



IEGULDĪJUMS TAVĀ NĀKOTNĒ

L-KC-11-0004

Pārskats par pētījuma

# Metodes un tehnoloģijas meža kapitālvērtības palielināšanai

virziena

## Potenciālo klimata izmaiņu ietekmes vērtējums un kvantifikācija

7. aktivitātes rezultātu izpildi

**Pētījums veikts sadarbībā ar:  
Latvijas Valsts mežzinātnes institūtu „Silava”  
AS „Latvijas valsts meži”  
SIA "MNKC"**

Virziena vadītājs \_\_\_\_\_ Āris Jansons

2015.gada jūnijs

**Apraksts par pētījumu objektiem meteoroloģisko datu (augšnes, gaisa mitruma, temperatūras), saimnieciski nozīmīgāko koku sugu dendrohronoloģisko datu, kā arī datu par aktīvajiem pieauguma veidošanās periodiem un vielu plūsmu ievākšanai**

## **KOPSAVILKUMS**

Klimata pastāvīgās mainības rezultātā notiek izmaiņas mežu ekosistēmās, kas ietekmē kokaudzes ražību. Koku fizioloģisko procesu un vides parametru saiknes analīze sniedz iespēju precīzi noteikt koku augšanai kritiskos vides faktoros. Līdzšinējie dendrohronoloģiskie pētījumi ir pierādījuši limitējošo vides faktoru ietekmi uz koku pieaugumu. Koku ekofizioloģiskie novērojumi *in situ* var sniegt detalizētāku (pat ar dažu minūšu intervālu) informāciju par koku augšanas reakciju uz vides apstākļiem, tādējādi nodrošinot datus dendrohronoloģijas analīzēs konstatēto sakarību cēloņu skaidrošanai un līdz ar to iespējas prognozēt koku augšanas izmaiņas nākotnes klimatā.

Meteoroloģisko parametru novērojumiem konkrētā izpētes objektā izmanto mobilās meteostacijas, augšnes ūdens potenciālu mēra ar tensiometriem, gruntsūdens līmeņa monitoringu veic ar ūdens staba spiediena sensoriem gruntī ievietotās filtra caurulēs, augšnes virskārtas mitruma saturu nosaka ar dufmetru, koka ūdens saturs un izmantošanas dinamiku novēro ar dendrometriem un ksilēmas sulu plūsmu sensoriem.

## **SATURS**

1. Meteoroloģisko faktoru ietekmes uz koku augšanu novērtēšanas nepieciešamība klimata izmaiņu kontekstā .....	3
2. Meteoroloģisko apstākļu ietekmes novērtēšanas metodes .....	4
3. Meteoroloģisko apstākļu ietekmes novērtēšanas piemēri .....	8

## **1. Meteoroloģisko faktoru ietekmes uz koku augšanu novērtēšanas nepieciešamība klimata izmaiņu kontekstā**

Klimats, kas ir viens no galvenajiem veģetācijas attīstību noteicošajiem faktoriem (Sykes et al., 1996; Walther et al., 2002; Thuiller, 2004), ir pastāvīgi mainījies (Åbolkalns et al., 1960; Mann et al., 2008). Klimata izmaiņu rezultātā notiek izmaiņas gan meža ekosistēmas sugu sastāvā, gan ražībā (Harrison et al., 2006; Kullman, 2008; Lindner et al., 2010). Lai saglabātu vai paaugstinātu mežaudžu noturību un ražību mainīga klimata apstākļos, ir nepieciešamas izmaiņas meža apsaimniekošanas plānošanā. Detalizētu rekomendāciju izstrādei par meža apsaimniekošanu klimata pārmaiņu kontekstā ir nepieciešama informācija par koku augšanas un meteoroloģisko faktoru saikni.

Dendrohronoloģiskie pētījumi liecina par limitējošo vides faktoru ietekmi uz koku pieaugumu, tomēr, lai labāk izprastu un precīzāk interpretētu dendrohronoloģijas analīžu rezultātus, nepieciešama informācija par dažādu meteoroloģisko faktoru ietekmes izmaiņām sezonas laikā, ko iespējams iegūt, veicot koku fizioloģisko procesu un meteoroloģisko/vides parametru dinamikas monitoringu un analīzi (Cermák et al., 2015).

Koku augšanas-vides saistībām ir vērojamas lokālas iezīmes, tāpēc koku ekofizioloģijas novērojumus saistībā ar meteoroloģisko apstākļu izmaiņām nepieciešams veikt ar atbilstošu reģionālo izšķirtspēju. Pat situācijās, kad kāda reģiona meteoroloģiskie apstākļi ir homogēni, pastāv virkne citu faktoru, kas var ietekmēt mežaudžu mikroklimatu (reljefs, gruntsūdens līmenis, augsnes veids, audžu sugu sastāvs un vecumstruktūra). Tāpēc katrā eksperimentālo novērojumu parauglaukumā ir jāveic arī tā mikroklimata (nokrišņi, gaisa temperatūra, augsnes mitrums un temperatūra, gruntsūdens līmenis) monitorings (Cermák et al., 2015).

## 2. Meteoroloģisko apstākļu ietekmes novērtēšanas metodes

### Meteoroloģisko apstākļu ietekme uz koku augšanu

Koku augšanas dinamiku nosaka meteoroloģisko apstākļu kopums gan kārtējā (Way, ren, 2010) un iepriekšējā (Matisons, Brūmelis, 2012) veģetācijas sezonā, gan miera periodā (Pederson et al., 2004). Fotoperiods, temperatūra, CO<sub>2</sub> un ūdens pieejamība ir nozīmīgākie vides faktori, kas nosaka koku augšanu (Pallardy, 2008), un tās sekmes ir tieši atkarīgas no fotosintēzes – procesa, kura norisi šie faktori regulē (Berry, Downton, 1982). Metabolisma ātrumu nosaka temperatūra. Fotosintēze var norisināties plašā gaisa temperatūras amplitūdā – no sasalšanas temperatūras līdz pat vairāk nekā +40 °C. Mērenās klimatiskās joslas koku sugām maksimālā fotosintēzes aktivitāte (atkarībā no gaismas intensitātes, CO<sub>2</sub> un ūdens pieejamības, augsnes temperatūras un citiem vides faktoriem) iestājas robežās no +15 līdz +25 °C; ārpus šī temperatūru diapazona fotosintēzes aktivitāte ir nozīmīgi zemāka (Pallardy, 2008; Way, Oren, 2010). Ūdens deficīta ietekmē aizveras lapu atvārsnītes, neuzņemot CO<sub>2</sub> pietiekamā daudzumā (Pallardy, 2008). Ūdens deficītu var izraisīt gan nepietiekams nokrišņu daudzums, gan zema augsnes temperatūra (mērenajā klimatiskajā joslā tas īpaši raksturīgi veģetācijas sezonas sākumā) (Linder, 1999; DeLucia, Smith, 2011; Bergh, ).

Vides apstākļu ietekmes uz koku augšanu pētījumos meteoroloģisko parametru monitoringam izmanto pārvietojamās meteostacijas (2.1.att.), kuras uzstāda izvēlētajā parauglaukumā vai tā tuvumā tā, lai mērījumu rezultāti korekti reprezentētu arī, piemēram, vēja ātrumu un virzienu un nokrišņu apjomu (Mäkinen et al., 2008; Cermák et al., 2015). Pārvietojamas meteostacijas, jo īpaši nokrišņu uztvērēju, nepieciešamības pamatā ir laikapstākļu (mikroklimata) nevienmērīgums plašākās teritorijās, jo īpaši mežaudzēs, kur, piemēram, nokrišņu sadalījumu ļoti ietekmē audzes vainagu slēgums. Atkarībā no parauglaukuma atrašanās vietas audzē mainās mikroklimats. Lai novērtētu tā atšķirības dažādās parauglaukuma vietās, ir nepieciešami papildus gaisa un augsnes temperatūras mērījumi (Chen et al., 1995).

Prof. Zālīša (2006) ilggadīgo pētījumu rezultāti liecina, ka nokrišņu intercepcija Latvijas mežaudzēs var variēt no 7 līdz 11 mm, ietekmējot augsnes mitruma un temperatūras režīmu mežaudzē. Atšķirīgā nokrišņu sadalījuma ietekmē mainās augsnes virskārtas samitrinājums, kuru var novērtēt ar dufmetru (2.1.att.) – mērierīci, kurā ievieto zemsegas vai augsnes virskārtas paraugu, lai izmērītu tā ūdens saturu (Robichaud et al., 2004).

Augsnes virskārtas mitrumam ir īpaša nozīme meža atjaunošanā - augsnes ūdens resursu saglabāšanā sausuma apstākļos. Nedzīvās zemsedzes mitrums aizkavē augsnes virskārtas

izzūšanu (pat sniega kušanu), nodrošinot sēklu dīgšanai un stādu attīstībai pēc iestādīšanas piemērotu mitruma režīmu veģetācijas perioda sākumposmā, paaugstinot stādīto koku konkurētspēju par ūdens resursiem ar citām kokaugu un zālaugu sugām (Roberts et al., 2005; Dinger, Rose, 2009).

Gruntsūdens līmenis ir viens no galvenajiem augsnes mitrumu un temperatūras režīmu regulējošajiem faktoriem (Kang et al., 2002). To mēra, gruntī ievietojot īpašas filtra caurules ar ūdens staba radītā spiediena sensoriem (2.1.att.), kuras iegremdē kontrolurbumos. Richter (2012) norāda uz gruntsūdens līmeņa svārstību nozīmīgo ietekmi uz melnalkšņa (*Alnus glutinosa*) ūdens patēriņa sezonālo dinamiku. Augsnes ūdens potenciāla mērījumi (tensiometrija) (Cassel, Klute, 1986) sniedz informāciju par augsnes ūdens pieejamību augiem. Šo parametru mēra kā negatīvu spiedienu (kPa vai mPa) jeb spēku, ar kādu augu saknes iegūst augsnes ūdeni. Vairumam augšņu to ūdens ietilpības kapacitāte ir no -10 līdz -33 kPa, bet pastāvīgās vīšanas punktu augi sasniedz pie -1500 kPa. Koku sakņu augšana apstājas pie -500 kPa liela augsnes ūdens potenciāla (Kuhns et al., 1985).



2.1.att. Gaisa, augsnes un nobiru parametru uzmērīšanas komplekts: pārvietojamā meteostacija (a), dufmetrs (b) un gruntsūdens līmeņa mērīšanas akā uzstādīts mērījumu sensors (c) (<https://www.campbellsci.com>; <http://www.novamatrixgm.com>).

### **Koku sulu plūsma (ūdens izmantošana)**

Ūdens augos atrodas dažādu šķīdumu formā, un tā galvenās funkcijas ir ķīmisko reakciju vides, šūnu turgora un barības vielu transporta nodrošināšana (Salisbury, Ross, 1992). Ūdens šķīduma (sulas) pārvietošanos kokā primāri nosaka tādas ūdens fizikālās un ķīmiskās īpašības kā kohēzija, adhēzija un virsmas spraigums, kas nodrošina ūdens kapilaritāti. Sulas plūsma veģetācijas sezonā ir atkarīga no transpirācijas (T), ko nodrošina augsnes → auga → atmosfēras procesu kontinuitāte, bet miera periodā sulas pārvietošanos

izraisa salcietības veidošanās vai mazināšanās (Zimmermann, 1964). Paralēli transpirācijai norisinās arī evaporācija ( $E$ ) ( $\text{kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) – iztvaikošana no atklātas ūdensobjekta virsmas, kuras galvenais limitējošais faktors ir iztvaicēšanai nepieciešamās enerģijas pieejamība. To vienkāršoti var izteikt kā

$$E = \frac{C_{\text{ūdens}} - C_{\text{gais}}}{r_{\text{gais}}},$$

kur  $C_{\text{ūdens}}$  un  $C_{\text{gais}}$  ir ūdens tvaiku koncentrācija ( $\text{kg m}^{-3}$ ) attiecīgi uz ūdens virsmas un gaisā, bet  $r_{\text{gais}}$  ir ūdens molekulu difūzijas rezultātā veidotā robežslāņa pretestība virs iztvaikojošās virsmas ( $\text{s m}^{-1}$ ). Summārā iztvaikošana jeb evapotranspirācija ( $ET$ ) ir evaporācijas un transpirācijas summa, kuru ietekmē Saules radiācijas intensitāte, temperatūra, vējš, nokrišņu apjoms un intensitāte un rasas punkta deficīts ( $VPD$ ) (Ward, Trimble, 2003).

Transpirācija ir fizioloģiski kontrolēta evaporācija, kas norisinās apstākļos, kad starp atmosfēru un lapas starpšūnu telpu izveidojas atšķirīgs gaisa piesātinājums ar ūdens tvaikiem. Transpirāciju izsaka kā

$$T = \frac{C_{\text{lapa}} - C_{\text{gais}}}{r_{\text{lapa}} + r_{\text{gais}}},$$

kur  $C_{\text{lapa}}$  ir ūdens tvaiku koncentrācija uz iztvaikojošajām virsmām lapas iekšienē ( $\text{kg m}^{-3}$ ) un  $r_{\text{lapa}}$  – ūdens tvaiku difūzijas pretestība lapas iekšienē (Pallardy, 2008).

Transpirācijas process iesākas, kad lapas šūnu evaporācijas rezultātā starpšūnu telpa lapas čauganajā (kailsēkļu skujām – krokainajā) parenhīmā piesātinās ar ūdens tvaiku, kas tālāk pārvietojas uz atvārsnītes elpošanas dobumu. No tā tvaiks auga gāzu apmaiņas procesā izdalās atmosfērā caur lapu virsmas atvārsnītēm. Koki caur lapām, lapu epidermu un stumbru, dzinumu mizas lenticelēm transpirē lielāko daļu no uzņemtā ūdens (līdz pat 95%), neiesaistot to metabolismā (Philip, 1966; Wullschleger et al., 1998).

Koki, uzņemot ūdeni un transportējot to starp orgāniem, nodrošina barības vielu un augšanas regulatoru pārvietošanu, kā arī visa organisma dzesēšanu. Koka ūdens aprites ciklā augsnes ūdens, iesaistīts šķīdumā, tiek pārvietots no augsnes caur organismu atmosfērā. Tas saistīts ar dažādiem vielas transporta veidiem (Philip, 1966; Zahner, 1968; Pallardy, 2008). Vielu uzņemšana un izdalīšana norisinās šūnu līmenī pasīvā (piemēram, osmoze) (Lopushinsky, 1964) vai aktīvā (vielu pārvietošana cauri šūnas membrānai pretēji koncentrācijas gradientam) transporta rezultātā.

Vielu pārvietošana starp audiem un orgāniem norisinās tuvā jeb laterālā (radiālā) transporta rezultātā pa vakuolāro, apoplastu vai simplastu ceļiem. Ātrāku vielu pārvietošanu (translokāciju) nodrošina tālā transporta sistēma pa specializētiem vadaudiem koksne (ksilēmā) un lūksne (floēmā). Lūksnes vadaudos darbojas hidrostatiskais spiediens, koksne – negatīvs

spiediens, kas rodas transpirācijas rezultātā, veidojoties spiediena starpībai starp iztvaikojošās lapas virsmu un saknēm (Pallardy, 2008).

Koka – ūdens attiecību dinamikas analīze ir vērtīgs informācijas avots, kas sniedz izpratni par koku reakciju uz vides faktoru izmaiņām, un pašreiz pieejamās pētījumu metodes ļauj veikt kvantitatīvus mērījumus gan koka orgānu, gan visa organisma un pat audzes līmenī (Cermák et al., 2015). Ar koka sulu plūsmu un stumbra apkārtmēra izmaiņu mērījumiem ir iespējams raksturot koka ūdens patēriņu, fenoloģiju, dažādu orgānu funkcionalitāti un barības vielu transportu. Šāda informācija ir neaizstājama, prognozējot iespējamo koku reakciju uz potenciālām vides faktoru izmaiņām (Cermák et al., 2015).

### **Mežaudzes ūdens patēriņš**

Līdzšinējā pieeja mežaudzes ūdens patēriņa raksturošanā ir evapotranspirācijas izteikšana no siltuma vai ūdens bilancēm (Zālītis, 2006). Vienkāršota kāda sateces baseina ūdens bilance ir

$$P - E - R - \Delta V = 0,$$

kur  $P$  – nokrišņi (mm),  $E$  – iztvaikojums (mm),  $R$  – notece (mm) un  $\Delta V$  – ūdens krājumu pieaugums baseinā vai teritorijā (mm) (Zīverts, 2004), bet Latvijas apstākļos šāda veida aprēķini var būt korekti tikai lielo upju sateces baseinos (Zālītis, 2006).

Mežu masīvu evapotranspirāciju ET vienkāršoti var iegūt no

$$N + P_p + P_s = ET + Q_p + Q_s \pm \Delta W,$$

kur  $N$  – nokrišņi (mm),  $P_p$  – pazemes spiedes ūdeņu pieplūde (mm),  $P_s$  – ūdens pieplūde no pieguļošajām platībām (mm),  $Q_p$  – ūdens infiltrēšanās (mm),  $Q_s$  – ūdens notece (mm),  $\Delta W$  – ūdens daudzuma izmaiņas analizētajā augsnē (mm), bet šāds aprēķins ir neprecīzs, jo vienādojums neiekļauj mežaudzes struktūras parametrus (Zālītis, 2006). Tā kā pie vienādas mitruma un enerģijas pieplūdes vienas sugas kokiem transpirācija ir tieši proporcionāla koka lapu masai, konkrētas sugas tīraudzēm lielās platībās  $T$ ,  $E$  un  $ET$  var iegūt, risinot regresijas vienādojumus, kuros iekļauj tādus mežaudžu parametrus kā audzes koku vidējo caurmēru un koku skaitu (Zālītis, 2006).

Augstākas izšķirtspējas transpirācijas aprēķiniem (kvartāla, nogabala, audzes līmenī) ir nepieciešams zināt mežaudzes struktūras un koku morfoloģiskos un vides parametrus, kuru kopu var dēvēt par lapotnes mikroklimata (LM) parametriem (Levia et al., 2011). Mežaudzē katram kokam ir atšķirīgs transpirācijas līmenis, ko galvenokārt ietekmē, piemēram, nevienāds Saules radiācijas sadalījums dažādos vainaga augstumos un audzes stāvos, sakņu un aplievas funkcionalitāte (Cermák et al., 2015), koku lapu virsmas laukums (Granier et al., 2000) un atvārsnīšu darbība (Hogg, Hurdle, 1997), ko ir iespējams izmērīt (Cermák et al., 2015).

### 3. Meteoroloģisko apstākļu ietekmes novērtēšanas piemēri

#### Koku sulu plūsmas mērījumi

Koka sulu plūsmu un stumbru apkārtmēru izmaiņu mērījumi ir efektīvs koka un visas mežaudzes ūdens izmantošanas aprēķināšanas instruments, kas sniedz svarīgu informāciju par koka transpirāciju (Balek, Pavlik, 1977; Čermák et al., 1982; Granier, 1987; Granier, Loustau, 1994; Martin et al., 1997) un koka orgānu ūdens pārvades īpatnībām (David et al., 2013); šī informācija, savukārt, palīdz rekomendāciju meža ūdens resursu saglabāšanas (Čermák, 1991), kā arī plantāciju un jaunaudžu apsaimniekošanas (Mellander et al., 2004; Delzon, Loustau, 2005) rekomendāciju izstrādē.

Koku ūdens izmantošanas pētījumos tiek pielietotas dažādas eksperimentālās metodes – sveramie lizimetri (Fritschen et al., 1973), potometri jeb transpirometri (Roberts, 1977), augšanas kameras (Greenwood, Beresford, 1979), stumbra sulas ķīmiskie krāsu marķieri (Greenidge, 1955), radioizotopi (Kline et al., 1970), stabilie izotopi (Calder et al., 1986), kā arī termālās metodes (piemēram, stumbra enerģijas balansa THB (Čermák et al., 1973, 2004; Kučera et al., 1977; Tatarinov et al., 2005) un SHB (Daum, 1967; Sakuratani, 1981; Baker, van Bavel, 1987; Valancogne, Nasr, 1989; Steinberg et al., 1990; Senock, Ham, 1993; Chandra et al., 1994; Weibel, Vos, 1994), siltuma izkliedes TD (Viewegh, Ziegler, 1960; Ittner, 1968; Balek, Pavlik, 1977; Granier, 1985), siltuma pulsa pārvietošanas HPV (Marshall, 1958) un HRM (Burgess et al., 2001), siltuma lauka deformācijas HFD)(Nadezhdina et al., 1998, 2006, 2012; Čermák et al., 2004; Nadezhdina, 2010)) metodes.

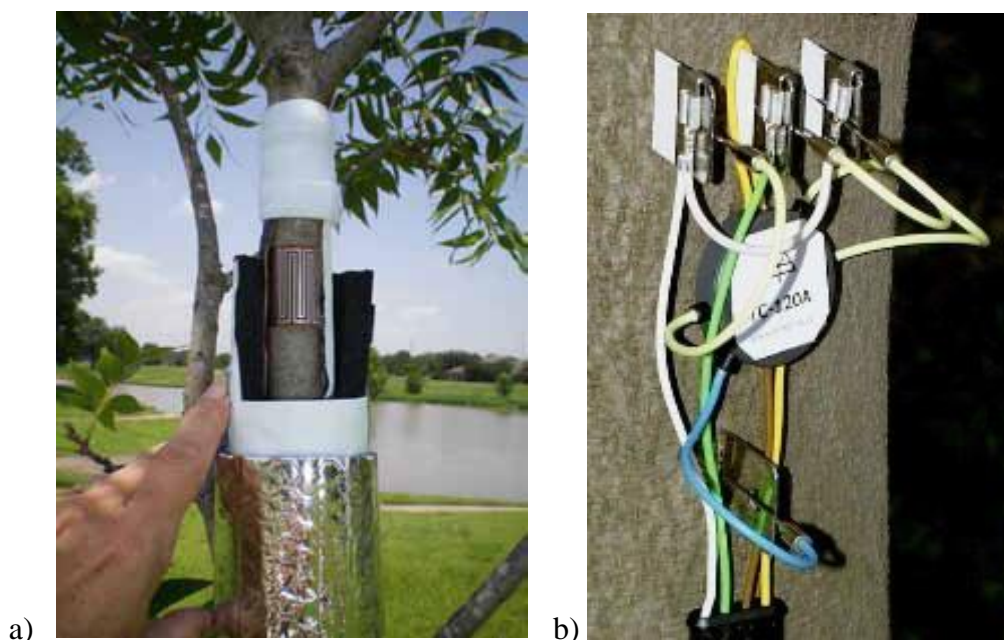
#### Termālās metodes

Termālās koku sulu plūsmu mērīšanas metodes ir mobilas un ērti pielietojamas ilgtermiņa lauka pētījumos, jo nodrošina tiešus mērījumus *in situ*, neizmainot koka augšanas apstākļus. To pamatā ir siltuma vai elektriskās strāvas pārnese (kā ūdens plūsmas kokā indikatora) mērījumi gan atsevišķos koka orgānos, gan visa auga līmenī. Šīs metodes savstarpēji atšķiras pēc to darbības principiem un tehniskajiem risinājumiem, kas nosaka to piemērotību izvēlētajam pētījumam.

Lielākā daļa no termālajām koku sulu plūsmu mērīšanas metodēm ir invazīvas, jo to sensorus ievieto koksnē, izņemot SHB, kuras pamatā ir enerģijas starpības aprēķins starp stumbrā ievadīto enerģiju un tās zudumu. Šīs metodes instrumentācija paredz sildelementu un termosensoru uzstādīšanu pa stumbra apkārtmēru (3.1.att.), tos aplūkot ar termo un hidroizolāciju. Stumbram pievadītā siltuma daudzuma samazināšanās ātrumu (pārvietotā siltuma daudzumu) aprēķina kā sulas plūsmas ātrumu ( $g$  vai  $kg\ h^{-1}$ ). Šo metodi var izmantot ne



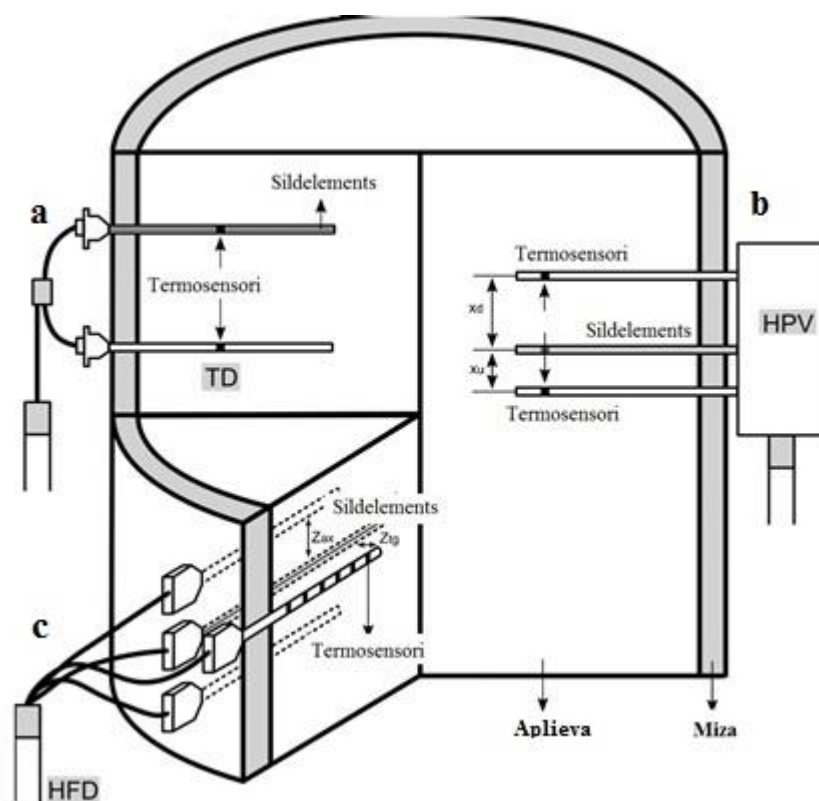
tikai lieliem kokiem, bet arī stādiem un lakstaugiem. Tomēr ar šo metodi nevar novērtēt atsevišķu koka orgānu funkcionalitāti (Chandra et al., 1994).



3.1.attēls. Uz siltumenerģijas balansa metodes balstīto a) SHB un b) THB tipa koku sulu plūsmu mērinstrumentu instalācija (<http://www.dynamax.com/EXO-Skin.htm>; <http://www.emsbrno.cz/p.axd/en/Sap.Flow.html>)

THB ir invazīva siltuma balansa metode, ar kuru var veikt sulas plūsmas mērījumus atsevišķos koka stumbra segmentos, nosakot caur koka audiem ejošas strāvas un temperatūras atšķirības starp noteiktā attālumā koksni ievietotām metāla plātnēm (3.1.att.). Tā kā ar šo metodi var noteikt aplievas dziļumu (sausā kodolokoksne nevadīs ne elektrību, ne siltumu), ir iespējams raksturot koka stumbra vai lielo sakņu ūdens pārvades funkcionalitāti un kapacitāti (Trcala, Čermák, 2012).

Sulu pārvietošanos kokā var kvantificēt arī kā siltuma konvekciju (siltuma pārvietošana, pārvietojoties šķīduma molekulām (Incropera, DeWitt, 1990)). TD metode ir balstīta uz divu termopāru, kas integrēti katrs savā zondē (adatā) (*Granier's Thermal Dissipation Probe* (TDP)), ievietošanu aplievā pa sumbra radiālo profilu vertikālā 10 cm attālumā (Granier, 1985) (3.2.att.). Katru sulas plūsmas ātruma mērījumu veic pēc augšējās adatas uzsildīšanas, nomērot temperatūru atšķirības starp abām adatām. Mērījumus ir iespējams veikt tikai noteiktā (no zondes garuma un mizas biezuma atkarīgā) aplievas dziļumā (Fernández et al., 2013).



3.2.attēls. a) TD, b) HPV (HRM) un c) HFD metožu shematisks attēlojums  
(Steppe et al., 2010).

HPV (HRM) metožu (Huber, 1932; Marshall, 1958; Cohen et al., 1981; Green, 1998; Burgess et al., 2001) darbības principi balstās uz temperatūras pārnese ātruma noteikšanu starp siltuma impulsa punktu un stumbra temperatūras mērījumu punktiem virs un zem sildelementa (3.2.att.). Ar šīm metodēm var izmērīt ļoti zemas plūsmu ātrumus un arī lejupejošas plūsmas dažādos aplievas dziļumos (Fernández et al., 2013).

HFD sulas plūsmas mērījumu metode (3.2.att.) ir integrēta mērinstrumentā, kas sastāv no trim temperatūru multisensoriem (adatām), sildelementa, datu logera un sistēmas bloka. Katrā adatā ir integrēti 8 mērījumu punkti (termosensori) 1 cm attālumā, ļaujot mērīt koka stumbra sulas plūsmas ātruma radiālo profilu (koka hidrauliskās arhitektūras kartēšana). Metodes pamatā ir siltuma pārvietošanās atšķirību mērījumi gan aksiālā, gan tangenciālā virzienā ap lineāru sildelementu – siltuma lauka asimetrija ap sildelementu (Nadezhdina et al., 1998, 2006, 2012; Cermák et al., 2004; Nadezhdina, 2010). Stumbra segments, kurā veic sulas plūsmas mērījumus ar HFD metodi, var tikt pastāvīgi sildīts vai saņemt siltuma impulsu noteiktu laiku pirms mērījuma (0,012 - 0,6 W) (Cermák et al., 2015).

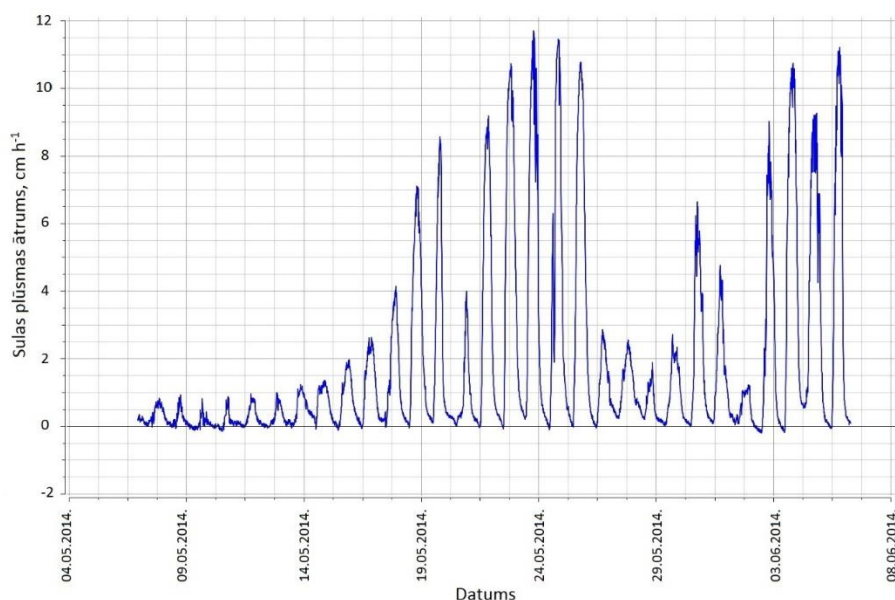
## Sulu plūsmas mērījumu pielietojamība

Koku sulu plūsmu monitoringa metodes var pielietot ūdens izmantošanas, transpirācijas un atvārsnīšu vadītspējas pētījumos gan koka (Cermák et al., 2004; Verbeeck et al., 2007), gan mežaudzes (Martin et al., 1997) līmenī.

Visa koka ūdens izmantošanas pētījumi līdz ar mērījumu tehnoloģiju attīstību iegūst arvien lielāku nozīmi mežsaimniecības prakses uzlabošanā (sugu adaptācijas novērtēšana, ūdens resursu apsaimniekošana, īscirtmeta plantāciju efektivitātes uzlabošana) (Cermák et al., 2015). Citviet veiktu pētījumu rezultāti ar koku sugām, kas Latvijas apstākļos uzskatāmās par vietējām (Roberts, 1977; Waring, Roberts, 1979; Schulze et al., 1985; Granier et al., 1989; Cienciala et al., 1992; Čermák et al., 1995; Herzog et al., 1995; Köstner et al., 1998) vai introducētām (Owston et al., 1972; Fritschen et al., 1973; Kline et al., 1976; Knight et al., 1981; Schulze et al., 1985; Granier, 1987; Čermák et al., 1993) koku sugām, rāda, ka dažādām sugām un to genotīpiem ir atšķirīgas ūdens izmantošanas stratēģijas, kas var mainīties atkarībā no augšanas apstākļiem (Wullschleger et al., 1998).

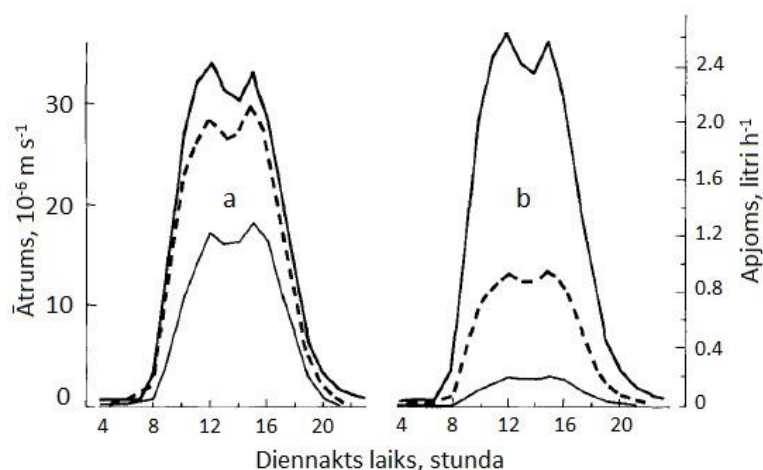
Diennakts ciklā koka ūdens patēriņa vērtību pieaugums sākas no rīta līdz ar saullēktu (3.3.att.), maksimumu sasniedz dienas vidū, un pēcpusdienā sākas ūdens patēriņa samazināšanās. Diennakts minimālās (ne vienmēr nulles) vērtības ir novērojamas agri no rīta pirms saullēkta (Čermák et al., 2007). Spējš sulu plūsmu ātruma diennakts maksimālo vērtību samazinājums liecina par transpirācijas samazināšanos, piemēram, temperatūras pazemināšanās, gaisa relatīvā mitruma un atmosfēras spiediena palielināšanās, nokrišņu ietekmē (Ford et al., 2004). Par šādu koka ūdens izmantošanas izmaiņu iemeslu var kļūt arī sakņu, lapotnes un konduktīvo sistēmu bojājumi vai pieejamā ūdens apjoma samazināšanās (Nadezhdina, 2010).

Koku adaptāciju vides apstākļiem var novērtēt, analizējot vairākus parametrus, piemēram, atvārsnīšu un lapas robežvirsmas tvaika caurlaidību, visa koka ūdens pārvadi un ūdens uzkrāšanos stumbrā. Čermák et al. (1995) novēroja, ka jauktā skujkoku audzē nelimitēta augsnes mitruma apstākļos gan parastā egle, gan parastā priede jūlija vidū agrā rītā 20% no transpirētā ūdens apjoma nodrošināja ar iepriekšējā naktī audu rehidrācijas rezultātā stumbrā uzkrātajām rezervēm. Ūdens uzkrāšanās kapacitāti ietekmē sulas plūsmas intensitāte aplievas dziļākajos slāņos – stumbra konduktivitāte (ūdens pārvades funkcionalitāte), kuru var ietekmēt, piemēram, audzes biezība. Dye et al. (1991) un Wullschleger et al. (1998) sulas plūsmas ātruma samazināšanās gradientu skujkoku aplievas šķērsriezuma radiālajā profilā skaidro ar tās saistību ar vecākajiem, vanaiga zemākajiem, apēnotajiem zariem, kas palīdz izskaidrot, piemēram, dabisko atzarošanos.



3.3.attēls. Parastās apses (*Populus tremula* L.) sulu plūsmas ātrums ( $\text{cm h}^{-1}$ ) diennakts izmaiņas (06.05. – 06.06.2014.)

Tā kā metožu instrumentācija ir dārga un laikietilpīga, ļoti bieži nav iespējams veikt mērījumus visiem audzes kokiem. Tā vietā izvēlas atbilstošu sugu, vecuma un augstuma paraugkokus un iegūtos rezultātus attiecina uz visu audzi (Cermák et al., 2004). Šādas prakses piemērs ir Granier (1987) pētījums par Menzīsa duglāzijas (*Pseudotsuga menziesii*) ūdens patēriņa diennakts ritmu (3.4.att.). Vienas audzes ietvaros dažādu augstuma klašu (vainaga apēnojuma pakāpes) kokiem stumbra diametra (tātad arī ūdeni vadošās aplievas) atšķirību ietekmē izmantotā ūdens apjoms var atšķirties pat trīs reizes, kaut arī transpirācijas intensitāte ir līdzīga (Granier, 1987).



3.4.attēls. Menzīsa duglāzijas (*Pseudotsuga menziesii*) diennakts a) sulu plūsmas intensitāte pret aplievas šķērsriezuma laukumu ( $10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ ) un b) pārvietotais ūdens apjoms ( $\text{l h}^{-1}$ ) dominantā (nepārtraukta izcelta līnija), kodominantā (pārtraukta līnija) un nomāktā (nepārtraukta neizcelta līnija) vienas audzes kokā (Granier, 1987).

Martin et al. (1997) pētījumā par *Abies amabilis* meža lapotnes iztvaikotspēju un audzes transpirāciju, izmantoja individuālu koku sulu plūsmu datus, ekstrapolējot tos audzes līmenī. Koku transpirētā ūdens apjomu ( $E_{\text{vainags}}$  ( $\text{kg} (\text{m}^2 \text{ virsmas platība})^{-1} \text{ s}^{-1}$ )) aprēķināja kā attiecību starp sulu plūsmu ātrumu un šķērslaukumu, un iegūto rezultātu attiecināja uz katru audzes koku caurmēru klasei, kuru pārstāvēja izvēlētais paraugkoks. Pilnīgu priekšstatu par mežaudzes ūdens patēriņa raksturu var sniegt transpirācijas apjoma salīdzināšana ar konkrētajā brīdī un apstākļos potenciāli iespējamo transpirāciju (PT), kuru nosaka lapotnes iztvaikotspēja ( $g_{\text{vainags}}$ ). Martin et al. (1997)  $g_{\text{vainags}}$  izteica no Penman-Monteith vienādojuma (Monteith, 1965); Granier, Loustau, 1994)

$$E_{\text{vainags}} = \frac{sR_{\text{vainags}} + \rho_a C_p D g_a}{\lambda \left[ s + \gamma \left( 1 + \frac{g_a}{g_{\text{vainags}}} \right) \right]}$$

( $sR_{\text{vainags}}$  - koka vainaga absorbētā Saules radiācija ( $\text{W m}^{-2}$ ),  $\rho_a$  - sausa gaisa blīvums ( $\text{kg m}^{-3}$ ),  $C_p$  - gaisa īpatnējā siltumietilpība ( $\text{J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ),  $D$  - VPD (rasas punkta deficīts, kPa),  $g_a$  - robežvirsmas tvaika caurlaidība ( $\text{m s}^{-1}$ ),  $\lambda$  - iztvaikojošā ūdens latentais siltums ( $\text{J kg}^{-1}$ ),  $s$  - slīpums VPD piesātinājuma attiecībai pret gaisa temperatūru ( $\text{kPa K}^{-1}$ ),  $g_{\text{vainags}}$  - lapotnes iztvaikotspēja ( $\text{m s}^{-1}$ ),  $\gamma$  - psihrometra konstante ( $\text{kPa K}^{-1}$ )),

kā

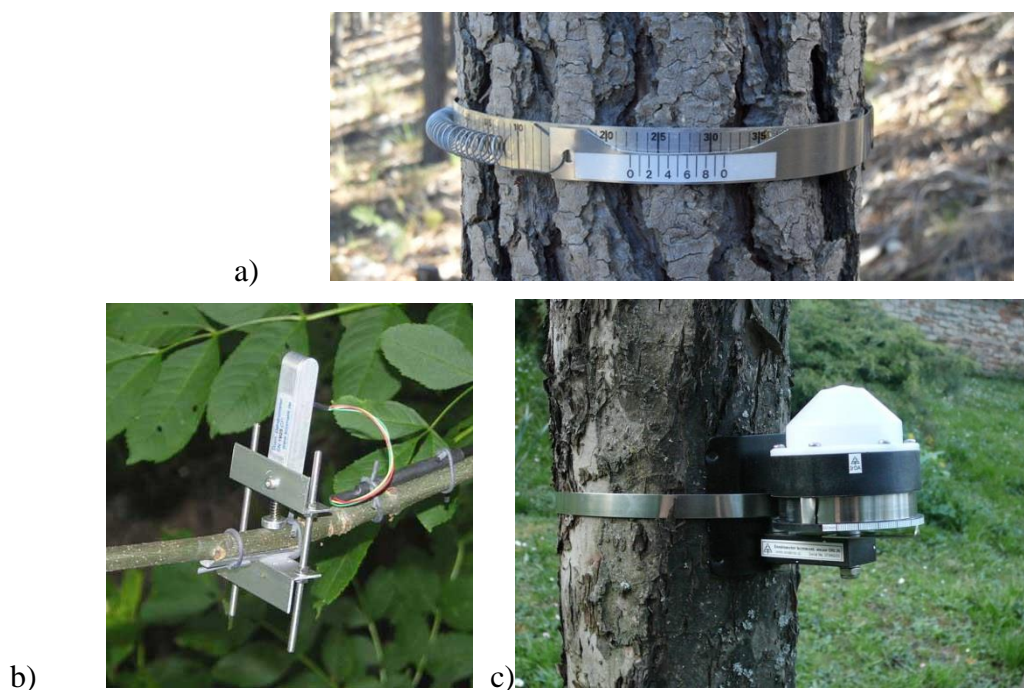
$$\frac{1}{g_{\text{vainags}}} = \left[ \frac{s}{\gamma} \left( \frac{R_{\text{vainags}} - \lambda E_{\text{vainags}}}{\lambda E_{\text{vainags}}} \right) - 1 \right] \frac{1}{g_a} + \frac{\rho_a}{E_{\text{vainags}}} \frac{C_p}{\lambda \gamma} D$$

Katra koka absorbētās Saules radiācijas ( $R_{\text{vainags}}$ ,  $\text{W m}^{-2}$ ) vērtības ieguva pēc Granier, Loustau, (1994) (Martin et al., 1997).

Martin et al. (1997) pētījuma rezultāti rāda, ka sulu plūsmas ātrums variē pa diametru klasēm (DBH 16,9 cm – mazāk par 5 kg dienā<sup>-1</sup>; DBH 40,1 cm – līdz 98 kg dienā<sup>-1</sup>), kas skaidrojams ar lapu virsmas laukumu un vainagu apgaismojuma atšķirībām, ko raksturo  $g_{\text{vainags}}$  un  $R_{\text{vainags}}$  parametru lineārā saistība. Tas arī izskaidro Granier (1987) pētījumā (3.4.att.) iegūtos rezultātus – audzes dominantajiem kokiem bija lielāks sulu plūsmas ātrums un pārvietotā ūdens apjoms (kopējais ūdens patēriņš). Koku augstuma un vainaga absorbētās Saules radiācijas atšķirību ietekmē variē gan koku lapotņu iztvaikotspēju, gan ūdens izmantošanas laiks diennaktī, piemēram, lielākajiem indivīdiem tas var būt pat 23 h, kamēr mazākajiem tikai 17 h (Martin et al., 1997), tomēr mazāk blīva vainagu slēguma apstākļos šādas atšķirības var būt mazākas.

## Dendrometrija

Koku noturību pret ūdens deficītu nodrošina ne tikai, piemēram, transpirācijas minimizēšana vai dziļu sakņu sistēmu veidošana, bet arī ūdens uzkrāšana audos (Roberts, 1976), kuras dinamiku var novērtēt, kombinējot sulu plūsmu mērījumus ar dendrometriju (Cermák et al., 1982, 2007, 2015). Koka floēmas un jauno ksilēmas audu ūdens satura izmaiņas izraisa stumbra apkārtmēra fluktuācijas (Klepper et al., 1971), kuras var fiksēt ar dendrometru (3.5.att.) palīdzību (Cermák et al., 2015).



3.5.attēls. a) manuāli nolasāms lentas dendrometrs, b) automātiski nolasāms punkta dendrometrs, c) automātiski nolasāms lentas dendrometrs

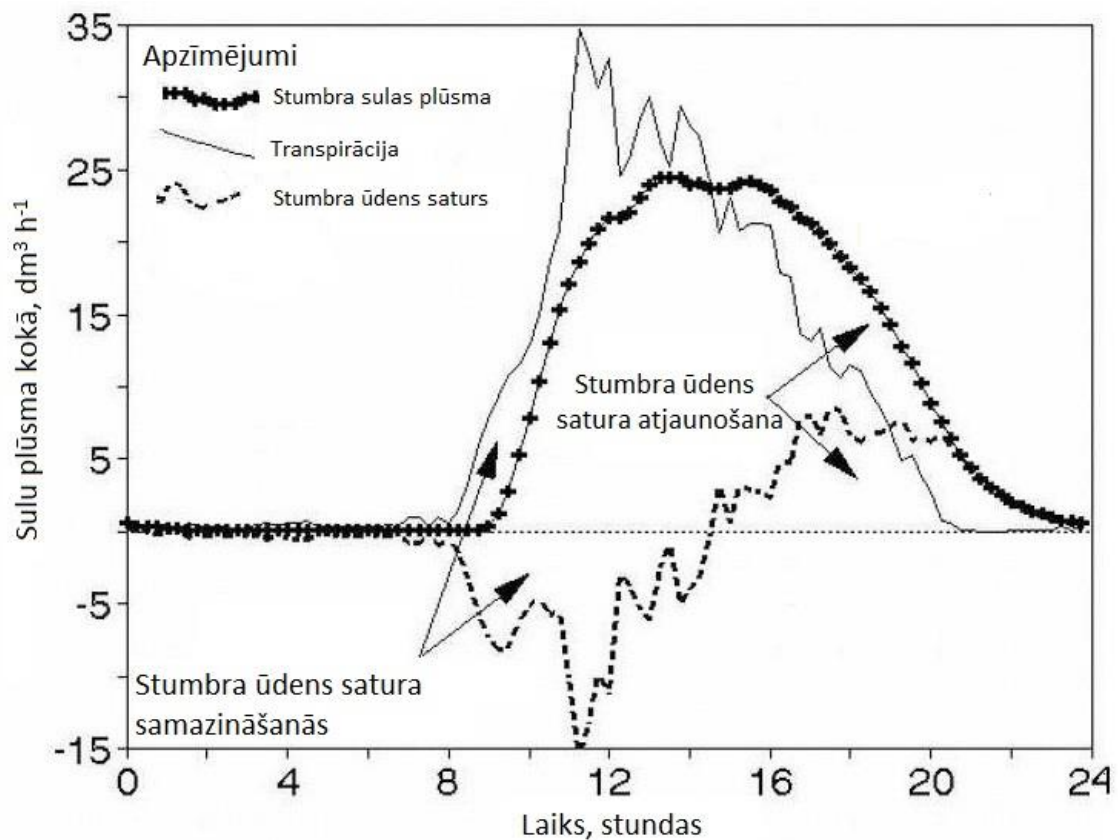
(<http://www.camcore.org>, <http://www.ecomatik.de>, <http://www.ugt-online.de>)

Vienkāršākā stumbra apkārtmēra izmaiņu monitoringa metode ir manuāli nolasāmais lentas dendrometrs (3.5.att.), kuras mērījumu principa pamatā ir pa stumbra šķērsriezuma perimetru nospiiegota metāla vai plastikāta lentā, kuras gali ir savienoti ar atsperēm, un, mainoties stumbra apkārtmēram, mainās stumbru aptverošās lentas posma garums (Pesonen et al., 2004; Mäkinen et al., 2008). Ar lentas dendrometru tiek fiksētas caurmēra izmaiņas visā stumbra perimetrā (apskatītajā augstumā), bet ar to nav iespējams veikt ksiloģenēzes monitoringu (Jansons et al., 2013). Punkta dendrometri arī var būt gan manuāli, gan automātiski nolasāmi, un to darbības pamatā ir mērījums vienā stumbra virsmas sektorā vai punktā. Tā kā gan koku radiālās augšanas, gan ūdens pārvades dinamika visā stumbra šķērsgriezumā nav sinhrona (Mäkinen et al., 2008; Pallardy, 2008; Jansons et al., 2013). punkta dendrometrs var sniegt neprecīzu priekšstatu par stumbra izmēru fluktuācijām. Savukārt ar lentas dendrometru nav iespējams novērtēt atšķirības dažādos stumbra perimetra segmentos.

Klepper et al. (1971) novēroja, ka koku stumbru apkārtmēri samazinās, palielinoties Saules radiācijas intensitātei, bet vakarā notiek apkārtmēru palielināšanās. Tāda pati sakarība bija vērojama arī lapu relatīvajam ūdens saturam, bet tā minimums tika sasniegts 1 – 2 h agrāk nekā stumbra apkārtmēra diennakts minimums. Tādas pašas tendences novēroja arī ilgākā laika posmā – stumbrs mākoņainās, lietainās dienās piebrieda, bet siltās un saulainās dienās tā apkārtmērs samazinājās, kas izskaidrojams ar stumbra ūdens satura izmaiņām transpirācijas rezultātā.

Diennakts ūdens satura izmaiņu ietekmē ir novērojamas mazas koka stumbra apkārtmēra fluktuācijas (- 0,1 līdz 0,2 mm). Tomēr šādas apkārtmēra svārstības var nozīmēt koka ūdens satura izmaiņas pat par vairākiem desmitiem litru (Cermák et al., 2015). Martin et al. (1997) novērojumi rāda, ka vidēja vecuma Menzīsa duglāzijas audzē individuālu koku diennaktī izmantotā ūdens apjoms atkarībā no stumbra apkārtmēra var svārstīties no 5 kg dienā<sup>-1</sup> līdz 98 kg dienā<sup>-1</sup>. Nepietiekams audu ūdens saturs var samazināt pieaugumu un ietekmēt saglabāšanos, īpaši pēc ziemas ar zemu nokrišņu daudzumu, piemēram, Centrāleiropā, kad veģetācijas sezonas sākumā nepietiekama audu rehidrācija var būt limitējoša (Cermák et al., 2015).

Koku stumbru ūdens satura diennakts dinamiku veģetācijas sezonā raksturo 3.6.attēls. Agri no rīta, saullēkta ietekmē sākoties transpirācijai, tiek izmantotas audos uzkrātā ūdens rezerves, kuras dienas gaitā sulu plūsmas procesā tiek atjaunotas no augsnē pieejamā ūdens. Palielinoties no augsnes uzņemtā ūdens iesaistīšanai transpirācijā, samazinās stumbra ūdens rezervju izmantošana un norisinās to atjaunošana nākamās dienas sākumam (Cermák et al., 2015). Ūdens uzņemšana no augsnes var sākties pat divas stundas pēc transpirācijas sākuma un turpināties tikpat ilgi pēc transpirācijas izbeigšanās dienas beigās. Audos uzglabātā ūdens izmantošana dienas transpirācijas sākumā samazina ūdens deficīta izraisītu šūnu bojājumu risku, īpaši lieliem kokiem, kur ūdens pievade lapām var prasīt vairākas stundas (Cermák et al., 2007).



3.6.attēls. Stumbra ūdens satura, transpirācijas un sulu plūsmas diennakts dinamika veģetācijas sezonā (Cermák et al., 2007; Cermák et al., 2014).

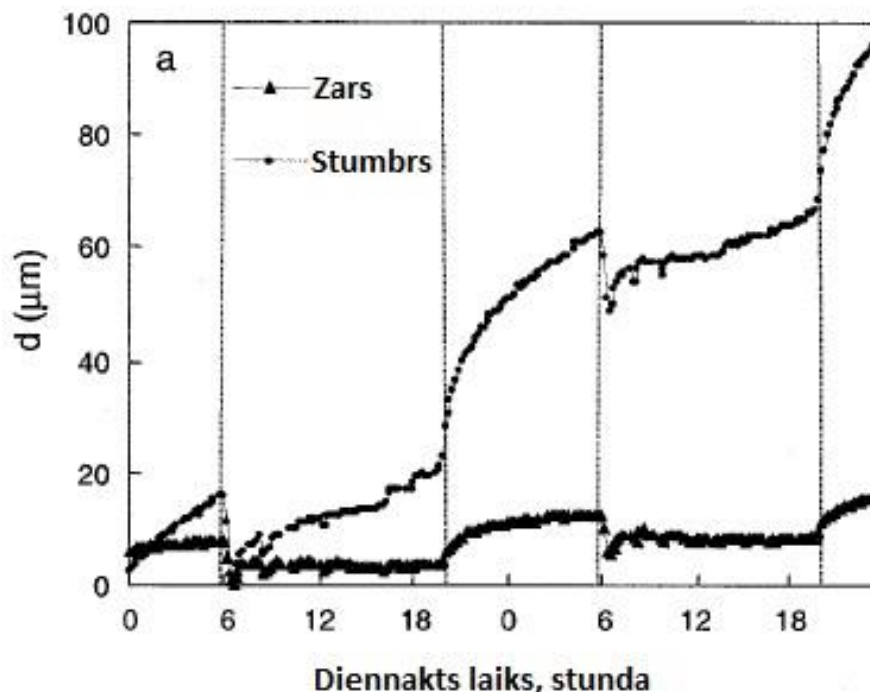
Nepatruktā līnija – transpirācija, pārtrauktā līnija – stumbra ūdens saturs, izceltā līnija – sulu plūsma.

Antonova et al. (1995) novēroja, ka parastajai priedei (*Pinus sylvestris* L.) pietiekama augsnes mitruma un zemas transpirācijas apstākļos stumbra apkārtmēra izmaiņu diennakts ciklā nav novērojama apkārtmēra samazināšanās, kas skaidrojams ar radiālā pieauguma veidošanos. Lai gan augsta augsnes mitruma satura un augstas transpirācijas gadījumā stumbru apkārtmēri palielinās visā diennakts periodā, dienas vidū ir novērojams stumbru apkārtmēru palielināšanās ātruma samazinājums, ko saista ar transpirāciju audu rehidrācijas laikā. Turpretī, augsnes ūdens deficīta apstākļos ar augstu transpirāciju, diennakts gaišajā laikā ir novērojama stumbru apkārtmēru samazināšanās, bet vakarā, audu rehidrācijas rezultātā, stumbriem ir vērojama piebriešana (Antonova et al., 1995; Cermák et al., 2007). Audos uzkrātais ūdens ir vieglāk un ātrāk pieejams transpirācijas sākumā, jo, kā rāda sulas plūsmas pētījumu rezultāti (Granier, 1987; Martin et al., 1997; Cermák et al., 2007), pieaugušos kokos sulas pārvietošana no stumbra bazālās daļas līdz lapotnei var ilgt vairākas stundas.

Līdzīgu rezultātu ieguva arī Steppe, Lemeur (2004), kas Eiropas dižskābardim (*Fagus sylvatica* L.) novēroja, ka agri no rīta, uzsākoties transpirācijai, gan stumbra pamatnes, gan zaru caurmēru izmaiņu amplitūdas ir atšķirīgas (3.7.att.). Stumbra caurmēram ir lielākas svārstības



nekā zariem, kas skaidrojams ar pārvietotā ūdens apjomu un radiālā pieauguma veidošanos. Novērojumu periodā paraugkoka stumbra caurmērs palielinājās par 0,4 %, bet zara – par 0,14%. Tas norāda, ka dažādās koka daļās uzkrāto ūdens rezervju izmantošanai transpirācijā ir atšķirīga dinamika.



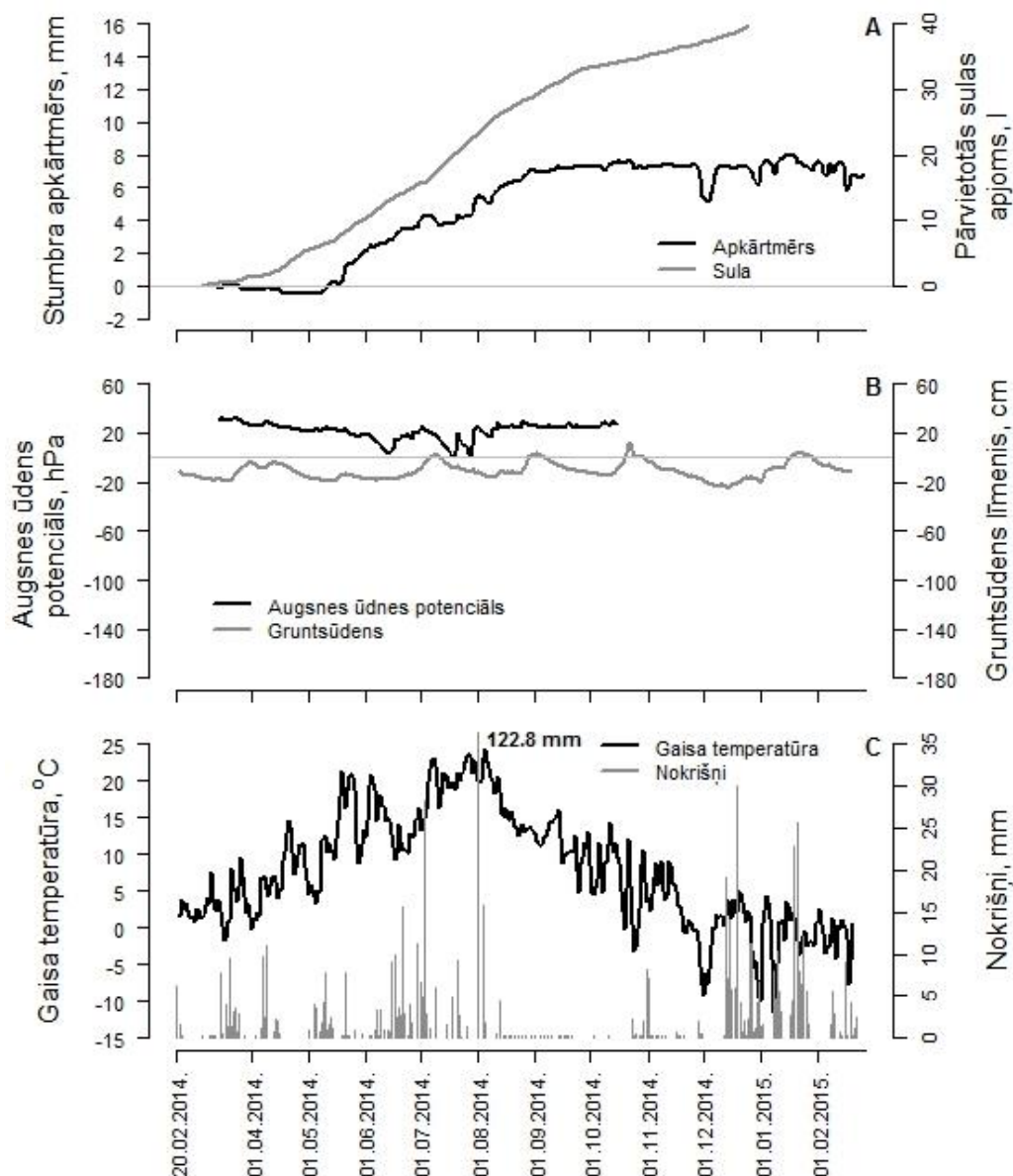
3.7.attēls. Eiropas dižskābarža (*Fagus sylvatica* L.) stumbra un zara caurmēru fluktuāciju diennakts dinamika (Steppe, Lemeur, 2004).

Dažādos veģetācijas sezonas posmos notiek atšķirīgas koka augšanas/fizioloģisko procesu fāzes, piemēram, apikālā augšana vai agrīnās un vēlīnās koksnes veidošanās (Domec, Gartner, 2002). Dendrometrijas kombinēšana ar sulu plūsmu mērījumiem sniedz iespēju novērot audu rehidrācijas gaitu, kas ir koku aizsargmehānisms, piemēram, augsnes ūdens deficīta apstākļos gan veģetācijas sezonā, gan saulainās ziemas dienās (mūžzaļajiem skujukokiem). Analizējot stumbra apkārtmēra fluktuāciju dinamiku veģetācijas sezonas laikā, ir identificējama meteoroloģisko parametru ietekme uz koka ūdens patēriņu un stumbra radiālo augšanu.

Līdzīgos augšanas apstākļos, bet pēc kontinentalitātes atšķirīgos Latvijas reģionos – rietumu (R) un centrālajā (C), divu parasto egļu stumbra apkārtmēra fluktuāciju un kumulatīvā ūdens patēriņa sezonas dinamikā (3.8., 3.9.att.) ir novērojama vides apstākļu ietekme.

Kā redzams 3.8. attēlā, pirms augšanas sezonas ir novērojamas apkārtmēra svārstības, ko līdzīgos pētījumos Mäkinen et al. (2008) un Yamashita et al. (2006) skaidrojuši ar audu rehidrāciju pēc ziemas, kas var notikt pat vairākus mēnešus pirms pumpuru plaukšanas un kambija šūnu dalīšanās sākuma. Yamashita et al. (2006) pētījumos ar *Cryptomeria japonica*

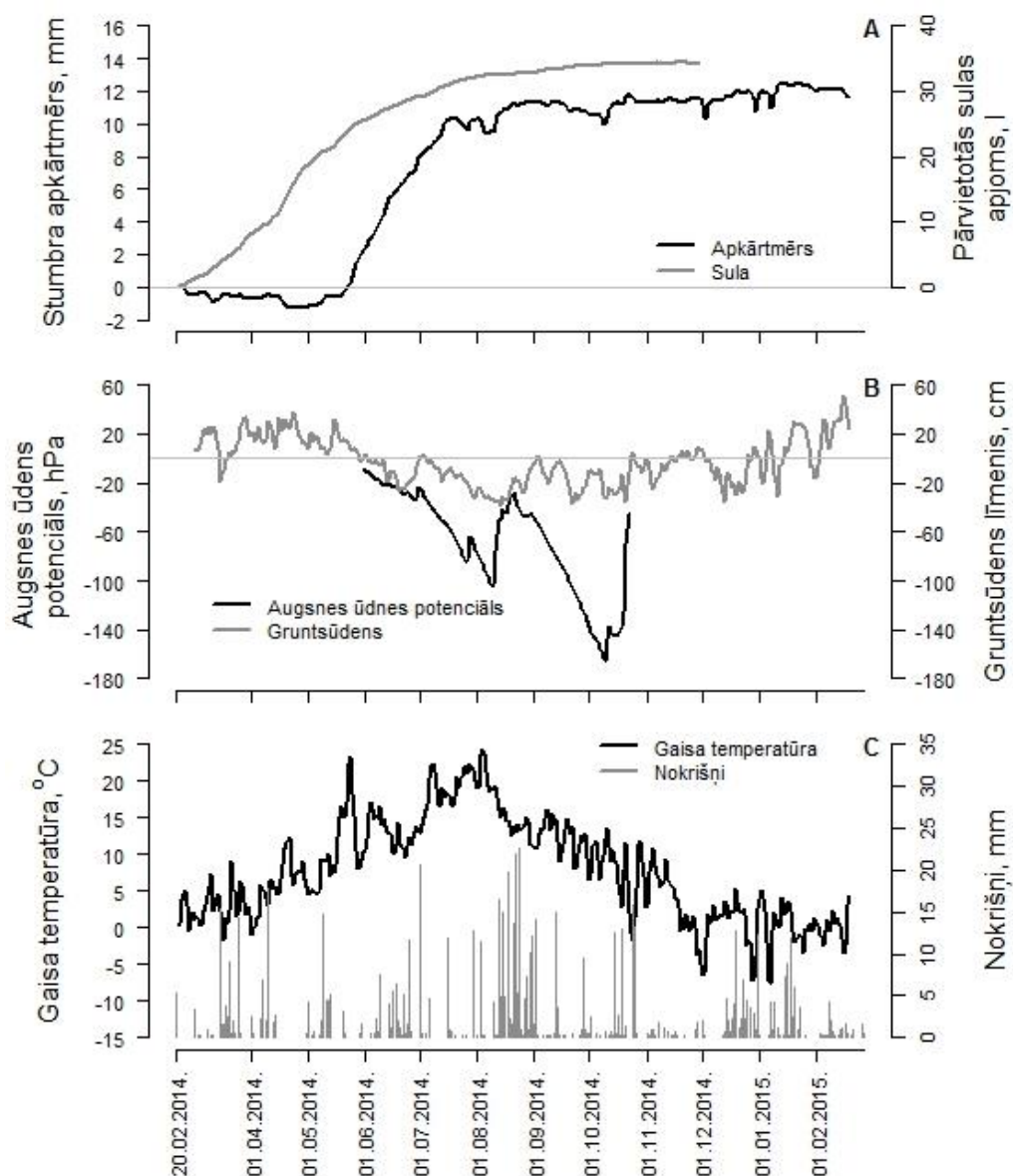
konstatējuši, ka par radiālā pieauguma veidošanās sākumu var pieņemt brīdi, kad beidzas pavasara rehidrācijas periodam sekojošais aptuveni 2 nedēļas ilga apkārtmēra nelielo (aptuveni 0,2 – 0,3 mm robežās) svārstību periods. Abiem paraugkokiem apkārtmēra palielināšanās pēc ziemas perioda beigu posma rehidrācijas sākās maija vidū. Par audu rehidrāciju, pumpuru briedināšanu un aktīvu transpirāciju liecina lielais pārvietotās sulas apjoms (stumbra segmentā, kur uzstādīts mērinstruments) līdz stumbra apkārtmēra palielināšanās sākumam. R paraugkokam tā ir gandrīz puse no visa sezonas apjoma, bet C paraugkokam – aptuveni ceturtdaļa.



3.8.attēls. Parastās egles (*Picea abies* Karst.) stumbra apkārtmēra un kumulatīvā ūdens patēriņa sezonas dinamika Latvijas centrālajā daļā 2014. gadā.

Abiem paraugkokiem stumbra apkārtmēra palielināšanās dinamika ir atšķirīga - R kokam (3.9.att.) ir daudz mazākas fluktuācijas kā C kokam (3.8.att.). Antonova et al. (1995) un Steppe,

Lemeur (2004) norādījuši, ka labvēlīgos vides apstākļos stumbriem novērojamas apkārtmēra palielināšanās un samazināšanās vērtību amplitūda ir daudz mazāka nekā augsnes sausuma vai ūdens pārsātinājuma apstākļos. C paraugkokam ir novērots augsnes mitruma pārsātinājums, bet augsnes ūdens potenciāla mērījumi R paraugkokam uzrāda, iespējams, labāku augsnes aerāciju, un vienlaikus pietiekamu mitrumu. Gruntsūdens līmeņa starpība starp abiem parauglaukumiem liecina par atšķirīgiem mitruma režīmiem. Biežās gruntsūdens līmeņa svārstības R paraugkokam radīja drenāžas efektu, bet gruntsūdens līmeņa stabilitāte C paraugkokam – stagnāta gruntsūdens efektu.



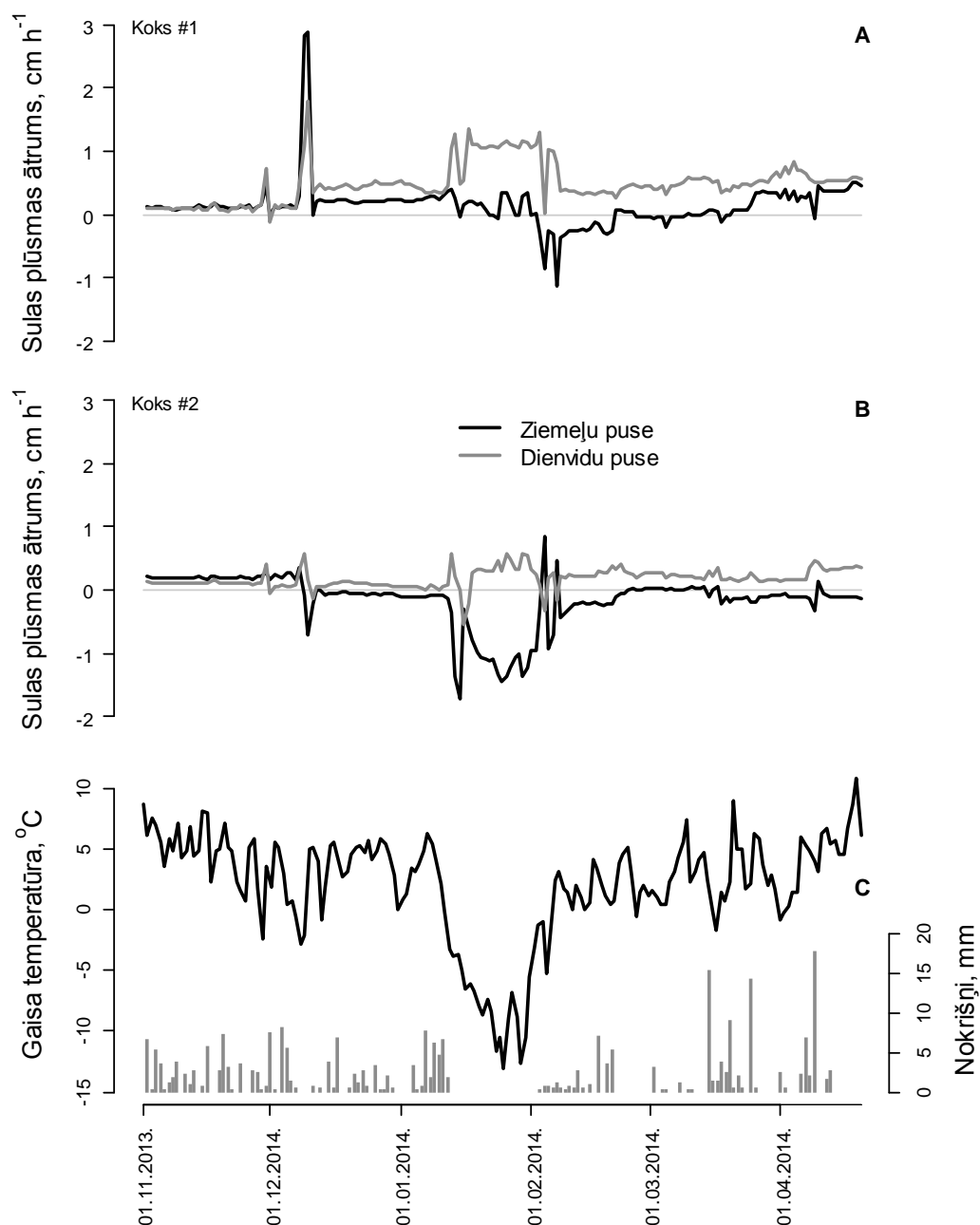
3.9.attēls. Parastās egles (*Picea abies* Karst.) stumbra apkārtmēra un kumulatīvā ūdens patēriņa sezonas dinamika Latvijas rietumu daļā 2014. gadā.

Vasaras vidū, kad reģistrētas augstākās gaisa temperatūras un zemas augsnes ūdens potenciāla vērtības, u vērojama stumbru apkārtmēra samazināšanās un ilgstošāka stabilitāte. Palielinoties nokrišņu apjomam un samazinoties gaisa temperatūrai, pēc vairākām dienām atsākās egļu stumbru apkārtmēra palielināšanās. Tā turpinājās līdz septembra sākumam; kā citā pētījumā norādījuši Gričar un Čufar (2008), šajā augšanas sezonas laikā izveidojas gadskārtas vēlinās koksnes šūnas un radiālā pieauguma veidošanās apstājas.

Informāciju par vides faktoru ietekmi uz koku augšanu pagātnē var sniegt dendrohronoloģiskie pētījumi - gadskārtu analīze (Matisons, Brūmelis, 2012), jo ikgadējais koksnes pieaugums ir atkarīgs no vides faktoriem veģetācijas sezonā (Pallardy, 2008). Visbiežāk gadskārtu veidošanos nosaka augšanas brīdī limitējošais faktors, kura iedarbības analīze ļauj prognozēt augšanas tendences tā ietekmē (Matisons, Brūmelis, 2012). Šādos pētījumos ir noskaidrojies, ka augšanu ļoti bieži ietekmē ne tikai veģetācijas sezonas, bet arī iepriekšējās ziemas vides faktori (Elferts et al., 2011).

Ziemas miera perioda ietekmi uz koku fizioloģiskajiem procesiem var novērot, izmantojot HPV sulas plūsmas monitoringa metodes. Šim nolūkam diviem melnalkšņiem Mazirbē veica ziemas sulas plūsmas mērījumus gan stumbru ziemeļu, gan dienvidu segmentos. Sulas plūsmas novērojumi uzrādīja gan augšupejošu, gan lejupejošu sulas plūsmu melnalkšņa stumbrā ziemas periodā. Katrā paraugkokā bija vērojami atšķirīgi sulas plūsmas virzieni starp abām stumbra pusēm (3.10.att.). Novērojumu perioda lielākajā daļā sulas plūsmas ātruma vērtības svārstījās no 0 līdz 3 cm h<sup>-1</sup> abu koku abās stumbra daļās. Pirmās nozīmīgās svārstības novēroja pie pirmajām negatīvajām gaisa temperatūras vērtībām novembrī un decembrī, un sulas plūsmas ātruma izmaiņas atbilda gaisa temperatūras svārstībām. Janvāra vidū sulas plūsmas ātruma izmaiņas sakrita ar straujo gaisa temperatūras pazemināšanos, vienlaicīgi fiksētie pretējie stumbra sulas plūsmu virzieni vienā kokā norāda uz sulas cirkulāciju. Gaisa temperatūras un nokrišņu apjoma paaugstināšanās bija galvenie sulas plūsmas ātruma palielināšanās izraisītājfaktori ziemas periodā.

Sulas plūsmas ātruma izmaiņas apskatītajā periodā norāda uz svārstīgu fizioloģisku aktivitāti melnalkšņa stumbrā ziemas periodā. Tas saskan ar citiem pētījumiem, kuros ir analizēta ziemas perioda ietekme uz koka augšanu nākamajā veģetācijas sezonā (Elferts et al., 2011; Matisons, Brūmelis, 2012).



Negatīvās sulas plūsmas ātruma vērtības norāda lejupejošu sulas plūsmu. 3.10.attēls. Dienas vidējie sulas plūsmas ātrumi (A un B), gaisa temperatūra un nokrišņu apjoms (C) novērojumu periodā.

Novērojumi liecina par nozīmīgu koka fizioloģisko reakciju uz gaisa temperatūru izmaiņām dažādos ziemas miera perioda posmos. Nākotnē – līdz 21. gadsimta beigām – tiek prognozēta šādu siltu ziemu biežāka atkārtošānās Ziemeļeiropā. Paaugstināta ziemas gaisa temperatūra varētu samazināt fizioloģisko aktivitāti, samazinot arī pārvietoto barības vielu rezerves, kas paredzētas salcietības izstrādāšanai. Tādējādi koki varētu ciest no lielākiem sala bojājumiem pēkšņos sala periodos. Tomēr pilnīgai analīzei ir nepieciešami novērojumi vairākos ziemas periodos ar atšķirīgu temperatūras režīmu.

## Izmantotā literatūra

- Ābolkalns J., Majore M., Stelle V. (1960). Driasa floras atliekas Gaujas ielejas trešās virspalu terases nogulumos. *Latvijas PSR ZA Vēstis*, 8: 99–107.
- Antonova G.F., Cherkashin V.P., Stasova V.V., Varaksina T.N. (1995). Daily dynamics in xylem cell radial growth of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *Trees*, 10: 24–30.
- Baker J.M., van Bavel C.H.M. (1987). Measurement of mass flow of water in the stems of herbaceous plants. *Plant, Cell and Environment*, 10: 777–782.
- Balek J., Pavlik O. (1977). Sap stream velocity as an indicator of the transpirational process. *Journal of Hydrology*, 34: 193–200.
- Bergh J., Linder S. (1999). Effects of soil warming during spring on photosynthetic recovery in boreal Norway spruce stands. *Global Change Biology*, 5: 245–253.
- Berry J.A., Downton W.J.S. (1982). Environmental regulation of photosynthesis. - Govindjee (eds.). *Photosynthesis, Vol.2., Development, carbon metabolism, and plant productivity*. Academic Press, New York, 263–343.
- Burgess S.S.O., Adams M.A., Turner N.C., Beverly C.R., Ong C.K., Khan A.A.H., Bleby T.M. (2001). An improved heat pulse method to measure low and reverse rates of sap flow in woody plants. *Tree Physiology*, 21: 589–598.
- Calder I.R., Narayanswamy M.N., Srinivasalu N.V., Darling W.G., Lardner A.J. (1986). Investigation into the use of deuterium as a tracer for measuring transpiration from eucalypts. *Journal of Hydrology*, 84: 345–351.
- Cassel D.K., Klute A. (1986). Water potential: tensiometry. – *Methods of Soil Analysis: Part 1 – Physical and Mineralogical Methods*, Soil Science Society of America, American Society of Agronomy, 563–596.
- Cermák J. (1991). Tree transpiration and its importance in forest ecology. PhD Thesis, Faculty of Forestry, Mendel University in Brno, Czech Republic, 97 p.
- Čermák J., Cienciala E., Kučera J., Lindroth A., Bednárová E. (1995). Individual variation of sap-flow rate in large pine and spruce trees and stand transpiration: a pilot study at the central NOPEX site. *Journal Hydrology*, 168: 17–27.
- Čermák J., Deml M., Penka M. (1973). A new method of sap flow rate determination in trees. *Biologia Plantarum*, 15: 171–178.
- Čermák J., Kučera J., Bauerle W.L., Phillips N., Hinckley T.M. (2007). Tree water storage and its diurnal dynamics related to sap flow and changes in stem volume in old-growth Douglas-fir trees. *Tree Physiology*, 27(2): 181–198.

- Cermák J., Kucera J., Nadezhdina N. (2004). Sap flow measurements with some thermodynamic methods, flow integration within trees and scaling up from sample trees to entire forest stands. *Trees - Structure and Function*, 18: 529–546.
- Čermák J., Matyssek R., Kučera J. (1993). Rapid response of large, drought-stressed beech trees to irrigation. *Tree Physiology*, 12: 281–290.
- Cermák J., Nadezhdina N., Trcala M., Simon J. (2015). Open field-applicable instrumental methods for structural and functional assessment of whole trees and stands. *iForest- Biogeosciences and Forestry*, 8: 226–278.
- Čermák J., Úlehla J., Kučera J., Penka M. (1982). Sap flow rate and transpiration dynamics in the full-grown oak (*Quercus robur* L.) in floodplain forest exposed to seasonal floods as related to potential evapotranspiration and tree dimensions. *Biologia Plantarum*, 24(6): 446–460.
- Chandra S., Lindsey P.A., Bassuk N.L. (1994). A gauge to measure the mass flow rate of water in trees. *Plant, Cell and Environment*, 17: 867–874.
- Chen J., Franklin J.F., Spies T.A. (1995). Growing-season microclimatic gradients from clearcut edges into old-growth Douglas-fir forests. *Ecological Applications*, 5(1): 74–86.
- Cienciala E., Lindroth A., Cermák J., Hällgren J.-E., Kučera J. (1992). Assessment of transpiration estimates for *Picea abies* trees during a growing season. *Trees*, 6: 121–127.
- Cohen Y., Fuchs M., Green G.C. (1981). Improvement of the heat-pulse method for determining sap flow in trees. *Plant, Cell and Environment*, 4: 391–397.
- Daum C.R. (1967). A method for determining water transport in trees. *Ecology*, 48(3): 425–431.
- David T.S., Pinto C.A., Nadezhdina N., Kurz-Besson C., Henriques M.O., Quilho T., Cermak J., Chaves M.M., Pereira J.S., David J.S. (2013). Root functioning, tree water use and hydraulic redistribution in *Quercus suber* trees: A modeling approach based on root sap flow. *Forest Ecology and Management*, 307: 136–146.
- DeLucia E.H., Smith W.K. (2011). Air and soil temperature limitations on photosynthesis in Engelmann spruce during summer. *Canadian Journal of Forest Research*, 17: 527–533.
- Delzon S., Loustau D. (2005). Age-related decline in stand water use: sap flow and transpiration in a pine forest chronosequence. *Agricultural and Forest Meteorology*, 129(3): 105–119.

- Deshpande B.P. (1967). Initiation of cambial activity and its relation to primary growth in *Tilia americana* L. PhD Thesis, University of Wisconsin, Madison, 118 p.
- Dinger E.J., Rose R. (2009). Integration of soil moisture, xylem water potential, and fall–spring herbicide treatments to achieve the maximum growth response in newly planted Douglas-fir seedlings. *Canadian Journal of Forest Research*, 39(7): 1401–1414.
- Domec J.C., Gartner B.L. (2002). How do water transport and water storage differ in coniferous earlywood and latewood? *Journal of Experimental Botany*, 53(379): 2369–2379.
- Dye P.J., Olbrich B.W., Poulter A.G. (1991). The influence of growth rings in *Pinus patula* on heat pulse velocity and sap flow measurement. *Journal of Experimental Botany*, 42: 867–870.
- Elferts D., Dauškane I., Ūsele G., Treimane A. (2011). Effect of water level and climatic factors on the radial growth of black alder. *Proceedings of the Latvian Academy of Sciences. Section B*, 65 (5-6): 164–169.
- Fernández E., Čermák J., Cohen Y., Ferreira I., Nadezhdina N., Testi L., Steppe K. (2013). Methods to Estimate Sap Flow. ISHS Working Group on Sap Flow, 8 p.
- Ford C.R., McGuire M.A., Mitchell R.J., Teskey R.O. (2004). Assessing variation in the radial profile of sap flux density in *Pinus* species and its effect on daily water use. *Tree Physiology*, 24(3): 241–249.
- Fritschen L.J., Cox L., Kinerson R. (1973). A 28-meter Douglas-fir in a weighing lysimeter. *Forest Science*, 19: 256–261.
- Granier A. (1985). Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres (A new method of sap flow measurement in tree stems). *Annals of Forest Science*, 42: 193–200.
- Granier A. (1987). Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements. *Tree Physiology*, 3(4): 309–320.
- Granier A., Bréda N., Claustres J.P., Colin F. (1989). Variation of hydraulic conductance of some adult conifers under natural conditions. *Annals of Forest Science*, 46(S): 357–360.
- Granier A., Loustau D. (1994). Measuring and modelling the transpiration of a maritime pine canopy from sap-flow data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 71(1): 61–81.
- Granier A., Loustau D., Bréda N. (2000). A generic model of forest canopy conductance dependent on climate, soil water availability and leaf area index. *Annals of Forest Science*, 57(8): 755–765.



- Green S. (1998). Measurements of sap flow by the heat-pulse method. An Instruction Manual for the HPV system. HortResearch internal Report IR98, 54 p.
- Greenidge K.N.H. (1955). Observations on the movement of moisture in large woody stems. *Canadian Journal of Botany*, 33: 202–221.
- Greenwood E.A.N., Beresford J.D. (1979). Evaporation from vegetation in landscapes developing secondary salinity using the ventilated-chamber technique. *Journal of Hydrology*, 42: 369–382.
- Gričar J., Čufar K. (2008). Seasonal dynamics of phloem and xylem formation in silver fir and Norway spruce as affected by drought. *Russian Journal of Plant Physiology*, 55(4): 538–543.
- Harrison P.A., Berry P.M., Butt N., New M. (2006). Modelling climate change impacts on species' distributions at the European scale: implications for conservation policy. *Environmental Science & Policy*, 9(2): 116–128.
- Herzog K.M., Häslér R., Thum R. (1995). Diurnal changes in the radius of a subalpine Norway spruce stem: their relation to the sap flow and their use to estimate transpiration. *Trees*, 10: 94–101.
- Hogg E.H., Hurdle P. A. (1997). Sap flow in trembling aspen: implications for stomatal responses to vapor pressure deficit. *Tree Physiology*, 17(8-9): 501–509.
- Huber B. (1932). Beobachtung und Messung pflanzlicher Saftströme. *Berichte der Deutschen Botanische Gesellschaft*, 50: 89–109.
- Incropera F.P., DeWitt D.P. (1990). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (3rd ed.). Wiley, New York, 53 p.
- IPCC, 2014: *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 p.
- Ittner E. (1968). Der Tagesgang der Geschwindigkeit des Transpirationsstromes im Stamm einer 75-jähriger Fichte. *Oecologia Plantarum*, III: 177–183.
- Kang S., Hu X., Goodwin I., Jerie P. (2002). Soil water distribution, water use, and yield response to partial root zone drying under a shallow groundwater table condition in a pear orchard. *Scientia Horticulturae*, 92(3): 277–291.
- Klepper B., Browning V.D., Taylor H.M. (1971). Stem diameter in relation to plant water status. *Plant Physiology*, 48(6): 683–685.

- Kline J.R., Martin J.R., Jordan C.F., Koranda J.J. (1970). Measurement of transpiration in tropical trees with tritiated water. *Ecology*, 51: 1068–1073.
- Kline J.R., Reed K.L., Waring R.H., Stewart, M.L. (1976). Field measurement of transpiration in Douglas-fir. *Journal of Applied Ecology*, 13: 272–283.
- Knight D.H., Fahey T.J., Running S.W., Harrison A.T., Wallace L.L. (1981). Transpiration from 100-year-old lodgepole pine forests estimated with whole-tree potometers. *Ecology*, 62: 717–26.
- Köstner B., Schupp R., Schulze E.-D., Rennenberg H. (1998). Organic and inorganic sulfur transport in the xylem sap and the sulfur budget of *Picea abies* trees. *Tree Physiology*, 18: 1–9.
- Kučera J., Čermák J., Penka M. (1977). Improved thermal method of continual recording the transpiration flow rate dynamics. *Biologia Plantarum*, 19: 413–420.
- Kuhns M.R., Garrett H.E., Teskey R.O., Hinckley T.M. (1985). Root growth of black walnut trees related to soil temperature, soil water potential, and leaf water potential. *Forest Science*, 31(3): 617–629.
- Kullman L. (2008). Early postglacial appearance of tree species in northern Scandinavia: review and perspective. *Quaternary Science Reviews*, 27(27): 2467–2472.
- Levia D.F., Carlyle-Moses D., Tanaka T. (2011). *Forest Hydrology and Biogeochemistry: Synthesis of Past Research and Future Directions*. Ecological Studies, 216, Springer Science & Business Media, 735 p.
- Lindner M., Maroschek M., Netherer S., Kremer A., Barbati A., Garcia-Gonzalo J., Seidl R., Delzon S., Corona P., Kolström M., Lexer M.J., Marchetti M. (2010). Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *Forest Ecology and Management*, 259(4): 698–709.
- Lopushinsky W. (1964). Effect of water movement on ion movement into the xylem of tomato roots. *Plant physiology*, 39(3): 494–501.
- Mäkinen H., Seo J. W., Nöjd P., Schmitt U., Jalkanen R. (2008). Seasonal dynamics of wood formation: a comparison between pinning, microcoring and dendrometer measurements. *European Journal of Forest Research*, 127(3): 235–245.
- Mann M.E., Zhang Z., Hughes M.K., Bradley R.S., Miller S.K., Rutherford S., Ni F. (2008). Proxy-based reconstructions of hemispheric and global surface temperature variations over the past two millennia. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 105 (36): 13252-13257.

- Marshall D.C. (1958). Measurement of sap flow in conifers by heat transport. *Plant physiology*, 33(6): 385–396.
- Martin T.A., Brown K.J., Cermak J., Ceulemans R., Kucera J., Meinzer F.C, Rombold J.S., Sprugel D.G., Hinckley T.M. (1997). Crown conductance and tree and stand transpiration in a second-growth *Abies amabilis* forest. *Canadian Journal of Forest Research*, 27(6): 797–808.
- Matisons R., Brūmelis G. (2012). Influence of climate on tree-ring and earlywood vessel formation in *Quercus robur* in Latvia. *Trees*, 26(4): 1251–1266.
- Mellander P.E., Bishop K., Lundmark T. (2004). The influence of soil temperature on transpiration: a plot scale manipulation in a young Scots pine stand. *Forest Ecology and Management*, 195(1): 15–28.
- Monteith J.L. (1965). Evaporation and environment. *Symposia of the Society for Experimental Biology*, 19: 205–234.
- Nadezhdina N. (2010). Integration of water transport pathways in a maple tree: responses of sap flow to branch severing. *Annals of Forest Science*, 67: 107.
- Nadezhdina N., Cermák J., Gašpárek J., Nadezhdin V., Prax A. (2006). Vertical and horizontal water redistribution within Norway spruce (*Picea abies*) roots in the Moravian Upland. *Tree Physiology*, 26: 1277–1288.
- Nadezhdina N., Čermák J., Nadezhdin V. (1998). Heat field deformation method for sap flow measurements. – Čermak J., Nadezhdina N. (eds.). *Measuring Sap Flow in Intact Plants*, IUFRO Publications, Publishing House of Mendel University, Brno, Czech Republic, 72–92.
- Nadezhdina N., Vandegehuchte M.W., Steppe K. (2012). Sap flow measurements based on heat field deformation method. *Trees*, 26: 1439–1448.
- Owston P.W., Smith J.L., Halverson, H.G. (1972). Seasonal water movement in tree stems. *Forest Science*, 18: 266–272.
- Pallardy S.G. (2008). *Physiology of Woody Plants* (3rd Edition). San Diego, Academic Press. 454 p.
- Pederson N., Cook E.R., Jacoby G.C., Peteet D.M., Griffin K.L. (2004). The influence of winter temperatures on the annual radial growth of six northern range margin tree species. *Dendrochronologia*, 22(1): 7–29.
- Pesonen E., Mielikäinen K., Mäkinen H. (2004). A new girth band for measuring stem diameter changes. *Forestry*, 77(5): 431–439.

- Philip J.R. (1966). Plant water relations: some physical aspects. *Annual Review of Plant Physiology*, 17(1): 245–268.
- Richter G. (2012). Xylem sap flow of mature black alder in relations to tree characteristics, microclimate and groundwater table. Unpublished master thesis. Technische Universitat Dresden, Free State of Saxony, Germany, 35 p.
- Roberts J. (1976). An examination of the quantity of water stored in mature *Pinus sylvestris* L. trees. *Journal of Experimental Botany*, 27: 473–479.
- Roberts J. (1977). The use of tree-cutting techniques in the study of the water relations of mature *Pinus sylvestris* L. *Journal of Experimental Botany*, 28: 751–767.
- Roberts S.D., Harrington C.A., Terry T.A. (2005). Harvest residue and competing vegetation affect soil moisture, soil temperature, N availability, and Douglas-fir seedling growth. *Forest Ecology and Management*, 205: 333–350.
- Robichaud P.R., Gasvoda D.S., Hungerford R.D., Bilskie J., Ashmun L.E., Reardon J. (2004). Measuring duff moisture content in the field using a portable meter sensitive to dielectric permittivity. *International Journal of Wildland Fire*, 13(3): 343–353.
- Sakuratani T. (1981). A heat balance method for measuring water flux in the stem of intact plants. *Journal of Agricultural Meteorology*, 37: 9–17.
- Salisbury F.B., Ross C.W. (1992). *Plant Physiology* (4th Edition). Wadsworth Publishing Co, Belmont, CA, 682 p.
- Schulze E.-D., Čermák J., Matyssek M., Penka M., Zimmermann R., Vasíček F., Gries W., Kučera J. (1985). Canopy transpiration and water fluxes in the xylem of the trunk of *Larix* and *Picea* trees – a comparison of xylem flow, porometer and cuvette measurements. *Oecologia*, 66: 475–483.
- Senock R.S., Ham J.M. (1993). Heat balance sap flow gauge for small diameter stems. *Plant, Cell and Environment*, 16: 593–601.
- Steinberg S.L., van Bavel C.H.M., McFarland M.J. (1990). Improved sap flow gauge for woody and herbaceous plants. *Agronomy Journal*, 82: 851–854.
- Steppe K., De Pauw D.J., Doody T.M., Teskey R.O. (2010). A comparison of sap flux density using thermal dissipation, heat pulse velocity and heat field deformation methods. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(7): 1046–1056.
- Steppe K., Lemeur R. (2004). An experimental system for analysis of the dynamic sap-flow characteristics in young trees: results of a beech tree. *Functional Plant Biology*, 31: 83–92.

- Sykes M.T., Prentice I.C., Cramer W. (1996). A bioclimatic model for the potential distributions of north European tree species under present and future climates. *Journal of Biogeography*, 23: 203–233.
- Tatarinov F.A., Kucera J., Cienciala E. (2005). The analysis of physical background of tree sap flow measurement based on thermal methods. *Measurement Science and Technology*, 16: 1157–1169.
- Thuiller W. (2004). Patterns and uncertainties of species' range shifts under climate change. *Global Change Biology*, 10(12): 2020–2027.
- Trcala M., Čermák J. (2012). Improvement of the trunk heat balance method including measurement of zero and reverse sap flows. *Agricultural and Forest Meteorology*, 166: 120–126.
- Valancogne C., Nasr Z. (1989). Measuring sap flow in the stem of small trees by a heat balance method. *Horticultural Science*, 24: 383–385.
- Verbeeck H., Steppe K., Nadezhdina N., Op De Beeck M., Deckmyn G., Meiresonne L., Lemeur R., Čermák J., Ceulemans R., Janssens I.A. (2007). Model analysis of the effects of atmospheric drivers on storage water use in Scots pine. *Biogeosciences*, 4: 657–671.
- Vieweg G.H., Ziegler H. (1960). Thermoelektrische Registrierung der Geschwindigkeit des Transpirationsstromes I. *Berichte der Deutschen Botanische Gesellschaft*, 73: 221–226.
- Walther G.R., Post E., Convey P., Menzel A., Parmesan C., Beebee T.J.C., Fromentin J.-M., Hoegh-Guldberg O., Bairlein F. (2002). Ecological responses to recent climate change. *Nature*, 416: 389–395.
- Ward A.D., Trimble S.W. (2003). *Environmental hydrology*. CRC Press, 461 p.
- Waring R.H., Roberts J.M. (1979). Estimating water flux through stems of Scots pine with tritiated water and phosphorus-32. *Journal of Experimental Botany*, 30: 459–471.
- Way D.A., Oren R. (2010). Differential responses to changes in growth temperature between trees from different functional groups and biomes: a review and synthesis of data. *Tree Physiology*, 30: 669–688.
- Weibel F.P., Vos J.A. (1994). Transpiration measurements on apple trees with an improved stem heat balance method. *Plant and Soil*, 166: 203–219.
- Wullschlegel S.D., Meinzer F.C., Vertessy R.A. (1998). A review of whole-plant water use studies in tree. *Tree physiology*, 18(8-9): 499–512.
- Yamashita K., Okada N., Kamo K. (2006). Application of the wire dendrometer for monitoring the radial growth of trees: A comparison with the conventional band dendrometer and

the pinning method (in Japanese with English abstract and legends). *Mokuzai Gakkaishi*, 52: 8–18.

Zahner R. (1968). Water deficits and growth of trees. – Kozlowski T.T. (ed.). *Water Deficits and Plant Growth*. Academic Press, New York, 191–254.

Zālītis P. (2006). *Mežkopības priekšnosacījumi*. Rīga, “Et cetera”. 219 lpp.

Zimmermann M.H. (1964). The effect of low temperature on ascent of sap in trees. *Plant Physiology*, 39(4): 568–572.

Zīvertis A. (2004). *Hidroloģija*. LLU, Jelgava. 104 lpp.