

HODNOCENÍ UKOTVENÍ STROMŮ V PODLOŽÍ JAKO ZÁKLADNÍ PARAMETR JEJICH STABILITY - II. NEDESTRUKTIVNÍ, EKOFYZIOLOGICKÉ METODY: odborné sdělení

THE ASSESSMENT OF TREE ANCHORING IN THE GROUND AS A BASIC PARAMETER OF THEIR STABILITY - II. NON-DESTRUCTIVE, ECOPHYSIOLOGICAL METHODS: short communication

JAN ČERMÁK¹⁾ ✉ - NADEZHDA NADEZHINA¹⁾ - JAROSLAV SIMON¹⁾ - ZDENĚK STANĚK²⁾ - JAN KOLLER²⁾

¹⁾Mendelova univerzita v Brně, Lesnická a dřevařská fakulta, Zemědělská 3, CZ - 613 00 Brno

²⁾České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Technická 2, CZ - 166 27 Praha 6

✉ e-mail: cermak@mendelu.cz

ABSTRACT

Tree anchoring in the soil by fixation of the root system is the most basic aspect of tree stabilization and resistance to uprooting. Understanding of this phenomenon is important especially in parks, in the linear alleys or for solitary individuals in an urban environment, as well as in the forest vegetation. The assessment of tree anchoring in the subsoil makes use of a number of methods, of which destructive and mechanical approaches were discussed earlier (ČERMÁK et al. 2015). The present study summarizes the approaches based on (i) sonic tomography and (ii) measuring the transpiration stream. The category of validated, specific methods stemming from the principles of ecophysiology includes a set of techniques based on measuring the transpiration stream and deriving the distribution of active root systems, as well as impulse tomography, which includes the potential assessment of root-rot. Furthermore, there are methods of acoustic tomography to detect and assess the condition of large skeletal roots and the trunk base. The two methods, or rather a set of methodologies form a coherent system stemming from scientific physical foundations. Naturally, both of these have been validated for several dozens of woody species under differentiated natural conditions as part of a number of specific studies and form, along with the set of destructive and mechanical methods, an interconnected complex for solving the mentioned issue.

Klíčová slova: ukotvení stromu v půdě, nedestruktivní metody, absorpční plocha kořenů, pulsní tomografie

Key words: tree anchoring in the ground, non-destructive methods, absorption area of roots, impulse tomography

ÚVOD

Nedestruktivní ekofyziologické metody hodnocení kořenových systémů stromů vycházejí z fyzikálních metod měření speciálních parametrů týkajících se životního procesu stromů. Vybrané parametry mají zpravidla širší význam pro hodnocení prosperity, stavu a vývoje stromů a porostů, a dále pak v praktické oblasti pro formulaci optimální fytotechniky. Z celé škály metod jsou prezentovány pouze metody ověřené a aplikačně využitelné. Předkládané sdělení navazuje na předchozí článek věnovaný mechanickým (destruktivním) a fyzikálním (nedestruktivním) metodám hodnocení ukotvení stromů v podloží (ČERMÁK et al. 2015).

PŘEHLED METOD

Metoda akustické tomografie

Akustické metody, a z nich zejména pulsní tomografie, byly původně vyvinuty především pro studie zdravotního stavu kmenů (obr. 1 – A). Tato metoda je založena na detekci zvukového pulsu generovaného malým kladívkem na kmeni stromu a zaznamenávaného sérií cca de-

seti mikrofonů instalovaných ve stejných vzájemných vzdálenostech kolem kmene stromu (závisí na průměru a tvaru průřezu kmene). Tato metoda byla také aplikována pro detekci velkých skeletových kořenů, kdy mikrofony zůstaly na kmeni stromů, ale zvukové pulsy byly generovány velkým kladívkem v kombinaci s kovovou deskou (ve funkci kovvadliny), která byla postupně přenášena kolem stromu ve vzdálenosti dva až tři metry (obr. 1 – B). Výsledky těchto měření mohou charakterizovat riziko odumření celého stromu, případně jeho následujícího pádu při výskytu poškozených kořenů (SIMON, ČERMÁK 2011).

Měření transpiračního proudu

Aby bylo možné odvodit distribuci kořenů v půdě na základě zpracování vektorů transpiračního proudu (či hustoty proudu v běli podél poloměru kmene nebo velkých kořenů a větví v koruně), je třeba použít multibodových čidel (ČERMÁK, NADEZHINA 1998) pracujících s metodou deformace tepelného pole (HFD), (NADHEZDINA et al. 2012a, 2012b). Čidla sestávají z lineárního ohříváče a série termočlánkových párů umístěných v nerezových (injekčních) jehlách ve vertikální vzdálenosti 15 mm nad a pod ohříváčem a 5 mm u obou bočních stran. Termočlánky uvnitř jehel jsou umístěny ve vzájemných vzdá-

lenostech 6 mm až 16 mm (první z nich 20 mm od okraje hlavičky jehly). Transpirační proud (Q_w) je obvykle měřen ze čtyř světových stran, nebo např. směrem do svahu a ze svahu plus do stran, nebo alespoň ze dvou protilehlých stran (např. východ a západ) ve výšce 1,3 m.

Hustota transpiračního proudu na 1 cm širokou sekci kmene v kambiu (q_i) je počítána dle vztahu

$$q_i = 3,6 D L_{ax}/L_{tg} [(dT_{ax} - dT_{tg}_0) + (dT_{ax} - dT_{tg}_i)]/dT_{tg} \quad [\text{kg cm}^{-1}\text{h}^{-1}] \quad (1)$$

kde konstanta 3,6 pře počítává sekundy na hodiny a současně gramy na kg; D je tepelná difusivita čerstvého bělového dřeva (jako nominální hodnota D byla předpokládána $2,25 \cdot 10^{-3} \text{cm}^2 \text{s}^{-1}$); $(dT_{ax} - dT_{tg}_0)$ je teplotní rozdíl (v K) mezi oběma měřenými teplotními gradienty dT odvozenými ze vztahu dT_{tg} k dT_{ax}/dT_{tg} pro podmínky nulové hodnoty proudu a $(dT_{ax} - dT_{tg}_i)$ pro skutečně měřenou hodnotu proudu; indexy ax a tg znamenají polohu odpovídajících teplot v axiálním a tangenciálním směru; L_{ax} je vzdálenost mezi horním koncem axiální termočlánekové dvojice umístěné nad ohříváčem (vzdálenost 15 mm měřená mezi osami jehel, přičemž referenční konec termočlánekové dvojice je umístěn na stejnou vzdálenost pod ohříváčem); L_{tg} je tangenciální vzdálenost jehly s termočlánekou od ohříváče (ta činí 5 mm mezi osami jehel, ale jen 3,5 mm mezi vnitřními okraji jehel umístěných ve výšce ohříváče), přičemž jejich referenční konce jsou umístěny ve stejné jehle jako dT_{ax} .

Naměřené teplotní rozdíly jsou zpracovány v příslušné rovnici a vyjádřeny pro měřenou sekci kmene širokou 1 cm (v $\text{dm}^3 \text{cm}^{-1} \text{h}^{-1}$) pro různé hloubky bělové části dřeva a poté integrovány ze série použitých čidel na celý strom (v $\text{dm}^3 \text{h}^{-1}$) podle odpovídajících ploch mezikruží bělové části dřeva (zpravidla s krokem 1% poloměru dřevní části kme-

ne). Tímto postupem je zjištěn radiální profil transpiračního proudu ze série (obvykle čtyř) stran kmene. Data jsou zpravidla zaznamenávána v případě použití analogových výstupů z termočláneků analogovými datalogery Midi 12, EMS/UNILOG (Brno, Česká republika) nebo v případě použití čidel s digitálním výstupem rovněž digitálními datalogery z produkce ICT International (Armidale, Austrálie).

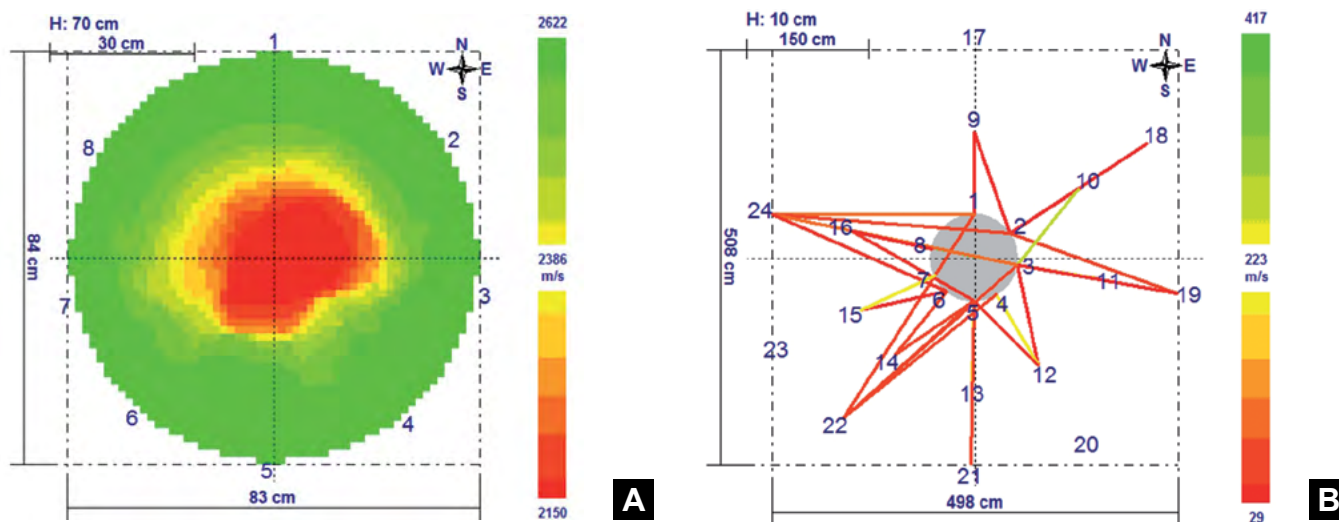
Odvození distribuce aktivních kořenových systémů z dat transpiračního proudu

Distribuce absorpčně aktivních částí kořenového systému celého stromu je odvozována z vektorů transpiračního proudu, resp. jeho hustoty v kmeni v radiálním směru. Taková naměřená křivka má obvykle více či méně asymetrický tvar. Díky matematické práci chemiků v chromatografické laboratoři, kteří byli nuceni zabývat se podobnými křivkami, u nich představovanými použitými kolonami nedostatečně rozdělené látky (zaznamenávané jako píky), se podařilo problém specifickým způsobem vyřešit.

Podle tohoto postupu lze jakékoli asymetrické křivky rozdělit na dvě symetrické (např. Gaussovy) křivky, nacházející se v různé poloze, jmenovitě v různé hloubce radiálního profilu kmene (obr. 2). To je možné vyjádřit rovnicí ve tvaru:

$$Q_w = \{a \cdot \exp[-b \cdot (c-x)^2]\} + \{d \cdot \exp[-e \cdot (f-x)^2]\} \quad (2)$$

Interpretace této křivky ovšem vychází z řady experimentálních studií, ze kterých vyplynulo, že povrchové kořeny jsou spojeny převážně s vnějšími vrstvami bělové části dřeva (které zahrnuje vnější křivka), zatímco hluboké (kotevní a kůlové) kořeny jsou převážně spojeny s hlubšími vrstvami běle. Obě křivky se navzájem částečně prolínají, což odpovídá i rozložení příslušných kořenů. Jestliže je nutné měřit



Obr. 1. Sonický tomogram kmene jasanu (ve výšce 70 cm) z oblasti lužního lesa (A). Číselně je označeno umístění mikrofonů na kmene, barevnou škálou (červená, žlutá, zelená) pak rychlost procházejícího zvukového impulsu. Zároveň je zobrazena distribuce skeletových kořenů v půdě (B). Číselně jsou označena měřičště v půdě okolo kmene. Při vyhodnocování rychlosti impulsu (zobrazen stejnou barevnou škálou s odlišnými hodnotami) je nutná doplňková kalibrace

Fig. 1. Sonic tomogram of the trunk at a height of 70 cm for an ash tree from an area of alluvial forest (A). The numbers identify the location of microphones on the trunk whilst the colour scale (red, yellow, green) illustrates the rate of the sound pulse passing through. The distribution of the skeleton roots in the soil (B) is also shown along with the sites of measurement in the soil around the trunk (numerical labelling). Evaluating the pulse rate (displayed by the same colour scale with different values) requires additional calibration

hustotu proudu separátně u jednotlivých kořenů, je postup stejný, jen při instalaci čidel je nutné alespoň malou část takových kořenů odhalit, aby tam mohla být čidla umístěna, případně prováděna manipulace s dalšími nástroji v případě zvláštních experimentů.

Jestliže jsou s kořeny prováděny podobné experimenty (např. jsou na určitých místech zavlaženy nebo odříznuty od kmene), je možné rozlišit dva druhy odezvy transpiračního proudu: (i) reversibilní vztup proudu, který může nastat v případě opatrně prováděných pokusů a (ii) „ireversibilní“ pokles proudu v případě hrubých pokusů (pod pojmem ireversibilní míníme alespoň po dobu pokusů). Jen taková „ireversibilní“ změna může být brána jako např. specifické poškození kořenů. Velikost určitého poškození kořenů jsme definovali jako integrovaný rozdíl mezi hodnotami transpiračního proudu v různých hloubkách bělové části dřeva před pokusem ($Q_{w,orig}$) a po stabilizaci proudu po skončení pokusu ($Q_{w,treat}$), ve srovnání s hodnotou proudu těsně po skončení pokusu ($Q_{w,sev}$). Tato hodnota nemusí být nutně nulová, protože povrchový kořen může být zásobován vodou z nepoškozených hlubokých kořenů, které nemusí být shora viditelné. Příslušná hodnota proudu může pak být označována jako „relativní nula“ pro konkrétní pokusný kořen. Původní hodnota transpiračního proudu na jednotkovou sekci (v $kg\ cm^{-1}\ h^{-1}$) může být vyjádřena jako ($Q_{w,orig} - Q_{w,treat}$) a brána jako 100%, a snížená hodnota proudu po poškození kořene jako ($Q_{w,treat} - Q_{w,orig}$). Hodnoty proudu v různých hloubkách nebo integrované hodnoty ze všech hloubek (i) je možné brát v úvahu, jestliže vypočteme zbývající relativní hodnotu proudu ($Q_{w,rem}$). Rela-

tivní poškození kořene ($Q_{w,dam}$) je pak vypočteno z měřených hodnot proudu, tj. zbývajících procent původního proudu, což lze vyjádřit jako

$$Q_{w,rem} = \sum_{i=1}^{i=n} [(Q_{w,load} - Q_{w,sev}) / (Q_{w,orig} - Q_{w,sev})] * 100 \quad (3)$$

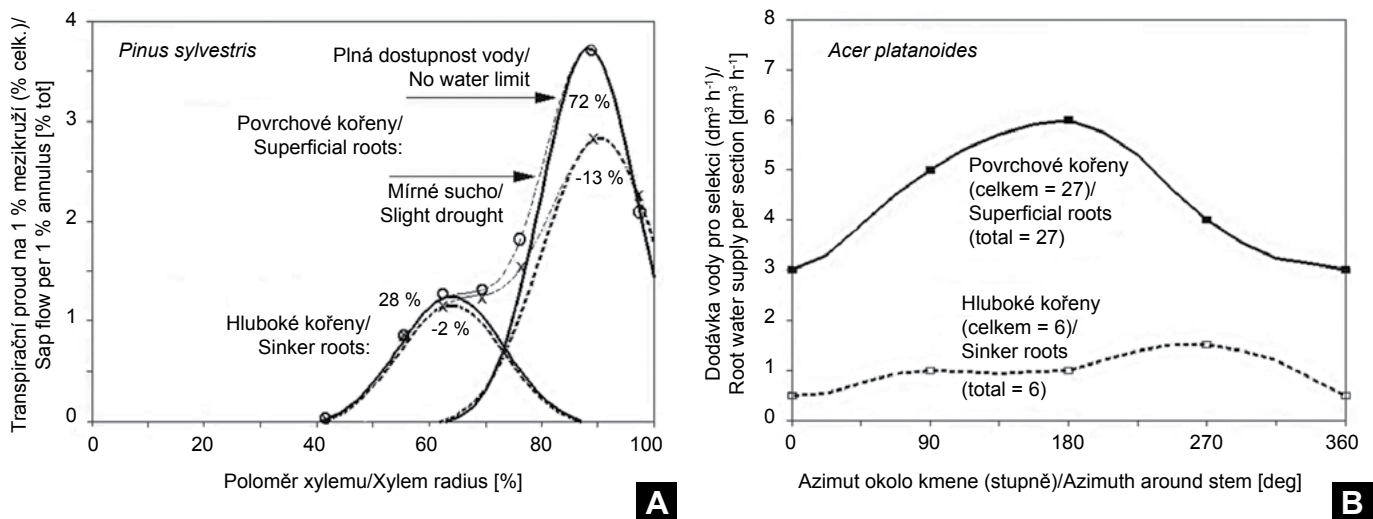
a relativní poškození kořene (v %) jako frakci redukovaného proudu $Q_{w,dam}$ jako

$$Q_{w,dam} = 100 - Q_{w,rem} \quad (4)$$

Shora uvedený podrobný popis zde uvádíme proto, že kořeny se často stávají pokusným objektem (resp. objektem poškozování různými antropickými vlivy), přičemž míra poškození může být při nesprávném vyhodnocení dat významně zkeslena.

Aktuální efektivní absorpční plocha kořenů

Jedná se o modifikovanou metodu měření elektrické impedance půdy (MEI), která v současné době patří mezi velmi malý počet v terénu aplikovatelných metod pro měření okamžité elektricky vodivé, či v biologické terminologii absorpční, plochy kořenů celých stromů nebo jejich částí (radiálních sekcí). Tato metoda byla vyvinuta skupinou fyziků elektrotechnické fakulty ČVUT v Praze (STANĚK 1997; AUBRECHT et al. 2006). Tento měřicí systém byl zkoušen v terénních podmínkách



Obr. 2.

Radiální profily hustoty transpiračního proudu. Měrné body jsou označeny kroužky. Část (A) znázorňuje hladké křivky (plná čára), které ukazují množství vody přitékající z povrchových kořenů (72 %, vpravo – vnější vrstvy běle) a z hlubokých kořenů (28 %, vlevo – hlubší vrstvy běle). Malý pokles v amplitudě křivek (přerušovaná čára), větší v povrchových než v hlubších vrstvách běle, ukazuje vliv nastupujícího sucha. Část (B) zachycuje příklad obvodové (azimutální) distribuce kořenů kolem kmene, ukazující množství vody přicházející z povrchových kořenů (27 $dm^3\ h^{-1}$) a hlubokých kořenů (6 $dm^3\ h^{-1}$). Obrázek (B) indikuje dvě možnosti: (1) v případě, že je půda heterogenní, je větší půdní vodní kapacita z jihu a (2) v případě, že je půda homogenní, povrchové kořeny jsou více vyvinuty k jihu (což může odrážet následek převládajících větrů z jihu). Z hlediska mechanické stability je evidentní, že v případě 2 je strom mechanicky odolnější vůči tlaku z jižní strany

Fig. 2.

Radial patterns of sap flow density (measuring points are marked by round points). Part (A) indicates amount of water coming from superficial roots (72% right – through outer sapwood layers) and from tap plus sinker roots (28% left – through inner sapwood layers). Small decrease in amplitude (dotted line), larger in outer than in inner sapwood layers, indicates the impact of coming slight drought. Part (B) shows the example of circumferential (azimuthally) root distribution around stems, showing separately water supply by superficial roots (27 $dm^3\ h^{-1}$) and sinker roots (6 $dm^3\ h^{-1}$). The given figure (B) indicates (1) in the case that soil is heterogeneous, that there is a bigger capacity in shallow soil water from south, and (2) in the case of homogenous soil, that surface roots area larger to south (this may reflect e.g., the impact of prevailing local wind from the south). From the mechanical stability perspective it is evident that in the case (2) the tree is mechanically more stable against pushing from the south

u celkem dvanácti druhů dřevin (ČERMÁK et al. 2006, 2013; BUTLER et al. 2010; URBAN et al. 2011 aj.), přičemž se potvrdila blízká shoda ve srovnání výsledků získaných kombinací klasických metod a MEI. Měřicí systém sestává z několika sérií elektrod a měřicího logometru. Elektrody (proudové, C a potenciálové, P) jsou nezávisle instalovány na stromě a v půdě (např. z různých světových stran, do svahu a ze svahu, ve směru nějakého ovlivnění a na protější straně apod.). Jestliže užíváme čtyř-elektrodivý systém, jsou elektrody zapojeny v pořadí: C1, P1, P2, C2, a to od kmene (C1, P1), podél vzdálenosti L_{soil} (s použitím pohyblivé elektrody P2) k půdním elektrodám (C2). C1 a C2 jsou proudové multi-elektrody (10–12 tenkostěnných zahrocených trubek o průměru 8 mm z nerezové ocele). C1 je souprava 10–12 plochých (nožových) elektrod (0,7 mm tenké, 15 mm široké) v kmeni ve výšce cca 2 m. Potenciálové P1 elektrody instalované u báze kmene jsou podobného typu jako C1 (4–5 kusů) a P2 elektroda v půdě je jen jediná trubková elektroda (podobná C2, ale s delším nástavcem), která je přenášena ve směru od kmene k půdním elektrodám C2 umístěným ve vzdálenosti 8–12 m od kmene. Elektrická impedance (odpor vůči střídavému proudu) je měřena logometrem (FLUKE 1625 earth tester, Fluke Corporation, USA), pracujícím pod napětím 48 V a s frekvencí 94–128 Hz.

Systém je založen na obecné rovnici kontinuity elektrického proudu (respektive zákonu udržování elektrického náboje (FEYNMAN et al. 1963), který říká, že hustota proudu (v ampérech na plochu vodiče, $A \cdot m^{-2}$) násobená vodivou plochou S_1 v jedné části systému (1) je rovna stejné vyjádřenému vztahu v jiné části systému (2), tedy: $j_1 \cdot S_1 = j_2 \cdot S_2$. Výsledkem je rovnice pro výpočet velikosti parametrů rozhraní mezi půdou a kořenem, tedy elektrické vodivosti pro hydratované ionty, tj. v biologické terminologii, absorpční plocha (S_{absar}) na základě vztahu:

$$S_{absar} = \frac{\rho_{stem} L_{ts,crit}}{R_{ts,crit} - R_{ts,0}} \xi \eta v \quad [m^2, \Omega m, m, \Omega, -, -, -] \quad (5)$$

Základem pro stanovení člena resistivity kmene (ve jmenovateli) je ρ_{stem} a $L_{ts,crit}$ (odpovídající $R_{ts,crit}$) jako odporová charakteristika kmene v půdě. Rozdíl v hodnotě kritické a nulové impedance strom-půda (ve jmenovateli) reprezentuje netto půdní impedanci, kde je vliv kmene na impedanci eliminován (je též možné ho stanovit několika odlišnými postupy uvedenými jinde, viz STANĚK 2015). Kořenová data jsou měřena v radiální sekci půdy o úhlu $\alpha_{60} = 60 \text{ deg}$ a jsou přepočtena na úhel $\alpha_{90} = 90 \text{ deg}$ (za předpokladu stejné distribuce kořenů jako v dané sekci u dvou sousedících 15 deg sekcí nacházejících se na obou stranách měřené 60 deg sekce) před sumarizací dat ze sekcí na úroveň celého stromu. Shora řečené platí až po středně velké stromy o výčetní tloušťce cca 60 cm. Rozsáhlé kořenové systémy větších stromů by narušovaly měření, proto je tam třeba používat užších sekcí, cca 30 deg u stromů do průměru > 120 cm apod.

Jestliže vztáhneme měřená data R_{ts} ke vzdálenosti L_{ts} , měřené na povrchu půdy od kmene k půdním elektrodám, obvykle dostáváme křivku typického „židlovitého tvaru“ (obr. 2 – A). V kritické vzdálenosti $L_{ts,crit}$ (v m, podél měřeného poloměru od kmene až k bodu, kde se křivka mění v přímku) je dosažena odpovídající kritická impedance půdy $R_{ts,crit}$ (v Ω). Jinými slovy, vidíme zde bod s koordinátami $L_{ts,crit}$ a impedance půdy ($R_{ts,crit} - R_{ts,0}$). $R_{ts,crit}$ je hodnota impedance odpovídající vzdálenosti $L_{ts,crit}$. $R_{ts,0}$ (v Ω) je impedance systému strom-půda (reprezentující část vodiče od elektrod C1 v kmeni k pohyblivé půdní elektrodě P2 při nulové vzdálenosti, $L_0 = 0$). $R_{ts,0}$ představuje k měření kořenů neužitečnou část impedance v části kmene mezi elektrodami C1 a P1, která se objevuje proto, že nemůžeme umístit elektrody C1 v nedefinované části kmene na úrovni půdy. V případě, že se vyskytne nějaká nepravidelná křivka (např. jestliže strom roste na silně kamenité, mokré, uměle vytvořené půdě nebo permafrostu, lze shora zmíněné parametry získat také, ale jen pomocí speciálních metod, srv. STANĚK 2015).

V základní rovnici pro výpočet absorpční plochy kořenů je dále uvedeno několik korekčních koeficientů, jejichž účelem je minimalizovat určité nejistoty v systému. První bezrozměrný koeficient ξ slouží ke kompenzaci vlivu vzájemného elektrického stínění kořenů, které působí malou negativní chybu v určení velikosti absorpční plochy (S_{absar}). Druhý bezrozměrný koeficient η charakterizuje mechanické poškození kořenů (pokud k němu vůbec dojde) a způsobuje malou pozitivní chybu v S_{absar} . Třetí bezrozměrný koeficient v představuje také malou negativní nebo pozitivní chybu ve stanovení S_{absar} , která je způsobena částí elektrického proudu, který proběhl mimo měřenou sekci (tj. sousedícími sekcemi). Teoretická analýza ukázala, že hodnoty všech koeficientů se pohybují blízko 1, což potvrdila i terénní měření (STANĚK 1997).

Impedance a resistivita kmene

Resistivita kmene (ρ_{stem}) je stanovena na základě nezávislých měření impedance kmene R_{stem} některou z metod, vybranou v závislosti na tloušťce kmene pokusného stromu. V případě použití Wennerovy metody je možné použít odpovídající impedanci kmene (R_{stem}) a vzdálenosti elektrod ve třech rozestupech podél osy kmene ($L_{el,stem}$, např. 2 cm, 4 cm a 6 cm). Umístění elektrod dovoluje elektrickému poli pronikat přibližně do hloubky běle rovné vzdálenosti elektrod.

$$\rho_{stem} = 2 \pi L_{el,stem} R_{stem} \quad [\Omega m, m, \Omega] \quad (6)$$

Původní Wennerova rovnice (s konstantou = 2) však platí jen pro rovinné povrchy (např. půdu). Pro stromy s válcovým tvarem musí být provedena korekce ve tvaru:

$$\rho_{stem} = c_{cyl} \pi L_{el,stem} R_{stem} \quad [\Omega m, m, \Omega] \quad (7)$$

Podobně jako měření R_{stem} na kmeni mohou být měřeny i malé kořeny R_{roots} , ale pomocí jiného přístroje. Korekce cylindrického tvaru kmene (c_{cyl}) závisí na jeho poloměru (r_{stem}) a vzdálenosti elektrod ($L_{el,stem}$), která je dána jednoduchým vztahem:

$$C_{cyl} = 2 - [0,6 / (DBH_{phlo} + 0,6)] \quad [cm] \quad (8)$$

Resistivita kmene je vypočtena pro každou měřenou hloubku běle (resp. vzdálenost elektrod $L_{el,stem}$) a poté před dalším použitím pro výpočty zprůměrována.

Metoda dlouhého válce je zvláště vhodná pro malé stromky (cca DBH < 15 cm), ale je použitelná také pro stromky, které dosud nedorostly do výčetní výšky a u nichž musí být místo výčetní tloušťky měřena tloušťka kmene v 10 % výšky kmene. Při umístování elektrod na kmeni je třeba se vyhnout částem kmene se suký, protože mají větší impedanci, což by zkreslovalo výsledky. Velmi tenký film kapalné nebo zmrzlé vody na povrchu kmene má většinou zanedbatelný vliv. Metoda dlouhého válce také pracuje se čtyřmi elektrodami, zavedenými do kmene nad sebou, ale v různých vzdálenostech. Elektrody C1 a C2 jsou ve větší vzdálenosti od sebe ($L_{el,C} = \text{cca } 2 \text{ m}$), zatímco elektrody P1 a P2 jsou blízko od sebe ($L_{el,P} < 10 \text{ cm}$).

$$\rho_{stem} = (\pi D^2 R_{stem}) / 4 L_{el} \quad [\Omega m, m, \Omega, m] \quad (9)$$

Tříbodová metoda je použitelná pro měření resistivity kmene u malých i velkých stromů, zejména pokud je požadováno minimální poškození kmene. Elektroda C1 o známém průměru (d_{el} , např. vrták či nebozízek o průměru 2 mm) je zavedena do známé hloubky ($h_{el} \ll$ menší než tloušťka kmene), ale ne hlouběji než je tloušťka běle. Tloušťku běle (h_{sapw} v % r_{xyl}) lze přibližně odvodit z alometrických vztahů u různých listnatých a jehličnatých druhů. Elektrodu P2 představuje jehla z nerezové oceli o průměru 1 mm. Elektroda C1 je umístěna v minimální vzdálenosti rovné L_{sapw} , maximální vzdálenost je dána délkou přeslenu.

Elektroda P1 není použita. Elektroda C2 je zavedena do půdy vedle báze kmene. Resistivita kmene mezi elektrodami C1 a P2 pak činí:

$$\rho_{\text{stem}} = [(2 \pi h_{el}) / \ln(4 h_{el} / D_{el})] R_{\text{stem}} \dots \dots \dots [\Omega \text{m}, \text{m}, \text{m}, \Omega] \quad (10)$$

Všechny metody dávají výsledky ležící těsně na stejné křivce. Jestliže však měříme převážně kmene, nesmíme zapomínat, že resistivita ostatních vodivých pletiv či orgánů kmene (včetně větví koruny a kořenů) nemusí být stejná. Analýza těchto otázek probíhá. Je třeba se vyhnout měření zmrzlých tlustých vrstev dřeva a půdy, které mají větší resistivitu, a mohly by tedy zkreslovat výsledky. Materiály nemohou být zahřívány Jouleovým teplem, protože intenzita používaných elektrických proudů (pocházejících z několika tužkových baterií) je velmi nízká.

Dodatečné elektrické parametry půdy a systému strom-půda

Při práci s měřením absorpční plochy kořenů také měříme impedanci půdy (R_{soil} v Ω) s použitím tyčových elektrod umístovaných ze stejných stran kmene jako na kmeni samém. Vzdálenost těchto půdních elektrod je $L_{\text{soil}} = 50 \text{ cm}, 100 \text{ cm}$ a 150 cm , celkově je hloubkový profil impedance měřen kolem stromu na ploše cca $22\text{--}25 \text{ m}^2$. Radiální profily impedance strom-půda (R_{is} v Ω) od kmene k půdními elektrodám C2 jsou měřeny ve vzdálenostech $L_{\text{soil}} = 0 \text{ m}$ až 3 m s krokem $0,3 \text{ m}$, 3 m až 5 m s krokem $0,5 \text{ m}$ a poté s krokem $1,0 \text{ m}$ až do 8 m . Měření je prováděno např. také z různých světových stran (přesněji charakterizovaných jejich azimuty) kolem kmene. Resistivita půdy je kolem každého pokusného stromu měřena na poměrně velké ploše, cca $220\text{--}250 \text{ m}^2$. Měřené sekce jsou definovány jejich konstantními úhly, α_{60} (60 deg), které jsou dány vzdáleností půdních elektrod od kmene a kolmo na tento směr vzdáleností krajních půdních elektrod C2 (v obou případech 8 m). Uvedené úhlové sekce jsou dány prostorovou distribucí elektrického pole v půdě, např. pro kmen o výčetní tloušťce $2 \text{ cm}, 50 \text{ cm}, 100 \text{ cm}$ a 200 cm můžeme aplikovat sekce o úhlu $180, 60, 30, 15 \text{ deg}$. Totéž platí i pro duté stromy. Resistivitu půdy (ρ_{soil}) vypočteme stejně, jako je shora uvedeno u jiných materiálů (jen L a R charakterizují půdu). Takže z měřených hodnot elektrické impedance (R_{soil}) po dosažení odpovídajících vzdáleností mezi půdními elektrodami ($L_{\text{el,soil}}$) a konstanty metody ($2 \pi L$) vychází:

$$\rho_{\text{soil}} = 2 \pi L_{\text{el,soil}} R_{\text{soil}} \quad [\Omega \text{m}, \text{m}, \Omega] \quad (11)$$

Dodatečné elektrické půdní a stromo-půdní parametry byly vypočteny na základě měřených dat z publikovaných vztahů (STANĚK 2015) s cílem podrobněji charakterizovat půdní vlastnosti. Resistivitu půdy (ρ_{soil}), která charakterizuje větší nebo menší vzestup impedance se vzdáleností od kmene, můžeme interpretovat jako indikátor půdní hloubky, obsahu vody a skeletu (kamenů a štěrku). Vyšší variabilita měřených bodů kolem impedanční křivky rovněž indikuje vliv skeletu. Gradient impedance (G_i) lineární části křivky je odvozený od vzdálenosti L_{crit} až do nejdále vzdálené lineární části křivky (L_{dist}) a odpovídající hodnoty impedance R_{crit} a R_{dist} .

$$G_i = \frac{R_{\text{dist}} - R_{\text{crit}}}{L_{\text{dist}} - L_{\text{crit}}} \quad [\Omega \text{ m}^{-1}] \quad (12)$$

Kompatibilita C_{ts} je vypočtena z poměru průměrných hodnot impedance bělové části dřeva a půdy.

$$C_{\text{ts}} = \frac{\rho_{\text{stem}}}{\rho_{\text{soil}}} \quad [-, \Omega \text{m}, \Omega \text{m}] \quad (13)$$

Jde o parametr, který lze interpretovat jako určitý ukazatel homogeneity transportních podmínek pletiv kořene a dané okolní půdy, když obě vstupní veličiny jsou získány při měření Wennerovou čtyřbodovou metodou.

ZÁVĚR

Ukotvení stromu v půdě prostřednictvím fixace kořenových systémů je základní aspekt stabilizace, tedy odolnosti proti vyvrácení stromů. Uvedené má význam zejména v parkových a liniových stromořadích, u solitérních jedinců v městském prostředí, ale i v lesních porostech. Metod používaných pro hodnocení je celá řada, obecně je možné je rozdělit na nedestruktivní a destruktivní. Destruktivní metody (přímý odkryv kořenů, ať již manuální či mechanizovanou metodou, využití supersonického proudu vzduchu) jsou sice objektivní, nicméně s omezeným využitím. Negativním aspektem je rovněž fakt, že je vyloučena možnost opakovaného měření, následného získání údajů na časové řadě, a tudíž sledování dynamiky vývoje. Také z tohoto důvodu mnoho nedestruktivních metod, které se intenzivně rozvíjejí zejména v posledních desetiletích, nabývá v současné době na významu a v mnoha směrech jsou běžně prakticky využívány. Z těchto prakticky ověřených metod byla jako příklad popsána metoda akustická (obr. 1), využívající pulsní tomografie, která umožňuje posoudit i hnilobu kořenů. Dále pak např. metody vycházející z měření transpiračního proudu (obr. 2) (distribuce aktivních kořenových systémů), případně posouzení elektrické impedance půdy (stanovení absorpční plochy kořenů). Využitím účelové kombinace naznačených metod lze odpovídajícím způsobem posoudit kvalitu kořenového systému jako základ pro hodnocení tohoto parametru ve vztahu k jeho provozní spolehlivosti. Na závěr je nutno ještě poznamenat, že provozní spolehlivost je základní aspekt, který je determinující zejména pro městskou zeleň a dřevinné liniové prvky. Zjišťované fyziologické poznatky a závislosti jsou ale zásadní pro uplatňování a volbu fyto techniky v kompaktních lesních porostech. Tento fakt zatím v provozní praxi uniká pozornosti.

LITERATURA

- AUBRECHT L., STANĚK Z., KOLLER J. 2006. Electric measurement of the absorbing surfaces in whole tree roots by the earth impedance method – I. Theory. *Tree Physiology*, 26: 1105–1112.
- BUTLER A.J., BARBIER N., ČERMÁK J., KOLLER J., THORNILY C., McEVROY C., NICOLL B., PERKS M.P., GRACE J., MEIR P. 2010. Estimates and relations between aboveground and belowground resource exchange surface areas in a Sitka spruce managed forest. *Tree Physiology*, 30: 705–714.
- ČERMÁK J., NADEZHDIRINA N. 1998. Sapwood as the scaling parameter – defining according to xylem water content or radial pattern of sap flow? *Annals of Forest Science*, 55: 509–521.
- ČERMÁK J., ULRICH R., STANĚK Z., KOLLER J., AUBRECHT L. 2006. Electric measurement of the absorbing surfaces in whole tree roots by the earth impedance method – II. Verification based on allometric relationships and root severing experiments. *Tree Physiology*, 26: 1113–1121.
- ČERMÁK J., SIMON J., KÁŇOVÁ H., TICHÁ S. 2013. Absorptive root areas of large pedunculate oak trees differing in health status along a road in South Bohemia. *Urban Forestry & Urban Greening*, 12: 238–245.
- ČERMÁK J., NADEZHDIRINA N., SIMON J., STANĚK Z., KOLLER J. 2015. Hodnocení ukotvení stromů v podloží jako základní parameter jejich stability – I. Mechanické a fyzikální metody: odborné sdělení. *Zprávy lesnického výzkumu*, 60: 233–237.
- FEYNMAN R.P., LEIGHTON R.B., SANDS M. 1963. The Feynman lectures on physics. Vol. I. Mainly mechanics, radiation and heat. Reading, Addison-Wesley: 252 s.
- NADEZHDIRINA N., DAVID T.S., DAVID J.S., NADEZHDIRINA V., ČERMÁK J., GEBAUER R., STOKES A. 2012a. Root structure: in situ studies through sap flow research. In: Manusco S. (ed.): *Measuring roots. An updated approach*. Berlin, Springer: 247–266.

- NADEZHINA N., DAVID T.S., DAVID J.S., NADEZHIN V., ČERMÁK J., GEBAUER R., FERREIRA M.I., CONCEICAO N., DOHNAL M., TESAŘ M., GARTNER K., CEULEMANS R. 2012b. Root function: in situ studies through sap flow research. In: Manusco S. (ed.): Measuring roots. An updated approach. Berlin, Springer: 268–290.
- SIMON J., ČERMÁK J. 2011. Posuzování hniloby báze kmene u kořenů stromů. Lesnická práce, 90: 781–782.
- STANĚK Z. 1997. Physical aspects of resistance measurement in plants and their ecological applications. Associate professor thesis. Prague, Czech Technical University in Prague: 166 s.
- STANĚK Z. 2015. Ohmic resistance analysis of woody species and its practical applications. In press.
- URBAN J., BEQUET R., MAINIERO R. 2011. Assessing the applicability of the earth impedance method for *in situ* studies of tree root systems. Journal of Experimental Botany, 62: 1857–1869. DOI:10.1093/jxb/erq370

THE ASSESSMENT OF TREE ANCHORING IN THE GROUND AS A BASIC PARAMETER OF THEIR STABILITY - II. NON-DESTRUCTIVE, ECOPHYSIOLOGICAL METHODS:

short communication

SUMMARY

Tree anchoring in the soil by root system fixation is fundamental to tree stabilization and uprooting resistance. Understanding this phenomenon is crucial in parks and linear alleys or for solitary individuals in urban settings, as well as in forest vegetation. A whole range of assessment methods exists, and they can be generally classified as destructive and non-destructive techniques. The destructive methods (direct root exposure using either manual or mechanical methods, use of supersonic airflow) are objective, however limited in use. Their negative aspects include the impossibility of taking repeated measurements, thus eliminating the potential for getting data within a time series, and subsequently monitoring the dynamics of development. Consequently, a whole range of non-destructive methods has been intensively developed and validated especially over the most recent decades. The methods gain importance, finding frequent applications in the field. They embrace geophysical radars (Fig.1), acoustical methods (Fig. 2), and impulse tomography, which includes the potential assessment of root-rot. Such methods can be used for supplementary purposes as well as mutually combined; for example, methods based on the sap flow measurement (distribution of absorptive root systems) may be extended to assess electrical impedance of the soil (determination of absorptive root area). When combined, the methods can be used to assess the quality of the root system as a basis for examining its operational reliability, a notable aspect namely for urban greenery and accompanying linear vegetation. The present findings on physiology and relationships are also essential to select and apply plant management methods in compact forest stands, which is a fact that has so far been escaping attention in the field. The paper follows the preceding work (ČERMÁK et al. 2015) aimed at mechanical and physical methods.