelih² od katerih je vsak na svoj način ključen za uspešno izvedbo dendrokronološke analize. Ta načela so:

Načelo enakega odziva

Načelo enakega (ali skladnega) odziva pravi, da so bili vsi biološki ali fizikalni procesi, ki povezujejo trenutne okoljske razmere z rastjo dreves prisotni tudi v preteklosti in da se način vplivanja okolja na drevesa in način odzivanja dreves na te dejavnike v času ni spremenil. Z drugimi besedami, drevesa se na okoljske spremembe danes, odzivajo popolnoma enako, kot so se odzivala na okoljske spremembe v preteklosti. To načelo omogoča dendrokronologom rekonstrukcijo preteklih fizikalnih / bioloških dogodkov, ki so vplivali na rast dreves in ga lahko s pridom uporabimo tudi za napovedovanje / modeliranje učinkov okoljskih sprememb na rast dreves v prihodnje.

Tipičen primer uporabe tega načela je rekonstrukcija poletnih temperatur na zgornji gozdni meji za 100, 200 in več leta nazaj, v obdobja, ko ni na voljo prav nobenih instrumentalnih meritev – prve uporabne meritve temperature so se pojavile šele leta 1715 za Padovo, Bolonjo, Firence, Milano in okolico. Postopek rekonstrukcije se začne tako, da najprej ugotovimo kateri meseci ključno vplivajo na rast npr. macesna na zgornji gozdni meji. V Sloveniji je to junij, nato na osnovi te korelacije razvijemo linearni model, ki nam služi za rekonstrukcijo junijske temperature v obdobja pred instrumentalnimi meritvami. Tak pristop nam omogoča, da rekonstruiramo temperature na zgornji gozdni meji daleč nazaj v obdobja (npr. zadnjih tisoč, dva tisoč let), ko nismo imeli prav nobenih instrumentalnih meritev. Tovrstne študije so ključne pri evaluaciji učinkov izpustov toplogrednih plinov v atmosfero in vpliva človeka na spreminjanje klime. Pomembne so tudi pri odgovorih na vprašanja ali se segrevanje atmosfere dejansko dogaja zaradi izpustov toplogrednih plinov in ali je takšen trend segrevanja, kot smo mu priča sedaj dejansko antropogenega izvora ali ne.

Načelo faktorjev minimuma

To načelo pravi, da so procesi v neki rastlini / drevesu omejeni s tisto okoljsko spremenljivko, ki je trenutno v minimumu. V principu gre pri tem načelu za nekoliko razširjen Liebigov zakon minimuma. Tako so na primer padavine pogostokrat omejujoč dejavnik za rast rastlin v suhih in plosuhih območjih na Zemlji. V teh območjih količina padavin definira začetek, trajanje in konec rastnih / razvojnih procesov. Rast je torej funkcija padavin. Na drugih območjih na Zemlji pa je padavin dovolj in je mogoče temperatura tisti dejavnik, ki omejujejo procese v rastlini. Tako na primer

² Načela sem povzel po odlični spletni strani Henri Grissina – Mayerja. Načela kot taka je sicer definiral že Fritts v svoji knjigi *Tree-rings and climate* (1976). Za naše potrebe sem ta načela prevedel in priredil.

je na zgornji gozdni meji v Alpah ponavadi dovolj padavin, vendar je temperatura tista, ki determinira rast. Odzive rastlin na okoljske spremembe lahko močno omejijo tudi tisti dejavniki, ki sami po sebi ne delujejo zaviralno, vendar v kombinaciji z drugim dejavnikom prebijejo mejo in postanejo odločilen dejavnik, ki zavira rast opazovane rastline. Tako padavine same po sebi niso ključne za rast hrasta v poplavnih ravninah Slovenije. V kombinaciji z zniževanjem podtalnice, pa postane količina padavin ključen in omejujoč dejavnik za preživetje hrasta.

Načelo združenega modela rasti drevesa

$$R_t = A + C + \delta D_1 + \delta D_2 + \varepsilon$$

To načelo nam govori o tem, da lahko vsako zaporedje širin branik razstavimo v skupek okoljskih dejavnikov, tako naravnih kot antropogenih, ki skupaj vplivajo na vzorec priraščanja drevesa v času (Cook 1985). Tako na primer je letni prirastek drevesa (R) v poljubnem letu (t) funkcija naslednjih dejavnikov:

1. starostnega trenda (A), ki je posledica normalnega upada letnega prirastka zaradi staranja drevesa
2. klimatskih dejavnikov, ki vplivajo na rast drevesa (C)
3. bližnjih dejavnikov, ki vplivajo na rast drevesa na nivoju mikrorastišča (δD_1) (npr. poškodbe, specifično rastišče, konkurenca sosednjega drevesa, ipd.)
4. daljnih dejavnikov, ki ne vplivajo samo na eno drevo, ampak na ves gozdni ekosistem (δD_2) (npr. napadi podlubnikov, požar, onesnaževanje ozračja, ipd.)
5. naključni vplivi (ε), ki jih ne znamo ali ne moremo pojasniti z nobenim od prejšnjih štirih (npr. eno drevo raste v primerjavi z drugim hitreje, ker je pač drugačne genetske zasnove)

dejavnika D_1 in D_2 lahko z binarnim znakom $\delta(0,1)$ označimo za prisotna ali odsotna. To storimo tako, da ustrezen dejavnik pomnožimo z 0 ali 1.

Enačba, kot je napisana zgoraj ni uporabna za izračunavanje česar koli. Je le model s pomočjo katerega razložimo relativno kompleksen odnos med širino branik / letnim prirastkom drevesa, starostjo, klimo in okoljskimi dejavniki.

Seveda je zgornji model dober pripomoček pri načrtovanju dendrokronoloških poskusov. Če nas zanima vpliv klime na rast drevesa, potem poskus zastavimo tako, da poiščemo lokacije, kjer sta D_1 in D_2 nepomembna. Podobno bomo v študiji vpliva podtalnice na rast drevesa izbrali rastišča, kjer je klima bolj ali manj podobna, starost dreves bolj ali manj enaka, razlika pa bo v nivoju podtalnice – torej dejavnika D_1 ali D_2 .

Načelo ekološke amplitude

To načelo je zelo preprosto in govori o tem, da ima vsaka drevesna vrsta določeno ekološko nišo v območju katere lahko raste in se razmnožuje. Tako na primer imata smreka in bukev precej široko ekološko amplitudo.

Uspevata na različnih rastiščih, od hladnih do toplih, od svežih do sušnih. Rdeči bor po drugi strani pa ima precej ozko ekološko nišo. Raste samo na rastiščih, kjer je konkurenčen drugim drevesnim vrstam, predvsem tam kjer je rast in razmnoževanje drugih drevesnih vrst oteženo zaradi različnih ekoloških in / ali človeških dejavnikov (npr. steljniki v okolici Šmarne gore). To načelo je zelo pomembno za dendrokronologijo, saj imajo drevesa določene drevesne vrste, ki rastejo na robu ekoloških niš veliko bolj izrazite odzive na okoljske spremembe, kot tista drevesa, ki rastejo v centru ekološke niše. To načelo tudi »sili« dendrokronologe, da vzorce nabirajo na ekstremnih lega, visokih nadmorskih višinah, ipd.

Načelo rastišča

To načelo pravi, da moramo rastišča / lokacije dreves poiskati na način, da bodo kronologije, ki jih bomo naredili za ta rastišča, kar najbolj odražale tisti okoljski dejavnik, ki ga želimo preučevati.

Če želimo na primer preučevati odziv drevja na sušo bomo poiskala drevesa, ki rastejo na območjih kjer je malo padavin – taka so na primer južna pobočja na plitvih tleh, strma rastišča na prepustni matični podlagi, na zelo izpostavljenih legah in podobno. Dendrokronolog, ki ga zanima rekonstrukcija suše na določenem območju bo tako poiskal takšna drevesa, ki rastejo na ekstremnih rastiščih z izrazitim pomanjkanjem padavin – se pravi na rastiščih, kjer je voda omejujoč dejavnik. Nasprotno, pa vzorčenje dreves na relativno vlažnem rastišču, kjer voda ni omejujoč dejavnik, ne bo dalo nobenega pravega odgovora na vprašanja o problematiki suše.

Načelo navzkrižnega datiranja

To načelo pravi, da ujemaš vzorec širin branik ali drugih značilnosti branike (npr. vzorec maksimalnih gostoto branik / vsebnosti stabilnih izotopov v braniki) med večimi zaporedji širin branik omogoča enoznačno identifikacijo leta v katerem je nastala posamezna branika.

Tako lahko na primer datiramo staro leseno hišo s primerjanjem vzorca širin branik dobljenega v stari hiši z vzorcem širin branik, ki smo ga pridobili iz živečih dreves. Načelo navzkrižnega datiranja je ključno načelo dendrokronologije – brez natančnosti, ki nam jo daje navzkrižno datiranje, bi bilo datiranje širin branik dreves bolj ali manj preštevanje branik in ugotavljanje starosti posameznih dreves.

Načelo velikega števila vzorcev

To načelo pravi, da lahko katerikoli okoljski vpliv maksimiziramo in nezaželene »šume« minimiziramo, če odvezamo več kot eno vzorec drevo, če vzorčimo več kot eno drevo na stojišče in če vzorčimo na več kot enem stojišču (rastišču).

S tem, ko odvezamo več kot en vzorec na drevo izničimo vplive znotraj drevesa. Ko vzorčimo več kot eno drevo na rastišču izničimo vpliv okolja na eno samo drevo (dobimo odziv večih dreves na nek okoljski dražljaj). S tem

ko vzorčimo na različnih rastiščih pa izničimo vpliv nezaželenih okoljskih dejavnikov in poudarimo tistega, ki je predmet naše raziskave (npr. klimatske spremembe).

5 Omejitve dendrokronologije

Vsaka raziskovalna metoda ima svoje slabosti in omejitve in tudi dendrokronologija jih ima nekaj in le-te postanejo še toliko bolj pomembne, ko moramo za naročnike opraviti dendrokronološko analizo.. Naštete so samo najbolj bistvene in prav je, da se z njimi seznanijo tudi potencialni naročniki dendrokronoloških storitev:

1. **na vzorcu mora biti dovolj branik**

dendrokronologija temelji na optičnem primerjanju vzorca zaporedij širin branik in na izračunanih statističnih kazalcih; zaradi obeh načinov dela in primerne natančnosti mora imeti vzorec za dendrokronološko analizo dovolj branik (najmanj 40) za korektno analizo, če jih nima, dendrokronološka analiza ni korektna. Torej, ko vam stranka prinese v laboratorij košček lesa za datacijo, ji razložitev čem je problem in ji povejte, da je za dendrokronološko analizo potrebno odvzeti vzorec na ustrezen način.

2. **les mora biti primerno ohranjen**

to je ena od pomembnejših omejitev dendrokronologije, če les ni primerno ohranjen potem je priprava površine za merjenje močno otežene ali celo onemogočena. Največje probleme nam povzročajo glive in žuželke, ki razkrajajo les. Primerno izobražen dendrokronolog lahko že na terenu izloči tiste vzorce, ki niso primerni za dendrokronološko analizo

3. **les ne sme prihajati iz tropskih ali subtropskih predelov**

drevesa zmernih klimatskih con vsako leto prirastejo eno braniko, to pomeni, da dendrokronološke analize ne moremo opraviti, če se koledarska leta ne ujemajo z letnimi prirastki. Tako na primer drevesa, ki rastejo v tropih ne oblikujejo branik, ki bi bile kakorkoli povezane s koledarskimi leti. Drevesa, ki rastejo v območjih monsunov (tipično mokro in suho obdobje) sicer tvorijo branike, problem je le v tem, da te branike niso vezane na eno koledarsko leto. Šele drevesa, ki rastejo v območjih zmerne do hladne klime tvorijo prave branike. V teh območjih rast prekine hladno obdobje, ko kambijeve aktivnosti ni.

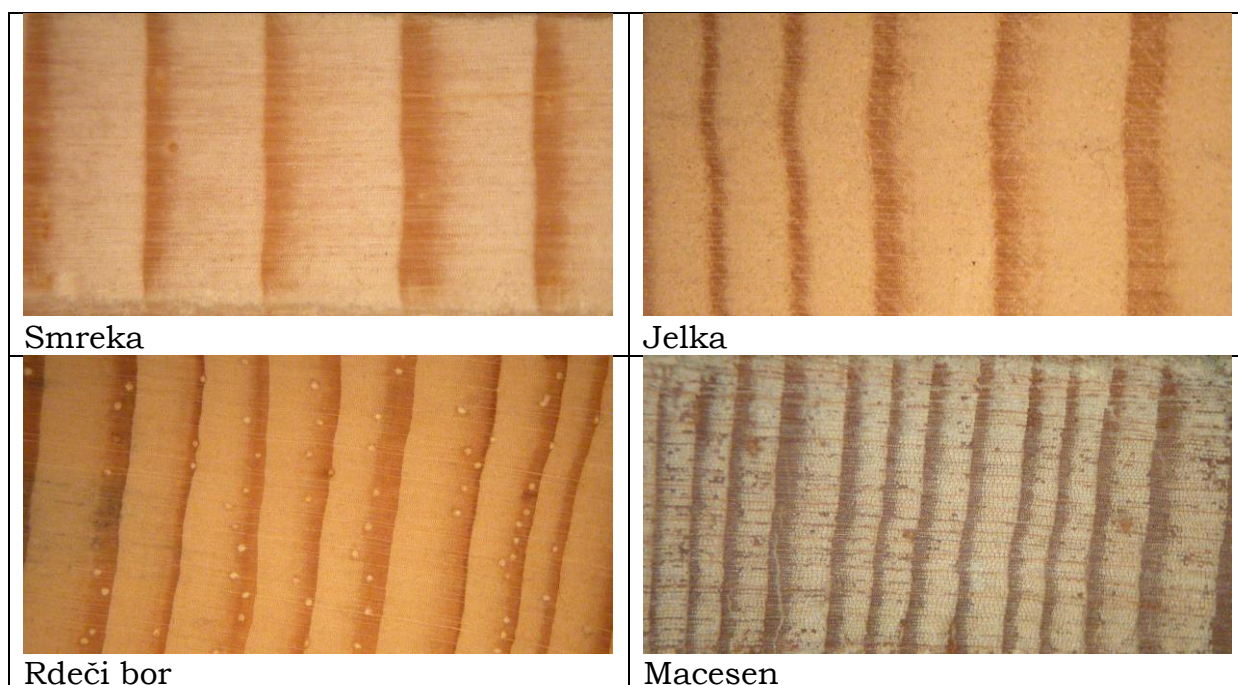
4. **imeti moramo kronologijo za določeno drevesno vrsto**

datiranje lesenega vzorca neznane starosti je možno le če imamo na razpolago primerno kronologijo za datiranje. V Evropi in S Ameriki imamo za večino najpomembnejših drevesnih vrst izdelane primerno dolge kronologije, če v kakšni leseni konstrukciji najdemo lesno vrsto za katero nimamo primerne kronologije potem skušamo vzorec datirati s kronologijo sorodne drevesne vrste - to imenujemo **heterokonekcija**. V primeru pa, ko za datiranje uporabimo kronologije iste vrste vendar z oddaljenega območja takšno datiranje imenujemo **telekonekcija** ali datiranje z oddaljenimi kronologijami.

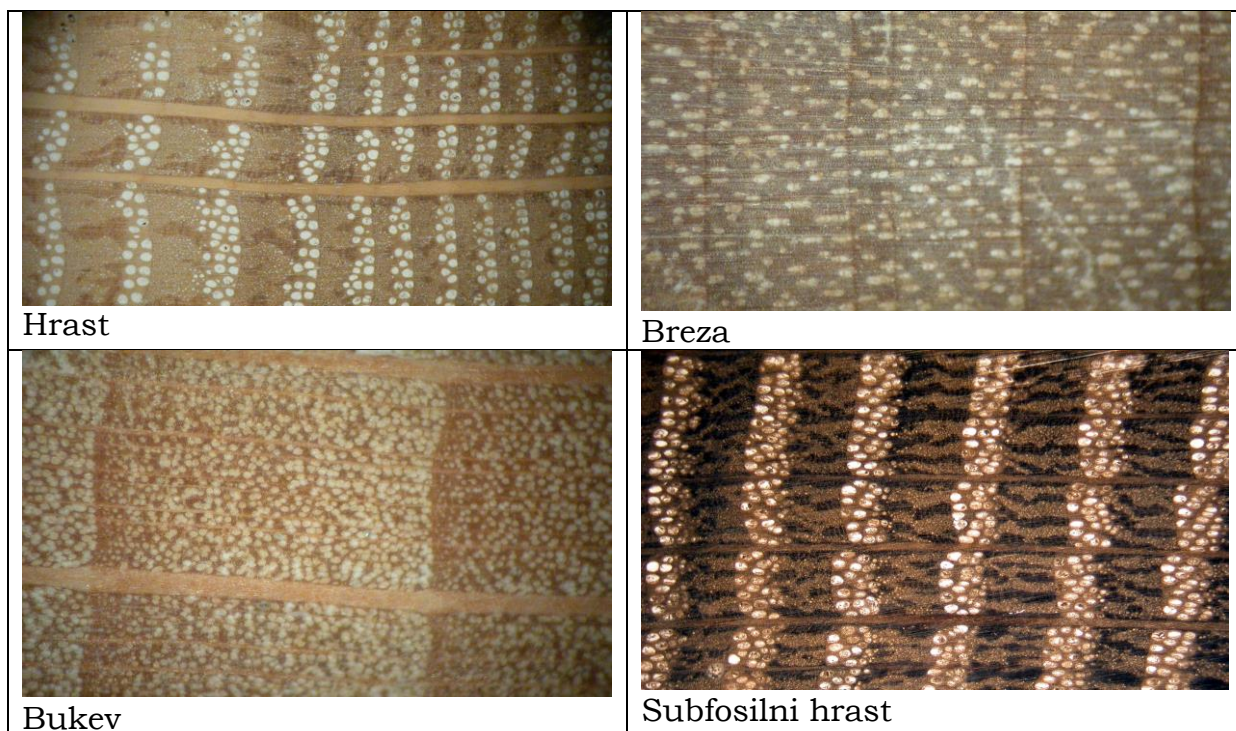
6 Drevesne vrste v dendrokronologiji

Pri dendrokronoloških analizah se srečujemo s precej širokim naborom različnih drevesnih vrst zato spada prepoznavanje drevesnih vrst po lesu med osnovne postopke vsake dendrokronološke analize. Prepoznavanje drevesne vrste na osnovi lesa se lahko opravi na makroskopskem nivoju, kjer opazujemo strukturo, teksturo in barvo lesa ter si pri tem pomagamo z lupo ali na mikroskopskem nivoju kjer na lesno anatomskem preparatu in s pomočjo ključa za določanje lesnih vrst prepoznamo neznano lesno vrsto. Za pripravo lesno anatomskih preparatov potrebujemo primerno opremljen lesno-anatomski laboratorij.

Drevesne vrste delimo na iglavce in listavce, listavce pa še naprej v skupino venčastoporoznih in difuznoporoznih listavcev. Lesovi vsake od omenjenih skupin imajo, z vidika dendrokronologije, dobre in slabe lastnosti. Zaradi narave nastanka branike imajo iglavci daleč najbolj vidne branike, slabost pa je da branika v določenih okoljskih razmerah in pri slabi vitalnosti drevesa preprosto izostane. Tudi venčastoporozni listavci (hrast, brest, jesen...) imajo lepo vidne branike in dobro lastnost, da zaradi fizioloških razlogov branika sploh ne more manjkati, lahko pa je široka le eno do dve traheji, kar močno oteži vidljivost. Skupina difuznoporoznih listavcev je zelo pestra in obsega številne drevesne vrste (bukev, breza, beli in črni gaber, lipa, oljka...) z zelo homogeno zgradbo branike. Ravno zaradi tega je ta skupina dreves za dendrokronološko delo najbolj zahtevna, delo pa nam še dodatno otežujejo relativno slaba vidljivost letnic, majhna razlika med ranim in kasnim lesom ter možnost izpada le-teh.



Slika 11: Nekaj najbolj tipičnih lesov iglavcev. Od levo, zgoraj proti desno spodaj si sledijo: smrekovina, jelovina, borovina in macesnovina. V borovini so lepo vidni smolni kanali (bele pikice).



Slika 12: Nekaj najbolj tipičnih lesov listavcev. Od zgoraj, levo proti spodaj, desno si sledijo: venčastoporozna hrastovina, difuznoporozni brezovina in bukovina ter les subfossilnega hrasta, ki je nekaj tisoč let ležal v zakopan v prud in glini reke Drave. Kljub veliki starosti lesa subfossilnega hrasta (preko 3500 let) je struktura lesa lepo ohranjena.

Kakor ni vseeno v kakšnih razmerah je drevo raslo, tudi ni vseeno v kakšnih razmerah se je nahajal vgrajen tram ali potopljeno deblo. Les, ki ga najdemo vgrajenega v objekte ali potopljenega v močvirjih in prodiščih sčasoma spremeni barvo in, subfossilni les, tudi obliko. Z vidika dendrokronologije in prepoznavne lesne vrste to ni problem, dokler je les primerno ohranjen. To v praksi pomeni, da morajo biti branike vidne, mehanska trdnost lesa pa tolikšna da vzorec še nekako obdrži obliko in da se površina vzorca da pripraviti.

Les je izjemno trdoživ naravni material, ki se lahko v ugodnih mikroklimatskih razmerah ohrani več tisoč let dolgo. Za ugodne razmere veljajo tista okolja, kjer je razgradnja lesa močno omejena, takšna okolja so npr. zelo suho podnebje z malo padavinami in nizkimi temperaturami, neprepustne gline, ki kose lesa zalijejo in nepredušno zaprejo, led, ki zamrzne les in ga tako shrani, rečna prodišča, barja,....

Tudi v zgradbah se lahko les ohrani precej dolgo, še posebej če je bila stavba primerno vzdrževana in streha ni puščala. V takšnih razmerah se lahko les ohrani tudi tisoč in več let. Sicer pa ali ste mogoče že kje videli tisoč in več let staro betonsko stavbo?

7 Metode v dendrokronologiji

7.1 Vzorčenje

Načrt vzorčenja in vzorčenje sta prva koraka v dendrokronološki analizi. Vzorčimo lahko živa ali mrtva drevesa, lesena ostrešja, stropove, lesene kipce in različne druge predmete iz lesa. Pri vzorčenju sledimo izreku svetovno znanega švicarskega dendrokronologa Fritza Schweingruberja »nikoli ne vrtaj, če nimaš vprašanja«. V ozadju reka je namreč vedenje o tem, da vrtnanje živo drevo poškoduje in da drevo potrebuje določen čas, da rano preraste, v tem času pa je izpostavljeno napadom gliv, insektov in bakterij. Tudi vzorčenje lesenih konstrukcij in lesenih predmetov naj ne bi bilo stihijsko, ampak skrbno načrtovano, po vrtnanju pa naj bi vse vrtine začepili z ustreznimi mozniki.

Pomen vzorčenja smo v tekstu že večkrat omenili. Shema vzorčenja vedno izhaja iz nekega cilja, ki ga zasleduje raziskovalec. V splošnem bi lahko rekli, da lahko nek vpliv raziskujemo tam, kjer je ta vpliv najbolj izrazit, tako na primer bomo vpliv temperature na rast dreves raziskovali tam, kjer je načeloma dovolj vlage, vendar je temperatura kot eden od dejavnikov za rast drevesa v minimumu - takšna lokacija je na zgornji gozdni meji. Nasprotno pa bi vpliv padavin na širono branike lahko raziskovali na vročih kraških ravninah.

Temeljni princip vzorčenja je torej v tem, da skušamo določene dejavnike izločiti s shemo vzorčenja, tiste pa ki nas zanimajo s shemo vzorčenja poudarimo.

To pomeni, da vedno vzorčimo več dreves (10-20) na relativno omejenem območju (5-7 ha), vedno vzamemo vsaj dva izvrtka na drevo, če se le da poiščemo ekstremne rastne razmere - zgornjo gozdno mejo, termofilna pobočja ali hladne doline. V spodnji preglednici je podan kratek pregled načinov vzorčenja in kaj s tako zastavljenim planom vzorčenja dosežemo.

Preglednica 2: Pomen posameznih strategij vzorčenja

Ukrep	Učinek
dva izvrtka na drevo = dve smeri merjenja na kolotu	z odvzemom dveh izvrtkov na drevo izločimo dejavnik različne širine branike znotraj drevesa. Vse nadaljnje analize delamo na povprečju teh dveh meritev
vrtnanje večih dreves na ploskvi	izničimo učinek morebitnih individualnih posebnosti v rasti drevesa, dobimo povprečno sliko rasti analiziranih dreves na nekem ožjem območju
isto vzorčenje zastavimo na več lokacijah	izognemo se nesrečno izbrani ploskvi na kakšnem zelo specifičnem rastišču, omogočeno je primerjanje povprečij za posamezno rastišče in spremljanje splošnega odziva na opazovan dejavnik (npr. temperaturo).
premik v ekstremne razmere, ven iz povprečja	preveč neizrazite rastne razmere povzročijo "mlačen" odziv drevja na okoljske dejavnike,

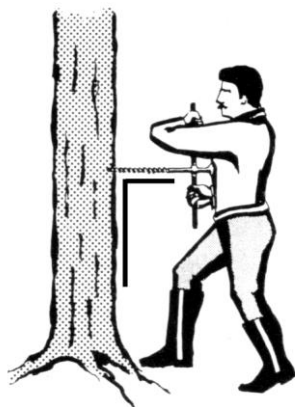
	pogostokrat sploh ne moremo analizirati razlik med posameznimi rastišči, s premikom v bolj izostrene rastne razmere, ekstremna rastišča, se odnos med drevesom in okoljem bistveno bolj izostri in
--	--

Odvzem vzorcev za dendrokronološko analizo je zahtevno in temeljito delo, je temelj na katerem lahko zgradimo ali pa zavozimo dendrokronološko analizo. Zaradi tega je odvzema vzorcev natančen, počasen, težaven in zahteven proces, ki zahteva temeljito pripravo, primerno orodje in izobraženega strokovnjaka.

7.1.1 Vzorci živih dreves

Živa drevesa vzorčimo tako, da s pomočjo prirastoslovnega svedra odvezamo izvrtke iz drevesa. Prirastoslovni sveder je orodje za odvzem izvrtkov iz živih dreves, debelina izvrtka je lahko 4 ali 5 mm, dolžine svedrov pa od 100 mm do 800mm. Zunanji premer prirastoslovnega svedra je 10-12 mm. Poškodba, ki nastane zaradi vrtnja je relativno majhna in se hitro preraste, zato večina dreves ne utrpi prav velike škode.

Izvrtke vedno odvezamo na višini 1,30 m od tal, to je v t.i. »prsni« višini, veliko primerneje pa bi bilo če bi izvrtke jemali nekoliko više, npr. na 4 m. Jemanje vzorcev na tej višini bi zagotovilo vzorce optimalne kvalitete z minimalnim vplivom korenin in krošnje, žal pa bi morali poleg svedra v gozd prinesiti tudi lestev, zato si takega načina vzorčenja ne moremo privoščiti. Odvisno od namena raziskave lahko odvezamo od 1-4 izvrtke na drevo (v praksi največkrat dva). Vrtamo vedno tako, da vzamemo izvrtke pravokotno na padnico terena in pravokotno na vertikalno drevesa.



Slika 13: Odvzem izvrtkov iz živega drevesa. Vrtamo vedno pravokotno na vertikalno drevesa in natančno v sredino drevesa.

Razlogi za tak način vrtnja so fiziološki. Pri drevesih, ki rastejo na neravnem terenu se na deblu pojavi reakcijski les, ki je posledica odziva drevesa na spremembo nagnjenosti debla.

Reakcijski les je aktivno usmerjevalno tkivo anomalne anatomske zgradbe (Torelli 1990) in kot tako ne kaže normalne rastne zakonitosti, zato ni

primerno za splošne dendrokronološke analize. Reakcijskemu lesu se zato skušamo izogniti, obstajajo pa raziskovalna vprašanja kjer lahko pojav reakcijskega lesa koristno uporabimo za rešitev nekega problema (npr. preučevanje nestabilnih tal, seizmike tal ipd.).

Odvzem vzorcev je postopek, ki ga sestavljajo štirje koraki (Slika 14):

1. Izbira mesta za vrtnanje in vrtnanje v drevo,
2. vstavljanje vlečke v sveder,
3. izvlek vlečke z izvrtkom in
4. označitev izvrtka in vstavljanje v plastično cevko za transport.



Slika 14: Odvzem izvrtka s prirastoslovnim svedrom (od levo zgoraj proti desno spodaj): Vrtnanje v drevo, vstavljanje vlečke, izvlek izvrtka, vstavljanje v plastično slamico

Alternativa vrtnanju je odvzem koluta. Kolute dobimo, ko sekajo drevesa. V primerjavi z izvrtkom dobimo s kolutom bistveno več materiala za obdelavo. Slabost kolotov je, da jih zelo redkokdaj dobimo z nižjih delov debla, ponavadi dobimo kolute z višine 4m ali 8 m, zato so zelo primerni za ekološke študije, manj pa za sestavljanje dolgih kronologij.

Tipičen kolut je debel od 5-10 cm, njihova slabost je, da zavzamejo zelo veliko prostora, so precej težki in zaradi tega potrebujemo precej velik skladiščni prostor. Tem težavam se lahko izognemo, če kolute pred analizo

razrežemo na manjše kose, popularno imenovane »napolitanke«. Iz enega koluta s tračno žago izrežemo 2-4 »napolitanke«.

Za potrebe densitometrije in izotopskih analiz potrebujemo bistveno debelejši sveder katerega izvrtki so debeli 12 mm, sam sveder pa skoraj 20 mm. Tehnika vrtanja za potrebe tovrstnih analiz je zahtevna, saj morajo vlakna v izvrtku potekati pravokotno na os debla. Da dosežemo pravi kot si pomagamo s kotomerom. Delo z densitometričnim svedrom je zahtevno in naporno, pogosto sta potrebna dva človeka da sveder sploh prodre v drevo. Zaradi težavnosti je število debelih izvrtkov na dan omejeno na največ 10-15, pri drevesnih vrstah z zelo trdim lesom (npr. bukev, hrast) pa še manj.

7.1.2 Vzorci vgrajenega suhega lesa

Pod »vgrajenim lesom« dendrokronologi razumejo ves les, ki je tako ali drugače vgrajen v različne konstrukcije - ostrešja, pohištvo ali kakšen drug lesen predmet.

Načinov odvzema vzorcev vgrajenega lesa je veliko, v grobem jih delimo na nedestruktivne in destruktivne. V prvem primeru nekoliko poškodujemo lesen predmet, vendar le ta ni uničen, v drugem primeru pa zaradi vzorčenja predmet popolnoma uničimo. Kadar moramo narediti dendrokronološko analizo dragocenega lesenega predmeta, npr. Stradivarijeve violine, sarkofaga egiptovskega faraona ali dragocenega starega pohištva, takrat moramo uporabiti tehniko brezkontaktnega način vzorčenja. Z uporabo te tehnike se predmeta sploh ne dotaknemo le branike na površini predmeta posnamemo z video kamero opremljeno z zmogljivim makro objektivom, širine branik pa kasneje izmerimo s pomočjo specializiranega programa za analizo slike.

Klasično, nedestruktivno vzorčenje opravljamo s posebnim dendrokronološkim svedrom. Če pri živih drevesih uporabimo nekoliko tanjši, 12mm sveder, moramo za vzorce suhega lesa uporabiti nekoliko debelejši 20 mm sveder, razlog za uporabo debelejšega svedra je v velikih silah, ki delujejo na vzorec pri vrtanju z električno vrtalko in v dejstvu, da je periferija lesenih delov dostikrat v zelo slabem stanju in bi se tanjši vzorci zdrobili. S svedrom za »suh les« vrtamo velike lesene konstrukcije. Po odvzemu vzorca se mehanska trdnost konstrukcije ne spremeni in ni nobene nevarnosti, da bi se lesena konstrukcija podrla. Luknjo, ki nastane po vrtanju pa običajno zapolnimo z lesnim moznikom.



Slika 15: Odvzem vzorcev suhega lesa (shematsko in »v živo«).

Pri jemanju vzorcev vgrajenega lesa je potrebno voditi načrt odvzema vzorcev. To storimo tako, da preden začnemo vzorčiti narišemo shemo konstrukcije, nato pa med delom označujemo mesta odvzema vzorcev. Shema vzorčenja je potrebna zato, da lahko kasneje s pomočjo datiranja določimo morebitne gradbene faze na analiziranem objektu.

7.1.3 Vzorčenje mokrega lesa

Moker les spada med najzahtevnejše vzorce. Pod pojmom »moker les« razumemo dendrokronologi les, ki je bil dalj časa namočen v vodi, zakopan v barjih, prodiščih, v strugah rek ali na dnu morja. Značilno za moker les je zelo velika vsebnost vode in močno spremenjenje kemijske, fizikalne in mehanske lastnosti. Moker les se močno krči, kemijska zgradba celične stene je močno spremenjena, mehanske lastnosti pa komaj primerljive z enakim lesom iz sedanosti. Vzorce mokrega lesa dobimo takrat, ko arheologi opravljajo izkopavanja na barjih, ko gradbeniki v zalitih gramoznicah izkopljejo subfosilne hraste ali ko reke odnesejo del brežine in razkrijejo pred davnimi leti zakopana debla. Pri delu z mokrim lesom moramo paziti predvsem na to da se ne posuši. To dosežemo tako, da ga takoj ob odvzemu shranimo v plastičnih vrečkah napolnjenih z vodo.

7.1.4 Vzorca oglja

Včasih se zgodi, da arheologi pri svojem delu najdejo veliko ostankov oglja in jih zanima koliko je oglje staro. Starost lahko ugotovijo s pomočjo datiranja z radioaktivnim ogljikom ^{14}C , lahko pa tudi s pomočjo dendrokronoloških metod.

Oglje je samo po sebi zelo krhko, zato agresivne oblike obdelave, kot je brušenje in odrezovanje, ne pridejo v poštev. Kosi oglja so večinoma tudi relativno majhni, zato uporabimo zelo preproste, a učinkovite tehnike lomljenja oglja. Ko oglje razlomimo so lomi zelo čisti in svetleči, nobene druge dodatne tehnike ni potrebno uporabiti za pripravo vzorca. Kljub vsemu pa je dobro metodologijo nekoliko preizkusiti na nepomembnih vzorcih oglja iz trgovine in šele nato naše znanje preizkusiti na pravih vzorcih.

Če vse drugo odpove je koristna tudi tehnika nežnega brušenja pod tekočo vodo z zelo finimi brusnimi papirji (gradacija 800 in več).

7.2 Priprava vzorcev

Priprava vzorcev je, podobno kot odvzem vzorcev in način vzorčenja, ključnega pomena za uspešno dendrokronološko analizo. Pri tem velja takoj na začetku zapisati »če ne vidim ene same branike je vseeno, če se merjenja sploh ne lotim«. To pomeni, da mora biti površina analiziranega vzorca tako dobro pripravljena, da med merjenja niti enkrat ne pridemo v situacijo, ko branike zaradi slabe priprave površine ne moremo prepoznati. Slabo pripravljena površina vzorca vpliva na kvaliteto meritve, na zmožnost kasnejšega datiranja, posredno vpliva pa tudi na ugled laboratorija in s tem količino dela, ki ga takšnemu laboratoriju zaupajo.

Površina izvrtka ali koluta je brez predhodne priprave pregroba za kakršnokoli resno dendrokronološko delo, zato moramo površino pred merjenjem ustrezno pripraviti. Priprave površine vzorca se v različnih laboratorijih lotevajo na različne načine. Največkrat se srečamo z rezanjem oz. odrezovanjem površine s skalpeli, britvicami in različnimi tapetniškimi noži. Zelo pogosto se uporablja za pripravo površine tudi brušenje v kombinaciji s krožno ali tračno žago.

7.2.1 Odrezovanje z ostrimi rezili

Tehnika obdelave vzorcev z ostrimi rezili je najstarejša preparativna tehnika v dendrokronologiji. Odlikuje jo enostavnost in nizka cena potrošnega materiala. Za odrezovanje uporabljamo ostra dleta, tapetniške nože, skalpele in britvice vpete v posebna držala. S to tehniko uspešno pripravljamo površino izvrtkov, deloma pa tudi kolotov. V primerjavi z brušenjem je površina bistveno bolj neravna in ni primerna za skeniranje in kasnejšo analizo slike. Prednosti metode je v njeni cenenosti in enostavnosti, lahko jo uporabljamo na terenu še posebej če potrebujemo hitro oceno starosti drevesa ali ritma priraščanja. Pri nekaterih drevesnih vrstah z odrezovanjem dosežemo bistveno bolj vidno površino izvrtka kot z brušenjem (npr. pri brezi). Pri odrezovanju površine vzorca, držimo rezilo pod kotom 45 stopinj na smer stržen-skorja. Na ta način preprečimo trganje sten traheid. Za odrezovanje vedno uporabljamo ostra rezila !

7.2.2 Brušenje

Postopkov priprave vzorca je več, odvisno pač od tega za kakšen vzorec gre. V praksi se najpogosteje srečujemo z izvrtki in koluti živih dreves, z izvrtki ali odrezki iz lesenih ostrešij in konstrukcij ter s t.i. mokrim lesom. V nadaljevanju si bomo ogledali postopke priprave vzorcev z brušenjem za vse tri omenjene skupine.

7.2.2.1 Izvrtki živih dreves

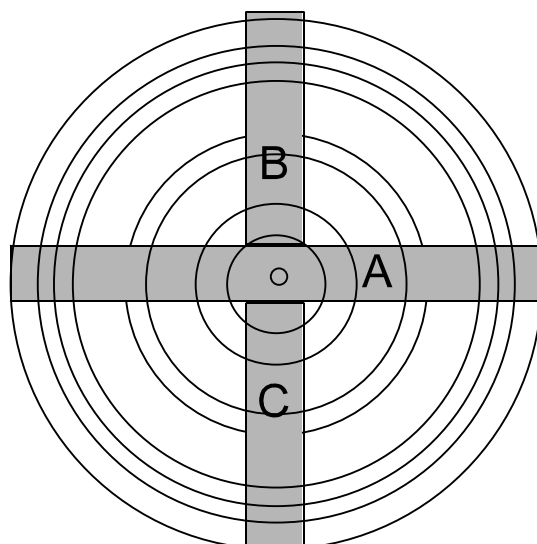
1. Izvrtke takoj po odvzemu vstavimo v plastične slamice, jih označimo s šifro, vrhove slamice zalepimo z lepilnim trkom in varno shranimo v nahrbtnik ali torbo.

2. Ko jih prinesemo v laboratorij jih damo kar se da hitro sušiti. Če vzorci predolgo ostanejo v zaprtih plastičnih slamicah nam lahko splesnijo. Za sušenje uporabimo valovit karton, ker izvirki zelo lepo sedejo vanj. Vsak izvirtek označimo s šifro, ki nam omogoča identifikacijo vzorca.
3. Vzorce sušimo v kartonu 3-4 dni
4. Suhe vzorce zalepimo v lesene nosilce, pri tem uporabljamo hitro sušeče polivinil-acetatno lepilo (npr. Mekol Plus, Rakol, Ponal...).
5. Pri lepljenju vzorcev v lesene nosilce je potrebno paziti na pravilno orientacijo izvrtka. Izvrtke je pravilno orientiran takrat, ko je prečni prerez izvrtka zgoraj in ko vlakna na preseku izvrtka potekajo vertikalno. Velikokrat si pomagamo tudi z lastnostjo lesa, da se v radialni smeri potekajoči strženovi trakovi nekoliko svetlikajo, če izvrtke vrtimo na svetlobi. Ta odblesk na potem pomaga, da pravilno orientiramo in zalepimo izvirtek v lesen nosilec.
6. Ko se lepilo posuši, vzorce odnesemo v brusilnico in zbrusimo.
7. Za brušenje uporabimo brusne trakove vsaj dveh zrnatosti 180 in 360, po potrebi pa tudi 500*. Izvirtek je ustrezno zbrušeno, ko z lupo na površini izvrtka ne vidimo več raz od brusnega traku in ko so jasno vidne posamezne celice prečnega prereza debela.

7.2.2.2 Koluti

1. Kolut ustrezno označimo že na terenu
2. Ko ga dostavimo v laboratorij, ga je potrebno najprej površinsko osušiti kar traja do vsaj 14 dni.
3. Glede na namen raziskave, predvsem pa zaradi velike teže kolutov, kolute ponavadi razžagamo na manjše, ustrezno izbrane sekcije, ki jih v žargonu imenujemo »napolitanke«
4. Tako narezane vzorce odnesemo v brusilnico, kjer jih zbrusimo z brusnimi trakovi zrnatosti 100, 180, 360 in po potrebi 500*. Kolut je ustrezno zbrušeno, ko z lupo ne vidimo več raz brusnega traku in ko so jasno vidne posamezne celice prečnega prereza debela.

* OPOZORILO: Brusni trakovi so sestavljeni iz brusnega sredstva, ki bi lahko bil karcinogen, ravno tako je po vsej verjetnosti karcinogen tudi lesni prah – zato pri delu VEDNO uporabljajte zaščitna sredstva.



Slika 16: Eden od najbolj tipičnih razrezov koluta na tračni žagi. Najprej izrežemo celoten vzorec A, nato pa še stranska vzorca B in C. Vzorca B in C ne vsebujeta stržena.

7.2.2.3 Vgrajen les

Metodologija priprave vzorcev vgrajenega lesa je močno podobna pripravi izvrtkov in kolotov živih dreves. Vzorce v večini primerov pripravimo tako, da površino obrusimo s brusnimi trakovi različne zrnatosti. Začnemo z bolj grobimi trakovi in končamo z najbolj finimi. Pri obdelavi vzorcev vgrajenega lesa moramo biti pazljivi, ker so ponavadi v relativno slabem stanju in radi razpadejo.

7.2.2.4 Moker les

Delo z vzorci mokrega lesa je izjemno zahtevno, saj moramo les pred pripravo zamrzniti, za to pa potrebujemo ustrezno hladilno opremo in prostor za shranjevanje mokrih vzorcev.

1. Po odvzemu vzorec označimo in takoj shranimo v plastično vrečko v katero dodamo nekaj vode in vrečko dobro zapremo ter prenesemo v laboratorij
2. V laboratoriju vzorce 48 ure pred pripravo zmrznemo na -25°C .
3. Površino zmrznjenih vzorcev obdelamo s skalpelom in šele nato pustimo vzorec na sobni temperaturi, da se odtaja. Vzorce moramo potem izmeriti v roku 12-24 ur, sicer se bo vzorec preveč osušil, se posledično skrčil in začel razpadati.
4. Vzorce po končanem merjenju vrnemo v vrečke z vodo, nepredušno zapremo in shranimo v primerno hladnem skladišču. Tako shranjeni vzorci zdržijo kar nekaj let, še posebej če jih hranimo v temi (ker sicer plastika na sončni svetlobi začne razpadati).

Posebna oblika mokrega lesa so vzorci, ki so bili sicer najdeni v mokrem stanju, vendar zaradi različnih razlogov (ponavadi starosti), celoten vzorec še ni enakomerno prepojen z vodo, niti ni enakomerno »zmehčan« na celotnem prerezu. Pri takih vzorcih bi načeloma lahko uporabili tehniko zamrzovanja, vendar se to ne izkaže za preveč uporaben pristop. Pri takšnih

vzorcih zadošča že, če vzorcu vzdržujemo primerno vlažnost in se površine lotimo z odrezovanjem z ostrimi rezili, največkrat čisto navadnimi britvicami. Pomembno je da uporabimo primerno ostro britvico in da vedno začnemo z odrezovanjem na tisti strani vzorca, kjer je najmehkejši les (periferija).

Sicer pa velja pravilo, da tehniko vzorčenja vedno prilagodimo objektu vzorčenja in njegovemu stanju, zato moramo biti pri delu velikokrat iznajdljivi. Nahajališč lesa je veliko, najdemo ga v rečnih koritih, barjih in drugod v naravi, veliko lesa je vgrajenega v ostrešja, stropove in temelje velikih objektov kot so npr. cerkve, srednjeveška obzidja in podobno. Veliko lesa se nahaja tudi pod vodo npr. kolišča, potopljene ladje, drevaki in podobno, zato mora dendrokronolog poleg osnovnega dendrokronološkega znanja obvladati tudi druga specialna znanja kot je na primer potapljanje ali čisto preprosto plezanje po lestvah saj je včasih potrebno vzeti vzorec cerkvenega stropa tudi 25 m nad tlemi.

7.3 Problem ohranjenosti periferije vzorcev in predhodna raba lesa

Dendrokronolog se pri svojem delu srečuje z različno ohranjenimi vzorci. Nekateri vzorci so čvrsti in popolni od stržena do zadnje branike pod skorjo. Takšni so v večini primerov vzorci, ki jih odvezamo iz živih dreves. Povsem drugačna pa je situacija pri vzorčenju suhega in arheološkega lesa, ti vzorci so vedno bolj ali manj poškodovani. To dejstvo je skoraj vsakodnevna praksa dendrokronologov, ki delajo v starih objektih, z mokrim ali subfosilnim lesom. Zaradi tega mora dendrokronolog vzorec pred analizo skrbno pregledati in zabeležiti prisotnost skorje in terminalne branike ali po nemško Waldkante.

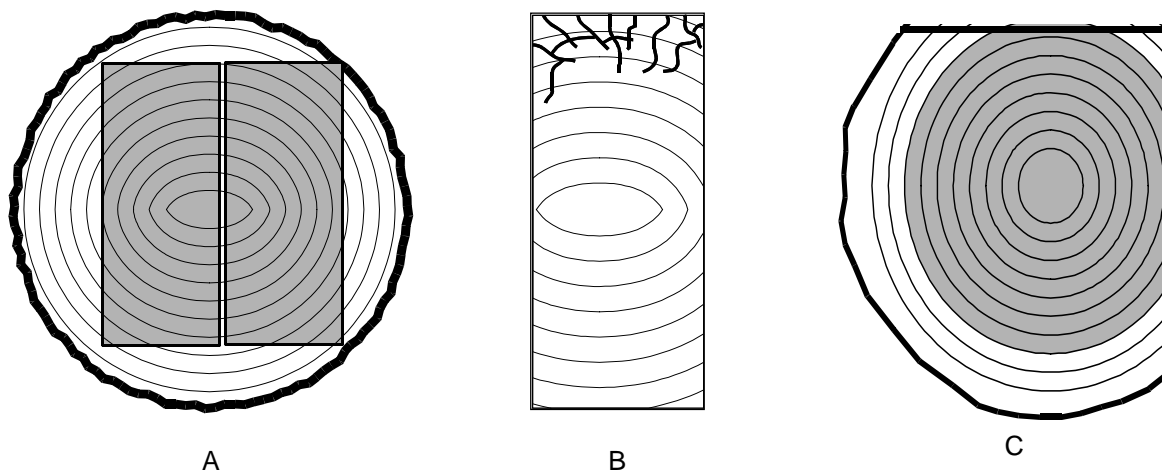
Terminalna branika je zadnja branika, ki je nastala pred posekom drevesa in se je ob poseku nahajala tik pod skorjo. Terminalna branika, če je seveda prisotna, s svojimi značilnostmi nakazuje kdaj je bilo drevo posekano. Če je prisoten samo rani les potem sklepamo, da je bilo drevo posekano med aprilom in julijem, če pa je prisoten tudi kasni les pa je bilo drevo posekano nekje od avgusta dalje.

Prisotnost terminalne branike da močno izboljša natančnost dendrokronološke analize. Ko dendrokronološko datiramo neznan lesen vzorec vsaki analizirani braniki določimo v katerem letu je nastala. Z določitvijo leta njenega nastanka ugotovimo leto poseka drevesa, in tako vemo, da preučevani objekt ni mogel biti zgrajen ali obnovljen pred tem letom. Prisotnost terminalne branike je zaželena zato ker nam omogoča določitev starosti objekta skoraj na leto natančno, vendar se pri dendrokronoloških analizah starih objektov z njo le redkokdaj srečamo, ker ponavadi iz takšnega ali drugačnega vzroka manjka. Najpomembnejši vzroki za to so:

- Tramovi so bili tesani na oster rob. Za tak tram so potrebovali deblo z bistveno večjim premerom, zato je bila terminalna branika odstranjena (slika 12 - A).
- Terminalna branika je zunanja in hkrati tudi najbolj izpostavljena branika, zato je pogosto prepredena z rovi larv ali razkrojena od gliv -

zaradi tega se pri vrtnanju zelo rada zdrobi in zaradi pritiska svedra odpade (slika 12 - B).

- Deblo so pred vgradnjo delno obtesali, neobtesan del pa obrnili proti zidu, da dostop z dendrokronološkim svedrom ni mogoč (slika 12 - C).
- Zaradi slabih mehanskih lastnosti in občutljivosti za napade insektov so beljavo pred vgradnjo s tesarkami odstranili in s tem izboljšali trajnost lesa (slika 12-C).



Slika 17: Trije najpogostejši vzroki za odsotnost terminalne branike: A - tramo je ostrorob in je izrezan iz hloda večjega premera, B - periferija trama je prepredena z rovi larv in zaradi tega krhka - pri vrtnanju se zato največkrat zdrobi, C - tramo je delno obtesan, beljava in z njo terminalna branika pa na določenih mestih odstranjena.

Odsotnost terminalne branice pomeni, da natančnega datuma postavitve objekta ne bomo mogli določiti. Napaka v tem primeru je lahko znatna, variira pa od nekaj let pri hitro rastočih drevesnih vrstah do nekaj deset let pri počasi rastočih drevesnih vrstah. Tako na primer s tesarko pri hitro rastočem hrastu odstranimo branice beljave (5-20 branik), medtem ko pri počasi rastočem macesnu z visokogorskih rastišč samo z rahlim obtesovanjem odstranimo tudi do 60 branik.

Napaka ki je zaradi obdelave lesa pred vgradnjo nujna, onemogoča natančno določitev datuma postavitve nekega objekta, zato je zelo priporočljivo, da v konstrukcijah najdemo vsaj en tramo s terminalno braniko, ker bo to znatno izboljšalo natančnost datacije objekta.

Dendrokronološka datacija zato v večini primerov datiranja objekta določi nekoliko večjo starost objekta kot to piše v pisnih virih, hkrati pa je ugotovljeno leto najzgodnejše možno leto postavitve objekta.

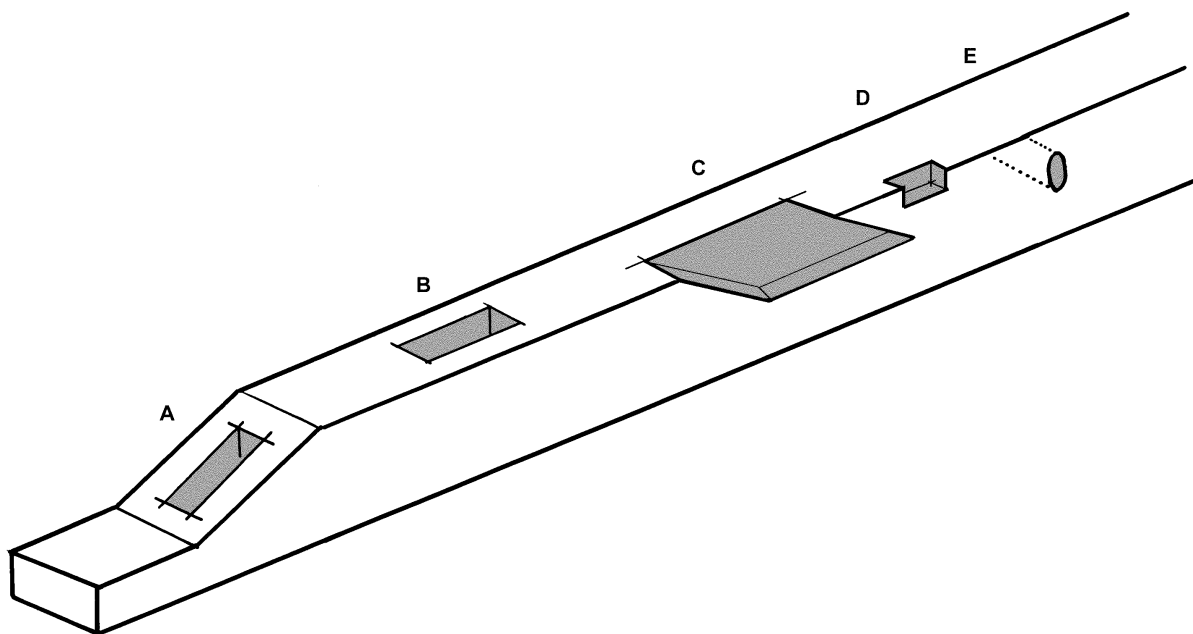
V dendrokronološki praksi, še posebej pa pri dendrokronološki analizi lesenih konstrukcij se velikokrat srečamo s t.i. znaki predhodne rabe lesa. Ti znaki, večinoma gre za različne utore, zaseke in luknje, nam nakazujejo, da je bil konstrukcijski element že nekje uporabljen v novi konstrukciji pa je dobil novo vlogo in obstoječi utori in zaseke ne opravljajo več nobene funkcije. Ko na konstrukciji opazimo takšne znake to lahko pomeni dvoje – (1) da je bil les morda kupljen na trgu rabljenega lesa ali pa (2) da je bil

element sicer že vgrajen v obstoječo konstrukcijo, vendar so po neki večji rekonstrukciji element morda zasukali ali pa prestavili na novo mesto.

Pri vrednotenju znakov ponovne rabe se moramo zavedati dejstva, da je bil les v preteklosti cenjena in težko dostopna surovina, zato so les iz velikih stavb velikokrat prodali na borzah rabljenega lesa in nekdo drug pa ga je ponovno uporabil pri postavitvi kakšnega manjšega objekta. Tako se dendrokronolog znajde pred zelo težkim problemom. Z dendrokronološko datacijo lahko relativno brez težav določimo starost nekega lesenega dela, problem pa je da ugotovljena starost ni nujno tudi dejanska starost raziskanega objekta, ampak nekega drugega, neznanega objekta.

Zaradi tega moramo biti pri interpretaciji datacije elementov z znaki predhodne rabe izjemno previdni, ker nas rezultati lahko zavedejo in se zmotimo v določitvi prave starosti objekta.

Pravilna identifikacija znakov predhodne rabe nam omogoča pravilno datiranje objekta, zato je pred odvzemom vzorca za dendrokronološko datiranje potrebno vsak analizirani tram natančno pregledati in zabeležiti prisotnost znakov predhodne rabe.



Slika 18: Štirje najbolj tipični znaki predhodne rabe lesa. A, B – različni tesarski utori, C, D – dve najbolj tipični obliki zaseka in E - luknja za lesen mozničnik.

7.4 Merjenje & kontrola meritev

7.4.1 Ročno merjenje

Kljub precejšnjemu razvoju računalniške in merilne tehnike se vedno znova pojavlja potreba po čisto navadnem ročnem merjenju širine branik. Ročno merjenje je merjenje z merilno lupo, svinčnikom in papirjem, velikokrat si pomagamo tudi s tanko jekleno iglo.

Ročno merjenje uporabimo tam, kjer z drugimi merilnimi tehnikami ne pridemo blizu ali pa predmeta ne smemo poškodovati. Takšno merjenje uporabimo npr. pri merjenju širin branik na Stradivarijevih violina, Rembrandtovih lesenih slikah ali na kakršnemkoli lesenem predmetu zelo velike vrednosti.



Slika 19: Pred merjenjem vzorec v skladu z navodili restavratorja rahlo obrežemo in ga tako pripravimo za merjenje. Rob smo obrezali na mestu, ki je bil zakrit z letvicami (leva slika). Merjenje z merilno lupo poteka na desni sliki.

Ročno merjenje ne poškoduje objekta merjenja vendar je merjenje relativno zahtevno in ni tako natančno kot merjenje z merilno mizico in s pomočjo binokularne lupe.

Zaradi problematične preverljivosti meritev in počasnosti ter zaradi nujnega dela v parih (merilec in zapisovalec) so na dunajskem inštitutu za arheologijo (VIAS) razvili pol avtomatsko, brezkontaktno merilno napravo, ki v celoti nadomesti ročno merjenje z lupo. Inštrument temelji na video kameri z makro objektivom, povezavi z računalnikom in programskem paketu PAST-4. Z inštrumentom so zanesljivo, ponovljivo in brez poškodb izmerili veliko število egipčanskih sarkofagov v različnih muzejih.

7.4.2 Merjenje z merilno mizico

Merjenje z merilno mizico je klasičen način merjenja širin branik. Merilna mizica je inštrument kjer se mizica z vzorcem s pomočjo vijaka premika naprej in nazaj. Mizico premikamo tako da z ročico vrtimo vijak in tako vrtenje pretvarjamo v premikanje. Vrtenje vijaka zaznava rotacijski enkoder, ki vrtenje pretvori v dolžino. Zaradi velike natančnosti pretvorbe so rotacijski enkoderji sposobni zaznati premik dolg samo 1 tisočinko milimetra ali manj. Rotacijski enkoder je preko AD pretvornika povezan z računalnikom, ki podatke o premiku beleži v datoteko.

Na tržišču je na voljo več merilnih mizic, med najbolj znanimi so LINTAB (www.rinntech.com), VELMEX (www.velmex.com) in PAST (www.sciem.com). Merilni mizici LINTAB in SCIEM sta se najbolj uveljavili v Evropi, VELMEX pa v Ameriki. Od naštetih merilnih mizic velja VELMEX za najcenejšega.



Slika 20: Merilna mizica LINTAB – tipična predstavnica modernih ročnih merilnih miz.

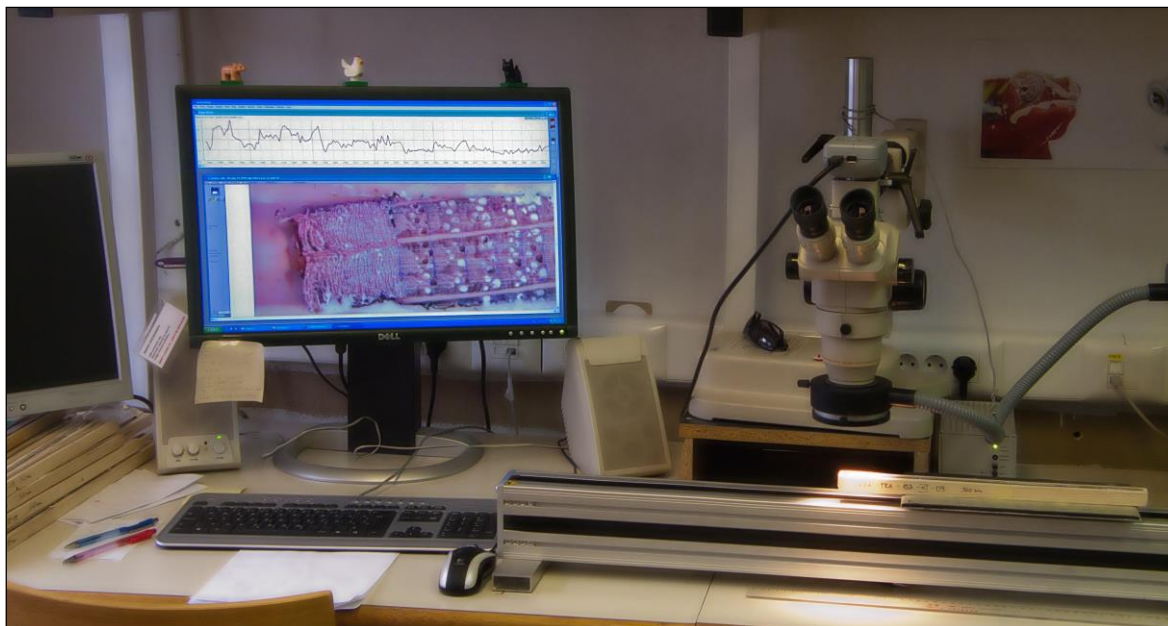
Merilna mizica sama po sebi ne zadošča za merjenje širin branik, za vzpostavitev popolnega sistema potrebujemo še binokularno lupo in osebni računalnik – več o tem glej v kasnejših poglavjih.

7.4.3 Avtomatsko prepoznavanje branik in merjenje širine branik

Z razvoj računalniško podprte analize slike se je analiza slike začela uveljavljati tudi v dendrokronologiji. S pomočjo kanadskega izdelka WINDEDNRO se da relativno enostavno prepoznavati branike iglavcev in zabeležiti njihovo širino. Avtorji programa WINDEDNRO so naredili še korak dlje in programu dodali možnost prepoznavanja gostotnih profilov v branikah ter ranega in kasnega les in s tem postavili temelj za avtomatizirano densitometrijo. Za delo s programom WINDENDRO potrebujemo nekoliko boljši skener z ustrezno ločljivost (600 DPI in več) ter dokaj zmogljiv osebni računalnik, ki mora biti prilagojen za delo z velikimi grafičnimi datotekami. Skenograme v TIFF obliki odpremo v programu WINDENDRO in s pomočjo avtomatiziranega postopka prepoznamo letnic (meje med branikami). Program omogoča enostavno popravljanje napačnih prepoznav ter omogoča dodajanje, premikanje in brisanje letnic. Pri iglavcih z ne preveč ozkimi branikami ga odlikuje tudi velika natančnost >95%, tako da je ročnih posegov relativno malo. Pri vzorcih z ožjimi branikami pa je stopnja natančnosti nekoliko nižja, potrebno pa je tudi večje število ročnih posegov. Kljub temu, da WINDENDRO ni uporaben za delo z listavci pa lahko z ročnim dodajanjem mej med branikami relativno enostavno merimo tudi večino lesov listavcev. Najhitrejši pa tak pristop seveda ni.

Slabost merjenja širin branik na ekranu je v prvi vrsti povezana s skenerjem. Skener sam po sebi slike prav nič ne poveča in ne glede na dejstvo, da smo sliko poskenirali z ločljivostjo 1200 DPI ali več, razen zelo velike datoteke ne dobimo nič boljše slike ko jo začnemo programsko povečevati, zato imam program pri prepoznavanju ozkih branik nemalo težav.

Zato smo razvili in patentirali sistem ATRICS (Levanič 2007). ATRICS je sistem, ki odpravlja slabosti skenerja, saj za zajem slike uporablja zelo kvalitetno video kamero (ločljivosti 1280 x 1280) in optično lupo, ki sliko tudi dejansko, ne samo optično poveča. Delovanje ATRICS-a nadzoruje računalniški program, ki sinhronizira delovanje video kamere in merilne mizice. ATRICS deluje po naslednjem principu - digitalna video kamera na ukaz iz računalnika zajame sliko, mizica pa se premakne za določen korak, ta postopek se ponavlja toliko časa, da je preskeniran celoten vzorec. V naslednjem koraku nato računalnik iz velikega števila delnih slik sestavi eno sliko - sliko vzorca. Ta slika se nato obdela v programu WinDENDRO. Delo s sistemom ATRICS ima kar nekaj prednosti pred ročnim merjenjem. Ročno merjenje poteka tako, da moramo v enem koraku izmeriti vse branike na vzorcu, kar ni problematično, če gre za enostaven vzorec. Pri kompleksnem vzorcu s problematičnimi branikami pa je ročno merjenje zamudno in vsaka napaka pri meritvi je lahko vzrok za ponavljanje celotne meritve. Tega pri sistemu ATRICS / WinDENDRO ni. Ker je vzorec v obliki slike shranjen v računalniku se lahko kadarkoli vrnemo na »problematičen« del vzorca, kaj dodamo, zberemo ali popravimo in nove podatke shranimo nazaj v datoteko. Merilnih napak, ki bi nastale zaradi ponavljanja merjenja v tem primeru ni.



Slika 21: Sistem ATRICS, na ekranu je viden program WinDENDRO.

7.5 Vizualna primerjava / sinhronizacija / datacija / podaljševanje kronologij

7.5.1 Konstrukcija grafa odvisnosti širine branike od časa

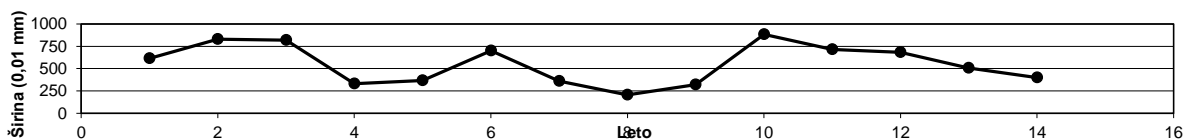
Vizualna primerjava spreminjanja širin branik v času spada med klasične dendrokronološke tehnike in je poleg metode "skeleton plot" najstarejša metoda za ogled, primerjavo, sinhronizacijo, datacijo in spajanje kronologij. Konstrukcija grafa je relativno enostavna. Izmerjene podatke uredimo v dvo-kolonsko tabelo. V prvo koloni zapišemo zaporedno številko branike v drugo pa izmerjeno širino branike. Na milimetrski papir na X osi nanizamo številke branik od najmanjše do največje. Pri tem upoštevamo tudi v kateri smeri smo odčitavali širine branik. Če smo to počeli od skorje proti strženu, začnemo z risanjem krivulje na desni strani in se pomikamo proti levemu robu papirja, če pa smo začeli z meritvami v strženu in se pomikali proti skorji začnemo z risanjem na levi strani papirja in se pomikamo proti desni strani.

Razdalje med posameznimi leti na X osi so konstantne in jih določimo vnaprej npr. 1 leto = 5mm.

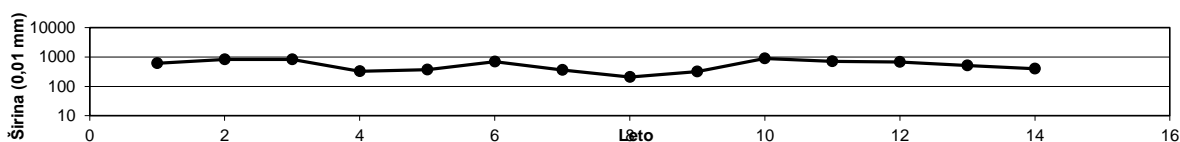
Podatek za širino branike v posameznem letu nanašamo na Y-os. Y os lahko prikažemo na logaritemski ali pa na navadni skali. Kadar je rast analiziranega drevesa zelo senzitivna z velikimi odstopanji proti širokim in ozkim branikam, potem je izbira logaritemskega prikaza, ki optično nekoliko "poveča" ozke in nekoliko "potlači" zelo široke branike, dobra izbira.

Preglednica 3: Naključno generirani podatki za namišljeno zaporedje širin branik. Vrstico **Branika** sestavljajo zaporedne številke branik na vzorcu, vrstica **Širina (0,01 mm)** pa vsebuje širine branik izmerjene na stotinko milimetra natančno.

Branika	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Širina (0,01 mm)	615	830	820	329	367	701	359	206	319	885	714	682	508	400

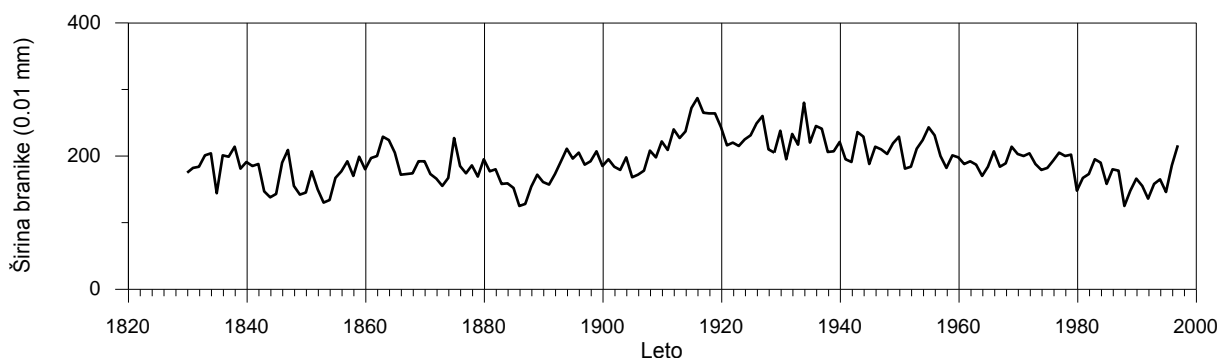


Slika 22: Grafična predstavitev podatkov iz zgornje tabel. Širina branike je na zgornjem grafu prikazana v nelogaritemski obliki.



Slika 23: Grafična predstavitev podatkov iz zgornje tabele. Za razliko od zgornjega grafa je širina branike prikazana v logaritmirani obliki. V primerjavi s sliko 5 je krivulja bolj izravnana, ekstremi so manjši.

Na spodnjem grafu je prikazana kronologija smreke za Pokljuko. Interpretacija grafa bi se lahko glasila nekako takole: v obdobju od leta 1830 do 1910 so smreke na analiziranem območju izkazoval relativno umirjeno rast. Po letu 1910 je prišlo do večjega povečanja širin branik. Povečevanje širin branik je trajalo do leta 1916, ko so širine dosegle maksimum za vse preučevano obdobje. Po tem letu je sledil počasen upad širine branike.



Slika 24: Kronologija smreke (*Picea abies*). Na Y osi je prikazana širina branike v odvisnosti od časa (X-os). Tak način prikaza je standarden v dendrokronologiji, velikokrat prikažemo Y-os tudi v logaritemski skali.

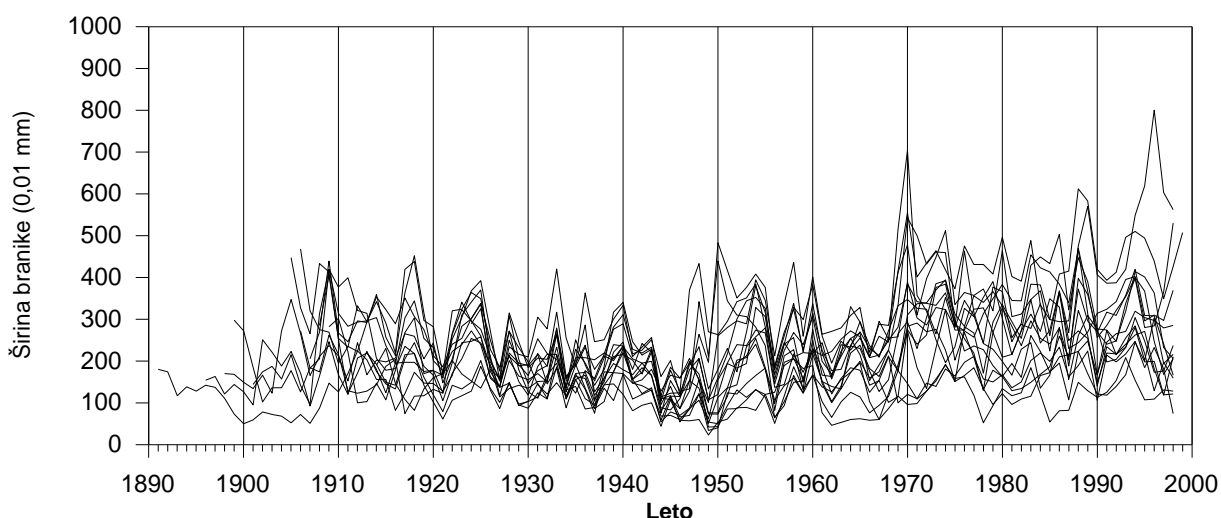
7.5.2 Vizualna primerjava dveh kronologij

Vizualna primerjava dveh kronologij (dveh zaporedij širin branik) je osnovna tehnika dendrokronologije. Z opazovanjem podobnosti ritmov na dveh ugotovimo ali sta si ritma podobna ali ne. Vizualna primerjava je najstarejša tehnika sinhroniziranja in datiranja. Vizualno primerjavo opravljamo na dva načina – na svetlobni mizici, kar velja za nekoliko zastarel, a še vedno dokaj učinkovit način sinhronizacije in datacije ali na računalniškem ekranu kjer je vizualno sinhroniziranje podrti tudi z osnovnimi statističnimi kazalci podobnosti med dvema kronologijama.

Vizualno datiranje in sinhroniziranje omogočata le dva standardna dendrokronološka programa TSAP/x in PAST-4. Programi, ki so na voljo v Ameriki te funkcije nimajo.

7.5.3 Sinhronizacija zaporedij širin branik

Če na osnovi teh temeljnih predpostavk analiziramo širino branik nekaj dreves iste drevesne vrste s podobnega rastišča na ne preveč velikem območju in narišemo graf odvisnosti širine branike (y os) od časa (x-os) bomo dobili sliko spreminjanja širin branik v času in po vsej verjetnosti bomo ugotovili, da se rast dreves v času dokaj skladno spreminja (Slika 25). Črta širine branik, ki jih prikazujemo v odvisnosti od časa se imenuje **zaporedje širin branik**, povprečje večih takšnih črt pa se imenuje **kronologija**. (Slika 24)



Slika 25: Primer sinhronne lege zaporedij širin branik. Na sliki je prikazan prirastni odziv bukve v kočevskih gozdovih (Preža) na okoljske dejavnike na ožjem območju v zadnjih 100 letih.

Preverjena zaporedja širin branik s pomočjo računalnika in ustreznega dendrokronološkega programa (npr. TSAP/x ali PAST-32) primerjamo med seboj in iščemo sinhrono lego. Sinhronizacija je postopek, kjer zaporedjem širin branik uskladimo leto nastanka branik. Za sinhrono velja tista lega, kjer je t-vrednost po Baillie-Pilcherju (*Baillie in Pilcher 1973*) največja, in kjer se hkrati obe primerjani krivulji tudi vizualno dobro ujemata.

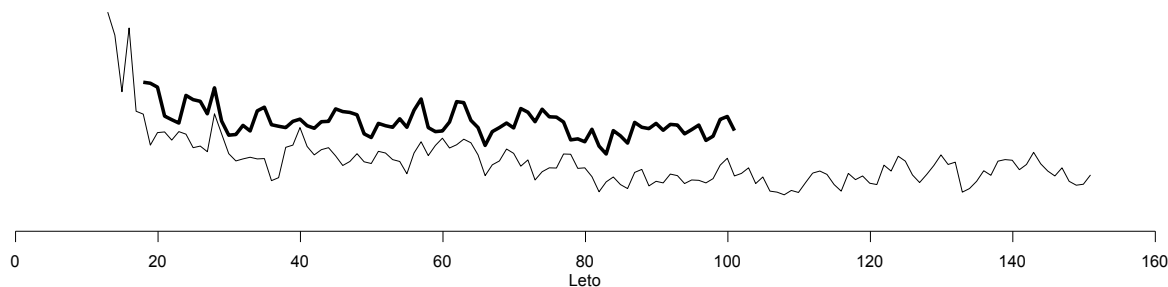
V praksi poteka sinhronizacija tako, da v bazi podatkov izberemo zaporedje širin branik zdravega, dobro rastočega drevesa brez izpadov branik. Potem izberemo iz baze še naslednjih pet krivulj in jih eno za drugo primerjamo z izbranim zaporedjem širin branik. Pri tem prvo zaporedje širin branik služi le za osnovo. Ko najdemo sinhrono lego vsem analiziranim zaporedjem širin branik, shranimo sinhrono pozicije na računalniški medij. Postopek ponavljamo do konca. V drugem koraku naredimo navzkrižno primerjavo sinhronih leg. Če se ujemajo, podatke shranimo na disk in arhiviramo, v nasprotnem pa poiščemo problematične kronologije, jih izrišemo in ročno sinhroniziramo. Zaporedja širin branik, ki se jih ne da sinhronizirati, izločimo in shranimo posebej. Pri sinhronizaciji se za vsa analizirana zaporedja širin branik vodi zapisnik, kjer se beleži različne pomembne informacije, ki se jih ne da shraniti v računalniku.

Postopek sinhronizacije zaporedij širin branik nam omogoča tudi iskanje izpadlih branik, kar ni mogoče z nobeno drugo metodo. Iskanje manjkajočih branik je zapleten in zamuden postopek, za katerega potrebujemo dobro pokrito lokalno kronologijo. S pomočjo lokalne kronologije lahko poiščemo, kje na primerjanem zaporedju širin branik pride do zamikov v primerjavi z lokalno kronologijo. S premikanjem zaporedja širin branik ob lokalni kronologiji lahko že na zaslonu ugotovimo, ali je na določenem mestu prišlo do izpada branike ali ne. Če je prišlo do izpada, manjkajočo braniko označimo s posebno vrednostjo (npr. 1) in to vpišemo v zapisnik.

Sinhronizacija je temelj za datiranje kronologij in eno izmed najmočnejših orodij dendrokronologije. S pomočjo sinhronizacije in **spajanja** kronologij med seboj lahko kronologije posameznih drevesnih vrst podaljšujemo daleč nazaj v preteklost. V Evropi imamo tako hrastovo kronologijo dolgo preko 10.000 let, kronologijo rdečega bora dolgo preko 7.000 let, v S Ameriki pa so s pomočjo podaljševanja kronologij uspeli narediti 8.000 letno kronologijo za bore, ki rastejo v Belih gorah v Arizoni.

7.5.4 Datiranje

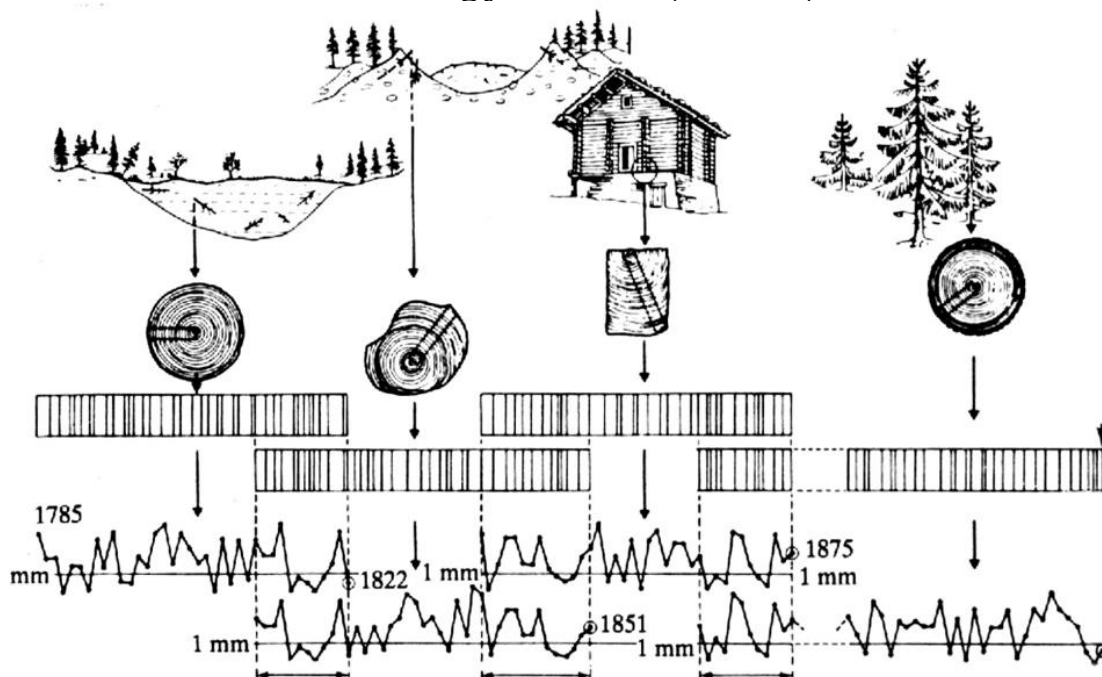
Dendrokronologi vedno prikazujemo rast drevesa v odvisnosti od časa, zato lahko vsaki braniki pripišemo tudi leto v katerem je nastala. Ta postopek imenujemo **datiranje** branike (Slika 26). Datiranje lahko izvedemo le v primeru, da smo dve kronologiji prej uspešno sinhronizirali. Datiranje in sinhronizacija sta zato dva neločljivo povezana procesa.



Slika 26: Dve kronologiji v sinhroni legi. Hkrati z določitvijo sinhronne lege smo neznani kronologiji (debelejša črna črta) določili tudi leto nastanka zadnje branike - kronologijo smo datirali.

7.5.5 Podaljševanje kronologij v preteklost (izdelava dolgih kronologij za posamezne drevesne vrste)

Tehnika podaljševanja kronologij nam omogoča, da premostimo daljše časovno območje in dobimo več tisočletne kronologije. S to tehniko so dendrokronologi uspeli sestaviti več tisočletne kronologije hrastov, borov, jelke in macesna za različne regije na svetu (Slika 27).



Slika 27: Osnovni princip spajanja kronologij in sestavljanja daljše kronologije (povzeto po Schweingruber 1989).

Podaljševanje kronologij je postopek, kjer kronologije različnih objektov ter iste drevesne vrste sinhroniziramo in "zlepimo" v eno samo dolgo kronologijo. Pri "lepljenju" kronologij moramo upoštevati vizualne in statistične parametre, ki morajo biti nad spodnjimi predpisanimi mejami. Tako za datiranje in podaljševanje kronologij, poleg dobrega vizualnega ujemanja, veljajo naslednji, minimalni statistični kriteriji: minimalno prekrivanje dveh kronologij je najmanj 40 let, t vrednost po Baillie-Pilcherju mora biti najmanj 4,0, vrednost koeficienta CDI mora biti najmanj 100 in vrednost koeficienta istosmernosti mora biti najmanj 65 (pri prekrivanju najmanj 40 let).

Za podaljševanje kronologij v preteklost redkokdaj uporabimo zaporedje širin branik enega samega vzorca, večinoma uporabljamo kronologije objekta, rastišča ali nekega širšega območja. Po kronologiji enega vzorca posežemo šele takrat, kadar je potrebno premostiti neko obdobje za katerega nimamo dovolj podatkov. V takem primeru si zabeležimo, kje je to področje na kronologiji in bodoče raziskave usmerimo v iskanje vzorcev iz slabše pokritega časovnega obdobja.

S pomočjo sinhronizacije in podaljševanja kronologij lahko kronologije posameznih drevesnih vrst podaljšujemo daleč nazaj v preteklost. V Evropi imamo tako hrastovo kronologijo dolgo preko 10.000 let, kronologijo rdečega bora dolgo preko 7.000 let, v S Ameriki pa so s pomočjo

podaljševanja kronologij uspeli narediti 8.000 letno kronologijo za bore, ki rastejo v Belih gorah v Arizoni.

7.6 Statistične metode v dendrokronologiji

7.6.1 Določanje potrebne velikosti vzorca

Velikost vzorca oz. določitev minimalnega potrebnega števila dreves za sestavo kronologije rastišča je odločilnega pomena za izdelavo kvalitetne kronologije rastišča. Pri tem je potrebno upoštevati dejstvo, da reprezentativnost kronologije rastišča s povečevanjem števila analiziranih dreves in števila izvrtkov na drevo narašča, varianca, ki je posledica "različnih šumov" pa se zmanjšuje; hkrati s tem se povečuje delež klimatskega signala v braniki, v prid signalu pa se povečuje tudi razmerje med šumom in signalom (Fritts 1976).

Obseg vzorčenja je vedno odločitev med željenim in možnim. Vemo, da z velikim vzorcem (npr. 100 dreves) dobimo boljše rezultate kot z izborom 5 dreves na rastišču, hkrati pa tudi vemo, da vrtnanje drevesa poškoduje, zato ne moremo vrtati poljubno mnogo dreves in je zato odločitev o minimalnem potrebnem številu vzorčenih dreves vedno kompromis med statistično korektnostjo in škodo, ki jo z vrtnanjem povzročamo.

Metodologij za določitev minimalnega števila potrebnih dreves za izvedbo raziskave je več (Fritts 1976), med najpreprostejše metode določitve minimalnega števila potrebnih dreves za izdelavo kronologije rastišča spada metoda, ki temelji na spremljanju koeficienta istosmernosti (Gleichlaeufigkeit - GLK%). Z naključnim izborom 30 premerjenih polmerov se izračuna povprečne kronologije iz 2,3,...,30 dreves pri tem pa se spremlja GLK% med izračunano povprečno kronologijo in vsemi posameznimi zaporedji širin branik. Na osnovi spreminjanja GLK% s povečevanjem števila zaporedij širin branik v kronologiji rastišča in ustalitve GLK% pri določenem številu dreves lahko določimo minimalno potrebno število dreves na posamezni ploskvi za sestavo kronologije rastišča (Accetto 1977)

Preglednica 4: Določitev minimalnega potrebnega števila dreves za sestavo kronologije rastišča s pomočjo spreminjanja koeficienta istosmernosti (GLK%).

Povprečje dreves	GLK%	Verjetnost %
2	59,9	95,0
3	60,6	99,9
4	62,7	99,9
5	63,5	99,9
6	63,6	99,9
7	63,7	99,9
8	64,0	99,9
9	64,3	99,9
10	64,1	99,9

11	64,3	99,9
12	64,4	99,9
13	64,4	99,9
14	64,6	99,9
15	65,0	99,9
16	65,0	99,9
17	65,0	99,9
18	65,2	99,9
19	65,2	99,9
20	65,3	99,9
21	65,3	99,9
22	65,3	99,9

V praksi se je pokazalo, da je petnajst (15) minimalno potrebno število dreves za postavitve kvalitetne kronologije rastišča. Kvaliteta kronologije se še poveča, če z vsakega dreves odvezamo po dva vzorca. V praksi se je pokazalo, da več kot 30 dreves na ploskev³ zgornja smiselna meja števila vzorčnih dreves.

Petnajst kot minimalno potrebno število dreves je nujno še z drugega vidika. Pri računanju kazalnih let je eden od kriterijev tudi minimalno število branik (dreves) v posameznem letu, najmanj 13, da lahko kazalno leto sploh identificiramo.

7.6.2 Korelacija med vzorci

Korelacija med dvema zaporedjima širin branik ali kronologijama nam pove ali med opazovanima vzorcema širin branik obstaja kakšna povezava. Z drugimi besedami s pomočjo korelacijske analize skušamo ugotoviti ali sta si vzorca podobna ali ne.

Za izračun uporabljamo najpogosteje Pearsonovo formulo za izračun korelacije med dvema vzorcema.

$$cc = \frac{\sum (s_i - \bar{s}) \cdot (r_i - \bar{r})}{\sqrt{\sum (s_i - \bar{s})^2 \cdot \sum (r_i - \bar{r})^2}}$$

Vrednost korelacijskega koeficienta vedno leži med -1 in +1. Razlaga vrednosti je enostavna, če je izračunana vrednost korelacijskega koeficienta blizu +1 pomeni, da je zveza med preučevanima premosorazmerna – če ena spremenljivka narašča, narašča tudi druga; če je izračunan koeficient blizu -1 pomeni, da je zveza med preučevanima spremenljivkama obratnosorazmerna – medtem ko vrednost ene spremenljivke narašča, druge pada. Vrednost korelacijskega koeficienta 0 pomeni, da med preučevanima spremenljivkama ni nobene povezave oz. jo z našo analizo nismo uspeli odkriti. Če so izračunane vrednosti korelacijskega koeficienta blizu 0 bo to pomenilo, da je med preučevanimi spremenljivkami šibka korelacijska povezava. Poleg samega izračuna vrednosti korelacijskega koeficienta je potrebno upoštevati tudi število podatkov v analizi. Ni namreč

³ Ploskev v tem kontekstu je manjše zaokroženo območje s približno enakimi ekološkimi značilnostmi (tip sestoja, nagib, osončenje, tla, kamenitost, gozdna združba ...). Ponavadi ne presega površine 5-7 ha.

vseeno ali smo korelacijo izračunali za 10 parov podatkov ali pa za 100. Tako recimo korelacijski koeficient 0,4 dobljen s pomočjo 10 parov podatkov skorajda ne pove ničesar koristnega, medtem ko isti korelacijski koeficient dobljen iz 10x več podatkov pove, da je med podatki zelo velika in značilna stopnja odvisnosti. Ker je očitno, da je izračunana vrednost korelacijskega koeficienta odvisna od velikosti analiziranega vzorca je potrebno nivo značilnosti Pearsonovega korelacijskega koeficienta odčitati iz ustrezne tabele ali pa uporabiti katerega od številnih statističnih programov.

Kot splošen napotek, pa bi lahko rekli, da lahko z 99% verjetnostjo trdimo, da sta dva pojava povezana, ko je korelacijski koeficient večji od $\pm 0,40$ in kjer je število podatkov v analizi večje od 40.

7.6.3 Studentov t

Namen izračuna Studentovega t-testa je ugotoviti ali se aritmetične sredine dveh primerjanih vzorcev statistično značilno razlikujejo. t-test je razmerje med diferencami dveh aritmetičnih sredin in njihovimi standardnimi odkloni.

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}}$$

Rezultat enačbe se porazdeljuje v t-porazdelitvi z n_1+n_2-2 stopinjami prostosti.

V testu testiramo ničelno hipotezo, da sta si aritmetični sredini preučevanih vzorcev enaki. Ničelno hipotezo zavrnamo, če so vrednosti izračunanega t-testa manjše od tabličnih pri ustreznem številu stopinj prostosti.

Opozoriti velja, da je uporaba Studentovega t na nestandardiziranih podatkih v dendrokronologijo nekoliko sporna, saj je t-vrednost zelo občutljiva že na najmanjša odstopanja v aritmetični sredini. Tako npr. bi izračun t-vrednosti za dva popolnoma identična vzorca, pri katerih bi bile vse meritve razen ene popolnoma enake privedlo do zaključka, da vzorca nista primerljiva ampak različna, kar pa ni res. Zaradi tega je potrebno podatke pred izračunom t-vrednosti standardizirati z eno od mnogih metod za standardizacijo dendrokronoloških podatkov (glej poglavje XXX).

7.6.4 Koeficienta t po Baillie-Pilcherju

t-test po Baillie Pilcherju odpravlja zgoraj omenjeno slabo lastnost t-testa s predhodno standardizacijo primerjanih vzorcev.

t vrednost po Baillie Pilcherju sta leta 1973 v dendrokronologijo uvedla Baillie in Pilcher (Baillie / Pilcher 1973). Namen izračunavanja t-vrednosti je dobiti objektivno mero za ugotavljanje podobnosti med dvema kronologijama. S primerjanjem krivulj na osnovi t-vrednosti si močno olajšamo optično navzkrižno datiranje velikega števila kronologij. Primerjava poteka vedno med dvema krivuljama in temelji na izračunu korelacijskega koeficienta, korigiranega s kvadratnim korenom iz števila stopinj prostosti.

$$cc = \frac{\sum (s_i - \bar{s}) \cdot (r_i - \bar{r})}{\sqrt{\sum (s_i - \bar{s})^2 \cdot \sum (r_i - \bar{r})^2}}$$

$$t = \frac{cc \sqrt{n-2}}{(1-cc)}$$

cc	navzkrižna korelacija	s_i	Širina branike v i-tem letu pri vzorcu s	r_i	širina branike v i-tem letu pri vzorcu r
n	število skupnih let v primerjavi	v	s	r	povprečna širina branike vzorca r

V skladu s predlogom Baillie in Pilcherja smo serije širin branik pred izračunom navzkrižne korelacije standardizirali z netehtano drsečo sredino z intervalom 5 let. t-vrednost lahko zavzame vrednosti med 0 in 100. Nivo značilnosti za t-vrednost je vnaprej določen, in sicer: t- vrednosti od 3-5 so označene z *, vrednosti med 5 in 10 z ** in vrednosti nad 10 s ***. t-vrednosti smo izračunavali s programom TSAP/X. Primerjalne analize t-vrednosti, kakor jih izračunavajo različni programi (Sander / Levanič 1996), so pokazale, da različni programi izračunajo različne t-vrednosti, zato je pri podajanju t-vrednosti nujno potrebno navesti, s katerim programom so bile t-vrednosti računane.

7.6.5 Koeficient časovne skladnosti (Gleichläufigkeit)

Koeficient časovne skladnosti (Huber 1943; Eckstein / Bauch 1969) je po definiciji mera ujemanja dveh kronologij na opazovanem intervalu. Pri tem primerjamo dva vzorca rasti med seboj. Izražamo ga v odstotkih in zavzema vrednosti med 0 in 100%. Bolj ko sta si dve kronologiji podobni, večjo vrednost ima koeficient časovne skladnosti. Nivo značilnosti se pri vsaki primerjavi izračuna posebej, pri tem je pomembno poudariti, da je značilnost koeficienta GLK% močno odvisna od dolžine prekrivanja dveh kronologij. Krajše ko je prekrivanje višjo vrednost bo moral imeti GLK%, da bo značilen in obratno daljše ko je prekrivanje, nižjo vrednost ima lahko GLK% pa bo še vedno značilen. Tako npr. mora biti GLK% pri 50 letnem prekrivanju večji od 61.7, pri 150 letnem prekrivanju pa večji od 56.8 (glej Slika 28). V praksi to pomeni, da se pri 150 letnem prekrivanju ujema 56.8% primerjav dveh kronologij, kar je nekoliko malo.

Koeficient časovne skladnosti smo izračunavali s pomočjo programa TSAP/X po naslednji formuli:

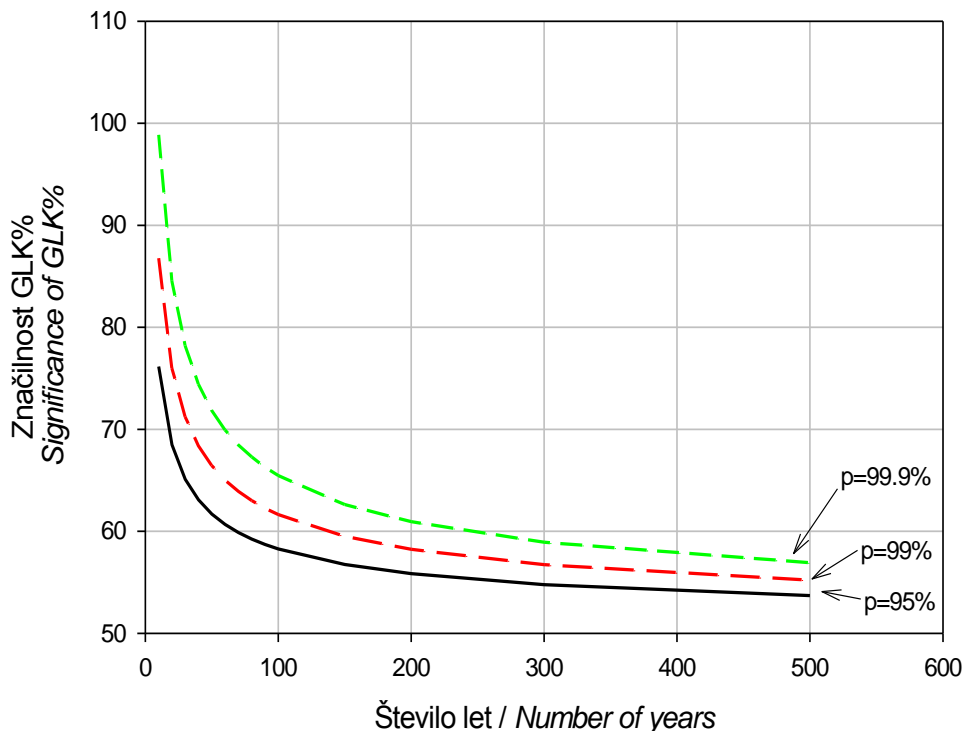
$$\Delta_i = (x_{i+1} - x) \begin{cases} \Delta_i > 0: G_{ix} = +1/2 \\ \Delta_i = 0: G_{ix} = 0 \\ \Delta_i < 0: G_{ix} = -1/2 \end{cases} \quad G_{(x,y)} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} (G_{ix} + G_{iy})$$

$G_{(x,y)}$	koeficient časovne skladnosti med dvema kronologijama	Δ_i	razlika med dvema zaporednima letom	G_{ix} , G_{iy}	atributiven znak kronologije X in Y, ki je odvisen od predznaka razlike Δ_i
-------------	---	------------	-------------------------------------	------------------------	--

Kriterialne vrednosti za posamezen nivo značilnosti se izračunajo po naslednji formuli:

$$50.0 + \frac{x \cdot 50.0}{\sqrt{n}}$$

pri tem je $x_{95\%}=1.654$; $x_{99\%}=2.326$; $x_{99.9\%}=3.090$



Slika 28: Odvisnost nivoja značilnosti za GLK% od dolžine primerjanih kronologij.

7.6.6 Indeks navzkrižnega datiranja (CDI)

Indeks navzkrižnega datiranja je povzet po Schmidtu in je kombinacija koeficienta časovne skladnosti, t vrednosti po Hollsteinu in t -vrednosti po Baillie Pilcherju (Schmidt 1987). Dobra stran tega indeksa je, da poudari sinhrono in potlači nesinhrono pozicije. To doseže tako, da t vrednosti pomnoži s tistimi koeficienti časovne skladnosti, ki imajo vrednosti večje od 50%. Vrednosti indeksa so med 0 in 1000 pri tem pa velja, da so vrednosti nad 100 značilne. CDI se izračuna po naslednji formuli:

$$CDI = \frac{(GLK\% - 50)(t_{BP} + t_{HO})}{2} \frac{n}{1000}$$

CDI	indeks navzkrižnega datiranja
GLK%	koeficient časovne skladnosti
t_{BP}	t vrednost po Baillie Pilcherju
t_{HO}	t vrednost po Hollsteinu
n	število let prekrivanja

7.6.7 Srednja stopnja občutljivosti (Mean sensitivity)

Srednja stopnja občutljivosti je kazalec, ki so ga vpeljali posebej za potrebe dendrokronologije. Z njim merimo relativne razlike med širino primerjane in predhodne branike. Douglas je definiral srednjo stopnjo občutljivosti kot povprečni odstotek spremembe med primerjano in predhodno braniko (povzeto iz Fritts 1976, str. 257-258). Povprečna stopnja občutljivosti se izračuna po naslednji formuli:

$$ms_x = \frac{1}{n-1} \sum_{t=1}^{n-1} \left| \frac{2(x_{t+1} - x_t)}{x_{t+1} + x_t} \right|$$

Pri tem x_{t+1} in x_t predstavljata preučevano in predhodno braniko. Vrednosti za srednjo stopnjo občutljivosti so v rangi med 0 in 2, kjer 0 pomeni, da ni nobenih razlik v sosledju (vse vrednosti so enake), 2 pa pomeni da ničelni vrednosti sledi neničelna. V splošnem velja, da nižje vrednosti pomenijo, da so zaporedja širin branik bolj izravnana, višje vrednosti pa, da je v rasti prihajalo do velikih sprememb v priraščanju.

7.6.8 Avtokorelacijska analiza

Avtokorelacijska analiza kronologij nam omogoča vpogled v dogajanje znotraj kronologije in študij časovnih odvisnosti v njej. V principu izračunavamo korelacijski koeficient med preučevano kronologije in kopijo te kronologije zamaknjene za -1, -2, -3,..., (N-2), (N-1) let. Rezultat se ponavadi prikaže v obliki korelograma. Izračun poteka po standardni formuli (npr. Schlittgen / Streitberg 1987). Pred analizo je potrebno iz časovne vrste odstraniti vse t.im. "outlierje". Iz gibanja avtokorelacijskih koeficientov lahko razberemo velikost in trajanje morebitnih ciklov (npr. redčenje) (Fritts 1976; Kotar / Puhek / Godler 1995).

7.6.9 Analiza glavnih komponent (PCA)

Z analizo glavnih komponent (PCA=Principal Component Analysis) lahko kompleksne in medsebojno odvisne odnose med spremenljivkami poenostavimo do take mere, da postanejo odnosi med njimi relativno enostavno razložljivi in jih grafično prikazujemo s pomočjo XY grafa. Rezultat analize glavnih komponent so lastni vektorji, ki so med seboj ortogonalni in neodvisni. Pri tem pojasnjuje prvi lastni vektor največji del skupne variabilnosti preučevanih kronologij (Hartung / Elpelt 1984). S pomočjo analize glavnih komponent iščemo skupne lastnosti oz. vodilni dejavnik, ki vpliva na širino branike v množici kronologij. Rezultat prikažemo na dvo- ali tro-dimezijskem grafu in ga poskušamo interpretirati na osnovi ekoloških značilnosti preučevanega rastišča. Analiza glavnih komponent je potekala avtomatsko v programu ARSTAN. Rezultati so bili ročno preneseni v ustrezen program za risanje grafov.

7.6.10 Standardizacija dendrokronoloških časovnih vrst

Zaporedje širin branik je, statistično gledano, časovna vrsta sestavljena iz več komponent. Te komponente je Cook leta 1985 natančno obdelal v svoji doktorski disertaciji. Časovna vrsta v dendrokronologiji je tako sestavljena iz starostne komponente, vpliva klime, bližnjih okoljskih dejavnikov in daljnjih okoljskih dejavnikov (Cook 1985). Odvisno od definicije problema

lahko v tem modelu preučujemo eno ali več neodvisnih spremenljivk in pri tem skušamo s primerno statistično zasnovo vzorčenja kontrolirati ostale neodvisne spremenljivke modela. Če katera od teh komponent močno prevladuje nad ostalimi potem je treba časovno vrsto primerno statistično obdelati, da lahko na njej opravljamo različne analize. Ta postopek se v dendrokronologiji imenuje **indeksacija** ali pa **standardizacija**. V principu pa v postopku standardizacije skozi zaporedje širin branik potegnemo ustrezno regresijsko krivuljo, ki odstrani trend iz časovne vrste (=zaporedja širin branik).

S standardizacijo odstranimo določene komponente dendrokronološke časovne vrste v skladu s Cookovim modelom:

$$R_t = A_t + C_t + \delta D1_t + \delta D2_t + \varepsilon_t$$

pri tem so

R_t = širina branike v določenem letu t

A_t = starostni trend

C_t = klimatski signal v branikah

$D1_t$ = vpliv lokalnih dejavnikov

$D2_t$ = vpliv okoljskih dejavnikov na širšem območju

δ = binarni znak, ki je lahko 0 ali 1; če je 0 dejavnik ni prisoten, če pa je 1 pa je

ε_t = nepojasnjena letna variabilnost, ki ni povezana z drugimi zgoraj opisanimi dejavniki

Zgornji model je postavljen tako, da so posamezne spremenljivke modela v aditivni zvezi, kar je v primerjavi z dejanskim stanjem nekoliko poenostavljeno, kajti znano je, da so določene spremenljivke v branikah povezane multiplikativno (npr. zveza med širino branike in standardno deviacijo širin branik). Multiplikativne povezave se da s pomočjo logaritemske transformacije pretvoriti v aditivno zvezo, zato predstavljeni model obdrži svojo uporabnost. Vpliva $D1$ in $D2$ lahko z binarnim koeficientom $\delta(0,1)$ vključimo oz. izključimo, medtem ko za A_t , C_t in ε_t predpostavljamo, da so v drevesnih branikah stalno prisotni. Glavne komponente tega modela - starostno, klimatsko in okoljsko ponavadi analizirano tako, da jo skušamo ostale komponente izločiti kot "motnje". Kako to storimo je opisano v nadaljevanju.

Faktor A_t predstavlja povečevanje debela s starostjo in upad širine branike zaradi, med drugim, povečevanja obsega in volumna debela ter starosti. Če je starostni trend prevladujoča komponenta časovne vrste, ga lahko zelo dobro izničimo s prilagoditvijo modificirane negativne eksponentne funkcije spreminjanju širine branike v času. Da stvar ne bi bila tako preprosta to velja samo za drevesa, ki rastejo v relativno redkem sestoju (pretrgan sklep krošenj) ali sami. V gostejših sestojih širina branike s časom ne upada, ampak se spreminja v skladu s konkurenco v sestoju, ko je drevo zastrto so branike ožje, ko konkurenca omaga postanejo branike širše in to ne glede na starost drevesa (faktorja $D1$ in $D2$). V takem primeru si z modificirano eksponentno funkcije ne bi mogli kaj prida pomagati in moramo zato poseči

po bolj kompleksnih funkcijah - polinomih, kubičnih zlepkih ali drsečih sredinah.

Uporaba standardizacije

Namen standardizacije je odstranitev določene, moteče, komponente iz časovne vrste. Razlogi zakaj se tega lotimo so različni, v nadaljevanju sta podana dva najpogostejša.

Pri računanju povprečja zaporedij širin branik, je nedopustno združevati široke branike mladih dreves in ozke branike starih. Če bi to storili z nestandardiziranimi zaporedji širin branik bi dobili zelo nenavadno kronologijo s precejšnjimi skoki na mestih kjer smo povprečili široke in ozke branike. Da to preprečimo pred izračunom povprečja, zaporedja širin branik izravnamo z eno od togih funkcij ali pa z drsečo sredino s 5 letnim intervalom.

Pri ugotavljanju vpliva klime na rast dreves se kot nezaželena komponenta pojavlja starostni trend, vpliv klime na rast drevesa pa je komponenta, ki jo analiziramo. Ostale komponente lahko s primerno zastavljenim planom vzorčenja enostavno izločimo. Namen standardizacije je v tem primeru odstranitev starostnega trenda iz časovne vrste ter izostritev klimatskega signala v branikah. Gre za matematično zelo kompleksen način standardizacije, kjer različni avtorji uporabljajo različne metode standardizacije časovnih vrst. V splošni dendroklimatološki praksi so se za standardizacijo zaporedij širin branik najbolj uveljavili kubični zlepki, bistveno manj pa drseče sredine, ker imajo celo vrsto slabosti. Kubični zlepki so prilagodljivi, dobro odstranjujejo starostni trend iz časovnih vrst, slabost je da so matematično zelo zahtevni (vendar to z modernimi računalniki ni več problem).

Za standardizacijo najpogosteje uporabljamo program ARSTAN ali pa, v zadnjem času, tudi posebno knjižnico imenovano dplR napisano za programski paket R. Oba programa sta zelo zmogljiva, pri tem pa ostaja ARSTAN de-facto standard za standardizacijo dendrokronoloških podatkov.

7.7 Nesklenjene časovne vrste

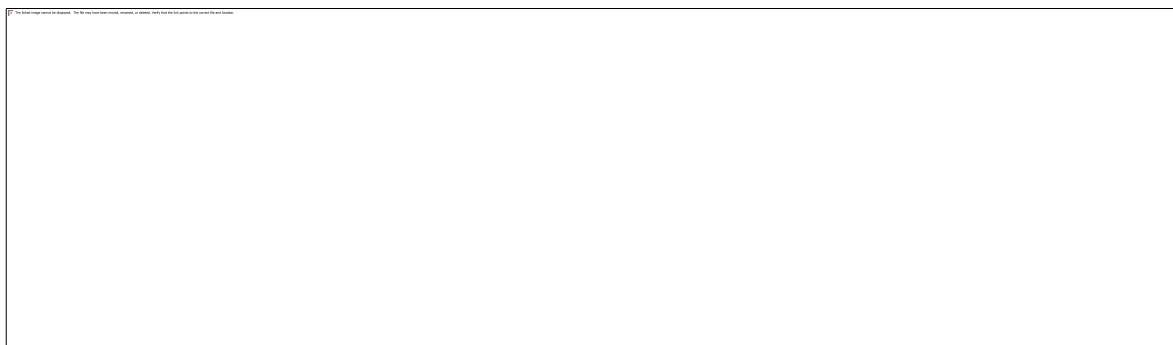
Pri statistični analizi dendrokronoloških krivulj se srečamo z dvema vidikoma analize časovnih vrst - s sklenjenimi in nesklenjenimi časovnimi vrstami. Pri sklenjenih velja klasična teorija časovnih vrst (Box / Jenkins 1970), nesklenjene pa moramo obravnavati povsem drugače (Schweingruber 1993). V dendrokronologiji pod sklenjeno časovno vrsto razumemo neprekinjeno zaporedje letnih prirastkov, pod nesklenjeno časovno vrsto pa razumemo statistično analizo posameznih let, ki po svojih značilnosti močno izstopajo od povprečnega leta. Tako je branika, ki vsebuje travmatske smolne kanale kazalno leto v določenem drevesu in kaže na nek dogodek, ki je povezan samo s tem drevesom. Na drugi strani lahko izjemno ozka branika v več drevesih pomeni, da je bilo leto v katerem je nastala ta branika sušno in vroče ali pa so bila drevesa izpostavljena nekemu skupnemu neugodnemu dejavniku. Metodo preučevanja nesklenjenih časovnih vrst s pridom uporabljamo pri preučevanju lokalnih zunanjih dejavnikov na rast posameznih dreves ali skupine.

7.7.1 Kazalci vezani na eno drevo

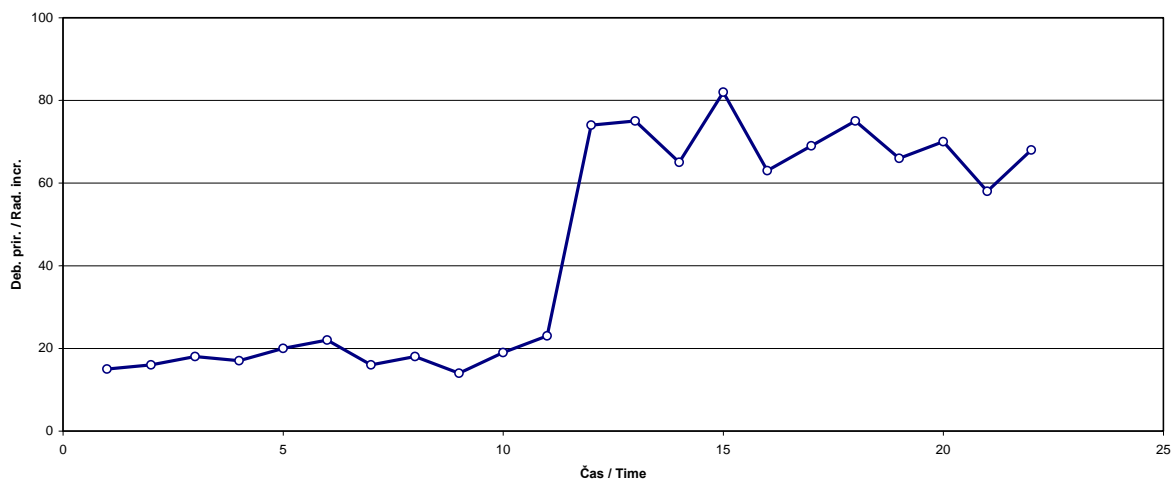
Termina kazalno leto in nenadna sprememba rasti se nanašata na predvsem optično zaznavo nenavadnih pojavnih oblik branike ali njene anatomske zgradbe.

Termin kazalno leto (an. Event year) se nanaša na braniko ki po svojem izgledu odstopa od branik pred in za opazovano braniko. Pri opisu kazalnega leta gre za povsem kvalitativno oceno vizualnega izgleda branike (bolj / manj temen kasni les, ožja / širša branika, več / manj trahej, travmatski smolni kanali prisotni / odsotni, kompresijski ali reakcijski les prisoten / odsoten, poškodba kambija prisotna / odsotna, ...) - glej npr. Slika 8. V novejšem času se kvalitativnem opisu izgleda branike pridružuje tudi kvantitativni opis, kjer določen pojav natančno izmerimo, ponavadi s pomočjo programov za avtomatsko analizo slike. Tako lahko izmerimo velikost, število in porazdelitev trahej v braniki, širino ranega / kasnega lesa, gostotni profil branike, število smolnih kanalov v braniki, velikost travmatskih smolnih kanalov ipd.

Termin nenadna sprememba rasti (an. Abrupt growth change) se nanaša na potek priraščanja v določenem obdobju (Slika 29). Gre za kvalitativno in kvantitativno oceno rasti v določenem obdobju. O nenadni spremembi rasti govorimo takrat, ko drevo nenadoma začne boljše / slabše rasti kot prej. Po definiciji lahko govorimo o nenadni spremembi rasti, ko je povprečna širina štirih zaporednih branik za 40% ožje oz. za 160% širše v primerjavi s povprečjem predhodnih štirih branik (Slika 30).



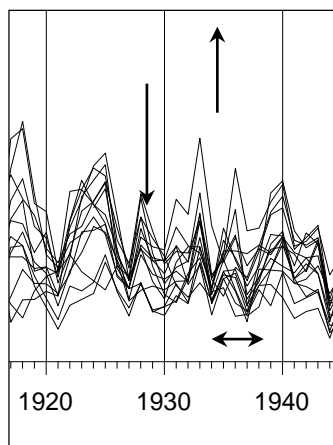
Slika 29: Pojav nenadne spremembe rasti



Slika 30: Shematski prikaz nenadne spremembe v rasti – širina branik je poskočila za več kot 160%, hkrati pa sprememba traja vsaj štiri leta, prirastek je prešel na nov nivo.

7.7.2 Kazalci vezani na skupino dreves

Kazalca značilno leto (an. Pointer year) in značilni interval (an. Pointer interval) sta vezana na skladen odziv večje skupine dreves na nek dražljaj iz okolice (Slika 31). Odziv dreves je lahko pozitiven ali negativen, v prvem primeru govorimo o pozitivnem značilnem letu v drugem pa o negativnem značilnem letu. Dražljaj, ki povzroči pojav značilnega leta je lahko klimatskega izvora, lahko pa je tudi skupen vsem drevesom, ki ležijo ob neki vlaki in imajo zaradi spravila poškodovana debla in korenine. Za izračun značilnega leta obstajajo povsem jasni kriteriji. Značilno leto je tisto leto, ko 80% od najmanj 13 dreves reagira s povečanjem ali zmanjšanjem debelinskega prirastka v primerjavi s predhodnim letom (Schweingruber et al. 1990). Po potrebi lahko kriterij 80% zvišamo na 90 ali 100%. Za razliko od značilnega leta, je značilni interval tipično zaporedje več let, ki se pojavi pri večjem številu dreves (glej definicijo). O značilnem intervalu govorimo takrat, ko je sestavljen iz najmanj 4 zaporednih značilnih let. Pojavlja se zelo redko, a je ravno zaradi tega izjemno dobro orodje za datiranje in sinhroniziranje, tako je na primer pri jelki v Sloveniji zaporedje let od 1959 do 1962 značilni interval.



Slika 31: Shematski prikaz značilnega leta (puščica gor, dol) in značilnega intervala - podpisa (vodoravna puščica)

7.8 Terenska, laboratorijska in programska oprema v dendrokronologiji

7.8.1 Terenska oprema in oprema delavnice

Delo dendrokronologa je vezano na tri delovišča – teren, delavnico in laboratorij. Terensko delo poteka v gozdu ali pa na / v objektu. Glede na tip terenskega dela je potrebno v vsakem trenutku razpolagati z ustrežno terensko opremo.

Terenska oprema za delo v gozdu obsega naslednje dele (glej sliko):



Slika 34: Tračna žaga (levo) omogoča žaganje večjih kosov lesa do debeline 24 cm. Primerno stanjšane se jih do konca obdela na krožni žagi (desno).

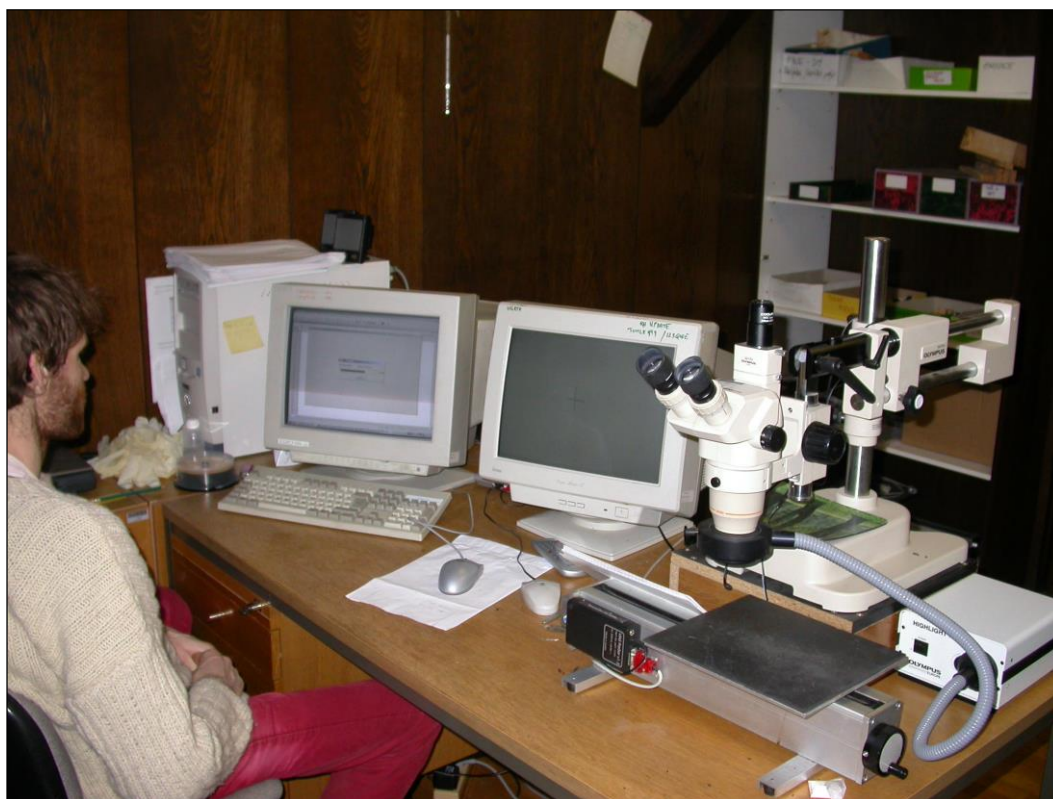


Slika 35: Profesionalna tračna brusilka omogoča kvalitetno brušenje poljubno velikih vzorcev. Omogoča brušenje izvrtkov in kolotov.

7.8.2 Laboratorijska oprema

Osnovna oprema dendrokronološkega laboratorija je sestavljena iz osebnega računalnika primerne zmogljivosti (vsi moderni računalniki so dovolj zmogljivi), merilne mizice z binokularno lupo in ustreznega svetlobnega vira. Boljši laboratoriji so opremljeni še z dodatnim kvalitetnim monitorjem, ki preko video kamere priključene na binokularno lupo, omogoča merjenje širin branik neposredno na ekranu (to precej olajša

dolgotrajnejše delo) in s skenerjem visoke ločljivosti, ki omogoča skeniranje vzorcev neposredno v računalnik, kjer jih potem obdelamo s programom WinDENDRO.



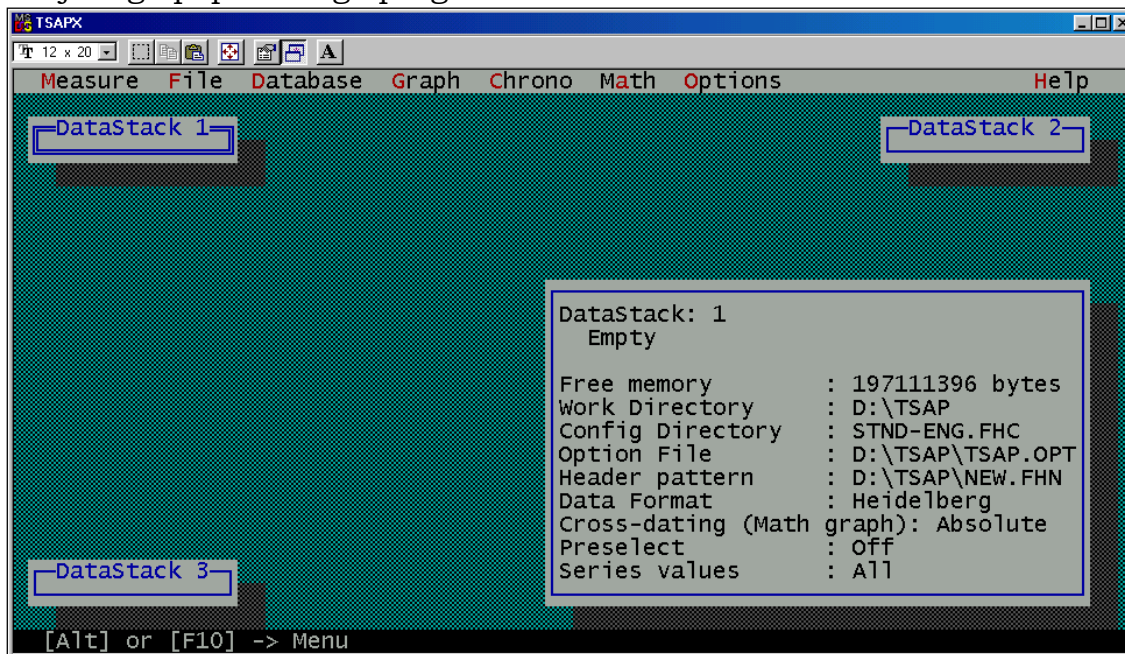
Slika 36: Osnovna oprema dendrokronološkega laboratorija: računalnik, merilna mizica, binokularna lupa in dodatni monitor za spremljanje poteka meritev na zaslonu; na sliki manjkata še skener in digitalni fotoaparati, ki se ga priključi na binokularno lupo in služi povezavi z zaslonom in fotodokumentaciji.

Ključni inštrument dendrokronološkega laboratorija je merilna mizica. V dendrokronoloških laboratorijih po svetu uporabljajo različne merilne mizice, najbolj uveljavljeni pa sta dve LINTAB (Slika 36) in VELMEX, ki je bolj razširjena na severno ameriškem trgu. Merilna mizica je kombinacija natančne mehanike in moderne elektronike. V osrednjem delu merilne mizice je vijačnica, ki premika merilno mizico, vijačnik lahko premikamo ročno ali s pomočjo koračnega motorja. Vrtenje vijačnice se prenaša na rotacijski enkoder, kjer premike preko pretvorniškega mikrovezja pretvorimo v binarni zapis, ki se po kablu prenaša v računalnik. V računalniku program (TSAP ali PAST) dekodira signal in pretvori vrtenje v razdaljo. Natančnost merilne mizice je 1/100 mm, trenutno najboljše mizice pa zmorejo natančnost 1/1000 mm.

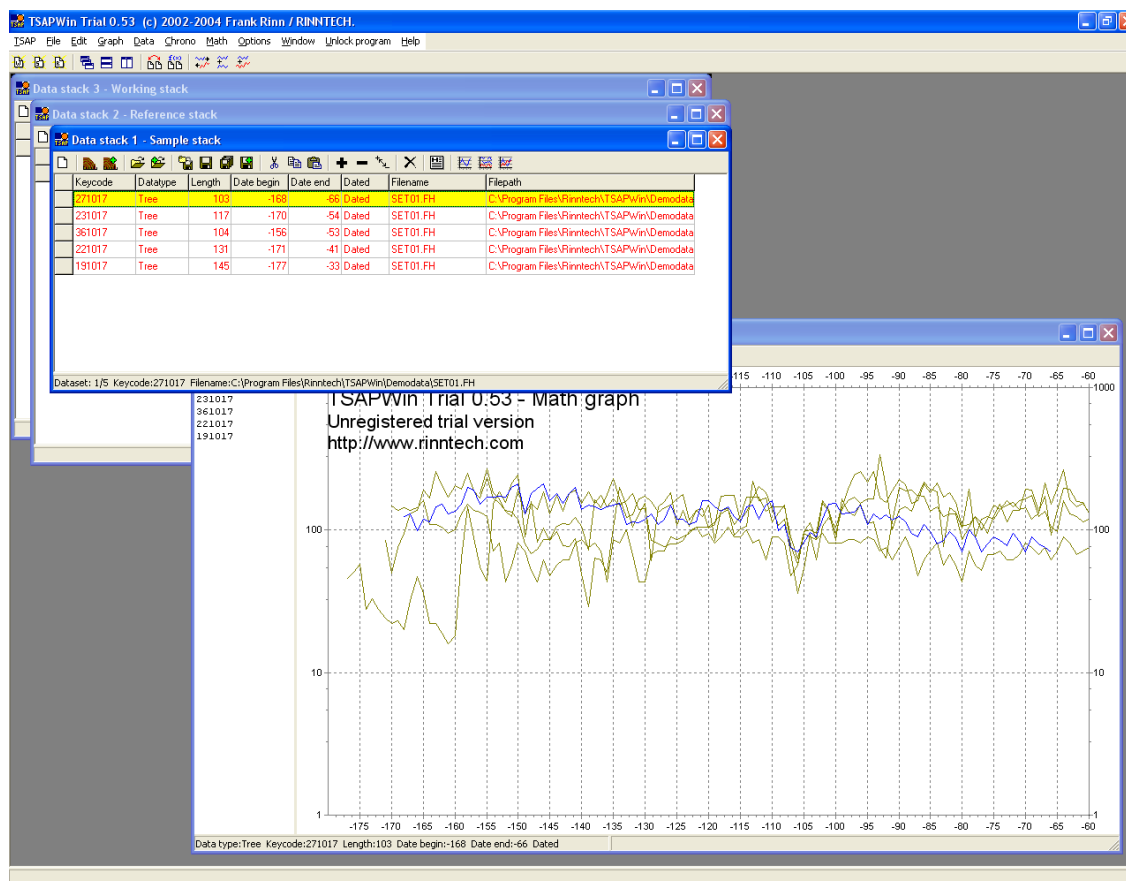
7.8.3 Programska oprema

7.8.3.1 Tsap/X, TSAP/win

TSAP/x je splošen program za dendrokronološko analizo. Dela pod operacijskim sistemom MS-DOS, kar lahko danes predstavlja tudi problem. TSAP je bil eden prvih univerzalnih programov za dendrokronološko analizo in je v primerjavi s kopico drugih, posebnih programov za dendrokronološke analize predstavljal pravo osvežitev na dendrokronološkem trgu programske opreme. Program je naprodaj še danes, avtorji pa so naredili tudi Windows verzijo tega popularnega programa.



Slika 37: Program TSAP/x je sicer MS-DOS program vendar lahko teče tudi v oknu znotraj operacijskega sistema MS WINDOWS.



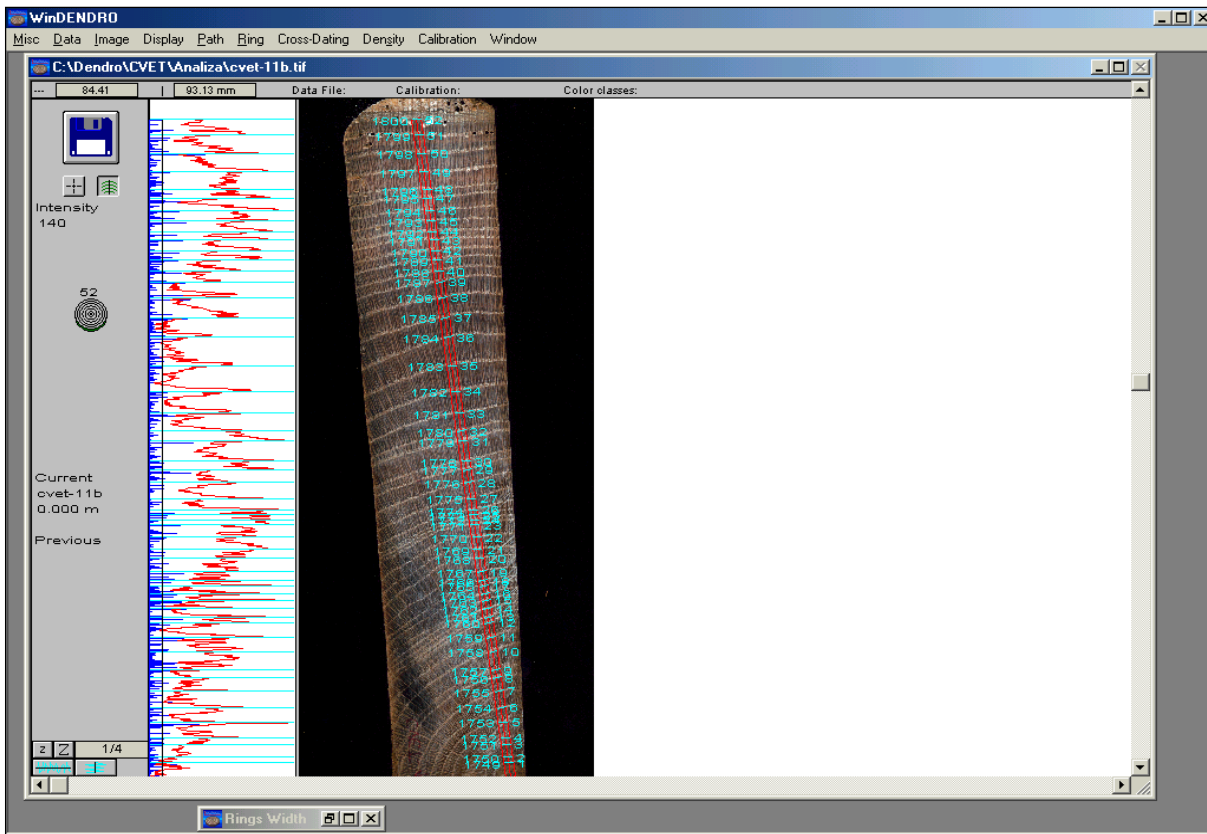
Slika 38: Windows različica programa TSAP – TSAP/win

7.8.3.2 WinDENDRO

Program za avtomatsko prepoznavanje branik iglavcev. Razvoj programa WinDENDRO je bil logična posledica razvoja in pocenitve skenerjev. Vzorec za analizo položimo na skener, odčitamo v program WinDENDRO in izvedemo avtomatsko prepoznavanje branik. Avtomatsko prepoznavanje branik temelji na preprostem dejstvu, da so branike iglavcev sestavljene iz svetlejšega ranega lesa in temnejšega kasnega. Razlika v svetlobnem odčitku je osnova za ločitev na rani in kasni les ter letnico. Program poleg širine branike avtomatsko izračuna tudi širino ranega in kasnega lesa ter njun delež. WinDENDRO je uporaben tudi za meritve gostotnih profilov – densitometrijo.

Program ima tudi nekatere omejitve, ki so povezane predvsem z načinom zajema informacij. Zelo ozke branike mu namreč predstavljajo dokaj velik problem, stopnja prepoznave pa je relativno nizka, zato je ročnih intervencij več. Problem tiči v skenerju, ki kljub temu, da podpira zelo visoke ločljivost skeniranja, slike optično ne povečajo ampak samo zajamejo z večjim številom slikovnih elementov na enoto površine.

Pri listavcih algoritem za prepoznavanje branik ne deluje več, ker je anatomsko zgradba branike listavca bistveno drugačna od branike iglavcev, kljub temu pa lahko še vedno sliko včitamo in letnice določimo ročno.

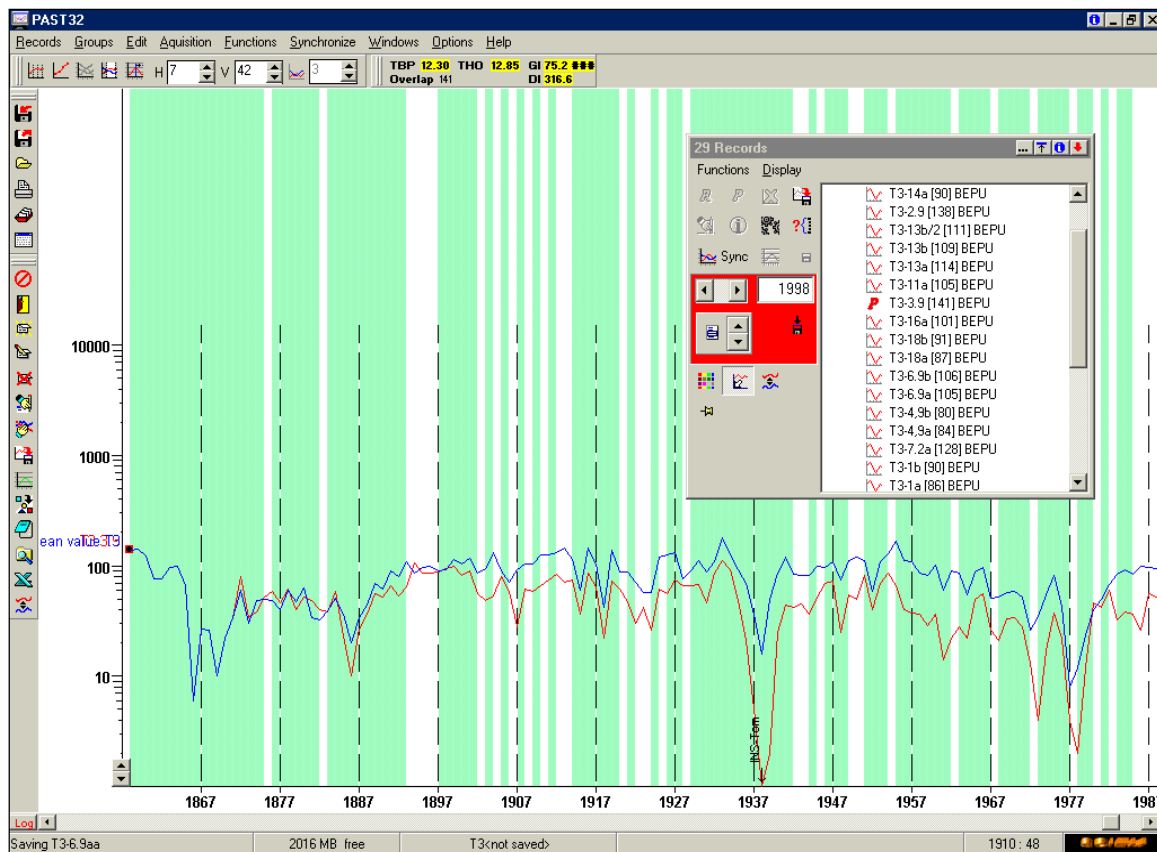


Slika 39: Izgled delovnega ekrana v programu WinDENDRO. Na sliki vidimo, kako je program avtomatsko prepoznal in označil branike. V večini primerov je potrebna samo skromna intervencija operaterja in meritev je primerna za nadaljnjo obdelavo.

Program WinDENDRO deluje dokaj solidno, podatke shranjuje v ASCII obliki, ki jo za nadaljnje delo v programih PAST ali TSAP pretvorimo v t.i. TUCSON format. Sam program nima vgrajenih nekaterih posebnih funkcij za analizo dendrokronoloških krivulj, zato služi predvsem zajemu in prenosu v bolj zmogljive programe.

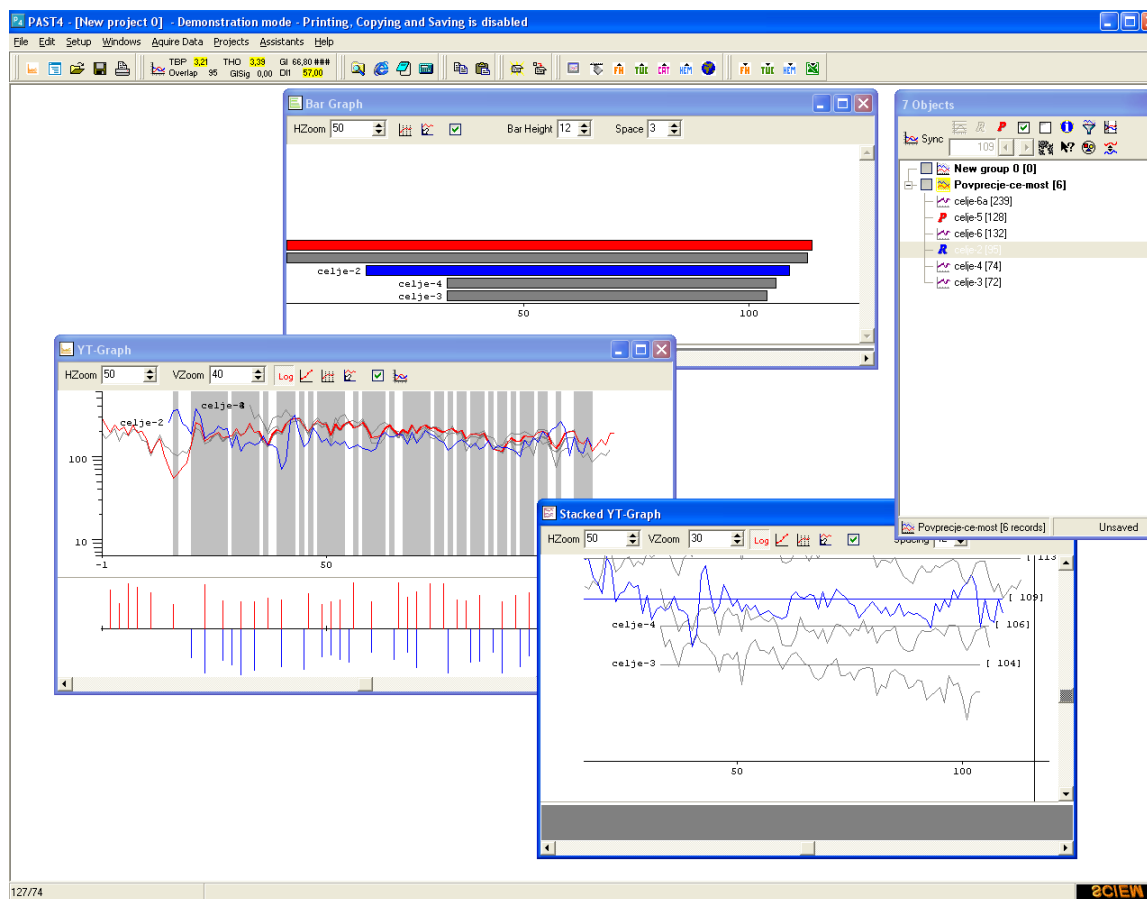
7.8.3.3 PAST-32 in PAST 4

PAST 32 je univerzalen program za obdelavo dendrokronoloških krivulj, merjenje širine branik ipd. Je plod dela avstrijskih dendrokronologov. V svojem bistvu je nekoliko podoben programu TSAP/x, le da dela v programskem okolju Windows in je zaradi tega nekoliko bolj sodoben. Program deluje s široko paleto merilnih mizic - od merilne mizice lastne proizvodnje do LINTAB-a in VELMEX-a.



Slika 40: Delovno okno programa PAST-32- na sliki je prikazana najbolj tipična dendrokronološka operacija – sinhronizacija dveh krivulj.

Bistven napredek v razvoju dendrokronoloških programov pa pomeni najnovejša verzija programa PAST – PAST 4. Avtor programa je, poleg že preverjenih možnosti, vgradil številne nove možnosti – kot npr. dinamično izračunavanje srednje vrednosti, kar je še posebej pomembno pri sestavljanju kronologij, vpeljal je številne »čarovnike«, ki močno olajšajo delo dendrokronologa in, kar je še posebej pomembno, kot prvi je prešel na standardno obliko zapisa dendrokronoloških podatkov v XML formatu. V bodoče naj bi ta format igral ključno vlogo pri izmenjavi datotek in močno olajšal prenose med različnimi programi.



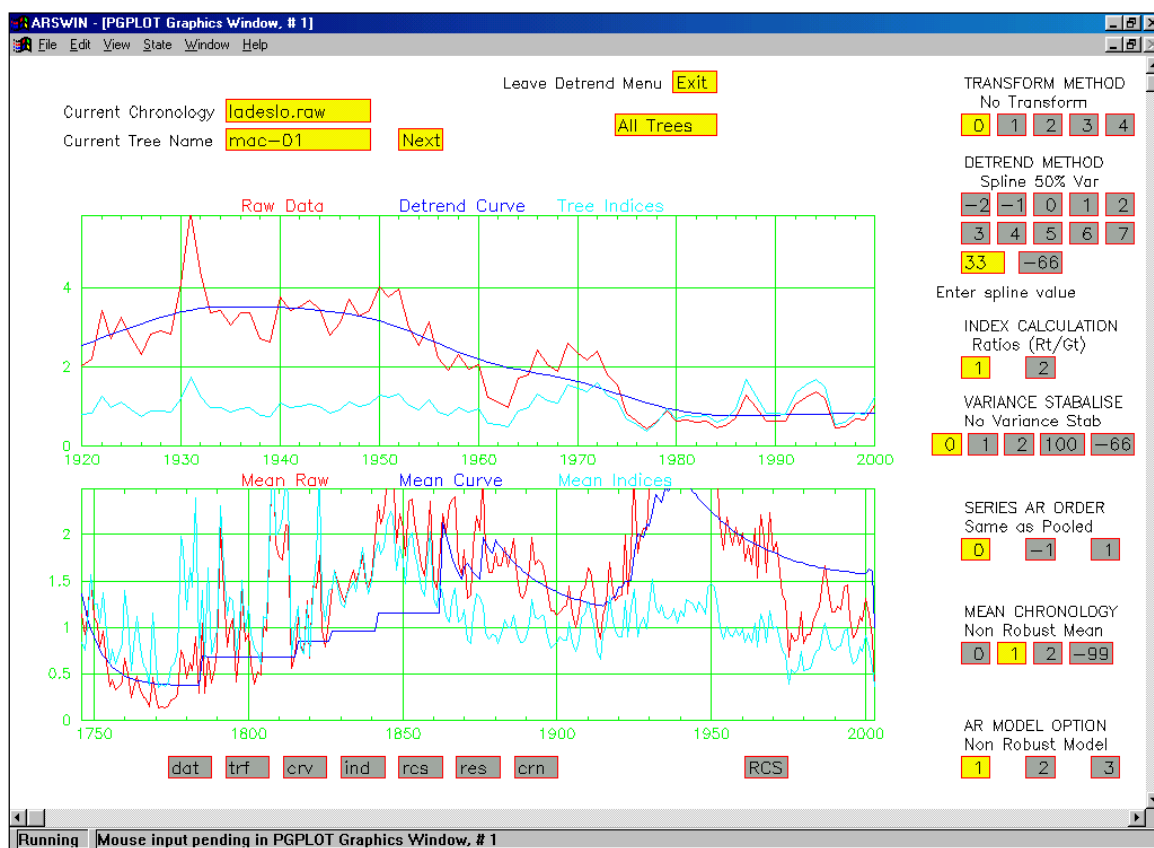
Slika 41: Delovno okno novega programa PAST-4

7.8.3.4 ARSTAN (Arstan for Windows)

ARSTAN oz. ArsWIN je program namenjen standardizaciji časovnih vrst. Prilagojen je uporabi v dendrokronologiji, napisal ga je ameriški dendrokronolog Ed Cook. Program obstaja tudi v Oknih in eno od Okenskih verzij pa Anglež Tom Melvin, vendar ta verzija programa ni v širši rabi. Avtorji originalne verzije ARSTAN-a za MS-DOS so nekoliko kasneje kot Melvin program prevedli tudi v Okensko okolje, tako, da sedaj originalni ARSTAN deluje tudi v Oknih (Cook 1985; Holmes, Adams in Fritts 1986; Holmes 1994). Program je neobhodno potreben pri standardizaciji zaporedij širin branik in omogoča številne tipe standardizacij – od preproste linearne regresije preko negativne eksponentne funkcije do kubičnih zlepkov in RSC standardizacij. Za uporabo je nekoliko neroden in občutljiv, vendar ko datoteke pripravimo tako kot to program zahteva, dela program brez težav. Na osnovi teoretičnega modela lahko izvedemo standardizacijo podatkov in oblikujemo standardizirano kronologijo. Postopek standardizacije je sestavljen iz iskanja primerne regresijske krivulje in računanja razlik med prilagojenimi in dejanskimi vrednostmi. Sodobni programi (npr. ArsWIN, ARSTAN) poleg te osnovne funkcije opravijo še analizo časovne vrste s pomočjo ARMA modela za analizo časovnih vrst (Box / Jenkins 1970).

Standardizacija v programu ArsWIN (Holmes/ Adams / Fritts 1986; Holmes 1994) poteka po naslednji shemi. Najprej določimo tip funkcije, s katero bomo izravnali podatke. Možnosti je več in v našem primeru so se najbolj izkazali kubični zleпки z različnimi širinami intervala, pri tem smo uporabili tako gibljiv zlepek, da smo ohranili 50% variabilnosti izvornih podatkov (Richard Holmes, os. kom.).

S kubičnimi zleпки lahko zaporedje širin branik izravnamo in odstranimo trend. Večina togih funkcij je v primeru bolj ali manj naravnih gozdnih sestojev neuporabna, zato se je v praksi najbolj uveljavila izravnava s kubičnimi zleпки in drsečimi sredinami različnih širin intervala. Kubični zlepek je v bistvu krivulja, sestavljena iz več krivulj - kubičnih polinomov. Kubični zlepek prve stopnje mora zadostiti nekaterim osnovnim matematičnim zahtevam: mora imeti prevoje, mora biti zvezno odvedljiv, drugi odvod mora biti minimalen (Cedilnik 1991). S spreminjanjem števila točk, ki morajo biti med konci kubičnih polinomov, določamo kubičnemu zleпку togost prilagajanja dejanskim podatkom. Kubične zlepkе sta leta 1981 v dendrokronologijo uvedla Cook in Peters (Cook / Peters 1981), ker sta se zavedala pomanjkljivosti standardizacije podatkov s togimi funkcijami.



Slika 42: Eden od številnih ekranov programa ArsWIN (c T.Melvin), kjer je prikazana osnovna kronologija, njena prilagojena različica in prilagojena krivulja (v našem primeru kubični zlepek s širino intrevala 33 let).

Po izravnavi sledi računanje indeksnih vrednosti in nato oblikovanje povprečne kronologije. Pri izbiri povprečja sta na voljo dve možnosti, in sicer

izračun navadne aritmetične sredine in izračun t.im. robustne aritmetične sredine (Mosteller / Tukey 1977), ki ne upošteva vrednosti, ki so izrazito nad ali pod aritmetično sredino.

Rezultat analize kronologij s programom ArsWIN so tri krivulje in izčrpen izpis vseh vmesnih rezultatov in statističnih kazalcev. Prva krivulja, imenovana standardna krivulja (STD), predstavlja navadno aritmetično ali robustno aritmetično sredino indeksiranih kronologij v analizi.

Druga krivulja (RES) bazira na avtoregresivni izravnavi indeksnih kronologij. Načeloma je avtokorelacija popolnoma odstranjena s ponovno avtoregresivno izravnavo. Ta postopek se imenuje "čiščenje" (an. rewhitening).

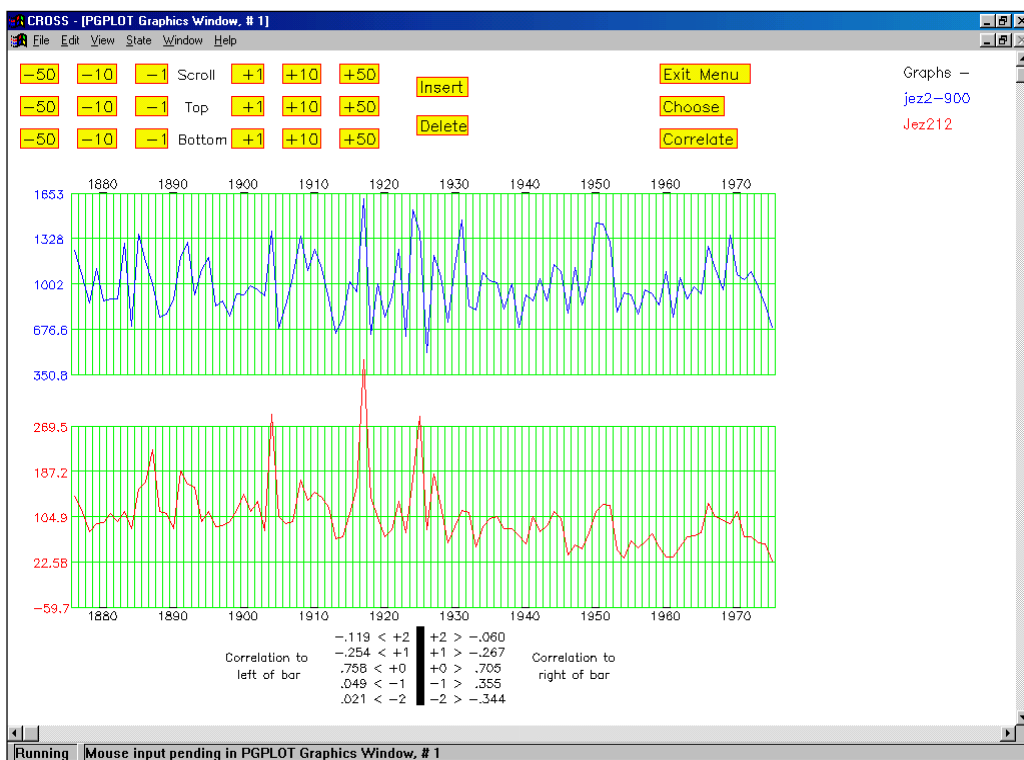
Tretja krivulja (ARS) je izpeljana iz kronologije RES. Pri tem se s postopkom multivariatne avtoregresivne analize poudarijo skupne lastnosti vseh krivulj, v kronologijo pa se umetno vstavi del originalne avtokorelacije. Ta kronologija ima zaradi tega najboljši klimatski signal in se jo pogostokrat uporablja za preučevanje vpliva klime na širino branike.

7.8.3.5 COFECHA (CROSS for Windows)

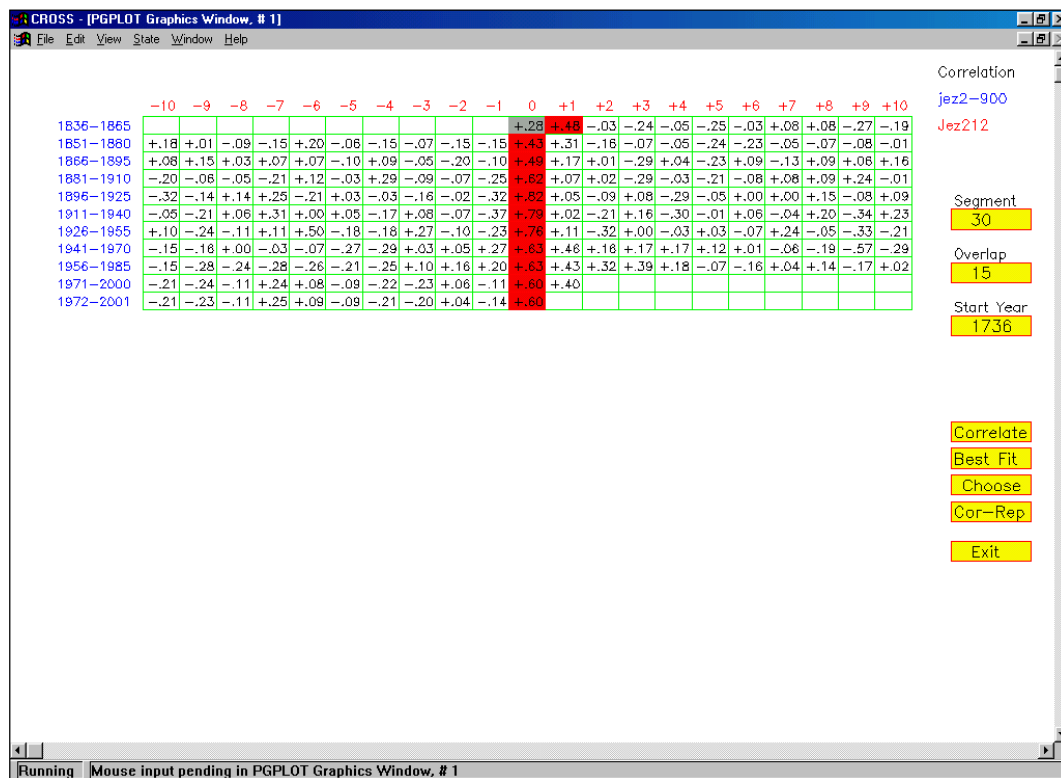
Program COFECHA in njegova različica za Windows okolje avtorja T. Melvina spada v skupino programov za preverjanje kvalitete izmerjenih podatkov in njihovega prilagajanja na kronologijo rastišča ali širšega območja.

Prvotna različica programa je delovala v DOS okolju in je bila zelo nerodna za delo. Moderna različica deluje v okolju Windows in omogoča preprosto in učinkovito delo.

Namen programa je preverjanje datacije. To pomeni, da izračuna korelacijo med izmerjeno krivuljo in kronologijo rastišča in rezultat korelacije prikaže na ekranu. Uporabniku omogoča izračun korelacije za poljubno dolge segmente kar nam močno olajša analizo t.i. "problematičnih območij". Te program prikaže na ekranu kot ga vidimo na sliki 45. Program omogoča tudi vrivanje in brisanje brani in nam s tem omogoči interaktivno sinhroniziranje.



Slika 43: Primerjava standardne kronologije rastišča (zgoraj modro), z vzorcem s sosednjega rastišča (spodaj, rdeče). Na dnu ekrana je vidna trenutna korelacija med kronologijo in vzorcem ter kakšna bi bila korelacija, če bi vzorec premaknili v levo ali desno za 1 ali 2 leti.



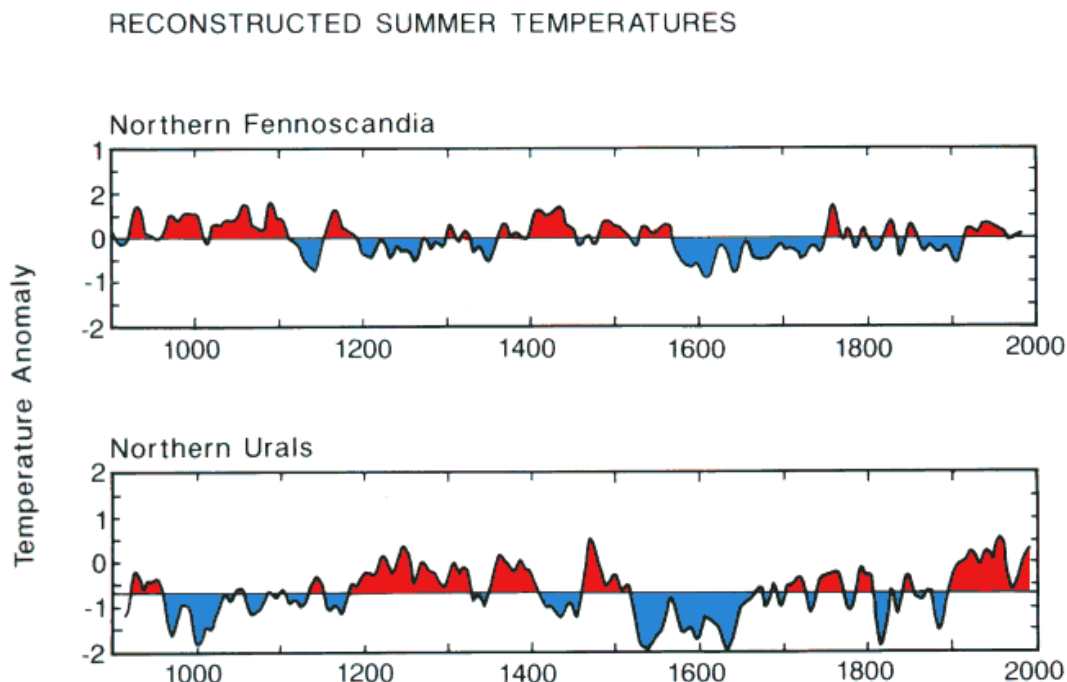
Slika 44: Ekran iz programa COFECHA, kjer je natančno po segmentih prikazano kako se zaporedje širine branik ujema s standardno kronologijo.

8 Povezanost dendrokronologije z drugimi vedami

Zaradi razprostranjenosti dreves na Zemlji, njihove dolgoživosti in zato ker drevesa lahko rastejo v različnih ekstremnih rastnih razmerah (ob ledenikih, na robovih puščav, na drsečih pobočjih...) se dendrokronologija ne uveljavlja samo kot samostojna veda ampak tudi kot veda, ki lahko s podatki o širinah branik pomaga številnim drugim vedam, ki do pred nedavnega niso uporabljala podatkov iz širin branik. Med takšne vede spadajo na primer glaciologija, geomorfologija, seizmologija, vulkanologija, klimatologija in podobne vede.

Kljub izredno široki uporabnosti pa se je v naravoslovju dendrokronologija še najbolj uveljavila na dveh področjih **klimatologiji** in **ekologiji**.

V ekologiji se je še posebej utrdila v poznih 70-ih letih, ko so gozdovi v Evropi velikopovršinsko propadali zaradi neznanega vzroka. Združitev ekologije in dendrokronologije je dala povsem novo znanstveno disciplino imenovano **dendroekologija**. Ta veda se ukvarja z vplivom okolja na širino branike in je kot taka zelo uporabna ko želimo odgovoriti na različna ekološka vprašanja npr. kako gostota sestoja vpliva na širino branike, kaj se dogaja s priraščanjem dreves zaradi vnosa dušika v sestoje, kaj se bo zgodilo z rastjo dreves, če se bo vsebnost CO₂ v atmosferi še naprej povečevala, kako SO₂ vpliva na rast dreves, itd. S kombiniranjem dolgih kronologij in različnih okoljskih podatkov lahko dobimo vpogled, kaj se je dogajalo s prirastkom dreves v daljših časovnih obdobjih. To nam pomaga razumeti preteklost in sedanost dogajanj v različnih gozdnih ekosistemih na Zemlji. Nekoliko starejša od dendroekologije je povezava dendrokronologije in klimatologije. Veda, ki je s takšno povezavo nastala se imenuje **dendroklimatologija**. Ukvarja se s preučevanjem odnosa med širino branike in klimo ter na osnovi širine branik v določenem letu sklepa na klimatske razmere v tem letu. S pomočjo modelov med širino branike in klimo lahko z dendroklimatologijo ugotavljamo spreminjanje klime na Zemlji v obdobjih za katere ne obstajajo instrumentalne meritve, torej pred letom 1700, na veliko območjih pa celo pred letom 1800. Obstajajo celo rekonstrukcije klime, ki podajajo nihanje povprečnih letnih temperatur za zadnjih 10 in več tisoč let za določena območja na Zemlji. V zadnjem času postaja zaradi klimatskih sprememb dendroklimatologija vse pomembnejša. Pomaga nam odgovoriti na vprašanja kaj se s klimo na Zemlji dogaja in kako hitre so te spremembe, lahko odgovorimo tudi na vprašanje ali so se podobne klimatske spremembe kot jih doživljamo sedaj, pojavile že kdaj v preteklosti. Velikoprostorske dendroklimatološke raziskave so dale številne in zelo zanimive rezultate. Najbolj tipična rezultata dendroklimatoloških študij sta določitvi dveh relativno dolgih, klimatsko izjemnih obdobj v zadnjih nekaj tisoč letih, to sta "Mala ledena doba" v obdobju od 1350 (1450) - 1900 in "Srednjeveško toplo obdobje" približno od 900 - 1250 (1300) (Briffa et al. 1990) –glej Slika 45



Slika 45: Spreminjanje povprečne letne temperature v severni Fenoskandiji in severnem Uralu. Vidno je toplo obdobje pred letom 1100 in hladno obdobje med leti 1100 in 1900.

Dendrokronologija ni našla uporabe samo v naravoslovnih znanostih, ampak se je razširila tudi na področja kjer z rastočimi drevesi nimajo veliko skupnega, zato pa toliko več s starimi lesenimi predmeti in najdbami. Ta področja so arheologija, restavratorstvo ter varovanje naravne in kulturne dediščine. Zaradi možnosti datiranja neznanega lesenega vzorca s pomočjo dolgih kronologij se je razvila cela veja historične dendrokronologije, kjer s pomočjo meritev širine branik vzorca in dolgih kronologij datiramo posamezne lesene najdbe in predmete. Na ta način si strokovnjaki pomagajo pri ugotavljanju starosti lesenih ostrešij, vrednejših lesenih predmetov in različnih lesenih konstrukcij, to pa jim pomaga pri oblikovanju pravih odločitev in strategij za obnovo posameznih lesenih konstrukcij oz. pri ločevanju originalov od ponaredkov.

Poleg vsega prej naštetega je dendrokronologija tudi ena izmed tehnik datiranja lesenih objektov. Zaradi narave branik spada med najnatančnejše tehnike datiranja lesenih objektov za obdobje zadnjih 12.000 let na svetu. Manj natančna tehnika datiranja lesa v tem časovnem oknu je še metoda z radioaktivnim ogljikom C-14, kjer je natančnost 20-150 let. Velikokrat obe tehniki datiranja kombiniramo in na ta način izboljšamo zanesljivost datiranja.

9 Zgodovina dendrokronologije

Raziskovanje priraščanja dreves ima, za razliko od S Amerike, v Evropi dolgo tradicijo. Že Leonardo da Vinci je opazoval povezavo med širino branike in padavinami in zapisal, da so bile branike ožje v sušnem letu in širše v mokrem.

Za razvoj dendrokronologije in za njeno uveljavitev je bilo potrebno najprej razviti nekatere druge vede - lesno anatomijo, botaniko z ekologijo in fiziologijo ter klimatologijo. Te vede so osnova na katerih gradi dendrokronologija in vse njene izpeljanke.

Leta 1770 je francoz H.L. Duhamel de Monceau ugotovil kje nastajata les ter skorja in tako odkril kambijevo cono, vendar je šele leta 1828 F. Mirbel odkril kako pomemben je kambij in kakšna je njegova vloga pri nastajanju lesa.

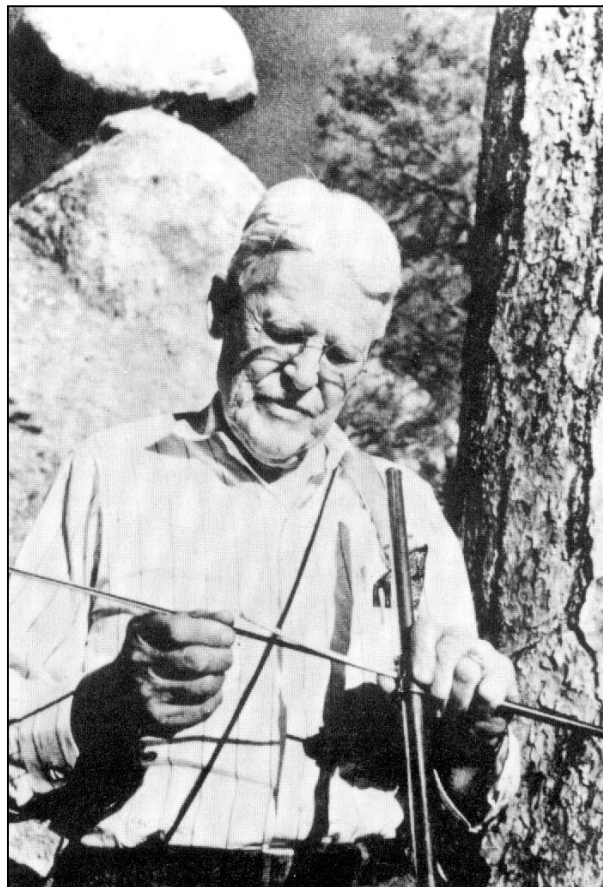
V prvi polovici 19. stoletja so se v botaniki razvila znanja s področja anatomije in fiziologije rastlin do te mere, da se jih je dalo uporabiti tudi širše, na primer v dendrokronologiji. Theodor Hartig je na osnovi teh spoznanj lahko že leta 1855 dobil dokaj jasno sliko o načinu nastanka in razvoju drevesne branike. Njegov sin Robert Hartig je svoje življenje posvetil izključno preučevanju priraščanja dreves in je v letih 1869-



1901 izdal 34 člankov na temo anatomije in ekologije nastanka branik. S pomočjo značilnih branik je že konec 19. stoletja uspel datirati ekstremne dogodke kot so toča, pozeba in napadi insektov.

Večina najpomembnejših temeljev dendrokronologije je bila položena do prve svetovne vojne, čeprav so bile prve dendrokronološke študije v Evropi do leta 1920 razmeroma redke. Tako je na primer leta 1892 Shvedov dokazal, da obstaja jasna povezava med debelinskim prirastkom robinije in padavinami v okolici Odesse. Istočasno je tudi ugotovil, da različni lokalni dejavniki vplivajo na rast in razvoj drevesa. V Holandiji je Kaptein leta 1917 dokazal, da klima vpliva na rast dreves, kaj več pa o tej študiji ni znanega. Na Švedskem sta Laitakari leta 1920 in Eide leta 1926 izvedla prvi dendroklimatološki študiji.

Čeprav je bil osnovni princip dendrokronologije - navzkrižna primerjava - poznana že v 19. stoletju pa je bil Američan Andrew Elmer Douglass prvi, ki je bil dovolj daljnoviden, da je uvidel potencial navzkrižne primerjave in možne uporabe na področjih arheologije, restavratorstva, ekologije in klimatologije.



Le redke vede so bile tako odvisne od enega samega človeka kot je bila dendrokronologija. Mladi astronom Lowellovega astronomskega observatorija v Flagstaffu v Arizoni (ZDA) se je začel daljnega leta 1901 zanimati za vpliv sončnih peg in sončeve aktivnosti na klimo na Zemlji. Ker v bližnji in daljni okolici observatorija ni bilo na razpolago dovolj dolgih meteoroloških vrst se mu je utrnila genialna ideja, da so v branikah dreves, ki so rasli v bližnji polpuščavi morebiti zabeležena nihanje padavin in temperatur. Svojo predpostavko o odvisnosti širine branike od klime je gradil na naslednjih temeljih:

1. Širina branike je odvisna od hranil, ki se nahajajo v zemlji
2. Dostopnost hranil je močno odvisna od razpoložljive vode v tleh
3. Zaradi tega je širina branik neposredno odvisna od razpoložljive vode v tleh

To svojo teorijo je preveril na panjih 350 do 500 let starih borov (*Pinus ponderosa*), ki so rasli v bližini observatorija. Kaj hitro je odkril, da so bile branike v zelo suhih letih ozke, v bolj mokrih pa široke. Opazil je tudi tipično sosledje širin branik, ki je bilo pri različnih drevesih enako. S primerjavo izvrtkov živih dreves in panjev je na temelju značilnega vzorca rasti ugotovil kdaj so posekali drevesa katerih panje je preučeval.

Leta 1906 se je Douglass zaposlil na univerzi v Arizoni in ostal tam do svoje smrti. Leta 1911 je na osnovi vzorcev z 80 km oddaljenega najdišča dognal, da so prirastni vzorci teh dreves podobni tistim iz bližine laboratorija. Ko je kronologije vzorcev združil je sestavil 500 letno kronologijo s katero je lahko ugotovil kdaj je bilo kakšno drevo posekano in kdaj so kmetje postavili skednje in kmetije. Okrepljen s temi izkušnjami se je leta 1914 lotil datiranja lesa iz arheoloških in zgodovinskih najdišč ameriških Indijancev v puščavi Nevada. Z arheologom Clarkom Wisslerjem sta odšla v Novo Mehiko in tam preučevala indijanske naselbine. S pomočjo različnih vzorcev

iz razpadlih hiš sta sestavila 139 letno kronologijo, ki pa se na žalost ni dala sinhronizirati z obstoječo kronologijo iz Arizone. Nastopila je nekoliko nerodna situacija, vendar je hkrati pomembno poudariti, da je bila to prva "plavajoča kronologija" v zgodovini dendrokronologije. Arheolog Wissler je bil nekoliko razočaran, obupal pa ni. Iskali so naprej in leta 1920 našli znameniti kos HH-39 Showlow, ki je spojil obstoječo kronologijo iz Nevade in plavajočo iz Nove Mehike. Za arheologe je bil ta rezultat senzacionalen, z njegovo pomočjo so ugotovili, da so Indijanci Pueblo Bonito svojo naselbino zgradili 39 let pred Azteki; hkrati pa so lahko kar naenkrat datirali 40 različnih indijanskih naselbin v Novi Mehiki, med drugim tudi znano naselbino Mesa Verde. Osem let po tem odkritju so decembra 1937 v Tucsonu, Arizona na pod univerzitetnim stadionom ustanovili Laboratorij za Raziskovanje branik (Laboratory of Tree Ring Research). Njegov prvi direktor je bil A.E. Douglas. Laboratorij se je vse do leta 1958 ukvarjal izključno z datiranjem arheoloških vzorcev, v tem času so nabrali skupno 20.000 vzorcev iz 1.320 različnih indijanskih naselbin.

Leta 1954 je E. Schulmann na zgornji gozdni meji v White Mountains v Kaliforniji odkril izjemno stara drevesa, preko 4000 let stare ščetinaste bore (an. Bristelcone pine - *Pinus aristata*), za katere so ugotovili, da so najstarejša živa bitja na Zemlji. Kronologija teh borov je danes med najdaljšimi na svetu in se uporablja za kalibracijo radiokarbonske metode C-14.

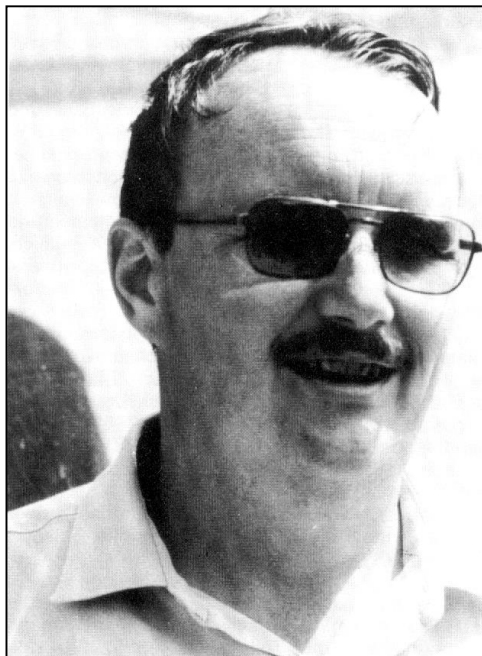
Dendrokronologija se v kontekstu kakor se je uporabljala v S Ameriki v Evropi ni uveljavila do leta 1937, ko je nemški gozdar in botanik Bruno Huber (1899-1969) spoznal pomen in potencial dendrokronologije. Od Douglasa je prevzel spoznanja in metodologijo ter vse skupaj začel uvajati v Evropi. Leta 1941 je na nemški gozdarski akademiji predaval o sestavi 250 letne moderne kronologije in o datiranju lesenih kolov iz bronaste dobe. V letih, ki so sledila je Huber sistematično zbiral material in sestavljal absolutno datirane in plavajoče kronologije. Ko mu je uspelo datirati večje število objektov v južni Nemčiji, so ga leta 1963 povabili v Švico, kjer so ravno izkopavali kolišča. Na osnovi dendrokronoloških analiz mu je uspelo datirati tri kolišča in med njimi vzpostaviti časovni odnos. Bruno Huber se je ukvarjal tudi z dendroklimatologijo in dendroekologijo. Znana sta dva njegova dela s tega področja, prvo se posveča predvsem drevju, ki raste na zgornji gozdni meji, drugo delo pa rasti in prirastku dreves v kolinskem pasu.

Za poznavanje zgodovine dendrokronologije je nujno omeniti vsaj še dva raziskovalca. Prvi je Američan Harold C. Fritts (glej sliko), drugi pa Švicar Fritz Schweingruber.

Hal Fritts je leta 1963 postavil dendrokronologijo na čvrsta statistična tla. V dendrokronologijo je uvedel statistične metode in računalnik. Posebej aktiven je bil na področju dendroekologije in dendroklimatologije. Njegove metode in principe še danes uporabljajo bolj ali manj vsi dendrokronološki laboratoriji na svetu.

Fritz Schweingruber je starosta evropske dendrokronologije in prodoren švicarski dendrokronolog. Deluje na področju klasične dendrokronologije, dendroklimatologije in dendroekologije. S svojimi pedagoškimi izkušnjami in švicarsko trmo je vzgojil številne evropske dendrokronologe, postavil dendrokronološko mrežo za severno poloblo in utrdil densitometrijo kot dopolnilo meritvam širin branik.

Zgodovine dendrokronologije ne moremo zaključiti, ne da bi omenili pomembnega nemškega dendrokronologa in lesnega anatoma Dietra Ecksteina, ki deluje v istem času kot Fritz Schweingruber. S poglobljenimi študijami arheoloških najdišč v Nemčiji je ob pomoči številnih nemških sodelavcev dendrokronologijo utrdil na področju dendroekologije, arheologije, konzervatorstva in restavriranja starih stavb.



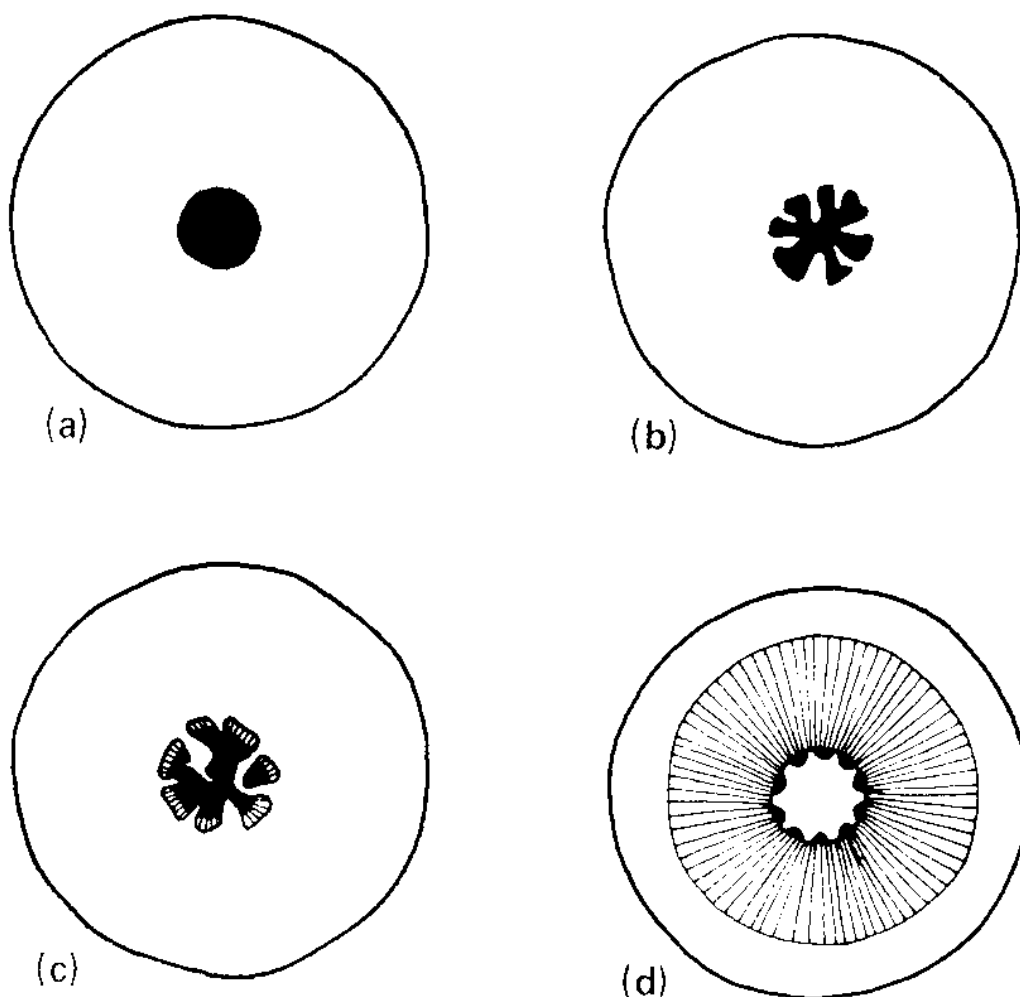
Trenutno deluje v svetu preko 1000 dendrokronologov, združujejo se na rednih letnih konferencah in na vsaka štiri leta na svetovnem dendrokronološkem kongresu. Izmenjava znanj in podatkov poteka preko osebnih stikov in preko elektronskih medijev. Še posebej dejavna je spletna konferenca ITRDB forum. Ameriški dendrokronologi in del evropskih podatke redno prispeva v ameriško bazo dendrokronoloških podatkov NOAA v Boulderju v Koloradu (ZDA), tisti pa ki iz taksnih ali drugačnih razlogov niso pripravljene dati podatkov v mednarodno zbirko prispevajo podatke o kronologijah v Evropsko bazo dendrokronoloških podatkov, ki hrani samo informacije o obstoječih kronologijah. Baza je shranjena na strežniku v Ljubljani, Slovenija.

10 RAZVOJ DREVESA (paleobotanika rasti drevesa)

Dendrokronologi se ne ukvarjajo samo z živimi drevesi ampak se pogostokrat srečajo tudi z mrtvimi drevesi in subfosilnimi ostanki, zato je koristno če imajo nekaj znanja tudi iz paleobotanike oz. bolj natančno iz zgodovine nastanka drevesa, kambija in branike.

10.1 Izvor drevesnega habitusa

Nastanek kambija in otrdelih sekundarnih tkiv, posebno lignificiranega ksilema, je bil predpogoj za razvoj drevesne oblike rastlin. Ogleдали si bomo skupino rastlin iz devona, ki sicer niso filogenetsko povezane, vendar nam prikazujejo razvoj tkiv, od majhnih zelenih rastlin do velikih, drevesu podobnih rastlin.



Slika 46: Prečni prerezi različnih rastlin iz devona, kažejo organizacijo ksilema, ki se je pojavljala na prehodu od zelatega k lesnatemu habitusu. (a) *Rhynia*, čvrsto jedro primarnega ksilema. (b) *Asteroxylon*, primarni ksilem je nekako nasekan. (c) *Schizopodium*, traheide v radialnih vrstah se pojavljajo na konicah trakov. (d) *Calixylon*, sekundarni ksilem je obilen. Primarni ksilem obstaja kot obroček, ki ovija stržen. Temno pobarvan=primarni ksilem, črtano=sekundarni ksilem.

Najpreprostejša vaskularna rastlina iz paleozoika je bila *Rhynia* (fam. Psilophyta). Rasla je samo zaradi delovanja apikalnega meristema, kljub temu je že imela tkivni sistem, ki je sestavljal preproste organe (Slika 46). Preučevanje prečnega prereza brezlistnega stebela je pokazalo, da ima to stebelce že majhen, a trden cilinder vaskularnih tkiv (ksilema in floema) imenovanih protostela. Steblo te rastline je bilo vitko in pri vrsti *Rhynia gwynne-vaughani* je zraslo do 20 cm v višino. Pri rastlini *Asteroxylon*, (verjetno praprotnica ali primitiven lisičjakovec), ima monopodialno steblo že majhne lističe, krpast primarni ksilem in čvrstejšo rast od *Rhynie* (Slika 46). Najvišja stebela *Asteroxylona* so dosegla višino do pol metra in debelino do enega centimetra. *Schizopodium*, brezlistna rastlina iz družine praprotnic (srednji devon), že kaže prve znake razvoja sekundarnih tkiv. Ksilem protostele je krpast in za razliko od *Asteroxylona*, so bile traheide organizirane v radialne obroče, kar naj bi nakazovalo, da je prisoten lateralni meristem (skica 7-1c). Očitno pa je, da kakega pravega vaskularnega kambija še ni bilo, ker so robne traheide zelo nepravilnih oblik in dimenzij. Na podlagi teh ugotovitev se zdi, da je bil meristem, ki je proizvedel te prevodne elemente, nekje na prehodu med prokambijem in pravim vaskularnim kambijem.

Pravi vaskularni kambij se pojavi šele pri rastlini *Tetraxylopteris*, progimnospermi iz srednjega devona (Beck 1970). Progimnosperme so bile skupina rastlin, ki še niso proizvajale semen, imele pa so nekatere strukturne značilnosti današnji golosemenk. Domnevajo, da so semenovke izšle prav iz te skupine. Listi *Tetraxylopterisa* so bili podobni listu praproti, deblo (debelo do 7 cm) pa je že vsebovalo les, podoben lesu današnjih golosemenk. Značilen drevesast izgled se je razvil šele kasneje pri *Archaeopterisu*, progimnospermi iz zgornjega devona, ki je imela velike (do 1 m), praproti podobne liste. Leseno deblo *Archaeopterisa* (skica 7-1d), ki je bilo dolgo poznano pod imenom *Callixylon*, je bilo izredno debelo (tudi do 1.5 m v premeru) in je imelo aktivni vaskularni kambij. Les *Archaeopterisa* je bil morfološko zelo enostaven, saj so ga sestavljale samo traheide in parenhim. Bil je zelo podoben lesu današnjih golosemenk, posebno pa lesu *Araukarije*. V celičnih stenah aksialnih traheid so našli veliko okroglih obokanih pikenj, kar kaže, da se je voda v beljavi tega devonskega pradrevesa pretakala zelo intenzivno. Trakovi (trakovni parenhim) so bili široki več celic (do 4) in so poleg parenhima vsebovali tudi traheide (Beck 1970).

Velja se vprašati, zakaj je drevesni habitus ravno v devonu dobil take razsežnosti. V glavnem lahko samo ugibamo, vendar se zdi, da sta bila vpletena dva dogodka: (1) izravnavanje in prepletanje razcepljenih hitro rastočih vej, kar je vplivalo na oblikovanje listov in (2) razvoj biokemičnih mehanizmov za sintezo fenilpropanoidnih molekul in njihovo polimerizacijo v primitivne substance podobne ligninu.

Listi so pri drevesastih rastlinah glavni vir hormonskih spodbujevalcev, ki vplivajo na podaljševanjem internodijev (npr. Ginkgo) in sodelujejo pri radialni rasti (poglavje 3). Zato lahko predpostavimo, da so se primitivni fiziološki sistemi za nastanek sekundarnih tkiv pojavili z razvojem primitivnega lista. Ugotovili so, da hormoni, ki prihajajo iz rastočega popka nadzorujejo iniciacijo vaskularnega kambija. To je jasno pokazal cepilni

preizkus s paradižnikom (Caruso in Cutter 1970), kjer so cepili normalen cepič na mutanta, ki ni bil sposoben iniciacije vaskularnega kambija. Če je mutant rasel v sterilni kulturi, z odrezanimi vršički listi in kličnimi listi, se rast vaskularnega kambija ni sprožila, če pa so na takega mutanta cepili popek normalnega paradižnika, je vaskularni kambij pričel rasti. Rast se je začela v hipokotilu in kmalu proizvajala sekundarni ksilem in floem. Vršiček torej zagotavlja hormone in metabolite potrebne za razvoj lateralnega meristema in hipokotila. V korenini redkve je šele prisotnost auksinov in citokininov omogočila začetek rasti in nadaljnjo rast vaskularnega kambija (Torrey in Loomis 1967). Očitno je torej, da so na drevesast izgled rastlin v devonu, vplivali biokemični procesi, ki so bili podobni današnjim in hkrati nujno potrebni, da je začel nastajati vaskularni kambij v sicer nelesnatih rastlinah.

Najpomembnejši element pri razvoju drevesastega izgleda je bil lignin. Lignin ima stabilizacijsko in utrjevalno vlogo v celični steni. Vzdrževanje velike, drevesaste oblike rastline je v veliki meri odvisno od moči lignificiranih sekundarnih tkiv. Ko so s poskusom želeli ugotoviti bistvo prastarih procesov, vpletenih v nastanek lignina, sta Manskaja in Drozdova (1968) analizirali sestavo celične stene pri različnih skupinah danes živečih rastlin. Ugotovili sta, da celične stene alg in mahov ne vsebujeta lignina, po drugi strani pa sta ugotovili, da lisičjakovci, praproti, golosemenke in kritosemenke vsebujejo lignin v različnih količinah (tabela 2).

Preglednica 5: Prisotnost lignina v danes živečih rastlinah. Ligninski ostanek (vanilin in syringaldehid) so pridobili z alkaličnim nitrobenzenom. Ponatisnjeno iz knjige "Geochemistry of Organic Substances" by Manskaya and Drozdova, 1968.

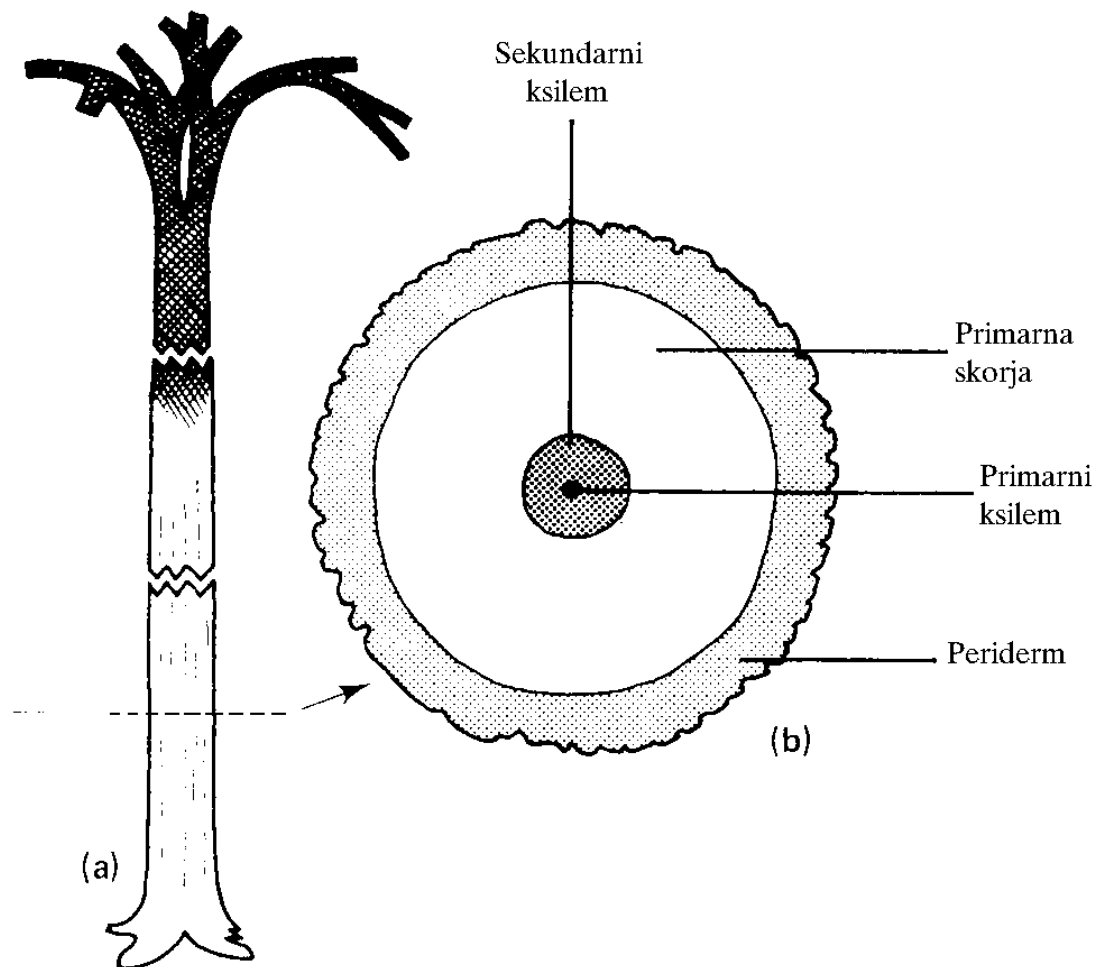
Rastlina	Vanilin (%)
<i>Fucus serratus</i> (alga)	v sledeh
<i>Polytrichum commune</i> (mah)	v sledeh
<i>Lycopodium</i> sp. (lisičjak)	4.0
<i>Alsophila australis</i> (praprot)	4.0
<i>Araucaria bidwillii</i> (iglavec)	6.0
<i>Casaurina stricta</i> (listavec)	2.0 (+1.0 syringaldehid)

Bilo je očitno, da so le kopenske rastline razvile sposobnost biosinteze lignina in še to samo tiste skupine ki imajo ali so imele drevesast videz. Nadalje še velja, da so se ostali gradniki celične stene (celuloza in hemiceluloze) očitno pojavili že v srednjem prekambriju (Barghoorn 1964). Velike pokončne rastline so se pojavile šele v devonu, kot po naključju ravno takrat, ko so se razvili tudi mehanizmi za biosintezo lignina.

10.2 Variabilnost v debelinski rasti

V zgodnjem karbonu se je drevesast izgled rastline razvil pri mnogih rastlinah, vključno z rodovi *Lycopsidea* in *Sphenopsida*. Pri nekaterih vrstah se je razvil sekundarni tkivni sistem precej neobičajne strukture, ki ga ni moč najti pri današnjih rastlinah. V fosilih *Lycopsidea* so ugotovili, da je sekundarna debelinska rast temeljila na zelo intenzivni rasti periderma in ne na rasti vaskularnega kambija, kot bi morebiti pričakovali.

Lepidodendron je bil do 30 m visoko drevo z dolgim ravnim deblom. Na vrhu tega debla so rasle veje, na katerih so bili spiralno nameščeni listi. Anatomska rekonstrukcija Lepidodendrona je pokazala, da je v drevesu sicer obstajal vaskularni kambij, ni pa bil tako pomemben kot pri današnjih drevesih, ker je proizvajal le malo sekundarnega ksilema (skica 7-2).



Slika 47: (a) Rekonstrukcija debla *Lepidodendrona*. Rombasto oblikovani listi, so rasli dokaj tesno eden ob drugem in so zato dajali videz blazine. (b) Deblo je bilo sestavljeno iz debelega periderma in relativno nepomembnega sekundarnega ksilema. Na spodnjem delu debla ni bilo vej. Z dovoljenjem The Ontogeny of Carboniferous Arborescent Lycopsidea.

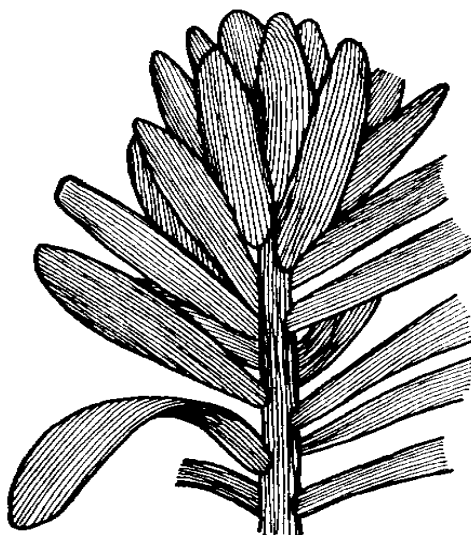
Ne samo, da so ugotovili relativno majhno vsebnost lesa v deblu, tudi traheide so imele relativno tanke stene in zaradi tega le šibko mehansko vlogo. Ker ni imel drugih nosilnih tkiv, je lepidodendron razvil debelo primarno skorjo. Znotraj debele primarne skorje je nastalo, zaradi sukcesivne periklinalne delitve meristema, več radialnih nizov celic, ki so sestavljale sekundarno skorjo ali periderm. Za razliko od periderma modernih golo- in kritosemenk (poglavje 5) felogen pri *Lepidodendron* ni jasno izražen (Eggert 1961). Namesto njega je razvil razpršen meristem, katerega proizvodi so bili včasih vlaknati, mogoče tudi živi, zanesljivo pa so imeli močno podporno

funkcijo. Čeprav je bil habitus *Lepidodendrona* v karbonu zelo uspešen pa se je izkazal za slabšega v obdobju različnih sprememb v okolju, verjetno zato, ker je preslabo razvit sekundarni ksilem dopuščal le omejen transport vode.

Mehanizmi, ki so izvajali in nadzorovali radialno rast so se dokončno razvili do konca paleozoika. Za primer si pogledjmo *Sphenophyllum*, vrsto iz rodu *Sphenopsida*, ki je uspevala v karbonu. To ni bilo drevo ampak majhna, razvejana lesnata rastlina podobna vinski trti z jasno izraženimi nodiji in internodiji. Sem ter tja je zrasla tudi do 10 m v dolžino in se je plazila po tleh v karbonskem gozdu. Analiza protostel je pokazala trikotno organizacijo s tremi protoksililemskimi trakovi in centralno nameščenim metaksilemom (Darrah 1968). Vaskularni kambij je izhajal direktno iz primarnega ksilema in je najprej proizvajal les; predpostavljamo, da v trikotnem vzorcu (slika 4). Ko se je radialna rast nadaljevala, je steblo dobivalo vedno bolj krožno obliko. Na prehod iz trikotne na krožno obliko sekundarnega ksilema, je vplivalo povečano število periklinalnih delitev in/ali povečevanje kambialnih produktov. Podobno se je razvil tudi ovoj lesa okoli krpastega primarnega ksilema v koreninah nekaterih današnjih drevesastih rastlin.

10.3 Vpliv dolgih poganjkov

Omenili smo že, da je značilnost progimnosperme *Archaeopterisa* zelo obilen primarni ksilem. Prave drevesaste golosemenke so rasle že v karbonu. Najbolj znan je rod *Cordaites* in ostali *Cordaitales*. Šlo je za visoko drevo (preko 30 m) z zelo debelim, a enostavno grajenim deblom. Les je bil enostavno grajen, saj aksialni sistem vsebuje samo traheide, parenhim pa je, kjer se pojavlja, širok samo eno celico. Takšna zgradba lesa močno spominja na zgradbo lesa pri današnjih iglavcih. Na vejah so bili dolgi, spiralno nameščeni listi s karakterističnim vzporednim ožiljenjem (skica 7-3). Vegetativne veje *Cordaitesa* bi lahko zelo ohlapno označili za dolge poganjke.



Slika 48: Vegetativni poganjek *Cordaitesa* kaže paralelno ožiljene liste, ki rastejo iz stebela v primernem ritmu. Na pojav poganjkov s podaljšanimi členki (dolgi poganjki) je verjetno vplival razvoj močnejšega sekundarnega ksilema. Vir: Darrah 1960; slika 36, str.

159; Copyright 1960.

To pomeni, da bi lahko os poganjka razdelili na internodije, kjer steblo raste in na nodije, kjer so pritrjeni listi. Najbolj jasen dokaz za internodijsko rast so našli v strženu; to so bile cele vrste luknjic, ki so ustrezale deležu internodijske rasti stebela (Arnold 1947). Tudi veje pri Archeopterisu so bili neke vrste dolgi poganjki (glej skico v Beck 1970), zato bi si tudi tu lahko pomagali z nodiji in internodiji.

Auksin ima pomembno vlogo pri začetku rasti vaskularnega kambija in v različnih fazah radialne rasti. Zelo verjetno je, da se je vpliv terminalnega popka na radialno rast posredoval, vsaj delno, preko auksinov, ki so nastajali v rastočih listih in internodijih. Za rastoče internodije je znano, da proizvajajo velike količine rastnih hormonov - auksinov (Gunckel in Thimann 1949).

Lahko predpostavimo, da je obilna proizvodnja sekundarnega ksilema pri palezojskem Archeopterisu in Cordaitesu povezana z lastnostmi dolgega poganjka; ta način rasti se je pri golosemenkah, ohranil vse do danes. Pojav dolgega poganjka je očitno omogočil obilno proizvodnjo lesa pri arhaičnih rastlinah. Drug vzorec rasti kaže Lepidodendrom, katerega značilnost je kratek poganjek (med sosednjimi listi praktično ni nobene razdalje, glej opombo k sliki 7-2) in sekundarni ksilem z zelo omejenim razvojem.

10.4 Izvor debelinske rasti

Pri današnjih drevesih zmernih klimatov in pri nekaterih tropskih drevesih je razvoj vaskularnega kambija ritmičen in se kaže kot branike v lesu. Ritmični sekundarni rasti lahko sledimo vse do zgornjega devona, kjer se pri drevesu *Callixylon erianum* pojavijo prve komaj vidne branike (Arnold 1947). Jeffrey (1917) je opravljajal zanimive raziskave lesa *Cordaitesa* na Otoku Princa Edwarda (46 st N) in ugotovil, da ni opaznih prirastnih kolobarjev, kakršne so opazili pri drevesih višjih geografskih širin, npr. Severna Anglija (54 st N, Lanchashire). Ritmična sekundarna rast je bila očitna pri zadnjih prirastnih kolobarjih (tisti, ki so bolj proti obodu), razlog za to je verjetno v tem, da se premer traheid zmanjšuje proti koncu rastne dobe. Čeprav nismo prepričani, kaj je povzročalo tovrstna sezonska nihanja se zdi, da so prirastni kolobarji v lesu *Cordaitesa* posledica sezonskih klimatskih nihanj, ki so se verjetno pojavljala v višjih geografskih širinah. Ne glede na povedano pa najdemo prirastne kolobarje tudi v lesu *Cordaitesa* z drugih precej oddaljenih lokacij, npr. v Indiji pri vrsti *Dadoxylon indicum* iz Paleozoika. V zadnji geografski dobi Paleozoika, Permu in v Mezozoiku, so prirastni kolobarji že dovolj jasno vidni in vsebujejo rani in kasni les. Branike v tistem času povezujejo z ritmičnimi sezonskimi nihanji temperature in zemeljske vlažnosti. Vidimo torej, da na nastanek branike vplivajo zunanji dejavniki okolja. Na rastlino vplivajo preko fotosinteze, ki jo ali omejujejo ali pospešujejo. Dostopna hrana (asimilati) pa neposredno vplivajo na debelitev celičnih sten in na nastanek auksinov, potrebnih za celično rast.

Sklepajo, da so se branike pojavile v Paleozoiku ali v Mezozoiku, kot neposreden odgovor na zunanje dejavnike, ki so vplivali na fiziološke procese pri rasti poganjkov. Branike, ki se pojavljajo v današnjih drevesih v tropskih predelih, pa so očitno fiziološki mehanizem kontrole periodične

rasti, ki je sčasoma postal deden (Barghoorn 1964). Že v 1.poglavju smo govorili o obdobju mirovanja pri tropskem drevesu *Oreopanax*. Sedaj lahko predhodne ugotovitve še razširimo z domnevo, da prihaja do ritmične rasti zaradi tega, ker je drevo nekdanje raslo v drugačnih razmerah (verjetno više v gorah), kot pa danes.

11 Literatura

- ACCETTO, M., 1977. Razvojna dinamika in naravna regeneracija naravnih gozdov črnega bora (*Pinus nigra* Arnold).- Doktorat, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo, 102 p.
- BAILLIE, M. G. L. / PILCHER, J. R., 1973. A simple cross-dating programme for tree-ring research.- *Tree-Ring Bulletin* 33: 7-14.
- BOX, G. E. P. / JENKINS, G. M., 1970. Time series analysis: Forecasting and control.- San Francisco, Holden Day
- BRIFFA, K. R./ BARTHOLIN, T. S./ ECKSTEIN, D./ JONES, P. D./ KARLEN, W./ SCHWEINGRUBER, F. H. / ZETTERBERG, P., 1990. A 1,400-year tree-ring record of summer temperatures in Fennoscandia.- *Nature London* 346, 6283: 434-439.
- CEDILNIK, A., 1991. Aproximacija rastnih funkcij s kubičnimi zlepkami.- *ZbGL* 37: 117-123.
- COOK, E. R., 1985. Time series analysis approach to tree ring standardization.- Dissertation, Tucson, University of Arizona, Laboratory of Tree-Ring Research, 171 p.
- COOK, E. R. / PETERS, K., 1981. The smoothing spline: a new approach to standardizing forest interior tree- ring width series for dendroclimatic studies.- *Tree-Ring Bulletin* 41: 45-54.
- ECKSTEIN, D. / BAUCH, J., 1969. Beitrag zur Rationalisierung eines dendrochronologischen Verfahrens und zur Analyse seiner Aussagesicherheit.- *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 88, 4: 230-250.
- FRITTS, H. C., 1976. Tree rings and climate.- London, New York, San Francisco, Academic Press, 567 s.
- HARTUNG, J. / ELPELT, B., 1984. Multivariate Statistik. Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik.- München, Oldenburg Verlag, 524 s.
- HOLMES, R. L., 1994. Dendrochronology program library.- Users manual, Tucson, University of Arizona, Laboratory of Tree-Ring Research, 55 p.
- HOLMES, R. L./ ADAMS, R. K. / FRITTS, H. C., 1986. Tree-ring chronologies of Western North America, California, Eastern Oregon and Northern Great Basin.- Tucson, University of Arizona
- HUBER, B., 1943. Über die Sicherheit jahrringchronologischer Datierung.- *Holz als Roh- und Werkstoff* 6: 263 - 268.
- KAENNEL, M. / SCHWEINGRUBER, F. H., 1995. Multilingual Glossary of Dendrochronology.- Berne, Stuttgart, Vienna, Paul Haupt Verlag, 467 s.
- KAENNEL, M. / SCHWEINGRUBER, F. H., 1999. Multilingual glossary of dendrochronology.- Bern, Paul Haupt AG Bern, 467 s.
- KOTAR, M./ PUHEK, V. / GODLER, L., 1995. Ekološke zahteve, rastne značilnosti in gojitvene lastnosti drevesnih vrst iz rodu *Sorbus* ter češnje in navadnega oreha.- In: *Prezrte drevesne vrste, 17. gozdarski študijski dnevi*, Dolenjske Toplice (9 - 10. 11.1995), Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo, s. 269-293.
- LEVANIČ, T., 2007. ATRICS - a new system for image acquisition in dendrochronology.- *Tree Ring Research* 63, 2: 117-122.
- LEVANIČ, T., 1999. Vertical resin ducts in Wood of Black Pine (*Pinus nigra* Arnold) as a possible dendroecological variable.- *Phyton* 39, 3: 123-127.
- MOSTELLER, F. / TUKEY, J. W., 1977. Data analysis and regression.- Massachusetts, USA, Addison-Wesley Reading, 437 s.
- OVEN, P. / TORELLI, N., 1994. Wound response of the bark in healthy and declining silver firs (*Abies alba*).- *IAWA Journal* 15, 4: 407-415.

- SANDER, C. / LEVANIČ, T., 1996. Comparison of t-values calculated in different dendrochronological programmes.- *Dendrochronologia* 14: 269-272.
- SCHLITTGEN, R. / STREITBERG, B. H. J., 1987. *Zeitreihenanalyse*.- München, Oldenburg Verlag, 505 s.
- SCHMIDT, B., 1987. Ein dendrochronologischer Befund zum Bau der Stadtmauer der Colonia Ulpia Traiana.- *Bonner Jahrbücher* 187: 495-503.
- SCHWEINGRUBER, F. H., 1989. *Tree rings: basics and applications of dendrochronology*.- Dordrecht, Boston, London, Kluwer Academic Publishers, 276 s.
- SCHWEINGRUBER, F. H., 1993. *Jahringe und Umwelt - Dendroökologie*.- Birmensdorf, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, 474 s.
- SCHWEINGRUBER, F. H./ ECKSTEIN, D./ SERRE-BACHET, F. / BRÄKER, O. U., 1990. Identification, presentation and interpretation of event years and pointer years in dendrochronology.- *Dendrochronologia* 8: 9-38.
- TORELLI, N., 1990. *Les & Skorja (Holz & Rinde, Wood & Bark) - slovar strokovnih izrazov*.- Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo, 70 s.
- TORELLI, N. / ČUFAR, K., 1995. Investigations of the response of the silver fir to air-pollution and mechanical injuries in Slovenia.- In: *Ecology and Silviculture of European Silver Fir, IUFRO WP S1.01 - 08*, Altensteig, Germany, s. 316-326.
- WIMMER, R. / GRABNER, M., 1997. Effects of climate on vertical resin duct density and radial growth of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.)- *Trees* 11: 271-276.