

# HODNOCENÍ UKOTVENÍ STROMŮ V PODLOŽÍ JAKO ZÁKLADNÍ PARAMETR JEJICH STABILITY - I. MECHANICKÉ A FYZIKÁLNÍ METODY: odborné sdělení

THE ASSESSMENT OF TREE ANCHORING IN THE GROUND AS A BASIC PARAMETER OF THEIR STABILITY - I. MECHANICAL AND PHYSICAL METHODS: short communication

JAN ČERMÁK<sup>1)</sup> ✉ - NADEZHDA NADEZHINA<sup>1)</sup> - JAROSLAV SIMON<sup>1)</sup> - ZDENĚK STANĚK<sup>2)</sup> - JAN KOLLER<sup>2)</sup>

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

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

✉ e-mail: [cermak@mendelu.cz](mailto: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, and for solitary individuals in an urban environment as well as in the forest vegetation. There is a whole range of methods for assessment, which are used. Generally it is possible to divide them into destructive (mechanical) or non-destructive (physical and ecophysiological) methods. The present paper briefly discusses conventional and traditional methods of excavating the roots that are used particularly in rating trees of rather small dimensions, or assessing cultures, while evaluating, within a broader context, more recent methods making use of supersonic airflow (mechanical, destructive methods) and also assessment through the use of geophysical radars (physical method). These methods, stemming from various physical principles, can be logically used in combination with ecophysiological, non-destructive methods.

**Klíčová slova:** ukotvení stromu v půdě, destruktivní metody, mechanické metody, fyzikální metody, supersonický proud vzduchu, geofyzikální radar

**Key words:** tree anchoring in the ground, destructive methods, mechanical methods, physical methods, supersonic airflow, geophysical radar

## ÚVOD

Analýza kořenových systémů celých stromů není jednoduchá záležitost, zejména jde-li o praktické použití výsledků na úrovni krajiny. Zahrnuje studium kořenových systémů jako části rostlinných těl, použitelné např. při hodnocení stability ukotvení stromů v lesních porostech nebo sadech, jejich zásobení vodou a živinami apod. Dále obsahuje technické hledisko, např. hodnocení mechanické stability vzrostlé městské nebo alejové zeleně vůči zatížení větrem a též i studie kořenů v lesních porostech, jako pragmatický moment ve vztahu např. k větrným kalamitám. V současné době již existuje celá řada prakticky ověřených a využívaných metod, z nichž s některými si kládeme za cíl rámcově seznámit. Obecně je možné tyto metody rozdělit na destruktivní a nedestruktivní, k nedestruktivním metodám řadíme metody fyzikální a ekofyziologické. V tomto příspěvku jsme se zaměřili na metody destruktivní a dále nedestruktivní fyzikální. O nedestruktivních ekofyziologických metodách pojednáme v samostatném článku (ČERMÁK et al., v tisku).

## PŘEHLED METOD

### Manuální odkryv kořenů

Výkopy kořenových systémů byly často využívány v minulosti (VYSKOT 1971), ale jsou někdy prováděny i v současné době (MAUER, PALÁTOVÁ 1990; SOBOTIK 1990). Tímto způsobem lze analyzovat většinou jen skeletové kořeny (obr. 1), ale prakticky téměř žádné jemné absorpční kořeny. Výjimku představují studie švýcarské skupiny prof. Kutscherové, která k odkryvu používala jehly (KUTSCHERA, LICHTENEGGER 2002). Takovéto převážně manuální práce jsou velmi pracné a časově náročné, kvantifikace jiných parametrů než celkového objemu nebo hmotnosti sušiny je velmi obtížná. Někteří vědci rozlišují celou řadu měřených parametrů kořenů na tomto materiálu, ale jejich syntéza není snadná.

### Supersonický proud vzduchu

Velmi specializovanou metodou je dále odkrytí celého kořenového systému pomocí supersonického proudu vzduchu (tzv. vzdušným rýčem). Odkryv nemusí být vždy celoplošný, někdy postačí úzký transekt, jindy je možné odkryt kořeny na jedné či druhé polovině

(180 deg) stromu, nebo u dvou sekci po 90 deg naproti sobě. U celoplošného odkryvu je pro operátory bezpečnější strom před započítím práce pokácet. U částečných odkryvů to obvykle není třeba, ale v některých případech je vhodné zabezpečit polohu kmene lany. Vlastní odkryv je prováděn speciální tryskou (Air-Spade Technology, series 2000, Concept Engineering Group, Inc., Verona, Pasadena, USA), která byla testována v několika studiích (RIZZO, GROSS 2000; NATHENSON, JARABAK 2001; ČERMÁK et al. 2008). Tato tryska je spojena se silným kompresorem (např. Ingersoll-Rand P130, TERRA-MET, s. r. o., Německo). Kompresor musí poskytovat vzdušný proud nejméně 8–12 m<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> při tlaku 8–12 nebo více barů. Tímto způsobem dostáváme při ústí trysky rychlost proudu 660 m s<sup>-1</sup>. Jestliže má vzdušný proud potřebnou rychlost, stane se viditelným – světle modrým. Supersonický proud nepracuje tlakem, ale svou rychlostí. Jestliže se tento proud dotkne hladkého předmětu jako je např. kámen, kořen nebo bosá noha, nestane se vůbec nic. Jestliže však proud zasáhne i nepatrný pór, při dané rychlosti se do něj vzduch vtláčí a pór exploduje. Půda je tak rozprášena v oblaku mikro-explozií a odfouknuta stranou, zatímco kořeny jsou odhaleny s minimálním poškozením. To platí, jestliže je půda optimálně vlhká, nikoli mokrá ani přesušená. Po mokré půdě proud vzduchu klouže, suchá půda se rozpadá na větší hroudy, které jsou pak odfouknuty i s jemnými kořínky. Supersonický proud vzduchu pracuje mnohem jemněji a rychleji než manuální odkryv. Práce jde pomaleji v hlubších vrstvách půdy (pod 1–2 m), protože se stává obtížnější vyjímání kamenů držených kořenovou sítí. Jestliže je půda velmi jemná (např. pod zemí rozpadlé dřevo), je možné odhalit i jemné kořeny cca do průměru 0,5 mm. Jinak mohou být tyto kořeny poškozeny abrazy rychle se pohybujících půdních částic (písečných zrn apod.). Tato technologie umožňuje získání 3D zobrazení celých kořenových systémů (obr. 2).

### Geofyzikální radar (georadar)

Geofyzikální radar nebo georadar reprezentuje moderní technologii použitelnou pro neinvazivní vizualizaci a prostorovou analýzu skeletových kořenů dřevin. Prakticky byly získány dobré zkušenosti jak v lesích, tak ve městech, zvláště na homogenních půdách a při poměrně řídkém zakořenění stromů (ČERMÁK, NADEZHDINA 1998; HRUŠKA et al. 1999). Při práci na kamenitých nebo štěrkovitých půdách byla tato technika aplikována např. pro studie míry poškození kořenů přejížděných těžkou těžební technikou (harvestory) v lesních porostech. Radar používá dvě antény, kterými se pohybuje většinou ručně podél nějaké linie (např. pásma) pokládané napříč měřeným objektem. Radarové paprsky pronikají půdou a jsou odraženy nepropustnými (nebo málo propustnými) objekty nacházejícími se v půdě (obr. 3 – A). Na rozdíl od malého počtu objektů, které obvykle sleduje nadzemní radar (např. letadla), z nichž každý reprezentuje jediný bod (nebo několik bodů blízko sebe), v půdě dochází k velkému počtu odrazů např. od kamenů, kořenů, nebo otvorů v půdě zaplněných jinou zeminou, které jsou zaznamenány na „řezu půdou“ (což vypadá podobně jako plochý mikroskopický preparát; obr. 3 – B). Tyto odrazy je možné vyhodnotit jen pomocí speciálního programu. Takový program vyhodnotí sérii „řezů půdou“ a polohy jednotlivých odrazů. Jestliže se odraz objeví na několika „řezech“, program předpokládá, že jde o lineární objekt (tedy např. kořen) a je schopen situaci znázornit prostorově nebo jako půdorys a nárys (obr. 3 – C).

Vizualizaci kořenových systémů je možné provádět pomocí georadarového systému pulseEKKO<sup>®</sup>, dodávaného kanadskou firmou Sensors and Software, která aplikuje stíněné antény a frekvenci 900 MHz. To zajišťuje přesnost 2 cm z hlediska specifikace polohy a hloubky výskytu odrazu do hloubky 1,5 m a cca 1 cm, pokud jde o rozměry kořenů. Georadar principiálně neidentifikuje jemné kořeny, které lze detekovat jen nepřímo na základě difrakčních markerů, které indikují polohu a hloubku, ale nikoli tloušťku kořenů. Měření je prováděno podél sítě příčných profilů vzdálených např. 0,1 m až 0,25 m s krokem podél linie 0,05 m. Efektivní rychlost, pomocí které jsou převáděna dočasná



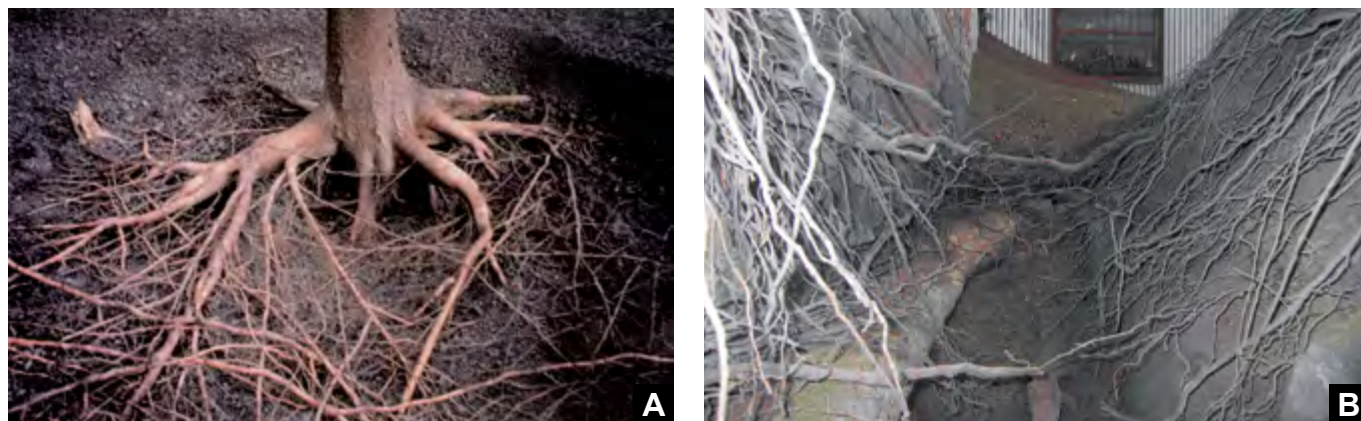
Obr. 1.

Příklad manuálně odkrytého kořenového systému smrku ztepilého (*Picea abies* (L.) Karst.) na mělké kamenité půdě: boční pohled (A) a přímý pohled (B); kořeny jsou mělké, zasahují jen do hloubky cca 30 cm; lze rozlišit cca 12–14 velkých skeletových kořenů 1–4 m dlouhých

Fig. 1.

Example of manually excavated Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) root systems on shallow stony soils: side view (A) and frontal view (B); it is flat, reaching the maximum depth of only 30 cm; about 12 to 14 major coarse roots 1–4 m long can be distinguished there



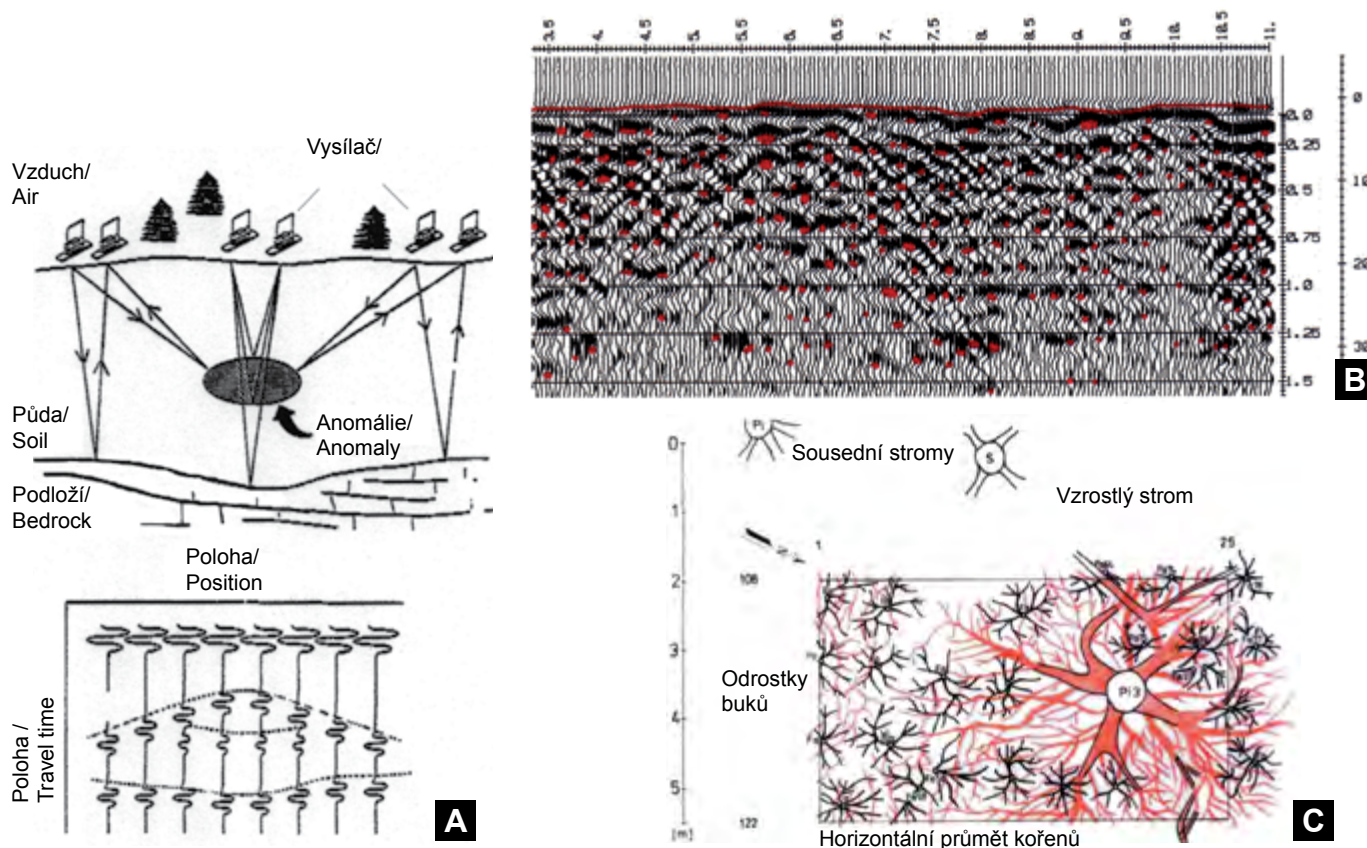


**Obr. 2.**

Příklad práce se supersonickým proudem vzduchu. Proud vzduchu rozdrobí půdu na malé částice, které jsou odfouknuty stranou. Je tak možno odkrýt skeletové kořeny, ale (při jemnějším postupu) i jemné absorpční kořeny (A) – mladý jedinec smrku v lesním porostu. Celý kořenový systém nebo jen jeho určitá část je odkryta do maximální hloubky zakořenění (B) – odkryv technické sítě, hloubka 1,5 m

**Fig. 2.**

Example of a fieldwork with the supersonic air stream. The stream will disperse soil into small particles, which are blown away; skeleton as well as fine roots is excavated this way (A) – young spruce tree in the forest. Whole tree root system or its most important part is opened to the maximum rooting depth (B) – the excavation utility lines, depth of 1.5 m



**Obr. 3.**

Aplikace radaru (georadaru) vysílajícího impulzy za účelem zviditelnění kořenových systémů celých stromů (dle HRUŠKA, GAŠPÁREK 2005). Schéma A ukazuje princip činnosti radaru. Získaný "řez půdou" v bukosmrkové skupině pomocí kombinace reflexí podél vybrané linie (např. pásma) v 10cm intervalech je charakterizován mnoha reflexemi (B) (černě – kameny, červeně – kořeny), které nelze vyhodnotit bez využití počítače. Finální horizontální obraz je zkonstruován počítačem, při použití speciálního software (C) (černě – kořeny mladých buků (*Fagus sylvatica* L.), hnědě – kořen velkého smrku (*Picea abies* (L.) Karst.); nezabarvené pérovky indikují polohu stromů nacházejících se mimo zájmovou zónu)

**Fig. 3.**

Application of ground penetrating radar (georadar) to visualize root systems of whole trees (according to HRUŠKA, GAŠPÁREK 2005). The scheme shows the principle of radar work (A). Actual "slide" in beech-spruce forest made by combination of reflections along line (e.g. tape) in 10-cm intervals is characterized by many reflections (B) (black – stones, red – roots), which cannot be evaluated without using a computer. Final horizontal picture is constructed in the computer, using the special software (C) (black – roots of young beech (*Fagus sylvatica* L.) saplings, brown – root of the old spruce tree (*Picea abies* (L.) Karst.); drawings indicate positions of trees outside the area of interest)

radarová data na odpovídající hloubky, je stanovena přímým měřením CMP-WARR. Např. pro zvětralý granodiorit a jemu odpovídající půdu je aplikována efektivní rychlost  $v_{ef} = 0,09 \text{ m ns}^{-1}$  až  $0,1 \text{ m ns}^{-1}$ . Pro zjištění distribuce kořenů dospělého stromu je třeba použít několika set metrů liniových profilů, což představuje cca 10 tisíc bodových měření.

### Zpracování radarových záznamů

Jednotlivé georadarové záznamy lze dále zpracovávat pomocí programu EKKO TOOLS 4.23 (HRUŠKA et al. 2005). Zlepšuje poměr signálu k šumu a také filtruje interferující signály a frekvence a eliminuje vnější rušivé zdroje. Tento krok zpracování dat je následován zpětnou fokusací difragované energie, což zlepšuje detekci indikátorů kořenů. Nemigrující záznamy doplní nepřímé indikátory, kde jsou aplikovány difrakční markery. Pak jsou záznamy obvykle vytisknuty a interpretovány z hlediska poloh a tlouštěk jednotlivých kořenů. Dostáváme sérii „řezů“, ze kterých se dá sestavit půdorys kořenových indikátorů pod měřeným půdním povrchem. Na sebe kolmé nárysy kořenového systému lze zhotovit dodatečně. Takovéto obrazy lze z důvodů verifikace radarových dat srovnávat s fotografiemi týchž kořenových systémů po jejich odhalení technikou supersonického vzduchu, přepočtených na srovnatelnou ortogonální projekci. Centrální projekci fotografií je nutno transformovat do ortogonální, protože jinak by byly geometrické obrazy deformovány. Při pořízení fotografií je nutno použít metrovou síť k udržení správného poměru délek obou horizontálních os. Pro transformační procesy vedoucí k ortogonální projekci je vhodný interaktivní grafický software KOKEŠ v. 6.57 (Gepro Praha). Tímto postupem je možno získat obraz se střední polohovou chybou  $\pm 2 \text{ cm}$ , střední prostorová přesnost na ploše přes  $60 \text{ m}^2$  dosahuje  $0,5 \text{ cm}$ .

### ZÁVĚR

Ukotvení stromu v půdě prostřednictvím fixace kořenových systémů je základní aspekt stabilizace odolnosti proti vyvrácení stromů. Uvedené má význam zejména v parcích, 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 metody destruktivní a nedestruktivní. Destruktivní metody (přímý odryv kořenů ať již manuální (obr. 1) či mechanizovanou metodou, využití supersonického proudu vzduchu (obr. 2) jsou sice objektivní, nicméně mají omezené využití. Omezení využití je dáno základním faktorem, že při destruktivní analýze je poškozena v různé míře část kořenového systému (jemné absorpční kořeny). Takto, na základě prováděných analýz, lze zpravidla optimálně posuzovat skeletové kořeny, které fungují jako zásadní podpůrný mechanismus stabilizace v půdě. Prováděné analýzy však, jak bylo naznačeno, mohou jen obtížně sloužit pro srovnání s nedestruktivními, ekofyziologickými metodami. Dalším zásadním problémem je skutečnost, že dochází k masivnímu poškození jedince, případně porostu, kdy není možné opakování analýz a získání řady údajů pro hodnocení dynamiky růstových analýz. Výhodou destruktivních metod je možnost hodnocení zdravotního stavu skeletových kořenů na příčném řezu, což je zásadním parametrem a jedním z faktorů pro posouzení stability ukotvení stromů v podloží. Využití fyzikální metody (geofyzikální radar) je vhodné na homogenních půdách s nízkým obsahem skeletu, zejména u stromů s řídkým, plošným kořenovým systémem. Na jemných půdách bez skeletu umožňuje metoda detekovat i jemné kořeny (do tloušťky  $0,5 \text{ cm}$ ), tedy zobrazit prakticky celý kořenový systém. Pro zpracování výsledků je přirozeně potřebné využít výpočetní techniku. Uvedené destruktivní mechanické a nedestruktivní fyzikální metody je vhodné při využití kombinovat s nedestruktivními ekofyziologickými metodami (ČERMÁK et al., v tisku).

### LITERATURA

- ČERMÁK J. et al. Hodnocení ukotvení stromů v podloží jako základní parametr jejich stability – II. Nedestruktivní, ekofyziologické metody: odborné sdělení. Zprávy lesnického výzkumu, v tisku/in press.
- ČERMÁK J., NADEZHINA N. 1998. Sapwood as the scaling parameter – defining according to xylem water content or radial pattern of sap flow? *Annales des Sciences Forestières*, 55: 509–521.
- ČERMÁK J., ULRICH R., CULEK I., ČERMÁK M. 2008. Visualization of root systems by the supersonic air stream. In: Neruda J. (ed.): Determination of damage to soil and root system of forest trees by the operation of logging machines. Monograph. Brno, Tribun EU: 89–95.
- HRUŠKA J., ČERMÁK J., ŠUSTEK S. 1999. Mapping of tree root systems by means of the ground penetrating radar. *Tree Physiology*, 19: 125–130.
- HRUŠKA J., GAŠPÁREK J., CULEK I. 2005. Visualization of root systems by georadar (in Czech). In: Neruda J. (ed.): Metody pro zlepšení determinace poškození kořenů stromů ve smrkových porostech vyváženými traktory. Výběr a ověření metod. Methods for improved determination of disturbance of tree roots in spruce stands by forwarders. Brno, MZLU: 69–75.
- KUTSCHERA L., LICHTENEGGER E. 2002. Wurzelatlas mitteleuropäischer Waldbäume und Sträucher. 6. Band der Wurzelatlas-Reihe. Graz, Stocker: 604 s.
- NATHENSON R., JARABAK A. 2001. The evolution of air tools for use in arboriculture. *Tree Care Industry*, 12 (May 2001): 49–51.
- MAUER O., PALÁTOVA E. 1990. Effect of environment acidification on the development of root system in some forest tree species. In: Persson, H. (ed.): Above and below-ground interactions in forest trees in acidified soils. Proceedings of a workshop. Sweden, 21–23 May 1990. Uppsala: 79–84. Air Pollution Research Report, 32.
- RIZZO D.M., GROSS R. 2000. Distribution of *Armillaria melea* on pear root systems and comparison of excavation techniques. In: Stokes, A. (ed.): The supporting roots of trees and woody plants: form, function and physiology. Dordrecht, Kluwer: 305–311.
- SOBOTIK M. 1990. Structure of roots in  $\text{SO}_2$  and  $\text{SO}_3$  polluted area. In: Persson, H. (ed.): Above and below-ground interactions in forest trees in acidified soils. Proceedings of a workshop. Sweden, 21–23 May 1990. Uppsala: 89–98. Air Pollution Research Report, 32.
- VYSKOT M. 1971. Základy růstu a produkce lesů. Praha, SZN: 440 s.

## THE ASSESSMENT OF TREE ANCHORING IN THE GROUND AS A BASIC PARAMETER OF THEIR STABILITY - I. MECHANICAL AND PHYSICAL METHODS:

### short communication

#### SUMMARY

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, linear alleys, and in solitary individuals in an urban environment, but also in the forest vegetation. There is a whole range of methods for assessment, which are used; generally it is possible to divide them into non-destructive and destructive. The destructive methods (direct expose of the roots either by manual, see Fig. 1, or mechanical methods, use of supersonic airflow, see Fig. 2), are objective, however limited in use.

Essential for the limitation is the fact that the process of destructive analysis causes a varied extent of damage to the root system (fine absorbent roots). This usually permits, on the basis of analyses, the best assessment of skeletal roots, which are essential as a mechanism supporting the stabilization in the soil. However, as indicated earlier, the analyses can be hardly used for comparison with non-destructive, ecophysiological methods. Another crucial issue consists in the aspect that it involves massive damage caused to the individual or the stand when repeated analyses and sourcing of any series of data to assess the dynamics of growth analyses are not possible. The benefit of destructive methods involves the possibility of rating the health status of skeletal roots using a transverse section, which is the key parameter – one for assessing the stability of tree anchorage in the subsoil. Employing a physical method, i.e. geophysical radars, is advisable for a homogeneous soil with a low skeleton content, especially for trees with thin, planar root system. For fine soils lacking the skeleton, the method enables to detect even fine roots (thickness to 0.5 cm), i.e. displaying virtually the entire root system. Naturally, processing the results will necessitate the use of computer technology. Combining the destructive mechanical and non-destructive physical methods mentioned above, if one is used, with non-destructive, ecophysiological methods is advisable.