

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra pěstování lesů



**Stromová tomografie založená na elektrickém
odporu a její potenciál v lesnictví i mimo les**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vedoucí práce: Ing. Ivan Kuneš, Ph.D.

Autorka práce: Bc. Jana Kusá

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Jana Kusá

Lesní inženýrství

Název práce

Stromová tomografie založená na elektrickém odporu a její potenciál v lesnictví i mimo les

Název anglicky

Electrical impedance tomography of trees and its potential for forestry and arboriculture

Cíle práce

Posoudit možnosti využití odporové stromové tomografie při hodnocení zdravotního stavu a statické bezpečnosti stromů

Metodika

Vypracujte stručnou rešerši týkající se neinvazivních metod posuzování rozsahu hnilob dřeva ve stromech.

Popište principy metody diagnostiky hnilob založené na měření elektrického odporu ve dřevě.

Zhodnoťte časovou náročnost metody vycházející z měření elektrického odporu a konfrontujte ji s metodou akustické tomografie.

Na praktických příkladech posudte možnosti a slabiny zvoleného diagnostického postupu.

Doporučený rozsah práce

min. 45 stran

Klíčová slova

stromová tomografie; diagnostika stavu kmene; stabilita stromu; elektrický odpor ve dřevě

Doporučené zdroje informací

- DEFIORIO G., FINK S. and SCHWARZE F.W.M.R. (2008). Detection of incipient decay in tree stems with sonic tomography after wounding and fungal inoculation. *Wood Science and Technology* 42: 117–132.
doi:10.1007/s00226-007-0159-0
- GILBERT E.A. and SMILEY E.T. (2004). PiCUS Sonic Tomography for the quantification of decay in white oak (*Quercus alba*) and hickory (*Carya* spp.). *Journal of Arboriculture* 30, (5): 277–281
- LIANG S., WANG X., WIEDENBECK J., CAI Z. and FU F. (2007). Evaluation of acoustic tomography for tree decay detection. In *Proceedings of the 15th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood*, Duluth, Minnesota, USA, September 10–12, 2007. pp 49–54
- MARTIN T. and GÜNTHER T. (2013). Complex Resistivity Tomography (CRT) for fungus detection on standing oak trees. *European Journal of Forest Research* 132, (5–6): 765–776.
doi:10.1007/s10342-013-0711-4
- WANG X., ALLISON R.B., WANG L. and ROSS R.J. (2007). Acoustic tomography for decay detection in red oak trees. U.S. Department of Agriculture, Forest Service. 7 p
-

Předběžný termín obhajoby

2015/16 LS – FLD

Vedoucí práce

Ing. Ivan Kuneš, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra pěstování lesů

Konzultant

Ing. Martin Baláš, Ph.D.

Elektronicky schváleno dne 7. 4. 2015

prof. Ing. Vilém Podrázský, CSc.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 30. 10. 2015

prof. Ing. Marek Turčáni, PhD.

Děkan

V Praze dne 26. 02. 2016

Čestné prohlášení

"Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Stromová tomografie založená na elektrickém odporu a její potenciál v lesnictví i mimo les** vypracovala samostatně pod vedením **Ing. Ivana Kuneše, Ph.D.**, a použila jen prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědoma, že zveřejněním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách, v platném znění, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby."

V Praze 20. 4. 2017.

.....

Poděkování

Ráda bych tímto poděkovala vedoucímu diplomové práce **Ing. Ivanu Kunešovi, Ph.D.**,
a **Ing. Martinu Balášovi** za rady a odbornou pomoc při zpracování diplomové práce.

Stromová tomografie založená na elektrickém odporu a její potenciál v lesnictví i mimo les

Jana Kusá

Předložená diplomová práce shrnuje poznatky o stromové tomografii a jejím využití v lesnictví i mimo les. Zabývá se porovnáním sonického a elektrického tomografu. Ukazuje možnosti využití stromového tomografu v nynější lesnické i nelesnické praxi.

Klíčová slova: stromová tomografie; diagnostika stavu kmene; stabilita stromu; elektrický odpor ve dřevě.

Electrical impedance tomography of trees and its potential for forestry and arboriculture

Jana Kusá

This diploma thesis summarizes knowledge about tree tomography and its use in forestry and outside the forest. It deals with comparing the sonic and electrical tomography. It shows the possibilities of using tree tomography in today's forestry and non-forestry practices.

Keywords: Tree tomography; diagnosis of the tree; stability of the tree; electrical resistance in wood.

Vysvětlené zkratky:

EIT – odporový tomograf

SoT – sonický tomograf

Obsah

Úvod.....	12
1 Cíle práce	13
2 Literární rešerše	14
2.1 Struktura dřeva.....	14
2.1.1 Makroskopická struktura dřeva	14
2.1.2 Mikroskopická struktura dřeva	17
2.2 Základní vlastnosti dřeva	18
2.2.1 Fyzikální vlastnosti dřeva	20
2.3 Vady a poškození dřeva.....	21
2.3.1 Růstové vady dřeva.....	22
2.3.2 Poškození dřevokaznými houbami	23
2.3.3 Poškození dřevokazným hmyzem	24
2.4 Nedestruktivní metody měření zdravotního stavu stromů.....	25
2.4.1 Stromový odporový tomograf.....	25
2.4.2 Stromový sonický tomograf.....	27
3 Metodika	28
3.1 Informace o použitých datech.....	28
3.2 Použitý stromový odporový tomograf	28
3.3 Metodický postup měření	28
3.4 Čtení tomogramu	30
3.5 Vlastní měření.....	31
4 Výsledky a diskuze	32
4.1 Vyhodnocení tomogramů	32
4.1.1 Strom č. 1 – borovice.....	33
4.1.2 Strom č. 2 – borovice.....	39
4.1.3 Strom č. 3 – borovice.....	45
4.1.4 Strom č. 4 – buk.....	51
4.1.5 Strom č. 5 – buk.....	57
4.1.6 Strom č. 6 – buk.....	63
4.1.7 Strom č. 7 – dub.....	69

4.1.8	Strom č. 8 – dub	75
4.1.9	Strom č. 9 – dub	81
4.2	Ekonomické aspekty provozu tomografu	88
	Závěr	90
	Přílohy.....	91
	Seznam použité literatury	93

Úvod

Dřevo je jedním z materiálů, které člověk používal už v nejstarších dobách. Již v pravěku využíval člověk dřevo ve velkém množství a k různým účelům. Pozitivní vliv mělo bohatství dřeva v přírodě, jeho pevnost při malé hmotnosti, snadnost těžby a zpracování (Munduchová 2014).

Dřevo napadené hnilobou u stojících stromů je velký problém ve vztahu k bezpečnosti osob i majetku (Blanchette et al. 1985). Detekce možnosti rozpadu stromu je důležitá nejen pro hospodaření v lesích, ale zejména u dřevin rostoucích ve městech, případně v místech s vyšší frekventovaností lidí (Pellerin & Ross 2002). Pomocí různých technik se zjišťují hniloby, dutiny a jiná poškození. Existují destruktivní a nedestruktivní metody zjišťování zdravotního stavu stromu (Tattar & Shigo 1972). Destruktivní metody vyžadují vrtání do kmene pro vložení sondy nebo odebrání vzorku dřeva, čímž zraňují strom a mohou zapříčinit jeho následné poškození až úhyn (Butnor et al. 2009). Mezi destruktivní patří například Presslerův nebozez, penetrometry, rezistografy a elektrické senzory (Tattar & Shigo 1972). Nedestruktivní metody strom nepoškozují, případně je poškození minimalizováno. Patří mezi ně akustické záření, termické a radarové techniky, nebo stromová tomografie (Johnstone et al. 2010). Tato technika je moderním přístupem v městském lesnictví a okrasném sadovnictví (Gallo et al. 2014).

Kompletní tomografická tomografie je vytvořena pomocí několika jednotlivých zařízení. Elektronická průměrka měří a následně zobrazuje tvar průřezu kmene pomocí triangulační metody. Samotné měření je poskytováno sonickým (SoT) anebo elektronickým (EIT) tomografem (Gallo et al. 2014).

Diplomová práce má dvě části, a to literární rešerši a vlastní výzkum ze získaných dat. Teoretická část je zpracována z dostupných literárních zdrojů, zabývajících se stromovou tomografií. Týká se neinvazivních metod posuzování rozsahu hnilob dřeva ve stromech. Popisuje principy metody diagnostiky hnilob založené na měření elektrického odporu ve dřevě. Zhodnocuje časovou náročnost metody vycházející z měření elektrického odporu a konfrontuje ji s metodou akustické tomografie.

V druhé části této práce jsou zpracována data z terénních měření. Na praktických příkladech jsou posouzeny možnosti a slabiny zvoleného diagnostického postupu. Měření odporovým tomografem pro předkládanou práci probíhalo společně s měřením pomocí sonického tomografu, jež prováděl kolega Bc. Tomáš Petřík.

1 Cíle práce

Cílem rešeršní části diplomové práce je shrnutí dosavadních poznatků o stromové tomografii, zejména o metodě založené na elektrickém odporu.

Cílem praktické části je na základě pořízených tomografických snímků analyzovat změny výsledků opakovaného měření daných stromů v průběhu roku.

Dílčím cílem je posouzení možností využití odporové stromové tomografie v lesnické praxi i mimo les, včetně vyhodnocení časové náročnosti tomografického snímkování.

2 Literární řešerše

2.1 Struktura dřeva

Dřevo je podle Gandelové et al. (2002), pro svůj přírodní charakter, přirozenou kresbu, příznivé fyzikální vlastnosti a estetický vzhled žádaným prvkem životního prostředí člověka. Jak uvádí Arciniegas et al. (2014), je to nehomogenní materiál s anizotropními vlastnostmi a vysokým stupněm variability. Dřevem se rozumí hmota organického původu, která roste v kmeni, větvích a kořenech dřevin. Z biologického pohledu se nachází mezi dřemí a kambiem. Představuje rostlinné pletivo, jehož převážná většina buněčných elementů má zdřevnatělé neboli lignifikované buněčné stěny (Gandelová et al. 2002). Čunderlík (2009) uvádí, že kuželovitá až válcovitá stavba kmene způsobuje při řezech pod různými úhly různou kresbu. Rozlišují se řezy transverzální (příčný), radiální (středový, poloměrový) a tangenciální (tečnový, fládrový).

Požgaj et al. (1993) posuzuje strukturu dřeva ze dvou hledisek: z hlediska makrostruktury a mikrostruktury. Makroskopickou strukturou dřeva se rozumí soubor znaků tvořících kresbu na povrchu dřeva, která je charakteristická pro určité dřeviny, což umožňuje určení druhu dřeva. Většinu jich je možné pozorovat pouhým okem. Mikroskopické znaky dřeva nelze vidět pouhým okem, sledují se pomocí mikroskopu nebo jiné techniky, jež umožňuje dostatečné zvětšení.

Jehličnaté dřeviny jsou vývojově starší než listnaté, vyznačují se jednoduchou a pravidelnou stavbou. Listnaté dřeviny jsou tvořeny větším počtem anatomických elementů s funkční specializací, tedy více druhy buněk (Munduchová 2014).

2.1.1 Makroskopická struktura dřeva

Rozeznávají se tyto základní makroskopické znaky dřeva (Munduchová 2014):

- letokruhy,
- běl, jádro, vyzrálé dřevo,
- dřeňové paprsky, dřeňové skvrny,
- pryskyřičné kanálky,
- cévy,
- suky.

Letokruhy

Gandelová et al. (2002) popisuje letokruh jako tloušťkový (radiální) přírůst dřeva vytvořený ve vegetačním období příslušného roku periodickou činností dělivých buněk kambia. Je to tedy výsledek přerušování tloušťkového růstu stromu v důsledku vegetačního klidu dřevin v mírném a chladném pásmu. Každý letokruh se skládá ze dvou barevně, případně strukturně rozdílných vrstev jarního a letního dřeva. Světlá část letokruhu vytvořená na počátku vegetačního období se označuje jako jarní (časné) dřevo a tmavší hustší část jako letní (pozdní) dřevo.

Jehličnaté dřeviny se vyznačují výrazně odlišným jarním dřevem oproti letnímu. Podíl jarního dřeva je v letokruzích zpravidla vyšší než dřeva letního. Listnaté dřeviny se vyznačují makroskopicky viditelnými širokými cévami (póry). U některých dřevin (tzv. roztroušeně pórovitých) je hranice mezi letokruhy obtížně rozpoznatelná (topoly, vrby, lípy, olše). Podíl letního dřeva je v letokruhu vyšší než u dřeva jarního.

Obecně platí, že se stoupajícím podílem letního dřeva se hodnoty fyzikálních (hustota) a mechanických (pevnost, tvrdost) vlastností zvyšují. U jehličnatých dřevin se se zvyšující šířkou letokruhů hodnoty snižují a u listnatých naopak zvyšují.

Stálezelené dřeviny tropického a subtropického pásma s nepřetržitou dobou růstu bez vegetačního klidu tvoří dřevo kontinuálně bez rozlišení letokruhů (přírůstových zón), nebo tvoří přírůstové zóny, které však neodpovídají přesně jednotlivým rokům, ale střídání vlhkých a sušších období, spojených s opadem listů.

Běl, jádro, vyzrálé dřevo

Běl je vnější část dřeva přiléhající ke kambiu, je tvořená živými buňkami. Plní fyziologickou funkci u rostoucího stromu vedením vody s rozpuštěnými minerálními látkami z kořenů k listům a ukládáním zásobních látek. S vodivou funkcí běle obvykle souvisí větší vlhkost dřeva v této části kmene. Vlhkost běle dosahuje až do hodnoty 150 % (Munduchová 2014). Běl ohraničuje jádro nebo vyzrálé dřevo. Je obvykle více propustná pro vodu než jádro nebo vyzrálé dřevo. Je méně odolná proti hnilobě a snadněji podléhá napadení hmyzem.

Jádro je vnitřní, zpravidla viditelně tmavší část dřeva, je tvořené odumřelými buňkami. Je výrazně makroskopicky odlišné od běle. Pravé jádro nemá na obvodu zřetelnou hraniční čáru, jeho tvar je obvykle pravidelný a plynule se zvětšuje. Jeho funkce pro kmen je především stabilizační. Jádrové dřevo je odolnější proti houbám

a různé chemické látky v něm obsažené mají vliv na chemické, fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva (Gandelová et al. 2002).

Čerstvě vytěžené dřevo některých druhů stromů (např. smrk, jedle, buk, lípa) má na obvodu příčného řezu tmavší část dřeva (bělová část), která má vyšší obsah vody než středová část kmene (jádro, vyzrálé dřevo). Po vyschnutí je barevný rozdíl nepatrný (Munduchová 2014).

Dřeňové paprsky, dřeňové skvrny

Gandelová et al. (2002) uvádí, že dřeňové paprsky tvoří různě mohutná seskupení parenchymatických buněk, které jsou umístěny kolmo na podélnou osu kmene. V živém stromě zabezpečují horizontální pohyb hlavně organických látek a vody. Funkce dřeňových paprsků je vodivá, zásobní, u některých dřevin i sekreční. Makroskopicky jsou možné vidět pouze široké dřeňové paprsky, které na příčném řezu pozorujeme jako pásy probíhající od kambia do středu kmene kolmo na letokruhy. Dřeňové paprsky jsou produktem kambia. Podle doby vzniku se dělí na primární a sekundární.

Munduchová (2014) popisuje dřeňové skvrny jako buňky parenchymu, které vznikly poškozením kambia od hmyzu či bakterií. Vyskytují se nejvíce v dolní části kmene (např. topol). Skvrny mohou být hnědé nebo zelené. Hnědé má bříza, vrba, hrušeň a zelené javor a jilm.

Pryskyřičné kanálky

Pryskyřičné kanálky tvoří buňky, které shromažďují a vylučují pryskyřici. Vyskytují se u mnoha jehličnatých dřevin (smrk, modřín, borovice, douglaska), listnaté dřeviny je nemají. Kanálky jsou uloženy ve dřevě vertikálně a horizontálně. Vertikální kanálky se vyskytují převážně v letním dřevě svisle mezi podélně orientovanými buňkami dřeva, pohybují se na hranici viditelnosti pouhým okem. Horizontální jsou orientovány kolmo na podélně probíhající buňky dřeva, nejsou makroskopicky viditelné (Gandelová et al. 2002).

Cévy (tracheje)

Cévy neboli tracheje se vyskytují pouze u listnatých dřevin a představují vodivé elementy dřeva. Tvoří je neživé kapiláry, jejichž funkcí je vést vodu s rozpuštěnými nerostnými látkami od kořenů ke koruně. Cévy jsou makroskopicky viditelné

na příčném řezu jako póry, na podélném řezu jako rýhy, které pouhým okem lze pozorovat jen u některých druhů dřevin (Munduchová 2014).

Suky

Suky jsou základy živých nebo pozůstatky odumřelých větví, vyskytují se u všech dřevin. Jejich makroskopický vzhled se liší v jednotlivých řezech. Na příčném a tangenciálním řezu mají převážně oválný tvar, na radiálním procházejí zcela kolmo nebo pod určitým úhlem k podélné ose kmene. U dřevin s přeslenovitým uspořádáním větví, jako například u borovice, vytvářejí suky na příčném řezu růžice.

Množství a rozměry suků závisí na druhu dřeviny, poloze v kmeni, stanovištních podmínkách a pěstební technice. Suky narušují rovno-vláknitou strukturu dřeva, negativně ovlivňují výrobu sortimentů surového dříví a snižují výtěžnost řeziva, takže se považují za vadu dřeva (Gandelová et al. 2002).

2.1.2 Mikroskopická struktura dřeva

U jehličnatých dřevin sledujeme: tracheidy (cévice), parenchymatické buňky, dřevné paprsky, pryskyřičné kanálky a podélný dřevní parenchym. U listnatých dřevin sledujeme: tracheje (cévy), tracheidy (cévice), parenchymatické buňky, dřevné paprsky a podélný dřevní parenchym (Gandelová et al. 2002).

Tracheje (cévy)

Tracheje zaujímají u listnatých dřevin 10–20 % z celkového objemu dřeva. Jsou to různě dlouhé kapiláry s vodivou funkcí. Ve dřevě tvoří síť axiálních drah, skrz které strom vede vodní roztok s rozpuštěnými minerálními látkami.

Tracheidy (cévice)

Tracheidy jsou základním prvkem jehličnatých dřevin, tvoří 87–95 % celkového objemu dřeva (Munduchová 2014). Gandelová et al. (2002) je popisuje jako dlouhé uzavřené buňky, orientované rovnoběžně s podélnou osou kmene, jejichž funkce je vodivá a mechanická. Rozlišujeme jarní a letní tracheidy.

U listnatých dřevin jsou z mikroskopického hlediska doplňkovým elementem. Jejich funkce je, stejně jako u jehličnatých dřevin, vodivá, mechanická, a ještě navíc zásobní.

Jejich zastoupení ve dřevě je velmi rozmanité, u některých druhů dřevin tvoří velkou část základního pletiva, jinde se nevyskytují skoro vůbec (Munduchová 2014).

Parenchymatické buňky

Tyto buňky jehličnatých dřevin mají tvar kratších hranolků, válců nebo vřeten. Mají funkci vodivou a zásobní, slouží k vedení živin a růstových látek a k ukládání zásobních látek (škrob). Ve dřevě listnatých dřevin jsou zastoupeny hojněji, s podobným tvarem, jako mají jehličnaté dřeviny (Gandelová et al. 2002).

Dřeňové paprsky

U jehličnatých dřevin tvoří 5–10 % celkového objemu dřeva, jsou tvořeny souborem parenchymatických buněk uložených kolmo na směr letokruhů. Jejich funkcí je zásobení a vedení vodního roztoku s rozpuštěnými minerálními látkami (Munduchová 2014).

Pryskyřičné kanálky

Mají tvar dlouhých kanálků obklopených vrstvami parenchymatických buněk. Kanálky jsou ve dřevě uloženy vertikálně a horizontálně, jsou vzájemně propojeny. Nevyskytují se u všech jehličnatých dřevin (Gandelová et al. 2002).

Podélný dřevní parenchym

Podélný dřevní parenchym je tvořen parenchymatickými buňkami orientovanými ve směru podélné osy kmene. Slouží k ukládání zásobních látek (škrob). U jehličnatých dřevin se vyskytuje jen zřídka, například ve dřevě jalovců a cypřišů. Naopak u borovice a tisu chybí. U listnatých dřevin je jeho zastoupení velmi variabilní (průměrně 10 % z celkového objemu dřeva), avšak mnohem hojnější než u jehličnatých dřevin. Z hlediska mikroskopického určování dřev je poměrně důležitou strukturou, zejména jeho typy podle lokalizace v letokruzích (Gandelová et al. 2002).

2.2 Základní vlastnosti dřeva

Jak uvádí Gandelová et al. (2002), základní vlastnosti dřeva odpovídají jeho chemické a anatomické stavbě. Ze stavby dřeva vyplývá jeho anizotropie, pórovitost, hygroskopicita a nehomogenita. Tyto základní charakteristiky dřeva předurčují

a limitují všechny následné fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva. Zjišťují se tyto fyzikální vlastnosti: vlhkost, hustota, elektro-fyzikální a akustické vlastnosti dřeva (Munduchová 2014).

Mechanické vlastnosti dřeva charakterizují jeho schopnost odolávat účinku vnějších sil. Tyto vlastnosti se dělí do tří skupin: základní, odvozené a technologické. Mezi základní vlastnosti patří pružnost, pevnost, plastičnost a houževnatost dřeva. Mezi odvozené patří tvrdost, odolnost proti trvalému zatížení a proti únavovému lomu. Do technologických vlastností řadíme štípatelnost, opotřebovatelnost, impregnovatelnost a ohýbatelnost (Gandelová et al. 2002).

Anizotropie

Anizotropie dřeva vyplývá z orientace základních chemických stavebních sloučenin. V zásadě platí, že dřevo namáhané ve směru vláken vykazuje několikanásobně vyšší pevnost a pružnost než ve směru kolmém na vlákna (Gandelová et al. 2002).

Pórovitost

Dřevo je porézní materiál. Objem pórů často u dřeva převyšuje objem buněčných stěn. Póry ve dřevě vytváření zcela průchodný, vzájemně propojený kapilární systém, který může být zaplněný tekutinou (voda). Tato vlastnost vyplývá z biomechanické optimalizace tvaru buňky, to znamená maximální snížení spotřeby stavebních látek při současném minimálním snížení pevnosti (Gandelová et al. 2002).

Hygroskopicita

Dřevo má schopnost měnit svoji vlhkost podle vlhkosti okolního prostředí. Nepříjemným důsledkem změny obsahu vody ve dřevě jsou rozměrové změny (sesychání, bobtnání), změny pevnosti a pružnosti při mechanickém namáhání (Gandelová et al. 2002).

Nehomogenita

Dřevo jako biologicky rostlý materiál je nehomogenní. Tato vlastnost vzniká již na submikroskopické a mikroskopické úrovni a dále pak přechází na makroskopickou úroveň. Při posuzování pevnosti dřeva je zpravidla rozhodující podíl letního dřeva, které zabezpečuje převážně funkci mechanickou (Gandelová et al. 2002).

2.2.1 Fyzikální vlastnosti dřeva

Vlhkost dřeva

Jak zmiňuje Gandelová et al. (2002), dřevo je ve vztahu k okolnímu prostředí hygroskopický materiál schopný přijímat nebo odevzdávat vodu v kapalném či plynném skupenství. Vlhkost dřeva se nazývá přítomnost vody ve dřevě. Dle Munduchové (2014) ovlivňuje jeho fyzikálně – mechanické vlastnosti, a proto je velice důležitým parametrem. Zjišťuje se gravimetricky nebo nedestruktivními metodami pomocí vlhkoměrů. Vyjadřuje se podílem hmotnosti vody k hmotnosti dřeva v absolutně suchém stavu (absolutní vlhkost) nebo v modrém stavu (relativní vlhkost). Absolutní vlhkost se používá pro charakteristiku fyzikálních a mechanických vlastností dřeva. Relativní vlhkost se zjišťuje například při prodeji nebo nákupu dřeva podle jeho hmotnosti. Obě hodnoty vlhkosti se nejčastěji vyjadřují v procentech (Gandelová et al. 2002).

Munduchová (2014) rozděluje vodu do třech základních forem: vázaná (hygroskopická), volná (kapilární), na bodu nasycení buněčných stěn. Vázaná voda vyplňuje buněčné stěny a je vázaná vodíkovými vazbami, volná voda se ve dřevě nachází jen v případě přítomnosti té vázané. Třetí forma určuje obsah vody ve dřevě jak vázané, tak volné. Buněčné stěny jsou plně nasyceny vodou.

Největší rozdíl mezi vlhkostí jádra a běli je obecně u jehličnatých dřevin, kde jádro má 3 až 4krát menší vlhkost než běl. U listnatých dřevin je vlhkost ve dřevě rovnoměrně rozložena. S výškou stromu a v mladším věku se vlhkost zvyšuje, naopak u jehličnatých dřevin se nemění. Záleží také na období v roce a části dne, maximální vlhkost je v zimním období a ráno (Gandelová et al. 2002).

Hustota (objemová hmotnost) dřeva

Hustota dřeva neboli objemová hmotnost je podíl hmotnosti a objemu dřeva. Vyjadřuje se v $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ nebo $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (Gandelová et al. 2002). Hustota výrazně ovlivňuje fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva. Je ukazatelem vhodnosti použití dřeva na účely, které vyžadují nízkou hmotnost a současně vysokou pevnost nebo pružnost (Munduchová 2014). Rozlišujeme hustotu dřevní substance, hustotu dřeva a redukovanou hustotu dřeva (Gandelová et al. 2002). Hustota se stanovuje podle ČSN 49 0108 (Munduchová 2014).

Elektro-fyzikální vlastnosti dřeva

Jak píše Gandelová et al. (2002), dřevo je přírodní materiál s komplexní strukturou a stavbou, které při vystavení střídavému elektromagnetickému poli vykazuje další specifické vlastnosti. Elektromagnetické pole se skládá z elektrického a magnetického pole. Vliv obou polí na dřevo je rozdílný. Magnetické pole nemá na dřevo v podstatě žádný vliv. Naopak vliv elektrického pole na dřevo je velmi výrazný, kdy vzniká elektrický proud v materiálu a dřevo získává polarizační schopnost. Za nejdůležitější elektro-fyzikální vlastnosti dřeva považujeme jednosměrnou elektrickou vodivost, elektrickou pevnost a dielektrické vlastnosti.

Akustické vlastnosti dřeva

Další fyzikální vlastností dřeva je akustičnost. Dřevo vibruje, když na něj působí vnější periodické síly. Amplituda frekvence závisí na frekvenci působící síly. U dřeva se vyskytují tři druhy vibrací: podélné, příčné a torzní. Dřevem se může šířit zvuk o určité rychlosti. Tato rychlost zvuku je dána materiálovými charakteristikami dřeva, jako například hustotou, vlhkostí a teplotou prostředí (Gandelová et al. 2002).

2.3 Vady a poškození dřeva

Gandelová et al. (2002) popisuje vadu dřeva jako změnu jeho vnějšího vzhledu. Ve většině případů snižují vady kvalitu dřeva, jeho fyzikální a mechanické vlastnosti. Vznikají během růstu stromu nebo v procesu těžby, manipulace a uskladnění dřeva. Mohou být dědičné (točitost, vidličnatost větví), získané nesprávnými pěstebními způsoby nebo vlivem biotických (dřevokazné houby, hmyz, ptactvo) či abiotických (nízké teploty, vítr, sníh, oheň) činitelů. Některé vady, jako jsou spící očka či svalovitost, mohou být naopak vyhledávány pro nábytkářské účely pro zajímavou texturu dřeva.

Vady a poškození dřeva se člení na (Munduchová 2014):

- Růstové vady (suky, trhlíny, točitost, smolníky)
- Napadení dřevokaznými škůdci (houby, hmyz, plísňe)
- Vliv povětrnostních podmínek
- Chemická koroze
- Mechanické poškození.

2.3.1 Růstové vady dřeva

Suky

Suk je zarostlá část živé nebo odumřelé větve s vlastními letokruhy, která je obrostlá dřevem kmene. Sukovitost je přirozená vlastnost všech dřevin a patří k vadám rostoucího stromu. Větší počet suků mají jehličnaté dřeviny než listnaté. Sukem je přerušen normální průběh letokruhů (Gandelová et al. 2002). Podle zdravotního stavu se suky dělí na zdravé, nahnilé a shnilé. Podle viditelnosti se dělí na zarostlé a otevřené, které se dále dělí na zdravé a nezdravé (ČZU 2011).

Trhliny

Trhlinou se podle Gandelové et al. (2002) rozumí roztržení dřeva ve směru dřevních vláken. Trhliny ve dřevě vznikají při růstu stromu (dřeňové, odlupčivé, mrazové), při těžbě a manipulaci se surovinou (výrobní) a vlivem sesychání dřeva (výsušné). Mohou se vyskytovat v radiálním (dřeňové, mrazové, výsušné) a tangenciálním (odlupčivé) směru. Na rostoucím stromě jsou pozorovatelné pouze mrazové trhliny. Nejčastěji se vyskytují u kulatiny. Některým lze zabránit, například u čelní dřeňové trhliny se využívají ocelové svorky ve tvaru „S“, které dřevo stahují (ČZU 2011).

Vady tvaru kmene

Do této skupiny řadí Gandelová et al. (2002) vady, které deformují ideální tvar kmene stromu. Jde o sbíhavost, křivost, zbytnění oddenku, zploštění a nádory (boulovitost). Ideální tvar stromu je válcovitý s přirozeným snižováním tloušťky směrem ke špičce. Sbíhavost je odchylka od tohoto ideálního tvaru. Pokud je větší než 1 cm na 1 m délky, lze ji považovat za vadu. V případě křivosti se jedná o odchýlení podélné osy kulatiny od přímky způsobené zakřivením stromu. Vada vzniká zejména vlivem vnějšího prostředí (světlo, vítr, sníh, svah terénu). Křivost se vyskytuje u všech dřevin, nejvíce u borovice, modřínu a u převážné většiny listnatých dřevin (ČZU 2011). Zbytnění oddenku je výrazné zvětšení průměru oddenkové části kmene stromu. Podle tvaru na příčném řezu kmenem se rozděluje na okrouhlé a žebrované (Gandelová et al. 2002). Zploštěním kmene se rozumí oválný tvar kmene na jeho příčném řezu, kdy větší průměr se výrazně liší od menšího (ČZU 2011). Nádory jsou výrůstky, boule, vypukliny na kmeni, větvích i kořenech většinou kulovitého tvaru. Vytvářejí se v důsledku činnosti hub, mrazu, požáru nebo z mechanického poškození. Nejčastěji

se vyskytují na kmenech například javorů, jasanů, jilmů, bříz, ořešáků a borovice (Gandelová et al. 2002).

Nepravidelnosti struktury dřeva

Tato skupina obsahuje několik vad způsobených změnou normální struktury dřeva. Patří sem točitost, křemenitost (reakční dřevo), dvojitá dřeň, zásušek, zárost, rakovina, nepravé jádro a vnitřní běl. Točitost neboli odklon dřevních vláken, se projevuje závitnicovým uspořádáním dřevních vláken a je patrná na bočním povrchu kulatiny (Gandelová et al. 2002). Křemenitost, neboli také reakční dřevo tlakové, je místní změna struktury dřeva v části kmene namáhané na tlak, projevující se nápadným rozšířením zóny letního dřeva. Tato vada se vyskytuje pouze u jehličnatých dřevin (ČZU 2011). Dvojitá dřeň se vyskytuje u všech dřevin. Dvě dřeně se vytvářejí pod vidlicí kmene u tzv. dvojáku. Příčinou vzniku je zejména poškození terminálního pupenu mrazem, zvěří či ptactvem (Gandelová et al. 2002). Zásušek je odumřelá vrstva dřeva, která se jeví jako prohloubenina na povrchu dřeva. Vzniká v důsledku poranění kmene stromu v době jeho růstu (ČZU 2011). Zárost představuje odumřelé dřevo nebo kůru, které je částečně nebo úplně zarostlé dřevem. Vada vzniká v důsledku vnějšího poranění rostoucího stromu (Gandelová et al. 2002). U některých listnatých dřevin (dub, jasan) se v zóně jádra může vytvářet světlé mezikruží s vlastnostmi běli. Tato běl lehce podléhá hnilobě a hmyzu. Vzniká vlivem vnějších činitelů (ČZU 2011).

2.3.2 Poškození dřevokaznými houbami

Jak uvádějí Baier a Týn (1996), houby napadají živou nebo neživou organickou hmotu o určité vlhkosti. Jsou to chemoheterotrofní organizmy. Nemají fotosyntetické pigmenty, a proto nemohou přeměňovat oxid uhličitý ze vzduchu na organické látky. Uhlík získávají z organického substrátu. Pro svůj život potřebují vodu. Gandelová et al. 2002 uvádí, že se rozmnožují nepohlavně i pohlavně. Výtrusy se lehce rozšiřují větrem, vodou anebo na tělech živočichů. Podle způsobu výživy jsou houby parazitické, saprofytické a saproparazitické. Houby se dále člení na dřevokazné a dřevozbarvující. Dřevokazné houby tvoří zvláštní ekologicko-fyziologickou skupinu hub, která rozkládá dřevní hmotu. Základními podmínkami pro jejich rozvoj je určitá vlhkost dřeva, teplota a přístup vzduchu. Dřevozbarvující houby dřevo jen zbarvují a nenarušují jeho fyzikální a mechanické vlastnosti. Mohou však ovlivnit fyziologické procesy v živém stromě.

Podle napadené části kmene a stupně degradace dřeva se vady dělí na zbarvení jádra (skvrny, pruhy), zbarvení běle, zapaření, hnilobu a trouchnivost (dutiny). Za zbarvení jádra houbami se považuje nenormální zbarvení části jádra, které vzniká v rostoucím stromě činností dřevokazných nebo dřevozbarvujících hub. Zbarvení běli naopak vzniká v pokáceném stromě činností dřevozbarvujících hub (ČZU 2011). Zapaření dřeva vzniká v zóně běli i zóně vyztřelého dřeva listnatých dřevin (bříza, buk, olše) po těžbě. K jeho vzniku je potřebná určitá rychlost vysychání dřeva (Gandelová et al. 2002).

Hniloba je rozklad dřeva houbami nebo jinými mikroorganismy, který vede ke snížení jeho tvrdosti, ztrátě hmotnosti a pevnosti. Vzniká tím, že hyfy hub vylučují látky, kterými rozkládají buněčné stěny dřeva. Nákaza vniká do dřeva v místech poranění stromu. Napadení se projevuje jak vně, tak uvnitř stromů. Hniloba se dělí podle umístění na hnilobu na běli a na jádře. Dále se dělí podle barvy na bílou a hnědou, a podle vnějšího vzhledu na korozivní a destruktivní (ČZU 2011). Nepravé jádro se vytváří v zóně vyztřelého dřeva nebo ve středové části kmene dřevin s roztroušeně pórovitou stavbou dřeva (buk, bříza, olše, javor). Na urychlení jeho tvorby mají vliv extrémně nízké teploty (Gandelová et al. 2002). Rakovina je dutina nebo výčnělek na povrchu kulatiny, která vznikla v době růstu stromu jako důsledek činnosti hub nebo mikromycet. Tato vada se může vyskytnout u všech dřevin. Dělí se na otevřenou a uzavřenou (ČZU 2011). Plísně vznikají za vlhkého, nevětraného prostředí a způsobují zbarvení povrchu dřeva ve formě skvrn nebo povlaků. Plíseň může být od šedé, přes růžovou po zelenomodrou, závisí na barvě spor, ploidii a druhu vylučovaného pigmentu plísňových hub (Gandelová et al. 2002).

2.3.3 Poškození dřevokazným hmyzem

Gandelová et al. (2002) uvádí, že dřevo poškozují zejména larvy hmyzu, které se živí dřevem a kůrou. Larvy napadají rostoucí stromy nebo čerstvě vytěžené dřevo. Hmyz má několik vývojových stadií. Dospělý hmyz (imago) klade vajíčka na povrch kůry, do lýka nebo na obvod chodeb vyhrýzaných ve dřevě. Z vajíček se vylíhnou larvy, které požírají pupeny, listy, kůru (požerky) i dřevo. Dřevokazný hmyz se specializuje na určité druhy dřevin. Může se žít paraziticky na živých stromech, saproparaziticky na čerstvě vytěžené kulatině nebo saprofytický na odumřelém dřevě.

Škody hmyzem lze omezit péstebními opatřeními, ochranou pomocí postřiků a pomocí preventivních kontrol škůdců v porostu. U vytěžených sortimentů pomáhá včasné odkornění, asanace a odvoz dřeva z porostu (ČZU 2011).

2.4 Nedestruktivní metody měření zdravotního stavu stromů

Velké procento živých stromů má nějaké poškození, které snižuje nejen jejich ekonomickou hodnotu. Tyto stromy jsou obvykle použity jako palivo nebo jsou ponechány přirozenému rozkladu. Přesný způsob detekce poškození je užitečný nejen z hlediska těžby, ale také z hlediska bezpečnosti při pohybu v lesním a nelesním porostu (Larsson et al. 2004). Odhady rozsahu a druhů byly vyvinuty na základě vizuálního vzhledu rozkládajícího se dřeva (Shortle & Smith 1987). Nicméně Boyce a Hubert zjistili, že proces rozpadu přesahuje meze vizuální detekce. Proto byly vynalezeny metody, které měří poškození u stojících stromů, aniž by je nějak výrazně poškodily. Patří mezi ně mikrovlnné skenování, zobrazování magnetickou rezonancí, rentgenová tomografie a odporová a akustická tomografie (Larsson et al. 2004). Martin et al. (1986) píše o mikrovlnném skenování, které snímá strom uvnitř elektromagnetickými vlnami. Tyto mikrovlny jsou závislé na prostředí, kterým proudí. Výsledkem jsou informace o hustotě dřeva, jeho vlhkosti a defektech (suky, kovové předměty, bělové dřevo). Müller et al. (2001) píše o aplikaci metody magnetické rezonance na napadené dřevo, která je na stejném principu jako magnetická rezonance v lékařství. Rentgenová tomografie je založena, jak uvádí Schurch et al. (2014), na měření přenosu rentgenových paprsků skrz kmen stromu.

2.4.1 Stromový odporový tomograf

Stromová odporová tomografie je kontrolní nedestruktivní metoda, jež zjišťuje zdravotní stav stojících stromů a která byla původně vyvinutá v oblasti geofyziky (Göcke 2010). Metoda zkoumala dílčí povrchové struktury pomocí elektrických měření na povrchu. V roce 1912 Conrad Schlumberger koncipoval tuto myšlenku ke zmapování podpovrchových skalních útvarů. O 14 let později, v roce 1926, založil společně s bratrem společnost zabývající se vyhledáváním uhlovodíků (ropa, uhlí atd.) pomocí měření elektrického odporu. Stromový odporový tomograf byl poprvé použit na stromech v roce 1998 dvěma geofyziky Justem a Jacobsem. Používali geofyzikální

nástroje a upravili matematické algoritmy k měření odporu v kmenech stromů. Od roku 2004 tyto upravené algoritmy zlepšovaly výsledky odporového měření pomocí vykreslení přesného tvaru poškozené báze stromu (Göcke et al. 2007).

Zjišťování zdravotního stavu stromu se provádí také za účelem bezpečnosti osob a majetku. Mezi klíčové pojmy patří stabilita stromu. Stabilita stromu je stav, kdy vlivem působení vnějších i vnitřních faktorů nehrozí možnost selhání stromu či jeho části v rozsahu ohrožujícím jeho setrvání na stanovišti (Kolařík et al. 2005). Hlavní aspekty, které určují stabilitu stromu, jsou průměr kmene, síla větru, pevnost dřeva, ukotvení kořenů a hniloba nebo dutina uvnitř kmene (Schubert et al. 2009). Szórádová & Praus uvádí, že v současné době se stabilita stromu nejčastěji hodnotí tahovou zkouškou. Tuto metodu vyvinuli a publikovali Sinn a Wessolly pod názvem Static Integrated Method (SIM). V České republice se používá od roku 1996. Tahová zkouška zvažuje působící sílu, tvar a materiál nosných prvků. Skládá se z terénního šetření, vlastní takové zkoušky, zátěžové analýzy a výpočtu bezpečnosti stromu proti vyvrácení či zlomení.

Odporový tomograf využívá elektrický proud a vodivost pro stanovení prostorového rozložení odporu ve dřevě nedestruktivním způsobem (Göcke 2010). Odpor je ovlivněn obsahem vody, buněčnou strukturou, koncentrací iontů a dalšími faktory ve dřevě. Ve dřevě se hromadí vlhkost mimo jiné díky houbám nebo patogenům, které bázi stromu rozkládají na hnilobu. Tímto se zvyšuje vodivost a zároveň snižuje elektrický odpor (Johnstone et al. 2010).



Obr. 1 – Stromový odporový tomograf, zdroj: autor, 2015.

2.4.2 Stromový sonický tomograf

Sonický neboli akustický tomograf (obr. 2) zjišťuje přítomnost poškození u stojících stromů pomocí neinvazivní metody, která je na principu měření rychlosti zvukových vln v kmeni stromu. Rychlost zvuku ve dřevě závisí na modulu pružnosti a hustotě dřeva (Göcke 2012). Pružnost dřeva je všeobecně definována jako schopnost dřeva dosáhnout původního tvaru a rozměrů po uvolnění vnějších sil. Modul pružnosti vyjadřuje vnitřní odpor materiálu proti pružné deformaci. Čím je modul pružnosti větší, tím větší napětí je potřebné na vyvolání deformace (Gandelová et al. 2002).

Přístroj se skládá ze sady senzorů (obvykle 6 až 14), měřicího panelu, speciálního kladívka s bluetooth připojením a elektronické průměrky. Sensory se umísťují na body, které jsou rovnoměrně rozmístěné po celém obvodu kmene stromu. Každý snímač je pomocí magnetu připojen na daný bod a zároveň k měřicímu panelu pomocí kabelu. Ručním poklepáním kladívkem na tyto body se zaznamená zpoždění šíření zvuku v kmeni stromu. Ze vzdálenosti a času (zpoždění signálu) je následně vypočítána rychlost šíření zvuku. Záznam v programu PiCUS vykreslí pomyslný průřez kmene stromu a zobrazí umístění případné hniloby, dutiny či praskliny. Přístroj není schopen určit přesný typ poškození, pouze určí přibližné umístění abnormality kmene stromu a obsluha přístroje pak musí interpretovat výsledky a zhodnotit zdravotní stav stojícího stromu (Göcke 2012).



Obr. 2 – Stromový sonický tomograf, zdroj: autor 2015.

3 Metodika

3.1 Informace o použitých datech

Měření odporovým stromovým tomografem probíhalo na Výzkumné stanici Truba u Kostelce nad Černými lesy, jejíž součástí je detašované pracoviště Katedry pěstování lesů FLD ČZU v Praze. Výzkumná stanice Truba tvoří technické zázemí Arboreta FLD. Odbornou správu lesního porostu v areálu stanice, kde proběhla měření uváděná v této práci, vykonává Školní lesní podnik České zemědělské univerzity v Praze. Školní lesní podnik v Kostelci nad Černými lesy je vysokoškolským statkem ČZU v Praze. Hlavní náplní činnosti ŠLP je zajištění praxí a cvičení pro studenty ČZU v Praze, podpora při získávání dat pro odborné práce a výzkumné úkoly. Podnik byl založen v roce 1935, základem se staly lesní pozemky v okolí Kostelce nad Černými lesy a rybníční kaskáda v Jevanech. Postupem času se zde zřizovala další střediska. Současná velikost spravovaného území činí cca 6900 ha. Podnik se v lesích snaží hospodařit maximálně šetrným způsobem, podporovat přirozenou obnovu v těch porostech, kde je to možné, a využívat v maximální míře podrostní hospodářský způsob (Středočeský kraj 2017).

3.2 Použitý stromový odporový tomograf

Pro toto měření byl použit stromový odporový tomograf značky PiCUS TreeTronic (obr. 1), který vlastní Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta lesnická a dřevařská, Katedra pěstování lesů. Tomograf byl vyroben německou firmou Argus electronic gmbh ve městě Rostock.

3.3 Metodický postup měření

Posuzování zdravotního stavu stromu pomocí stromové odporové tomografie probíhá v jednotlivých navazujících krocích. Nejdříve jsou zhodnoceny vnější znaky vnitřních vad stromu, jako je prasklina, dutina, poškození kůry, výskyt plodnic hub a jiné anomálie (Göcke 2010). Poté proběhne vlastní měření. Pomůcky používané při měření: stromový odporový tomograf, elektronická průměrka, hřebíky, kladívko, notebook a malý stolek.

Při posuzování stavu stromu je žádoucí použít obě metody stromové tomografie (odporový i sonický tomograf.). V první fázi se určí úroveň, ve které bude prováděno měření. Úroveň je libovolná, závisí na tom, kde má být tomogram proveden. Zpravidla se volí tak, aby měření zachytilo průřez kmenem v místě očekávaného poškození hnilobou. Pokud kmen není viditelně poškozen, většinou se měření provádí ve výšce 130 cm od paty stromu. Na jeden strom lze samozřejmě umístit více úrovní měření, aby bylo možné rozsah případné hniloby porovnat. Do zvolené úrovně (ve stejné výšce) se umístí příslušný počet měřicích bodů (minimální počet bodů stanoví obslužný software podle tloušťky kmene). Měřicími body jsou hřebíky o potřebné délce zatlučené do kůry stromu. Délka hřebíků se zvolí podle tloušťky kůry měřeného stromu. Hřebíky musí pronikat přes vnější kůru do kambia. U stromů se slabou kůrou stačí hřebíky 25 mm dlouhé, u silnější kůry jsou mnohdy potřeba více jak 50 mm dlouhé. Na zatlučené hřebíky se připojí měřicí svorky. Svorky jsou očíslované, připojí se podle čísel bodů, která vyplývají z předchozí analýzy geometrie řezu kmene.

Vzdálenost mezi jednotlivými body by měla být přibližně stejná po celém obvodu kmene stromu, avšak minimálně 1 cm a maximálně 20–25 cm. Čím více se použije měřicích bodů, tím lepší bude úroveň rozlišení tomogramu (Göcke 2010). Pro tomografické snímky použité v této práci bylo použito 24 měřicích bodů. Následuje změření tvaru kmene v příslušném řezu elektronickou průměrkou. Podle pokynů na displeji průměrky se ramena průměrky postupně přikládají na jednotlivé měřicí body a průměrka zaznamená vzdálenost bodů. Z naměřených vzdáleností následně software vypočítá a vykreslí tvar kmene.

Následuje vlastní měření s tomografem. Datové spojení dat lze uskutečnit USB kabelem nebo bezdrátovým přenosem pomocí Bluetooth (Göcke 2010). Při tomto měření byl použit Bluetooth přenos. V programu PiCUS se zadá nové měření geometrie stromu a poté nový tomogram. Při měření proudí napětí vždy do dvou párů svorek (elektrod). Průběh měření se zobrazuje v tabulce, kde je také vidět hodnota napětí. Tato hodnota ukazuje vadu stromu nebo případnou chybu při instalaci přístroje na strom. Chyba instalace může být způsobena špatným připojením svorky k hřebíku (Göcke 2010). Po ukončení měření se výsledný tomogram uloží jako obrázek ve formátu JPG a soubor ve formátu TRT, který je možné otevřít v poznámkovém bloku nebo v Excelu společnosti Microsoft Office. Na obrázku č. 3 je fotografie z vlastního měření na Trubech.



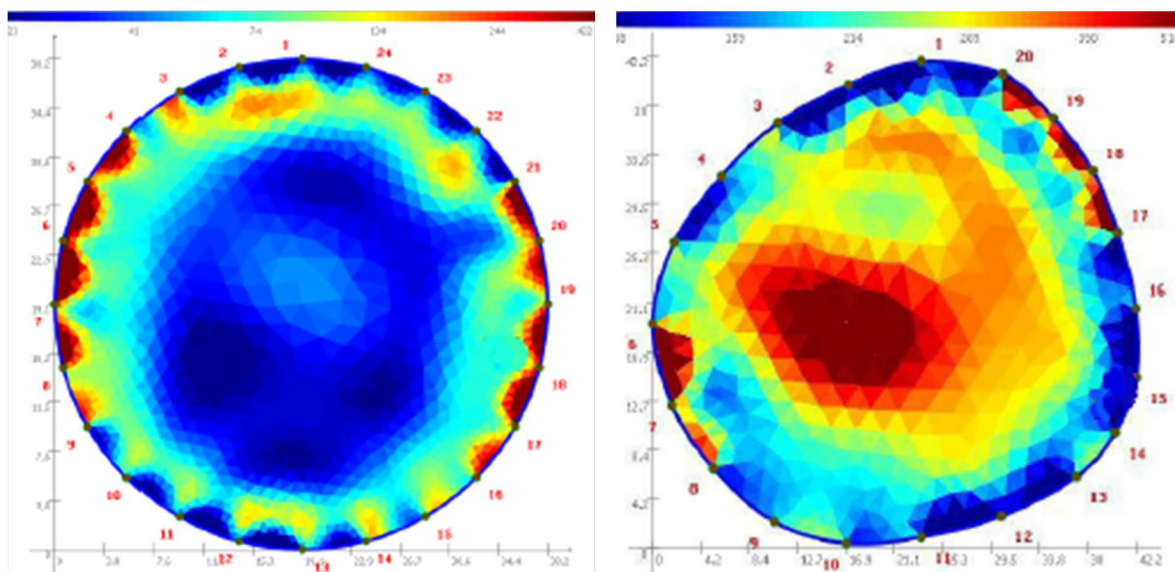
Obr. 3 – Měření stromovým odporovým tomografem, zdroj: autor, 2015.

3.4 Čtení tomogramu

Tomogram je snímek vytvořený metodou stromové tomografie, který zobrazuje distribuci oblastí v pomyslném řezu kmenem stromu podle hodnoty elektrického odporu. Vztah mezi elektrickým odporem, napětím a proudem definuje Ohmův zákon (Tkotz et al. 2002). Zákon říká, že elektrický proud v elektricky vodivém předmětu je přímo úměrný elektrickému napětí přiloženému na předmět, přičemž konstantou úměrnosti je vodivost (Nečásek 1981). Umístíme-li na protilehlé strany tělesa dva zdroje o rozdílném napětí (elektrody), vzniká mezi nimi elektrický proud (Gandelová et al. 2002).

Tomogram z odporového tomografu se skládá ze čtyř základních barev – modré, zelené, žluté a červené. Barvy představují výši elektrické vodivosti závislé na obsahu vody ve dřevě. Elektrická vodivost je fyzikální veličina popisující zdánlivý odpor a fázový posuv napětí proti proudu při průchodu harmonického střídavého proudu daného kmitočtu. Elektrická vodivost je odpor kladený střídavému proudu (Nečásek 1981). Snímky se liší podle dřeviny, jehličnaté dřeviny mají vyšší obsah vody v jádře a listnaté dřeviny naopak. Na obrázku č. 4 je ilustrační snímek řezu zdravého kmene jehličnaté dřeviny, konkrétně *Sequoia giganteum*. Na obrázku č. 5 je snímek zdravé listnaté dřeviny, konkrétně buku. Modrá barva znázorňuje oblasti s nízkou impedancí, což znamená vyšší obsah vody ve dřevě. Zelená a žlutá barva znamenají zvyšování impedance, červená vysokou impedanci neboli nižší obsah vody ve dřevě. Odlišné kraje

tomogramu neznamenají žádné poškození kmene stromu, jsou to pouze mírné nesrovnalosti mezi jednotlivými body při měření (Göcke 2010).



Obr. 4 (vlevo), 5 (vpravo) – Tomogramy. Vlevo tomogram zdravého sekvojovce obrovského (*Sequoia giganteum*), vpravo tomogram zdravého buku. Zdroj: Göcke, 2010.

3.5 Vlastní měření

Bylo měřeno celkem 9 stromů, a to 3 borovice, 3 buky a 3 duby. Stromy byly vybrány náhodně. U každého stromu proběhlo celkem 10 měření. V roce 2014 osm měření, od února do října (kromě srpna), a v roce 2015 dvě měření v lednu a říjnu. Přesné termíny měření jsou uvedeny pod výslednými obrázky tomogramů v následující kapitole 4 *Výsledky a diskuze*. V následující tabulce jsou údaje o měřených stromech, konkrétně výška, obvod, výčetní tloušťka a výška měření od paty stromu.

Tabulka č. 1 – Údaje o měřených stromech.

Strom	Výška (m)	Obvod (cm)	Výčetní tloušťka (cm)	Výška měření od paty stromu (cm)
1 – borovice	23	141	44,9	130
2 – borovice	25,5	152	48,4	130
3 – borovice	29,5	214	68,1	130
4 – buk	26,7	122	38,8	140
5 – buk	25,9	120	37,9	130
6 – buk	26,1	128	39,1	130
7 – dub	25,3	117	37,2	130
8 – dub	27	134	42,7	120
9 – dub	21,5	258	82,1	120

4 Výsledky a diskuze

Tato kapitola obsahuje výsledné vyhodnocení tomogramů získaných z měření stromů s komentáři, jak se tomogramy vyvíjely během období měření, a časovou náročnost neboli ekonomické aspekty provozu tomografu, kde jsou vyhodnoceny časy při měření stromovým odporovým tomografem.

4.1 Vyhodnocení tomogramů

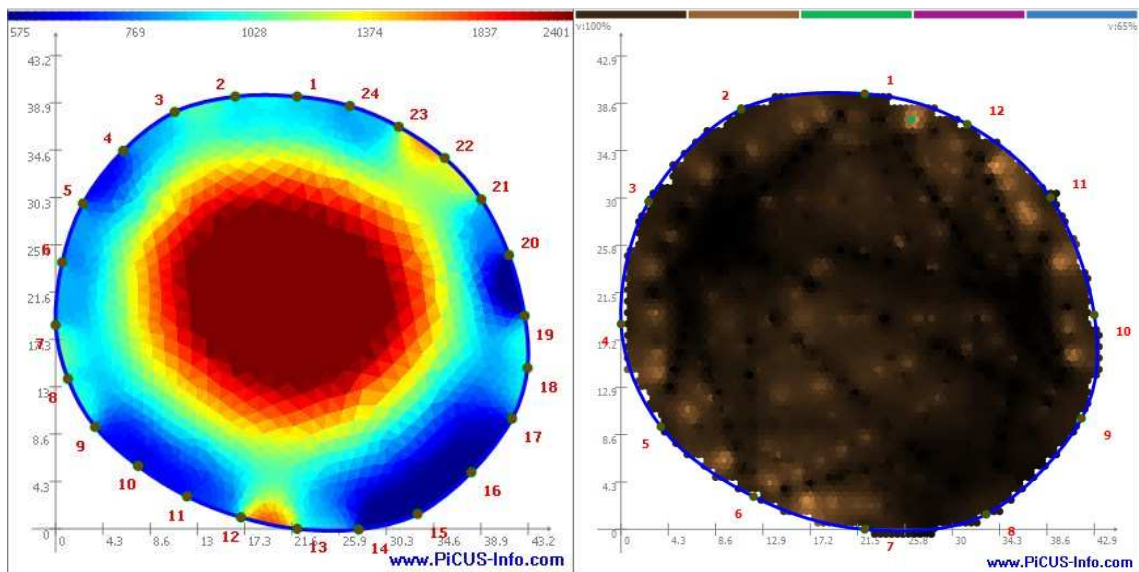
V této podkapitole jsou vyhodnoceny výsledné tomogramy (obr. 8–135) všech devíti měřených stromů za časové období od ledna 2014 do října 2015. Fotografie měřených stromů jsou na začátku každé podkapitoly pro daný strom.

4.1.1 Strom č. 1 – borovice

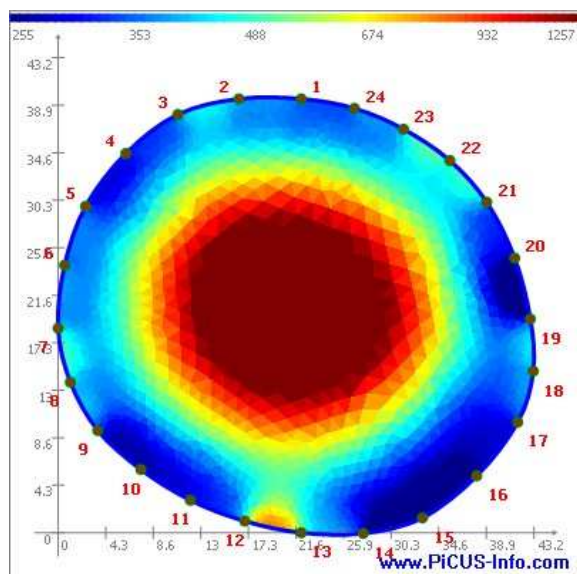


Obr. 6, 7 – Strom č. 1 – borovice, zdroj: Martin Baláš, 2015.

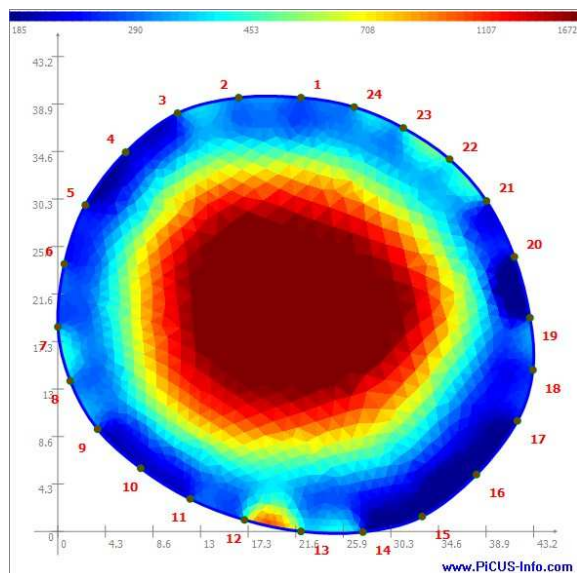
Na zkoumaném stromě č. 1 (obr. 6, 7) nebyla nalezena žádná vnější poškození. Na obrázcích č. 8–20 jsou výstupy měření tohoto stromu. Pro srovnání jsou vedle výstupů měření z odporového tomografu také výstupy ze sonického tomografu.



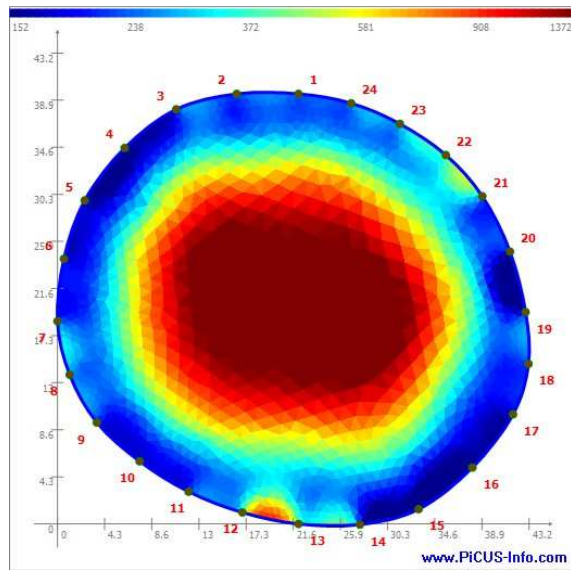
Obr. 8 (vlevo), 9 (vpravo) – Strom č. 1 – borovice, termín měření: 6. 2. 2014. Vlevo výstup z odporového tomografu, vpravo srovnávací výstup ze sonického tomografu.



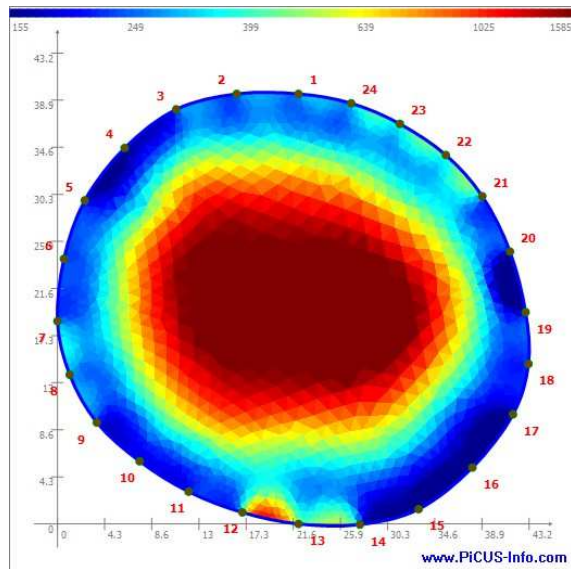
Obr. 10 – Strom č. 1 – borovice, termín měření: 7. 3. 2014.



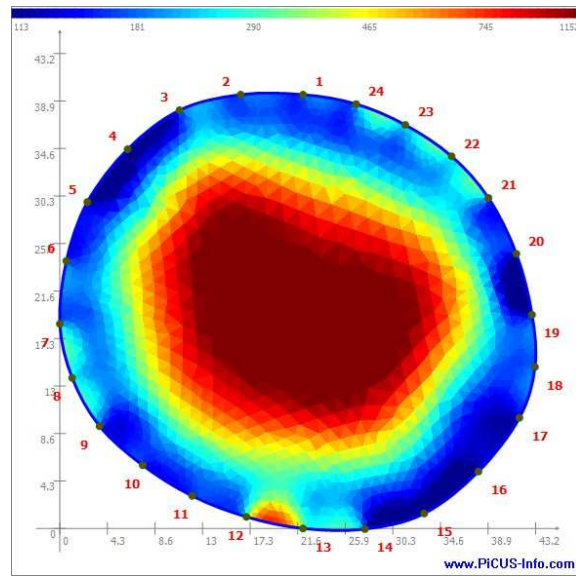
Obr. 11 – Strom č. 1 – borovice, termín měření: 17. 4. 2014.



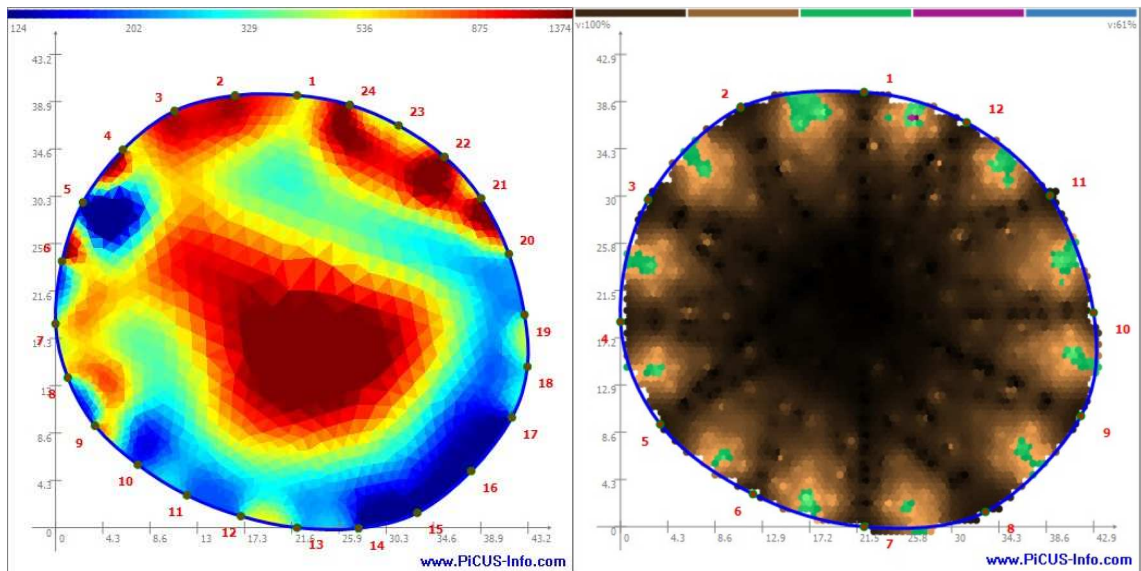
Obr. 12 – Strom č. 1 – borovice, termín měření: 26. 5. 2014.



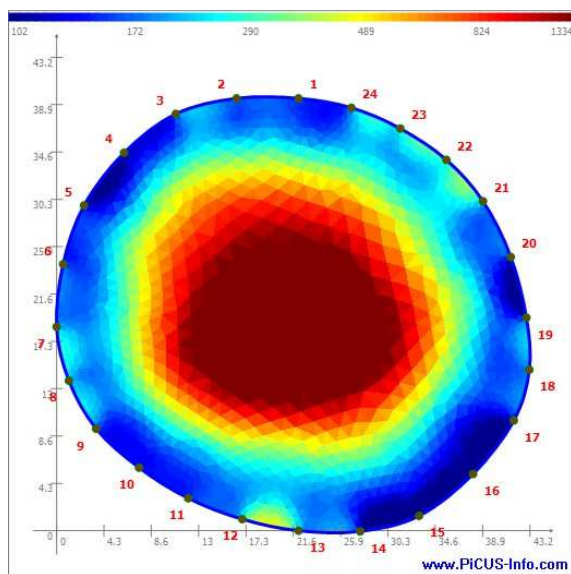
Obr. 13 – Strom č. 1 – borovice, termín měření: 27. 6. 2014.



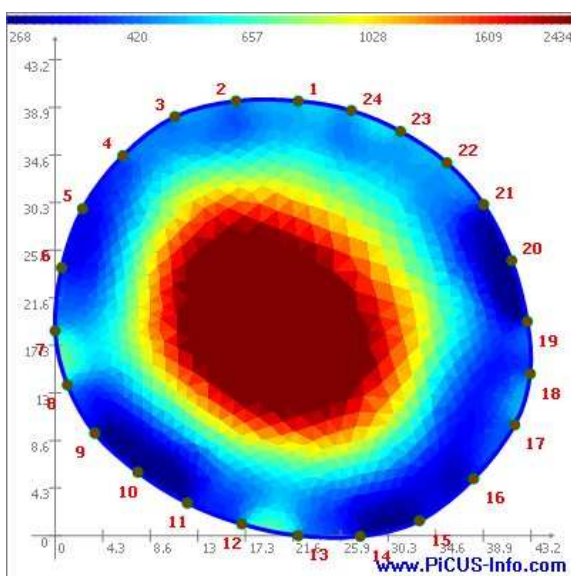
Obr. 14 – Strom č. 1 – borovice, termín měření: 21. 7. 2014.



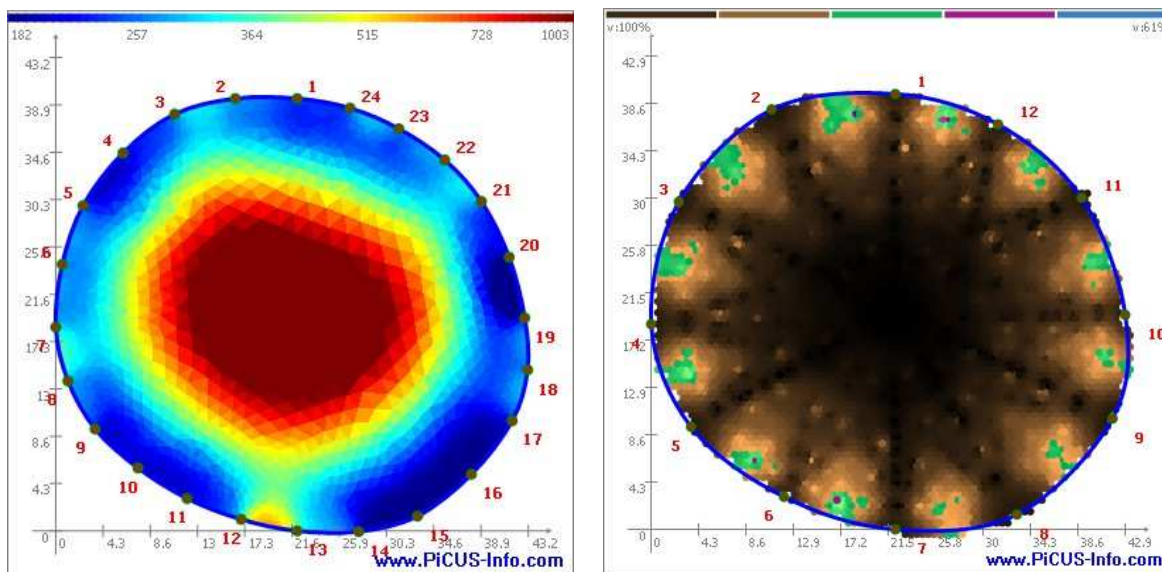
Obr. 15 (vlevo), 16 (vpravo) – Strom č. 1 – borovice, termín měření: 3. 9. 2014. Vlevo výstup z odporového tomografu, vpravo srovnávací výstup ze sonického tomografu.



Obr. 17 – Strom č. 1 – borovice, termín měření: 8. 10. 2014.



Obr. 18 – Strom č. 1 – borovice, termín měření: 15. 1. 2015.



Obr. 19 (vlevo), 20 (vpravo) – Strom č. 1 – borovice, termín měření: 27. 10. 2015. Vlevo výstup z odporového tomografu, vpravo srovnávací výstup ze sonického tomografu.

Z pořízených tomogramů pomocí odporového tomografu je patrná oblast ve vnitřní části kmene (naznačeno žlutou až červenou barvou), která má výrazně vyšší elektrický odpor oproti obvodovým částem průřezu kmene, kde je naopak odpor snížen (modrá barva). Vnitřní oblast odpovídá jádrovému dřevu s nižší vlhkostí, vnější oblast pak bělové části kmene s vyšší vlhkostí. Tomogramy se v závislosti na roční době liší jen minimálně. Výjimkou je sedmé měření z 3. 9. 2014 (obr. 15), kdy tomogram ukazuje zřejmou odlišnost od tomogramů pořízených v ostatních termínech. Tuto abnormalitu lze s velkou pravděpodobností připsat ke zvýšené vlhkosti v kmeni měřeného stromu. Den před měřením spadlo 14 mm a v den měření 5 mm atmosférických srážek (Meteostanice Truba 2014). Jak je popsáno v kapitole 3.4 *Čtení tomogramu*, odlišné kraje tomogramů (odporový i sonický) se při vyhodnocování výsledků měření neberou v potaz.

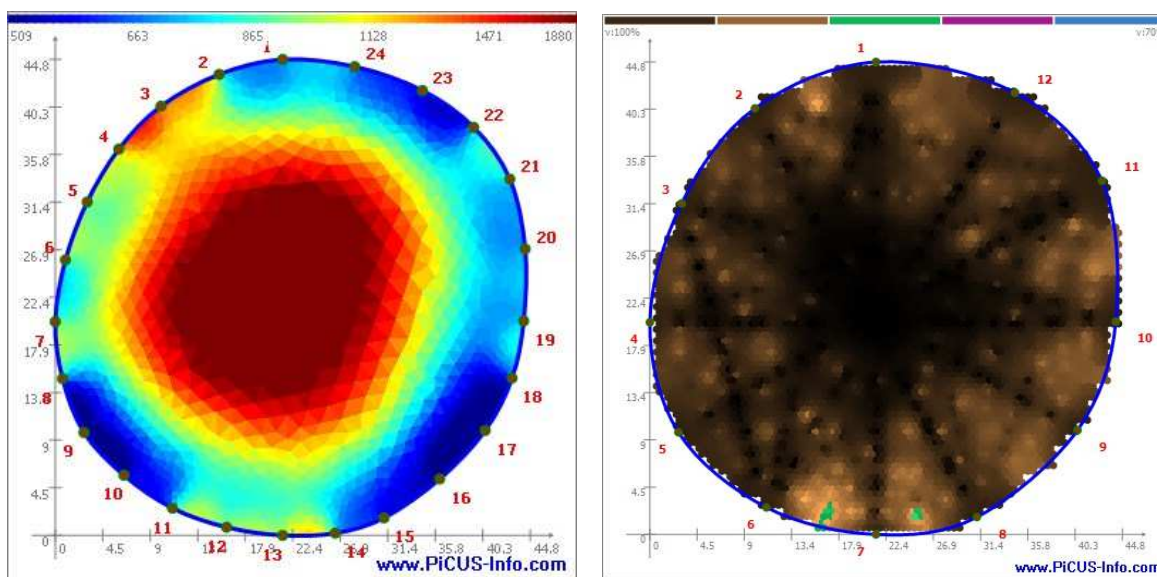
Poslední naměřené snímky neukazují žádné zvýšení vlhkosti uvnitř kmene stromu, které by nasvědčovalo hnilobě. Je možné tedy říci, že první měřený strom nemá vnitřní poškození a je relativně zdravý.

4.1.2 Strom č. 2 – borovice

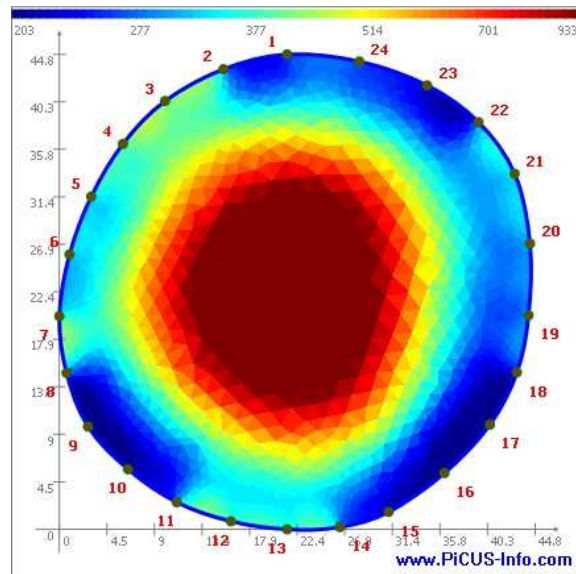


Obr. 21, 22 – Strom č. 2 – borovice, zdroj: Martin Baláš, 2015.

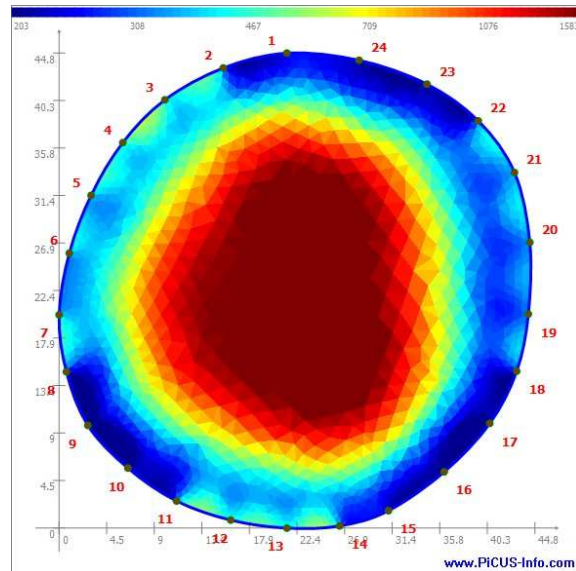
Na stromě č. 2 (obr. 21, 22) nebyla nalezena žádná vnější poškození. Na obrázcích č. 23–35 jsou výstupy měření tohoto stromu. Pro srovnání jsou vedle výstupů měření z odporového tomografu také výstupy ze sonického tomografu.



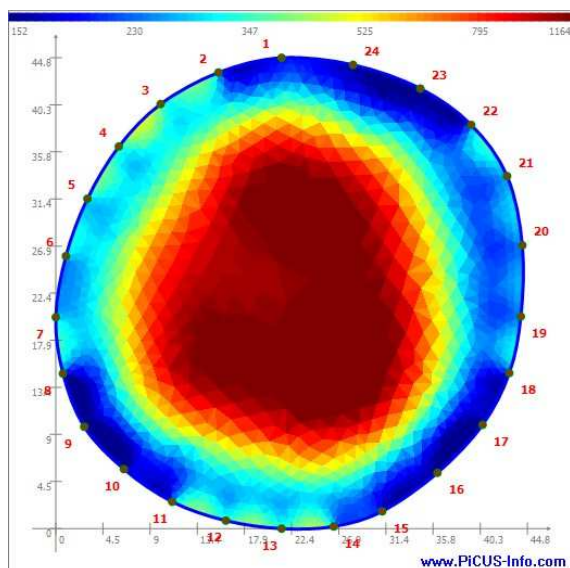
Obr. 23 (vlevo), 24 (vpravo) – Strom č. 2 – borovice, termín měření: 6. 2. 2014. Vlevo výstup z odporového tomografu, vpravo srovnávací výstup ze sonického tomografu.



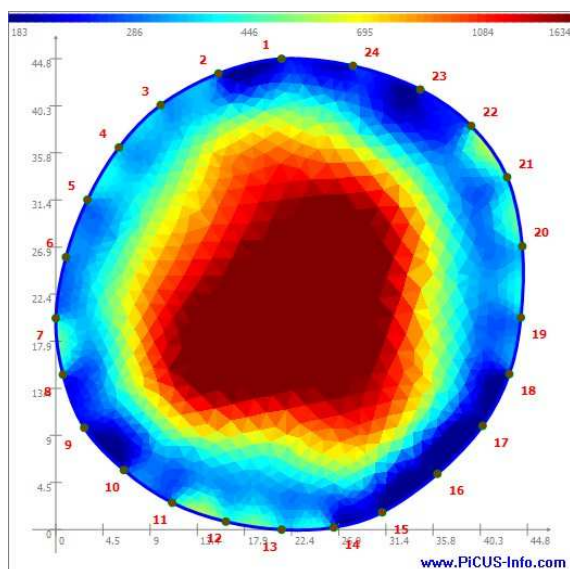
Obr. 25 – Strom č. 2 – borovice, termín měření: 7. 3. 2014.



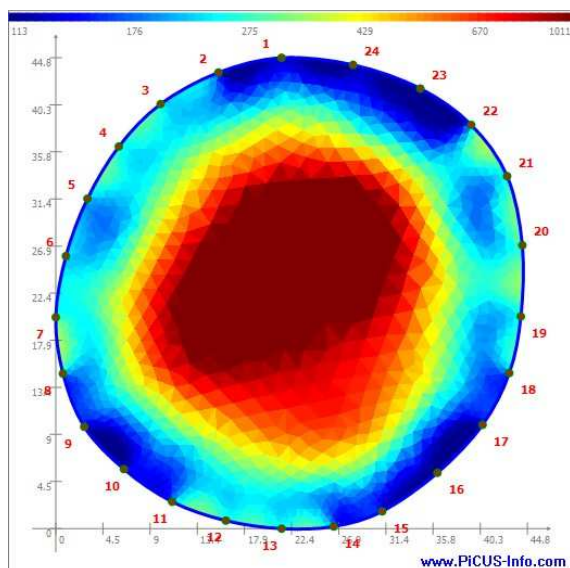
Obr. 26 – Strom č. 2 – borovice, termín měření: 17. 4. 2014.



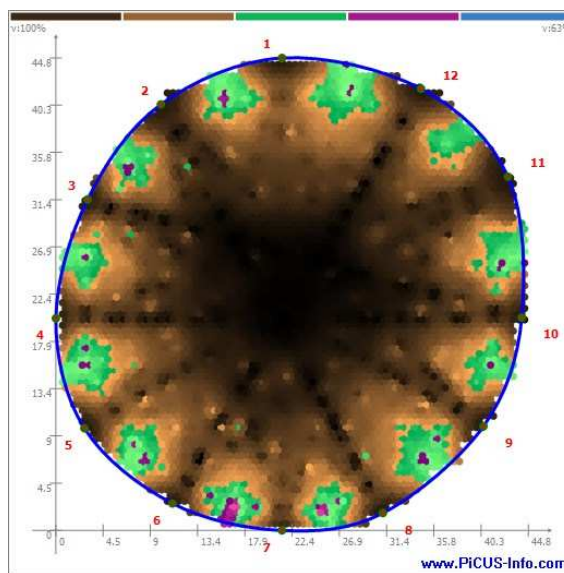
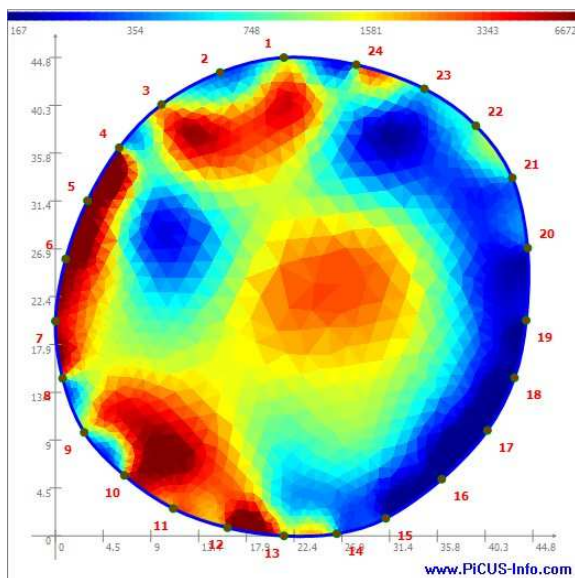
Obr. 27 – Strom č. 2 – borovice, termín měření: 26. 5. 2014.



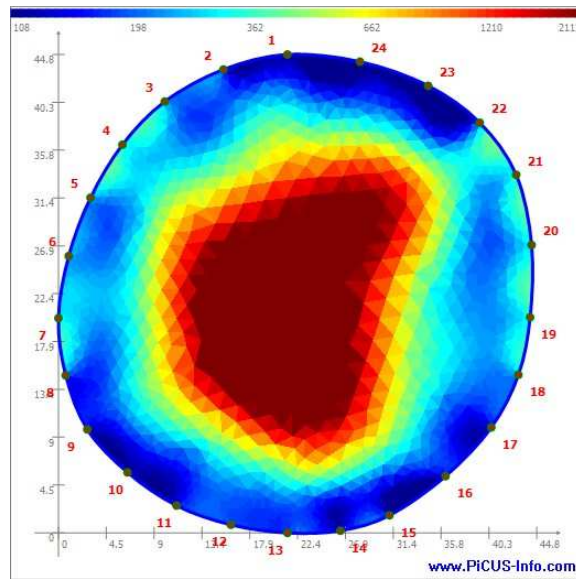
Obr. 28 – Strom č. 2 – borovice, termín měření: 27. 6. 2014.



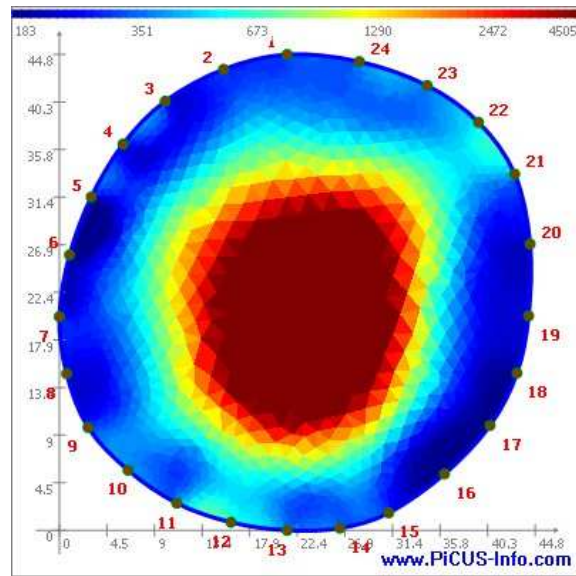
Obr. 29 – Strom č. 2 – borovice, termín měření: 21. 7. 2014.



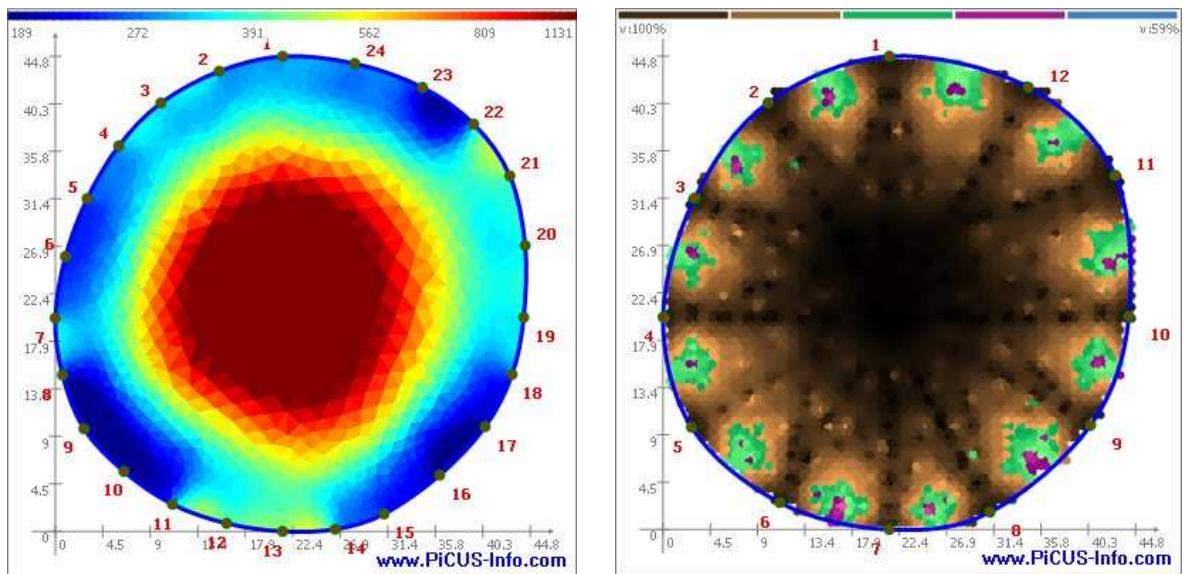
Obr. 30 (vlevo), 31 (vpravo) – Strom č. 2 – borovice, termín měření: 3. 9. 2014. Vlevo výstup z odporového tomografu, vpravo srovnávací výstup ze sonického tomografu.



Obr. 32 – Strom č. 2 – borovice, termín měření: 8. 10. 2014.



Obr. 33 – Strom č. 2 – borovice, termín měření: 15. 1. 2015.



Obr. 34 (vlevo), 35 (vpravo) – Strom č. 2 – borovice, termín měření: 27. 10. 2015. Vlevo výstup z odporového tomografu, vpravo srovnávací výstup ze sonického tomografu.

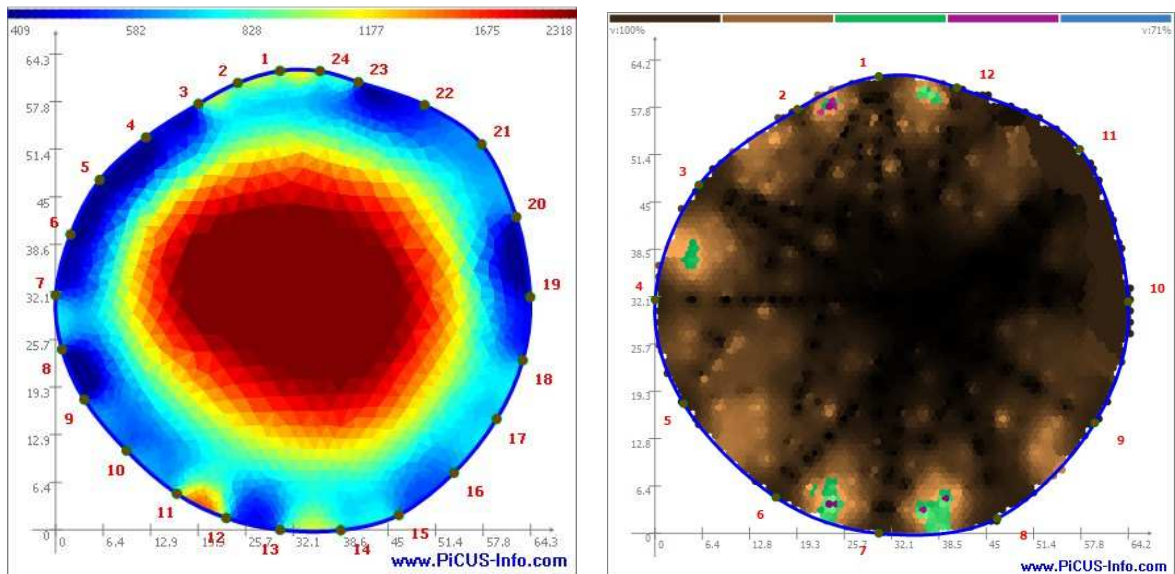
Tomogramy se u druhého měřeného stromu během roku opět příliš nemění. Stejně jako u prvního stromu se tomogram ze sedmého měření (obr. 30, datum měření: 3. 9. 2014) liší od ostatních měření. Tato odlišnost naznačuje, stejně jako u prvního měřeného stromu, že báze stromu obsahovala v den měření vyšší obsah vody. Výstup měření z odporového tomografu (obr. 34) nevykazuje zvýšenou vlhkost uvnitř stromu. V porovnání s tomogramem ze sonického tomografu (obr. 35) lze říci, že tento zkoumaný strom nejeví známky vnitřního poškození.

4.1.3 Strom č. 3 – borovice

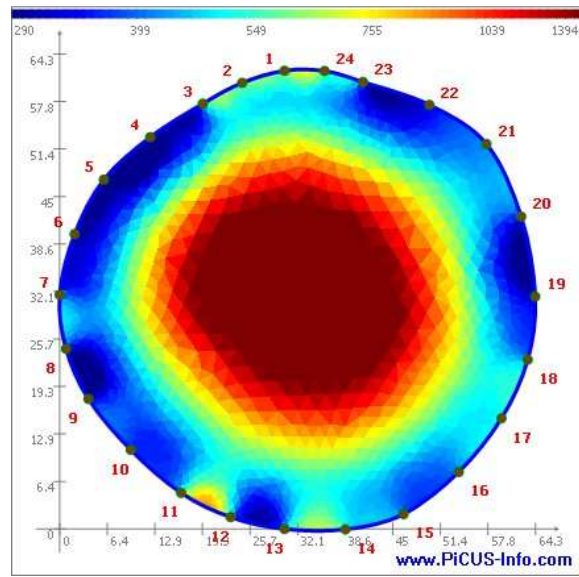


Obr. 36, 37 – Strom č. 3 – borovice, zdroj: Martin Baláš, 2015.

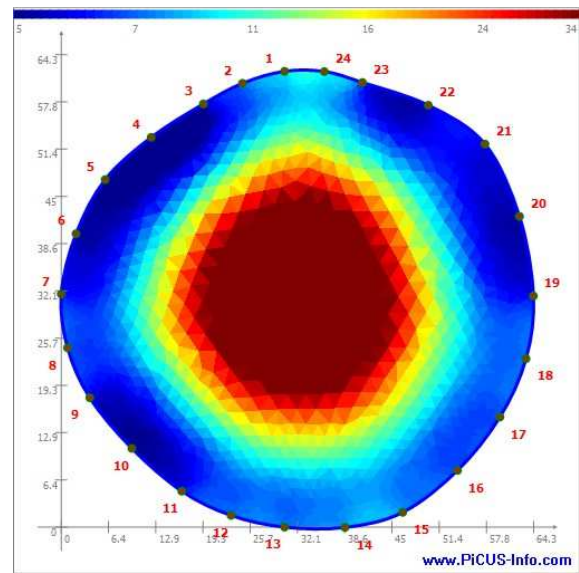
Na stromě č. 3 (obr. 36, 37) nebyla nalezena žádná vnější poškození. Na obrázcích č. 38–50 jsou výstupy měření tohoto stromu. Pro srovnání jsou vedle výstupů měření z odporového tomografu také výstupy ze sonického tomografu.



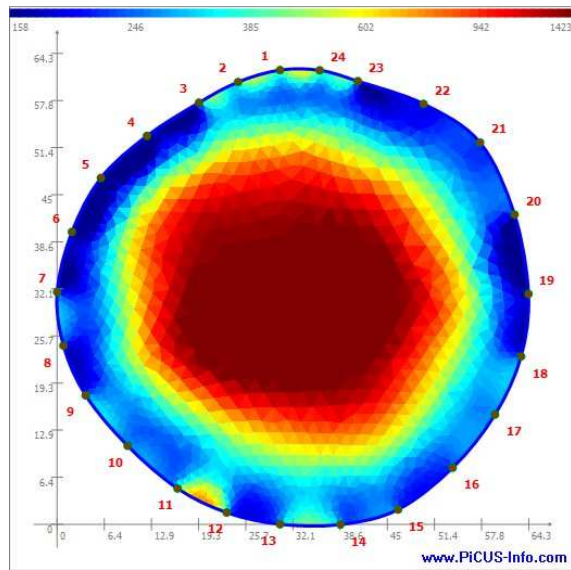
Obr. 38 (vlevo), 39 (vpravo) – Strom č. 3 – borovice, termín měření: 23. 1. 2014. Vlevo výstup z odporového tomografu, vpravo srovnávací výstup ze sonického tomografu.



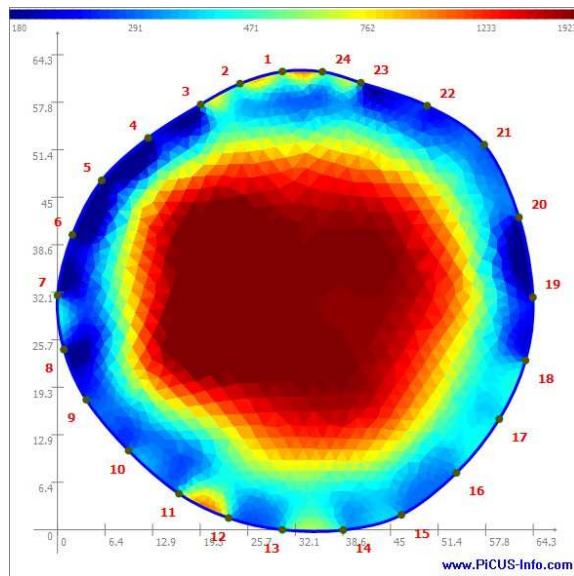
Obr. 40 – Strom č. 3 – borovice, termín měření: 7. 3. 2014.



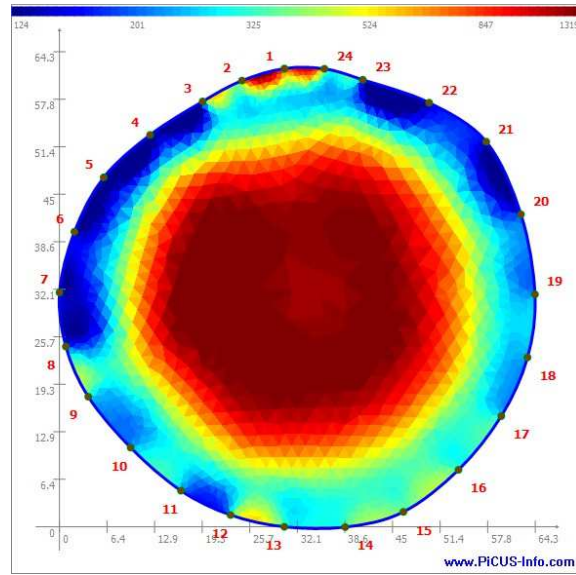
Obr. 41 – Strom č. 3 – borovice, termín měření: 17. 4. 2014.



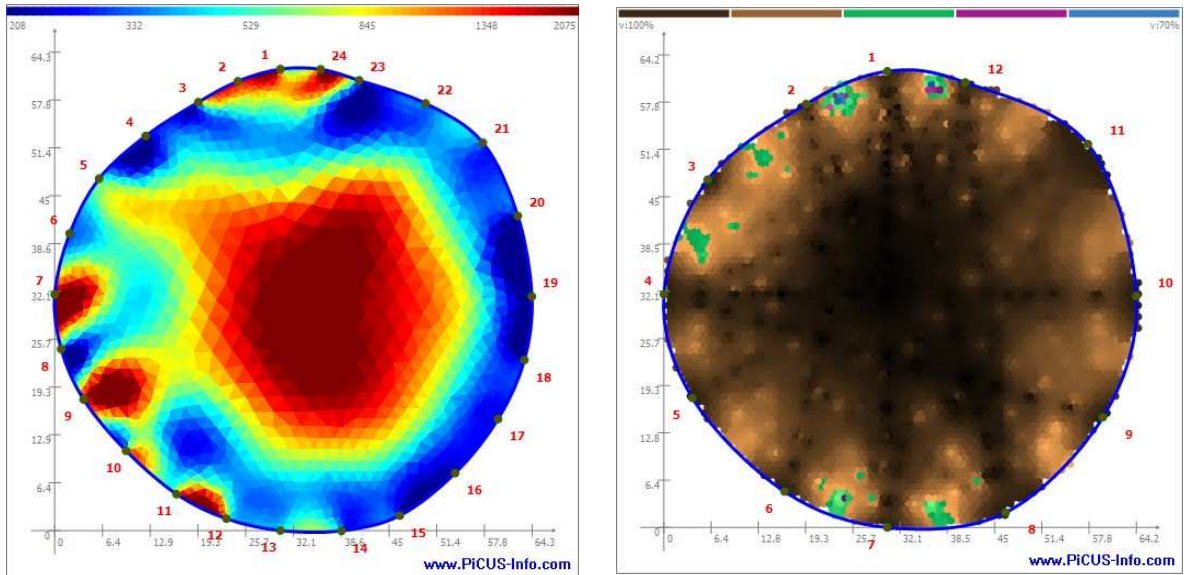
Obr. 42 – Strom č. 3 – borovice, termín měření: 27. 5. 2014.



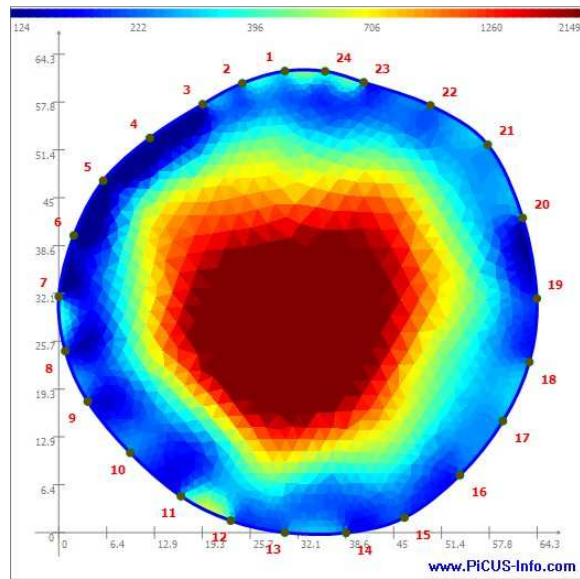
Obr. 43 – Strom č. 3 – borovice, termín měření: 27. 6. 2014.



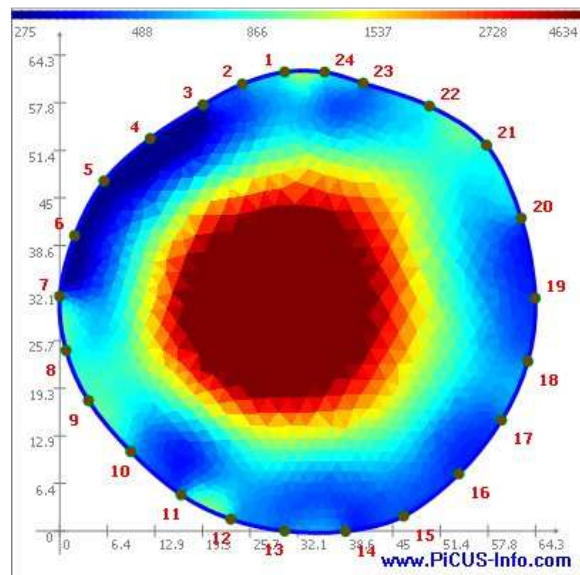
Obr. 44 – Strom č. 3 – borovice, termín měření: 21. 7. 2014.



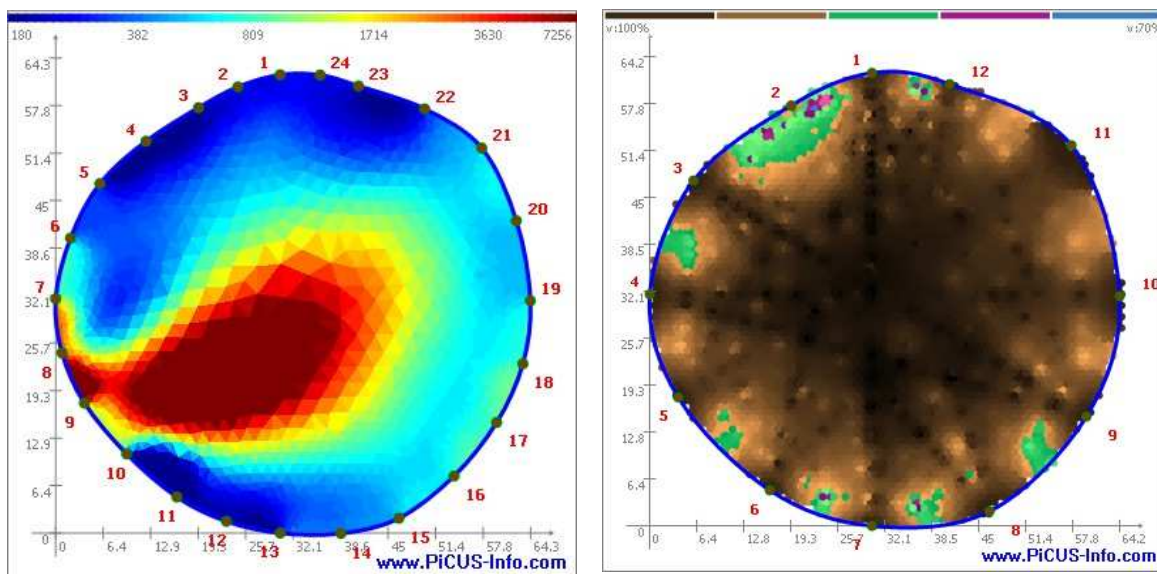
Obr. 45 (vlevo), 46 (vpravo) – Strom č. 3 – borovice, termín měření: 3. 9. 2014. Vlevo výstup z odporového tomografu, vpravo srovnávací výstup ze sonického tomografu.



Obr. 47 – Strom č. 3 – borovice, termín měření: 8. 10. 2014.



Obr. 48 – Strom č. 3 – borovice, termín měření: 15. 1. 2015.



Obr. 49 (vlevo), 50 (vpravo) – Strom č. 3 – borovice, termín měření: 27. 10. 2015. Vlevo výstup z odporového tomografu, vpravo srovnávací výstup ze sonického tomografu.

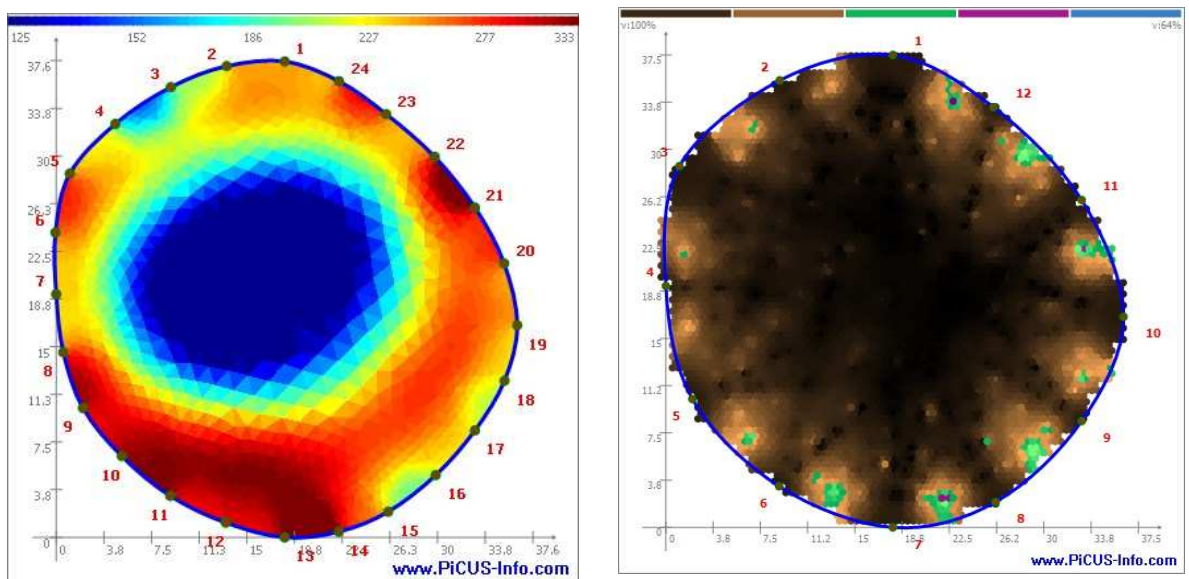
Z pořízených tomogramů pomocí odporového tomografu je patrné podobné rozložení elektrického odporu jako u dvou předešlých měřených borovic. Tomogramy se v závislosti na roční době liší jen minimálně. Při sedmém (obr. 45) a desátém (obr. 49) měření vykazují tomogramy jiné úrovně vlhkostí v okolí jádra kmene stromu. V případě sedmého měření je to nejspíše způsobeno, jako u prvního a druhého měřeného stromu, zvýšenými atmosférickými srážkami před a v době měření. Abnormalitu, která se projevila při desátém měření ze dne 27. 10. 2015, je možné přisuzovat vyšší vlhkosti na jedné straně povrchu kmene měřeného stromu. Tomogram ze sonického tomografu (obr. 50) může potvrdit, že na stromě nebyly zjištěny žádné známky začínající hniloby.

4.1.4 Strom č. 4 – buk

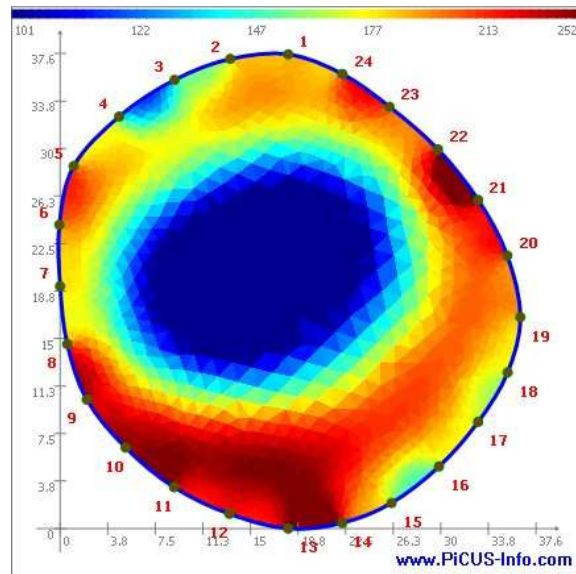


Obr. 51, 52 – Strom č. 4 – buk, zdroj: Martin Baláš, 2015.

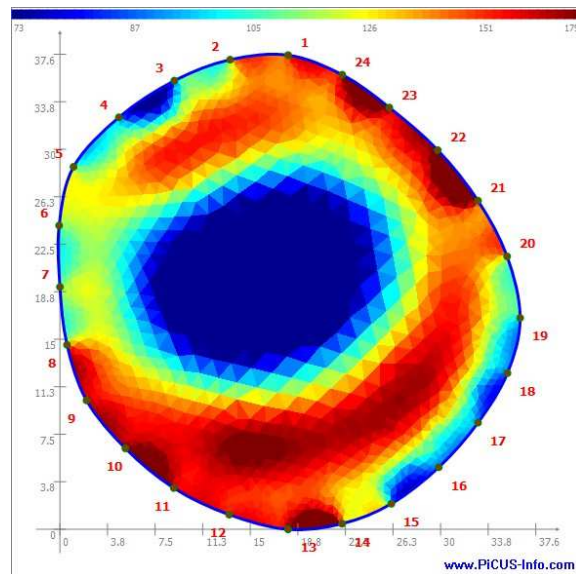
Na stromě č. 4 (obr. 51, 52) nebyla nalezena žádná vnější poškození. Na obrázcích č. 53–64 jsou výsledné tomogramy. Pro srovnání jsou vedle výstupů měření z odporového tomografu také výstupy ze sonického tomografu.



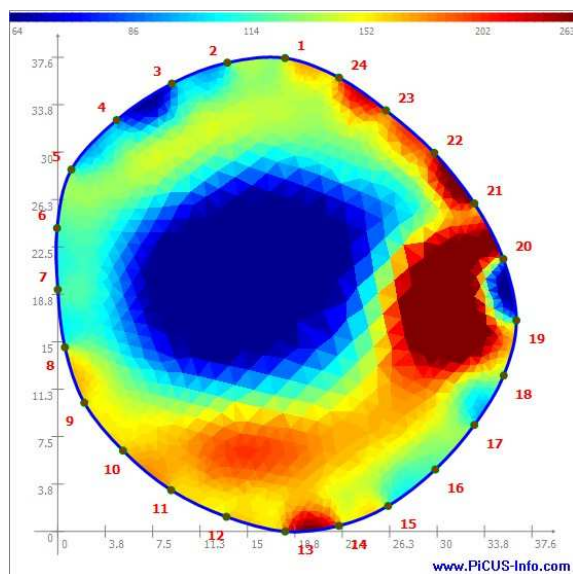
Obr. 53 (vlevo), 54 (vpravo) – Strom č. 4 – buk, termín měření: 15. 2. 2014. Vlevo výstup z odporového tomografu, vpravo srovnávací výstup ze sonického tomografu.



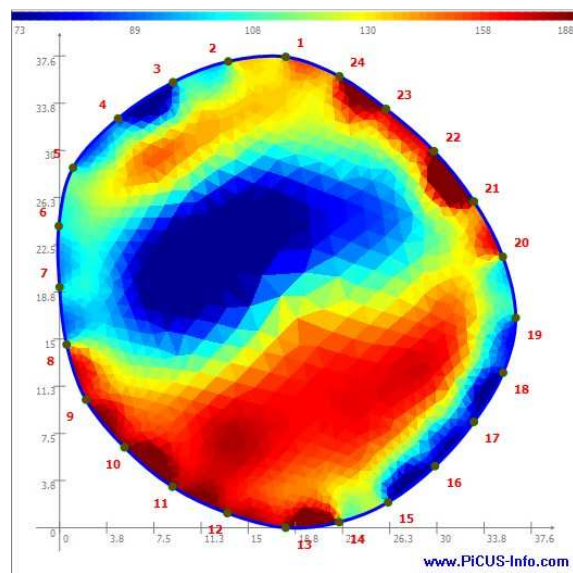
Obr. 55 – Strom č. 4 – buk, termín měření: 13. 3. 2014.



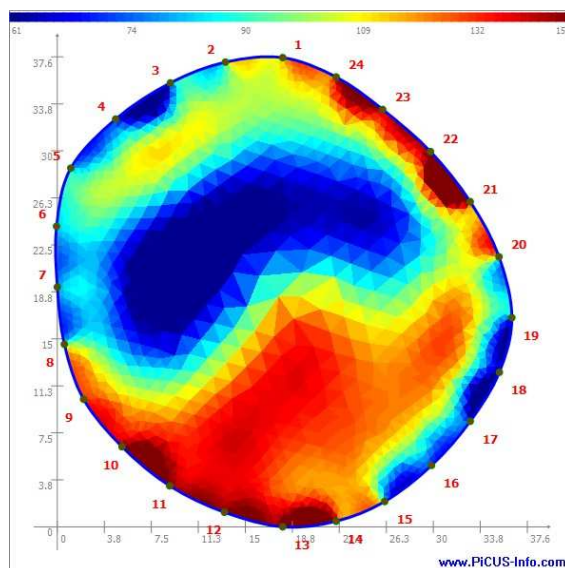
Obr. 56 – Strom č. 4 – buk, termín měření: 17. 4. 2014.



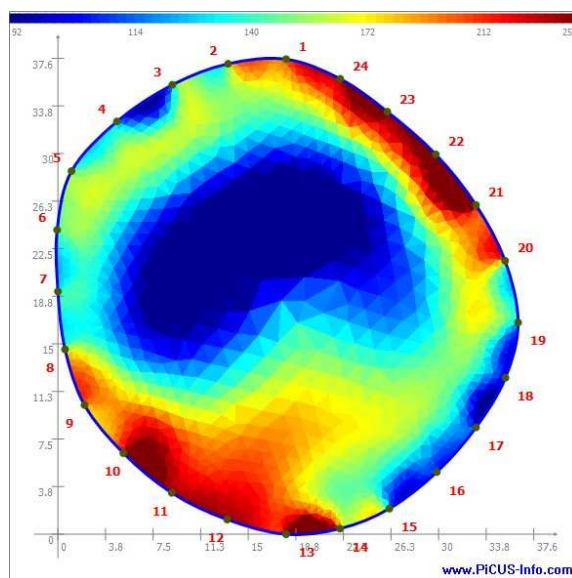
Obr. 57 – Strom č. 4 – buk, termín měření: 27. 5. 2014.



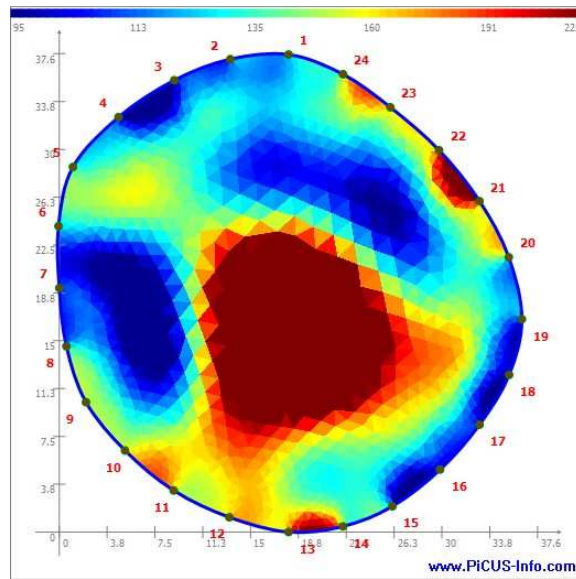
Obr. 58 – Strom č. 4 – buk, termín měření: 27. 6. 2014.



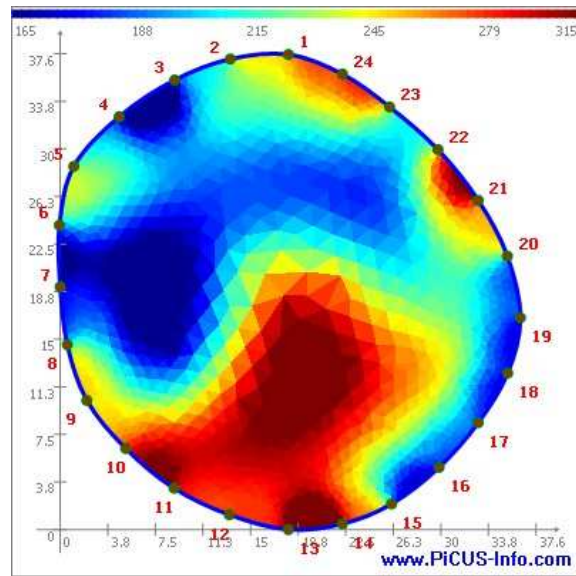
Obr. 59 – Strom č. 4 – buk, termín měření: 21. 7. 2014.



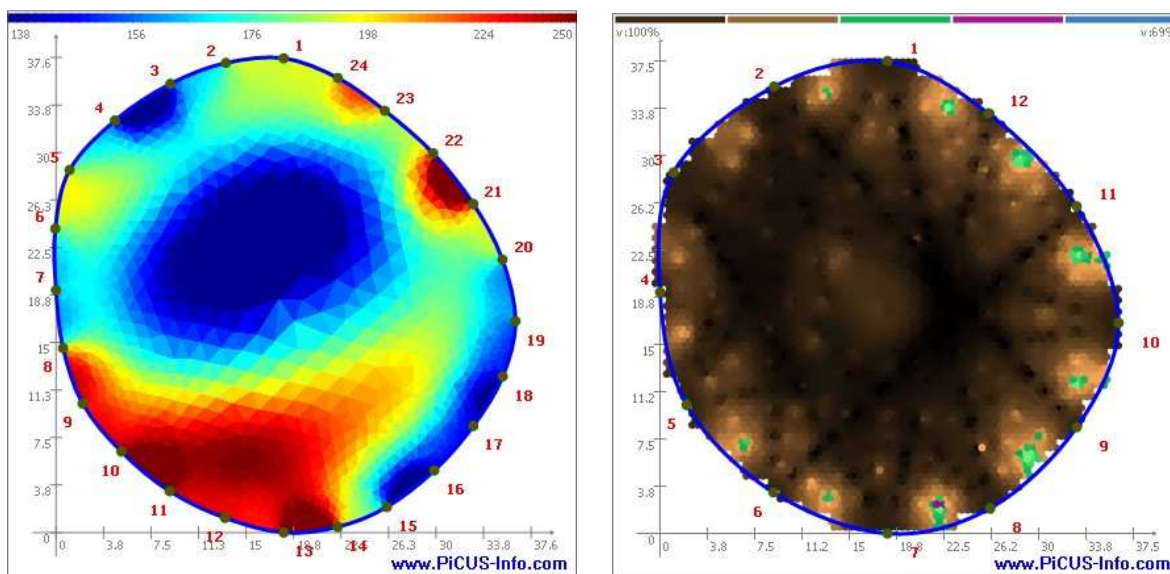
Obr. 60 – Strom č. 4 – buk, termín měření: 3. 9. 2014.



Obr. 61 – Strom č. 4 – buk, termín měření: 8. 10. 2014.



Obr. 62 – Strom č. 4 – buk, termín měření: 15. 1. 2015.



Obr. 63 (vlevo), 64 (vpravo) – Strom č. 4 – buk, termín měření: 27. 10. 2015. Vlevo výstup z odporového tomografu, vpravo srovnávací výstup ze sonického tomografu.

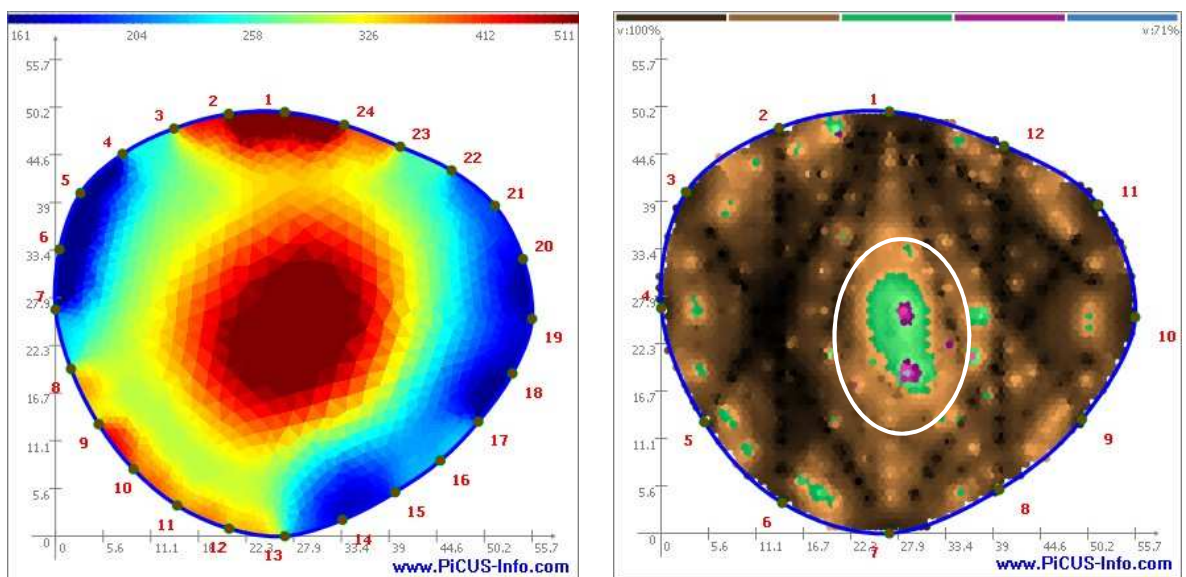
Jak je popsáno v kapitole 3.4 *Čtení tomogramu*, tomogramy jehličnatých a listnatých dřevin se diametrálně liší. Buk č. 4 nevykazoval podle prvního měření ze dne 15. 2. 2014 z odporového a sonického tomografu (obr. 53 a 54) žádné známky vnitřního poškození. Na obr. 57 kolem měřicího bodu č. 20 je patrná menší oblast obloukovitého tvaru s vyšším odporem. Zřejmě se jedná o chybu měření, kdy pravděpodobně vlivem špatně upevněné svorky byl zaznamenán vyšší přechodový odpor. Chybou měření je pravděpodobně také situace zachycená na obr. 61, kde je zřejmá ohraničená oblast s vysokým odporem ve středu kmene. Na výstupech z červenového a červencového měření (obr. 58 a 59) jsou patrné zvětšené oblasti s vyšším odporem, které se v dalších měřeních již neprojevují. Je to zřejmě dáno periodickým vysycháním a vlhnutím kmene v závislosti na ročním období. Asymetrický tvar (nekopírující letokruhy) oblastí s různou vodivostí dle zkušeností zpravidla naznačuje defekt ve dřevě kmene, čemuž nasvědčuje také nevýrazná oblast snížené rychlosti zvuku ve středu kmene na srovnávacím snímku ze sonického tomografu (obr. 64). V tomto případě je však velmi obtížné usuzovat na konkrétní druh poškození dřeva, může se jednat o odumřelé (ale tvrdé dřevo), případně o tzv. nepravé jádro. Lze však usuzovat, že poškození (pokud existuje) je pouze v počáteční fázi a zatím se nepředpokládá jeho výraznější vliv na stabilitu stromu.

4.1.5 Strom č. 5 – buk

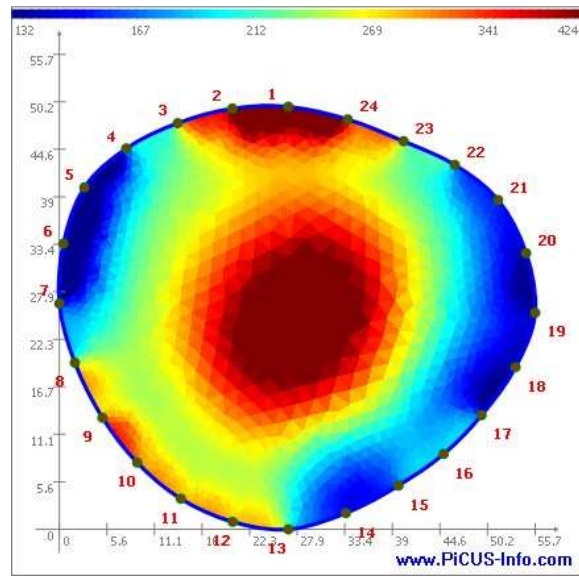


Obr. 65, 66 – Strom č. 5 – buk, zdroj: Martin Baláš, 2015.

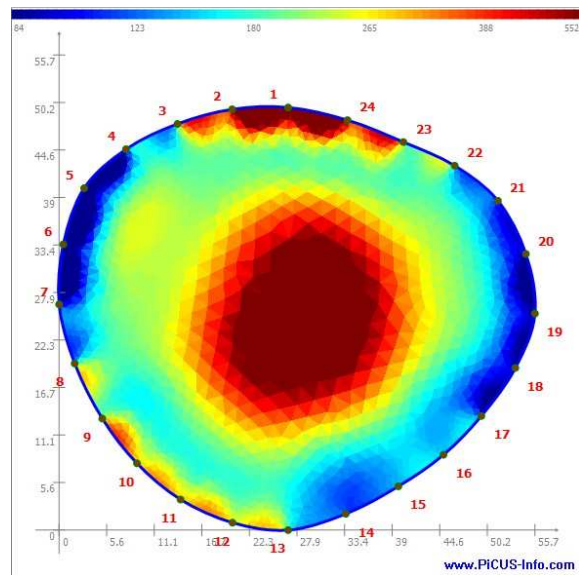
Na stromě č. 5 (obr. 65, 66) byl nalezen zárost a mírná prohlubeň. Na obrázcích č. 67-78 jsou výsledné tomogramy z měřeného stromu. Pro srovnání jsou vedle výstupů měření z odporového tomografu také výstupy ze sonického tomografu.



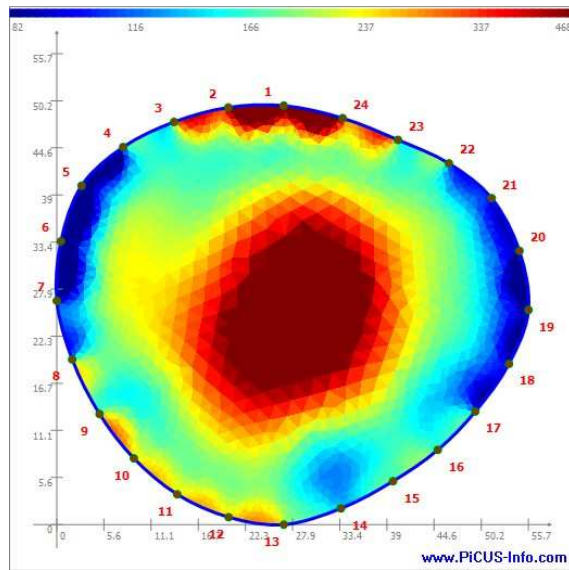
Obr. 67 (vlevo), 68 (vpravo) – Strom č. 5 – buk, termín měření: 14. 2. 2014. Vlevo výstup z odporového tomografu, vpravo srovnávací výstup ze sonického tomografu.



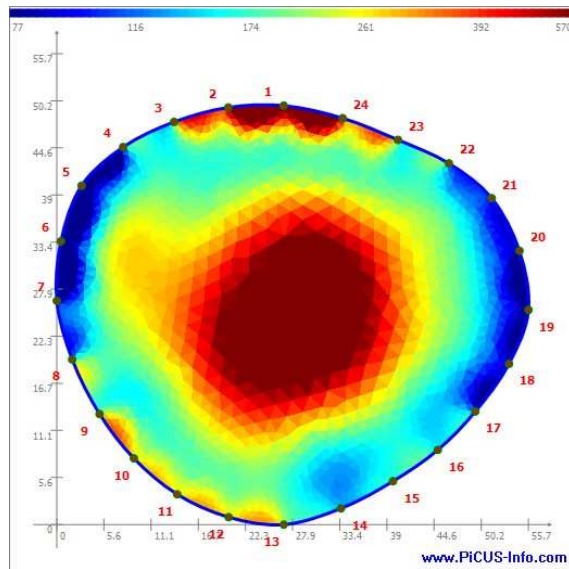
Obr. 69 – Strom č. 5 – buk, termín měření: 13. 3. 2014.



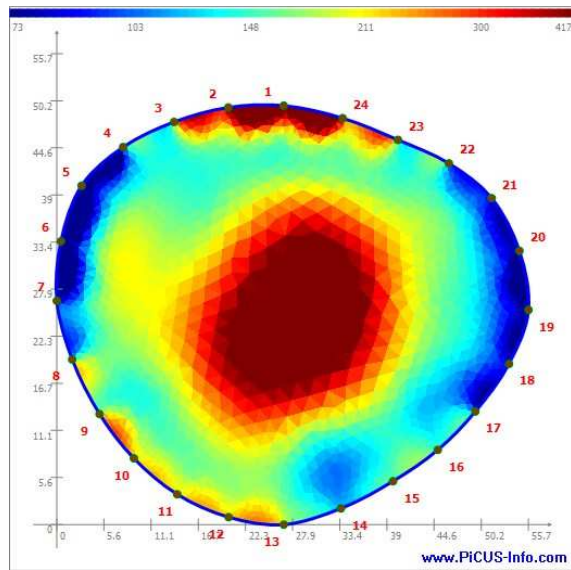
Obr. 70 – Strom č. 5 – buk, termín měření: 17. 4. 2014.



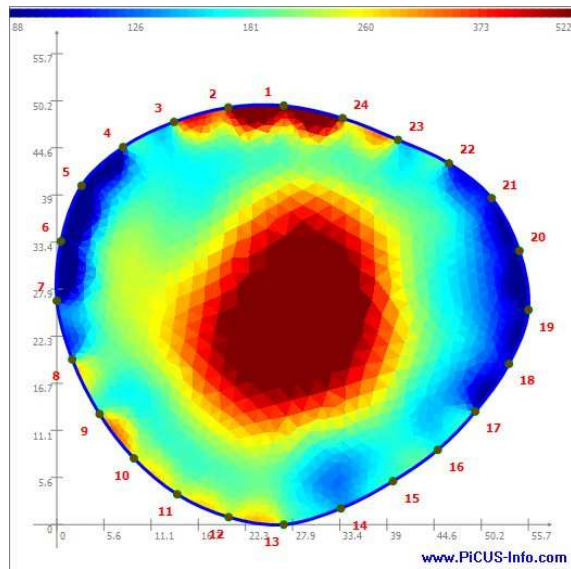
Obr. 71 – Strom č. 5 – buk, termín měření: 27. 5. 2014.



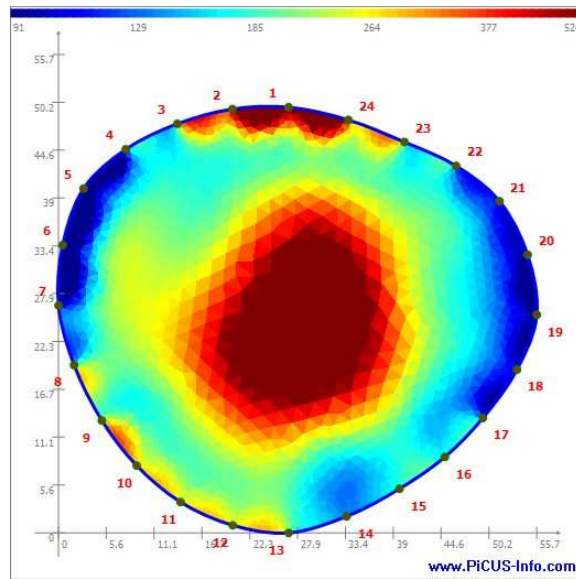
Obr. 72 – Strom č. 5 – buk, termín měření: 27. 6. 2014.



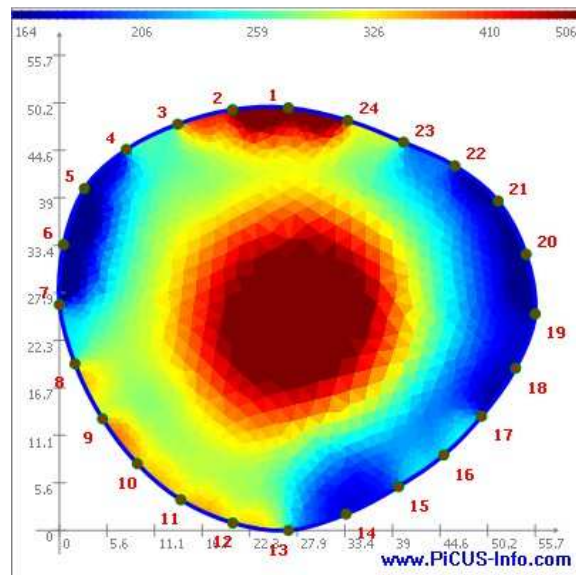
Obr. 73 – Strom č. 5 – buk, termín měření: 21. 7. 2014.



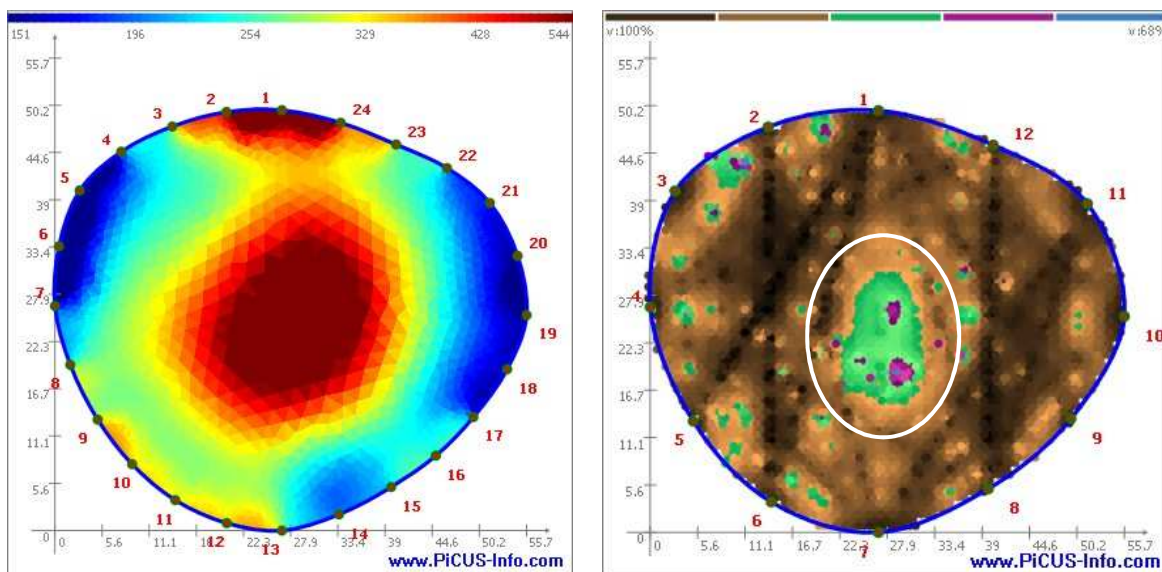
Obr. 74 – Strom č. 5 – buk, termín měření: 3. 9. 2014.



Obr. 75 – Strom č. 5 – buk, termín měření: 8. 10. 2014.



Obr. 76 – Strom č. 5 – buk, termín měření: 15. 1. 2015.



Obr. 77 (vlevo), 78 (vpravo) – Strom č. 5 – buk, termín měření: 27. 10. 2015. Vlevo výstup z odporového tomografu, vpravo srovnávací výstup ze sonického tomografu.

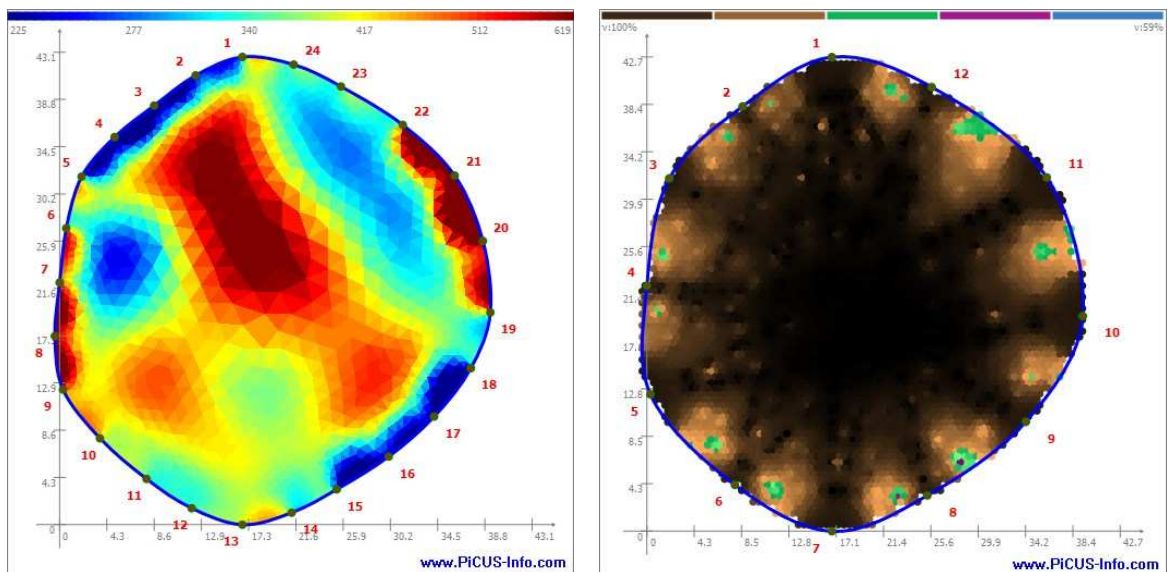
U stromu č. 5 bylo již při prvním měření dne 14. 2. 2014 nalezeno jisté vnitřní poškození. Na celé sérii snímků pořízených odporovým tomografem (obr. 67) je patrný vyšší elektrický odpor ve střední části kmene. Rozložení odporu v kmeni je podobné jako u zdravého jehličnanu (např. borovice). V případě buku však centrální část kmene s vyšším odporem však není typická a může znamenat přítomnost suchého (odumřelého) dřeva či suché hniloby. Pouze ze snímku z odporového tomografu by však nebylo možné usuzovat na přítomnost hniloby. Teprve porovnání s výstupem ze sonického tomogramu, jak je znázorněno na obrázku č. 68, ukazuje na pravděpodobný defekt menšího až středního rozsahu ve střední části kmene. Tomogramy z odporového tomografu se během období měření příliš nemění a nevykazují žádné abnormality. Poslední měření ze dne 27. 10. 2015 potvrzuje naměřené abnormality z prvního měření, které jsou opět patrné jen na výstupu ze sonického tomografu na obrázku č. 78. Lze tedy říci, že sledovaný strom č. 5 je s největší pravděpodobností napaden hnilobou.

4.1.6 Strom č. 6 – buk

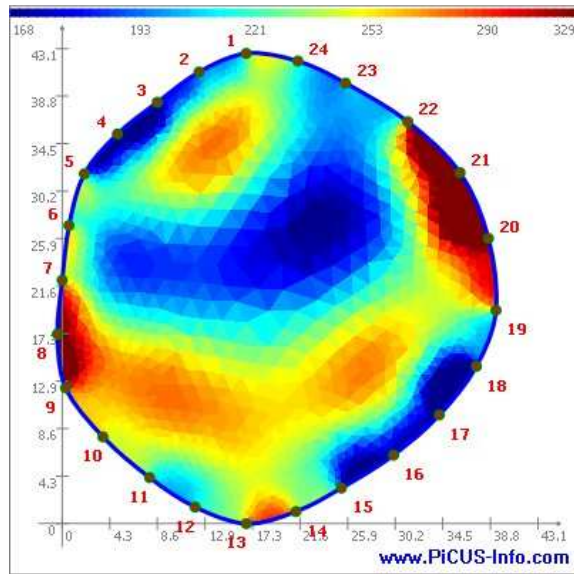


Obr. 79, 80 – Strom č. 5 – buk, zdroj: Martin Baláš, 2015.

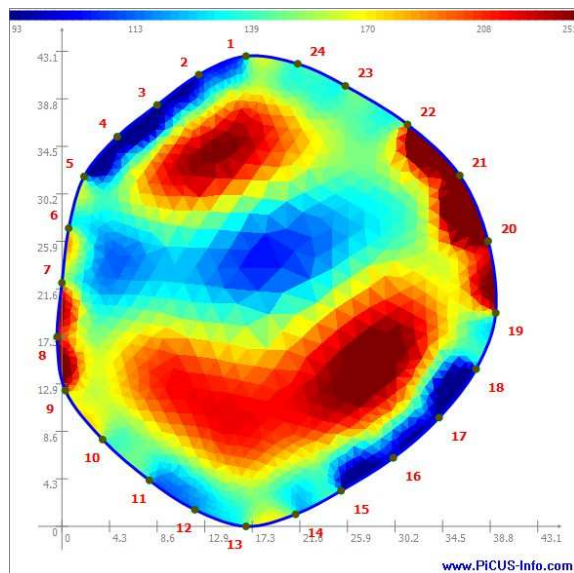
Na stromě nebyla nalezena žádná vnější poškození. Na obrázcích č. 81–92 jsou výsledné tomogramy z měřeného stromu č. 6 (obr. 79, 80). Pro srovnání jsou vedle výstupů měření z odporového tomografu také výstupy ze sonického tomografu.



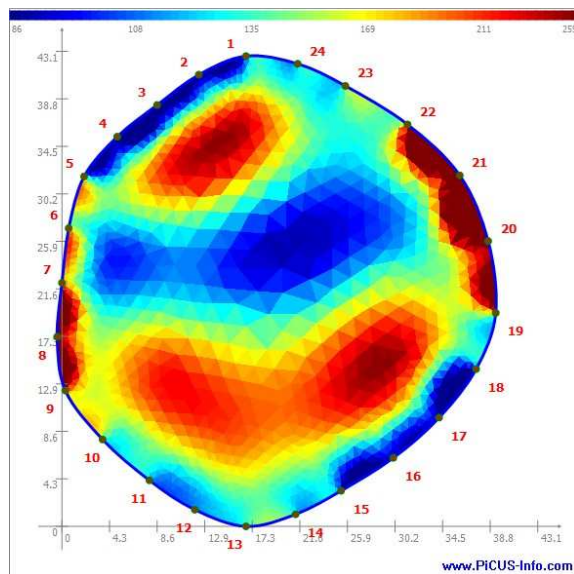
Obr. 81 (vlevo), 82 (vpravo) – Strom č. 6 – buk, termín měření: 7. 2. 2014. Vlevo výstup z odporového tomografu, vpravo srovnávací výstup ze sonického tomografu.



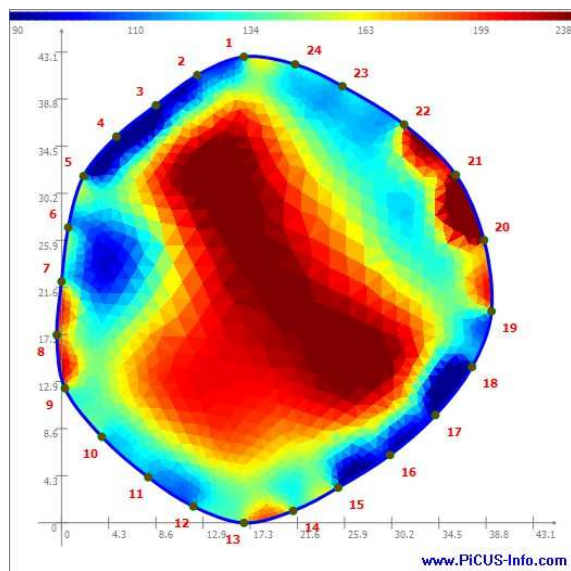
Obr. 83 – Strom č. 6 – buk, termín měření: 7. 3. 2014.



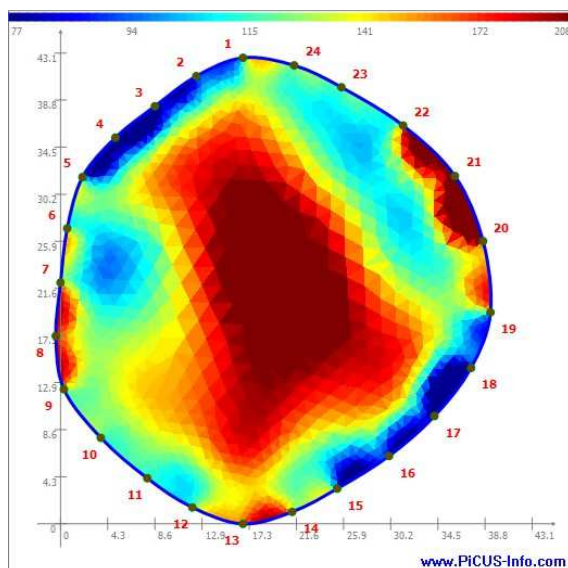
Obr. 84 – Strom č. 6 – buk, termín měření: 17. 4. 2014.



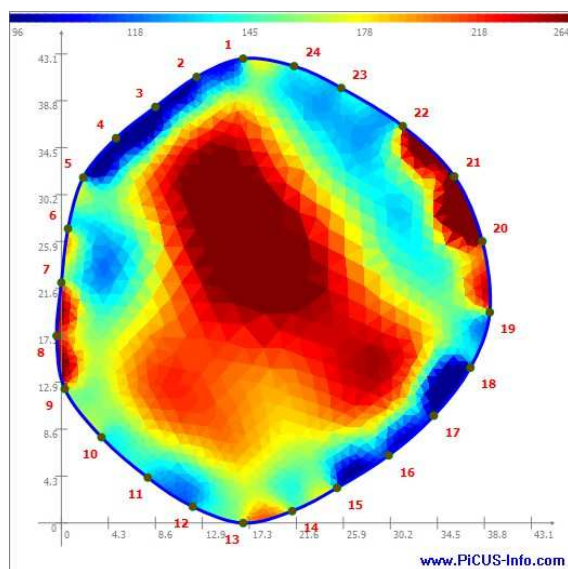
Obr. 85 – Strom č. 6 – buk, termín měření: 27. 5. 2014.



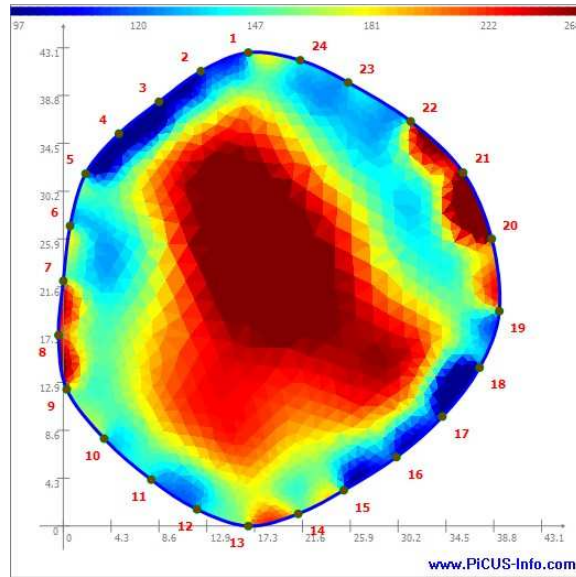
Obr. 86 – Strom č. 6 – buk, termín měření: 27. 6. 2014.



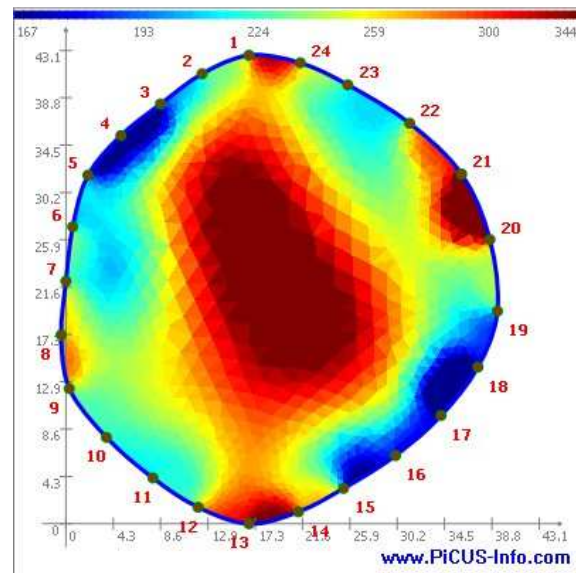
Obr. 87 – Strom č. 6 – buk, termín měření: 21. 7. 2014.



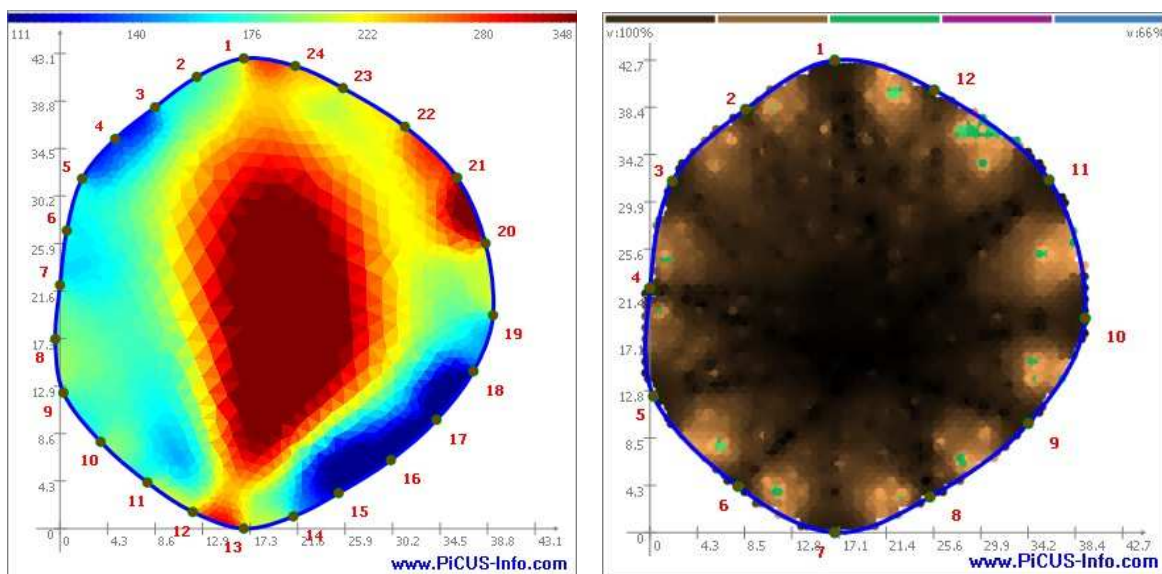
Obr. 88 – Strom č. 6 – buk, termín měření: 3. 9. 2014.



Obr. 89 – Strom č. 6 – buk, termín měření: 8. 10. 2014.



Obr. 90 – Strom č. 6 – buk, termín měření: 15. 1. 2015.



Obr. 91 (vlevo), 92 (vpravo) – Strom č. 6 – buk, termín měření: 27. 10. 2015. Vlevo výstup z odporového tomografu, vpravo srovnávací výstup ze sonického tomografu.

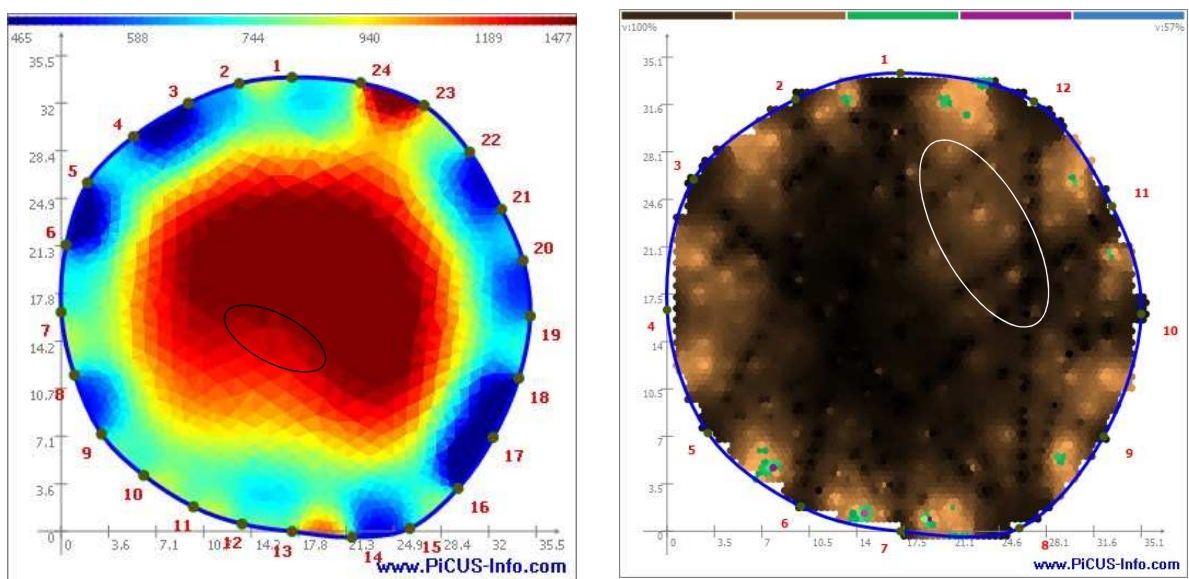
Výstupy z měření z odporového tomografu u stromu č. 6 byly ze začátku měření variabilní. Za pozornost stojí jednak nesymetrický tvar oblastí s různou vodivostí a jednak dosti výrazné změny v rozložení elektrického odporu mezi jednotlivými měřeními. Zatímco důvodem změn v rozložení odporu bylo nejspíše kolísání vlhkosti uvnitř sledovaného stromu, nesymetrický tvar dle zkušeností s interpretací snímků je zpravidla spojen s defektem, např. v podobě hniloby. Srovnávací měření sonickým tomografem neukázalo výskyt dřeva s výrazněji sníženou rychlostí zvuku, tzn. přítomnost měkkého, hnilobou napadeného dřeva není pravděpodobná. Příčinou anomálií zobrazených na odporových tomogramech by mohl být výskyt odumřelého, ale tvrdého dřeva (bez hniloby), které mění vlhkost v závislosti na aktuální nasycenosti stromu vodou.

4.1.7 Strom č. 7 – dub

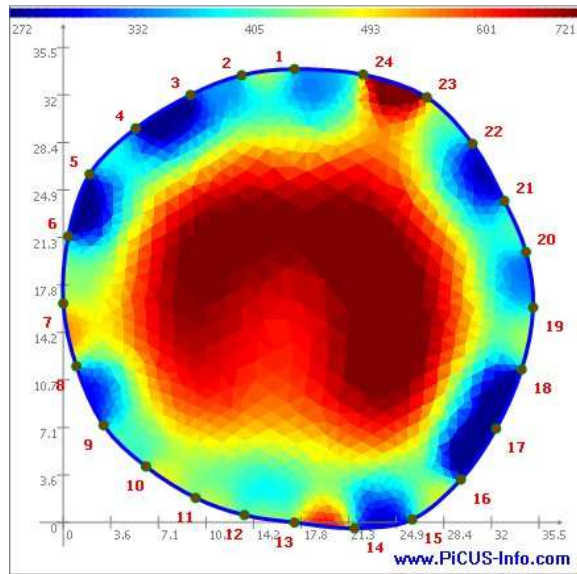


Obr. 93, 94 – Strom č. 6 – buk, zdroj: Martin Baláš, 2015.

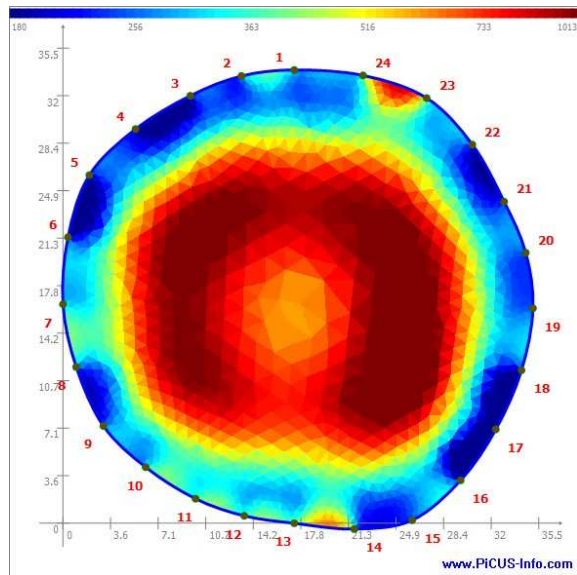
Na stromě č. 7 (obr. 93, 94) nebyla nalezena žádná vnější poškození. Na obrázcích č. 95–107 jsou výsledné tomogramy. Pro srovnání jsou vedle výstupů měření z odporového tomografu také výstupy ze sonického tomografu.



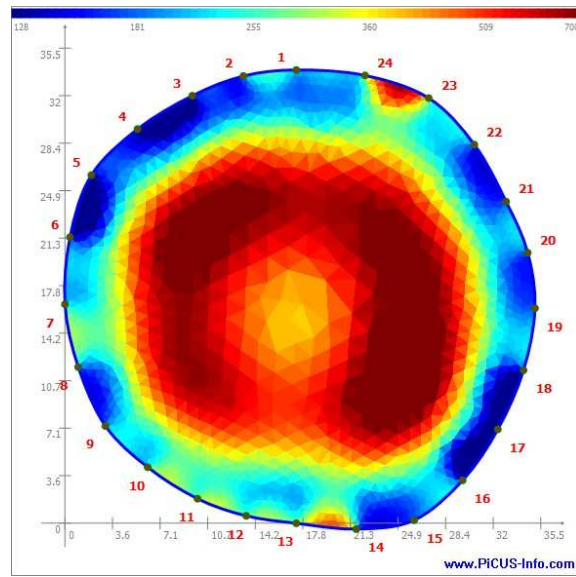
Obr. 95 (vlevo), 96 (vpravo) – Strom č. 7 – dub, termín měření: 7. 2. 2014. Vlevo výstup z odporového tomografu, vpravo srovnávací výstup ze sonického tomografu.



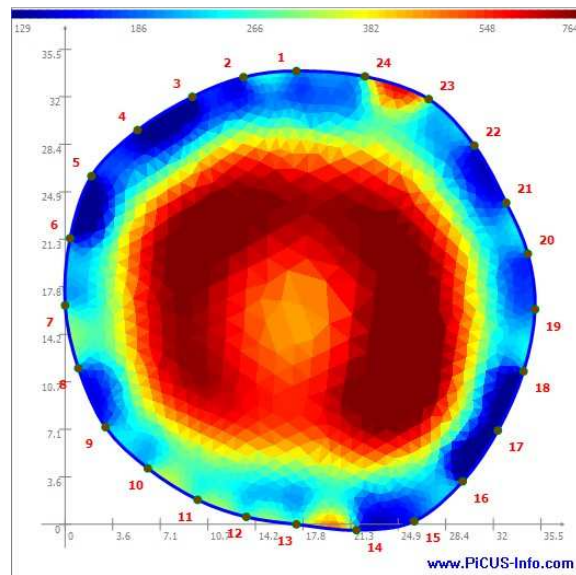
Obr. 97 – Strom č. 7 – dub, termín měření: 12. 3. 2014.



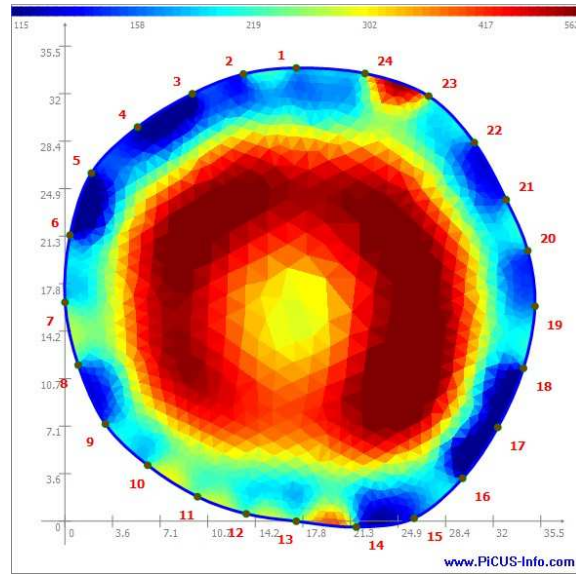
Obr. 98 – Strom č. 7 – dub, termín měření: 17. 4. 2014.



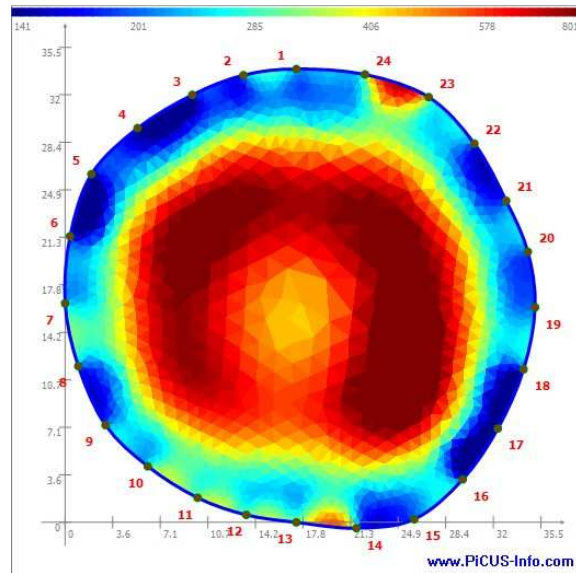
Obr. 99 – Strom č. 7 – dub, termín měření: 27. 5. 2014.



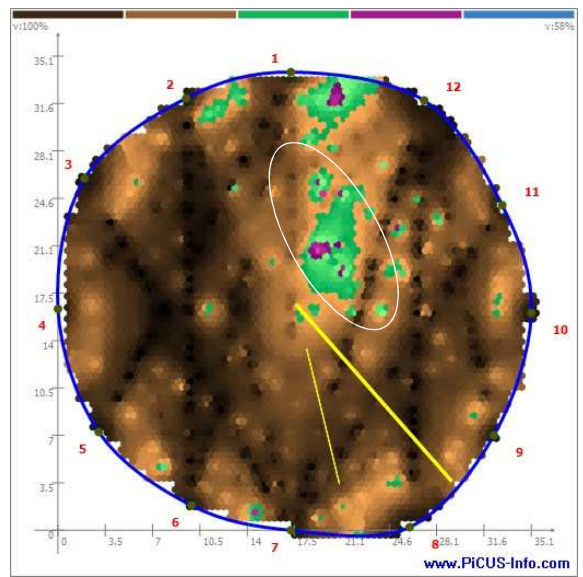
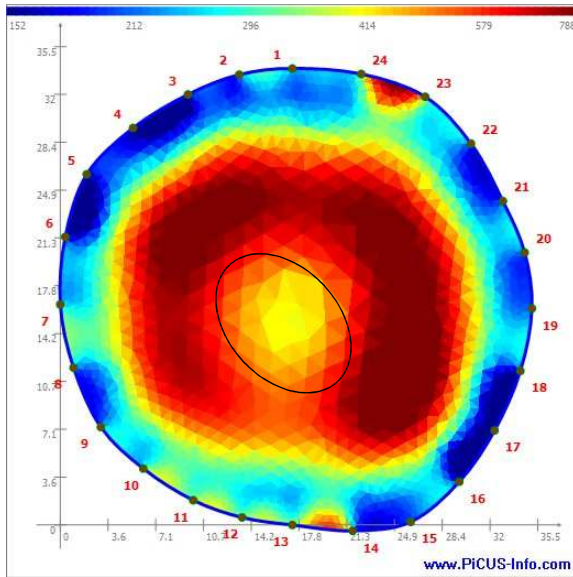
Obr. 100 – Strom č. 7 – dub, termín měření: 27. 6. 2014.



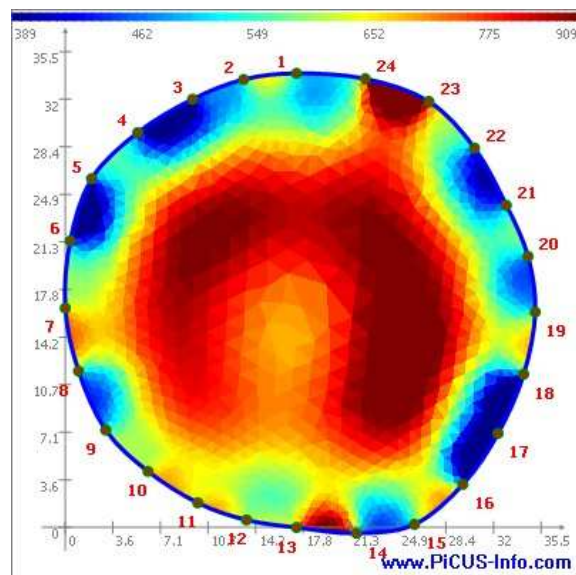
Obr. 101 – Strom č. 7 – dub, termín měření: 21. 7. 2014.



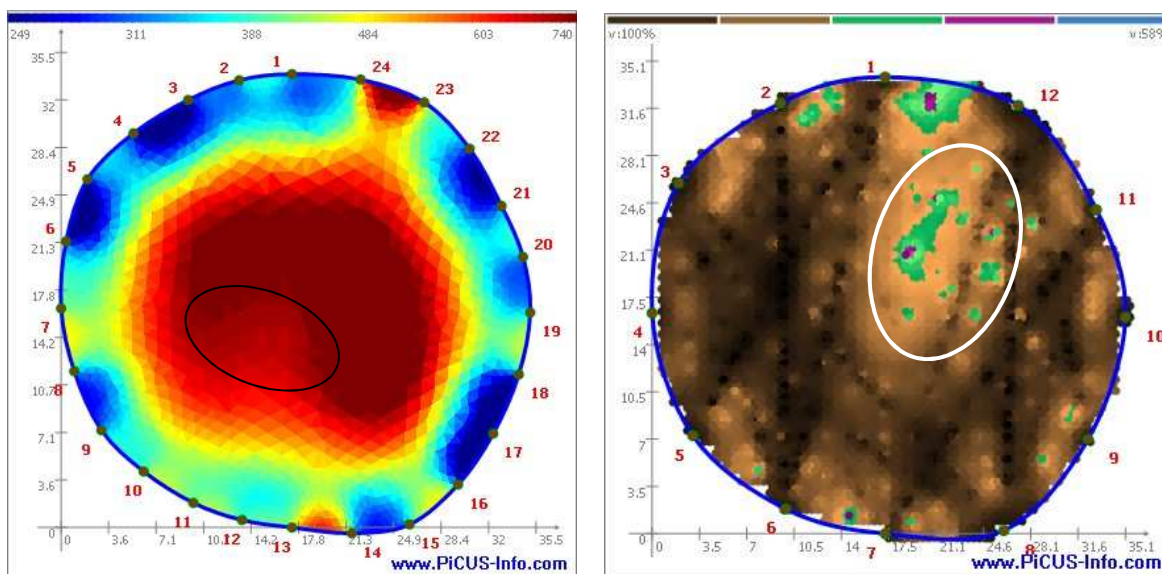
Obr. 102 – Strom č. 7 – dub, termín měření: 3. 9. 2014.



Obr. 103 (vlevo), 104 (vpravo) – Strom č. 7 – dub, termín měření: 8. 10. 2014. Vlevo výstup z odporového tomografu, vpravo srovnávací výstup ze sonického tomografu.



Obr. 105 – Strom č. 7 – dub, termín měření: 15. 1. 2015.



Obr. 106 (vlevo), 107 (vpravo) – Strom č. 7 – dub, termín měření: 27. 10. 2015. Vlevo výstup z odporového tomografu, vpravo srovnávací výstup ze sonického tomografu.

Počáteční měření neodhaluje zjevné zásadní anomálie v kmeni, i když lze pozorovat jisté náznaky, jak je označeno v obrázcích č. 89 a 90. U odporového tomogramu (obr. 89) se jedná o nesymetrickou vnitřní oblast se zvýšeným odporem a u srovnávacího sonického tomogramu (obr. 90) o nevýraznou oblast se sníženou rychlostí zvuku.

S postupujícím časem lze u odporových tomogramů pozorovat pozvolné zvětšování nepravidelnosti v rozložení elektrického odporu. Postupně se zvětšuje vnitřní oblast se sníženým odporem, tj. pravděpodobně s vyšší vlhkostí. Tento výsledek by sám o sobě ještě nemusel znamenat výskyt hniloby. Teprve po porovnání odporového tomogramu se sonickým tomogramem lze usuzovat na přítomnost defektní zóny s pravděpodobným výskytem hniloby, která se během sledovaného období pravděpodobně zvětšuje. Anomální oblasti na odporovém a sonickém tomogramu jsou situovány v jiných částech průřezu kmene, což lze označit za běžný jev, protože oba typy tomografu měří odlišné fyzikální veličiny, které ve skutečnosti mohou být v hnilobou napadeném kmeni takto rozloženy. Oblast se sníženým elektrickým odporem může indikovat hnilobu v počátečním stadiu, naproti tomu sonický tomogram znázorní až měkkou, pokročilejší hnilobu, která zároveň nemusí mít odlišný odpor v porovnání se zdravým dřevem (Göcke 2010).

Na snímku ze sonického tomografu (obr. 104) jsou dokonce naznačeny praskliny (žluté čáry), jejichž poloha odpovídá skutečné trhlině, vzniklé pravděpodobně

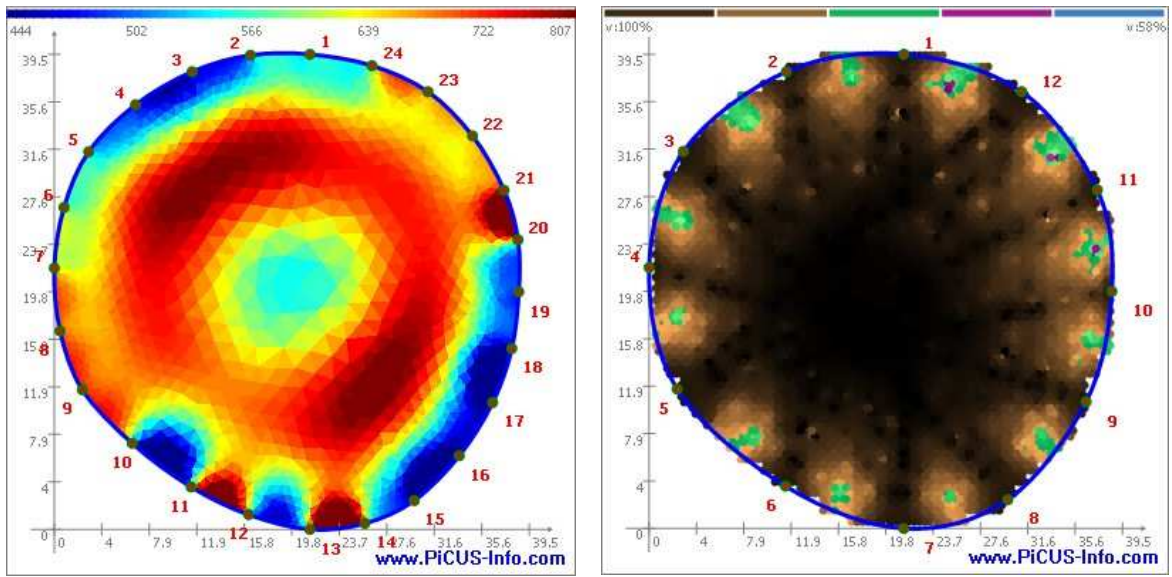
působením mrazu. Tímto případem lze demonstrovat, že je žádoucí při měření používat obě tomografické metody (odporovou i sonickou) a oba tomogramy vyhodnocovat a interpretovat zároveň ve vzájemné konfrontaci.

4.1.8 Strom č. 8 – dub

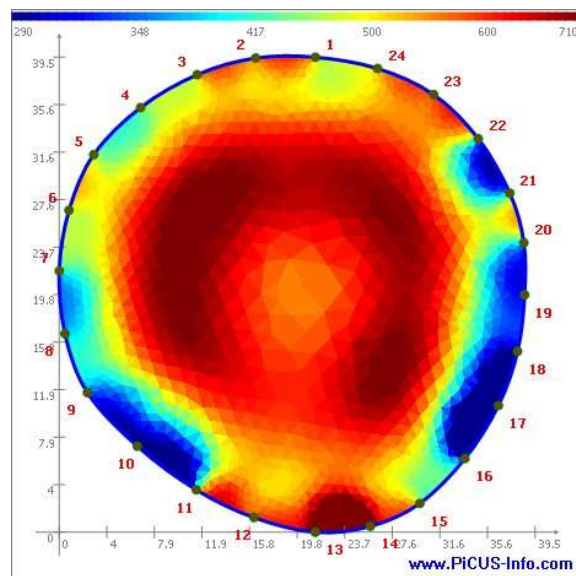


Obr. 108, 109 – Strom č. 8 – dub, zdroj: Martin Baláš, 2015.

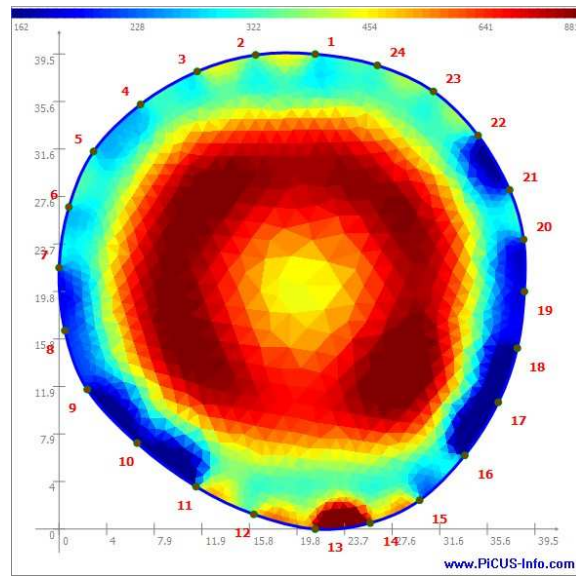
Na stromě č. 8 (obr. 108, 109) nebyla nalezena žádná vnější poškození. Na obrázcích č. 110-121 jsou výsledné tomogramy. Pro srovnání jsou vedle výstupů měření z odporového tomografu také výstupy ze sonického tomografu.



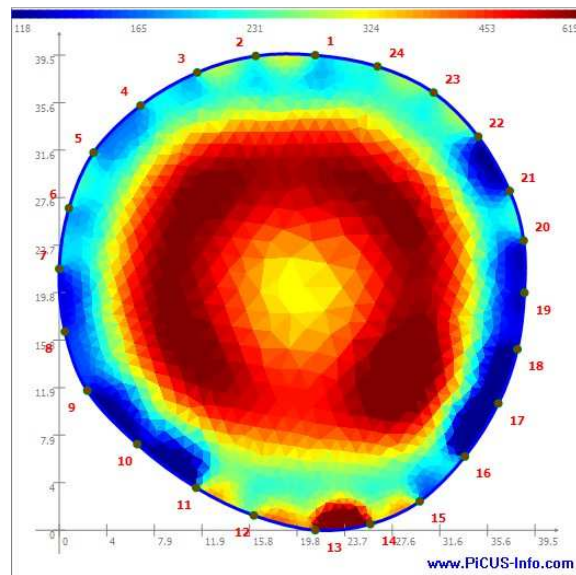
Obr. 110 (vlevo), 111 (vpravo) – Strom č. 8 – dub, termín měření: 14. 2. 2014. Vlevo výstup z odporového tomografu, vpravo srovnávací výstup ze sonického tomografu.



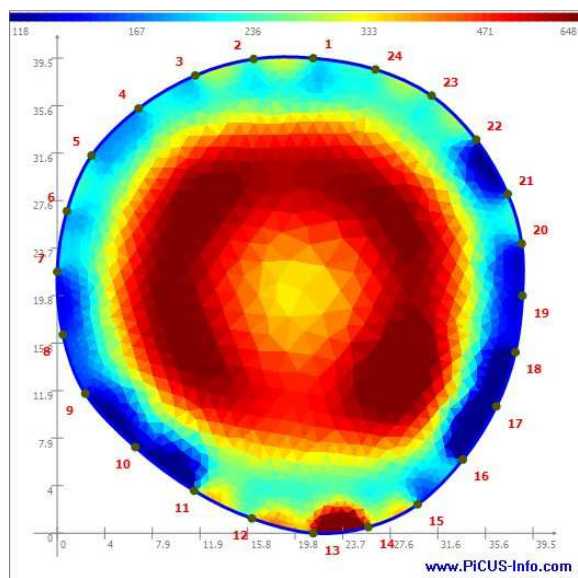
Obr. 112 – Strom č. 8 – dub, termín měření: 13. 3. 2014.



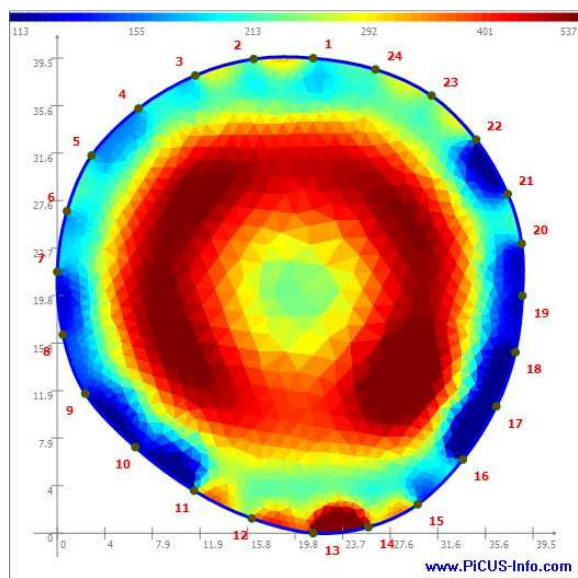
Obr. 113 – Strom č. 8 – dub, termín měření: 17. 4. 2014.



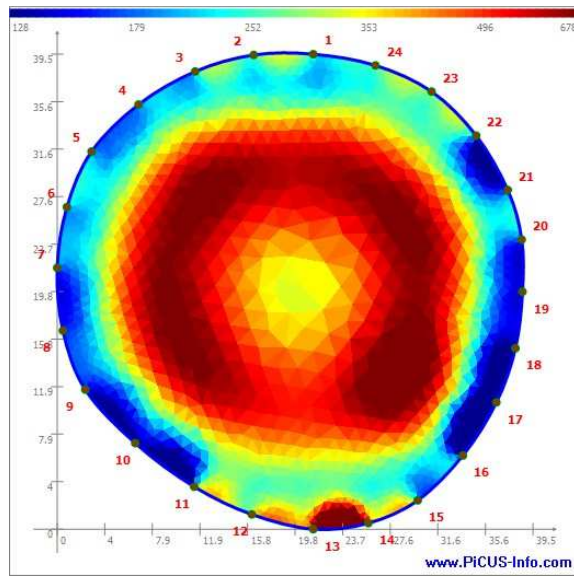
Obr. 114 – Strom č. 8 – dub, termín měření: 27. 5. 2014.



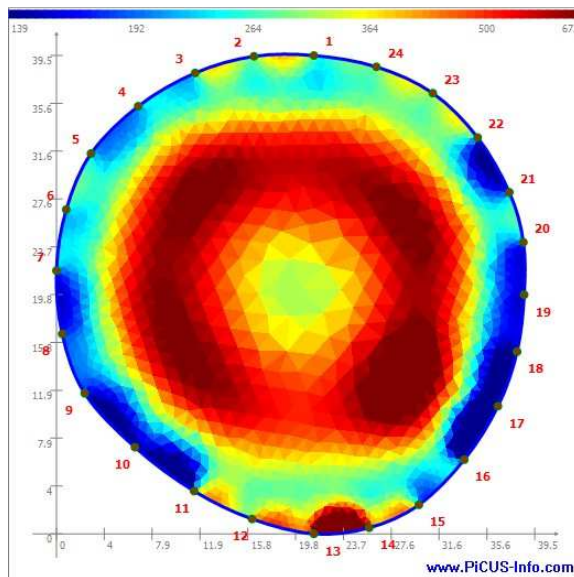
Obr. 115 – Strom č. 8 – dub, termín měření: 27. 6. 2014.



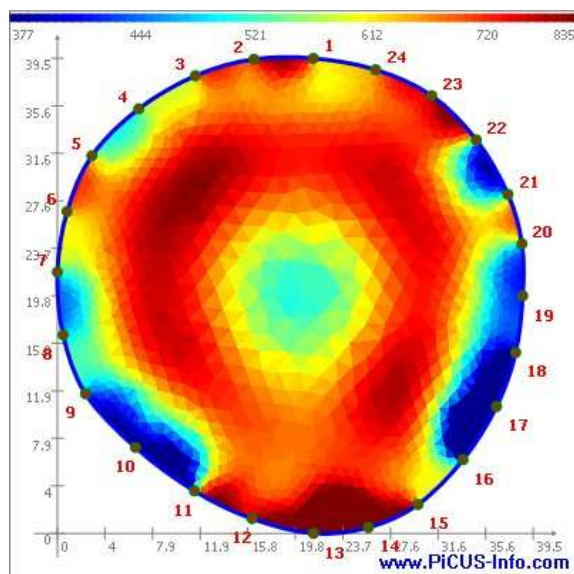
Obr. 116 – Strom č. 8 – dub, termín měření: 21. 7. 2014.



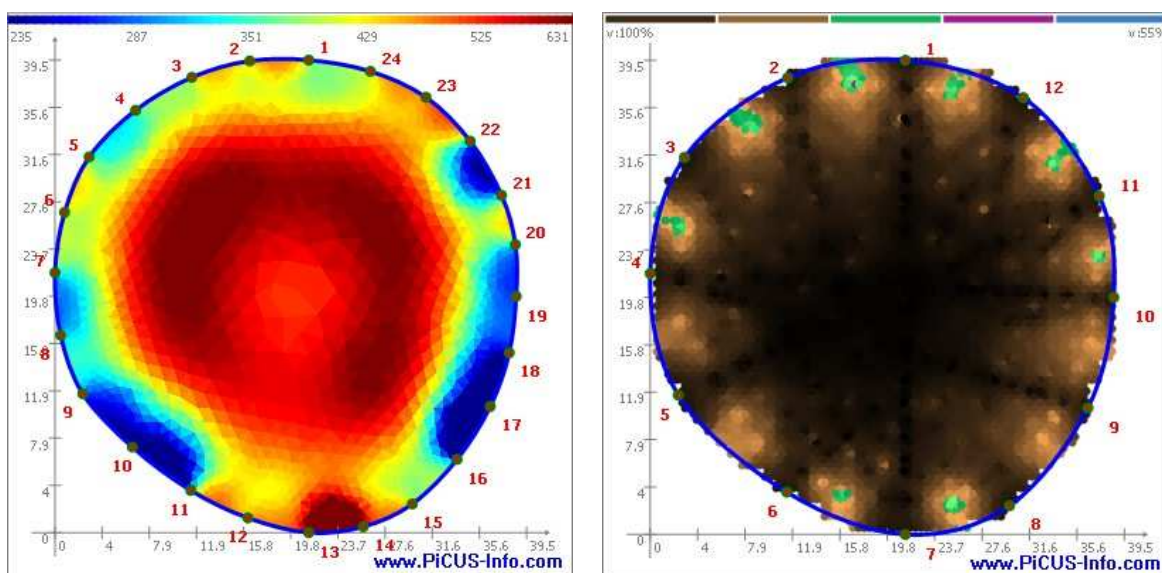
Obr. 117 – Strom č. 8 – dub, termín měření: 3. 9. 2014.



Obr. 118 – Strom č. 8 – dub, termín měření: 8. 10. 2014.



Obr. 119 – Strom č. 8 – dub, termín měření: 15. 1. 2015.



Obr. 120 (vlevo), 121 (vpravo) – Strom č. 8 – dub, termín měření: 27. 10. 2015. Vlevo výstup z odporového tomografu, vpravo srovnávací výstup ze sonického tomografu.

Zkoumaný strom č. 8 vykazoval podle prvních měření ze dne 14. 2. 2014 (obr. 110, 111) o něco vyšší vlhkost. To mohlo být zapříčiněno termínem měření ve vlhčím období na přelomu zimních a jarních měsíců. Další tomogramy ale nasvědčují tomu, že strom nejspíše neměl během sledovaného období vnitřní poškození. Toto potvrzují poslední tomografická měření na obrázku č. 120 (odporový tomogram) a na obrázku č. 121 (sonický tomogram). Ve střední části průřezu kmenem je jasně patrná oblast se sníženým odporem. Na rozdíl od předchozího stromu (č. 7, dub) je však tato oblast víceméně symetrická a bez trendu zvětšování či ústupu. Vzhledem k tomu,

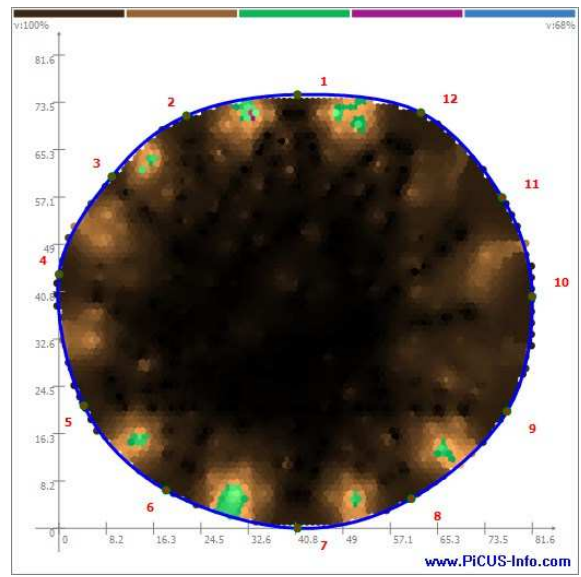
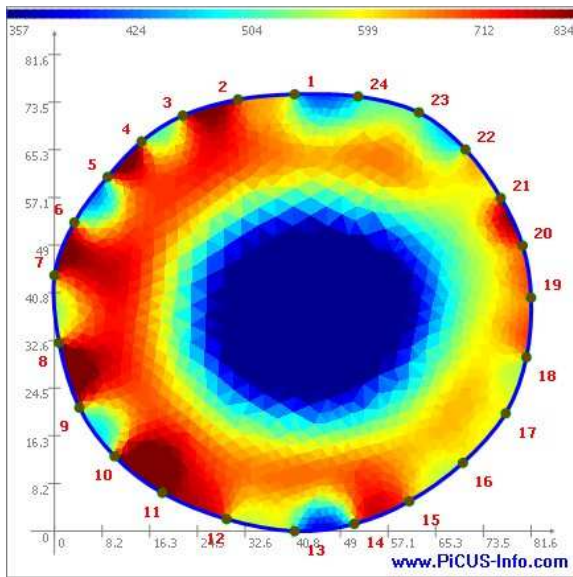
že kontrolní měření sonickým tomografem neukazuje žádné známky snížené rychlosti zvuku (měkčí dřevo), lze tomogram interpretovat jako přirozeně se vyskytující pravé jádro (které je charakteristické jednak vyšší vlhkostí a jednak vyšším obsahem rozpuštěných solí, což způsobuje vyšší vodivost).

4.1.9 Strom č. 9 – dub

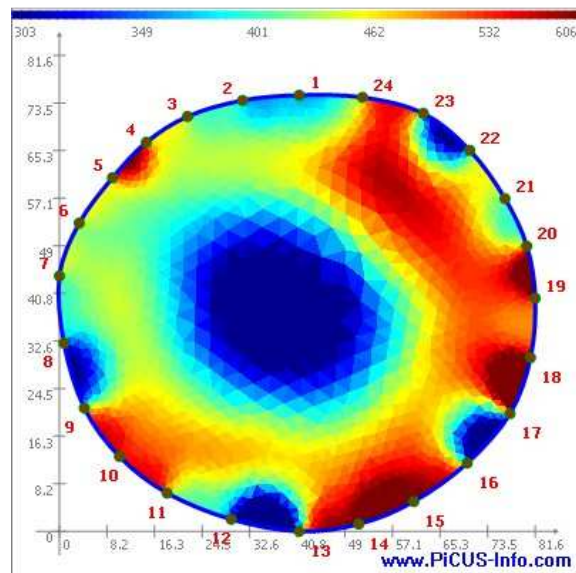


Obr. 122, 123 – Strom č. 9 – dub, zdroj: Martin Baláš, 2015.

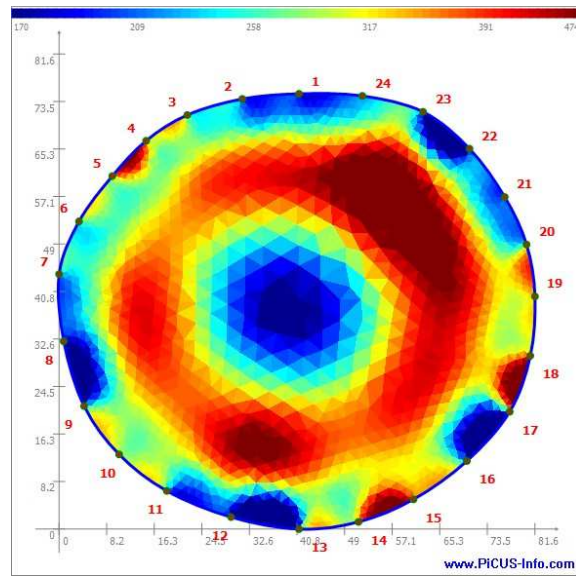
Na stromě č. 9 (obr. 122, 123) nebyla nalezena žádná vnější poškození. Na obrázcích č. 124–136 jsou výsledné tomogramy. Pro srovnání jsou vedle výstupů měření z odporového tomografu také výstupy ze sonického tomografu.



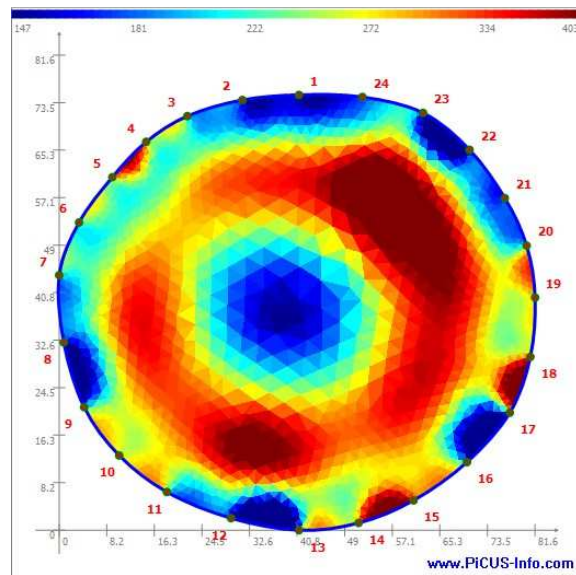
Obr. 124 (vlevo), 125 (vpravo) – Strom č. 9 – dub, termín měření: 23. 1. 2014. Vlevo výstup z odporového tomografu, vpravo srovnávací výstup ze sonického tomografu.



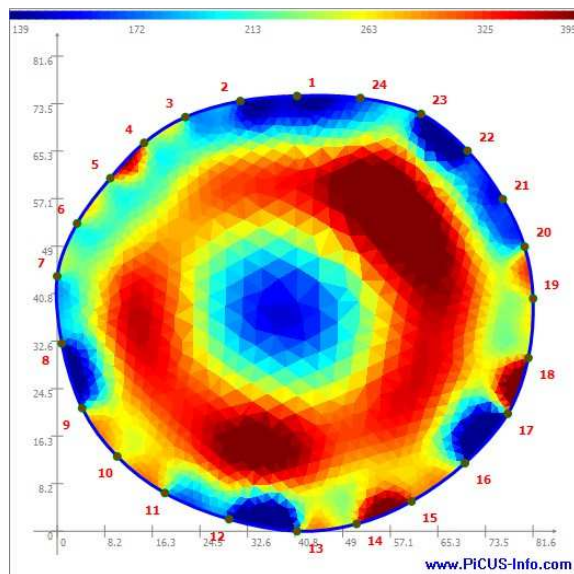
Obr. 126 – Strom č. 9 – dub, termín měření: 7. 3. 2014.



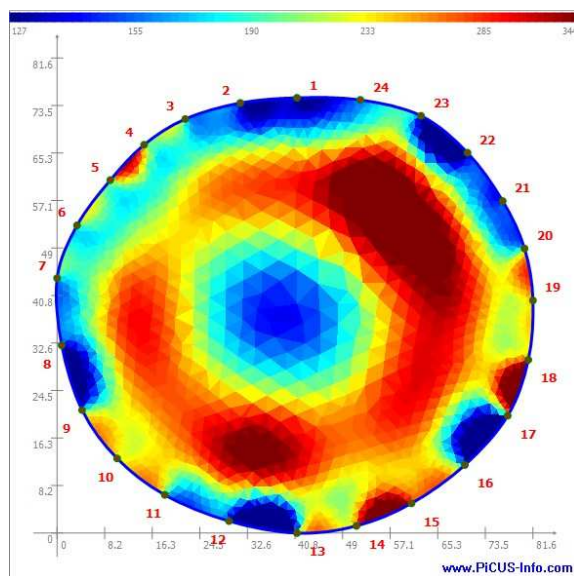
Obr. 127 – Strom č. 9 – dub, termín měření: 17. 4. 2014.



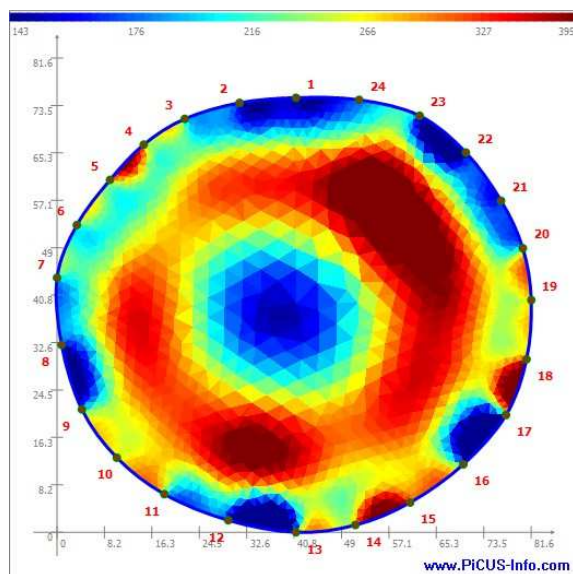
Obr. 128 – Strom č. 9 – dub, termín měření: 27. 5. 2014.



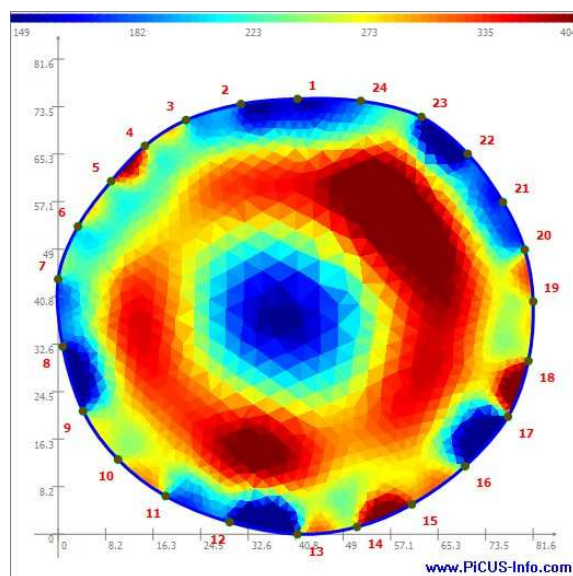
Obr. 129 – Strom č. 9 – dub, termín měření: 27. 6. 2014.



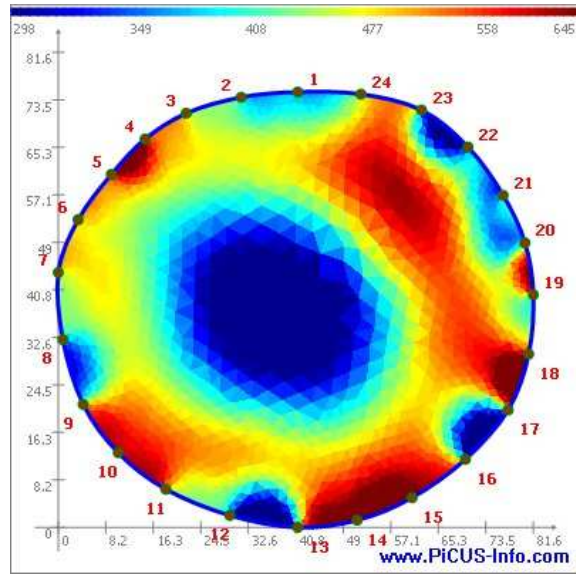
Obr. 130 – Strom č. 9 – dub, termín měření: 21. 7. 2014.



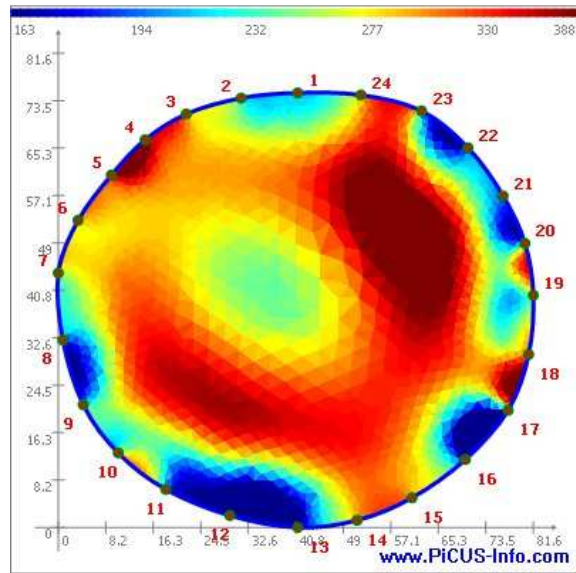
Obr. 131 – Strom č. 9 – dub, termín měření: 3. 9. 2014.



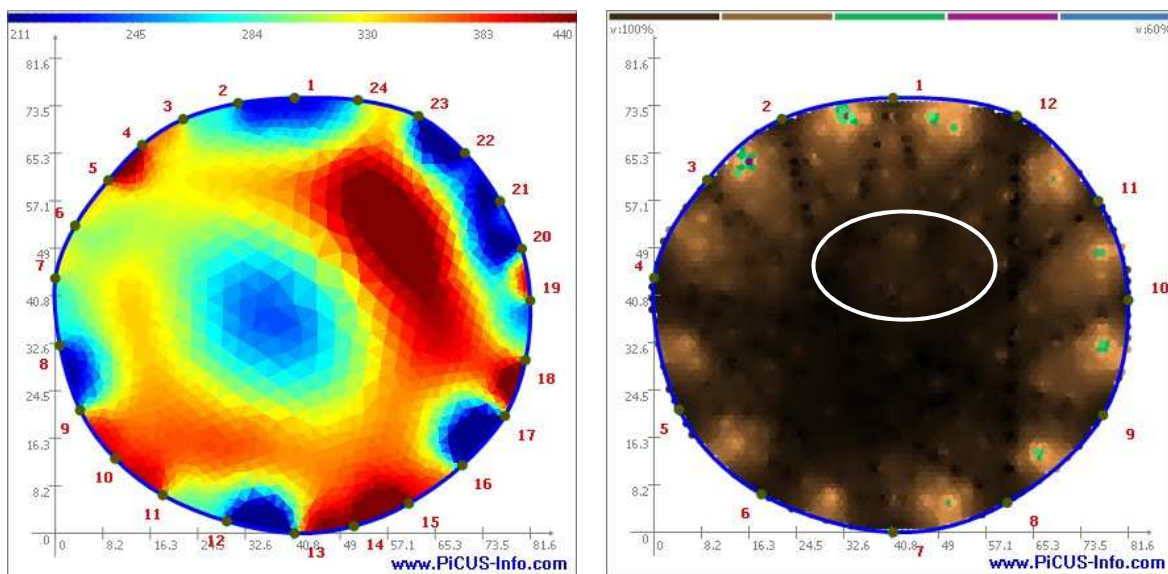
Obr. 132 – Strom č. 9 – dub, termín měření: 8. 10. 2014.



Obr. 133 – Strom č. 9 – dub, termín měření: 15. 1. 2015.



Obr. 134 – Strom č. 9 – dub, termín měření: 2. 10. 2015.



Obr. 135 (vlevo), 136 (vpravo) – Strom č. 9 – dub, termín měření: 27. 10. 2015. Vlevo výstup z odporového tomografu, vpravo srovnávací výstup ze sonického tomografu.

První výstup z měření odporového tomografu (obr. 124) ze dne 23. 1. 2014 ukazuje na vysokou vodivost uprostřed kmene měřeného stromu č. 9. Vzhledem k velikosti stromu lze usuzovat na přítomnost pravého jádra. Postupem času se výsledné tomogramy z odporového tomografu měnily jen málo. Tvar oblastí se sníženým odporem je symetrický a změny rozsahu jsou během roku 2014 nevýrazné.

Za pozornost stojí dodatečně provedený snímek z konce léta 2015 (obr. 134), které bylo charakterizováno vysokými teplotami a značným srážkovým deficitem. Ačkoliv relativní rozložení vodivosti v kmenu rámcově odpovídá předchozímu roku, je zřejmé výrazné zvýšení odporu ve střední části kmene, které patrně odpovídá vyschnutí jádrové části kmene během léta.

Další měření (obr. 135), provedené o měsíc později, již naznačuje částečné doplnění obsahu vody po období zvýšených srážek. Na srovnávacím výstupu ze sonického tomografu (obr. 136) je v náznaku viditelná oblast s mírně sníženou rychlostí zvuku (vyznačeno na obrázku), a to zhruba v místě, kde elektrický tomograf pravidelně zaznamenává vyšší odpor. V tomto případě je interpretace sporná, může se jednat o suché (odumřelé, ale tvrdé dřevo).

4.2 Ekonomické aspekty provozu tomografu

Dílním cílem této diplomové práce bylo zhodnotit časovou náročnost při měření stromovým odporovým tomografem. Jak je uvedeno v podkapitole 3.4 *Vlastní měření*, bylo měřeno 9 stromů, u každého proběhlo celkem 10 měření. První den proběhlo seznámení s přístrojem a následné měření.

Tabulka č. 2 zobrazuje přehled časů měření jednotlivých stromů. V tabulce jsou zohledněny časy měření z odporového i sonického tomografu. Zohlednění časové náročnosti u sonického tomografu zpracoval ve své diplomové práci kolega Bc. T. Petřík.

V tabulce č. 2 je časově zohledněno vybalování přístrojů a jejich příprava na měření, zatlukání hřebíků do stromu podle metodického postupu (viz kapitola 3.3 *Metodický postup měření*). Dále je zde zohledněna geometrie stromů, samotné měření odporovým tomografem a sonickým tomografem, jejich odinstalace ze stromů, vytahování hřebíků z kůry stromů a konečně také sbalení přístrojů. Z těchto jednotlivých úkonů byl vypočten průměrný čas, nejkratší a nejdelší čas, směrodatná odchylka, dolní a horní kvartil. Všechny hodnoty v tabulkách č. 2 a 3 jsou uvedeny v minutách.

Jak je vidět v tabulce č. 2, na měření jednoho stromu bylo průměrně potřeba 52 minut. Měření jednoho stromu odporovým tomografem se zatlukáním hřebíků do kůry stromu a geometrií trvalo průměrně 40 minut. Samotné měření odporovým tomografem trvalo průměrně 15 minut, to je dáno programem PiCUS, který vysílá elektrické výboje z jednoho bodu do druhého, dobře připojenými svorkami na hřebíky, silou signálu bluetooth připojení a výkonem notebooku. Měření sonickým tomografem vyžaduje průměrně 7 minut. Z toho vyplývá, že měření odporovým tomografem je dvakrát více časově náročnější než měření sonickým tomografem. Což potvrzuje i tabulka č. 3, kde je zohledněno pouze samotné měření odporovým tomografem (a sonickým tomografem) bez měření geometrie stromu, které trvalo průměrně 18 minut.

Tabulka č. 2 – Časy měření při měření s EIT a SoT (minuty).

	průměr	0,2 percentil	0,8 percentil	směrodatná odchylka	dolní kvartil	horní kvartil
Vybalování / začátek	1	1	2	0.5	1	2
Zatloukání hřebíků	5	4	6	1.2	4	5
Geometrie	7	6	7	2.5	6	7
Instalace SoT	3	2	4	1.4	2	4
Měření SoT	7	5	8	2.4	5	8
Odinstalace SoT	2	1	2	0.6	2	2
Instalace EIT	5	4	7	1.4	5	7
Měření EIT	15	12	17	3.0	12	17
Odinstalace EIT	3	2	4	1.1	2	4
Vyndávání hřebíků	2	1	2	1.2	2	2
Přechod / konec	2	1	3	0.8	1	3
Celkem	52	46	58	8.2	46	58

Tabulka č. 3 – Časy měření s EIT a SoT bez geometrie (minuty).

	průměr	0,2 percentil	0,8 percentil	směrodatná odchylka	dolní kvartil	horní kvartil
Celkem EIT	18	14	20	5.2	14	20
Celkem SoT	9	6	12	6.2	6	11

Dalším ekonomickým aspektem přístroje může být jeho cena pořízení, která se pohybuje kolem půl milionu Kč. Cena však zahrnuje kompletní vybavení (obr. 137), což je odporový (obr. 139), sonický tomograf a elektronická průměrka (obr. 138). Cena přístroje, který jsem měla k dispozici k této diplomové práci, byla 530 556 Kč včetně DPH. Přístroj byl pořízen v roce 2012 Fakultou lesnickou a dřevařskou ČZU v Praze.

S ohledem na všeobecný rozvoj techniky a při rozšíření využívání stromové tomografie lze do budoucna očekávat pokles cen přístroje, takže bude cenově dostupný i pro například menší firmy a živnostníky.

Závěr

Cílem této diplomové práce bylo podat ucelený přehled o stromovém odporovém tomografu, představit jej odborné veřejnosti a poukázat na jeho využití v lesnické praxi i mimo les. Diplomová práce sestává ze dvou částí. V první části je literární rešerše, která je souhrnem informací o stromové odporové tomografii, jejím využití v praxi, jejích pozitivěch a úskalích. V druhé části jsou zpracována vlastní měření, jejich výsledky a následná interpretace.

Důležitými výsledky měření jsou zhodnocení, zda byla na zkoumaných stromech nalezena vnitřní poškození. Bylo měřeno celkem 9 stromů: 3 borovice, 3 buky a 3 duby. Stromy byly měřeny v období od ledna 2014 do října 2015. U každého stromu proběhlo celkem 10 měření stromovým odporovým tomografem. Pro srovnání jsou u vybraných tomogramů prezentovány také tomogramy z měření stromovým sonickým tomografem.

Výsledné tomogramy ukázaly, že sedm z devíti měřených stromů (stromy č. 1, 2, 3, 4, 6, 8 a 9) bylo s největší pravděpodobností bez vnitřního poškození v období měření. Strom č. 5 (buk) měl při měření na výsledných tomogramech zřetelné jádrové poškození kmene. Byl nejspíše napaden hnilobou, která se objevila hlavně na snímku ze sonického tomografu. U stromu č. 7 (dub) byla nalezena nejen hniloba, ale i dvě praskliny, které ukázal tomogram ze sonického tomografu.

Důležitým poznatkem této práce je, že snímky z odporového tomografu se ve sledovaném období mezi jednotlivými měřeními, prováděnými zhruba v měsíčních odstupech, většinou nijak zásadně neměnily. Případné změny byly zřejmě dány vlhkostními podmínkami před a při měření. Při interpretaci snímků ze stromového odporového tomografu je tedy nutné brát v úvahu jednak dlouhodobé vlhkostní poměry (srážkově bohaté či chudé období) a také aktuální podmínky (vlhký kmen popředchozích srážkách). Celkově lze doporučit, aby měření bylo prováděno jen, pokud je kmen suchý.

Jak je uvedeno v kapitole 3.4 *Čtení tomogramu*, je doporučeno při vyhodnocování výsledných tomogramů porovnávat snímky z obou přístrojů, tedy z odporového i sonického tomografu. Některé abnormality objeví odporový a některé sonický tomograf. Na základě vyhodnocení výsledků lze učinit závěr, že vyhodnocování snímků z odporového tomografu je v případě jehličnatých dřevin jednodušší a zpravidla jednoznačné. Naproti tomu u listnatých dřevin je nutné brát ohled na možnou (ale

ne vždy jistou) přítomnost pravého či nepravého jádra. V těchto případech je na místě provést rovněž měření sonickým tomografem a výsledky při interpretaci konfrontovat,

Dílním cílem mé diplomové práce bylo zhodnotit ekonomické aspekty provozu stromového odporového tomografu. Tato časová náročnost je v kapitole 4.2 a zachycuje časy při měření odporovým tomografem. Výsledkem je, že průměrně trvalo měření jednoho stromu stromovým odporovým tomografem 52 minut. Tento čas zahrnuje všechny potřebné úkony před a po měření odporovým tomografem, tedy od geometrie, přes zatloukání hřebíků do kůry stromu až k odinstalaci přístroje. Celkové měření odporovým tomografem bez geometrie kmene stromu trvalo průměrně 18 minut. Tzv. čistý čas měření bez přípravných prací vyšel průměrně na 15 minut u odporového a 7 minut u sonického tomografu. Tento dvojnásobně potřebný čas pro měření odporovým tomografem je dán technickými vlastnostmi programu PiCUS, silou připojení bluetooth a notebookem.

Technologie stromové tomografie se neustále zdokonaluje a postupně se rozšiřuje její využití v lesnictví a mimo les. Lze předpokládat, že její využití bude hlavně v arboristice a veřejné zeleni, kde poslouží jako podpůrná metoda pro posuzování stability stromů, tak aby bylo možné v městském prostředí zachovat optimální množství zeleně, ale zároveň aby stromy neohrožovaly lidské životy a hmotný majetek.

Přílohy



Obr. 137 – Kompletní set stromové tomografie (odporový, sonický tomograf a elektronická průměrka), zdroj: autor, 2015.



Obr. 138 – Elektronická průměrka, zdroj: autor, 2015.



Obr. 139 – Stromový odporový tomograf s příslušenstvím, zdroj: autor, 2015.

Seznam použité literatury

- ARCINIEGAS, A., PRIETO, F., BRANCHERIAU, L. & LASAYGUES, P. Literature review of acoustic and ultrasonic tomography in standing trees. *Trees* [online]. 2014, 28(6), 1559-1567. DOI 10.1007/s00468-014-1062-6.
- BAIER, J. & TÝN, Z. *Ochrana dřeva*. Vyd. 3., přeprac. a dopl. Praha: Grada, 1996. ISBN 80-7169-275-1. 96 s.
- BLANCHETTE, R. A., OTJEN, L., EFFLAND, M. J., ESLYN, W. E. Changes in structural and chemical components of wood delignified by fungi. *Wood Science Technology* [online]. 1985, 19, 35-46.
- BOYCE, J. S. The dry rot of incense cedar. *United states department of Agriculture, Bulletin*. 1920, 871, 62 s.
- BUTNOR, J. R., PRUYN, M. L., SHAW, D. C., HARMON, M. E., MUCCIARDI, A. N. & RYAN, M. G. Detecting defects in conifers with ground penetrating radar: applications and challenges. *Forest Pathology* [online]. 2009, 39, 5, 309-322. DOI: 10.1111/j.1439-0329-2009-00590.x.
- BRAZEE, N. J., MARRA, R. T., GÖCKE, L. & WASSENAER, P. Non-destructive assessment of internal decay in three hardwood species of northeastern North America using sonic and electrical impedance tomography. *Forestry* [online]. 2011, 84 (1), 33-39. DOI: 10.1093/forestry/cpq040. ISSN 0015-752x.
- ČUNDERLÍK I. *Štruktúra dřeva*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, Drevárska fakulta, Katedra náuky o dreve, 2009. ISBN 978-80-228-2061-5. 135 s.
- ČZU V PRAZE. *Lexikon vad dřeva* [online]. 2011-01-30. Dostupné z WWW: http://fld.czu.cz/~zeidler/lexikon_vad/hniloba.htm.
- DEFLORIO, G., FINK, S. & SCHWARZE, F. W. M. R. Detection of incipient decay in tree stems with sonic tomography after wounding and fungal inoculation. *Wood science and technology* [online]. 2008, 42 (2), 117-132. DOI: 10.1007/s00226-007-0159-0. ISSN 0043-7719.
- GALLO, J., BALÁŠ, M., NOVÁKOVÁ, O. & KUNEŠ, I. The use of sonic and electrical impedance tomography in urban forestry and arboriculture. *Czech University of Life Sciences Prague, Faculty of Forestry and Wood Sciences, Department of Silviculture*. 2014, 7 s.

- GANDELOVÁ, L., HORÁČEK, P. & ŠLEZINGEROVÁ, J. *Nauka o dřevě*. 2. nezm. vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 2002. ISBN 80-7157-577-1. 176 s.
- GÖCKE, L. *PiCUS OilPalmTronic: Electrical Impedance Tomograph for trees*. Rostock: Argus electronic gmbh. 2010-12-13. 25 s.
- GÖCKE, L. *PiCUS Sonic Tomograph: Manual, program version Q72*. Rostock: Argus electronic gmbh. 2012-11-27. 88 s.
- GÖCKE, L., RUST, S., WEIHS, U., GÜNTHER, T. & RÜCKER, C. Combining sonic and electrical impedance tomography for the nondestructive testing of trees. *Western Arborist*. 2007-09-10. 11 s.
- JOHNSTONE, D., MOORE, G., TAUSZ, M. & NICOLAS, M. The measurement of wood decay in landscape trees *Arboriculture & Urban Forestry* [online]. 2010, 36 (3), 121-127.
- KOLAŘÍK, J., MARTINKOVÁ, M., ČERMÁK, M., GEBAUER, R., ŠPINDLEROVÁ, Z., HORÁČEK, P., PRAUS, L., KREJČÍŘÍK, P., BERÁNEK, J. & LIČKA, D. *Péče o dřeviny rostoucí mimo les II*. 3. vydání. Vlašim: Český svaz ochránců přírody, 2005. ISBN 80-86327-44-2. 719 s.
- LARSSON, B., BENGTSSON, B. & GUSTAFSSON, M. Nondestructive detection of decay in living trees. *Tree Physiology* [online]. 2004, 24, 853-858.
- MARTIN, P., COLLET, R., BARTHELEMY, P. & ROUSSY, G. Evaluation of wood characteristics: Internal scanning of the material by microwaves. *Wood Science and Technology* [online]. 1987, 21 (4), 361-371. DOI: 10.1007/BF00380203
- METEOSTANICE TRUBA. 2014.
- MÜLLER, U., BAMMER, R., HALMSCHLAGER, E., STOLLBERGER, R. & WIMMER, R. Detection of fungal wood decay using Magnetic Resonance Imaging. *Holz als Roh- und Werkstoff* [online]. 2001, 59 (3), 190-194. DOI: 10.1007/s001070100202
- MUNDUCHOVÁ, M. *Hodnocení stavu dřeva v konstrukcích a zhodnocení využitelnosti nedestruktivních metod zkoušení*. Brno, 2014. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. 69 s.
- NEČÁSEK, S. *Radiotechnika do kapsy*. 2. upravené a doplněné vydání. Praha: SNTL, 1981. 393 s.

- NICOLOTTI, G., SOCCO, L. V., MARTINIS, R., GODIO, A. & SAMBUELLI, L. Application and comparison of three tomographic techniques for detection of decay in trees. *Journal of Arboriculture* [online]. 2003, 29 (2), 66-78. ISSN 0278-5226.
- PELLERIN, R. F. & ROSS, R. J. Nondestructive Evaluation of Wood. *Forest Products Society* [online]. 2002.
- POŽGAJ, A., CHOVANEC, D., KURJATKO, S. a BABIAK, M. *Štruktúra a vlastnosti dreva*. Bratislava: Príroda, 1993. ISBN 80-07-00960-4. 475 s.
- SHORTLE, W. C. & SMITH, K. T. Electrical properties and rate of decay in spruce and fir wood. *Phytopathology*. 1987, 77, 811-814.
- SCHUBERT, S., GSELL, D., DUAL, J., MOTAVALLI, M. & NIEMZ, P. Acoustic wood tomography on trees and the challenge of wood heterogeneity. *International Journal of the Biology, Chemistry, Physics & Technology of Wood* [online]. 2009, 63, 107-112. DOI 10.1515/HF.2009.028.
- SCHURCH, R., ROWLAND, S. M., BRADLEY, R. S. & WITHERS, P. J. Imaging and analysis techniques for electrical trees using X-ray computed tomography. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* [online]. 2014, 21 (1), 53-63. DOI: 10.1109/TDEI.2013.003911. ISSN: 1070-9878.
- STŘEDOČESKÝ KRAJ. 2017-04-20. Dostupné z WWW: http://www.kr-stredocesky.cz/web/skolstvi/exkurze/-/asset_publisher/cuEW8sov1LL1/content/skolni-lesni-podnik-kostelec-nad-cernymi-lesy;jsessionid=60C7ED4F7659CDE84A92DE439A91A439.liferay_s1.
- SZÓRÁDOVÁ, A. & PRAUS, L. *Přístrojové hodnocení stability stromů* [online].
- TATTAR, T. A. & SHIGO, A. L. Relationship between the degree of resistance to a pulsed electric current and wood in progressive stages of discoloration and decay in trees. *Phytopathology* [online]. 1972, 62, 792.
- TKOTZ, K., BASTIAN, P., BUMILLER, H., EICHLER, F., JAUFMANN, N., MANDERLA, J., SPIELVOGEL, O., STRICKER, F. D. & WINTER, U. *Příručka pro elektrotechnika*. 1. vydání. Překlad HANDLÍŘ, J. Praha: Europa-Sobotáles, 2002. ISBN 80-86706-00-1. 564 s.