

Mendelova univerzita v Brně

Lesnická a dřevařská fakulta

Ústav ochrany lesa a myslivosti

**Ověření experimentální metodiky vyhledávání hnilob založené na
impedanční tomografii v porostech smrku ztepilého (*Picea abies* L.)**

Bakalářská práce

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem práci: **Ověřování experimentální metodiky vyhledávání hnilob založené na impedanční tomografii v porostech smrku ztepilého (*Picea abies* L.),** vypracoval samostatně a veškeré použité prameny a informace uvádím v seznamu použité literatury. Souhlasím, aby moje práce byla zveřejněna v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a v souladu s platnou Směrnicí o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací.

Jsem si vědom, že se na moji práci vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, a že Mendelova univerzita v Brně má právo na uzavření licenční smlouvy a užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona.

Dále se zavazuji, že před sepsáním licenční smlouvy o využití díla jinou osobou (subjektem) si vyžádám písemné stanovisko univerzity, že předmětná licenční smlouva není v rozporu s oprávněnými zájmy univerzity, a zavazuji se uhradit případný příspěvek na úhradu nákladů spojených se vznikem díla, a to až do jejich skutečné výše.

Vdne

Podpis

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Petru Čermákovi, Ph.D. za výborné vedení bakalářské práce a poskytnuté studijní materiály. Dále bych chtěl poděkovat také Ing. Ludřkovi Prausovi, Ph.D., který mi vysvětlil a umožnil práci s akustickým tomografem. Na závěr bych chtěl poděkovat celé své rodině, která mi byla podporou po celou dobu mého studia.

Děkuji

Autor práce: Matěj Vincour

Název: Ověřování experimentální metodiky vyhledávání hnilob založené na impedanční tomografii v porostech smrku ztepilého (*Picea abies* L.)

Title: Verification experimental methodology rots search based on impedance tomography in stands of Norway spruce (*Picea abies* L.)

Abstrakt

Bakalářská práce je zaměřena na zjišťování zdravotního stavu smrku ztepilého (*Picea abies* L.), který je v současné době silně ohrožován biotickými a abiotickými vlivy. Pro detekci zdravotního stavu dřevin jsou využity diagnostické nedestruktivní přístroje. Vlastní měření bylo prováděno na území Školního lesního podniku Masarykův les Křtiny – Polesí Habrůvka. Měřilo se akustickým tomografem, který je založen na průchodu zvukových vln a elektrickým impedančním tomografem, který naopak využívá pro detekci hnilob elektrický odpor. Pomocí těchto tomografů byla zjišťována přítomnost hniloby ve kmeni a její rozsah. Akustickým tomografem bylo naměřeno celkem 30 stromů a pomocí elektrického impedančního tomografu bylo naměřeno 15 stromů. Pro zjištění přesnosti měření elektrického impedančního tomografu byly výsledky porovnány s výřezy konkrétních stromů. Při měření akustickým tomografem byla pozorována změna rychlosti zvuku v důsledku poškození. Díky zjištění výskytu hnilob a dutin v kmeni je zároveň částečně zjišťována i stabilita stromu.

Klíčová slova: smrk, zdravotní stav, tomograf, hniloba

Abstract

The purpose of this Bachelor thesis was to monitor health of the Norway spruce (*Picea abies* L.), which is currently strongly endangered by biotic and abiotic factors. For the health detection of the woods are used non-destructive diagnostic machines. Measuring were in the territory of the Training forest enterprise „Masarykův les“ Křtiny – Polesí Habrůvka For the measuring were used acoustic tomography, which is based on passage of sound waves and electrical impedance tomography which is also used for detection rot electric resistance. Using this tomography was evaluated the presence of the rot in the trunk and its range. Total number of the trees measured by acoustic tomography was 30 trees, 15 trees were measured by electrical impedance tomography. For determination of the accuracy of measurement electrical impedance tomography, were compared the results with the specific tree cut-outs. For measurement of acoustic tomography was observed velocity changes because of the damages. Thanks to the detection rots and cavities in the trunk was also partly determined the stability of the tree.

Key words: Norway spruce, health, tomograph, rot

Obsah

1	Úvod	1
2	Cíl práce.....	3
3	Literární přehled	4
3.1	Charakteristika území	4
3.1.1	Geomorfologické poměry	4
3.1.2	Geologické a pedologické poměry.....	4
3.1.3	Hydrologické poměry	5
3.1.4	Klimatické poměry.....	5
3.2	Smrk ztepilý <i>Picea abies</i> (L.).....	6
3.3	Chřadnutí smrku	7
3.3.1	Chemický stav půd.....	8
3.3.2	Nedostatek srážek	9
3.3.3	Teplotní extrémy	9
3.4	Houbové patogeny.....	10
3.4.1	Václavka smrková <i>Armillaria ostoyae</i> (Romagn.) Herink	11
3.4.2	Kořenovník vrstevnatý <i>Heterobasidion annosum</i> (Fr.) Bref.	12
3.4.3	Pevník krvavějící <i>Stereum sanguinolentum</i> (Alb & Schwein.) Fr.....	12
3.5	Kůrovci	13
3.5.1	Výskyt kůrovců v ČR.....	15
3.6	Tomografie	16
3.6.1	Elektrická impedanční tomografie	16
3.6.2	Použití EIT	17
3.6.3	Akustická tomografie	18
4	Metodika	20
4.1	Charakteristika vybraného území	20
4.2	Elektrický impedanční tomograf (EIT)	20

4.2.1	Měření pomocí elektrického impedančního tomografu (EIT)	20
4.2.2	Zpracování dat z EIT	21
4.3	Akustický tomograf	21
4.3.1	Princip měření akustického tomografu	21
4.3.2	Vlastní měření pomocí akustického tomografu	22
5	Výsledky	23
5.1	Elektrický impedanční tomograf	23
5.2	Akustický tomograf	26
6	Diskuze	32
7	Závěr	35
8	Summary	36
9	Seznam literatury	37
10	Seznam příloh	43

1 Úvod

Smrk ztepilý (*Picea abies* L.) je v současnosti dřevinou vyskytující se téměř po celém světě. Tento výsledek je dán především jeho poměrně rychlým růstem a dobrou kvalitou dřeva. Svou využitelnost nachází v mnoha průmyslových i neprůmyslových odvětvích. Hojně se využívá ve stavebnictví, truhlářství, ale také pro výsadbu vánočních stromů. V České republice zaujímá smrk ztepilý asi polovinu celkové plochy lesů. Vyskytuje se především ve vyšších nadmořských výškách v místech s dostatkem srážek. Nižší a střední polohy jsou pro něho nevhodné. Na našem území je možné se setkat ještě s dalšími druhy smrku. Mezi ně patří smrk pichlavý (*Picea pungens* Engelm.), který byl v minulém století hojně vysazován v Krušných horách. Jako introdukovaná dřevina se u nás vyskytuje smrk východní (*Picea orientalis* L.). V zahradách a parcích pak můžeme vidět smrk sitka (*Picea sitchensis* Bongard Carr.).

V současné době se upíná pozornost na zdravotní stav smrku. Působením různých faktorů, vznikajících většinou v důsledku klimatické změny, dochází k rozpadu smrkových porostů na mnoha územích světa. V České republice jsou to především oblasti Šumavy, Jeseníků, Beskyd a Severní Moravy. Problém přináší fakt, že se nejedná o působení pouze jednoho faktoru, ale nýbrž jejich kombinace. Tyto problémy mohou být vyvolané nedostatkem srážek, výraznými teplotními extrémy, změněným chemismem půd nebo špatným vysazováním smrku na nevhodná stanoviště. Tyto faktory působí jako primární zdroj poškození, oslabují dřeviny a umožňují jejich napadení sekundárními činiteli. Ti způsobují rozpad smrkových porostů. Mezi sekundární činitele patří především hmyzí škůdci a také houbové patogeny. Hlavními hmyzími škůdci, kteří negativně působí na smrku, jsou především lýkožrout smrkový (*Ips typographus* L.), lýkožrout severský (*Ips duplicatus* Sahlb.), lýkožrout menší (*Ips amitinus* Eichh.) a lýkožrout lesklý (*Pityogenes chalcographus* L.). Mezi nejproblematictější houbové patogeny patří především václavka smrková, která napadá kořeny stromu a báze kmene. Velké problémy působí především v oblastech, kde se smrk vyskytuje mimo své ekologické optimum. Druhý houbový patogen, který působí výrazné škody, je pevník krvavějící. Ten napadá stromy v místech poranění, které jsou nejčastěji od zvěře nebo těžby dřeva. Vzájemným působením primárních a sekundárních činitelů dochází často k umírání celých smrkových porostů.

Pro zjišťování zdravotního stavu stromů lze využívat vizuální kontrolu, například sledování barevných změn nebo růstu asimilačních orgánů. Touto kontrolou však nelze určit vnitřní stav kmene, který je důležitý pro stabilitu stromu. Pro tuto skutečnost se významně využívají diagnostické přístroje. Pro zjišťování stability stromů v městském prostředí se hojně využívá přístroj založený na průchodu zvukových signálů. Jedná se o tzv. akustický tomograf, který umožňuje zjistit velikost defektu i jeho umístění. V lesnictví se pak využívá tzv. elektrický impedanční tomograf, který je založen na průchodu elektrického proudu a zjišťování velikosti elektrického odporu kmene.

2 Cíl práce

Cílem bakalářské práce bylo změřit pomocí impedančního tomografu a akustického tomografu dohromady 40–50 dospělých jedinců smrku ztepilého (*Picea abies* L.). Bakalářská práce měla dva dílčí cíle. Prvním dílčím cílem bylo vyhodnocení a srovnání datových souborů a tomogramů jednotlivých stromů mezi sebou a ověřit, zda lze na základě těchto dat určit přítomnost hniloby, případně její rozsah nebo kvalitativní znaky. Druhým dílčím cílem bakalářské práce bylo porovnat zastoupení stromů bez hniloby a s přítomností hniloby.

3 Literární přehled

3.1 Charakteristika území

Mnou vybrané území se nalézá na Školním lesním podniku (dále jen ŠLP) Masarykův les Křtiny – Polesí Habrůvka, přesněji lokalita Proklest. Polesí Habrůvka se nachází v Jihomoravském kraji, v přírodní lesní oblasti 30 – Dražanská vrchovina.

3.1.1 Geomorfologické poměry

Dle geomorfologického členění patří polesí Habrůvka do Česko-Moravské soustavy, podsoustavy Brněnská vrchovina, celek IID – 3 Dražanská vrchovina, podcelek IID – 3C Konická vrchovina a okrsek IID – 3C – 7 Mokerská vrchovina.

Mokerská vrchovina je okrsek v jižní části Konické vrchoviny. Je budována spodnokarbonským slepencem, drobami a břidlicemi, v dílčích kotlinách místy s miocenními jíly. Silně je ovlivněna neotektonickými pohyby, kterými byla rozlámána na řadu ker, z nichž některé jsou klenbovitě prohnuty, jiné poklesly a tvoří kotliny při východním okraji (Demek et al., 2014).

3.1.2 Geologické a pedologické poměry

Na geologické stavbě území má hlavní podíl brněnský pluton, devon Moravského krasu a kulm Konické vrchoviny. Naprostou většinu území Konické vrchoviny na území ŠLP Masarykův les Křtiny představují jednotvárná souvrství mořského spodního karbonu – kulmu: jílovité břidlice, droby, zčásti i slepence. Jako překryvné útvary se zde vyskytují jurské vrstvy, ojediněle křída, pískovce, jílovce a slínovce. Z pokryvů jsou nejčastější především sprašové hlíny a svahoviny. Okrajově se vyskytují také spraše ve formě ostrůvků a to na východní straně vrchoviny. V nejvyšší části se ojediněle vyvinuly rašelinné půdy (ÚHÚL, 2000).

Značnou pestrost půdních typů odráží geologické podloží, geomorfologické členění i lesní vegetační stupňovitost. Pro Konickou vrchovinu je charakteristická kambizem mezotrofní. Na severovýchodním okraji LHC je největší zastoupení podmáčených stanovišť s kambizemí pseudoglejovou až mezotrofní oglejenou (Lesprojekt, 2013).

Na zkoumaném území, lokalitě Proklest, se podle mapového serveru Školního lesního podniku Masarykův les Křtiny nachází jednak výše zmíněné kambizemě mezotrofní, ale také luvizemě a to modální. Obecně se luvizemě vyznačují vyběleným eluviálním horizontem El, který je ochuzený o jíl a degradovaným horizontem Bt, který

je jílem obohacený. Modální luvizem je pak typická sekvencí genetických horizontů na středně těžkých substrátech (Vavříček, Pancová Šimková, 2014).

3.1.3 Hydrologické poměry

Polesí Habrůvka je odvodňováno řekou Svitavou, Jedovnickým a Křtinským potokem a řekou Rakovec. Všechny uvedené toky patří do povodí Dyje, úmoří Černého moře (Morava, Dunaj). Jedovnický potok je součástí Rudického propadání. Jedná se o soustavu ponorů a paleoponorů. Celkový jeskynní komplex Jedovnického potoka je téměř 13 km dlouhý. Zpět na povrch se potok dostává nedaleko Býčí skály v údolí Křtinského potoka (Vávra, Štelcl, 2014).

V menší míře jsou zastoupeny tři hydromeliorační okrsky. Okrsek Q, který je charakteristický pouze sezónním zamokřením převážně povrchovou vodou, okrsek G je charakteristický trvalým zamokřením stagnující podzemní vody a její trvale zvýšenou hladinou a okrsek V, pro který je typické zamokření svahovou proudící podzemní vodou s plošnými svahovými vývěry Praktický význam mají pouze v lokalitě u jedovnických rybníků Olšovec a Budkovan na severovýchodním okraji LHC (Lesprojekt, 2013).

3.1.4 Klimatické poměry

Dle Tolasz et al. (2007) patří území LHC ŠLP Masarykův les Křtiny do teplé a mírně teplé klimatické oblasti. Polesí Habrůvka náleží do mírně teplé oblasti s červencovými teplotami 16–17 °C a lednovými teplotami od –2 do –3 °C.

Podnebí je značně ovlivňováno členitým terénem. Místní klima vykazuje velké rozdíly na malých vzdálenostech – hojně jsou teplotní inverze a extrémně suché teplé klima na jižních svazích (Lesprojekt, 2013).

Severní svahy jsou charakteristické jako plochy méně osluněné (v lednu i v ročním průměru 96 % a méně slunečního záření v porovnání s vodorovnou rovinou), s výrazně sníženými teplotními maximy. Na jižních svazích jsou plochy dobře osluněné (v lednu více než 121 % a v ročním průměru nad 111 % slunečního záření v porovnání s vodorovnou rovinou). Vyšší teplotní maxima podporují vznik anabatického mikroadvektivního proudění vzduchu při východní expozici (Lesprojekt, 2013).

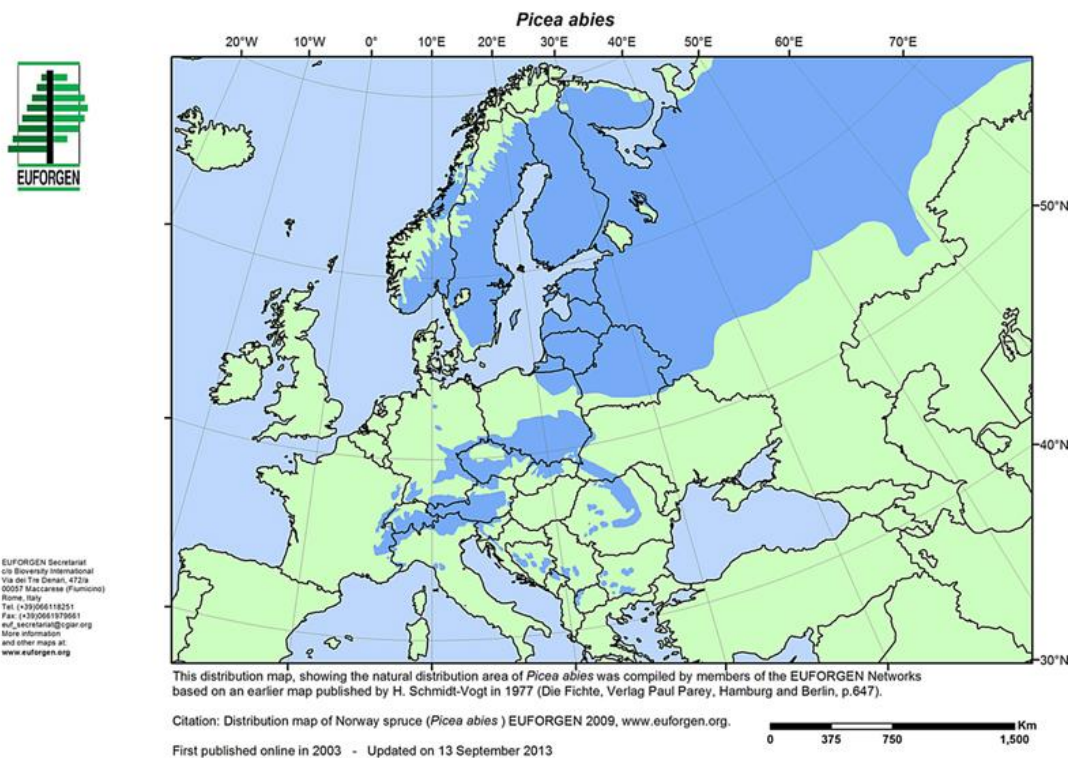
Dle údajů z portálu ČHMÚ (2017) se průměrná roční teplota vzduchu v roce 2015 pohybovala v rozmezí 9,1–10,0 °C, roční úhrn srážek byl v rozmezí 450–500 mm.

3.2 Smrk ztepilý *Picea abies* (L.)

Smrk ztepilý má rozlehlý euroasijský areál zasahující přes celou Sibiř na východ až k Ochotskému moři. Vlastní evropský areál se člení na dvě oddělené části:

1. Severská oblast; navazuje na areál smrku sibiřského, zabírá téměř celou Skandinávii a zasahuje na jih do Pobaltí a odtud k východu přes střed evropské části Ruska k Uralu.
2. Středoevropsko-balkánská oblast; ta zaujímá horské soustavy střední a jihovýchodní Evropy. V této druhé části není areál souvislý a rozpadá se na jednotlivá horstva, zvláště na jihu. Jsou to:

- Hercynsko-karpatská oblast
- Alpská oblast
- Dinárská oblast
- Rhodopská oblast



Obr. 1: Areál rozšíření smrku ztepilého (Euforgen, 2017)

Smrk je hlavní hospodářskou dřevinou České republiky. Je to světlomilná dřevina, v mládí snášejí zástin, dorůstající až 50 m. Její kořenový systém je povrchový, tudíž značně náročný na půdní vlhkost. Příznivá stanoviště se vyznačují rovnoměrnou vlhkostí (Úradníček, 2014).

Dle zprávy o stavu lesa a lesního hospodářství České republiky z roku 2015, smrk zastupuje v dřevinné skladbě 50,6 % z celkové plochy lesů ČR (MZe, 2016).

Na celém našem území je zastoupen horský smrk hercynsko-karpatské oblasti. Hlavním rozšířením jsou okrajová horstva: Novohradské hory, Krušné hory, Český les, Šumava, Jizerské hory, Krkonoše, Orlické hory, Jeseníky. Řidší je zastoupení smrku ve vnitrozemských horských skupinách, zejména na celé Českomoravské vrchovině, v Brdech, Slavkovském lese, Dražanské vrchovině a Oderských vrších. Jelikož je smrk naší hlavní hospodářskou dřevinou, je oporou dřevařského průmyslu. Zpracovává se na řezivo, papír i palivo. Poskytuje dřevo stavební, truhlářské či nástrojařské (Úradníček, 2014).

3.3 Chřadnutí smrku

Chřadnutí smrkových porostů je výsledek společného působení abiotických a biotických faktorů, který se projevuje zhoršeným zdravotním stavem, fyziologickým stavem a v určitých případech končí uhynutím stromů (Čermák, 2010). Jednotlivé faktory lze také rozdělit na predispoziční, iniciační (počáteční) a mortalitní (smrtící, koncové), kde každý faktor zaujímá v různých situacích jiné postavení (Manion, Lachance, 1992).

Jedním ze základních předpokladů jak pěstovat smrk v dobrém zdravotním stavu, je jeho správný výskyt. Ekologické optimum smrku ztepilého je od 5. do 9. lesního vegetačního stupně (lvs), kde je smrk dominantou. Produkční optimum má však trochu jinde, a to od 3. lvs až do 7. lvs. Zde je zapotřebí nastavit taková opatření, aby se dosáhlo jeho mytních dimenzí (Kantor, 2015). Nejnáchylnější stanoviště pro pěstování smrků se jeví hospodářské soubory (HS) 21, HS 23, HS 27, HS 41, kde jsou porosty intenzivně ohrožovány suchem a extrémními letními teplotami (Cudlín et al., 2004).

Do komplexu faktorů, které způsobují chřadnutí smrku, patří neuspokojivý stav chemismu lesních půd v důsledku předchozí imisní zátěže, nedostatečné srážky a vysoké teploty během vegetační sezóny v souvislosti s globálními klimatickými změnami (Dušek, 2015). Tyto faktory se označují jako abiotické. Dalšími faktory, které patří do tohoto složitého komplexu, jsou faktory biotické, např. podkorní hmyz nebo houbové patogeny. Ty však působí převážně sekundárně.

Potřebná či nutná opatření proti chřadnutí smrkových porostů je především extrémní omezení či ukončení pěstování smrku ve 3. lvs a omezení pěstování ve 4. lvs, tzn. vrátit smrk do jeho nejpříznivějších stanovišť (Čermák, 2014).

3.3.1 Chemický stav půd

Vlivem imisní zátěže dochází ke snižování obsahu živin v půdě. Velký problém přináší dopad mokrých depozic SO_4^{2-} a NO_3^- , které degradují půdy, ale i suchých depozic SO_2^- a NO_x , které při kontaktu s jehličím stromů způsobují poškození chlorofylu a následné usychání jehlic (ČHMÚ, 2017).

Působením SO_4^{2-} dochází k okyselení půd, tzv. acidifikaci. Ta způsobuje, že v půdě dochází k vyplavování bazických kationtů (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) do nižších vrstev půd (Cienciala et al., 2016). Tyto prvky jsou důležité nejen pro udržení kyselosti půd, ale také pro výživu vegetace. Reakce kořenů na vyplavování bází je zploštění kořenového systému, které vede k nestabilitě stromů. Právě kvůli ochuzování půd o báze nedochází k neutralizování kyselých vstupů (Samec et al., 2008). Jednou z dalších příčin, proč dochází k ochuzování lesních půd, je naopak pomalá tvorba bazických kationtů z podloží, na kterém se půda nachází. Velký problém mají půdy na žulách nebo křemencích. Tyto horniny obsahují malé množství bází, které ještě zároveň pomalu zvětrávají. Dochází tedy k ubývání důležitých prvků, které jsou schopny neutralizovat kyselou depozice. Kyselost půd přináší také opad jehličí ze smrkových monokultur (Hruška et al., 2009). Jedním z následků acidifikace půd je žloutnutí smrkových porostů, snižování přírůstu nových jehlic a v konečné fázi jejich opadávání (tzv. defoliace), které je způsobováno nedostatkem hořčíku (Mg) v půdě vlivem přijímání rozpuštěného hliníku (Semelová, Vacek, 2010).

Součástí mokrých depozic, jak je zmíněno výše, je také NO_3^- . Dopady těchto aniontů přináší pro lesní ekosystémy změnu druhové skladby ve prospěch druhů náročných na příjem dusíku. Druhým negativním dopadem je zrychlený růst dřevní hmoty, který přináší nestabilitu porostů (Hruška et al., 2009).

Dlouhodobé narušování půdního chemismus vede k oslabení zdravotního stavu porostů a snižuje jejich odolnost vůči ostatním vlivům, jako jsou epizody sucha, větrné kalamity či napadení houbovými patogeny a hmyzími škůdci (Čermák et al., 2016).

3.3.2 Nedostatek srážek

Sucho je jedním z nejvýznamnějších příčin chřadnutí lesa. Omezuje růst rostlin, jejich vývoj a také produkci. Vlivem nedostatku srážek dochází k vytvoření vodního deficitu a následného vodního stresu, což má za následek snížení zdravotního stavu stromů, které jsou pak náchylnější na působení sekundárních činitelů (Zhang et al., 2005).

Vodní deficit vzniká především zvýšeným výdejem vody nebo sníženým příjmem vody. Ten je způsoben hlavně nedostatkem vody v půdě nebo vlivem zamrznání půd, kde se voda mění na vodní krystalky a v této podobě není přijatelná pro rostlinu, čímž dochází ke stresové reakci (Čermák et al., 2016). Nedostatek půdní vody a zvýšená transpirace rostlin vlivem vysokých teplot způsobuje problém transportu vody. Dochází k přerušení vodního sloupce v xylému. V místech přerušení se začínají vytvářet volné prostory, které se postupem času začínají plnit horkým vzduchem. Výsledkem je embolie a vyschnutí rostlin (McDowell et al., 2008). Největší problém pro porosty však představují jarní přísušky v době rašení. To je období, kdy strom potřebuje nejvíce vody. Jinak dochází ke snížení tvorby asimilačního aparátu (Slugeňová et al., 2011).

Při dlouhodobém suchu dochází například ke snížení fotosyntézy. Působením sucha se uzavírají průduchy, čímž se zabraňuje vysychání rostlin. Tím je zapříčiněná snížená produkce fotosyntézy a následné snížení příjmu uhlíku. Je tak způsobeno tzv. uhlíkové hladovění. Následkem tohoto hladovění je nedostatečné množství sacharidů, ale také vylučování volatilních (těkavých) látek, které upozorňují na zhoršený zdravotní stav jedinců a následné napadení biotickými činiteli (McDowell et al., 2008).

Nedostatek srážek se také odráží na radiálním růstu stromů. Vliv na to mají jednak srážky v daném roce, ale také srážky v roce minulém. Při stresu suchem dochází ke snížení ukládání chemických látek v kambiu, a tím je snížen růst kmene. Z tohoto vyplývá, že růst stromu je jedním z indikátorů vitality (Čermák, 2007).

Další problém, který přináší nedostatek srážek je ten, že při sníženém obsahu vody v půdě může docházet ke zvýšení množství hliníku v půdě, který následně ovlivňuje příjem vody a minerálních živin kořeny (Slugeňová et al., 2011).

3.3.3 Teplotní extrém

Teplotní extrém působí negativně ve svém maximu i minimu. V letním období jsou to vysoké teploty a v zimním zase nízké (mrazové) teploty. Následkem vysokých teplot v letním období a prudkým odcloněním porostů dochází ke vzniku korní spály.

Takto poškozené dřevo praská a postupně se odlupuje (Knížek et al., 2016). Vyšší teploty společně se suchem způsobují rozvoj generací hmyzích škůdců, které nejsou redukovány ani v zimním období. Následně pak ve velké míře ničí porosty se sníženou vitalitou a působí tak jako mortalitní faktor (Čermák et al., 2016).

V zimním období způsobují mrazové teploty poškození rostlinných pletiv. Působením dlouhodobých a opakovaných mrazových teplot dochází k vytváření krystalů ledu v pletivech, které svým zvětšeným objemem buňku mechanicky destruuji. Poškození postihuje jehličí, které rezne, ale také kmeny, na kterých se vytváří mrazové trhliny. Pokud se tyto rány v dostatečné rychlosti nezacelí, jsou vstupní branou pro napadení houbou a rozšíření hniloby. Mrazové teploty mohou mít stejné účinky jako dlouhotrvající sucho. Vlivem krystalů, které se vytvoří v mezibuněčných prostorech nebo mezi buněčnou stěnou a protoplastem dochází k odčerpávání vody z protoplastů. Výsledkem této ztráty vody je smrštění buněk – vysychání. Velký problém pro mladé porosty představují pozdní mrazy, které způsobují poškození rašících dřevin (Čermák, 2004).

Pro dřeviny nemusí být problémové jenom dlouhotrvající vrcholové teploty amplitudy, ale také teploty kolem nuly a jejich časté střídání. Například prudké střídání teplot přináší vznik mrazové kýly. Významným problémem pro smrkové porosty je také fyziologická sypavka. Příčinou tohoto poškození je výrazný vzestup teplot z bodu mrazu na teploty nad nulu. Tím je nastartována zvýšená transpirace, ale jelikož nedochází k dostatečnému zásobování vodou kořeny, která je příliš studená nebo ve zmrzlé formě, dochází ke sníženému obsahu vody v pletivech pod únosnou míru. Výsledkem je červení, hnědnutí a následné odumírání především mladších jehlic (Čermák et al., 2014).

3.4 Houbové patogeny

Houbové patogeny svým působením snižují hodnotu a stabilitu stromů a zvyšují riziko mechanického selhání stromů (Bieker et al., 2010). V průběhu rozkladných procesů uvolňují houby znatelné množství iontů. Ionizační mechanismy jsou v podstatě dva. První z nich jsou hnědé hniloby, které zvyšují kyselost tím, že uvolňují vodíkové ionty, a ty následně způsobují snížení odporu dřeva. Druhým mechanismem je bílá hniloba, která způsobuje hromadění kationtů a K-ionty. Díky své vysoké mobilitě, způsobují snížení odporu dřeva již od samého počátku rozkládajících procesů (Nicolotti et al., 2003).

Prvotní příčinou infekce smrku primárně parazitickými dřevokaznými houbami je nejčastěji narušení funkce kořenů v důsledku přísušku. Jemné koncové kořínky bývají mechanicky poškozené v důsledku působení tahových sil během vysychání půdy. Takto narušený kořenový systém zhoršuje zásobení hostitele vodou a predisponuje jej k infekci jak václavkami, tak i dalšími parazitickými i fakultativně parazitickými houbami, především pak kořenovníkem vrstevnatým (Jankovský, Jančařík, 1999).

3.4.1 Václavka smrková *Armillaria ostoyae* (Romagn.) Herink

Jedná se o saproparazitickou dřevokaznou houbu, která k parazitismu přechází na oslabených a přestárlých dřevinách (Černý, 1989). Václavka smrková napadá kořenové systémy dřevin – nezřídka oslabených či přímo poškozených (např. suchem, větrem či výsadbou). Významným indikátorem chřadnutí smrku je specifické ronění pryskyřice, které velmi často doprovází akutní napadení smrku václavkou (Cienciala et al., 2016). Smrkové porosty napadené václavkou vykazují v důsledku hniloby kořenů a pařezové části kmenů jednotlivých stromů labilitu a snadno podléhají náporu větru. Smrky dlouhodobě napadené václavkou jsou v důsledku vyhnílených kořenů nedostatečně zásobovány vodou a živinami a jen málo přirůstají, a to i v případech, kdy mají velkou a volnou korunu (Černý, 1989). Pod kůrou napadených jedinců se dále rozrůstá syroccium. V mýtních a předmýtních porostech smrku vyvolává déle trvající parazitace ještě nápadné lahvicovité ztloustnutí báze kmenu (Pešková, Soukup, 2013). Časem se na bázi kmene, resp. jeho pařezové a oddenkové části vytvoří dutina, která dobře poukazuje na přítomnost václavky smrkové (Soukup, 2005).

Po napadení dřevin václavkou může mít choroba v zásadě dvojí průběh: akutní a chronický. Chronický průběh onemocnění bývá obvykle běžnější. Hostitelská dřevina může být napadena a parazitována i několik desítek let. Život stromu však obvykle ještě přímo ohrožen nebývá. K tomu dochází až při tzv. akutním průběhu onemocnění, který nastává obvykle po fyziologickém oslabení dřeviny – v našich podmínkách nejčastěji výrazným přísuškem (Soukup, 2005).

U nás jsou václavkou nejvíce ohroženy smrkové porosty na živných stanovištích středních poloh. Z hlediska typologického jde především o živné řady B ve 3. a 4. lvs, reprezentované především skupinou lesních typů Querceto-Fagetum podle Zlatníka, případně soubory lesních typů živné řady 3. a 4. lvs, zvláště pak SLT 3B, 3H a 3S podle ÚHÚL (Jankovský, Jančařík, 1999).

3.4.2 Kořenovník vrstevnatý *Heterobasidion annosum* (Fr.) Bref.

Kořenovník vrstevnatý je z lesnického hlediska hospodářsky nejvýznamnější dřevokazná houba a její infekce často probíhá skrytě, bez vnějších symptomů (Čermák et al., 2014).

Kořenovník vrstevnatý je chorošovitá houba známá téměř po celém světě. Parazituje především na jehličnanech, méně často však i na listnácích. Tento známý původce tzv. „červené hniloby“ způsobuje v konečné fázi bílou voštinovitou hnilobu napadeného dřeva (Čermák, Mrkva, 2007). Napadá kořenové systémy nejrůznějších druhů dřevin, nezářídka oslabených či přímo poškozených nepříznivým působením abiotických faktorů (např. suchem či větrem). Napadení a poškození kořenů a později i hniloba kmenů u jehličnanů vyvolává často ronění pryskyřice především v oddenkové části kmene. To je ovšem nesespecifický znak, protože k tomuto dochází i při napadení stromu jinými druhy dřevních hub. Hniloba smrkových kmenů způsobená kořenovníkem je velmi charakteristická. Šíří se ze středu kmene k obvodu. Infikované dřevo je světle okrově hnědé, zpočátku pevné, tvrdé. Postupně se jeho zbarvení mění do červeno hněda a dřevo měkne. Pro tuto fázi hniloby se vžil v praxi běžně používaný název červená hniloba. Rozklad postupuje, až je dřevo zcela zmineralizované, světle okrové, s bělavým podhoubím a drobnými protáhlými černými ploškami. Touto konečnou fází se hniloba způsobená kořenovníkem velmi výrazně odlišuje od hniloby způsobené pevníkem krvavějším, který jinak rovněž způsobuje v konečné fázi bílou, avšak vláknitou hnilobu (Soukup, 2011).

3.4.3 Pevník krvavějící *Stereum sanguinolentum* (Alb & Schwein.) Fr.

Pevník krvavějící je nebezpečná saproparazitická houba jehličnatých dřevin. Největší škody způsobuje jako ranový parazit. Lze říci, že prakticky každé poranění běle jehličnanů se stává vstupní branou infekce pevníkem krvavějším. Poranění mohou vznikat při manipulaci se dřevem, opakujícím se ohryzem spárkaté zvěře nebo také kvůli mokrému sněhu či námraze, které způsobí vrcholkové zlomy (Čermák, Mrkva, 2007). Pevník krvavějící napadá jak dosud žijící stromy, tak i již odumřelé dřevo jehličnanů (Soukup, 2008).

V první fázi rozkladu je smrkové dřevo světle okrově až světle oranžově zbarveno. Na hranici zdravé a napadené části je šedofialová zóna. V této fázi je na příčném řezu kmenem smrku několik soustředných nepravidelných kruhů hniloby

a šedofialových zón. V další fázi rozkladu je dřevo výrazně oranžově hnědé a podélně se vláknitě rozpadá (Černý, 1989). Pevník krvavějící je houba rozkládající jak celulózní, tak ligninové složky dřeva a způsobuje tak v konečné fázi „bílou“ hnilobu (Soukup, 2008). Hniloba postupuje kmenem podle podmínek různou rychlostí, nejčastěji v rozmezí 10 až 50 cm za rok, v extrémním případě byl zjištěn vertikální postup až 70 cm za rok (Čermák, Mrkva, 2007). Délka kmene zasaženého hnilobou se nejčastěji pohybuje v rozmezí 2–4,5 m (Čermák, Jankovský, 2006). Projevem napadení pevníkem krvavějícím je ronící pryskyřice na povrchu kmene v místě poranění (Černý, 1989).

Vlivem působení hniloby pevníku krvavějícího dochází ke snížení stability stromů, což přináší riziko větrných, sněhových a námrazových polomů. Rozvoj hniloby pevníku přináší také snížení přírůstu stromu. Dále hniloba působí jako predispoziční faktor, snižuje vitalitu stromu a tím zvyšuje jeho náchylnost pro napadení kambioxylofágním hmyzem, např. *Ips typographus*, *Pytiogenes chalcographus* nebo *Polygraphus poligraphus* (Čermák, Jankovský, 2006).

3.5 Kůrovci

Kůrovci patří mezi nejznámější hmyzí škůdce. Jejich zdrojem potravy jsou stromy se zhoršeným zdravotním stavem vyvolané nejčastěji suchem. Takto oslabené stromy produkují feromony (volatilní látky), kterými jsou kůrovci přilákáni. Je známo, že v přírodních smrkových lesích se kůrovci (*Ips typographus*, *Ips amitinus*, *Ips duplicatus*, méně již ostatní druhy žijící hlavně ve větvích) podílejí spolu s některými dřevokaznými houbami (václavky, kořenovník vrstevnatý) na rozpadu zralého lesa (Mrkva, Kuchařík, 2006).

Mezi nejvýznamnější kůrovce na smrku patří lýkožrout smrkový (*Ips typographus*), který nalétává na oslabené stromy na rozhraní suchých a zelených větví. Poté se šíří po celém kmeni. Lýkožrout smrkový se nejčastěji vyskytuje ve smrkových porostech nad 60 let, a to především na osluněných porostních stěnách, nejčastěji jižní – jihozápadní expozice (Mrkva, Zahradník, 2004).

V posledních letech se také výrazně rozšiřuje lýkožrout severský (*Ips duplicatus*), který se k nám dostává z Bělovežského pralesa ze severního Polska. Jeho kontrola a obrana je komplikovaná, protože *Ips duplicatus* obvykle napadá stromy roztroušeně uvnitř porostu a soustředí se na koruny stromů. Jeho vývoj je dokončen nebo je ve značně pokročilém stadiu často ještě dříve, než jsou patrné první změny

ve zbarvení jehličí. Tyto barevné změny se mohou objevit až později a napadený strom pak poznáme podle opadávající kůry (Holuša, 2013).

Dalším korunovým kůrovcem je lýkožrout menší (*Ips amitinus*), který osídluje spíše horní části oslabených a čerstvě pokácených kmenů nebo kmeny s tenčí kůrou. Napadá proto zejména koruny starých smrků nebo tyčoviny a nastávající kmenoviny. Ve spodní části silnějších kmenů vždy ustupuje lýkožroutu smrkovému. K jeho přemnožení přispívají větrné nebo sněhové polomy (Lubojacký, 20012).

Ve vrcholových částech stromů převládá lýkožrout lesklý (*Pityogenes chalcographus*). Lýkožrout lesklý je významný podkorní škůdce dospívajících mlazin, tyčovin a tyčovín. Ve starších porostech osídluje koruny stromů (Čermák et al., 2014). Společně s lýkožroutem smrkovým (*Ips typographus*) patří mezi kalamitní škůdce.

Dalším hmyzím škůdcem na smrku je lýkohub matný (*Polygraphus poligraphus*), který zpravidla napadá jednotlivé stromy, kmeny se slabší kůrou obsazuje po celé jejich délce, na starších stromech obsazuje korunovou část kmene, případně silnější větve, výjimečně i celé kmeny. Lýkohub matný je druhem častým v porostech poškozených přísuškem (Knížek, 2015). Obvykle nevznikají spontánně ohniska a napadené stěny, ale dochází k prořezávání porostů, což bylo typické zejména pro oblast Českomoravské vrchoviny. Napadení se pozná, podobně jako u lýkožrouta smrkového, barevnými změnami jehličí, které se však projevují až krátce před jeho výletem (Zahradník, 1999).

Ve spodních partiích stromů nejčastěji nalezneme lýkohuba smrkového (*Denroctonus micans*) a dřevokaze čárkovaného (*Xyloterus lineatus*).

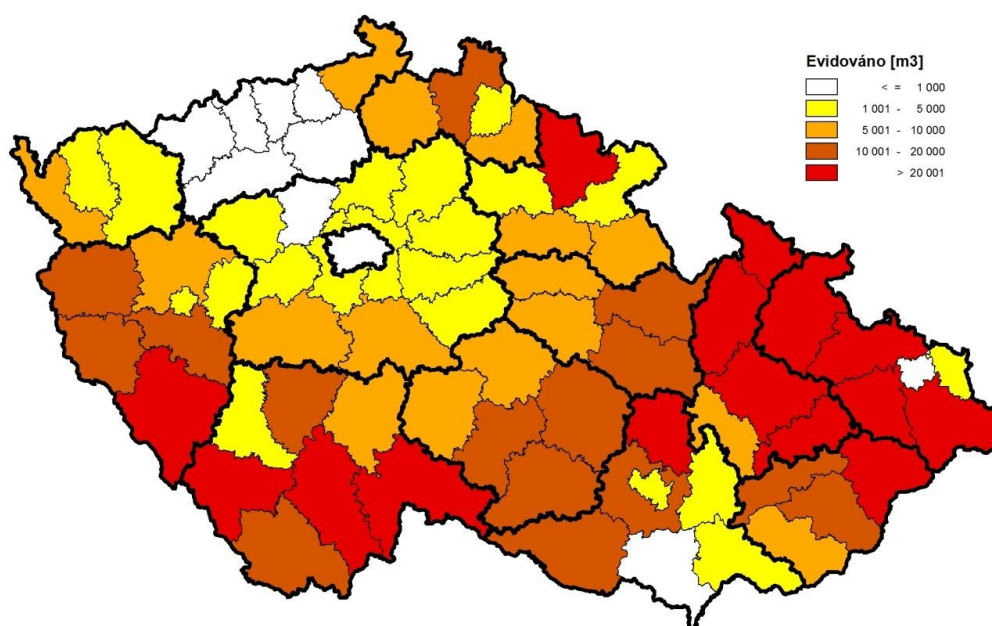
K výraznému rozšiřování kůrovců a jeho působení škod přispívá především klimatický faktor, ale také faktor lidský. Díky němu se smrk dostal na hranici, někdy i mimo, svého ekologického optima, a tím se snížila vitalita stromu a odolnost vůči působení *Ips typographus* a dalších hmyzích škůdců (*Ips duplicatus*, *Pityogenes chalcographus*, *Polygraphus poligraphus*). Celkově tyto hmyzí škůdci využívají oslabenost dřevin. Ta je způsobována nedostatečným množstvím srážek a vytvoření vodního stresu. Dalšími klimatickými faktory, které způsobují rozšiřování populací kůrovců a následné chřadnutí smrkových porostů je nerovnoměrný chemický stav půd, výrazné teplotní extrémy, které způsobují oslabení smrku. Vyšší teploty ve vegetační sezóně a častější suchá období vytvářejí příznivé podmínky pro gradace populací hmyzu, a to zejména vícegeneračních druhů. Při vyšší teplotě na jaře začíná dříve aktivita zimujících

jedinců, zkracuje se doba vývoje jedné generace, a to spolu s prodloužením vegetační doby vede k zvýšení počtu generací (Čermák, Pokorný, 2015).

3.5.1 Výskyt kůrovců v ČR

V roce 2015 bylo v České republice evidováno 2,24 mil. m³ smrkového kůrovcového dříví, což představuje výrazný nárůst (o více než 70 %) ve srovnání s rokem 2014, kdy bylo zaznamenáno cca 1,3 mil. m³. Na obr. 2 můžeme vidět objemy kůrovcového dříví v roce 2015 podle jednotlivých regionů (MZe, 2016).

Celkový objem vytěženého smrkového kůrovcového dříví činil v roce 2015 – 1 477 tis m³. Největší objemy vytěženého kůrovcového dříví jsou stabilně na střední a severní Moravě. V minulém roce bylo evidováno v Moravskoslezském kraji 594 tis. m³ a v Olomouckém kraji 248 tis. m³ kůrovcového dříví, což je necelých 60 % z celé České republiky. Dalšími kraji, kde se výrazně rozšířil kůrovec je kraj Jihočeský (121 tis. m³), Zlínský (114 tis. m³), ale také Plzeňský, Jihomoravský a kraj Vysočina (Knížek et al., 2016). Na území ŠLP Masarykův les Křtiny bylo vytěženo za probíhající decennium od roku 2013 ročně v průměru 2 726 m³ kůrovcového dříví.



Obr. 2: Objem kůrovcového dříví v roce 2015 (MZe, 2016)

3.6 Tomografie

Tomografie (z řeckého slova *tomos*, plátek) umožňuje rekonstrukci příčných řezů objektu pomocí měření prováděného na povrchu objektu a měření energie, která prochází samotným objektem (Nicolotti et al., 2003).

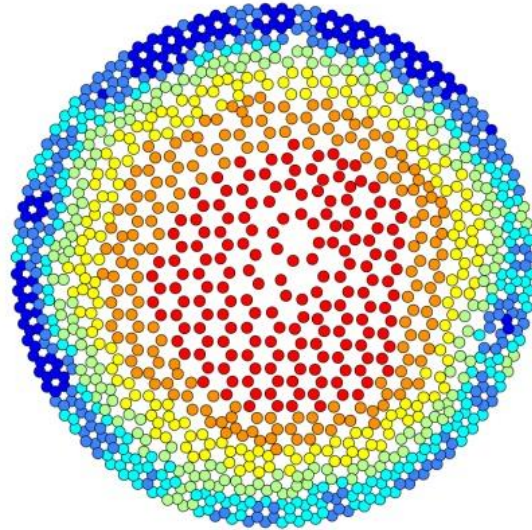
Tomografie slouží k včasnému odhalení vnitřního rozkladu živých stromů. Zejména u stromů s tvrdým dřevem může poskytnout významný přínos pro odvětví dřevozpracujícího průmyslu. Důležité je zaměřit se na přesné hodnocení kvality a odhadu množství škod, které vedou k nejlepšímu využití zdrojů (Tainter, Baker, 1996).

3.6.1 Elektrická impedanční tomografie

Elektrická impedanční tomografie (EIT, někdy nazývaná také elektrická odporová tomografie) je pokročilá metoda pro zjišťování stavu kmene živých stromů. Metoda je založena na snímání elektrické vodivosti, respektive elektrického odporu, mezi jednotlivými elektrodami umístěnými kolem kmene (Horáček, 2012). Elektrický odpor a elektrická vodivost jsou fyzikální vlastnosti, které umožňují vyvození závěrů o struktuře objektů (Göcke, 2011). V současné době je pomocí elektrického impedančního tomografu řešena problematika výskytu hnilob a stability dřeviny. S pomocí elektrického tomografu je možné identifikovat v kmeni stromu běl, jádro, hniloby, dutiny a z těchto poznatků posuzovat stabilitu stromů. Impedanční tomograf ukazuje veškerý odpor průřezu stromu a podle naměřených hodnot odporů dokáže identifikovat místa s hnilobou nebo dutinou. Nízký odpor může naznačovat zvýšený obsah vlhkosti, zatímco duté struktury způsobují zvýšenou úroveň odporu (Borman et al., 2009).

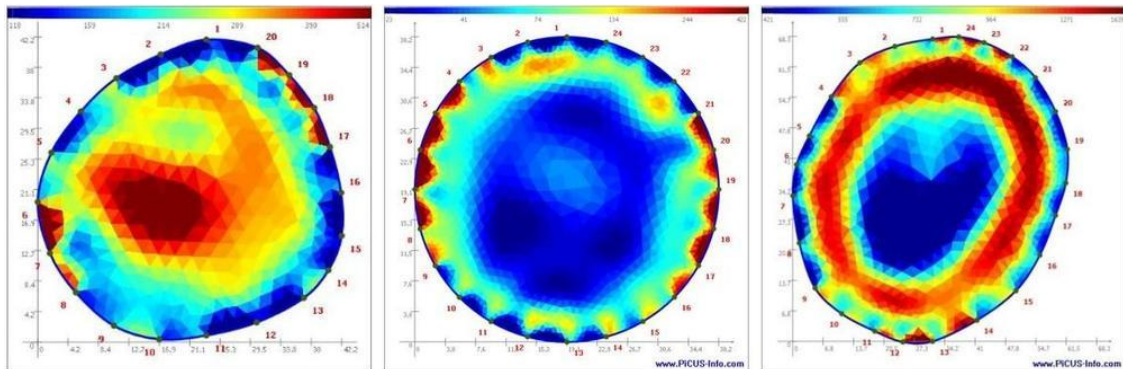
Elektrický odpor dřeva je ovlivněn vlhkostí a obsahem volných iontů. Houby nebo tlející dřevo většinou vlhkost zvyšují, a tím dochází ke snížení elektrického odporu. Na elektrický odpor dřeva má také vliv chemické složení dřeva a buněčná struktura (Göcke, 2011).

Zdraví jedinci smrku mají na tomogramu (obraz vnitřního stavu kmene) zobrazenou jádrovou kruhovou zónu vždy červeně. Je to oblast s vyššími hodnotami elektrického odporu. Na jádrovou zónu navazuje tenká zelenožlutá přechodová část, která slouží k oddělení jádra a běle. Bělové dřevo je na tomogramech vyobrazeno modrou barvou, což je oblast s nízkými hodnotami elektrického odporu (Humplík et al., 2016). Celkové vyobrazení tomogramu je možné vidět na Obr. 3.



Obr. 3: Tomogram zdravého jedince (Humplík et al., 2016)

Se zvětšující se plochou hniloby je na tomogramech viditelné narušení celistvosti jádra – objevují se zóny s nízkým odporem spojující středovou část s částí obvodovou. U pokročilých stádií hniloby je pak patrný rozpad jádrové části – na jedné straně vzniká v jádrové části rozsáhlá zóna s nízkým odporem, na straně druhé mohou být v místech s určitou fází pokročilé hniloby vytvořeny zóny s vysokým odporem (Humplík et al., 2016).



Obr. 4: Tomogramy napadených stromů (Göcke, 2011)

3.6.2 Použití EIT

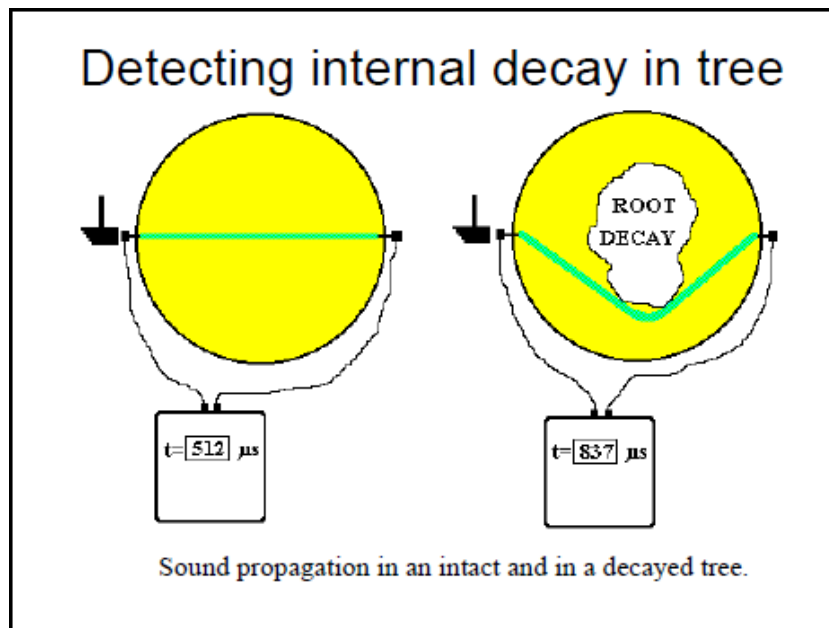
Brazee et al. (2011) uvádějí použití elektrické impedanční tomografie na listnatých dřevinách v Severní Americe, konkrétně v lesích Connecticutu. Měření probíhalo na devíti stromech, z toho čtyři byly javory červené (*Acer rubrum* L.), tři břízy tuhé (*Betula lenta* L.), a dva buky velkolisté (*Fagus grandifolia* Ehrh.). Na těchto listnatých dřevinách byla použita k detekci a kvantifikaci vnitřního rozkladu

v živých stromech akustická tomografie (Sonic Tomography – SoT) a elektrická impedanční tomografie (EIT). Tyto stromy byly zároveň pokáceny a rozřezány pro srovnání s výsledky EIT. Z výsledků, které byly pořízeny, lze říci, že SoT byla přesná pro stanovení rozsahu interního kazu ve vzorových stromech. Pomocí EIT byly schopni určit počínající rozklad dřeva.

Další použití tomografie popisují ve svém díle Nicolotti et al. (2003), kteří provedli výzkum na platanech (*Platanus hybrida* Brot.). Pro detekci hniloby na stromech byly použity 3 různé druhy tomografie: elektrická, ultrazvuková a georadarová. Jejich výsledky byly srovnány s výsledky z penetrometru. Elektrická tomografie odhalila nízké odporové zóny okolo centrálního kmene. Při porovnání tomogramů a výřezů kmene bylo umístění hniloby téměř stejné. Dále byla pomocí elektrické impedanční tomografie zjištěna souvislost mezi zónou s vysokou vodivostí a zónou s nízkým odporem. Ultrazvuková tomografie prokázala, že je velmi účinným nástrojem pro zjišťování vnitřních vad kmene. Dokázala určit místo s poškozením a také velikost a tvar poškození. Zvuk totiž umožňuje detekovat rozhraní mezi zdravou a rozkládající se částí stromu pomocí odrazu zvukových vln. Pomocí georadarové techniky byl zjištěn rozdíl elektromagnetické impedance mezi zdravou (tvrdou) a shnilou (měkkou) částí stromu. Všechny tyto techniky byly schopné zjišťovat přítomnost vnitřního rozkladu díky fyzikálním vlastnostem dřeva. Především byla zachycena snížená hustota a zvýšená vlhkost dřeva.

3.6.3 Akustická tomografie

Akustická tomografie je metoda založená na rychlosti průchodu zvukových vln materiálem a slouží k analýze stability stromů. Rychlost signálu je přímo úměrná tuhosti a nepřímo úměrná hustotě materiálu. V případě, že se objeví v cestě signálu dutina či prasklina, dochází ke snížení jeho rychlosti. Toto snížení tak determinuje poškození vnitřní části kmene (Szorádová, Praus, 2010).



Obr. 5: Průchod zvukových vln zdravým a poškozeným dřevem (Divos, 2009)

Rychlost průchodu signálu se liší podle typu dřevin. Například v jehličnatých dřevinách se rychlost signálu pohybuje okolo 1000 m/s (smrk 1310 m/s), u listnatých dřevin je to cca 1500 m/s (dub 1620 m/s, bříza 1140 m/s). Měření pomocí akustického tomografu se provádí pomocí hřebů zatlučených ve dřevě, takže se jedná o jednoduchou a zároveň levnou metodu zjišťování hniloby a defektů ve vnitřních částech kmene (Praus, 2016). I přes toto mírné poškození stromů se jedná o metodu nedestruktivní. Pro lepší a přesnější interpretaci výsledků je často měření akustickým tomografem doplňováno tahovou zkouškou, která komplexně zjišťuje stabilitu stromů (Li et al., 2011). Výsledkem celého měření je grafické vyjádření vnitřního stavu kmene, tedy tzv. tomogram. Oproti tomogramům z elektrické impedanční tomografie nelze na akustických tomogramech rozlišit jádro a běl. Zdraví jedinci jsou na tomogramech vyobrazovány zelenou barvou. Vlivem poškození dochází k barevným změnám na tomogramech. Místo s hnilobou je nejprve zbarveno červenou barvou a později po vytvoření dutiny má světle modrou barvu. Akustický tomograf se hojně využívá především při detekci zdravotního stavu městské zeleně, památných stromů či stromů v parcích (Divos, Szalai, 2002; Nicolotti et al., 2003; Socco et al., 2004; Wang et al., 2005, 2007). V lesnictví se používá zejména proto, aby nedocházelo ke snižování ekonomické hodnoty dřeva. Hlavními výrobci akustických tomografů je německá firma Picus a maďarská společnost Fakopp.

4 Metodika

4.1 Charakteristika vybraného území

Měření bylo prováděno na ŠLP Masarykův les Křtiny, polesí Habrůvka, porostní skupina 178A11 a 178A10. Jednalo se o monokultury smrku ztepilého. V porostní skupině 178A11 byl smrk zastoupen asi z 90 %. Další dřevinou, která se zde nacházela, byla jedle bělokorá v zastoupení asi 8 %, zbylé 2 % tvořila douglaska tisolistá. Porostní skupina 178A10 byla tvořena z 95 % smrkem ztepilým, ze 4 % jedlí bělokorou a z 1 % douglaskou tisolistou. Obě porostní skupiny jsou spíše rovinaté. Vybrané území se nachází ve 4. lvs, na hospodářském souboru 45, lesní typ 4H1 – hlinitá bučina. Celková výměra obou porostních skupin je 5,92 ha.

4.2 Elektrický impedanční tomograf (EIT)

4.2.1 Měření pomocí elektrického impedančního tomografu (EIT)

Měření se provádí přes bodové elektrody (nehty) rozmístěné po celé hranici objektu. Proud se pouští do objektu vždy dvěma z těchto elektrod. Elektrické pole závisí na odporu distribucí a měří se v párech ostatními elektrodami za účelem získání potenciálního rozdílu napětí (Göcke, 2011).

Elektrický impedanční tomograf měří absolutní vodivost na průřezu kmenem. Dokáže tedy zjistit množství vody na průřezu v rastrové podobě, kde je rozlišitelné množství vody v každém rastrovém poli. Měří se ve výčetní výšce 24 elektrodami, které pronikají pod kambium. Tyto senzory působí jen velmi malé poranění, které zanedbatelně ovlivňuje vitalitu stromu, proto se tato metoda dá označit za nedestruktivní. Přes tyto senzory se změří stejnosměrným proudem obsah vody vždy mezi dvěma sousedními senzory (Göcke, 2011).

Přístroj je schopen rozlišit jádro a běl, plochy s aktivním rozkladem dřeva i plochy již rozložené, zejména v kombinaci s akustickým tomografem. Očekávaným výsledkem jsou cenné poznatky o vitalitě smrku na konkrétních územích. Dále ověření použitelnosti a návrhy konkrétních metodických postupů použitelných pro jednotlivé indikátory a jejich kombinace.

Na vzorníkových stromech vybraných ploch byla impedančním tomografem měřena celková vodivost. Data byla získávána a zpracována dle manuálu vytvořeného pro tento přístroj – PiCUS: Treetric (Göcke, 2011).

4.2.2 Zpracování dat z EIT

Získaná data byla zpracována softwarem PiCUS Q72 EXP Treetric. Ten poskytuje jak grafické výsledky (tomogramy), tak datové soubory, které doplňují hodnoty odporů rastru tomogramu a určují souřadnice vrcholů rastrových polí v tomogramu. Ze souřadnic vrcholů rastrových trojúhelníků byly vypočteny souřadnice X/Y jejich středů. Ke každému středu trojúhelníku tak byla přiřazena jedna naměřená hodnota elektrického odporu. Pomocí souřadnic středů byly v softwaru ArcMap 10.2 vyneseny body, ke kterým byla doplněna sedmistupňová barevná škála na základě četnosti výskytu hodnot elektrického odporu na celkové škále odporu každého stromu. Takto zobrazené tomogramy byly využity pro oddělení jádrových a bělových polygonů s hodnotami elektrického odporu. Oddělení bylo vedeno po tenké zelené přechodové vrstvě, která se nachází mezi modrou bělovou a žlutou přechodovou vrstvou. Při oddělování v místě zobrazené hniloby byla udržována stejná tloušťka bělové vrstvy, jako ve zdravé části kmene, až k opětovnému navázání na zelenou vrstvu (Humplík et al., 2016).

4.3 Akustický tomograf

4.3.1 Princip měření akustického tomografu

Princip akustického tomografu je založen na měření rychlosti průchodu zvukového signálu materiálem. Ten se generuje úderem kladívka na snímače. Zvukový impuls se od daného místa šíří všemi směry a snímají jej senzory upevněné po obvodu kmene. Rychlost šíření signálu je přímo úměrná hustotě a tuhosti materiálu. Změní-li se některá z těchto hodnot, dochází ke snížení rychlosti průchodu. Jednotlivé snímače umístěné po obvodu kmene jsou vzájemně propojeny. Pomocí zařízení Bluetooth jsou na závěr spárovány s přenosným počítačem. Následně dochází k poklepání jednotlivých sond, které při kontaktu s kladívkem vpouštějí zvukový signál do dřeva. Měří se čas průchodu signálu k jednotlivým sondám. Pomocí tvaru kmene a času jednotlivých signálů je vytvořena mapa rychlostí a z ní následně vnitřní obraz kmene. Výsledkem měření je graf, který na spojnici jednotlivých snímačů zobrazuje rychlost signálu. Z tohoto grafu je poté vytvořen tomogram (ukazatel plošného zobrazení). Barevná škála tomogramu je uvedena v Příloze č. 2.

4.3.2 Vlastní měření pomocí akustického tomografu

Měření akustickým tomografem bylo provedeno pomocí přístroje ArborSonic 3D Accoustic Tomograph zapůjčeného z ústavu Nauky o dřevě (ÚNOD). Výrobce tohoto přístroje je firma Fakopp Enterprise BT.

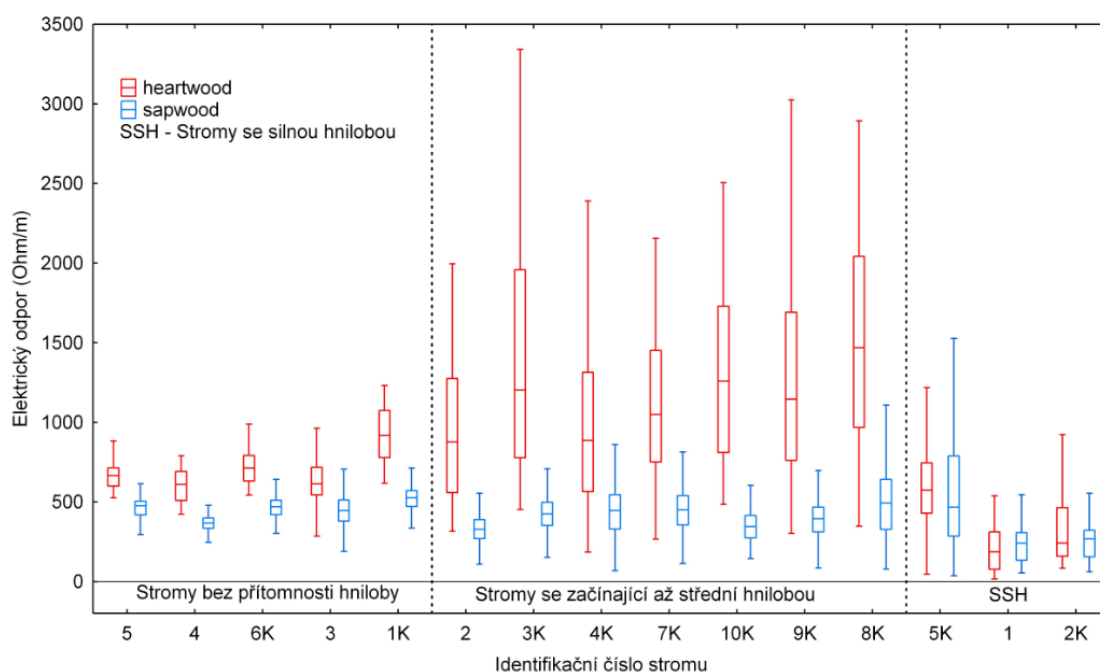
U stromu vybraného k měření byla nejprve odměřena výška 130 cm od zemského povrchu. V této výšce byly umístovány jednotlivé hřeby. První hřeb byl umístěn směrem na sever, který byl určen pomocí buzoly. Gumovou paličkou byl hřeb zatlučen do stromu tak, aby se dostal do kontaktu se dřevem. Následně byl ve výšce 130 cm změřen obvod kmene. Toto číslo bylo poděleno počtem hřebů, v mém případě jich bylo 8 a byla tak získána vzdálenost mezi jednotlivými hřeby. Podle těchto vzdáleností byly hřeby rozmístěny proti směru hodinových ručiček po celém obvodu kmene a následně zatlučeny paličkou. Očíslované hřeby byly spojené podle čísel se stejně číslovanými senzory. Vzájemně byly také spojeny senzory, vždy od nižšího čísla k vyššímu a poslední senzor byl propojen s vysílačem Bluetooth. Poté byl použit počítač s nainstalovaným softwarem ArborSonic 3D verze 5.2.115, do kterého byl zanesen název měřeného stromu v latině, obvod kmene, tvar kmene, hloubka zatlučeného hřebu a tloušťka borky. Následně byl zapnut vysílač přístroje a spárován s počítačem. Po spojení těchto dvou přístrojů se začalo kladívkem ťukat na jednotlivé hřeby. Po zvukovém signálu byly tyto úkony opakovány asi 5–10krát u každého ze zatlučených hřebů. Oťukáním všech 8 hřebů bylo ukončeno spárování. Závěrem bylo softwarem zobrazeno plošné zobrazení kmene v místě měření. Poté byl vypnut vysílač Bluetooth na tomografu a postupně odpojovány senzory od sebe a od hřebů. Jednotlivé měřené stromy byly vyfoceny běžným fotoaparátem pro možnost srovnání vnějšího vzhledu s výsledky tomografu.

Získaná data byla zpracována softwarem ArborSonic 3D. Ten poskytuje stejně jako software PiCUS Q72 EXP Treetric grafické výsledky (tomogramy) a datové soubory, které však obsahují hodnoty rychlostí mezi jednotlivými snímači. Z těchto datových souborů byly vytvořeny grafy regresní analýzy v programu Microsoft Office Excel 2007. Software ArborSonic 3D také automaticky vypočítává plochu defektu.

5 Výsledky

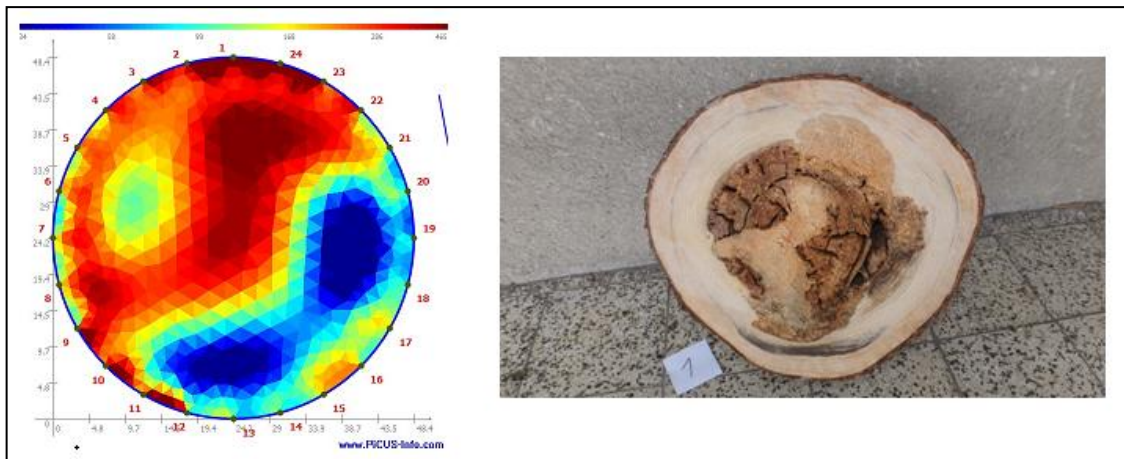
5.1 Elektrický impedanční tomograf

Elektrickým impedančním tomografem bylo naměřeno celkem 15 jedinců smrku ztepilého. Tyto stromy byly vybírány podle vzhledu, především byli vyhledáváni jedinci se zbytněným oddenkem, poškozeným kmenem nebo s jinými příznaky poškození (např. ronící prskyřice). Pro srovnání grafického výsledku a skutečného stavu byly stromy pokáceny a z každého stromu vyříznuty disky. Porovnání tomogramů s výřezy je demonstrováno na 5 příkladech (Obr. 7–10).



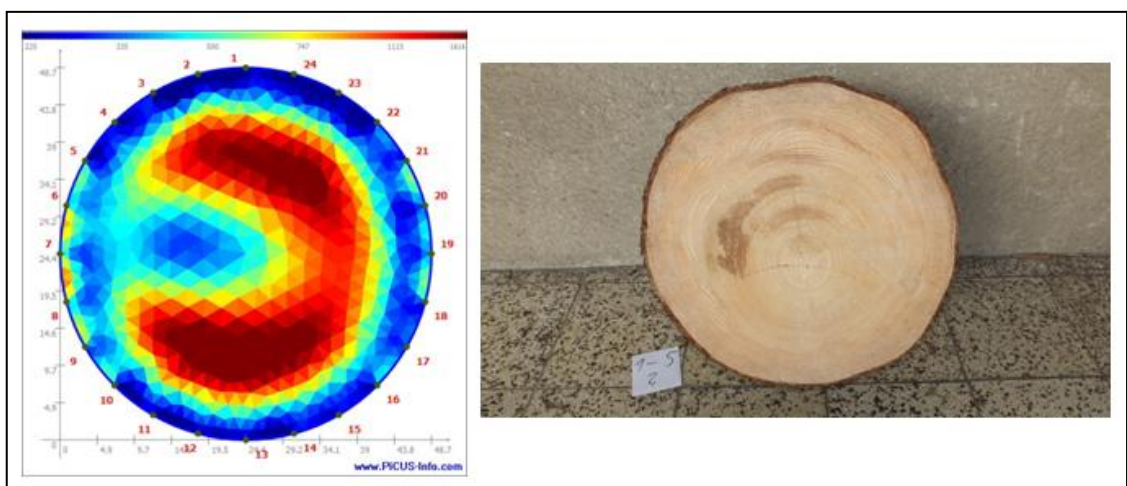
Obr. 6: Graf hodnot elektrického odporu rozdělené podle jádra (heartwood) a běle (sapwood)

S využitím metodiky Humplík et al. (2016) bylo rozlišeno 5 jedinců bez přítomnosti hniloby, 7 stromů se začínající až středně pokročilou fází hniloby a 3 stromy se silnou hnilobou.



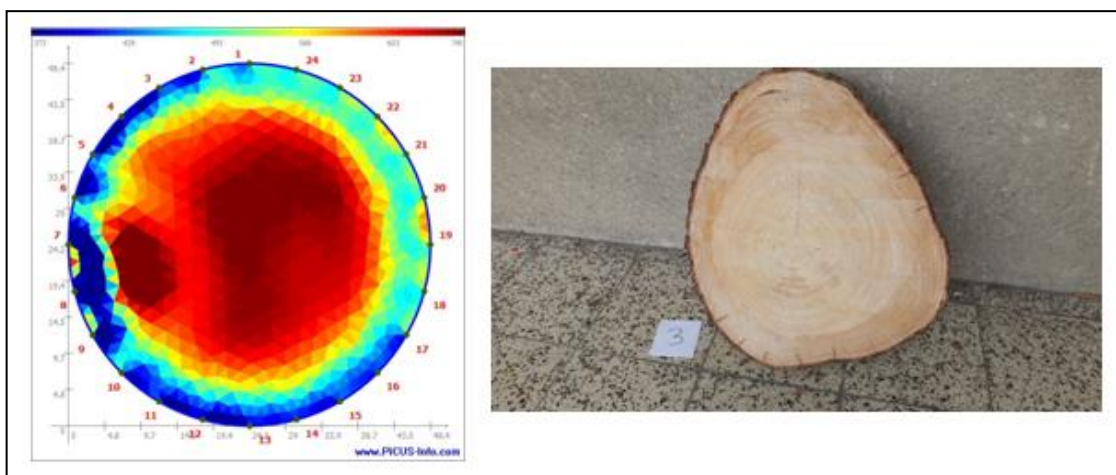
Obr. 7: Porovnání tomogramu se skutečným výřezem stromu č. 1

Na Obr. 7 je vidět, že strom č. 1 je podle výřezu správně zařazen do kategorie stromů se silnou hnilobou. Z tomogramu je však patrné, že z něj nelze přesně vymezit umístění hniloby. Lze jen určit, že hniloba postihuje podstatnou část průřezu.



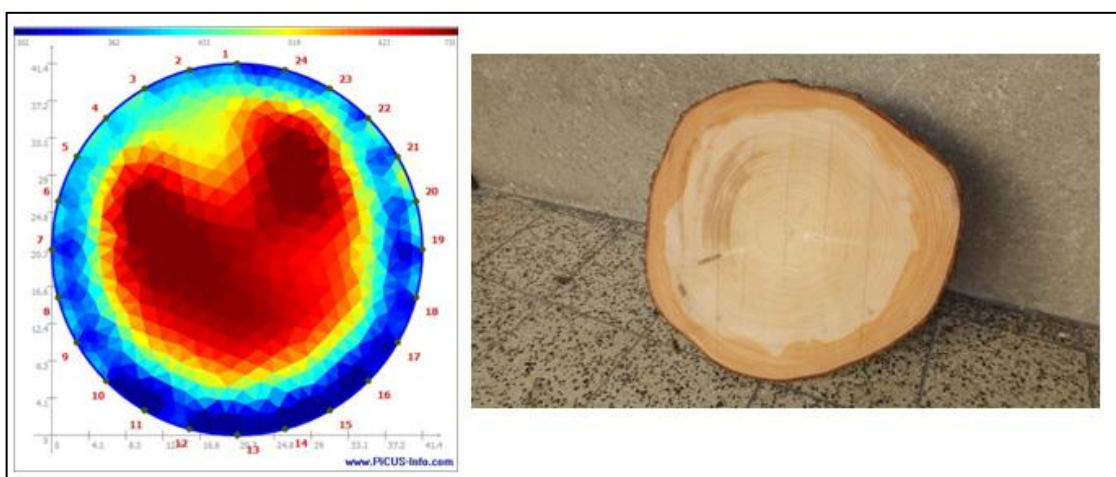
Obr. 8: Porovnání tomogramu se skutečným výřezem stromu č. 2

Tomogram na Obr. 8 ukazuje umístění hniloby stromu č. 2. Tomogram a skutečný výřez je téměř totožný. Podle hodnot z datasetů se jedná o strom se začínající až střední hnilobou stromu, což výřez potvrzuje.



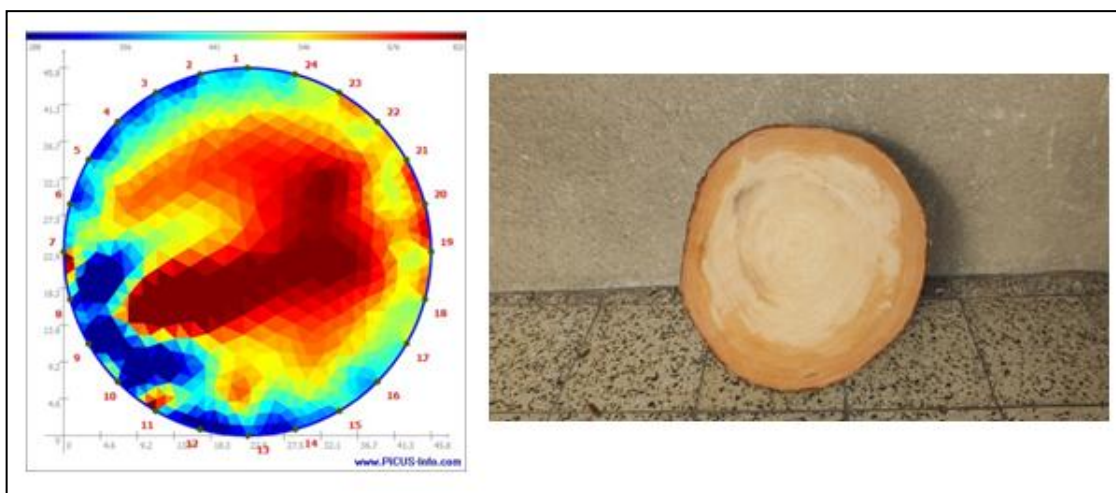
Obr. 9: Porovnání tomogramu se skutečným výřezem stromu č. 3

Obr. 9 ukazuje porovnání stromu č. 3, na kterém jsou vidět shodné obrazy tomogramu a skutečného výřezu. Datové soubory řadí tento strom do skupiny zdravých stromů, kam skutečně patří.



Obr. 10: Porovnání tomogramu se skutečným výřezem stromu č. 4

Z výsledků tomogramu stromu č. 4 a také podle grafu, se jedná o zdravý strom. Fotografie naznačuje, že by se mohlo jednat o strom s počínající hnilobou. Na grafu však žádné známky přítomnosti hniloby nejsou. Tento fakt může být počínající fází hniloby, kterou elektrický odpor nezachytil.

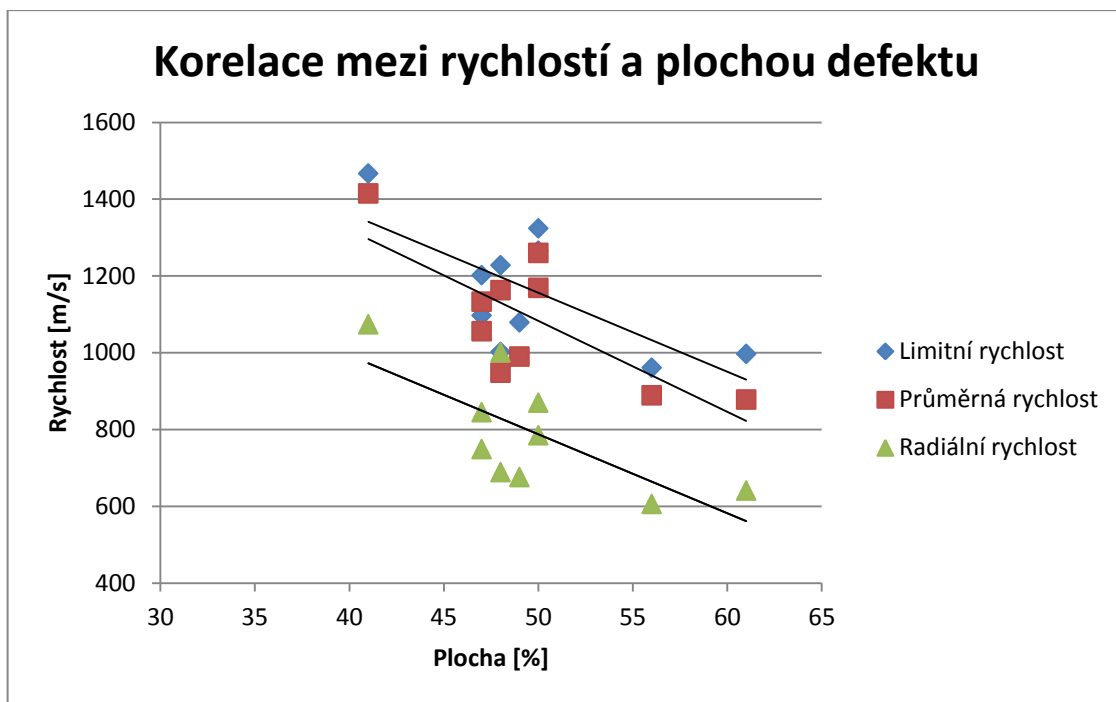


Obr. 11: Porovnání tomogramu se skutečným výřezem stromu č. 5

Podle skutečného výřezu a grafu se jedná o zdravý strom. Na Obr. 11 je vidět tomogram stromu č. 5, ze kterého nelze prokazatelně říci, zda se jedná o strom s hnilobou nebo bez hniloby.

5.2 Akustický tomograf

Pomocí akustického tomografu bylo naměřeno celkem 30 stromů. Jejich výběr byl stejný jako u měření elektrickým impedančním tomografem. Měřením bylo zjištěno 20 jedinců s žádným nebo malým poškozením a 10 jedinců s výrazným poškozením. Výsledná plocha defektu jednotlivých stromů je programem stanovený odhad podílu poškozené části průřezu z celkové plochy průřezu vyjádřené v procentech. Statistické zpracování naměřených dat ukázalo vysokou závislost rychlosti signálu a plochy defektu u stromů s poškozením nad 10 % ($R^2 = 0,55$), naopak u stromů s poškozením pod 10 % byla závislost nízká ($R^2 = 0,02-0,05$), viz Obr. 12 a 13.

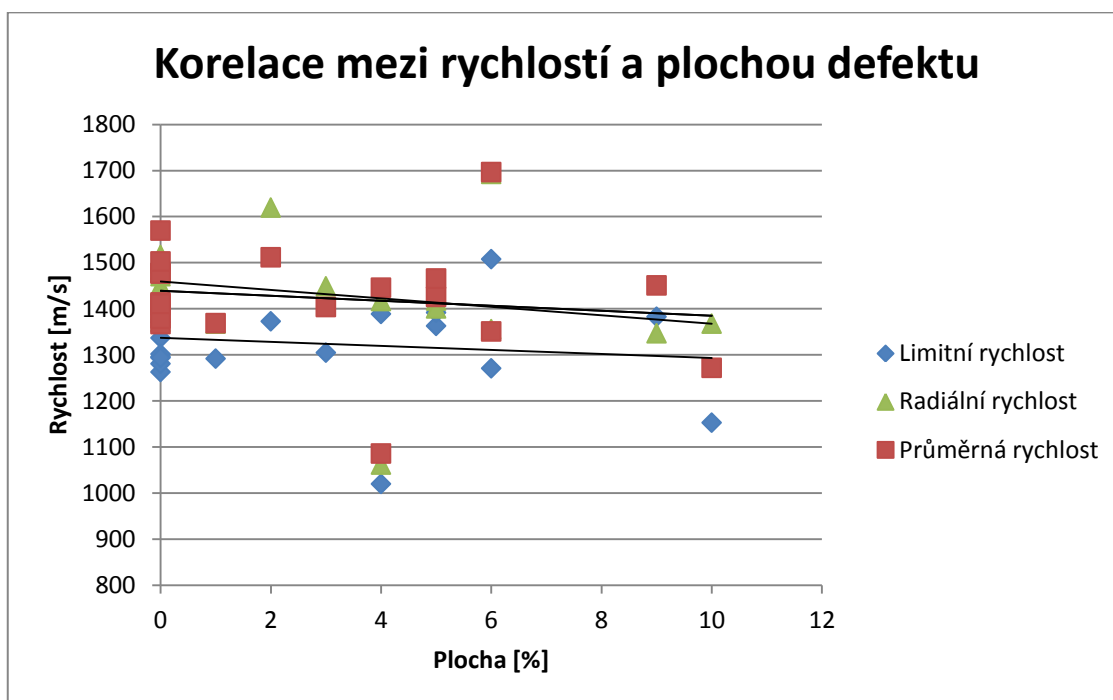


Obr. 12: Graf korelace mezi rychlostí a plochou defektu nad 10 %

Tab. 1: Hodnoty koeficientů determinace

Koeficienty determinace R^2	
Radiální rychlost	0,5194
Průměrná rychlost	0,5593
Limitní rychlost	0,4626

Radiální rychlost je vypočítána jako rychlost mezi dvěma protilehlými snímači. Průměrná rychlost je vypočítána jako průměr rychlostí mezi jednotlivými snímači. Limitní rychlost je konstruována z rychlostí mezi sousedními a ob-sousedními snímači, kde se předpokládá minimální poškození dřeva (povrchové vrstvy dřeva). Ze vzniklého souboru rychlostí je 25 % nejlepších a 25 % nejhorších hodnot odstraněno a limitní rychlost je vypočtena jako průměr zbývajících hodnot. Grafy jednotlivých závislostí jsou uvedeny v Příloze č. 3–5.

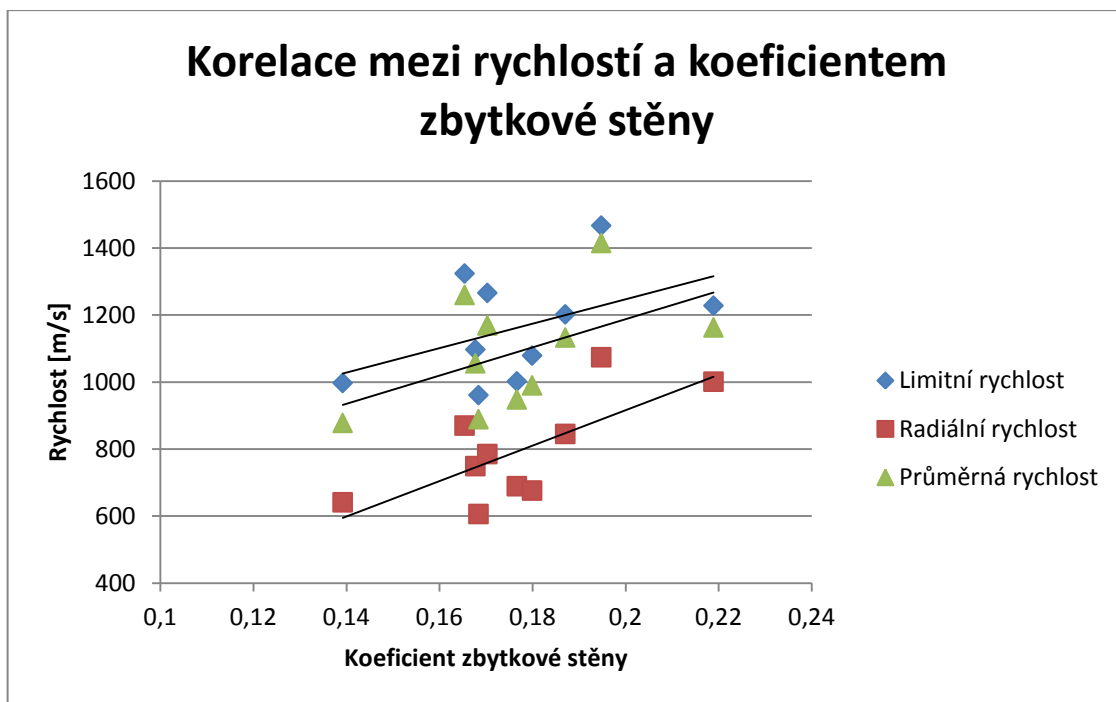


Obr. 13: Graf korelace mezi rychlostí a plochou defektu pod 10 %

Tab. 2: Hodnoty koeficientů determinace

Koeficienty determinace R^2	
Radiální rychlost	0,0567
Průměrná rychlost	0,0217
Limitní rychlost	0,0169

Z Obr. 13 a Tab. 2 je možné vidět, že při ploše defektu pod 10 % nedochází k výraznému snížení rychlosti ani v jedné z uvedených rychlostí. To se následně projeví na grafickém zobrazení přístroje, kde toto snížení nebude vyobrazeno žádnou změnou barvy nebo jen s minimální barevným rozdílem. Jednotlivé grafy jsou v Příloze č. 6–8.

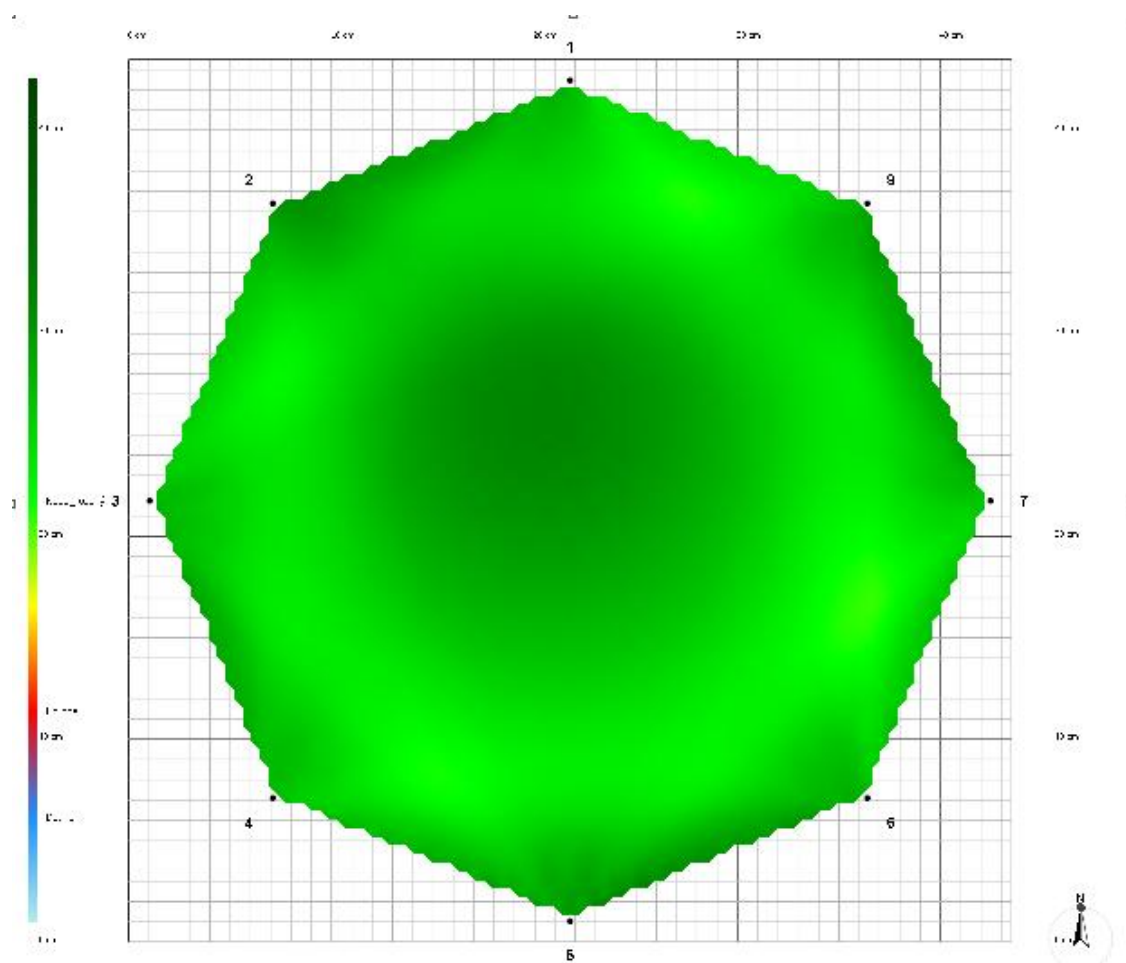


Obr. 14: Graf korelace mezi rychlostí a koeficientem zbytkové stěny u jedinců s plochou defektu nad 10 %

Tab. 3: Hodnoty koeficientů determinace

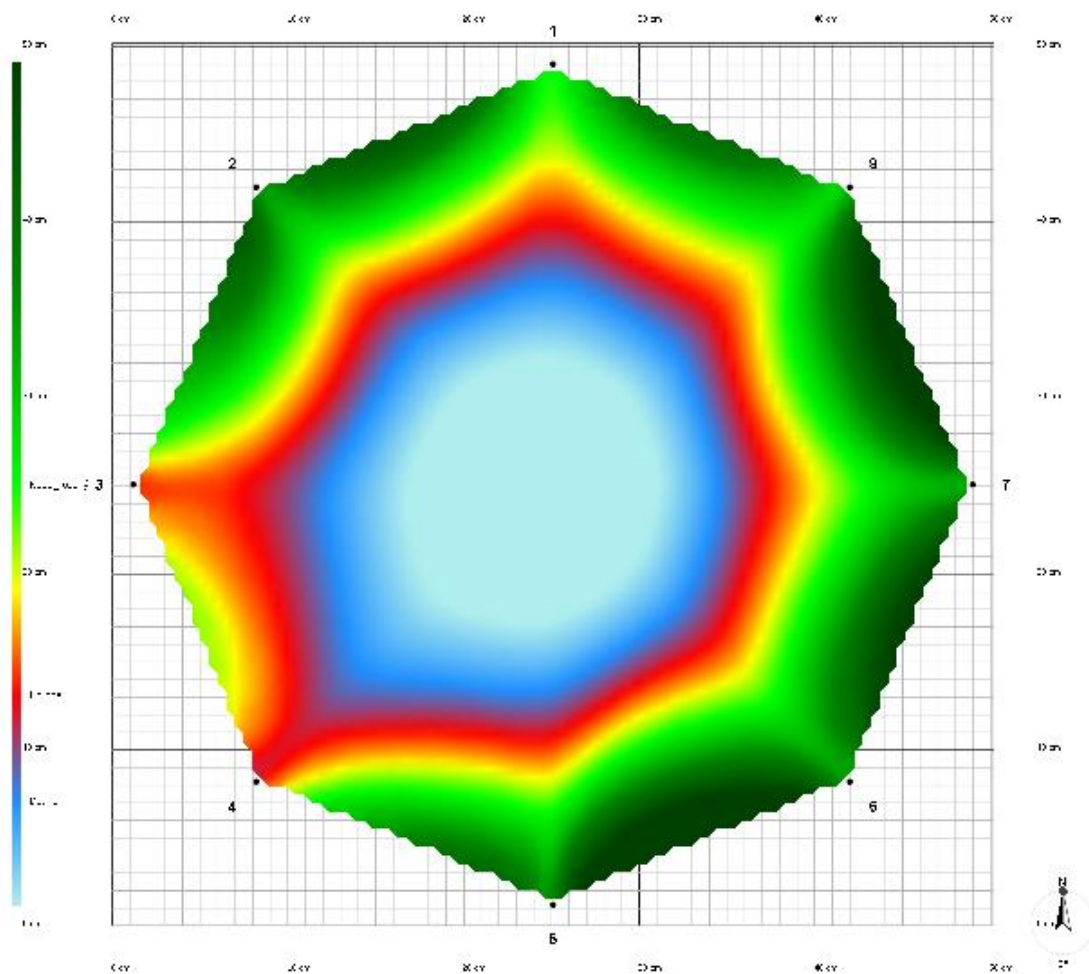
Koeficienty determinace R^2	
Radiální rychlost	0,5112
Průměrná rychlost	0,2632
Limitní rychlost	0,2184

Obr. 14 ukazuje vztah mezi rychlostí a koeficientem zbytkové stěny. Koeficient zbytkové stěny byl vypočítán dle vzorce: $Kz = \frac{t}{d}$, kde t je průměrná tloušťka zbytkové (zdravé) stěny a d průměr kmene. Především u radiální rychlosti je možné vidět výrazný zvyšující se trend rychlostí se zvyšující se tloušťkou zbytkové stěny. Jednotlivé grafy jsou uvedeny v Příloze č. 9–11.



Obr. 15: Tomogram zdravého stromu

Na Obr. 15 je možné vidět grafické vyjádření zdravého stavu stromu pomocí akustického tomografu. Na tomogramu není rozlišena oblast jádra a běle. Jedná se o strom č. 4 s plochou defektu 0 %.



Obr. 16: Tomogram stromu s dutinou a popisem

Na Obr. 16 je vidět způsob, jakým akustický tomograf zobrazuje kmen s poškozením. Modrá barva zobrazuje oblast s dutinou. Na ni navazuje červená barva zobrazující výskyt hniloby. Zdravá část od poškozené je oddělena žlutou barvou. Tento strom č. 1 měl plochu poškození 56 %. Ostatní vytvořené tomogramy jsou uvedené v Příloze č. 1.

6 Diskuze

Měření pomocí tomografických přístrojů poskytuje dva druhy výstupů. Jedním z nich je grafický obraz neboli 2D model stromu a druhým jsou datové soubory, které slouží k přesnější interpretaci výsledků. Obrazové modely nemusí být vždy zcela přesné, protože neobsahují všechny informace. U elektrického impedančního tomografu jsou datovým výstupem hodnoty elektrického odporu a u akustického tomografu jsou to hodnoty rychlostí. Datové soubory u elektrického impedančního tomografu pomáhají k rozlišení stromů bez hniloby a s hnilobou. Při hlubším zkoumání dat se dají ještě rozdělit na stromy s menší a střední hnilobou a stromy se silnou hnilobou (Humplík et al., 2016). Z porovnání radiálních výřezů stromů s EIT tomogramy je patrné, že samotný EIT tomogram není schopen určit velikost hniloby, viz Obr. 7. Stejnou nepřesnost zachytili také Nicolotti et al. (2003). Tato skutečnost je mimo jiné dána stejnou barevnou škálou, která se pro jednotlivé tomogramy přizpůsobuje rozsahu elektrického odporu. Zvýšení elektrického odporu způsobuje posun barevné škály směrem k červené barvě a tím dochází k posunu barevné škály zóny s hnilobou. Hniloba se pak tedy nemusí na tomogramech zobrazit v celé velikosti (Humplík et al., 2016).

U stromů bez hniloby je rozdělení hodnot odporů normální a bez výrazně odlehých hodnot. K tomu dochází jak u hodnot v jádře (hartwood) tak v běli (sapwood), viz Obr. 13. Další skupinou jsou stromy se začínající a střední hnilobou. Tyto stromy se od ostatních odlišují výrazným výskytem odlehých hodnot jádra i běli. Příkladem toho je strom 3K, kde odlehlé hodnoty přesahují až 3000 Ω m. Mezikvartilové rozpětí také dosahuje vysokých hodnot především v jádrové části. Příčinou, proč dochází ke vzniku tak výrazného rozptylu hodnot v jádře, může být skutečnost, že při napadení houbou dochází ke zvýšení obsahu vody v jádře (Göcke, 2011). Následně pak s rozvíjející se hnilobou dochází enzymatickou činností k rozkladu celulózy a ligninu. Tím je způsoben rozklad dřeva, ztráta vody a zvýšení elektrického odporu (Schwarze, 2007).

Poslední skupinou jsou stromy se silnou hnilobou. Zde by mohlo docházet k problému při interpretaci, jelikož medián těchto jedinců se často pohybuje ve stejné úrovni jako u stromů bez hniloby, místy i níže. Také mezikvartilové rozpětí se poměrně podobá kategorii bez hniloby. Vysvětlení, proč nedochází k většímu rozsahu elektrického odporu u stromů se silnou hnilobou, není zcela jasné. Dle Brazee et al. (2011) je to způsobeno tím, že v určitých oblastech dřeva s vyšší vodivostí dochází k překrytí oblastí

dřeva s nízkou vodivostí. Hlavním rozlišením této skupiny od ostatních je překryv mezikvartilového rozpětí jádra a běli. Výsledky měření elektrickým impedančním tomografem by mohly být ovlivňovány teplotami, tedy dobou, kdy se měření provádí. Největší rozdíly měřených hodnot se vyskytují v zimě při teplotách pod 0 °C (Larsson et al., 2004).

Konstatováním těchto výsledků z měření elektrickým impedančním tomografem je zřejmé, že elektrický impedanční tomograf dokáže zachytit již počínající hnilobu. Naopak problémem je schopnost zachycení prostorového umístění hniloby a její velikosti, která byla zjištěna až při vytvoření skutečného radiálního řezu. Pro tuto skutečnost by bylo vhodné zároveň použít další diagnostické přístroje. Jedním z nich je akustický tomograf.

Z výsledků měření akustickým tomografem lze poměrně přesně definovat plochu defektu a jeho umístění. Přesnost výskytu plochy defektu je zajišťována vytvořením husté sítě rychlostí mezi jednotlivými snímači a také množstvím použitých hřebů. Pokud by byl zvolen velký obvod měřeného stromu a nevhodný počet hřebů a snímačů, docházelo by k vytvoření hluchých míst, které by nebyly změřeny. Z provedeného měření a vytvoření grafu závislosti mezi rychlostí a plochou defektu bylo zjištěno, že rychlost lineárně klesá se zvětšující se plochou defektu. Touto plochou může být vytvořená dutina nebo výsledek degradace buněčné stěny působením houbových patogenů Nicolloti et al. (2003), a tím dochází ke snížení rychlosti, které je zachycováno až od 10 % poškození kmene. Sharma, Shukla (2012) zachytili tento fakt také při měření na *Acacia mangium*, *Gravillea robusta* a *Mangifera indica* s přesností až 95 %. V mém měření dosahovala závislost mezi rychlostí a plochou defektu 46–56 %. Objeví-li se drobné poškození kmene pod 10 %, akustický tomograf to není schopen úplně přesně zachytit a vyobrazit, jelikož nedochází k tak výraznému snížení rychlosti a nedojde tak k posunu v barevné škále.

Vysoká využitelnost obou tomografů by mohla být v lesnickém výzkumu při zjišťování typu poškození stromu, například u napadení václavkou smrkovou. Při opakovaném měření stejného stromu by se zjistila rychlost šíření houbového patogenu. Zároveň by bylo vhodné sledovat průběh teplot, množství srážek nebo chemický stav půd, které by doplňovaly a určovaly příčiny rychlosti šíření hniloby. Kombinací těchto dvou přístrojů by se mohlo docílit zjištění, odkdy se velikost vnitřního rozkladu dřevní hmoty projeví na vnějším vzhledu stromu. K prvotnímu měření by se použil elektrický impedanční tomograf, který by zachytil počínající

hnilobu. Následně by byl použit akustický tomograf, jelikož dokáže zjistit velikost plochy poškození. Při opakování měření by se takto dala najít závislost vnitřního a vnějšího stavu stromu. Práce s akustickým tomografem trvá asi 20 minut na jeden strom. V lesnictví je však využitelným spíše elektrický impedanční tomograf, který dokáže zjistit již počínající hnilobu a zajistit tak větší finanční zhodnocení dřevní hmoty. Tato situace je však reálná pouze pro jednotlivé stromy. Při měření celého porostu je to téměř nemožné. Důvodem je výrazná časová náročnost měření. Výzkum jednoho stromu trvá minimálně 15 minut. Další problém přináší také finanční stránka. Měření je zapotřebí opakovat minimálně jednou za půl roku. A tudíž měření celého porostu přináší výrazný náklad na zaplacení pracovníka provádějícího měření. Akustický tomograf lze využít spíše v arboristice. Pro ni je stabilita stromů důležitá, jelikož se většinou zabývá památnými stromy, stromy v parcích nebo stromy v alejích, kde by mohl hrozit pád stromu na člověka. Při zjišťování stability stromů se společně s akustickým tomografem používá tahová zkouška. Důvodem použití tahové zkoušky je fakt, že díky ní lze určit komplexní stabilitu stromů (odolnost proti zlomu nebo odolnost proti vývratu). Akustická tomografie dokáže vykreslit místo s dutinou popřípadě zjistit jak velká je zbytková stěna, ale nedokáže zjistit celkovou stabilitu stromů (Szorádová a Praus, 2010). Využití elektrického impedančního tomografu v tomto oboru je spíše při prvotním měření, kdy je zapotřebí zjistit, zda se vyskytuje nějaká hniloba ve kmeni. Tuto myšlenku potvrzuje také výzkum Braze et al. (2011), kteří zachytili počínající rozklad způsobený rezavcem šikmým (*Innonotus obligus*) na bříze tuhé (*Betula lenta*). Zachycení počínající hniloby zkoušeli také Deflorio et al. (2008) pomocí akustického tomografu. Měření prováděli na stromech douglasky, buku, dubu a platanu. Tyto dřeviny byly naočkovány lesklokorkou ploskou (*Ganoderma applanatum*) a outkovkou pestrou (*Trametes versicolor*). Z jejich závěru vyšlo, že pouze u platanu byl po 27 měsících zaznamenán rozklad dřeva. U ostatních dřevin nebyl zaznamenán žádný rozdíl.

7 Závěr

Smyslem vytvoření této bakalářské práce bylo pomocí nedestruktivních diagnostických přístrojů zjišťovat přítomnost a velikost hniloby v porostech smrku ztepilého. K tomuto zjišťování byly konkrétně použity dva tomografy. Jedním z nich byl elektrický impedanční tomograf a druhým byl akustický tomograf.

Pomocí těchto tomografů bylo změřeno několik stromů, na kterých se zjišťovala přesnost měření jednotlivých přístrojů. Z vytvořených EIT tomogramů bylo zjištěno, že nedochází k úplně přesnému vykreslení výskytu hniloby. Tato skutečnost je však přisuzována posunu barevné škály elektrického odporu. Dalším výstupem jsou datové soubory. Podle nich lze již bezpečně oddělit stromy bez hniloby a s hnilobou. Pomocí elektrického impedančního tomografu je tedy možné zjišťovat stromy s počínající hnilobou, což může být přínosné pro udržení finanční cennosti dřeva.

Akustický tomograf naopak ukazoval na možnost lepšího určení velikosti a umístění poškození. Tuto skutečnost indikoval od 10 % velikosti poškození, tedy stavu, od kterého dochází k většímu snížení rychlosti a je již vyobrazeno na tomogramu. Rychlost zvuku lineárně klesá se zvětšující se plochou defektu nad 10 %.

Z provedených měření vyplývá, že pro zvýšení přesnosti zjišťování zdravotního stavu stromů by bylo dobré používat oba tyto přístroje najednou. Tuto kombinaci by bylo dobré používat u zjišťování zdravotního stavu chráněných stromů, například ještě s využitím tahové zkoušky. Tato skutečnost však přináší větší náročnost na měření, prodloužení doby měření a především dvojnásobné přístrojové vybavení.

8 Summary

The aim of this bachelor thesis is to ascertain a presence and a measurement of putrefaction in the covers of spruce by means of nondestructive materials. In this investigation two tomographs were used. One of them was an electrical impedance tomography and the second one was an acoustic tomography.

Using these tomographs, a couple of trees were measured, on which the measurement accuracy of individual devices was investigated. From created EIT tomograms, we discovered that there is no accurate sign of putrefaction occurrence. In reality, it is due to the movement of color scale of electric resistance. The next output is data collection. From which we can easily separate the trees with or without putrefaction. Using the electrical impedance tomography, it is possible to discover trees with beginnings of putrefaction, which could be beneficial for keeping a financial value.

On the other hand, acoustic tomography showed the possibility of better determination of measurement and a placement of damage. This was supported by the fact that it indicated from 10 % of measurement, which means a state, which causes the bigger reduction of speed and is pictured on tomogram itself.

According to the measurements it can be claimed that for the increase of accuracy of discovering better health conditions for trees, it would be good to use both these devices at the same time. This combination would be the best to use by discovering of health conditions of protected trees with the possible usage of tensile testing, which would ensure the security. However, this fact causes bigger difficulties with measuring, prolongation of measuring hours and most importantly, much more device equipment.

9 Seznam literatury

Bieker, D., Kehr, R., Weber, G., Rust, S., 2010. Non-destructive monitoring of early stages of white rot by *Trametes versicolor*. *Annals of Forest Science*, sv. 67, č. 2, 210 s.

Borman, D. et al., 2009. The method of fundamental solutions for detection of cavities in EIT, *Journal of integral equations and applications*, sv. 21, č. 3. 383–406 s.

Braze N. J. et al., 2011. Non-destructive assessment of internal decay in three hardwood species of northeastern North America using sonic and electrical impedance tomography. *Forestry An International Journal of Forest Research*, sv. 84, č. 1, 33–39 s.

Cienciala, E. et al., Dopadová studie Jablunkov [online] citováno 25. února 2017. Dostupné na World Wide Web: http://www.frameadapt.cz/coajdfadlf/uploads/2016/11/Vystup_3-1_Dopadova_studie_Jablunkov.pdf

Cudlín, P., Čermák, P., Jankovský, L., 2004. Analýza rizik destabilizace smrkových porostů vlivem klimatické změny. In *Sborník z mezinárodní vědecké konference „Zmeny podnebia–Extrémy počasia–Organizmy a ekosystémy“*, Viničky, Česká bioklimatologická společnost Brno.

Čermák, M., Martinková, M., Nárovec, V., 2004. Patologický účinek mrazu a sněhu na smrčiny. *Lesnická práce s. r. o.*, sv. 84, č. 3, 126–128 s. ISSN 0322–9254.

Čermák, P., 2007. Defoliace a radiální růst ukazatelé vitality smrku ztepilého. *Lesnická práce, s. r. o.*, sv. 86, č. 11. 21–23 s., ISSN 0322–9254.

Čermák, P., 2014. Jak reaguje smrk na klimatické změny. In *Seminář „Chřadnutí smrku v oblasti severní a střední Moravy“*, Budišov nad Budišovkou, Sdružení vlastníků obecních a soukromých lesů v ČR. 94 s.

Čermák, P., 2010. Forest decline, dieback – chřadnutí, odumírání, hynutí. *Lesnická práce s. r. o.*, sv. 89, č. 3, 12–15 s., ISSN 0322-9254

Čermák, P., Jankovský, L., 2006. Škody ohryzem, loupáním a následnými hnilobami. In Sborník původních vědeckých prací a monografií, Brno. Folia Forestalia Bohemica. Lesnická práce s. r. o., 22–25 s., ISBN 80-86386-81-3.

Čermák, P., Mrkva, R., 2007. Škody zvěří – Neřešený eskalující problém. Zpravodaj ochrany lesa, sv. 17, 39–41 s. ISSN 1211–9342.

Čermák, P., Palovčíková, D., Beránek, J., Atlas poškození dřevin [online] citováno 5. března 2017. Dostupné na World Wide Web: <http://atlasposkozeni.mendelu.cz/>

Čermák, P., Pokorný, R., 2015. Současné dopady na lesní porosty a lesní hospodářství. In Brázdil et al., Historie počasí a podnebí v českých zemích. Brno: Centrum výzkumu globální změny Akademie věd České republiky. 354–356 s.

Čermák, P. et al., Katalog lesnických adaptačních opatření [online] citováno 3. března 2017. Dostupné na World Wide Web: http://www.frameadapt.cz/coajdfadlf/uploads/2016/11/KATALOG_FINAL_po_stranka_ch_web.pdf

Černý, A., 1989. Parazitické dřevokazné houby. Praha: SZN. 99 s. ISBN 80-209-0090.

Český hydrometeorologický ústav [online] citováno 15. března 2017. Dostupné na World Wide Web: <http://portal.chmi.cz/>

Demek, J. et al., 2014. Zeměpisný lexikon ČR. Hory a nížiny. Vydání 3. Přepřacované, Brno: Mendelova univerzita v Brně. 607 s. ISBN 978-80-7509-113-0.

Divos, E., Szalai, L., 2002. Tree evaluation by acoustic tomography. In Proc. of the 13th International Symp. on Nondestructive Testing of Wood, Aug. 19-21, Berkeley, CA. 251-256 s.

Divos, F. Instrument supported tree evaluation in Hungary [online] citováno 15. března 2017. Dostupné na World Wide Web: <https://www.slideshare.net/fakopp/instrument-supported-tree-evaluation-in-hungary>

Dušek, D., 2015. Potenciál pěstování smrku ztepilého v oblastech jeho chronického chřadnutí, Disertační práce. Praha. 4–12 s.

Euforgen. *Picea abies* [online] citováno 6. ledna 2017. Dostupné na World Wide Web: <http://www.euforgen.org/species/picea-abies/>

Göcke L., 2011. PiCUS: Treetric Electrical Impedance Tomograph for trees (manual). Argus electronic gmbh 35.

Holuša, J., 2013. Lýkožrout severský *Ips duplicatus*: význam a možnosti obrany. Lesnická práce s. r. o., sv. 92, č. 6, 25–28 s. ISSN 0322–9254.

Horáček P.; 2012. Znalecký posudek č./2013, Zjištění stability javoru mléče v ulici Před nádražím, Praha-Krč; Brno, Lesnická a dřevařská fakulta Mendelova univerzita v Brně, 29 s.

Hruška, J. et al., 2009. Účinky kyselého deště na lesní a vodní ekosystémy 2. Vliv depozice síry a dusíku na půdy a lesy. Živa. 3: 141–144 s.

Humplík P., Čermák P., Žid T., 2016. Electrical impedance tomography for decay diagnostics of Norway spruce (*Picea abies*): possibilities and opportunities. *Silva Fenica*, sv. 50, č. 1, 13–26 s., ISSN 2242–4075

Jankovský, L., Jančařík, V., 1999. Václavka stále aktuální. Lesnická práce s. r. o., sv. 78, č. 9, 49–53 s. ISSN 0322–9254.

Kantor, P., Pěstění lesů skripta – učební text [online] citováno 7. února 2017. Dostupné na World Wide Web: https://akela.mendelu.cz/~xcepl/inobio/skripta/Pesteni_skripta.pdf

Knížek M., Liška J., Modlinger R., 2016. Výskyt lesních škodlivých činitelů v roce 2015 a jejich očekávaný stav v roce 2016. Strnady, Zpravodaj ochrany lesa, Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti, v. v. i., 66 s.

Knížek, M., 2005. *Polygraphus poligraphus* (L.) lýkohub matný [online] citováno 11. března 2017. Dostupné na World Wide Web: http://www.silvarium.cz/images/letaky-los/2005/2005_polygraphus.pdf

Knížek, M., Zahradník, P., Kůrovci na jehličnanech [online] citováno 11. března 2017. Dostupné na World Wide Web: http://www.silvarium.cz/images/letaky-los/2004/2004_kurovci.pdf

Larsson, B., Bengtsson, B., Gustafsson, M., 2004. Nondestruktive detection of decay in living trees. *Tree Physiology*, sv. 24, 853–858 s.

Lesprojekt Brno. Lesní hospodářský plán – textová část LHC ŠLP Masarykův les Křtiny [online] citováno 7. února 2017. Dostupné na World Wide Web: http://www.slpkrtiny.cz/download/certifikace/LHP_2013_2022/Textovka-SLP-Krtiny.pdf

Li L. et al., 2011. Acoustic tomography in relation to 2D ultrasonic velocity and hardness. In Richter, K., *Wood Science and Technology. Journal of the International Academy of Wood Science*, sv. 46, č. 1, 551–556 s. ISSN 1432-5225.

Lubojacký, J., Lýkožrout menší *Ips amitinus* (Eichhoff, 1871) [online] citováno 11. března 2017. Dostupné na World Wide Web: http://www.silvarium.cz/images/letaky-los/2012/2012_lykozrout_mensi.pdf

Manion, P. D., Lachance, D., 1992. *Forest Decline Concepts*. APS St. Paul, Minnesota. 181–190 s.

McDowell, N. et al., 2008. Mechanisms of plant survival and mortality during drought: why do some plants survive while others succumb to drought? *Tansley review. New Phytologist*, 178, 719–739.

Praus, L., 2016. Přístrojové metody v arboristice [online] citováno 6. Března 2017. Dostupné na World Wide Web: https://akela.mendelu.cz/~xcepl/inobio/inovace/Pzspb/pristrojove_metody.pdf

Mrkva, R., Kuchařík, J., 2006. Obrana proti kůrovčům v porostech se silným výskytem václavky. *Lesnická práce s. r. o.*, sv. 85, č. 10, 17–20 s. ISSN 0322–9254.

MZe, 2016. *Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství České republiky v roce 2015*. Praha. 134 s. ISBN 978-80-7434-324-7

Nicolotti, G. et al., 2003. Application and comparison of three tomographic techniques for detection of decay in *trees*. J. of Arboriculture. Sv. 29, č. 2: 66–78 s.

Pešková, V., Soukup, F., 2013. Škody způsobené václavkou v smrkových porostech severní Moravy a Slezska. Lesnická práce s. r. o., sv. 92, č. 6, 19–21 s. ISSN 0322–9254.

Samec, P., Vavříček, D., Macků, J., Acidifikace versus pufrace lesních půd [online] citováno 25. února 2017. Dostupné na World Wide Web: <http://www.lesprace.cz/casopis-lesnicka-prace-archiv/rocnik-87-2008/lesnicka-prace-c-5-08/acidifikace-versus-pufrace-lesnich-pud>

Semelová, V., Vacek, S., 2010. Deficit hořčíku v lesních ekosystémech. Lesnická práce, s. r. o., sv. 89, č. 8, 14–16 s. ISSN 0322–9254.

Slugeňová, K. et al., 2011. Drought and aluminium as stress factors in Norway spruce (*Picea abies* [L.]Karst) seedlings. Journal of Forest Science, 57: 547–554 s.

Socco, L. V. et al., 2004. Feasibility of ultrasonic tomography for nondestructive testing of decay on living *trees*. Research in Nondestructive Evaluation, sv. 15, č. 1, 31–58 s.

Soukup, F., *Armillaria ostoyae* (Romagn.) Herink Václavka smrková [online] citováno 6. března 2017. Dostupné na World Wide Web: http://www.silvarium.cz/images/letaky-los/2005/2005_armillaria.pdf

Soukup, F., *Heterobasidion annosum* (Fr.) Bref. s. l. Kořenovník vrstevnatý [online] citováno 6. března 2017. Dostupné na World Wide Web: https://home.czu.cz/storage/54065_2011_Heterobasidion.pdf

Soukup, F., *Stereum sanguinolentum* (Alb. et Schw.: Fr.) Fr. (s. l.) pevník krvavějící [online] citováno 6. března 2017. Dostupné na World Wide Web: http://www.silvarium.cz/images/letaky-los/2008/2008_pevnik.pdf

Szorádová, A., Praus, L., Přístrojové hodnocení stability stromů [online] citováno 8. března 2017. Dostupné na World Wide Web: http://www.zahrada-park-krajina.cz/index.php?option=com_content&view=article&id=263:pristrojove-hodnoceni-strom&catid=61:yakladani-a-udrzba-zelen&Itemid=122

Tainter, E. H., Baker, E. A., 1996. Principles of Forest Pathology. John Wiley and Sons. Inc. New York. 805 s.

Tolasz, R. et al., 2007. Atlas podnebí Česka: Climate atlas of Czechia. Praha: Český hydrometeorologický ústav. 255 s. ISBN 978-80-86690-26-1.

ÚHÚL- Ústav pro hospodářskou úpravu lesů. Oblastní plány rozvoje lesa [online] citováno 12. února 2017. Dostupné na World Wide Web: http://www.uhul.cz/images/ke_stazeni/oprl_oblasti/OPRL-LO30-Drahanska_vrchovina.pdf

Úradníček, L., 2014. Dendrologie: (společenstva a významné dřeviny ČR). Brno: Mendelova univerzita v Brně. 143 s. ISBN 978-80-7509-181-9.

Vávra, V., Štelcl, J., 2014. Významné geologické lokality Moravy a Slezska. Brno: Masarykova univerzita. 287 s. ISBN 978-80-210-6715-8.

Vavříček, D., Pancová Šimková, P. Atlas půd [online] citováno 11. března 2017. Dostupné na World Wide Web: http://ldf.mendelu.cz/ugp/wp-content/ugp-files/atlas_pud/pudy/index.html

Wang, X. et al., 2007. Acoustic tomography for decay detection in red oak trees. Research Paper FPL-RP-642. USDA, Forest Service, Forest Products Lab., Madison, WI. 7 s.

Wang, X. et al., 2005. Nondestructive evaluation of incipient decay in hardwood logs. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-162. USDA, Forest Service, Forest Products Lab., Madison, WI. 11 s.

Zahradník, P., Přemnožení lýkohuba matného. Lesnická práce s. r. o., sv. 78, č. 7, 6–9 s., ISSN 0322–9254.

Zhang X., Wu N., Li C., 2005. Physiological and growth responses of *Populus davidiana* ecotypes to different soil water contents. Journal of Arid Environments, 60: 567–579 s.

10 Seznam příloh

Příloha č. 1: Tomogramy z měření akustickým tomografem jednotlivých stromů

Příloha č. 2: Barevná škála akustického tomografu

Příloha č. 3: Graf korelace mezi radiální rychlostí a plochou defektu nad 10 %

Příloha č. 4: Graf korelace mezi průměrnou rychlostí a plochou defektu nad 10 %

Příloha č. 5: Graf korelace mezi limitní rychlostí a plochou defektu nad 10 %

Příloha č. 6: Graf korelace mezi radiální rychlostí a plochou defektu pod 10 %

Příloha č. 7: Graf korelace mezi průměrnou rychlostí a plochou defektu pod 10 %

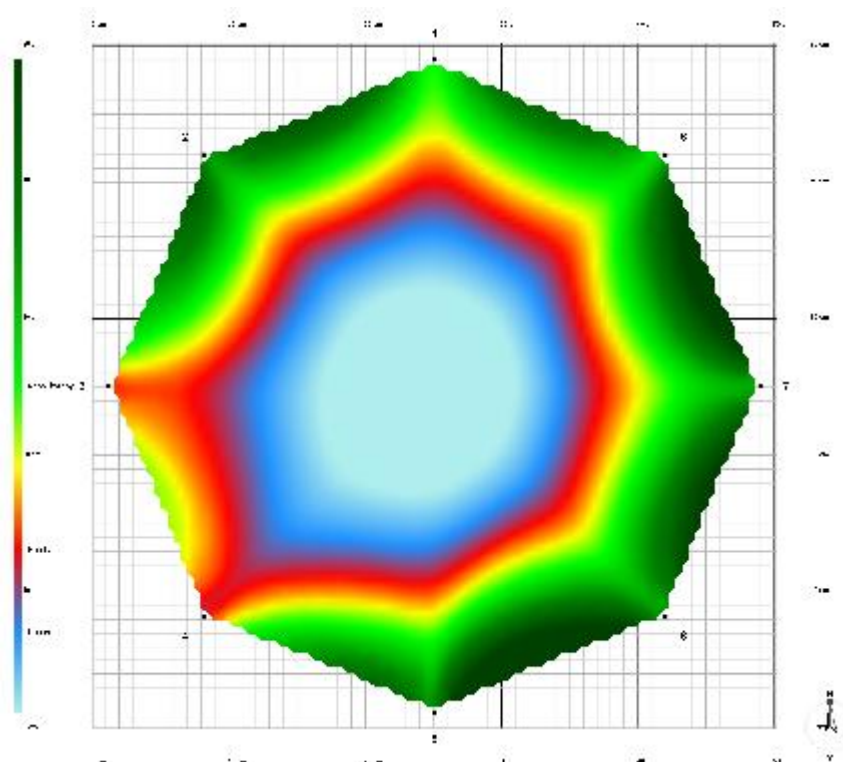
Příloha č. 8: Graf korelace mezi limitní rychlostí a plochou defektu pod 10 %

Příloha č. 9: Graf korelace mezi radiální rychlostí a koeficientem zbytkové stěny

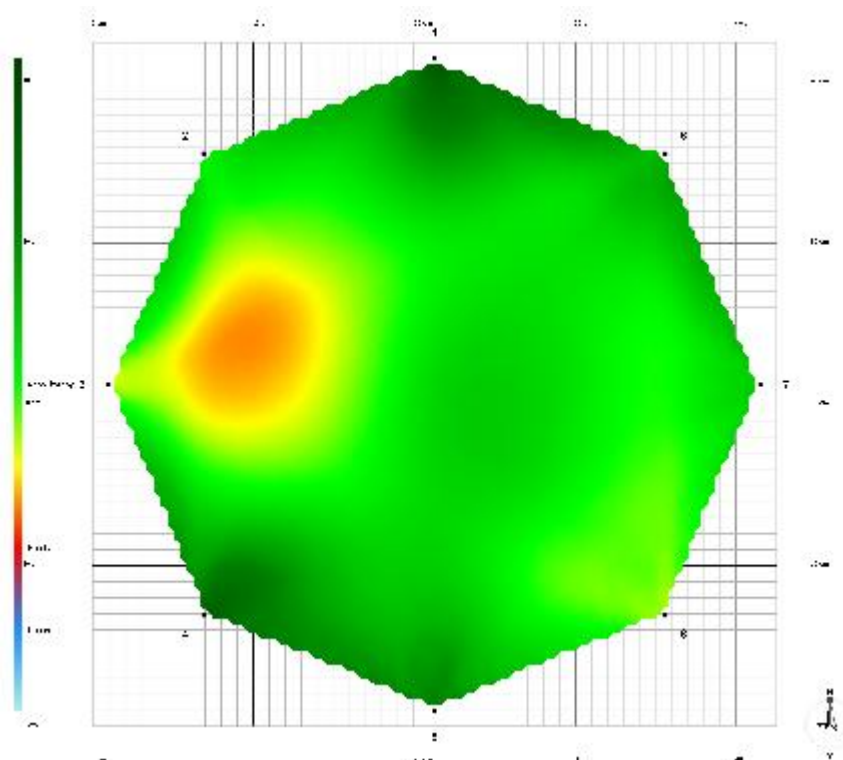
Příloha č. 10: Graf korelace mezi průměrnou rychlostí a koeficientem zbytkové stěny

Příloha č. 11: Graf korelace mezi limitní rychlostí a koeficientem zbytkové stěny

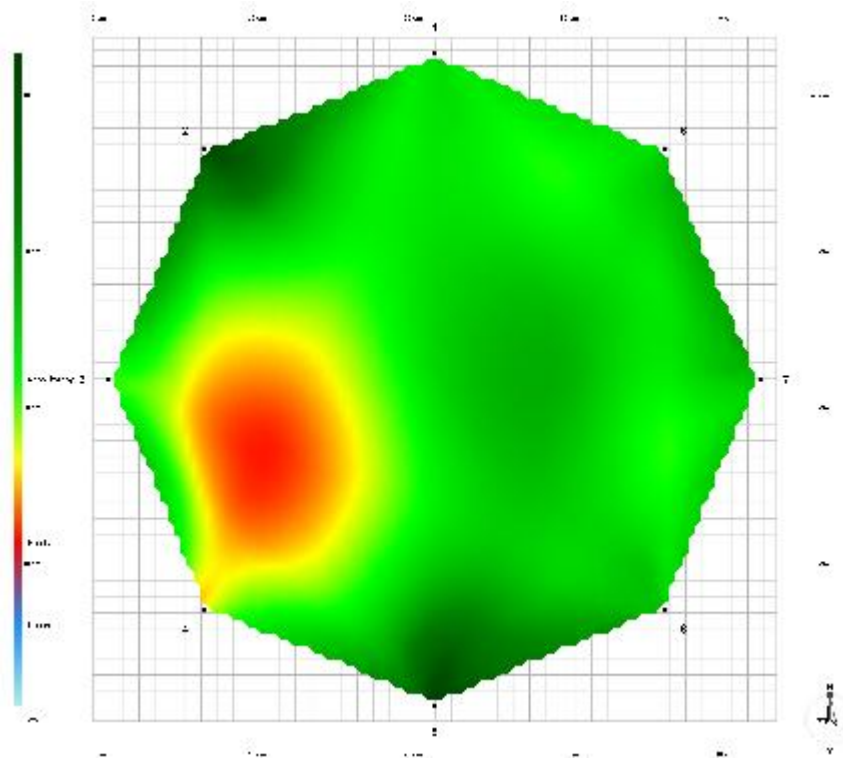
Příloha č. 1: Tomogramy z měření akustického tomografu jednotlivých stromů



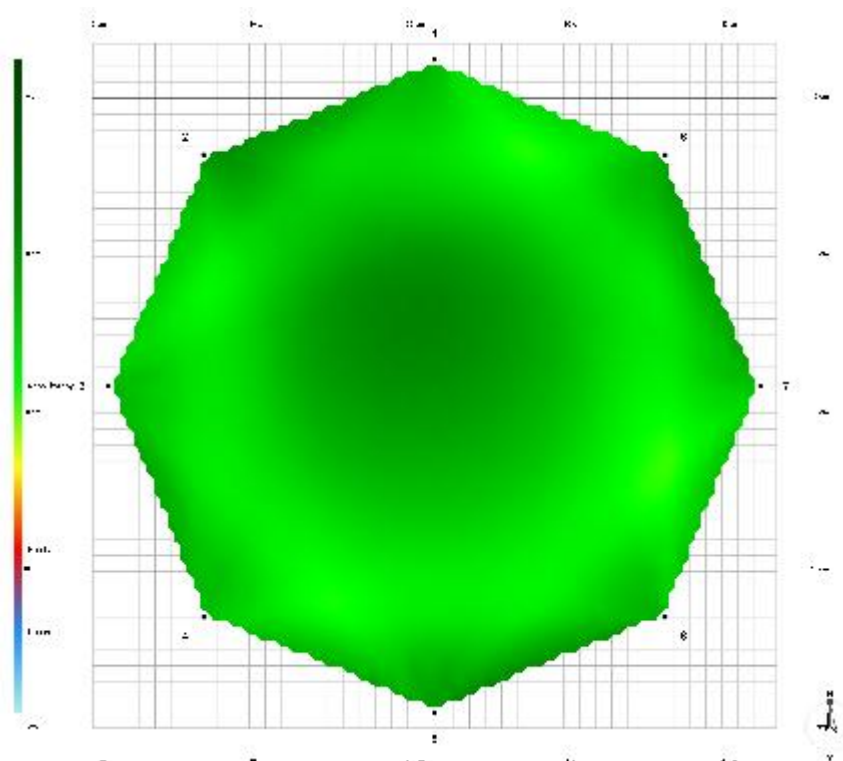
Smrk 1: Plocha defektu 56 %



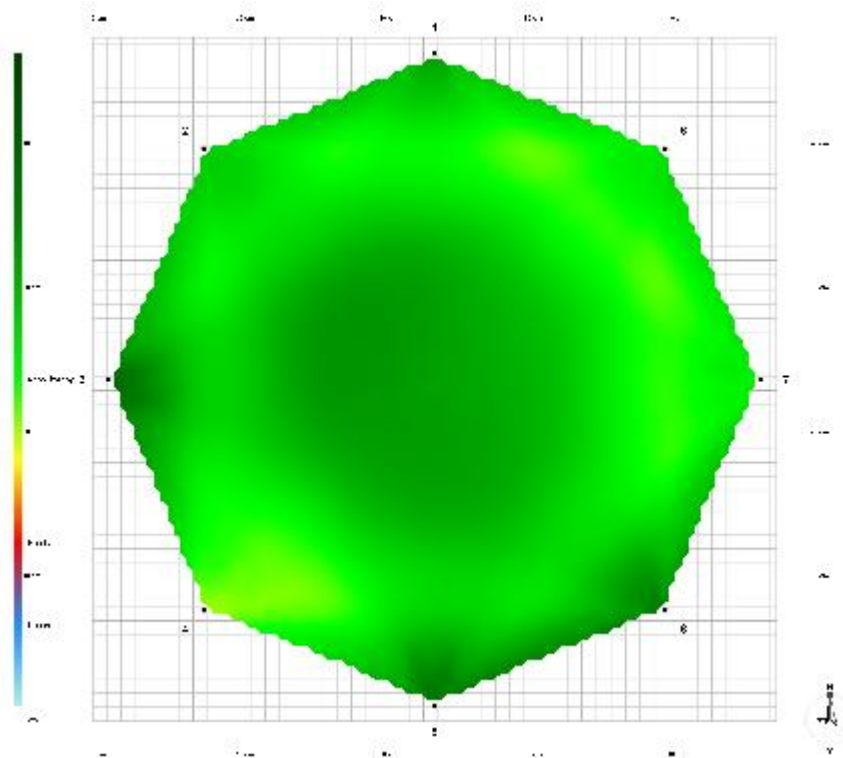
Smrk 2: Plocha defektu 6 %



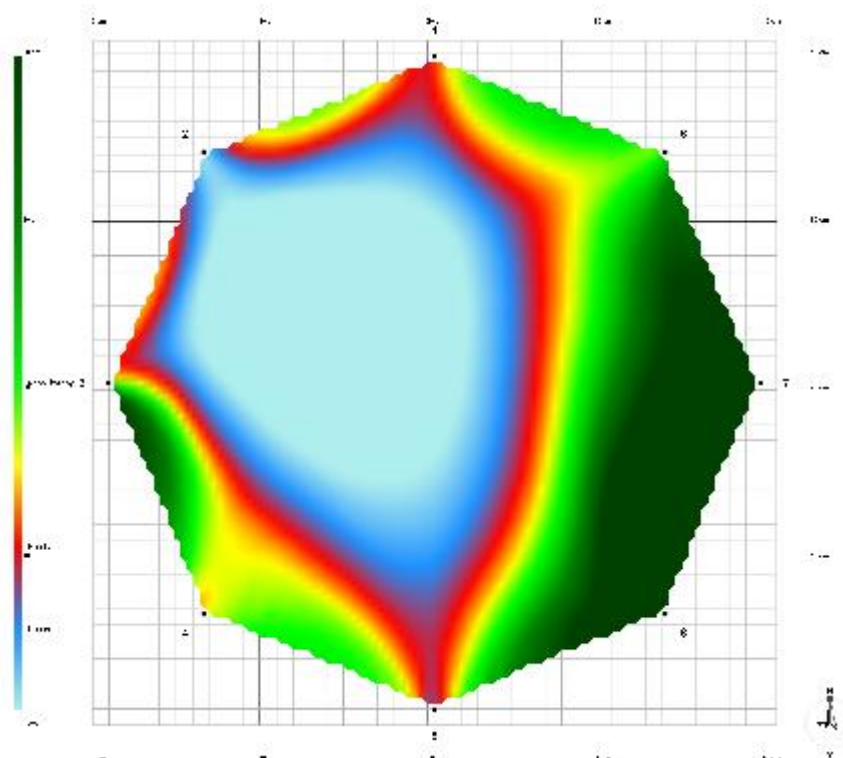
Smrk 3: Plocha defektu 11 %



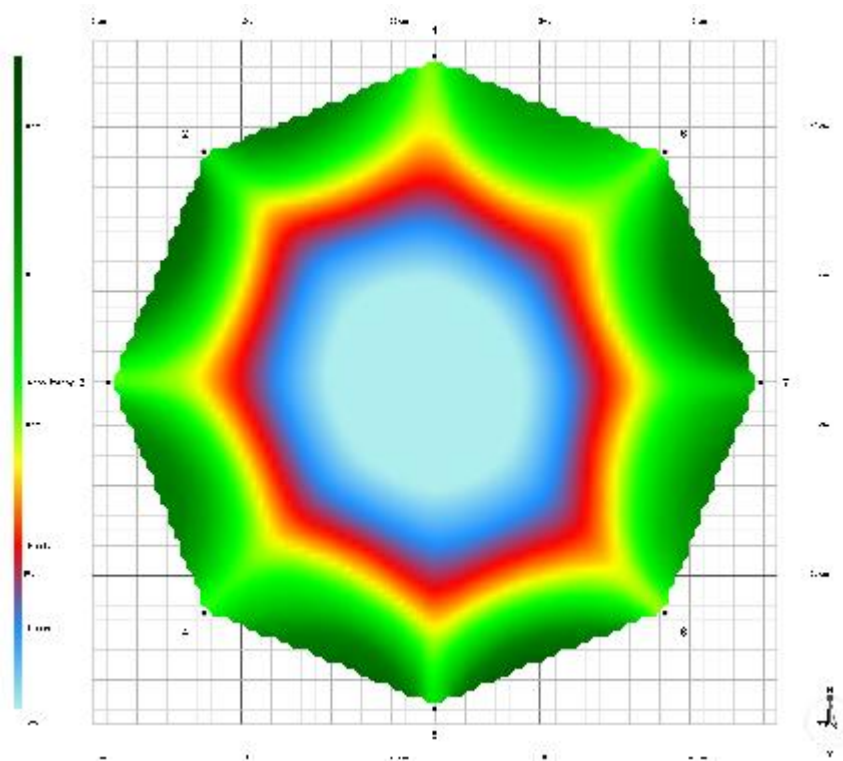
Smrk 4: Plocha defektu 0 %



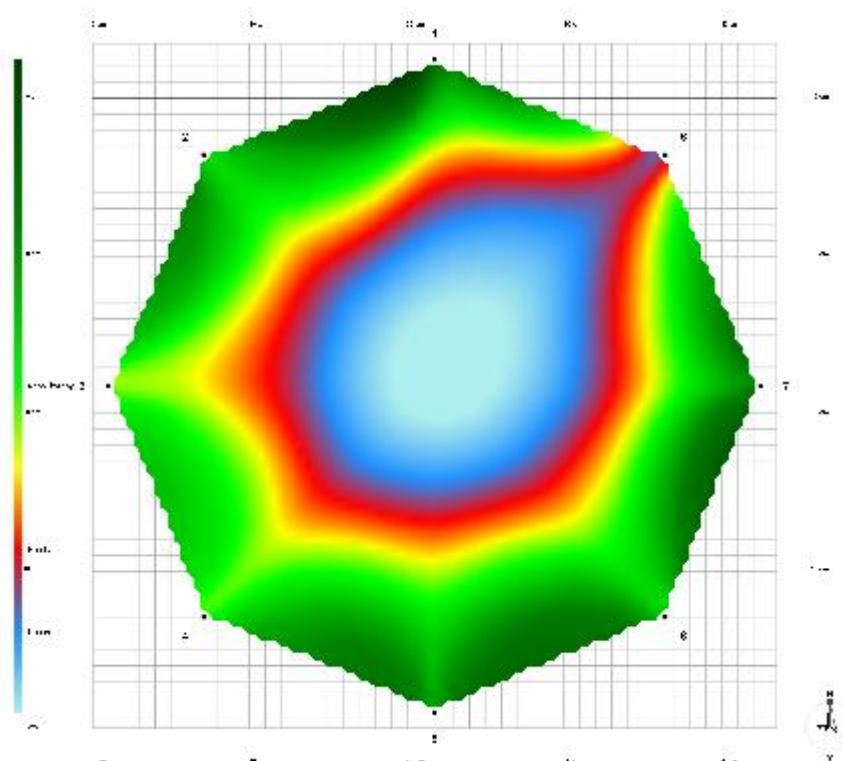
Smrk 5: Plocha defektu 0 %



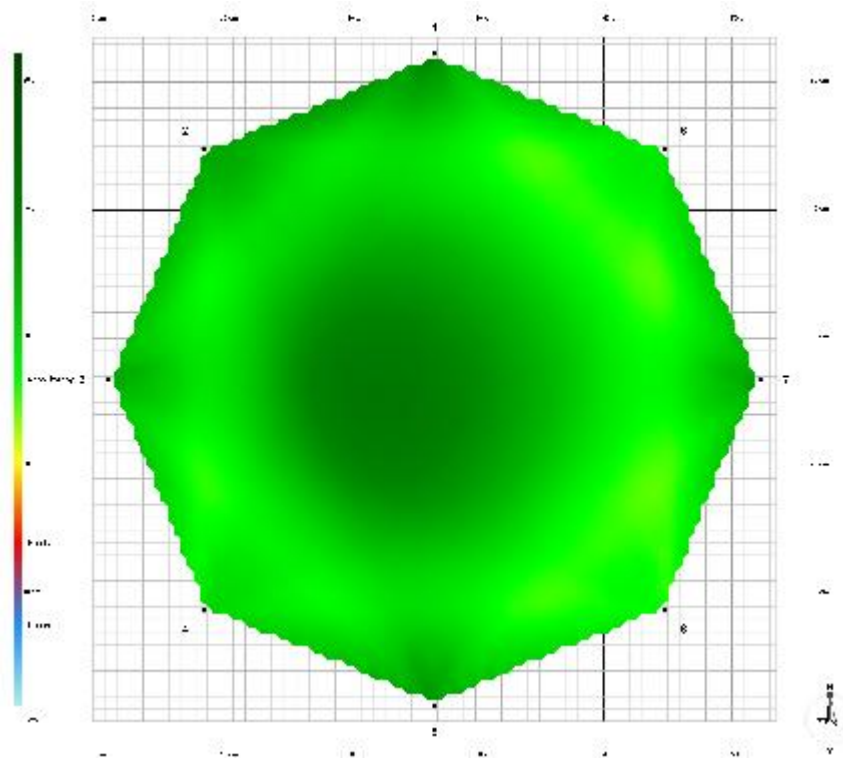
Smrk 6: Plocha defektu 61 %



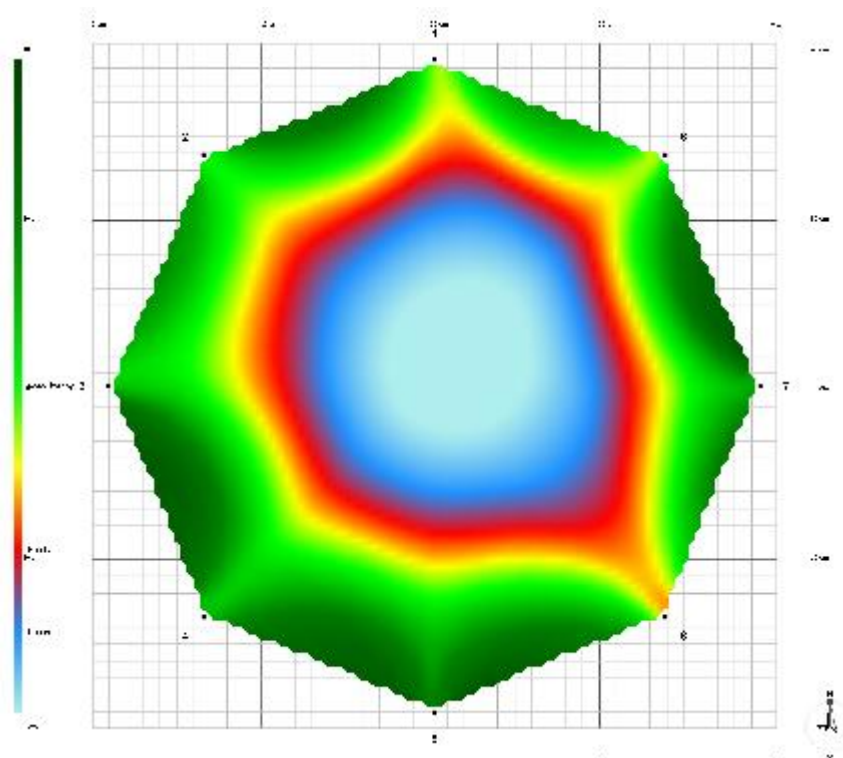
Smrk 7: Plocha defektu 49 %



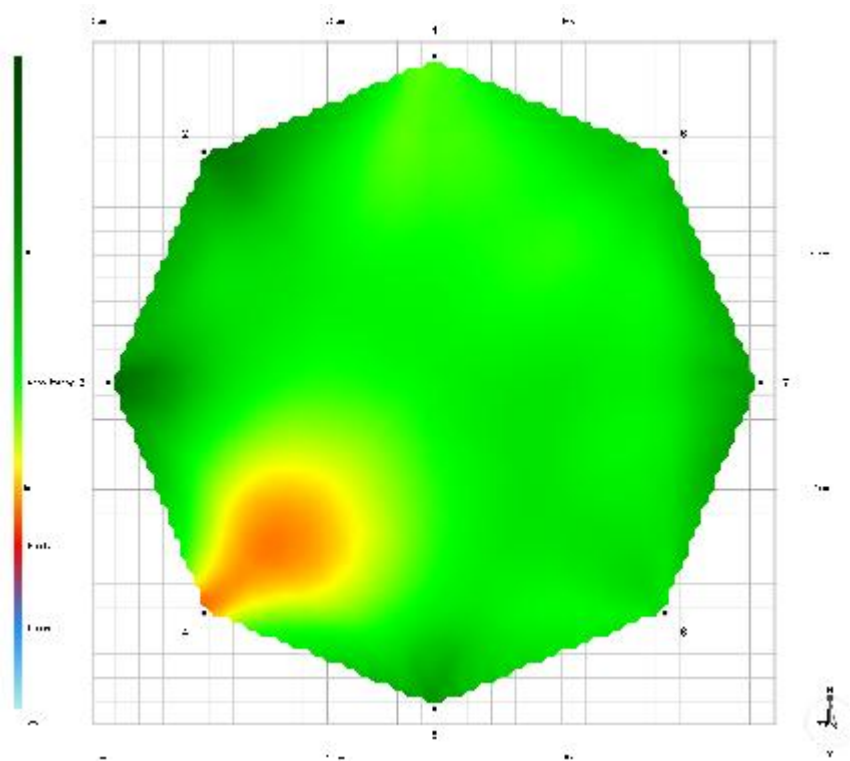
Smrk 8: Plocha defektu 47 %



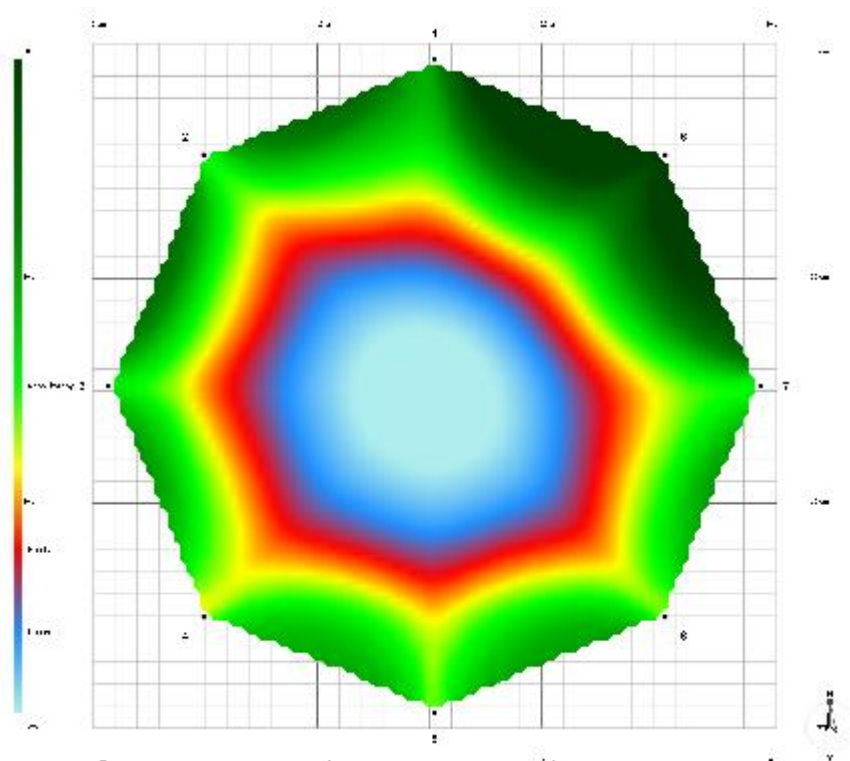
Smrk 9: Plocha defektu 0 %



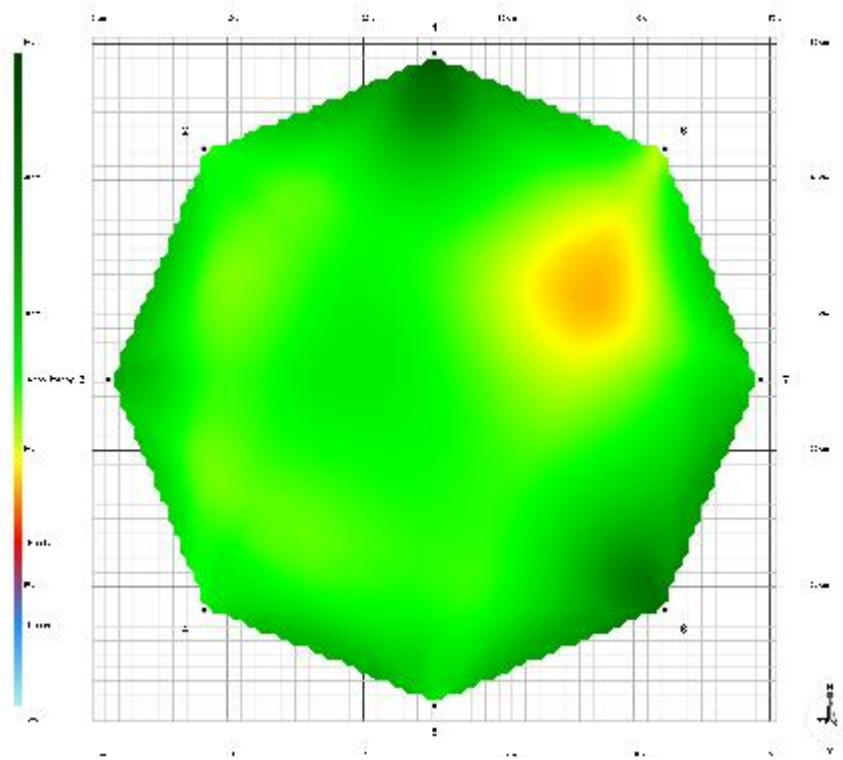
Smrk 10: Plocha defektu 48 %



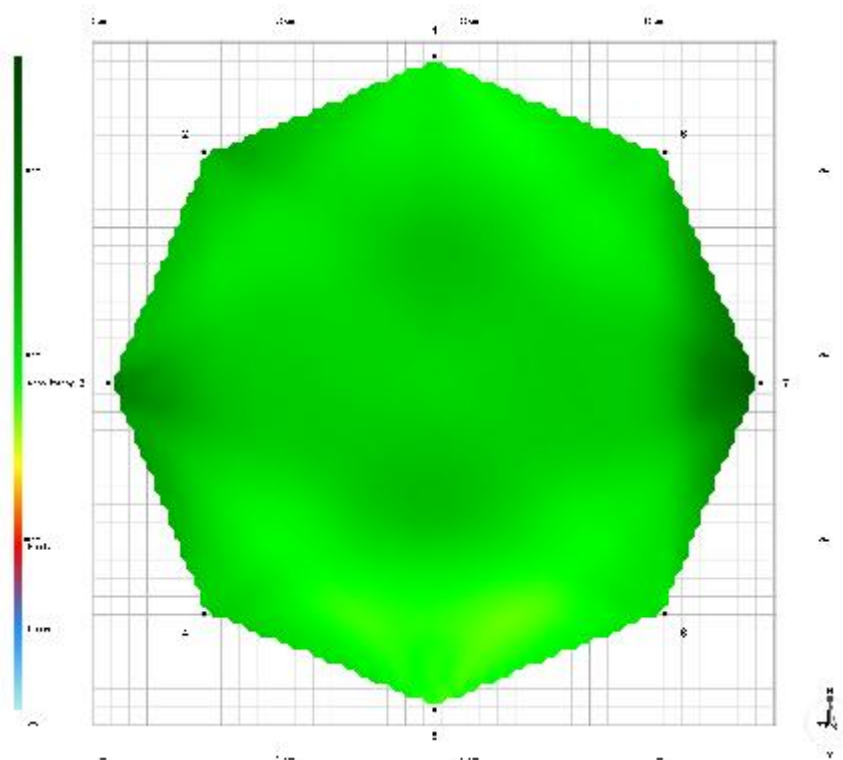
Smrk 11: Plocha defektu 5 %



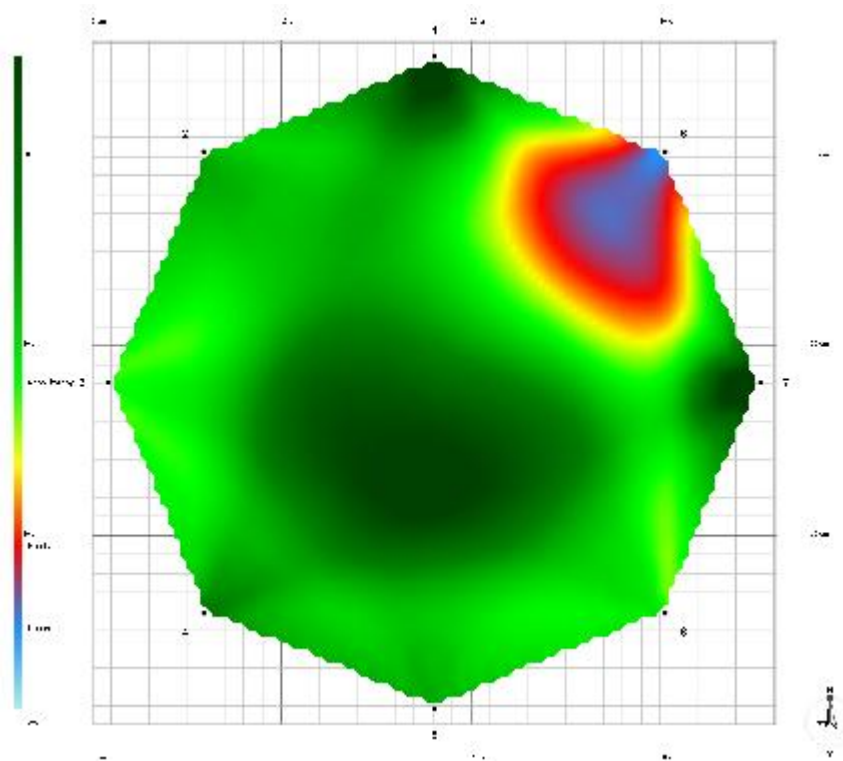
Smrk 12: Plocha defektu 47 %



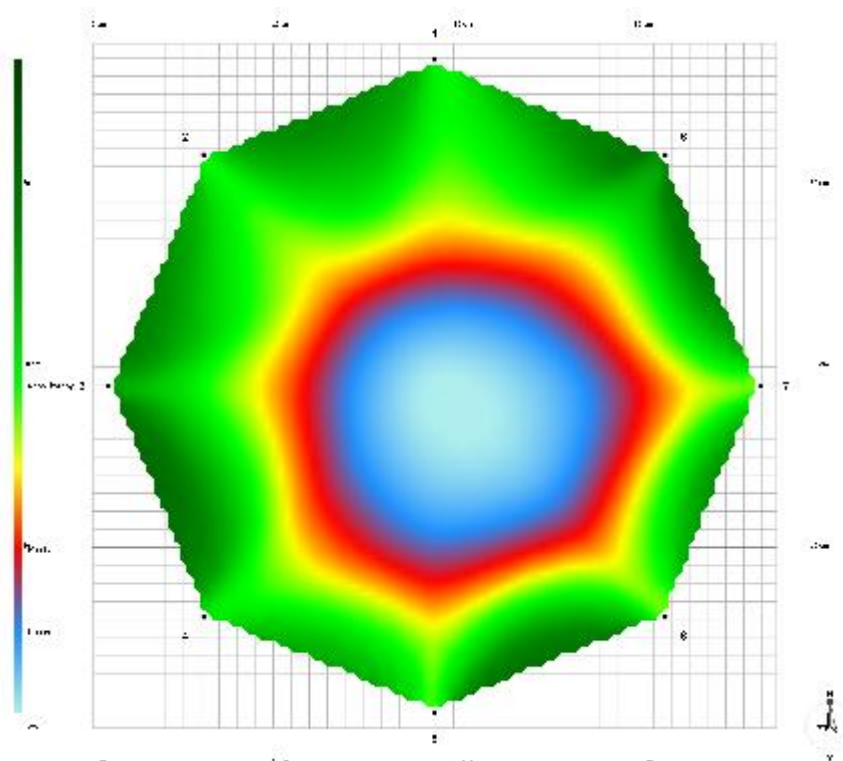
Smrk 13: Plocha defektu 4 %



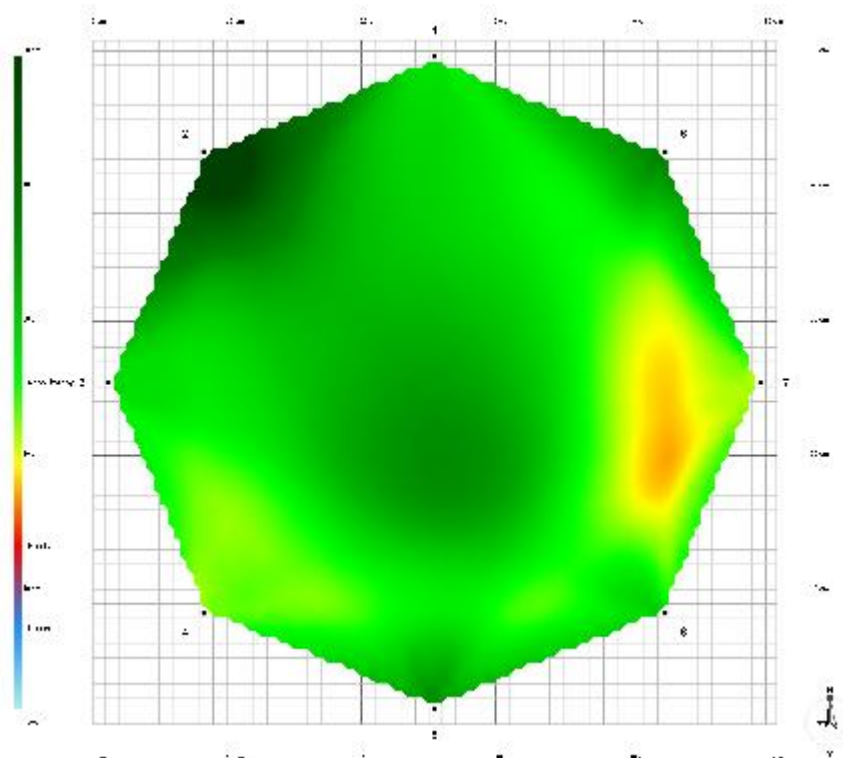
Smrk 14: Plocha defektu 0 %



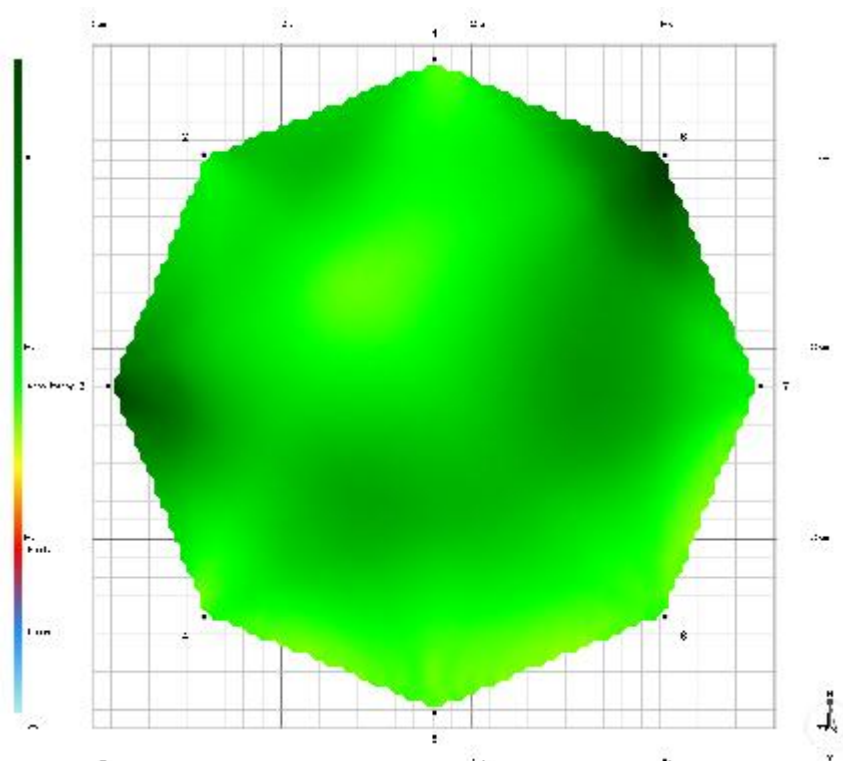
Smrk 15: Plocha defektu 10 %



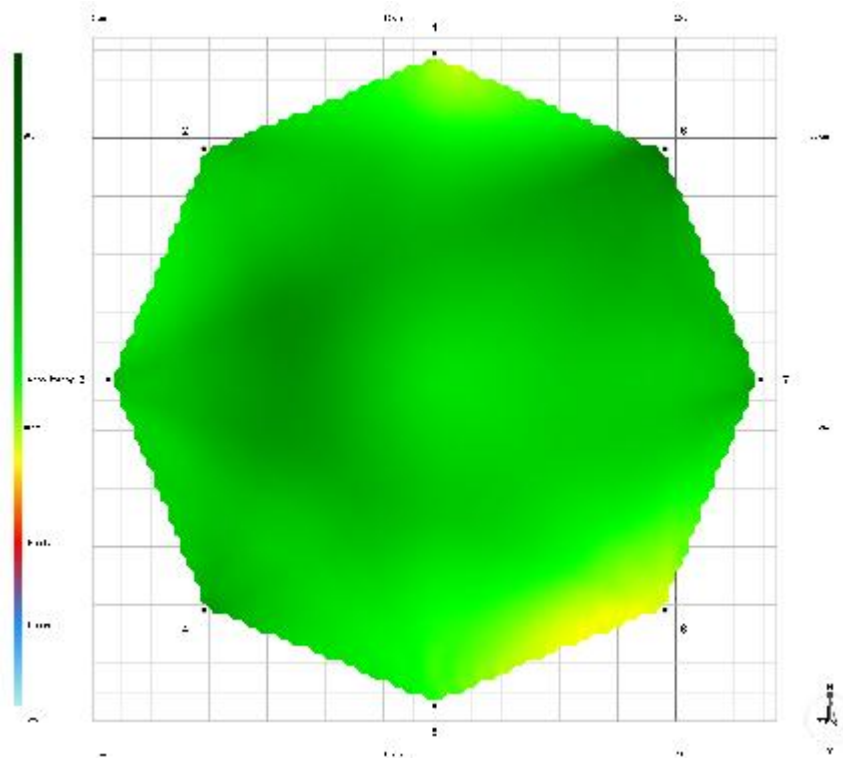
Smrk 16: Plocha defektu 41 %



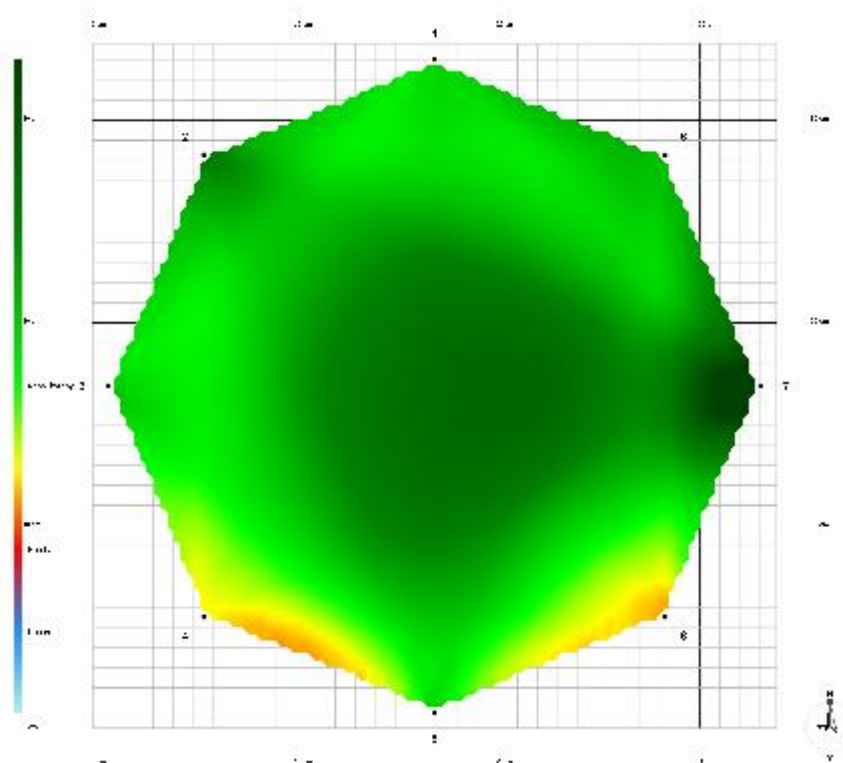
Smrk 17: Plocha defektu 3 %



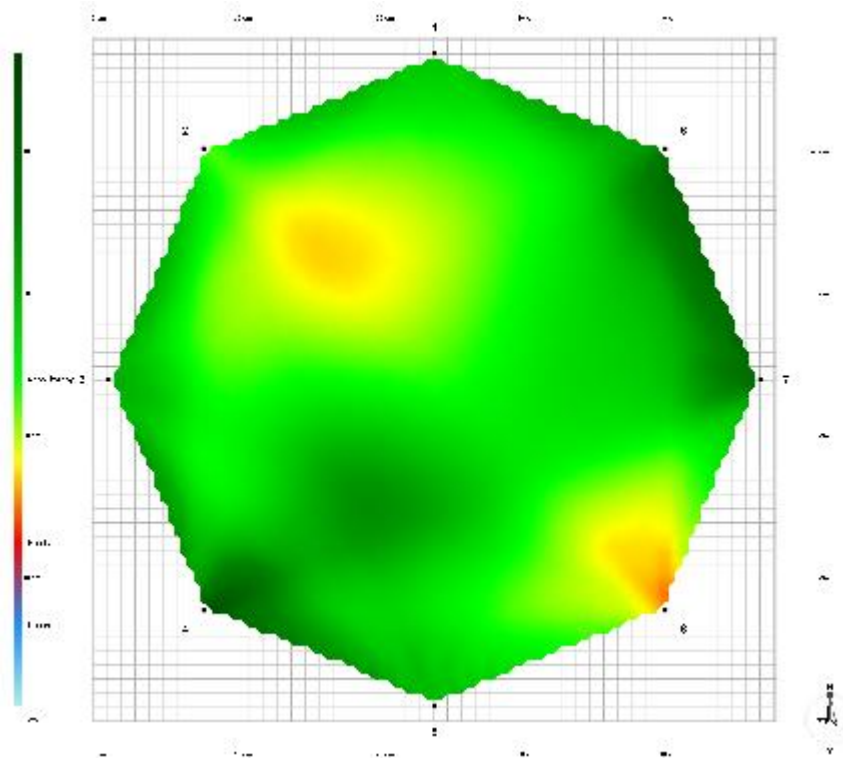
Smrk 18: Plocha defektu 0 %



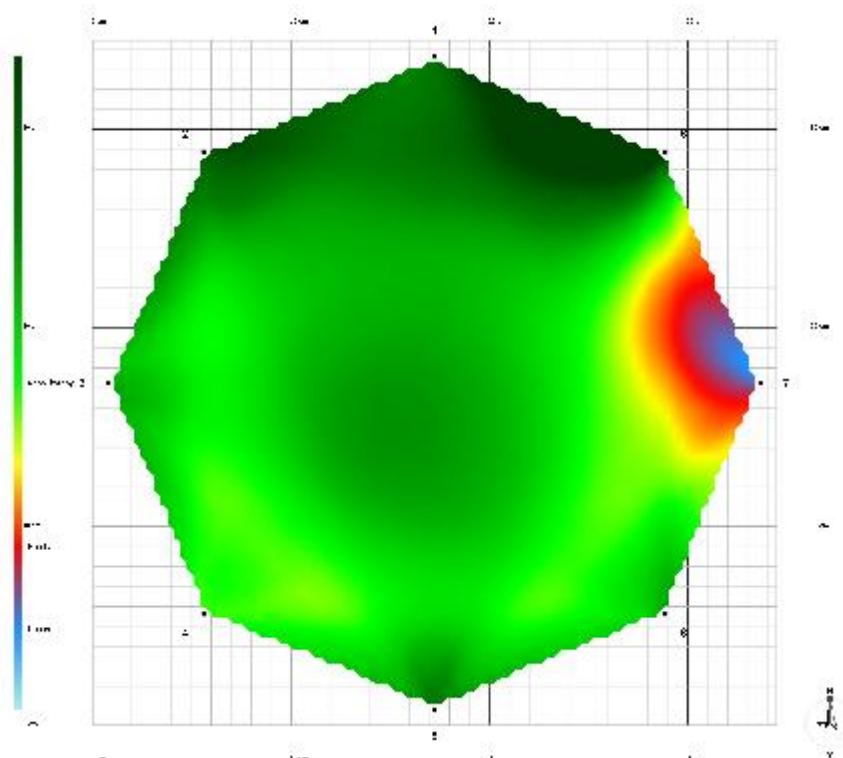
Smrk 19: Plocha defektu 0 %



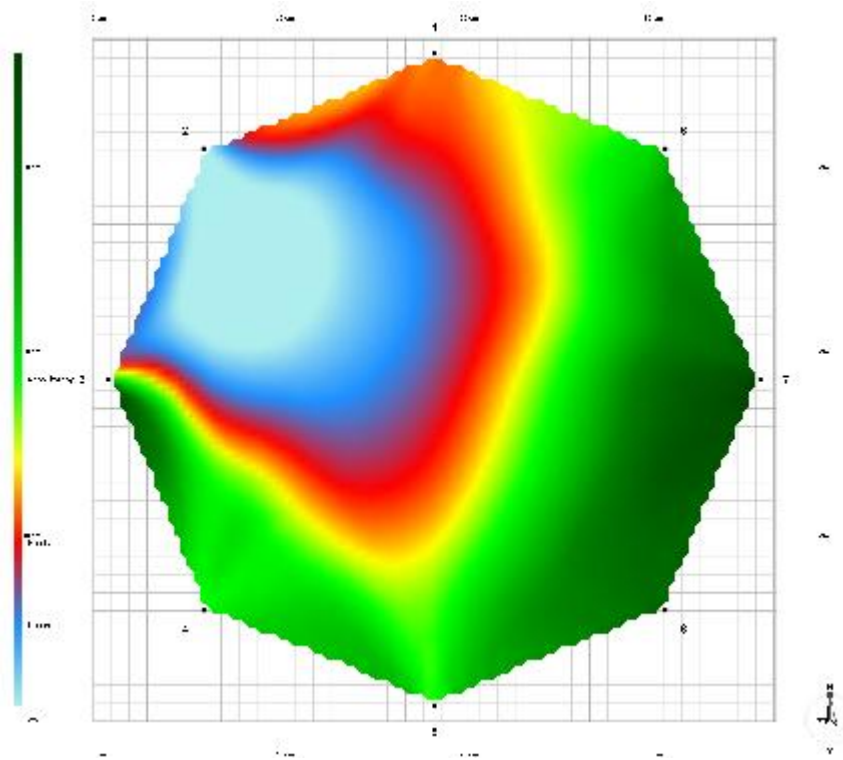
Smrk 20: Plocha defektu 2 %



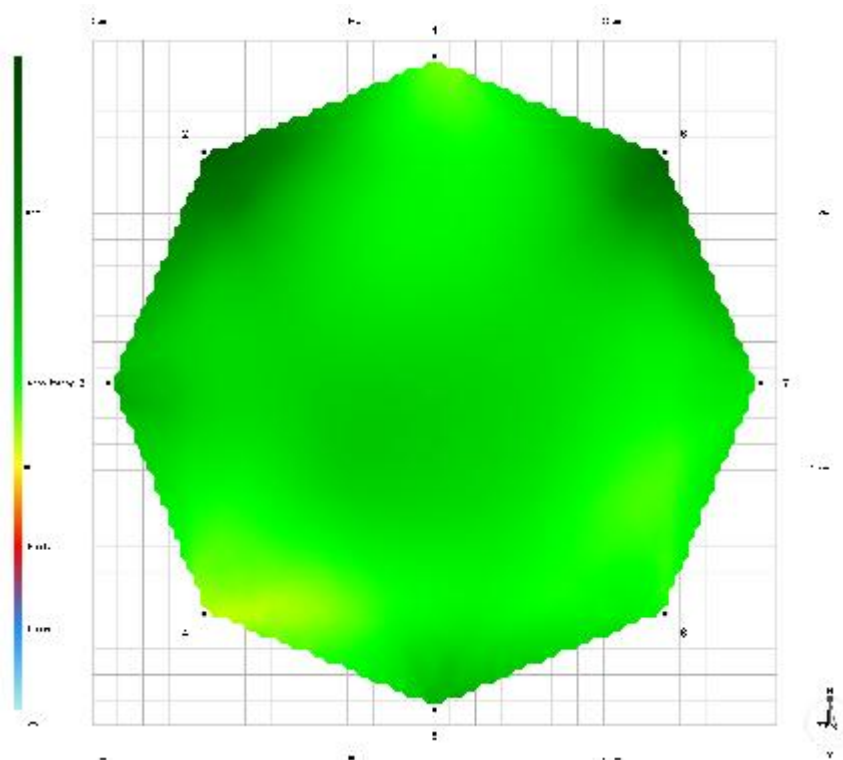
Smrk 21: Plocha defektu 4 %



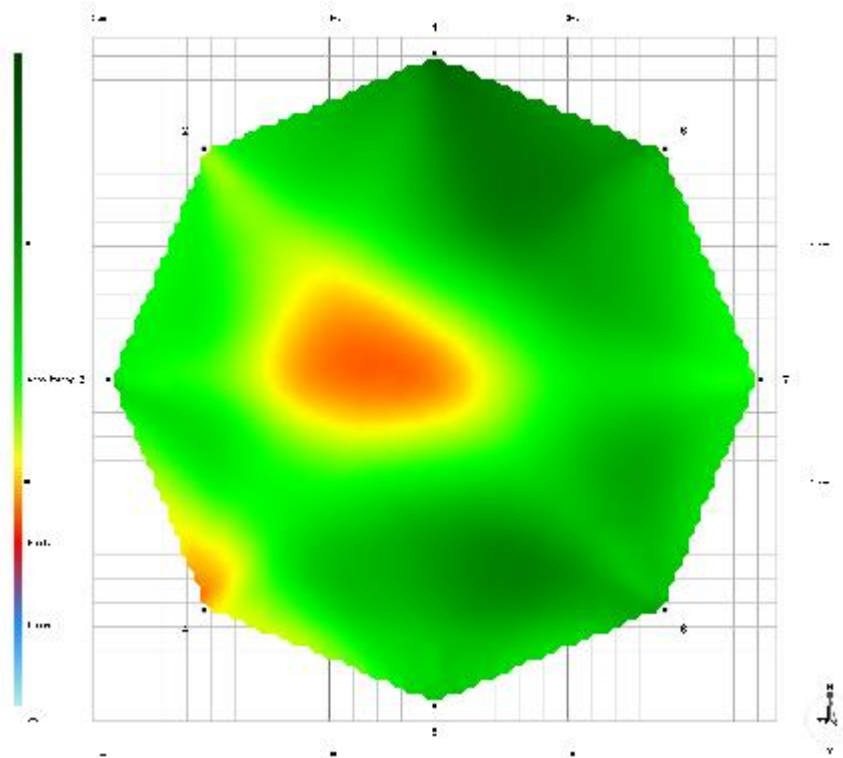
Smrk 22: Plocha defektu 6 %



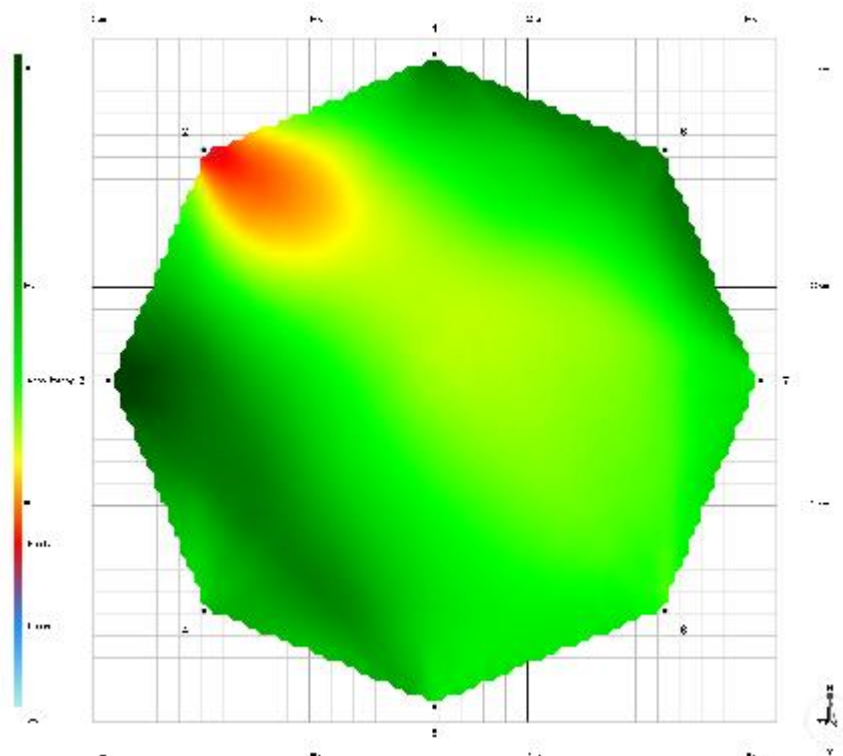
Smrk 23: Plocha defektu 48 %



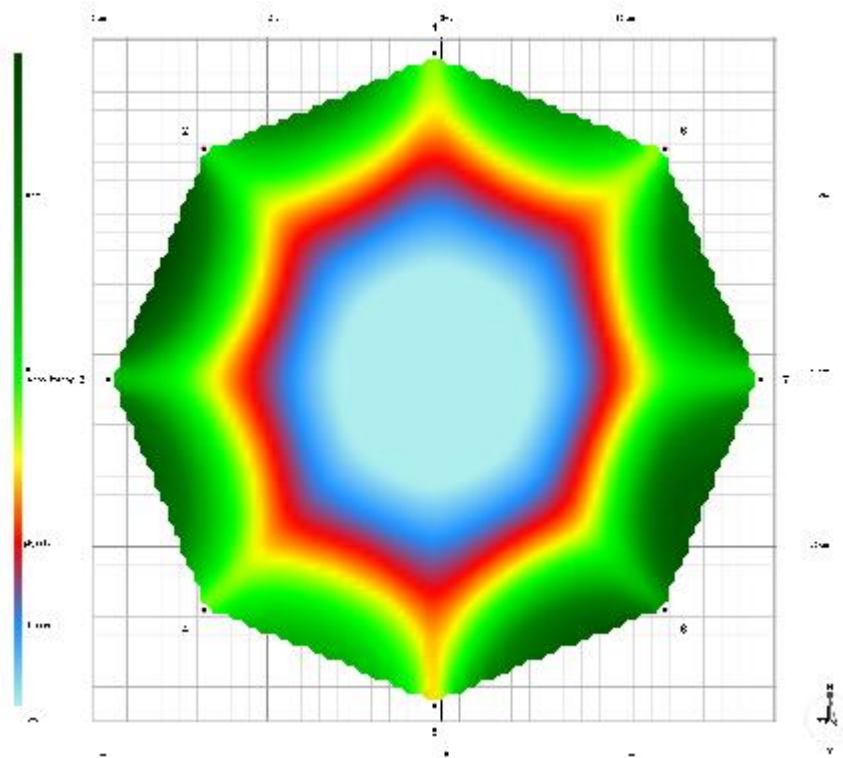
Smrk 24: Plocha defektu 0 %



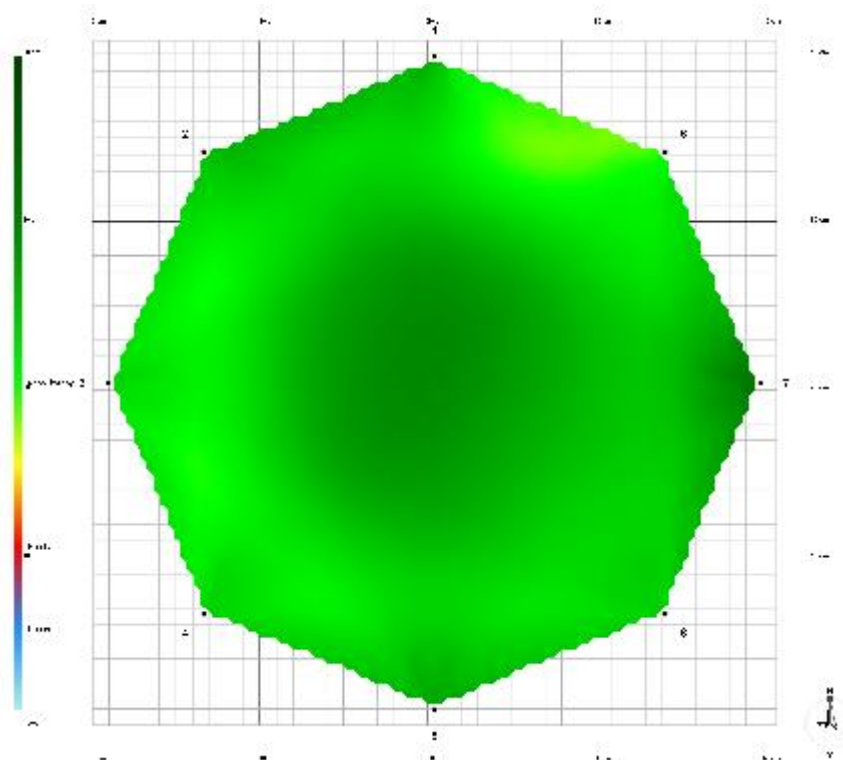
Smrk 25: Plocha defektu 9 %



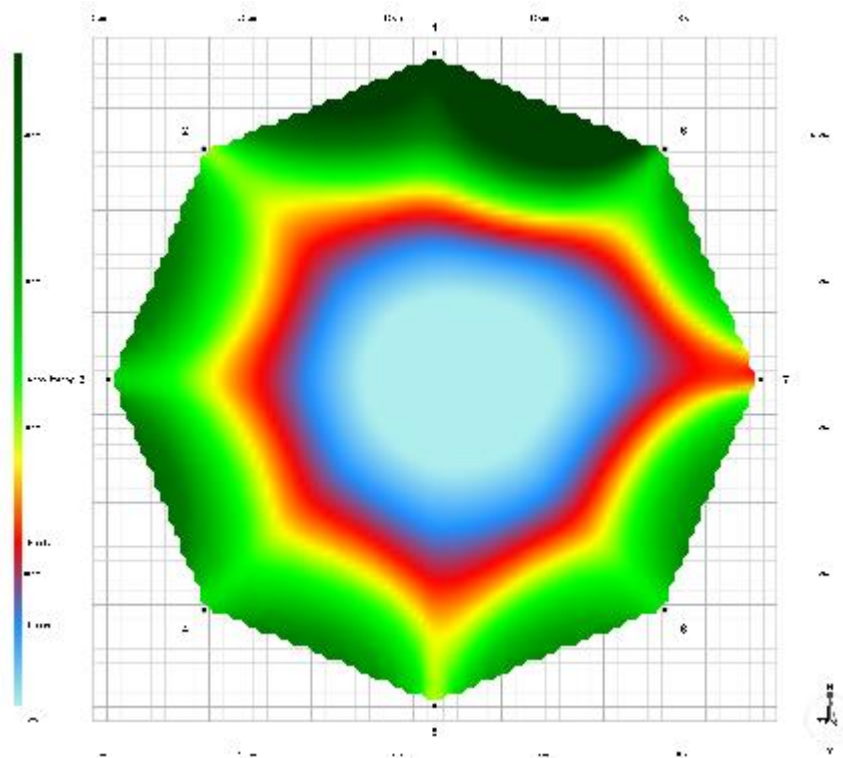
Smrk 26: Plocha defektu 5 %



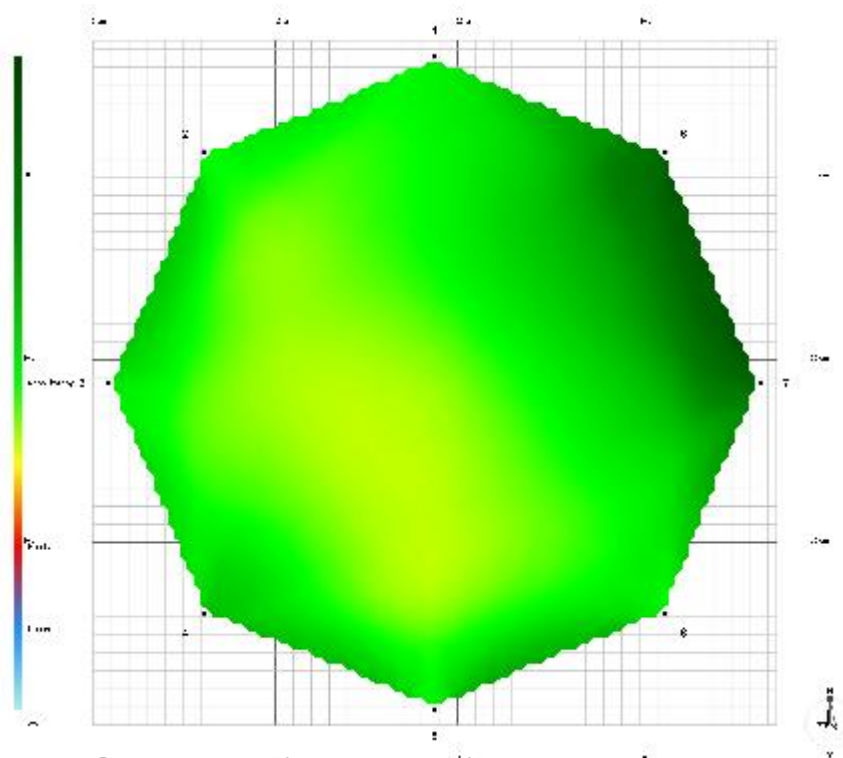
Smrk 27: Plocha defektu 50 %



Smrk 28: Plocha defektu 0 %

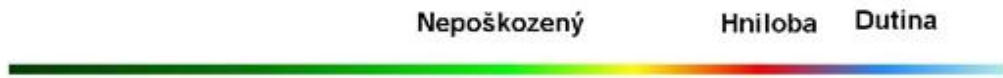


Smrk 29: Plocha defektu 50 %

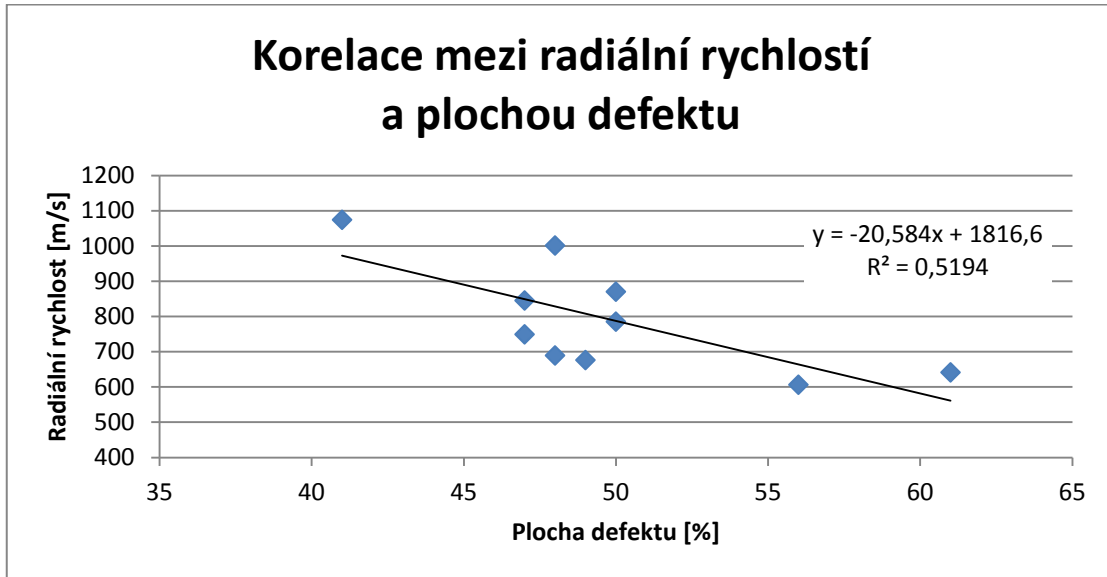


Smrk 30: Plocha defektu 0 %

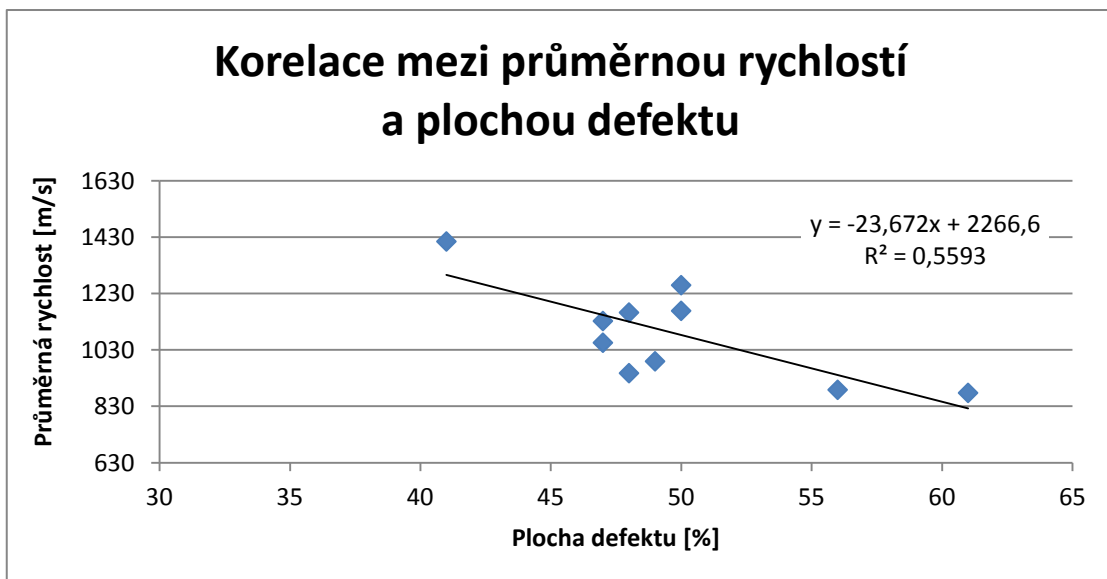
Příloha č. 2: Barevná škála akustického tomografu



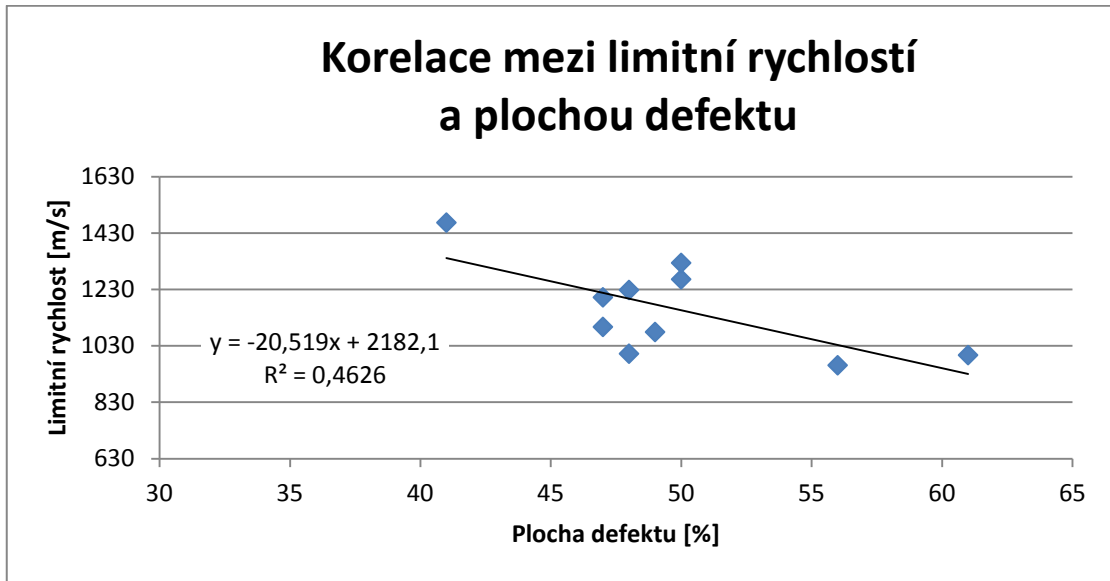
Příloha č. 3: Graf korelace mezi radiální rychlostí a plochou defektu nad 10 %



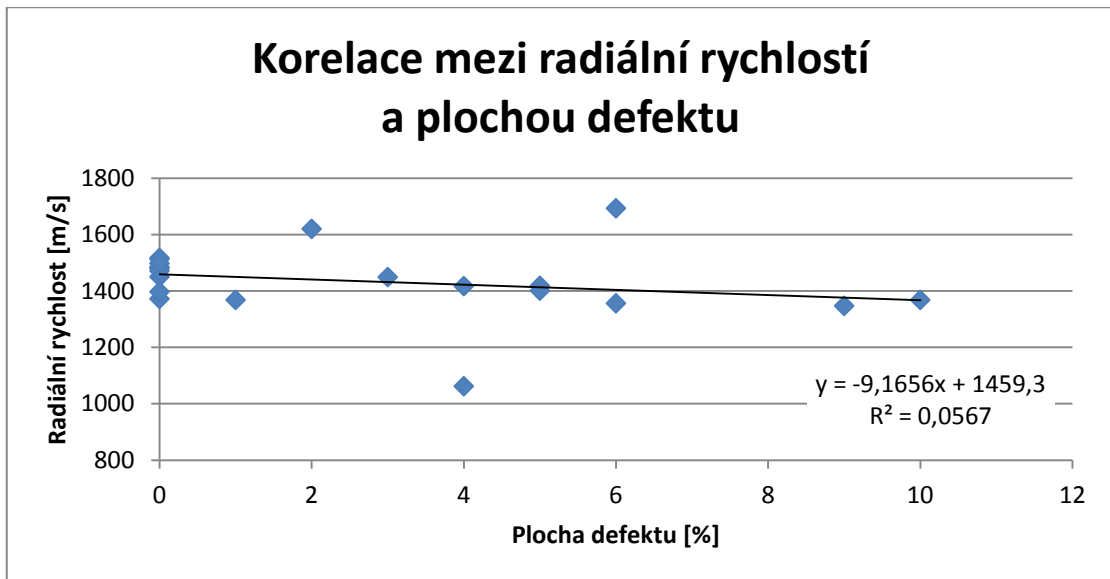
Příloha č. 4: Graf korelace mezi průměrnou rychlostí a plochou defektu nad 10 %



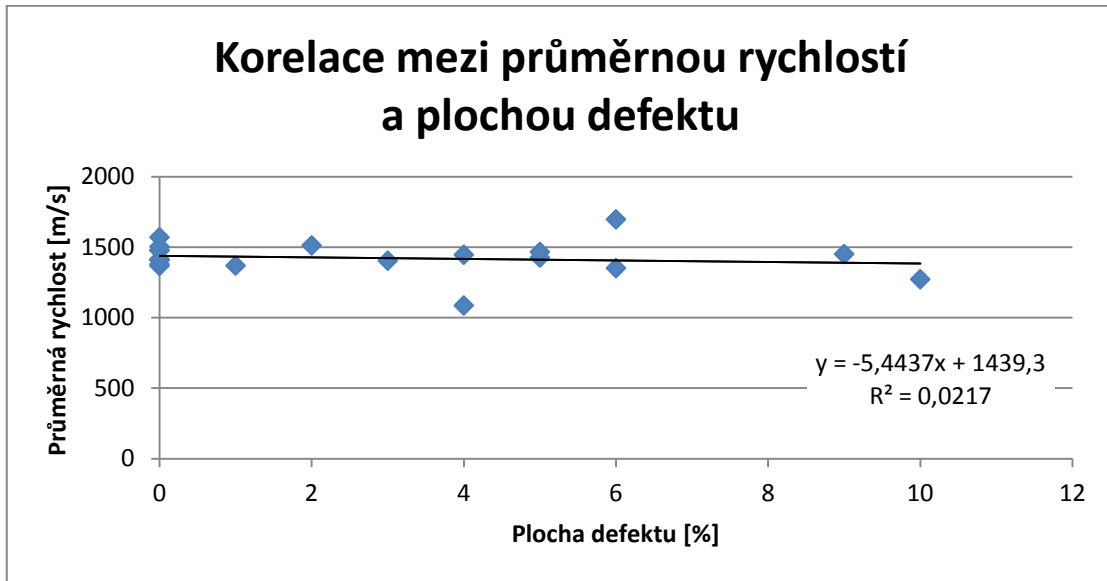
Příloha č. 5: Graf korelace mezi limitní rychlostí a plochou defektu nad 10 %



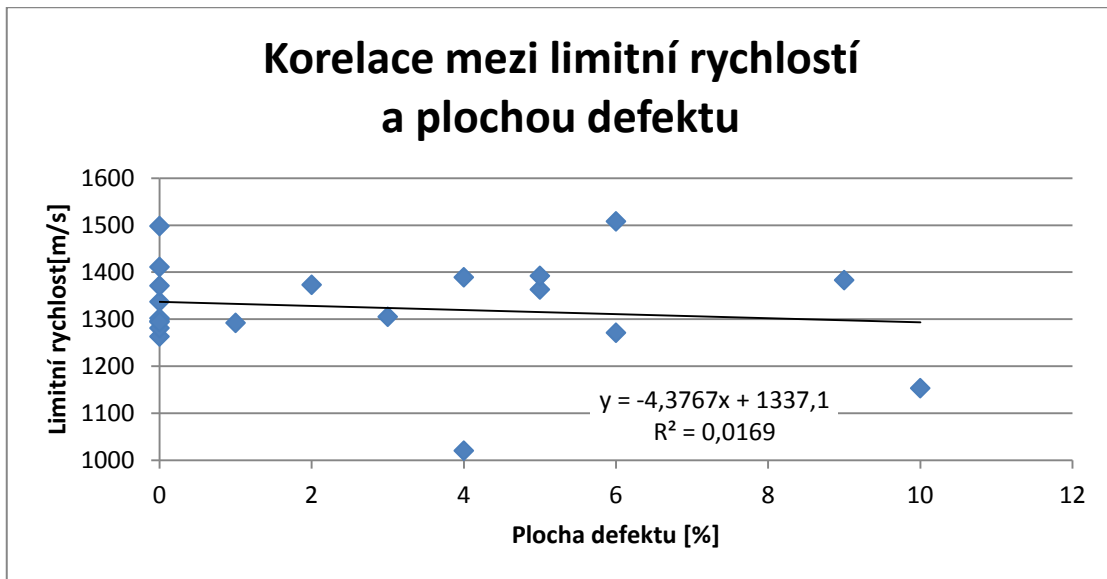
Příloha č. 6: Graf korelace mezi radiální rychlostí a plochou defektu pod 10 %



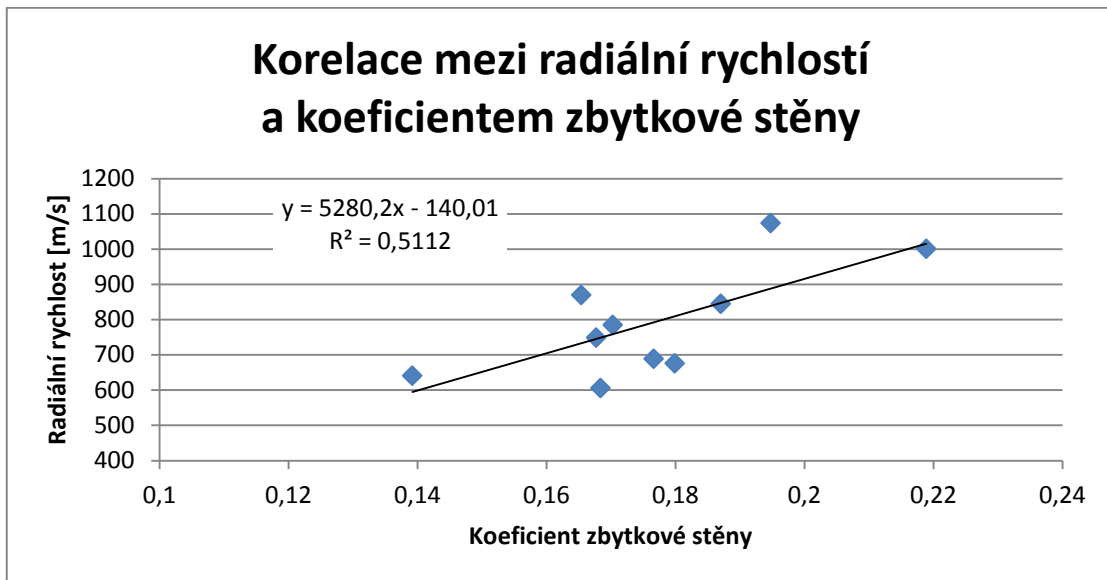
Příloha č. 7: Graf korelace mezi průměrnou rychlostí a plochou defektu pod 10 %



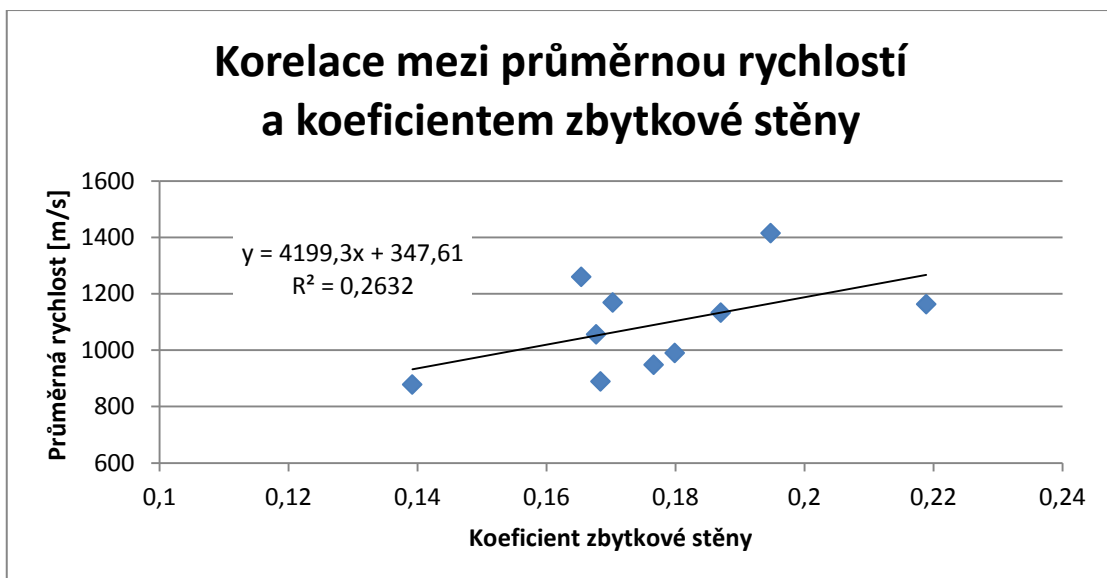
Příloha č. 8: Graf korelace mezi limitní rychlostí a plochou defektu pod 10 %



Příloha č. 9: Graf korelace mezi radiální rychlostí a koeficientem zbytkové stěny



Příloha č. 10: Graf korelace mezi průměrnou rychlostí a koeficientem zbytkové stěny



Příloha č. 11: Graf korelace mezi limitní rychlostí a koeficientem zbytkové stěny

