

Mendelova univerzita v Brně

Lesnická a dřevařská fakulta

Ústav nauky o dřevě

**Analýza stability kořenového systému intaktních a uměle poškozených stromů za využití
přístrojových metod šetření**

Diplomová práce

Brno 2015

Klára Šponarová

Prohlašuji, že jsem práci: *Analýza stability kořenového systému intaktních a uměle poškozených stromů za využití přístrojových metod šetření* zpracovala 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 ve znění pozdějších předpisů a v souladu s platnou Směrnicí o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací.

Jsem si vědoma, 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 nákladu spojených se vznikem díla, a to až do jejich skutečné výše.

V Brně, dne:

podpis studenta

Poděkování

Ráda bych tímto poděkovala Andree Szórádové za cenné rady a připomínky k mé práci a Jaroslavu Kolaříkovi za poskytnutí možnosti pro zpracování této práce. Rovněž bych ráda poděkovala Kateřině Peškové za pomoc při práci v terénu. V neposlední řadě patří poděkování mé rodině za podporu a motivaci po dobu mého studia.

Šponarová Klára

**Analýza stability kořenového systému intaktních a uměle poškozených stromů za využití
přístrojových metod šetření**

**The root system stability analysis for intact and artificially damaged trees with the help
of instrumental methods**

Abstrakt

Práce se zabývá analýzou stability kořenového systému a je zaměřena na dynamické zatížení vlivem větru. Předmětem zájmu je testování intaktních a uměle poškozených stromů pomocí akcelerometrů, které by mohlo být využíváno v arboristice k hodnocení odolnosti stromu vůči vývratu. Práce tuto metodu analyzuje na úrovni vlastního provedení testu i zpracování dat. Navrhuje možnost využití získaných informací při řešení otázky odolnosti stromu vůči selhání vlivem dynamického zatížení.

Klíčová slova: strom, kořenový systém, akcelerometr, dynamické zatížení, vítr

Abstract

This thesis focuses on the root system stability analysis and it deals with the dynamic stress caused by wind. The subject of focus is testing intact and artificially damaged trees with the help of accelerometers which might be used in the field of arboriculture to evaluate the tree resilience to being blown down. Thesis analyses this method by administering the test and evaluating the resulting data. This thesis also proposes different options for using the new information while contemplating the problem of tree resilience to dynamic stress.

Key words: Tree, root system, accelerometer, dynamic stress, wind

Obsah

1. Úvod.....	3
2. Cíl práce	4
3. Literární přehled	5
3.1. Působení větru.....	5
3.2. Síly působící na strom	6
3.2.1. Zatížení větrem	7
3.2.2. Zatížení vlastní hmotností.....	7
3.2.3. Zatížení vodou, sněhem a námrazou	7
3.3. Reakce stromu na dynamické zatížení	8
3.4. Dynamické oscilace stromu	9
3.4.1. Přírozená frekvence	10
3.4.2. Ovlivnění dynamické reakce větvemi	11
3.5. Tlumení.....	13
3.6. Strategie využití dynamických testů.....	15
3.7. Metody hodnocení dynamických pohybů stromu	16
3.7.1. Přírozené zatížení	16
3.7.2. Pull-release test	16
3.8. Hodnotící parametry.....	17
3.9. Měřicí přístroje.....	18
3.10. Statická metoda hodnocení stability stromu.....	19
3.10.1. Tahová zkouška	19
4. Metodika	21
4.1. Materiál.....	21
4.1.1. Základní údaje o lokalitě	21
4.1.2. Popis přírodních podmínek	21
4.1.3. Metodika dynamického testu	23

4.1.4.	Metodika statického testu	23
4.2.	Metodika zpracování dat.....	24
4.2.1.	Dynamický test	24
4.2.2.	Tahové zkoušky	26
5.	Výsledky	27
5.1.	Popisná statistika dynamických testů	27
5.1.1.	Stromy nepoškozené.....	27
5.1.2.	Stromy poškozené	29
5.2.	Grafové výstupy testů dynamiky	31
5.3.	Výsledky poškozených stromů	35
6.	Diskuse.....	37
7.	Závěr	40
8.	Summary	42
9.	Použitá literatura.....	44
10.	Přílohová část	47
10.1.	Přehledová mapa.....	47
10.2.	Fotodokumentace šetřených stromů	48
10.3.	Fotodokumentace umístění akcelerometrů.....	51
10.4.	Fotodokumentace poškození kořenového systému	52

1. Úvod

Kořenový systém je nepostradatelnou součástí stromu. Životnost závisí na typu kořenů, druhu dřeviny a stanovištních podmínkách. Z hlediska biologického umožňuje příjem vody a minerálních látek, z hlediska mechanického upevňuje dřevinu v půdě. Hmoty kořenů představuje dle Kolaříka et al. (2010) v některých případech až $\frac{1}{2}$ hmoty celého stromu v závislosti na typu stanoviště. Obecně platí, že čím chudší je půda, tím vyšší procento z celkové hmoty dřeviny tvoří právě kořenový systém.

V městském prostředí jsou stromy vystaveny mnoha různým stresovým faktorům, jako jsou například vibrace způsobené provozem, zhutnění půdy, prašnost a emise nebo teplo působící ze zpevněných ploch. Stromy v urbanizovaném prostředí se často stávají součástí staveb. Do vývoje kořenového systému významně zasahuje stavební činnost v podobě výstavby chodníků, komunikací, či výkopových prací pro umístění podzemních inženýrských sítí. Poškození kořenů nevede pouze k rozkladu kořenové hmoty, ale může také dojít k poškození dřeva ve kmeni, a tím tak snížení bezpečnosti způsobené zlomem či vývratem stromu.

Hodnocení stability stromů rostoucích mimo les se provádí převážně metodami vizuálními. Metody přístrojové poskytují možnost hodnocení stromu na vyšší úrovni detailu a jejich využití je v současné arboristické praxi stále častější. Rozlišují se metody přístrojové, které hodnotí jednotlivé části stromu (Fakopp, Picus, radar apod.) a metody, jež přistupují ke stromu jako ke komplexu. V současné době je jedním z přístupů hodnocení stability stromu tahová zkouška, která je vyhodnocena statickým testem. Ovšem novým trendem je najít a stanovit metodiku pro hodnocení dynamiky stromu, jelikož strom se nechová jako předmět statický, nýbrž jako předmět dynamický. Řešit dynamiku stromu lze pomocí způsobu použití akcelerometrů.

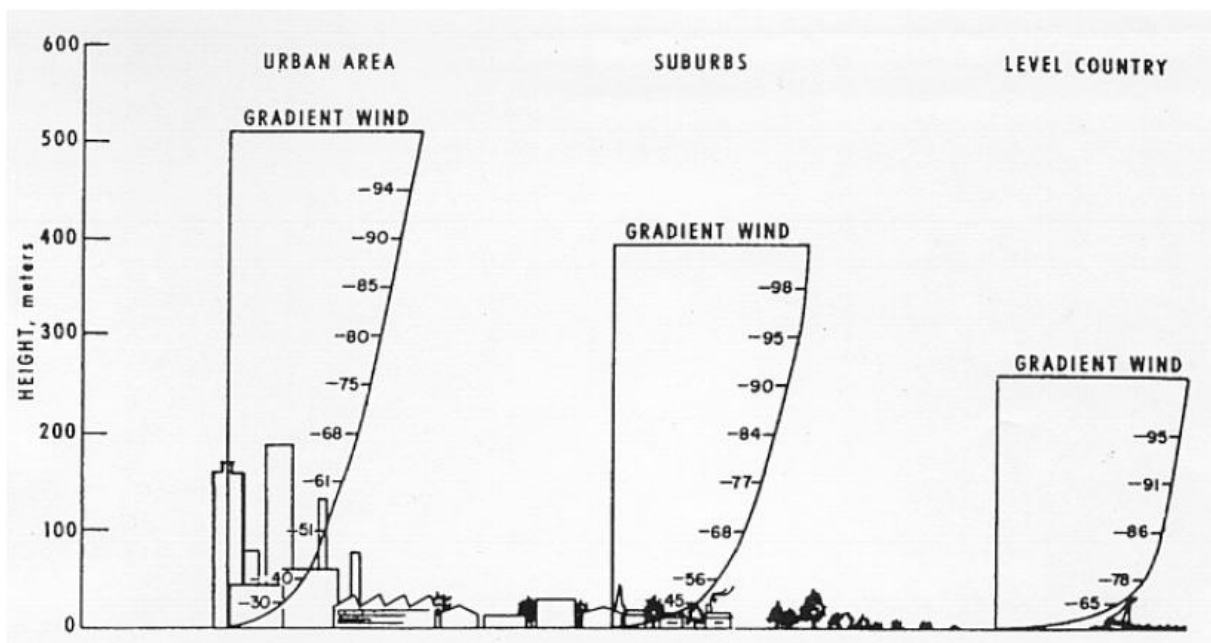
2. Cíl práce

Práce je zaměřena na oblast dynamických pohybů stromu. Primárním cílem je zjištění možností interpretace dat pro hodnocení dynamiky stromu, a to na základě porovnání výsledků statického a dynamického testu šetřených stromů. Předmětem zájmu je testování intaktních a uměle poškozených stromů pomocí akcelerometrů. Dílčím cílem je navržení vhodných parametrů, které by umožnily hodnocení dynamického pohybu stromů a porovnání výsledků práce s výzkumy vedenými na toto téma v posledních letech.

3. Literární přehled

3.1. Působení větru

Vzhledem k velikostem napětí a frekvenci působení, je vítr nejvýznamnější přirozený zdroj sil působících na strom (Kolařík et al. 2010). Rychlost větru se zvyšuje s rostoucí výškou nad zemí (Brudi, Wassenaer 2001) a jeho směr dle Tolasz et al. (2007) ovlivňuje drsnost povrchu. S rostoucí drsností se obecně snižuje rychlost (Tolasz et al. 2007) a mění se charakter proudění (Kolařík et al. 2010). Laminární proudění, ke kterému by mohlo docházet ve volné krajině bez překážek, se mění na proudění turbulentní (Kolařík et al. 2010), které tvoří systém neuspořádaných vírů a u větru se poté objevují fluktuace rychlosti, tedy četné nárazy a změny směru (Tolasz et al. 2007). Dochází ke vzniku míst se zvýšenou (větrné tunely, jako například ulice s vysokými domy) a sníženou rychlostí (závěťí za překážkou) proudění větru (Praus 2005).



Obr. 1 Znárodnění vlivu drsnosti terénu na distribuci křivky proudění větru (Schnelle, Dey 2000 in Good practice guide for atmospheric dispersion modelling, The Ministry for the Environment 2014)

Vítr je důležitý přirozený disturbanční prvek v lesích různých částí světa, protože ovlivňuje strukturu porostu a jeho vývoj (Moore, Maguire 2003). U dřevin rostoucích mimo les dochází vlivem působení větru k zatížení systému stromu (England et al. 2000). Aerodynamický odpor vyjadřuje odpor koruny vůči pronikání vzduchu. Dle Koizumi et al. (2008) odpor klesá

s rostoucí rychlostí větru. Aerodynamika tedy závisí na druhu stromu (anatomické, morfologické a mechanické rozdíly v architektuře koruny a struktuře dřeva kmene a větví) a stavu olistění. Dalším ovlivňujícím parametrem dle Kolařík et al. (2010) je rychlost proudění vzduchu. Rychlost a tlak větru závisí dle Brudi a Wassenaer (2001) na zeměpisné a topografické poloze a sezónních a meteorologických jevech. V mnoha oblastech může působení větru vytvořit vyšší než běžné rychlosti větru, což může být příčinou selhání stromu. James et al. (2006) uvádějí, že mechanika selhání je ovlivněna interakcí velikosti a tvaru stromu, rychlostí větru a topografií, která dle Selliera a Fourcauda (2005) ovlivňuje zejména vnitřní porosty, kde převažuje turbulentní proudění.

Pohybová energie proudícího vzduchu je třením předávána do listů, větví a kmene, čímž vzniká zatížení. James et al. (2006) tvrdí, že čím méně je kinetické energie předávané do stromu, tím se snižuje možnost jeho selhání. Kinetická energie proudícího vzduchu je stromům předávána vlivem tření vzduchu o povrch listů, větví a kmene, a přímého silového působení na listy, větve a kmen (Kolařík et al. 2010). Velikost zatížení větrem je závislá na vlastních rozměrech stromu, jeho výšce, tvaru a ploše koruny, stavu olistění a stanovištních podmínkách (Szórádová 2014). Větší plocha koruny zachytí více dynamických sil, čímž se sníží působící zatížení na strom (James et al. 2006). Část zachycené energie je spotřebována na deformaci chemických vazeb respektive na deformaci řapíku a tření v pletivu. Stejný princip funguje na úrovni letorostů a větví (Kolařík et al. 2010). Dynamické tlumení hmotou dále způsobuje redukci přenosu energie a minimalizaci výskytu harmonické nebo rezonanční frekvence. Jedná se tedy o proces, který minimalizuje přesun větrné energie do kmene a kořenového systému (James et al. 2006).

3.2. Síly působící na strom

Stabilita, respektive odolnost stromu vůči selhání, je již dlouhodobým tématem ve spojení s lesnictvím. Předmětem zájmu bylo předcházení ekonomickým ztrátám, které vznikaly po silných bouřích nebo vichřicích. Problematika stability stromu se v dnešní době dostává do popředí i v městských oblastech, kde je důvodem zájmu zdraví osob a ochrana majetku.

3.2.1. Zatížení větrem

Síly dynamického zatížení musí být přeneseny z koruny přes větve na kmen a kmenem následně do kořenového systému, kde se rozptýlí zejména třením kořenů o půdní částičky (Szórádová 2014). Stromy tedy absorbují energii z větrných proudů, kterými jsou zatíženy díky své nadzemní architektuře (Sellier, Fourcaud 2005). Obecně platí, že struktura je postavena tak, aby kritérium tuhosti bylo větší než pevnost (Gordon 1988 in Vogel 1996). Dynamické zatížení stromu vyvolává moment náklonu na jeho bázi (England et al. 2000). Moment odolnosti kořenového systému závisí na napětí půdy, půdním smyku, pevnosti návětrných kořenů, hmotnosti kořenového talíře atd. (Coutts 1986).

Saunderson et al. (1999) uvádějí, že čím vyšší jsou poměry mezi ohybovým momentem a mezi pevností, tím vyšší je možnost selhání stromu vlivem rychlosti větru. Ohybové zatížení může snížit krut, který umožní přeorientování větví a listů. V důsledku toho se zamezí vývratu či přímému poškození stromu (Vogel 1996).

3.2.2. Zatížení vlastní hmotností

V důsledku růstu stromů se zvětšuje biomasa, čímž dochází k nárůstu vlastní hmotnosti (Niklas, Spatz 2000 in James et al. 2006). Vlastní hmotnost je tedy dána působením tíhy kmene, větví a asimilačního aparátu. Tato hmota působí trvalé zatížení ohybové (u větví a nakloněného kmene), tlakové (kmen stromu) a namáhání vzpěrem (Kolařík et al. 2010). Kolařík et al. (2010) dále uvádějí, že velikost tohoto namáhání je v porovnání s napětím, které vzniká působením větru, poměrně malé. Dle Mattheck a Breloer (1995) je strom na tlakové zatížení vlastní hmotností uzpůsoben.

3.2.3. Zatížení vodou, sněhem a námrazou

Voda působí jako přídavná zátěž vlastní hmotnosti stromu. Jedná se o vodu zachycenou povrchem stromu. Mezi významnější zdroje zatížení patří sníh a námraza. Hustota mokrého sněhu se pohybuje okolo $300\text{--}500\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (Bühler in Vicena et al. 1979 in Kolařík et al. 2010). Jako kritická vrstva sněhu v korunách stromu je uváděno 25–40 cm. Středně rizikové množství sněhu 20–40 cm a vrstva sněhu o mocnosti 60 cm může způsobit poškození stromu (Peltola et al. 1997 in Kolařík et al. 2010). V korunách stromů mohou vznikat i několik centimetrů silné vrstvy námrazy a ledovky, které způsobí selhání celého stromu nebo jeho

části. Hustota námrazy a ledovky se pohybuje kolem $400 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (Vicena et al. 1979 in Kolařík et al. 2010). K tomu se přidává vliv snížené teploty kmene, čímž dochází ke změně mechanických vlastností dřeva, které se stává tužší a pevnější, ale křehčí (Kolaří et al. 2010).

3.3. Reakce stromu na dynamické zatížení

Reakce stromu na vítr je v konečném důsledku dynamický proces (de Lorde 2008 in James et al. 2014), který může ovlivnit růst stromů v podobě trvalých deformací (Cullen 2002). Vogel (1996) ve svém pozorování borovic s odkrytým kořenovým systémem uvádí, že hlavní kořeny byly v příčném profilu vyvinuté asymetricky (neokružový příčný profil) v důsledku reakce na působící dynamické zatížení z převažujícího větru. K přizpůsobení vlastní geometrie dochází také u řapíků, větví a kmene.

Zdravé stromy mohou selhat zlomem i vývratem. Jaký typ selhání převládá se podle Vogel (1996) značně liší od jednotlivých druhů stromů a přírodních stanovištních podmínek. Jehličnaté stromy lesních porostů reagují na dynamické zatížení jednoduchým způsobem. Vzrostlé stromy s vyvinutou korunou rostoucí v otevřeném prostoru reagují na dynamické zatížení komplexním způsobem, který je odlišný od lesních porostů. Tento způsob ovšem doposud dle James et al. (2006) není objasněn. Stromy mají mnoho různých tvarů a velikostí. V městském prostředí stromy obvykle rostou ve volném prostoru, díky čemuž dochází k tomu, že většina hmoty je zastoupena ve větvích a kmen tvoří poměrně malou část celkové hmoty (James 2014).

Strom reaguje na zatížení dvěma mechanismy- růstem nebo odstraněním větví. Milne (1991) in James (2014) uvádí, že rozptýlená energie a tlumení je uvážené k aerodynamickému odporu, vnitřním ztrátám energie ohybem, ztrátám energie v půdě kořenovým systémem a v neposlední řadě mají na tlumení vliv střety korun sousedních stromů. Strukturální výhodou je minimalizace kývavého pohybu stromů, která je dána hmotou větví dynamicky spolupůsobících s hlavní hmotou kmene (James et al. 2006). Vogel (1996) mezi další proměnné zařazuje odpory listů, materiálové vlastnosti kmene a geometrii kořenů jako systém ukotvení.

Mechanická stabilita stromu je schopnost stromu vydržet větrné síly (James et al. 2006). Sellier a Fourcaud (2005) tvrdí, že statický přístup tyto dynamické účinky nebere v potaz,

protože podceňuje mechanické namáhání, které může zapříčinit zlomení větví či kmene nebo vyvrácení stromu (Papesch 1974 in Sellier, Fourcaud 2005).

Zhodnocení stability stromu zahrnuje studie vlastností atmosférického proudění nad korunami (Raupach 1988 in Sellier, Fourcaud 2005), stejně tak jako porozumění mechanického chování stromů až do doby jejich selhání (Coutts 1986; Skatter a Kucera 2000 in Sellier, Fourcaud 2005). Nesmí se ovšem zapomenout na to, že stromy jsou dynamické systémy a jejich chování se v čase mění (Moore, Maguire 2003), protože se síly odporu odvíjejí od rychlosti větru. Tyto časové odchylky vyvolávají dynamické účinky v chování struktury (Oliver, Mayhead, 1974 in Sellier, Fourcaud 2005). Prvním náznakem stromy pouze nepřenáší boční sílu působící na své koruny. Se zvyšujícím se větrem strom minimalizuje aerodynamický odpor v podobě soustředování listů do shluků, pomocí ohýbání řapíků a konců vrcholu listů. Následně se listy stáčí do tvaru kužele, čímž dosáhnou své stability i ve vysoce turbulentním proudění. Tento proces je spojený se stupněm zatížení, kdy se listy dostatečně rychle otevírají a zavírají, jsou tedy schopné reagovat i na krátké poryvy (Vogel 1996).

Vzhledem k rozptýlené energii vlivem tlumení, nedochází k velkým náklonům stromu (James et al. 2014). James et al. (2006) uvádějí, že selhání stromu nastává o rychlostech větru $25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a více. V extrémních hurikánech s nárazy větru až $70 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ dochází k separaci listů od větví a dochází k selhání stromu. Sellier a Fourcaud (2009) ve své studii o aerodynamické reakci stromu zjistili, že materiálové vlastnosti hrají pouze omezenou roli v dynamice stromu. Na rozdíl od toho James et al. (2014) uvádějí, že malé morfologické rozdíly mohou vyvolat reakce v podobě malé oscilace kmene.

3.4. Dynamické oscilace stromu

Výsledky James et al. (2006) a Sellier, Fourcaud (2009) ukázaly, že větve a tvar stromu jsou důležité pro pochopení reakce stromu na dynamické zatížení. Rozměry a morfologie stromu ovlivňuje oscilační frekvenci a tlumení celého stromu (Rodriguez et al. 2008; Speck, Burgert 2011 in James et al. 2014). Pokud je strom vystaven dynamické zátěži, chová se jako systém spojených a tlumených oscilátorů (Sellier, Fourcaud 2005), které reagují komplexním oscilujícím pohybem listů, kmene a větví, z nichž se všechny pohybují různými směry (James et al. 2006). Tlumení je důležité, protože rozptyluje energii, čímž pomáhá snižovat velké

a nebezpečné kmitání. Tlumení energie je tedy důležité pro stromy, na které působí dynamické zatížení formou silného větru (James 2014).

Dynamické oscilace stromu jsou velmi ovlivněny dynamickým pohybem větví (James et al. 2006). Pohyby těžších struktur budou pomalejší než těch lehčích. Tužší struktura bude kmitat rychleji než ta méně tuhá (Sellier a Fourcaud 2005). James et al. (2006) tvrdí, že se zvyšující se hmotou větví k hmotě kmene, se stává přirozená frekvence kmene méně dominantní.

3.4.1. Přirozená frekvence

Přirozené frekvence stromu jsou frekvence, které budou oscilovat při volném kmitání a při kterých se objeví resonance, která bude stimulovaná při jedné nebo více těchto frekvencí (Moore, Maguire 2003). Sugden (1962) in Moore, Maguire (2003) poznamenal, že čím těžší je koruna stromu, nebo čím výše je těžiště, tím nižší je přirozená frekvence, z čehož vyplývá, že přirozené frekvence stromů ve vegetativním klidu jsou větší, než frekvence v olistěném stavu (Baker 1997).

Rozdílné přirozené frekvence jsou spojeny s různými režimy vibrací, které mohou ve stromě nastat (Moore, Maguire 2003). Absorbování energie z turbulentních větrů nejčastěji nastává ve frekvenci blízké frekvenci oscilace stromu (Sellier, Fourcaud 2005). Wood, 1995, Moore 2002 in Sellier, Fourcaud 2005 uvádějí, že energie dostupná stromům v těchto frekvencích nejpravděpodobněji vyústí ve zlomení kmene nebo vyvrácení stromu. Počet a povaha deformačních režimů závisí na změnách v čase a na geometrii zátěže, stejně tak jako na vlastnostech hmoty a tuhosti struktury (Sellier, Fourcaud 2005). Sellier a Fourcaud (2005) ve své studii „Mechanická analýza vztahu mezi kmitáním mladých stromů *Pinus pinaster* Ait. a jejich nadzemní architekturou” dále tvrdí, že několik deformačních režimů je aktivních v případě stromu ve volné oscilaci nebo v oscilaci způsobené větrem. Baker (1997) dále tvrdí, že nižší přirozená frekvence může vést buď z geometrie nadzemní části stromu, nebo možná s větší pravděpodobností, z rozdílů v kořenovém chování. Přestože Mayhead (1973a) in Moore, Maguire (2003) netestoval rozdíly v přirozené frekvenci mezi druhy, naznačil, že pokud tyto rozdíly existují, pak mohou být závislé na rozdílech ve faktorech jako tvar větví a pružnost, délka koruny a faktor tvaru.

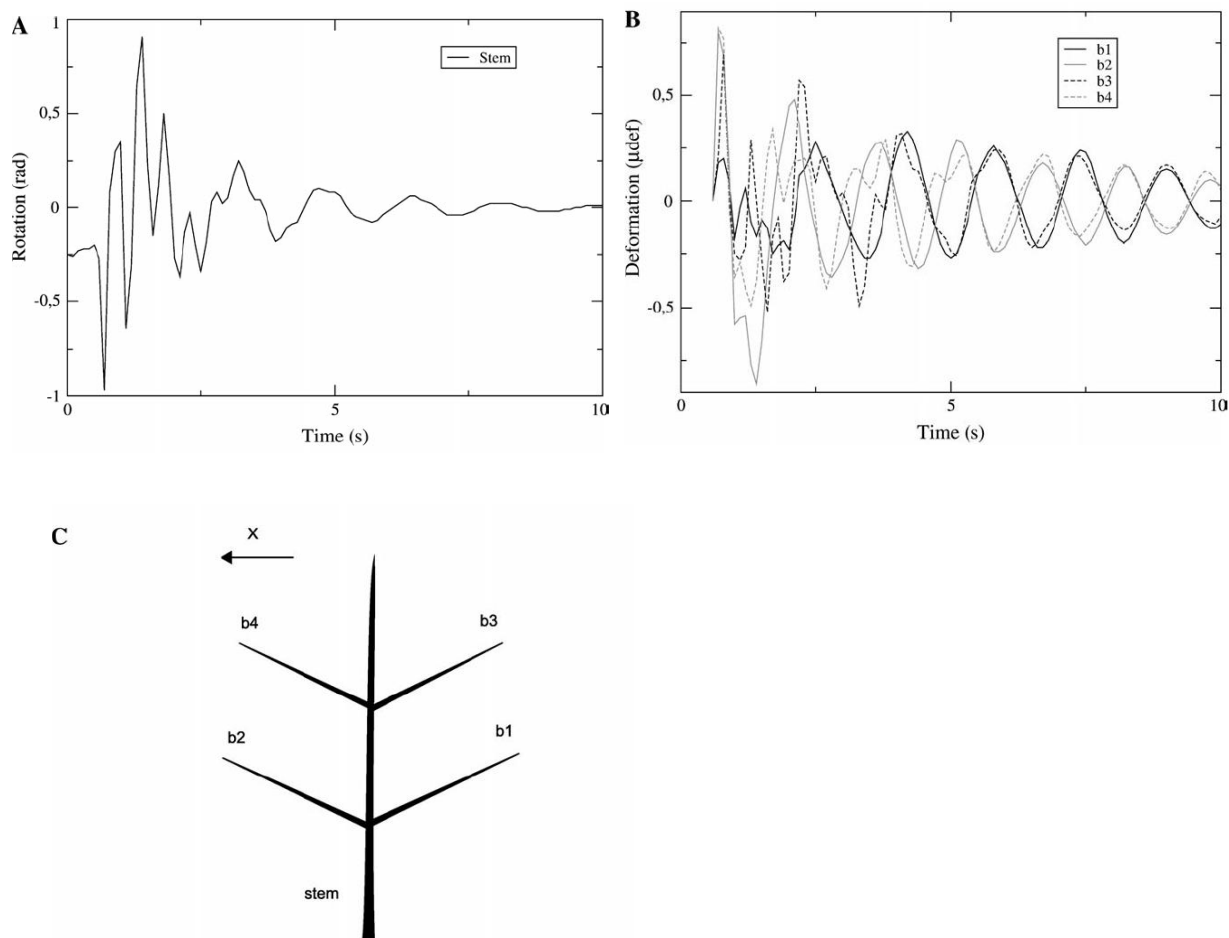
Moore a Maguire (2004) ve své studii uvádějí, že při měření přirozené frekvence a tlumícího poměru muselo být ve všech případech zkušebních stromů odstraněno cca 80 % korunové

hmoty, než byl rozpoznán rozdíl v přirozené frekvenci. Odstranění posledních 20 % hmoty koruny, která byla umístěna na vrcholu kmene, způsobila velké zvýšení přirozené frekvence. Moore a Maguire (2004) dále tvrdí, že přirozená frekvence neodvětveného stromu a zcela odvětveného stromu byla vztažena k poměru DBH/H^2 (kde DBH je průměr kmene v prsní výšce [cm] a H je celková výška stromu [m]), skloubením těchto dvou vztahů může být určena přirozená frekvence stromu dané velikosti a stupně odstranění koruny. Ve studii tedy dokázali, že přirozená frekvence odvětvených stromů byla vyšší se zvyšujícím se poměrem DBH/H^2 . Toto zvýšení bylo pravděpodobně způsobeno úměrně vyšší hmotou korun u stromů s vyšším poměrem DBH/H^2 stejně tak jako zvýšením aerodynamického tlumení kvůli vyšší rychlosti oscilace.

3.4.2. Ovlivnění dynamické reakce větvemi

Celkový účinek tlumení větví minimalizuje dynamické kývání stromu ve větru vytvořením široké škály frekvencí. Tím chrání hlavní strukturu kmene od vytvoření velkých a potencionálně nebezpečných harmonických kývavých pohybů (James et al. 2006). Pohyb těžké struktury bude pomalejší než lehké. Tužší struktura bude kmitat rychleji než struktura méně tuhá (Sellier, Fourcaud 2005). James et al. (2006) tvrdí, že se strom nikdy nekýve zpět přes svůj nulový nebo klidový bod. Čím je větší větrné zatížení, tím více se strom ohýbá a kýve pryč od působící síly. Moore a Maguire (2004) ve své studii o přirozené frekvenci a poměru tlumení u stromu uvádějí, že amplitudy vychýlení se začaly výrazně zvyšovat, pokud bylo z koruny stromu odstraněno alespoň 80% větví, což podle James et al. (2006) indikovalo důležitý vliv postranních větví a také to, že pouze několik větví je potřeba k tomu, aby nastala výrazná změna v kývavém pohybu kmene.

Sellier a Fourcaud (2005) ve svých studiích o měření vlivu větví a kmene na kmitání u odrostků *Pinus pinaster* Ait. dospěli k závěru, že nebyly nalezeny významné rozdíly mezi frekvencí kmitání ve vertikálním a bočním směru. Diametrálně opačné větve kmitaly vertikálně fázově opačně. Naopak větve, které patřily k té samé vertikální rovině a byly na stejné straně kmene, kmitaly ve změně fáze (Obr. 2). Větve orientované ve směru pohybu se ohnuly nahoru, kdežto větve na opačné straně se ohnuly dolů. Když dosáhl kmen své maximální amplitudy a začal se vychylovat v opačném směru, směr kmitání větve se změnil s fázovou změnou kmene.

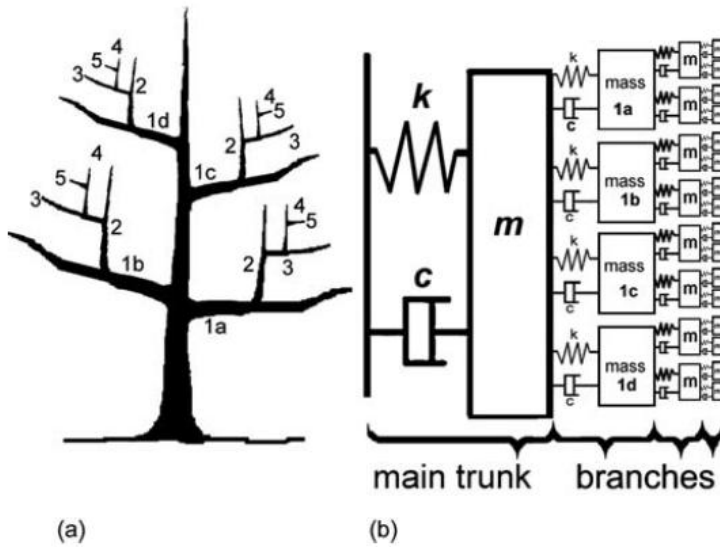


Obr. 2 A) otáčení kmene, B) oscilace větví (b1) a (b3) vyneseny v šedé barvě jsou diametrálně odlišné od oscilací větví (b2) a (b4) vyneseny v černé barvě. Přerušované čáry odpovídají větvím (b1) a (b2), uložených ve spodní části kmene, zatímco plné čáry odpovídají větvím (b3), a (b4), uložených v horní části kmene, C) rozvržení snímacích zařízení na větvích a kmene. Písmeno x znázorňuje směr působícího dynamického zatížení (Sellier, Fourcaud 2005).

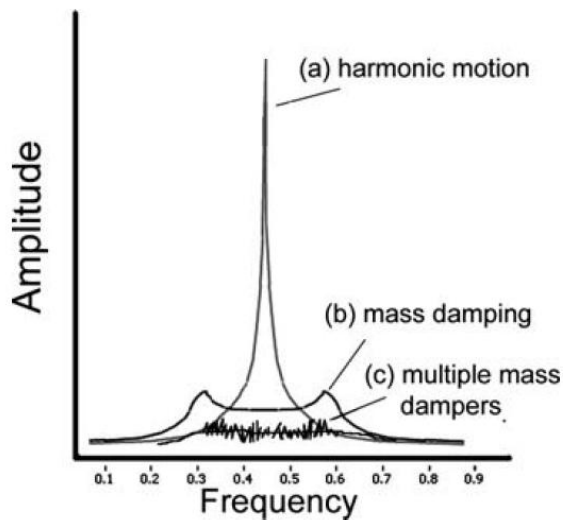
Dynamické kývání stromu je tedy velmi ovlivněno dynamickým pohybem větví (James 2006) a jejich vzájemnou interakcí, která může výrazně změnit frekvenci a tlumení stromu (Moore, Maguire 2004). Se zvyšující se hmotou větví ku hmotě kmene se stává přirozená frekvence kmene méně dominantní. Větve tlumí celou strukturu, což naznačuje, že na stromy s rozdílnou stavbou koruny by mělo být nahlíženo odlišně (James et al. 2006). Dynamickou reakci stromu také dle Sellier a Fourcaud (2009) ovlivňují malé morfologické změny koruny. Vliv geometrie větví na dynamické zesílení je tedy značný, ale není lineární (Sellier, Fourcaud 2009).

3.5. Tlumení

Dynamický pohyb stromu je snižován tlumením (Moore, Maguire 2003), které vyjadřuje míru schopnosti stromu rozptýlit pohybovou energii (Sellier, Fourcaud 2005). Ve stromech tlumení vynutí závislá uvážená rychlost (Moore, Maguire 2004, Jonsson et al. 2007 in James 2014), tlumení je tedy nulové, když je nulová rychlost (James 2014). Tlumící proces vzniká důsledkem vnitřního a vnějšího třecího mechanismu, který je aktivován pohybem struktur (Sellier, Fourcaud 2005). Vnitřní tlumení je způsobeno třením mezi půdou a kořeny (England et al 2000), pohybem větví a vnitřním třením ve dřevě (Scanell 1984 in Sellier, Fourcaud 2005). Vnější tlumení je způsobeno aerodynamickým odporem koruny a také střety korun sousedících stromů (Moore, Maguire 2003). James et al. (2006) uvádějí, že každá větev je hmota, která se kýve ve větru a dynamicky ovlivňuje kmen i ostatní větve. James (2014) tvrdí, že o hmotě větví se může mluvit jako o propojených hmotách, které nejsou zcela samostatné k hlavnímu kmeni, ale přesto mají vlastní kývavou reakci. Dále ve své studii dynamiky větví vzrostlých stromů ve volném prostoru dokázal, že větve v plném olistění mají velmi vysoký celkový stupeň tlumení. Ve skutečnosti se tedy větve chovají jako oddělené tlumené harmonické oscilátory seskupené ke kmeni (Moore, Maguire 2004). Tato interakce mezi složkami koruny může zabránit generaci přirozených harmonických kývavých frekvencí a minimalizovat extrémní dynamické zátěže, které by potencionálně způsobily mechanické selhání (James et al. 2006). Pro jakýkoliv dynamický systém platí, že převládající prvky v reakci jsou ty nejtěžší. U stromů se hmota jednotlivých os obvykle snižuje se snižováním řádu větví (Sellier, Fourcaud 2005). Menší větve mají menší vliv vzhledem k jejich menší hmotě, ovšem dohromady mohou mít důležitý vliv na strom, a to kvůli svému přispění k aerodynamickému tlumení (James et al. 2006).



Obr. 3 Dynamický konstrukční model stromu s kmenem a větvemi, reprezentován jako dynamické masy spojené k sobě navzájem. Systém číslování: č. 1 představuje větve 1. řádu připevněné ke kmeni; č. 2 představuje větve 2. řádu, které jsou připojeny k větvím 1. řádu atd. Označení a, b, c, d, představuje odlišné větve téhož řádu (c- faktor tlumení, k- tuhost, m-hmotnost), (James et al. 2006)



Obr. 4 Vliv tlumení na dynamické kýchání kmene, a) velikost tlumení a významný pik, b) jedna větev (tlumení hmoty) se dvěma malými píky, c) mnoho tlumičů, které nezobrazují žádný pik amplitudy (rozkmity), (James et al. 2006)

Všechny větve tedy působí jako tlumiče hmoty (James et al. 2006), které rozptýlí energii z větru jako pomocný mechanismus pro přežití stromu (James 2014). Větve prvního řádu jsou tlumeny větvemi druhého řádu. Tlumič hmoty se přidá k tlumiči první hmoty a usměrní kývavý pohyb první větve. Celkový účinek je minimalizace dynamického kývání stromu ve větru, a to vytvořením široké škály frekvencí. Tím chrání hlavní strukturu kmene od vytvoření velkých a potencionálně nebezpečných harmonických kývavých pohybů (James et al. 2006). Milne (1991) a Gardiner (1992) in Moore, Maguire (2003) zjistili, že výkyvy frekvencí u stromů byly větší poté, co se odstranily jejich větve.

Milne (1991) in Sellier, Fourcaud (2005) určil výši účasti tří známých zdrojů tlumení u smrku sitka: (1) koruny stromu se střetávají se sousedními stromy (to představuje 50 % celkového tlumení), (2) aerodynamický odpor listoví (40 %), (3) viskozita dřeva. Sellier a Fourcaud (2005) dokázali, že vliv vnitřních zdrojů tlumení (viskozita dřeva, tření půdy/kořenů, oscilace větví) v pohybu struktur nemůže být zanedbán, protože v jejich studii o mechanické analýze ve vztahu volné oscilace a vzdušné stavbě *Pinus pinaster* Ait. dosáhli např. 40 % vnitřního tření z celkového tlumení v případě jednoho měřeného stromu. Dle výsledků této studie Sellier a Fourcaud (2005) uvádějí, že listová plocha byla hlavním zdrojem tlumení celé struktury.

3.6. Strategie využití dynamických testů

Pro studování biomechaniky a dynamiky stromu ve větru byly použity různé metody. Všeobecně se tyto studie rozdělili do následujících skupin (James 2014):

- lesnictví: studování porostu stromů za účelem snížení hospodářských škod,
- vzrostlé volně rostoucí stromy: posuzování stability stromu především v městských oblastech,
- větrné tunely: měření koeficientu zatížení v konstantní rychlosti větru,
- dynamické modely stromů: počítačové studie, metody konečných prvků a matematické modelování.

Studie v lesnictví jsou zaměřeny na ekonomické ztráty způsobené větrem, obvykle s cílem stanovit prahové hodnoty způsobené bouří (James 2014). Prahové hodnoty zahrnují rychlost větru, nárazovost, délku trvání bouře, terén, půdní typ, půdní vlhkost, strukturu růstu (výška stromu, průměr kmene ve výšce 1,3 m, poměr koruny ku kmenu), zdravotní stav stromů

(Mayer 1987), druh stromu a předběžné odhady kolísání větru (James 2014). Prahovou hodnotu rychlosti větru, při které dochází k poškození stromů, Peltola (2006) nazývá kritickou rychlostí větru, která je důležitá pro správu lesů a v lesních modelacích.

Testování ve větrných tunelech se používá pro studování účinku větru na stromy. Kapacita tunelu ovšem není natolik velká, proto jsou testovány pouze stromy malých rozměrů (James 2014). Obecně platí, že získané výsledky z těchto testů jsou použitelné pouze za působení podobných podmínek. Pro zpracování mechanických modelů se počítá s tím, že působící větrná síla v tunelu je podobná jako síla statické tahové zkoušky (Peltola 2006).

Výzkumy na vzrostlých stromech rostoucích ve volných prostorech se zabývají reakcí stromu na dynamické zatížení. Jsou zaměřeny na aerodynamické vlastnosti stromu, frekvence, zatížení větrem, reakce stromu na působení větru vzhledem k ořezu koruny (James 2014).

3.7. Metody hodnocení dynamických pohybů stromu

3.7.1. Přírozené zatížení

Dynamická analýza je mnohem komplikovanější než statická analýza, protože zahrnuje všechny statické síly a další prvky setrvačných sil v důsledku: pohybu, tlumící síly a rozptýlené energie, posunuté a rozdílné fáze, přirozené frekvence a následné změny v pohybu (Den Hartog 1956 in James et al. 2014).

U přirozeného zatížení se jedná se o metodu měření oscilace stromu ve skutečných větrných podmínkách, kdy vítr působí na korunu stromu a energie je přenášena pulsujícím dynamickým systémem v dlouhých časových periodách (James et al. 2006). K tomuto měření pohybu stromu se využívají akcelerometry (Moore, Maguire 2003).

3.7.2. Pull-release test

Síla aplikovaná statickým způsobem bude mít za následek vychýlení určitého rozsahu. Stejná síla aplikovaná dynamickým nebo cyklickým způsobem při určité frekvenci, může zvýšit nebo zesílit pohyb a vyvolat veliký efekt než samotná síla aplikovaná staticky. Tento jev se nazývá dynamický faktor zesílení (DAF) nebo dynamický faktor reakce (DRF), (James et al. 2014).

Metoda pull-release test zahrnuje volnou oscilaci, a to taháním a povolováním stromu pomocí lana a měřením výsledného pohybu oscilace (James et al. 2006). Pohyb daného systému nastává pouze díky jeho režimu vychýlení, kdy nejsou přítomny vnější síly (Sellier, Fourcaud 2005). Ke stromu se připevní lano, pomocí něhož se strom uměle zatíží. Po zatížení se lano uvolní a stromu je umožněno kmitat ve smyslu volné vibrace (Moore, Magiure 2004). Metoda s lanem tahá v jediném bodě, energie je nejdříve uložena v ohnutém kmenu, která se náhle uvolní (James et al. 2006). Při uvolnění struktury systém kmitá, dokud nedosáhne opět svého rovnovážného stavu (Sellier, Fourcaud 2005). James et al. (2006) dále uvádějí, že tento test se používá k měření vibračních parametrů a k ověřování dat z modelových měření v terénu.

3.8. Hodnotící parametry

Růst stromu je citlivý ve velkém měřítku na vliv místního prostředí a není žádný důvod, proč by dva stromy stejného druhu měly být geometricky podobné (Neild, Wood 1999). Nicméně Saunderson et al. (1999) ve své studii o vztahu mezi kmitáním stromů (odrostků) a jejich nadzemní architekturou uvádějí, že poměr extrémního ku průměrnému ohybovému momentu báze kmene je relativně necitlivý k rozdílům v geometrii stromu. To je podle nich významné zejména proto, že největší vliv na selhání stromů větrem budou mít ty parametry, které ovlivní pouze průměrný ohybový moment.

Další parametry, které ovlivňují poměr extrémního a průměrného ohybového momentu nebo průměrný vychýlený tvar, budou pouze druhotného významu. Jedná se o hustotu koruny a kmene, tuhost půdy, zúžení kmene (Saunderson et al. 1999), jeho zakřivení, ale také flexibilita zakotvení kořenů na úrovni zemského povrchu (Neild, Wood 1999). Rychlosti větru jsou poté na selhání nejcitlivější k těm parametrům, které ovlivňují průměrné momenty, obzvláště moment vyvrácení a mez selhání (Saunderson et al. 1999).

Chování stromu pod silným aerodynamickým zatížením závisí také na odporu kořenové desky (England, Baker, Saunderson 2000). Pokud jsou stromy vystaveny působení větru nebo jiné síle působící uměle, pak se ohýbají. Ohýbání kmene není pouze jeho stočení, ale také naklánění báze kmene, což vede k tahovému zatížení kořenů, které pruží (Neild, Wood 1999). Neild a Wood (1991) předpokládají, že rotace stromu nastává v bodě, kde se osa stromu protíná s rovinou země. Neild a Wood (1999) dále ve své studii o ukotvení kořenů stromů ukázali, že stromy nejsou dokonale upevněny v zemi a tuhost spojení půdy a kořenů není

nekonečná (Moore, Maguire 2004). James et al. (2012) uvádějí, že se stromy mohou na bázi naklánět nad hodnotu $0,5^\circ$, aniž by došlo k jejich selhání. Nicméně k mechanickému selhání může dojít již při nízkých náklonech, tj. pod 1° , kdy dle Coutts (1986) dochází k počátečnímu selhání půdy vyskytující se pod úrovní kořenového talíře.

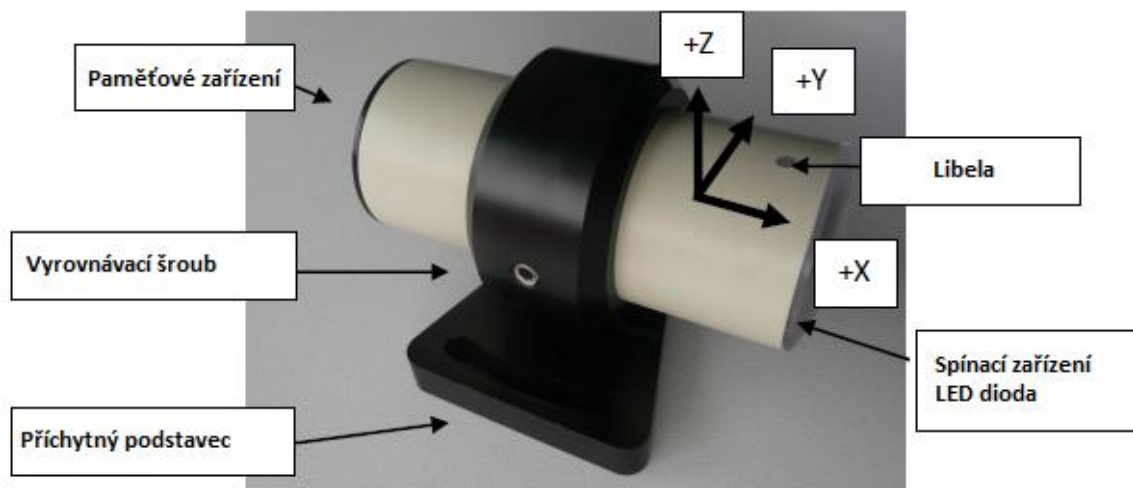
3.9. Měřicí přístroje

Moore a Maguire (2003) určovali přirozenou frekvenci stromu měřením výkonového spektra rychlosti stromu pomocí laserového Dopplerova interferometru. Jedná se o metodu měření laserem na bázi kmene, která na stromě nevyžaduje přístroje a povoluje měření velkého počtu stromů, které mají být zkoumány v relativně krátkém čase (Baker 1997).

Mezi další měřicí přístroje patří akcelerometry. Akcelerometr je senzor, který slouží pro měření dynamického zrychlení respektive sílu vzniklou změnou rychlosti pohybujícího se senzoru (Husák, 2014). Akcelerometry tedy mohou sloužit k detekování náklonu měřením zemské gravitace (statické zrychlení), k měření rychlosti, vzdálenosti, síly a vibrací. V případě stromu slouží k měření kývavého pohybu stromů ve větru. Jak se strom ve větru ohýbá, vnější vlákna se na návětrné straně natahují a na straně závětrné stlačují. Tento malý pohyb vláken se pomocí těchto deformačních měřících přístrojů zaznamenává do počítačového softwaru (James et al. 2006).

Akcelerometry typu Tree Motion Sensor (Obr. 5) zaznamenávají dynamické reakce stromu za působení přirozeného větru. Senzor se skládá z:

- úložiště pro paměťové zařízení SD karty,
- vnitřního softwaru,
- objímky a vyrovnávacího šroubu,
- podstavce, pomocí kterého se senzor připevňuje na strom,
- kartézské soustavy souřadnic v prostoru (osa x, y, z),
- libely,
- spínacího zařízení a LED diody.



Obr. 5 Akcelerometr Tree Motion Senzor

3.10. Statická metoda hodnocení stability stromu

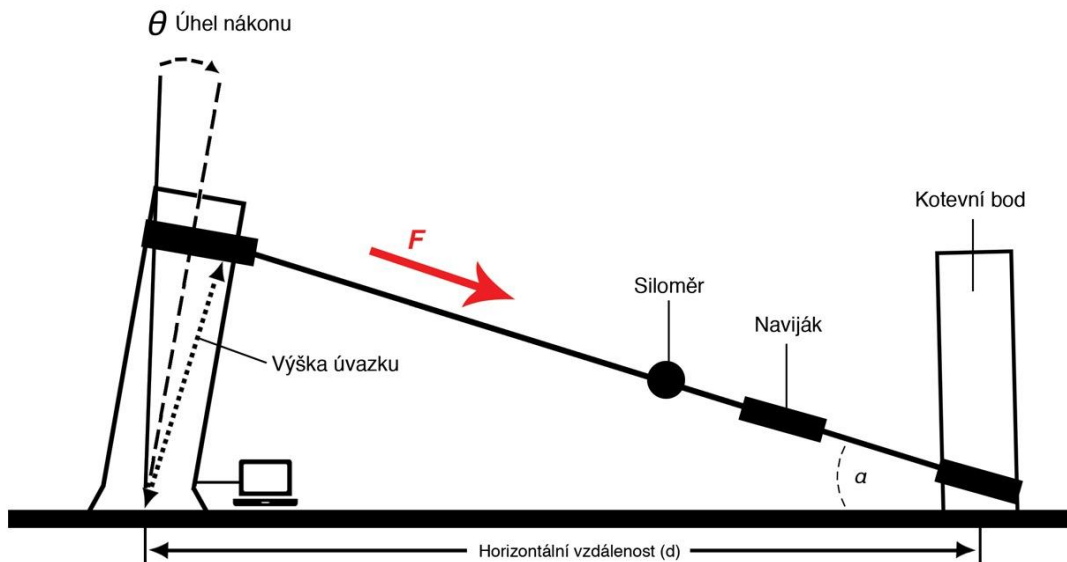
3.10.1. Tahová zkouška

Tahová zkouška je nedestruktivní způsob metody (Kolařík 2003), která je nejčastěji využívána při řešení problematiky mechaniky stromu. Jedná se o technický postup pro určení provozní bezpečnosti stromu (Praus 2005) z hlediska možnosti zlomu a vývratu stromu (Brudi, Wassenaer 2001). Tato metoda tedy umožňuje vyhodnotit stromy s poškozenými kořeny a stromy s nadměrně poškozeným kmenem (Kolařík 2003). V arboristické praxi je využívána metoda, publikována pod názvem Static Integrated Method (Sinn a Wessolly 1989), která je označována jako tahová zkouška.

Principem tahové zkoušky je umělé zatížení stromu a hodnocení reakce na toto zatížení (Szórádová 2014), přičemž sledovaným parametrem bývá deformace dřevních vláken, která je snímána na kmeni a změna úhlu náklonu báze kmene (Kolařík 2003).

Tahová zkouška sestává ze tří částí. Jedná se o zátěžovou analýzu, vlastní tahovou zkoušku a nakonec výpočet odolnosti stromu proti vyvrácení či zlomení (Praus 2005). Při vlastní zkoušce je na strom pomocí navíjecího systému aplikovaná síla, která má simulovat zatížení větrem (Szórádová 2014). Při zkoušce je pomocí dynamometru měřena jednak působící síla a pomocí elastometru současně vznikající deformace. Pro zjištění odolnosti proti vyvrácení je také zároveň zjišťován náklon kmene pomocí inklinometru (Praus 2005). Wessolly (1996) uvádí oblast elastického chování do hodnoty náklonu báze $0,5^\circ$. Brudi a Wassenaer (2001)

pokládají za hranici náklonu $0,25^\circ$ a proto doporučují při měření tahovými zkouškami tuto hodnotu nepřekračovat. Johnson et al. (2006) ve své studii o tuhosti rotace kořenového systému pokládají interval elastického chování za ještě nižší.



Obr. 6 Schéma tahové zkoušky (Szórádová 2014)

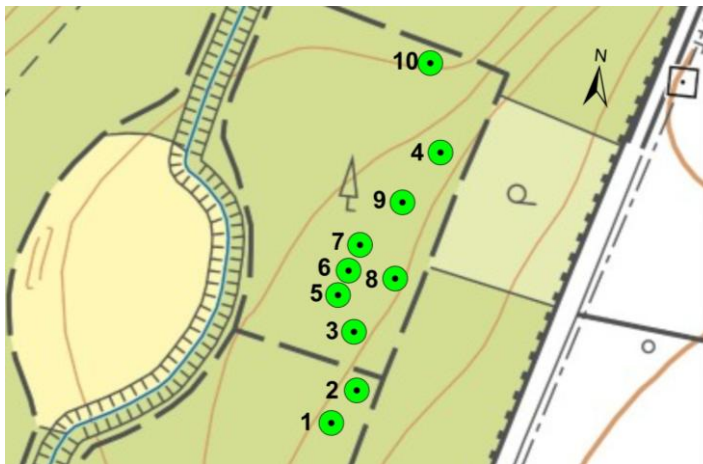
4. Metodika

Tato práce je zaměřena na dynamické pohyby stromů, které souvisí s jejich stabilitou. Vzhledem k tomu, že se jedná o nový, komplikovaný a těžko uchopitelný přístup, byl zvolen postup pro hledání takových parametrů, pomocí kterých mohou být naměřená data z jednotlivých stromů porovnána.

4.1. Materiál

4.1.1. Základní údaje o lokalitě

Obora Sokolnice se nachází jihovýchodně od Brna, nedaleko města Šlapanice, mezi obcemi Kobylnice a Sokolnice, v údolní nivě Zlatého potoka, který protéká jejím středem. Leží v nadmořské výšce 207 m n. m. a výměra obory činí 53ha (Mauer, Šilhánek 2014). Měřené stromy byly vybrány v jižní části obory. Přehledová mapa měřítka 1:10 000 s vyznačeným zájmovým územím je součástí přílohy.



Obr. 7 Měřené stromy v oboře Sokolnice

4.1.2. Popis přírodních podmínek

Z hlediska geomorfologie se jedná o soustavu Vněkarpatské sníženiny, podsoustavu západní Vněkarpatské sníženiny, celek Dyjsko-svratecký úval, podcelek Pracká pahorkatina a okrsek Šlapanická pahorkatina. Jedná se o teplou klimatickou oblast T4, smíšených lesů s potenciální vegetací dubo-habrových hájů a potenciální přirozenou vegetací prvosenková dubohabřina (MapoMap 2015).

Daná lokalita má z hlediska pedologie označení CCp05. Jedná se o půdní jednotku černice (CC), půdní subtyp extrémních substrátů- pelický (p) a poslední zastoupenou položkou jsou půdotvorné substráty spraše (05), (Kozák et al. 2009).

Průměrná teplota vzduchu činí 8-9 °C (průměrné sezónní teploty vzduchu: jaro 9° C, léto 17 °C, podzim 9 °C, zima -1 °C). Průměrný úhrn srážek na dané lokalitě se pohybuje okolo 450 mm/rok (průměrné sezónní úhrny srážek: jaro 100 mm, léto 200 mm, podzim 100 mm, zima 100 mm). Počet dnů se sněžením je zaznamenán na 50–60 dní/rok. Průměrná roční rychlost větru činí 3–4 m·s⁻¹, z toho průměrná sezónní rychlost větru na jaře činí 3,5–4 m·s⁻¹, v létě 3–3,5 m·s⁻¹, na podzim 3–3,5 m·s⁻¹ a v zimě 3–3,5 m·s⁻¹ (Tolasz et al. 2007).

Všechny měřené stromy se nachází v oboře Sokolnice. Předmětné stromy se vyskytují v jižní části obory, kde rostou v rozvolněném porostu. Celkem bylo sledováno a měřeno deset stromů. Z toho sedm stromů čeledě javorovité (*Aceraceae*) a tři stromy čeledě olivovníkovité (*Oleaceae*). Konkrétně se jednalo o druhy: javor klen (*Acer pseudoplatanus* L.) a jasan ztepilý (*Fraxinus excelsior* L.).

U stromů byly zaznamenány parametry typu:

- druh stromu,
- průměr kmene [cm] měřený ve výšce 1,3 m nad zemí, pomocí látkového pásma s přesností na 1 cm,
- výška stromu [m] měřená pomocí laserového dálkoměru typu Tru PulseTM 360/360B s následnou kontrolou přeměření, pomocí výškoměru typu Silva,
- výška nasazení koruny [m],
- průmět koruny [m] měřen pomocí sklolaminátového měřicího pásma. Měření probíhalo jako aritmetický průměr dvou na sobě kolmých poloměrů.

Pro účely zpracování dat byly vybrány stromy s rozměry průměru kmenů s max. odchylkou ±10 cm.

U předmětných stromů nebyla vizuálně zaznamenána žádná významná poškození či defekty. U třech jasanů (strom č. 1, 2, a 4) bylo zjevné prosychání koruny a přítomnost suchých větví. Ve dvou případech (strom č. 1 a 4) se vyskytovaly tlakové vidlice v koruně stromu. Strom č. 1 měl tlakovou vidlici ve výšce 4 m nad zemí a strom č. 4 ve výšce 8 m nad zemí.

Tab. 1 Seznam měřených stromů s naměřenými dendrometrickými parametry

Číslo stromu	Druh stromu	Druh stromu	Průměr kmene [cm]	Výška stromu [m]	Výška nasazení koruny [m]	Průmět koruny [m]
1	<i>Fraxinus excelsior</i> L.	jasan ztepilý	38	23	8	5
2	<i>Fraxinus excelsior</i> L.	jasan ztepilý	40	22	6	5
3	<i>Acer pseudoplatanus</i> L.	javor klen	48	22	6	8
4	<i>Fraxinus excelsior</i> L.	jasan ztepilý	47	16	8	7
5	<i>Acer pseudoplatanus</i> L.	javor klen	44	19	6	5
6	<i>Acer pseudoplatanus</i> L.	javor klen	43	20	5	7
7	<i>Acer pseudoplatanus</i> L.	javor klen	42	21	5	4
8	<i>Acer pseudoplatanus</i> L.	javor klen	42	20	5	9
9	<i>Acer pseudoplatanus</i> L.	javor klen	46	18	4	6,5
10	<i>Acer pseudoplatanus</i> L.	javor klen	42	16	4	4,5

4.1.3. Metodika dynamického testu

Sběr dat probíhal od listopadu roku 2013 do prosince roku 2014 pomocí akcelerometrů typu Tree Motion Sensor, které automaticky zaznamenávaly data, týkající se náklonů kořenového talíře za určité časové období. Na jeden kmen byly připevněny dva akcelerometry, jeden na bázi kmene a druhý v osové vzdálenosti ve výšce 2 m. Dva senzory byly zvoleny z důvodu patrnější reakce na zatížení vzhledem k typu utváření kmene, aby mohly zaznamenávat plný rozsah pohybu stromu. Data byla zaznamenávána se vzorkovací frekvencí 20 Hz z toho důvodu, aby byly zaznamenány i vyšší frekvence.

Připevněné akcelerometry byly na kmeni během každého měření ponechány po dobu v průměru přibližně jednoho týdne, kde snímaly data v časovém rozpětí 20 záznamů za vteřinu, která se automaticky ukládala na paměťová zařízení. Software znázorňoval velikosti náklonů, jejich směr a teplotu vzduchu.

Celkem bylo provedeno šest měření. Tři měření proběhla za vegetačního klidu a tři za vegetace. Měření byla rozvržena tak, aby na každém stromě byla minimálně jednou opakována.

4.1.4. Metodika statického testu

Pro statické testy byly vybrány stromy číslo 1 a 2. U těchto stromů se nejprve provedla tahová zkouška. Pomocí navijecího systému byla na stromy do výšky 4 m aplikována tahová síla, která byla zaznamenána pomocí siloměrné hlavy (Omega typ LCCA, nosnost 50 000 kN,

s přesností na 1 N). Náklon byl měřen snímačem náklonu Sitall STS 110 (s přesností na 0,001°), umístěným na bázi kmene. Stromy byly zatíženy do náklonu 0,1. Při zatížení byl zároveň snímán náklon a deformace kmene pomocí dataloggeru ADAM4561 (Advantech, USA).

Po tahových zkouškách byly stromy následně uměle poškozeny výkopem hlubokým 0,7 m a vzdáleným 1,5 m od báze kmene. Poté bylo opět provedeno měření tahovou zkouškou. Druhý výkop byl proveden do stejné hloubky, ale v menší vzdálenosti od kmene a to 0,5 m. Po tomto poškození byla opět provedena tahová zkouška

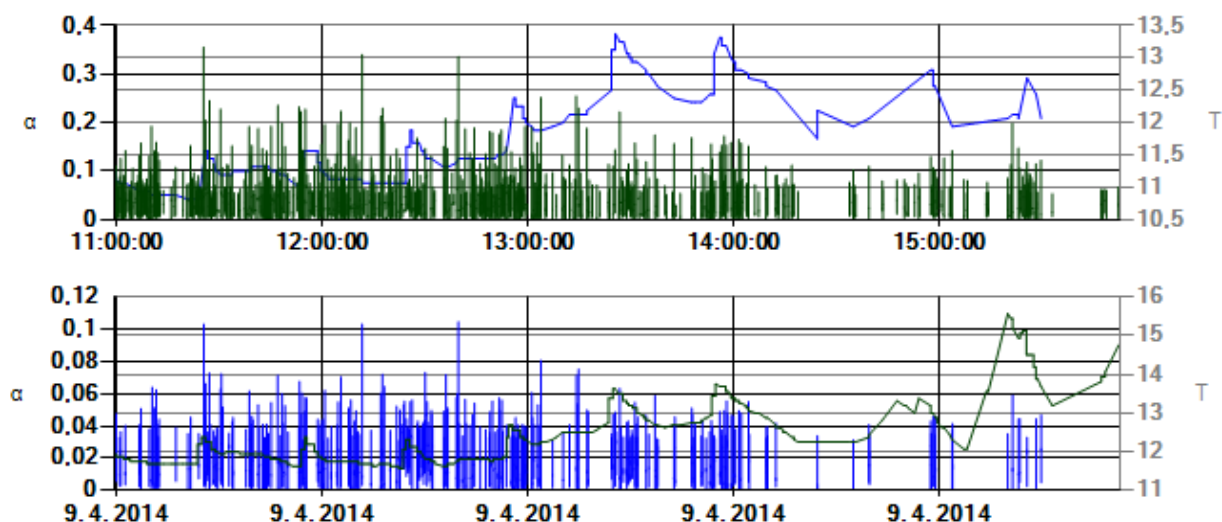
4.2. Metodika zpracování dat

4.2.1. Dynamický test

Pro zpracování zaznamenaných dat z akcelerometrů byl využit počítačový program Tree Motion Sensor (dále jen TMS). Data byla přehrána do TMS programu, který vykreslil náklony, během sledovaného období. Pro zpracování jedné analýzy bylo nutné současně nahrát data příslušných dvou senzorů z jednoho stromu, které nasnímal data ve stejný den a stejný časový úsek. Pokud senzory příslušného stromu náklony nezaznamenaly, nebyly pro další zpracování použity.

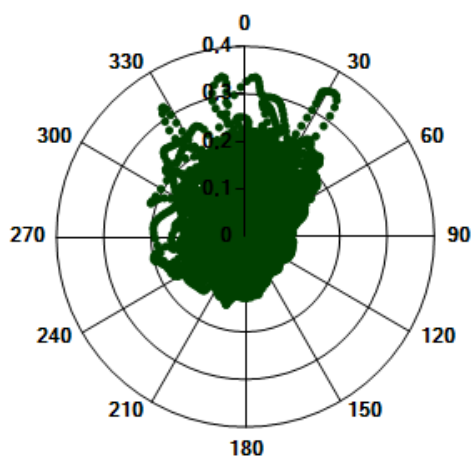
Spodní senzor umístěný na bázi kmene, zaznamenával náklon stromů. Druhý senzor, upevněný v osové vzdálenosti 2 m nad senzorem spodním, sloužil jako kontrolní, pro odlišení mezi náklonem stromu a šumem způsobeným okolními podmínkami. Tento záznam dat byl dále zpracovaný filtrováním významných a nevýznamných náklonů.

Obr. 8, ukazuje záznam vyfiltrovaných významných dat ze stromu č. 5, zaznamenaný na jaře 9. 4. 2014. Osa x zaznamenává časovou řadu, hodnota α udává stupnici náklonů ve stupních a vedlejší osa y (T) udává průměrné kolísání teploty vzduchu v průběhu měření. Píky na obrázku ukazují zaznamenané náklony. Modré píky indikují náklony spodního senzoru umístěného na bázi kmene. Zelené píky ukazují náklony kontrolního senzoru.



Obr. 8 Záznam vyfiltrovaných dat stromu č. 5, zaznamenaných 9.4.2014

Součástí grafového výstupu je také polární graf (obr. 9), získaný pomocí dynamometru, který měří úhel náklonu a zaznamenává směr, kterým se strom naklání. Náklon stromu závisí na převládajícím větru v době měření.



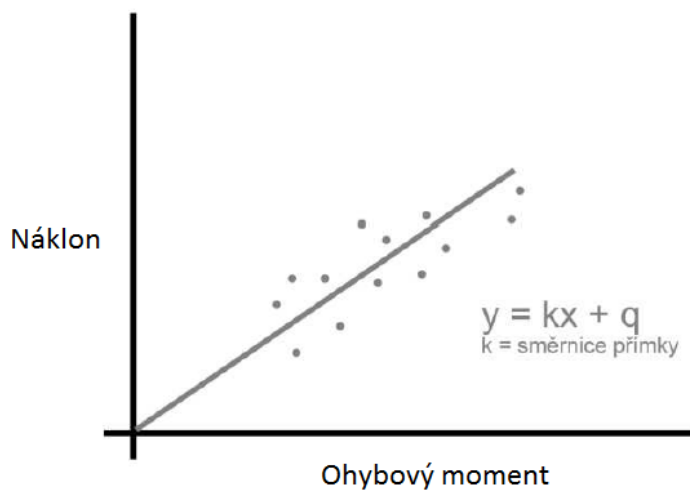
Obr. 9 Záznam dat z polárního grafu ze stromu č. 5 zaznamenaných 9.4.2014

Pro každý strom a příslušný senzor byl následně zpracován datový soubor, který byl použit pro statistické zpracování v podobě popisných statistik. V popisných statistikách bylo následně pracováno s hodnotami: aritmetický průměr a medián zaznamenaných náklonů, minimální a maximální náklon, variační koeficient a rychlost větru. Maximální rychlosti větru byli získány z 5 km vzdálené meteorologické stanice obce Šlapanice u Brna. Jedná se tedy o data která slouží pro orientaci rychlosti větru v dané oblasti, u šetřených stromů lze

očekávat hodnoty rozdílné. Pomocí popisné statistiky byly sledovány rozdíly stromů olistěných a neolistěných a parametry velikosti náklonů.

4.2.2. Tahové zkoušky

Z tahové zkoušky byl získán záznam velikosti síly a náklonu. Data byla dále zpracována pro vyhodnocení reakce stromu na zatížení pomocí směrnic přímky. Směrnice přímky je proložena grafickým vyjádřením závislosti ohybového momentu a příslušného náklonu báze kmene (obr. 10).



Obr. 10 Závislost ohybového momentu a náklonu báze kmene

Pro účely této diplomové práce bylo následně pracováno pouze s parametrem náklonu.

5. Výsledky

5.1. Popisná statistika dynamických testů

5.1.1. Stromy nepoškozené

Stromy nepoškozené tvoří taxony: javor klen (*Acer pseudoplatanus* L.), jasan ztepilý (*Fraxinus excelsior* L.). Přesněji se jedná o stromy číslo 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10. Z důvodu nedostatečných záznamů dat nebyl strom číslo 4 do statistiky zařazen.

Tab. 2 Popisná statistika datového souboru pro náklon kmene

Číslo stromu	Datum měření	Umístění	Aritmetický průměr	Medián	Min	Max	Variační koeficient	Max. rychlost větru [km·h ⁻¹]
3	9.8.2014	báze	0,021670	0,019731	0,000258	0,071504	64,47405	23
3	9.8.2014	2m	0,054508	0,042483	0,000668	0,338899	77,27654	23
3	11.8.2014	báze	0,021480	0,019698	0,000243	0,077009	56,01035	23
3	11.8.2014	2m	0,046060	0,039978	0,000133	0,263393	67,17765	23
3	15.8.2014	báze	0,020819	0,020037	0,000533	0,056290	53,50202	14
3	15.8.2014	2m	0,050949	0,042567	0,000407	0,239002	72,99069	14
3	22.8.2014	báze	0,029839	0,028392	0,000113	0,082577	50,33833	11
3	22.8.2014	2m	0,045003	0,044712	0,000599	0,079560	24,15695	11
3	24.8.2014	báze	0,022628	0,021675	0,000308	0,199946	53,55508	24
3	24.8.2014	2m	0,045091	0,038985	0,000309	0,345930	68,23291	24
3	25.8.2014	báze	0,026538	0,025092	0,000534	0,060643	42,72849	3
3	25.8.2014	2m	0,044525	0,049054	0,000384	0,099776	57,91419	3

Tab. 3 Popisná statistika datového souboru pro náklon kmene

Číslo stromu	Datum měření	Umístění	Aritmetický průměr	Medián	Min	Max	Variační koeficient	Max. rychlost větru [km·h ⁻¹]
5	19.3.2014	báze	0,022712	0,020185	0,000103	0,107156	60,98661	27
5	19.3.2014	2m	0,042879	0,037660	0,000201	0,383092	66,01034	27
5	8.4.2014	báze	0,035969	0,022477	0,000065	0,099792	87,04217	14
5	8.4.2014	2m	0,043504	0,037729	0,000013	0,130739	81,26929	14
5	9.4.2014	báze	0,021501	0,019643	0,000097	0,104509	58,17126	23
5	9.4.2014	2m	0,047001	0,040675	0,000258	0,355503	67,61366	23
5	24.7.2014	báze	0,018792	0,017952	0,000247	0,050045	51,54327	14
5	24.7.2014	2m	0,038832	0,036163	0,000452	0,146314	55,11055	14

Tab. 4 Popisná statistika datového souboru pro náklon kmene

Číslo stromu	Datum měření	Umístění	Aritmetický průměr	Medián	Min	Max	Variační koeficient	Max. rychlost větru [km·h ⁻¹]
6	19.3.2014	báze	0,019764	0,018186	0,000188	0,095735	57,48126	27
6	19.3.2014	2m	0,042754	0,037653	0,000238	0,350061	67,72735	27
6	9.4.2014	báze	0,020303	0,019274	0,000367	0,058956	53,29178	23
6	9.4.2014	2m	0,043502	0,038311	0,000197	0,285692	64,38072	23
6	23.7.2014	báze	0,028583	0,026001	0,000047	0,087906	63,89279	33
6	23.7.2014	2m	0,044525	0,041608	0,000060	0,335442	57,32326	33

Tab. 5 Popisná statistika datového souboru pro náklon kmene

Číslo stromu	Datum měření	Umístění	Aritmetický průměr	Medián	Min	Max	Variační koeficient	Max. rychlost větru [km·h ⁻¹]
7	6.3.2014	báze	0,019488	0,020369	0,000534	0,044128	44,90657	24
7	6.3.2014	2m	0,042199	0,039014	0,000267	0,220355	56,27283	24
7	7.3.2014	báze	0,026363	0,026907	0,003461	0,036675	16,21074	14
7	7.3.2014	2m	0,045708	0,043774	0,000248	0,155124	54,41191	14
7	12.3.2014	báze	0,021506	0,021585	0,000321	0,058706	43,15291	24
7	12.3.2014	2m	0,052928	0,048307	0,000082	0,271117	57,61483	24
7	19.3.2014	báze	0,024920	0,026341	0,000332	0,070652	36,56803	27
7	19.3.2014	2m	0,039754	0,036265	0,000060	0,330747	62,26620	27
7	9.4.2014	báze	0,021155	0,020210	0,000213	0,106494	52,06175	23
7	9.4.2014	2m	0,045771	0,038192	0,000070	0,646522	76,49347	23
7	23.7.2014	báze	0,023046	0,022646	0,000151	0,089836	46,86925	33
7	23.7.2014	2m	0,050438	0,044219	0,000144	0,301565	64,07033	33

Tab. 6 Popisná statistika datového souboru pro náklon kmene

Číslo stromu	Datum měření	Umístění	Aritmetický průměr	Medián	Min	Max	Variační koeficient	Max. rychlost větru [km·h ⁻¹]
8	6.3.2014	báze	0,021882	0,022406	0,000254	0,050466	40,04060	24
8	6.3.2014	2m	0,045640	0,043317	0,000045	0,204009	52,49176	24
8	9.3.2014	báze	0,029490	0,030983	0,005482	0,045924	25,92219	19
8	9.3.2014	2m	0,039805	0,039537	0,000205	0,133630	43,31914	19
8	12.3.2014	báze	0,027735	0,028330	0,002314	0,053630	29,75128	24
8	12.3.2014	2m	0,054750	0,051045	0,000140	0,182285	53,68374	24
8	19.3.2014	báze	0,019488	0,017917	0,000057	0,064249	55,17907	27
8	19.3.2014	2m	0,045019	0,038043	0,000073	0,388632	72,62560	27
8	9.4.2014	báze	0,021850	0,019298	0,000141	0,122375	63,60543	23
8	9.4.2014	2m	0,055923	0,044683	0,000319	0,543015	82,27452	23
8	21.7.2014	báze	0,029886	0,026915	0,000077	0,135859	59,70370	17
8	21.7.2014	2m	0,068075	0,049361	0,000127	0,492352	88,85373	17
8	23.7.2014	báze	0,026047	0,024771	0,000050	0,092015	50,49202	33
8	23.7.2014	2m	0,061257	0,052657	0,000097	0,293847	63,61805	33

Tab. 7 Popisná statistika datového souboru pro náklon kmene

Číslo stromu	Datum měření	Umístění	Aritmetický průměr	Medián	Min	Max	Variační koeficient	Max. rychlost větru [km·h ⁻¹]
9	21.7.2014	báze	0,026365	0,024018	0,000265	0,106256	57,32982	17
9	21.7.2014	2m	0,064888	0,048940	0,000518	0,472837	81,96525	17
9	23.7.2014	báze	0,025061	0,023517	0,000161	0,107861	51,19622	33
9	23.7.2014	2m	0,065922	0,049571	0,000027	0,420413	85,68196	33

Tab. 8 Popisná statistika datového souboru pro náklon kmene

Číslo stromu	Datum měření	Umístění	Aritmetický průměr	Medián	Min	Max	Variační koeficient	Max. rychlost větru [km·h ⁻¹]
10	27.8.2014	báze	0,027110	0,026365	0,000496	0,062550	40,81521	13
10	27.8.2014	2m	0,046325	0,043212	0,000140	0,137885	52,44443	13

Stromy s číslem 6, 7, 8, a 9 měly při maximální rychlosti větru $33 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ náklony kmene v rozmezích od $0,087^\circ$ do $0,107^\circ$ zaznamenaný ve stejný den (23. 7. 2014). Ovšem stromy č. 7 a 8 vykazovaly v neolistěném stavu (9. 4. 2014) a při nižší rychlosti větru ($23 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$) náklony kmene větší ($0,106^\circ$; $0,122^\circ$), stejně tak vykazoval shodné náklony strom č. 5. Jediný strom č. 6 vykazoval v neolistěném stavu a za nižší rychlosti větru nižší náklon ($0,058^\circ$).

Při maximální rychlosti větru $27 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ v době vegetačního klidu (19. 3. 2014) vykazoval strom č. 5 hodnoty maximálního náklonu $0,107^\circ$ a strom č. 6 hodnoty $0,095^\circ$. Stromy č. 7 a 8 vykazovaly ve stejném čase a rychlosti větru hodnoty náklonu nižší ($0,070^\circ$ a $0,064^\circ$). V porovnání s datem měření 9. 4. 2014 (nižší rychlost větru $23 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$) vykazoval strom č. 5 podobný náklon ($0,104^\circ$), strom č. 6 se nakláněl méně ($0,058^\circ$), ale naopak stromy č. 7 a 8 vykazovaly větší náklony ($0,106^\circ$ a $0,122^\circ$).

V době vegetace vykazoval strom č. 9 téměř shodné maximální náklony při rychlostech větru $17 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ (21. 7. 2014) a $33 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ (23. 7. 2014). Nicméně strom č. 8 se nakláněl více ($0,135^\circ$) při nižší rychlosti větru.

Strom číslo 5 při rychlosti větru $14 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ vykazoval v olistěném a neolistěném stavu podobné maximální náklony kontrolního senzoru umístěného ve dvou metrech. Nicméně náklony báze jsou větší v neolistěném stavu ($0,099^\circ$) a menší ve stavu olistěném ($0,050^\circ$).

5.1.2. Stromy poškozené

Stromy poškozené tvoří taxon jasan ztepilý (*Fraxinus excelsior* L.). Přesněji se jedná o stromy číslo 1 a 2.

Tab. 9 Popisná statistika datového souboru pro náklon kmene

Číslo stromu	Datum měření	Umístění	Aritmetický průměr	Medián	Min	Max	Variační koeficient	Max. rychlost větru [$\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$]
1	11.8.2014	báze	0,015498	0,013262	0,000284	0,195980	78,0555	23
1	11.8.2014	2m	0,069942	0,039070	0,000125	0,676597	133,1072	23
1	16.8.2014	báze	0,013596	0,011288	0,000568	0,061675	70,80532	8
1	16.8.2014	2m	0,042284	0,037139	0,000270	0,298506	65,03413	8

Tab. 10 Popisná statistika datového souboru pro náklon kmene

Číslo stromu	Datum měření	Umístění	Aritmetický průměr	Medián	Min	Max	Variační koeficient	Max. rychlost větru [km·h ⁻¹]
2	9.8.2014	báze	0,013604	0,011226	0,000173	0,072285	73,15070	23
2	9.8.2014	2m	0,040125	0,034170	0,000877	0,398281	77,19175	23
2	22.8.2014	báze	0,028504	0,028192	0,000286	0,075549	52,93891	16
2	22.8.2014	2m	0,036388	0,031306	0,000640	0,166138	69,04004	16
2	24.8.2014	báze	0,019750	0,017430	0,000072	0,333010	77,31775	24
2	24.8.2014	2m	0,045833	0,037848	0,000615	1,087370	90,37135	24
2	25.8.2014	báze	0,024825	0,024902	0,001572	0,043116	24,34584	4
2	25.8.2014	2m	0,048825	0,058097	0,000414	0,090309	48,30196	4

Při rychlosti větru 24 km·h⁻¹ (24.8.2014) dosáhl maximální náklon stromu čísla 2 na bázi hodnoty 0,333°. Strom č. 1 vykazoval při rychlosti větru 23 km·h⁻¹ větší parametry náklonu (0,195°) než strom č. 2 (0,072°).

Při celkovém srovnání maximálních náklonů dosáhl v době vegetace největšího parametru strom číslo 2 (0,333°) a následně strom č. 3 (0,199°), č.1 (0,195°), č. 8 (0,135°), č. 9 (0,106°), č. 7 (0,089°), č. 6 (0,087°), č. 10 (0,062°). Nejmenší maximální náklon zaznamenaný v době vegetace vykazoval strom číslo 5 (0,050°).

Hodnota variačního koeficientu bývá zpravidla vyšší u dat naměřených ve dvou metrech a nižší u dat zaznamenaných na bázi. Nicméně u stromů číslo 1 (16. 8. 2014), č. 3 (22. 8. 2014), č. 5 (8. 4. 2014) a číslo 6 (23. 7. 2014) vyšla hodnota variačního koeficientu obráceně, tzn. hodnoty na bázi jsou vyšší než hodnoty ve dvou metrech (v tab. 2–10 označeno červeně). Rozdíly hodnot variačních koeficientů těchto stromů jsou následující (tab. 11):

Tab. 11 Rozdíly hodnot variačního koeficientu

Číslo stromu	1	3	5	6
Datum měření	16.8.2014	22.8.2014	8.4.2014	23.7.2014
Maximální rychlost větru [km·h ⁻¹]	8	11	14	33
Rozdíl hodnot variačního koeficientu [%]	5,77	26,18	5,77	6,57

Ohledně umístění senzorů byla zamítnuta nulová hypotéza o shodnosti středních hodnot souborů. To znamená, že náklony naměřené na bázi se nerovnjí náklonům ve dvou metrech (tab. 12).

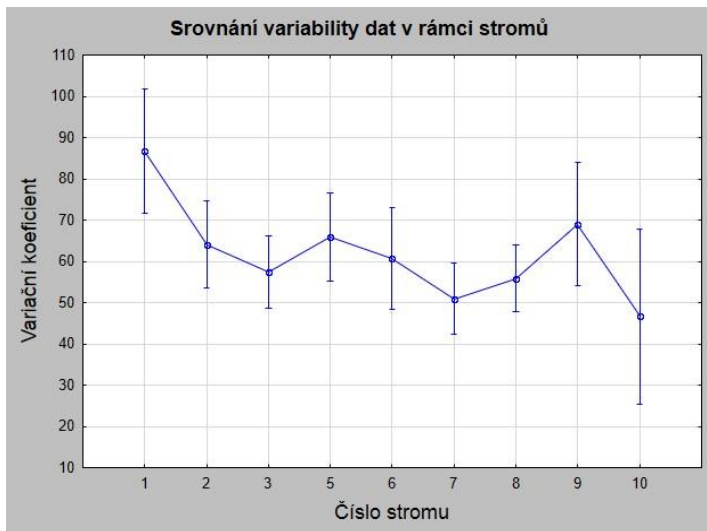
Tab.12 T-test pro závislé proměnné

Proměnná	Průměr	Sm.odch.	N	Rozdíl	Sm.odch. rozdílu	t	sv	Int.spolehl. - 95,000%	Int.spolehl. +95,000%
Báze	0,023333	0,005049							
2m	0,047724	0,008713	33	-0,024391	0,009987	-14,0298	32	-0,027932	-0,020850

5.2. Grafové výstupy testů dynamiky

Variabilita dat v rámci měřených stromů

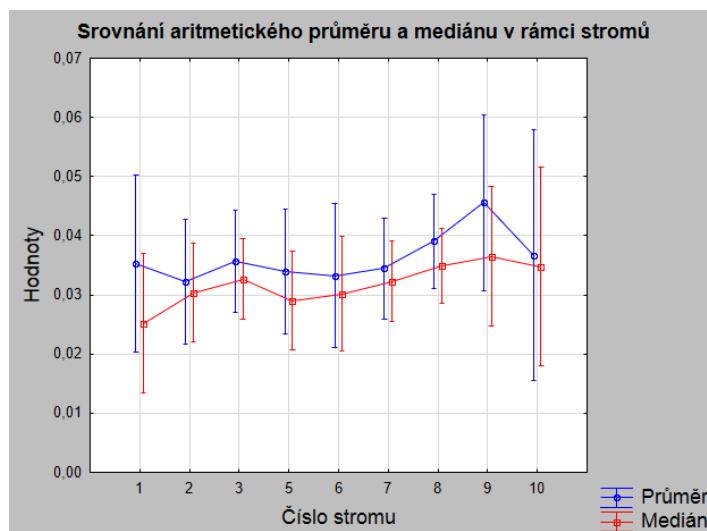
Mezi stromem číslo 1 a 10 se jedná o statisticky významně odlišné střední hodnoty základních souborů. Největší variabilita dat je u stromu číslo 1, naopak nejmenší u stromu číslo 10. Stromy č. 2, 3, 5, 6, 7, 8 a 9 mají variabilitu dat v rozmezí stupnice od 50 do 70 %.



Obr. 11 Srovnání variability dat v rámci šetřených stromů

Porovnání aritmetického průměru a mediánu

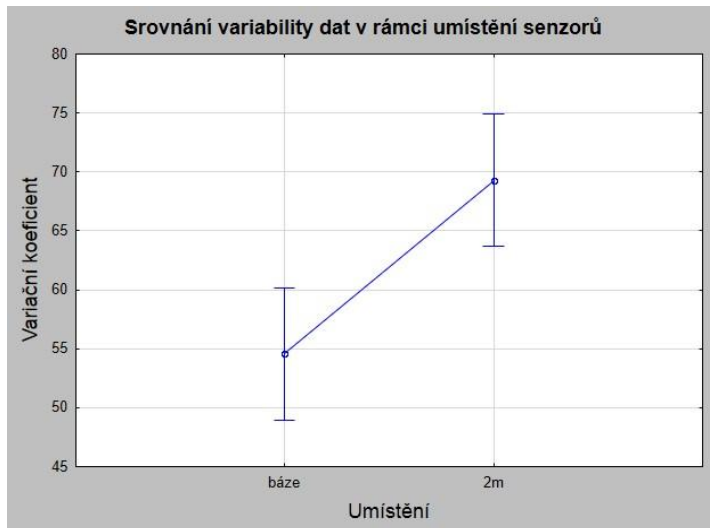
Mezi průměrem a mediánem všech šetřených stromů není statisticky významný rozdíl.



Obr. 12 Srovnání aritmetického průměru a mediánu v rámci šetřených stromů

Variabilita dat v rámci umístění senzorů

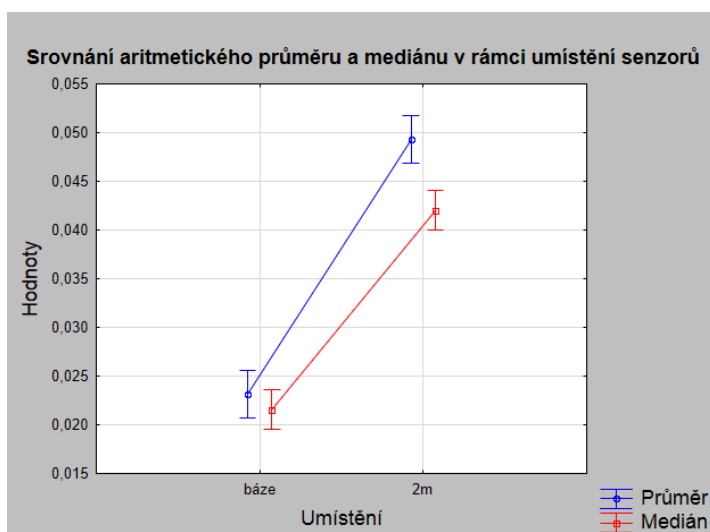
Variabilita dat na bázi je výrazně menší než ve dvou metrech. Výška umístění senzorů má významný vliv na velikost hodnoty variačního koeficientu.



Obr. 13 Srovnání variability dat v rámci umístění senzorů: báze, 2m

Závislost umístění senzorů na aritmetickém průměru a mediánu

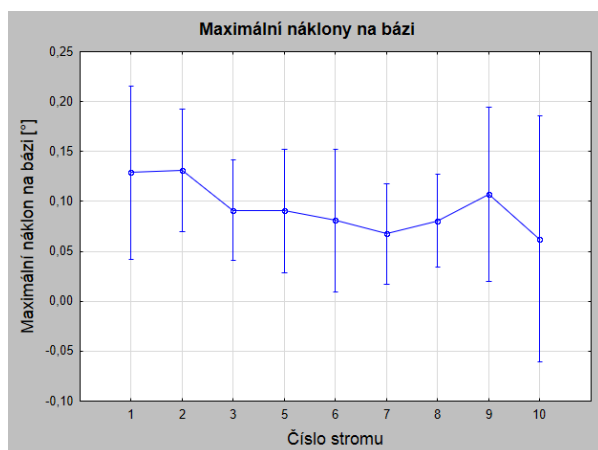
Aritmetický průměr a medián se rovnají, pokud je senzor umístěn na bázi kmene. U senzorů umístěných ve dvou metrech se tyto hodnoty nerovnají. To indikuje více extrémních hodnot zaznamenaných ve dvou metrech.



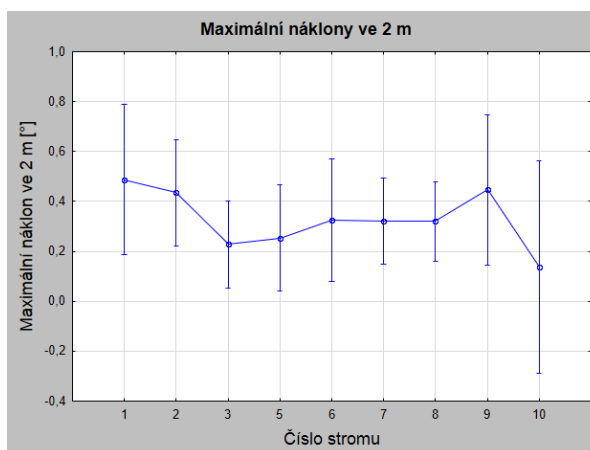
Obr. 14 Srovnání aritmetického průměru a mediánu v rámci umístění senzorů: báze, 2m

Průměrné náklony měřených stromů

Stromy číslo 1 a 2 vykazují největší zaznamenané průměrné náklony na bázi. U stromů číslo 3, 5, 6, 7, 8, 9 a 10 se náklon na bázi pohybuje v rozmezí od 0,05–0,10° (obr. 15). Nejvyšší průměrný náklon zaznamenaný senzorem ve dvou metrech (obr. 16) je u stromu číslo 1. Nejnižší průměrné náklony byly zaznamenané u stromu číslo 10. U stromů číslo 3, 5, 6, 7, a 8 se průměrné náklony pohybují v rozmezí od 0,2–0,35°.



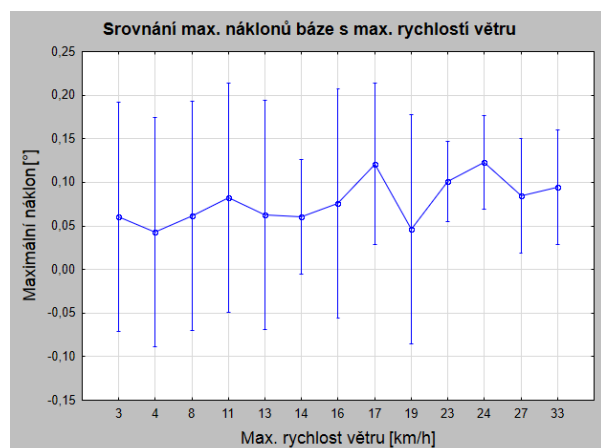
Obr. 15 Max. náklony na bázi kmene



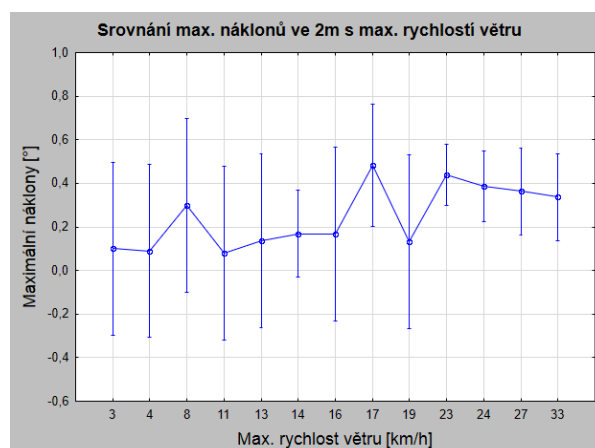
Obr. 16 Max. náklony ve dvou metrech

Vliv maximální rychlosti větru na maximální náklon stromů

Na bázi (obr. 17) vykazují stromy největší náklony při maximální rychlosti větru 17 km·h⁻¹. Náklony při této rychlosti větru se pohybovaly v rozmezí 0,11°–0,12°. Při největší zaznamenané rychlosti větru 33 km·h⁻¹ se stromy nakláněly méně, v průměru se jednalo o náklony okolo hodnoty 0,09°. Kontrolní senzory umístěné ve dvou metrech (obr. 18) ukazují největší náklony při rychlosti větru 17 km·h⁻¹. Při rychlosti větru 3 km·h⁻¹, 4 km·h⁻¹, 11 km·h⁻¹, 13 km·h⁻¹, 14 km·h⁻¹, 16 km·h⁻¹ a 19 km·h⁻¹ stromy vykazovaly podobné náklony v rozmezí 0,1–0,2°.



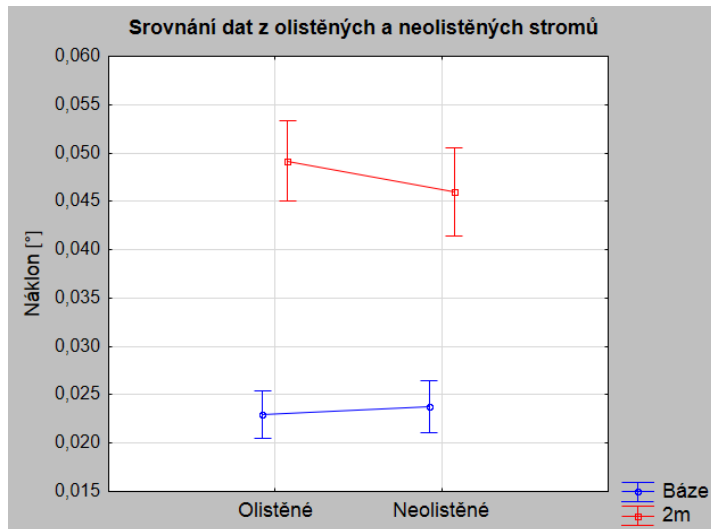
Obr. 17 Vliv rychlosti větru na náklony báze



Obr. 18 Vliv rychlosti větru na náklony ve 2m

Stromy v olistěném a neolistěném stavu

Mezi daty zaznamenaných v době vegetace a vegetačního klidu není rozdíl, ale existuje rozdíl dat vzhledem k umístění senzorů. Senzor umístěný ve dvou metrech zaznamenával náklony vyšší než senzor umístěný na bázi. Rozdíl mezi těmito daty je statisticky významný.

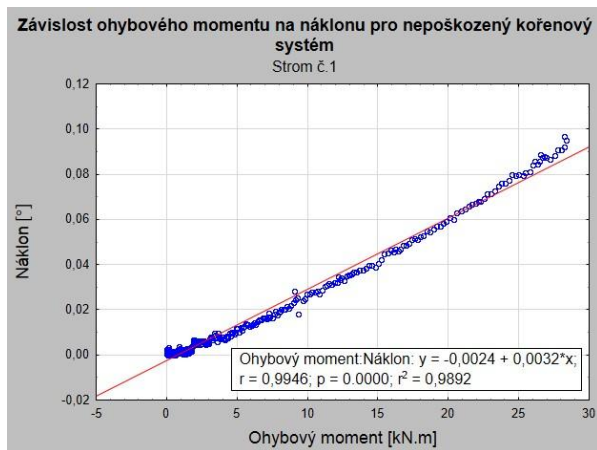


Obr. 19 Srovnání dat stromů v olistěném a neolistěném stavu

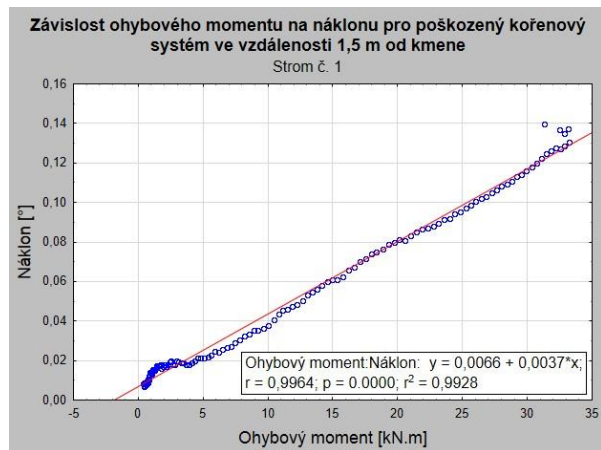
5.3. Výsledky poškozených stromů

Tahová zkouška

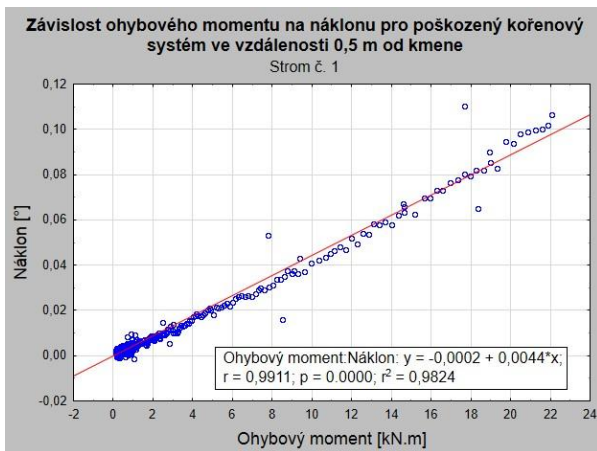
Pro porovnání sledovaných stromů (strom číslo 1 a 2) na základě parametrů ohybového momentu a náklonu, vyjadřujícího mechanické chování stromu, byla použita směrnice přímky znázorněna pomocí běžného bodového 2D grafu.



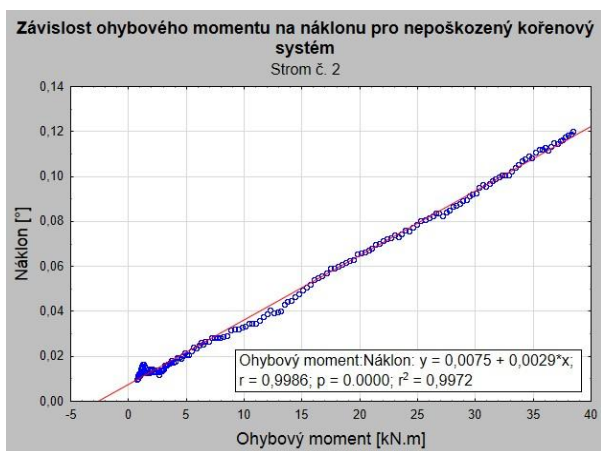
Obr. 20 Bodový graf náklonu, strom č.1



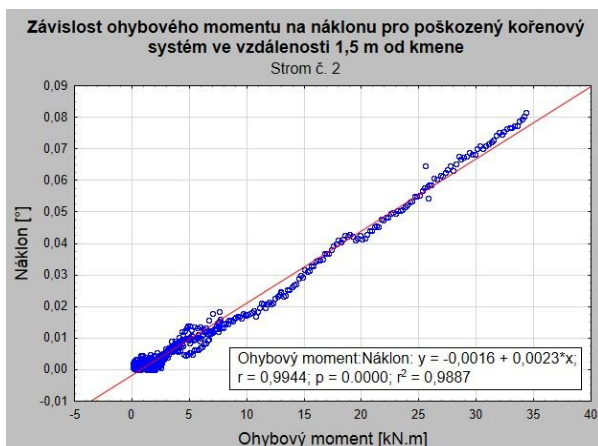
Obr. 21 Bodový graf náklonu, strom č.1



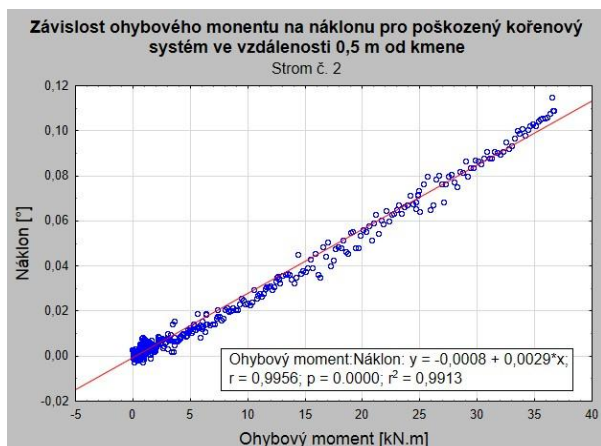
Obr. 22 Bodový graf náklonu, strom č.1



Obr. 23 Bodový graf náklonu, strom č.2



Obr. 24 Bodový graf náklonu, strom č.2



Obr. 25 Bodový graf náklonu, strom č.2

Hodnota směrnice u stromu číslo 1, když byl nepoškozený, je 0,0032. U stromu s poškozením ve vzdálenosti 1,5 m od kmene je hodnota směrnice 0,0037 a u výkopu vzdáleného 0,5 m tato hodnota činí 0,0044. Bylo zjištěno, že poškození kořenů má vliv na zvětšující se úhel náklonu stromu. Hodnota směrnice u stromu č. 2 před poškozením je 0,0029. U stromu s poškozením ve vzdálenosti 1,5 m od kmen je tato hodnota 0,0023 a u výkopu vzdáleného 0,5 m je hodnota směrnice 0,0029. U strom číslo 2 bylo zjištěno, že poškození kořenů nemá vliv na náklon stromu (tab.).

Tab. 13 Hodnota směrnice k poškozených a nepoškozených stromů

Číslo stromu	Nepoškozený	Poškozený 1,5 m od kmene	Poškozený 0,5 m od kmene
1	0,0032	0,0037	0,0044
2	0,0029	0,0023	0,0029

Popisná statistika dynamických testů

V dynamickém testu byly stromy měřeny v době vegetace, pouze po poškození kořenového systému (před poškozením a během poškození, dynamické zatížení nebylo měřeno). Z hodnot maximálního náklonu je zřetelné, že strom číslo 2 se naklání mnohem více, než strom číslo 1.

Tab. 14 Popisná statistika dynamických testů

Číslo stromu	Datum měření	Umístění	Aritmetický průměr	Medián	Min	Max	Variační koeficient	Max. rychlost větru (km/h)
1	11.8.2014	báze	0,015498	0,013262	0,000284	0,195980	78,0555	23
1	11.8.2014	2m	0,069942	0,039070	0,000125	0,676597	133,1072	23
1	16.8.2014	báze	0,013596	0,011288	0,000568	0,061675	70,80532	8
1	16.8.2014	2m	0,042284	0,037139	0,000270	0,298506	65,03413	8
2	9.8.2014	báze	0,013604	0,011226	0,000173	0,072285	73,15070	23
2	9.8.2014	2m	0,040125	0,034170	0,000877	0,398281	77,19175	23
2	22.8.2014	báze	0,028504	0,028192	0,000286	0,075549	52,93891	16
2	22.8.2014	2m	0,036388	0,031306	0,000640	0,166138	69,04004	16
2	24.8.2014	báze	0,019750	0,017430	0,000072	0,333010	77,31775	24
2	24.8.2014	2m	0,045833	0,037848	0,000615	1,087370	90,37135	24
2	25.8.2014	báze	0,024825	0,024902	0,001572	0,043116	24,34584	4
2	25.8.2014	2m	0,048825	0,058097	0,000414	0,090309	48,30196	4

6. Diskuse

Cílem práce bylo zjistit, zda stromy s asymetrickým respektive jednostranně poškozeným kořenovým systémem vykazují podobnou reakci, vzhledem ke statickému zatížení tahovou zkouškou a dynamickému zatížení větrem. Jedná se sice o dva různé přístupy hodnocení, u kterých se hodnotí rozdílné parametry, nicméně pro porovnání náklonu bylo možné ze statických testů vycházet z hodnot směrnice přímky, která určuje velikost náklonu při zatížení. Stromy s poškozeným kořenovým systémem se při statickém testu nakláněly více než před poškozením, přičemž na ně byla působena stejná síla zatížení. Stromy s poškozeným kořenovým systémem se při tahových zkouškách chovaly rozdílně. Strom číslo 1 vykazoval před poškozením hodnotu náklonu 0,0032, po poškození kořenového systému ve vzdálenosti 1,5 m od kmene 0,0037. Po následném poškození ve vzdálenosti 0,5 m od kmene vykazoval hodnotu náklonu 0,0044. Náklony stromu se tedy zvyšovaly s poškozením kořenového systému. Nicméně rozdíly v náklonech nebyly detekovány u stromu číslo 2, který měl hodnotu náklonu před a po poškození shodnou, tj. 0,0029. Tato skutečnost může znamenat, že poškození kořenového systému provedenými výkopy nebylo natolik rozsáhlé, aby ovlivnilo ukotvení stromu. Wessolly (1996) uvádí oblast elastického chování do hodnoty náklonu báze $0,5^\circ$. Brudi a Wassenaer (2001) pokládají za hranici náklonu $0,25^\circ$, proto doporučují při měření tahovými zkouškami tuto hodnotu nepřekračovat. Náklony stromů získaných tahovou zkouškou ovšem nebyly v souladu s výslednými náklony dynamických testů. Strom číslo 2 vykazoval při dynamických testech maximální náklon na bázi $0,333^\circ$ a ve dvou metrech $1,087^\circ$, zatím co strom č. 1 se nakláněl výrazně méně (na bázi $0,195^\circ$, ve dvou metrech $0,676^\circ$). Hodnoty náklonu u dynamického testu mohly být ovlivněny působením jiného směru větru, než směr působení zatížení tahovou zkouškou.

S výjimkou jednoho stromu (č. 2) nedosahovaly náklony na bázi šetřených stromů nad hodnotu $0,25^\circ$, čímž by odpovídala teorie Brudiho a Wassenaera (2001). James říká, že stromy nejsou bezpečné, pokud se vlivem dynamického zatížení naklánějí nad úhel 1° . Nad touto hodnotou se nakláněl pouze strom číslo 2, u kterého byl zaznamenán maximální náklon o úhlu $1,087^\circ$. Nutno ale podotknout, že James neuvádí, v jaké výšce na kmeni tyto náklony zaznamenal. Náklony ze stromu číslo 2 jsou zaznamenány ve dvou metrech nad zemí, což náklon stromu výrazně ovlivňuje.

Další cíl práce byl věnován charakteristice parametrů, které by umožnily hodnocení pohybů stromů. V této studii bylo pracováno se statistickými analýzami z dynamických testů. Pro vyfiltrování negativních odchylek byly sledované stromy vybrány z jednoho porostu téhož věku o průměru kmene (měřeného ve výšce 1,3 m nad zemí) s maximálním rozdílem ± 10 cm. Výběr dřevin s podobnými dendrometrickými parametry potvrdil rovnost aritmetického průměru a mediánu. Bylo zjištěno, že umístění senzorů mělo vliv na výsledné hodnoty parametrů náklonů. Náklony zaznamenané ve dvou metrech byly větší než náklony na bázi kmene. Tato situace byla očekávaná, daný předpoklad byl tedy potvrzen. Vzhledem k tomuto předpokladu by měly odpovídat i hodnoty variačního koeficientu. Nicméně při porovnání variability dat v závislosti na maximálních náklonech na bázi a ve dvou metrech bylo zjištěno, že u stromů číslo 1, 3, 5 a 6 byly hodnoty variačního koeficientu na bázi vyšší než hodnoty ve dvou metrech. V daném případě se nejedná o stejný druh stromu, ani o záznam dat ve stejném čase a stejné rychlosti větru. Větší variabilita dat na bázi může být dána, jak uvádějí Coutts a England et al. (1986, 2000), momentem odolnosti kořenového systému, který závisí na napětí půdy, půdním smyku, návětrných kořenů či hmotnosti kořenového talíře. Tuto domněnku však nelze potvrdit, protože architektura kořenového systému a pedologické rozborů nebyly sledovány. U stromů číslo 1, 5 a 6 vykazoval rozdíl hodnot variability 5,77–6,57 %. Strom číslo 3 vykazoval rozdíl těchto hodnot výrazně vyšší a to 26,18 %. Za předpokladu, že strom číslo 1 byl uměle poškozen a vykazuje srovnatelné hodnoty jako strom č. 5 a 6, lze usuzovat, že kořenový systém těchto stromů je oslaben. Tato skutečnost může u stromu číslo 3 znamenat, že jeho kořenový systém není natolik stabilní, jako kořenový systém ostatních šetřených stromů.

Při porovnání hodnot maximálních náklonů bylo jisté, že největší náklony na bázi i ve dvou metrech vykazují stromy číslo 1, 2. Náklony těchto stromů mohly být ovlivněny poškozeným kořenovým systémem. Naopak strom číslo 10 vykazoval ze všech stromů nejmenší náklony zaznamenané ve dvou metrech. Vzhledem k tomu, že se strom číslo 10 vyskytuje na okraji porostu lze předpokládat, že tlumení náklonů ovlivňuje koruna stromu, která je oproti ostatním šetřeným stromům více zavětvená. K podobnému závěru došli i Moore, Maguire (2003), Seillier, Fourcaud (2005) a James et al. (2006), kteří uvádějí, že se strom chová jako systém spojených tlumených oscilátorů, které reagují komplexním oscilujícím pohybem listů, větví a kmene.

Zaznamenané maximální náklony stromů nepodpořily předpoklad, pro závislost na maximálních rychlostech větru. Při největší zaznamenané rychlosti větru $33 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ stromy vykazovaly menší náklony, než při rychlosti větru $17 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. V tomto případě lze předpokládat, že v dané lokalitě šetřených stromů měl směr větru v daný okamžik větší vliv než jeho intenzita. Toto tvrzení je ovšem v rozporu s teorií, kterou uvádějí Saunderson et al. (1999) kdy říkají, že největší vliv na selhání stromů větrem budou mít pouze parametry, které ovlivní velikost zatížení. Větrné podmínky mohou být velmi variabilní i v rámci jedné plochy. Je tedy možné, že poryv větru může ovlivnit jeden strom, ale sousední strom dané plochy nikoliv, protože je chráněný. V této práci byly zaznamenány náklony stromů v porostu, nicméně v městském prostředí dochází vlivem zástavby k větrným tunelům, četným nárazům a neustálým změnám ve směru větru. Je tedy pravděpodobné, že u stromů ve městech dochází k větším náklonům než u stromů v porostu.

Mezi další hodnotící parametry byla zařazena data maximálních náklonů z olistěného a neolistěného stavu stromů. Výsledky ukazují, že mezi daty zaznamenaných v době vegetace a vegetačního klidu není rozdíl. To potvrzuje teorii Vogel (1996) Moore Maguire (2003), Seillier, Fourcaud (2005), James et al (2014), že stromy reagují komplexním oscilujícím pohybem listů, větví a kmene, čímž nedochází k velkým náklonům stromu. Nutno ale podotknout, že tyto výsledky mohly být způsobeny vlivem malého množství dat.

7. Závěr

Práce se zabývala analýzou stability kořenového systému z hlediska působení dynamického zatížení větrem. Byla potvrzena důležitost dynamického testování z hlediska stability kořenového systému stromů. Práce byla zaměřena na porovnání intaktních a uměle poškozených stromů a následného srovnání výsledků ze statického a dynamického testu. Účelem bylo navržení takových parametrů, které by umožnily hodnocení dynamického pohybu stromů.

Dynamického namáhání stromu bylo řešeno pomocí způsobu použití akcelerometrů. V práci byly zjištěny následující skutečnosti:

- Stromy s jednostranně poškozeným kořenovým systémem vykazují rozdílné reakce na zatížení v závislosti na druhu jeho působení (statické a dynamické zatížení). Tahová zkouška prokázala vliv poškození pouze u jednoho z poškozených stromů. Akcelerometry zaznamenaly vyšší náklony u obou poškozených stromů. Data z tahových zkoušek neidentifikovala možnost selhání stromu, ovšem náklon zaznamenaný akcelerometry možnost selhání potvrdil.
- Umístění senzorů mělo vliv na výsledné hodnoty náklonů.
- Hodnoty variačního koeficientu na bázi kmene byly u čtyř stromů vyšší než hodnoty ve dvou metrech, což by mohlo indikovat poškozený kořenový systém.
- Nízká hodnota maximálního náklonu charakterizuje stabilní stromy, které jsou dobře zakotveny v půdě.
- Stromy poškozené vykazovaly větší maximální náklony na bázi kmene i ve dvou metrech, oproti stromům nepoškozeným.
- Tlumení náklonů ovlivňuje koruna stromu.
- Olistěné a neolistěné stromy nevykazovaly vliv na maximální náklony stromů.
- Pro možnost hodnocení dynamického pohybu stromů jsou na základě zjištěného tyto parametry: výška stromu, výška nasazení koruny, průmět koruny, průměr kmene, umístění senzorů na bázi i v osově vzdálenosti ve dvou metrech, maximální zaznamenané náklony, rychlost větru, stupeň poškození kořenového systému, stav olistění.

Při této práci žádný z šetřených stromů neselhal. Pro další výzkum by bylo vhodné porovnávat soubory stromů různých dendrometrických parametrů, věkových kategorií, zdravotního stavu a více stupňů poškození. Tyto údaje budou nezbytné pro potvrzení meze náklonu, které mohou být použity pro definování stability stromů.

8. Summary

The thesis focuses on the root system analysis from the aspect of dynamic stress caused by wind. The importance of dynamic testing of tree root system stability has been confirmed. Thesis deals with comparing intact and artificially damaged trees and subsequently also comparing the dynamic and static test results. The point of this thesis was to design such parameters, which would enable evaluating the dynamic tree movement.

Tree infliction by dynamic stress has been studied with the help of accelerometers. Following information was learned in this thesis:

- Trees with one-side root system damage show different reactions to stress in compliance with the kind of stress involved (dynamic or static). Traction test proved the type of damage influence only with one individual. Accelerometers showed bigger inclination scale with both trees. Data from traction test did not identify any possibility for tree fall-down, but the inclination scale as recorded by the accelerometers did show the possibility for fall-down.
- The sensor placement had influence on the result value of inclination parameter.
- The variation coefficient value on the trunk basis were with for trees higher than values at two metres above ground which could indicate damaged root system.
- The low value of maximum inclination is characteristic for stable trees which are well anchored in the ground.
- Damaged trees showed bigger maximal inclination scale at the trunk basis and in two metres above ground as well in comparison to the healthy trees.
- The inclination inhibition is influenced by the tree top.
- There was no difference in the maximum inclination scale between trees with or without leaves.
- As discovered in this thesis, parameters viable to the tree movement under dynamic stress evaluation are: Tree height, tree top height, tree top projection, trunk diameter, sensor placement at the trunk basis and in the axis distance two metres above ground, maximum recorded inclination, wind speed, the degree of damage to the root system, state foliage.

While working on this thesis none of the trees has failed. For further research it would seem appropriate to compare group of trees of different dendrometric parameters, age categories, health condition and more levels of possible damage. These data will be necessary to confirm the limit of inclination which might be used to define the tree stability.

9. Použitá literatura

- Baker, C., J. 1997. *Measurements of the natural frequencies of trees*, Journal of Experimental Botany. Vol. 48, No. 310: 1125-1132.
- Brudi, E., Wassenaer, P. V. 2001. *Trees and statics: Nondestructive failure analysis*. In: Thomas, E. S., Kim, D. K. (eds). *Trees structure and mechanics conference proceedings: how trees stand up and fall down*. International Society of Arboriculture. s. 53-69.
- Coutts, M. 1986. *Components of tree stability in Sitka spruce on peaty gley soil*. Forestry 59:173-197.
- Cullen, S. 2002. *Trees and wind: Wind scales and speeds*. Technical Note. Journal of Arboriculture 28(5): 237-242.
- England, A., H., Baker, C., J., Saunderson, S., E., T. 2000. *A dynamic analysis of windthrow of trees*. Institute of Chartered Foresters, England. s. 225-237.
- James, K., R. 2014. *A study of Branch Dynamics on an Open-Grown Tree*, ISA, Arboriculture & Urban Forestry 40(3): 125-134.
- James, K., R., Dahle, G., A., Grabosky, J., Kane B., Detter, A. 2014. *Tree Biomechanics Literature Review: Dynamics*. ISA. Arboriculture & Urban Forestry 40(1): 1-15.
- James, K., R., Hallam, C., Spencer, Ch. 2012. *Measuring tilt of tree structural root zones under static and wind loading*. In Agricultural and Forest Meteorology. 168 (2013) 160– 167.
- James, K., R., Haritos, N., Ades, P., K. 2006. *Mechanical stability of trees under dynamic loads*, American Journal of Botany 93(10): 1522-1530.
- Jonsson, M., J., Foetzki, A., Kalberer, M., Lundström, T., Ammann, W., Stöckli, V. 2006. *Root-soil rotation stiffness of Norway spruce (Picea abies L. Karst) growing on subalpine forested slopes*. In Plant soil. Vol. 285. s. 267-277.
- Koizumi, A., Araki, H., Hori, H., Inagawa, Y. 2008. *Windthrow resistance of apple trees grafted in an orchard*. Journal of Wood Science 54: 10-15.

- Kolařík, J., et al. 2010. *Péče o dřeviny rostoucí mimo les – II. díl*. Vlašim. ČSOP. s. 696. ISBN 978-80-86327-85-3.
- Kolařík, J. 2013. *The application of the static integrated approach for arboricultural practice*. Rosice. s. 1-5.
- Kozák, J., et al. 2009. *Atlas půd České republiky. 2. upravené vydání*. ČZU Praha. s. 150. ISBN 978-80-213-2008-6.
- Mattheck, M., Breloer, H. 1995. *The Body Language of Trees: A handbook for failure analysis*. (Research for Amenity Trees 4. HMSO. London. s. 240.
- Mayer, H. 1987. *Wind induced tree sways*. Trees 1:195–206.
- Moore, J., R., Maguire, D., A. 2003. *Natural sway frequencies and damping ratios of trees: concepts, review and synthesis of previous studies*. Trees (2004) 18, © Springer-Verlag. s. 195-203.
- Moore, J., R., Maguire, D., A. 2004. *Natural sway frequencies and damping ratios of trees: influence of crown structure*. (Trees 2005)19. © Springer-Verlag. s. 363-373.
- Neild, S., A., Wood, C., J. 1999. *Estimating stem and root-anchorage flexibility in trees*. Tree Physiology 19. Heron Publishing- Victoria. Canada. s. 141-151.
- Peltola, H., M., 2006. *Mechanical stability of trees under static loads*. American Journal of Botany 93(10): 1341–1351.
- Praus, L. 2005. *Stabilita kmene stromu*. Disertační práce. Mendelova univerzita v Brně, Lesnická a dřevařská fakulta. s. 134.
- Saunderson, S., E., T., England, A., H., Baker, C., J. 1999. *A dynamic model of the behaviour of Sitka spruce in high wind*, Academic Press. s. 249-259.
- Sellier, D., Fourcaud, T. 2005. *A mechanical analysis of the relationship between free oscillations of Pinus pinaster Ait. saplings and their aerial architecture*. Journal of Experimental Botany. Vol. 56. No. 416: 1563-1573.
- Sellier D., Fourcaud, T. 2009. *Crown structure and wood properties: Influence on tree sway and response to high winds*. American Journal of Botany 96: 885–896.
- Sinn, G., Wessolly, L. 1989. *Contribution to the Proper Assessment of the Strength and Stability of Trees*. Arboricultural Journal (13): 45-65

Szórádová, A. 2014. *Analýza mechanické funkce kořenového systému*. Disertační práce. Mendelova univerzita v Brně, Lesnická a dřevařská fakulta. s. 104.

The Ministry for the Environment. 2014. *Good Practice Guide for Atmospheric Dispersion Modelling*. The National Institute of Water and Atmospheric Research, Aurora Pacific Limited and Earth Tech Incorporated. The Ministry for the Environment. New Zealand. s 152. ISBN 0-478-18941-9.

Tolasz, R., et al. 2007. *Atlas podnebí Česky/ Climate Atlas of Czechia*, Praha- Olomouc. ČHMÚ. s. 254. ISBN 978-80-86690-26-1.

Vogel, S., 1996. *Blowing in the wind: storm-resisting features of the design of trees*, Journal of Arboriculture. 22: 92–98.

Wessolly, L. 1996. *Explanation of the Tipping Process*. In *Stadt und Grün*. No. 4. s. 635-640.

Online zdroje

Český úřad zeměměřický a katastrální. 2015. *Základní mapa ČR*. [online] citováno 20. března 2015. URL:<http://geoportal.cuzk.cz/WMS_ZM10_PUB/WMSservice.aspx>

Husák, M. 2014. *Akcelerometry*. ČVUT FEL Praha. s. 44, [online] citováno 22. července 2014.

URL:< <http://www.micro.feld.cvut.cz/home/X34SES/prednasky/08%20Akcelerometry.pdf>>

Mauer, P., Šilhánek, J. 2014. *Obora Sokolnice*. ŠLP Křtiny. [online] citováno 12. prosince 2014.

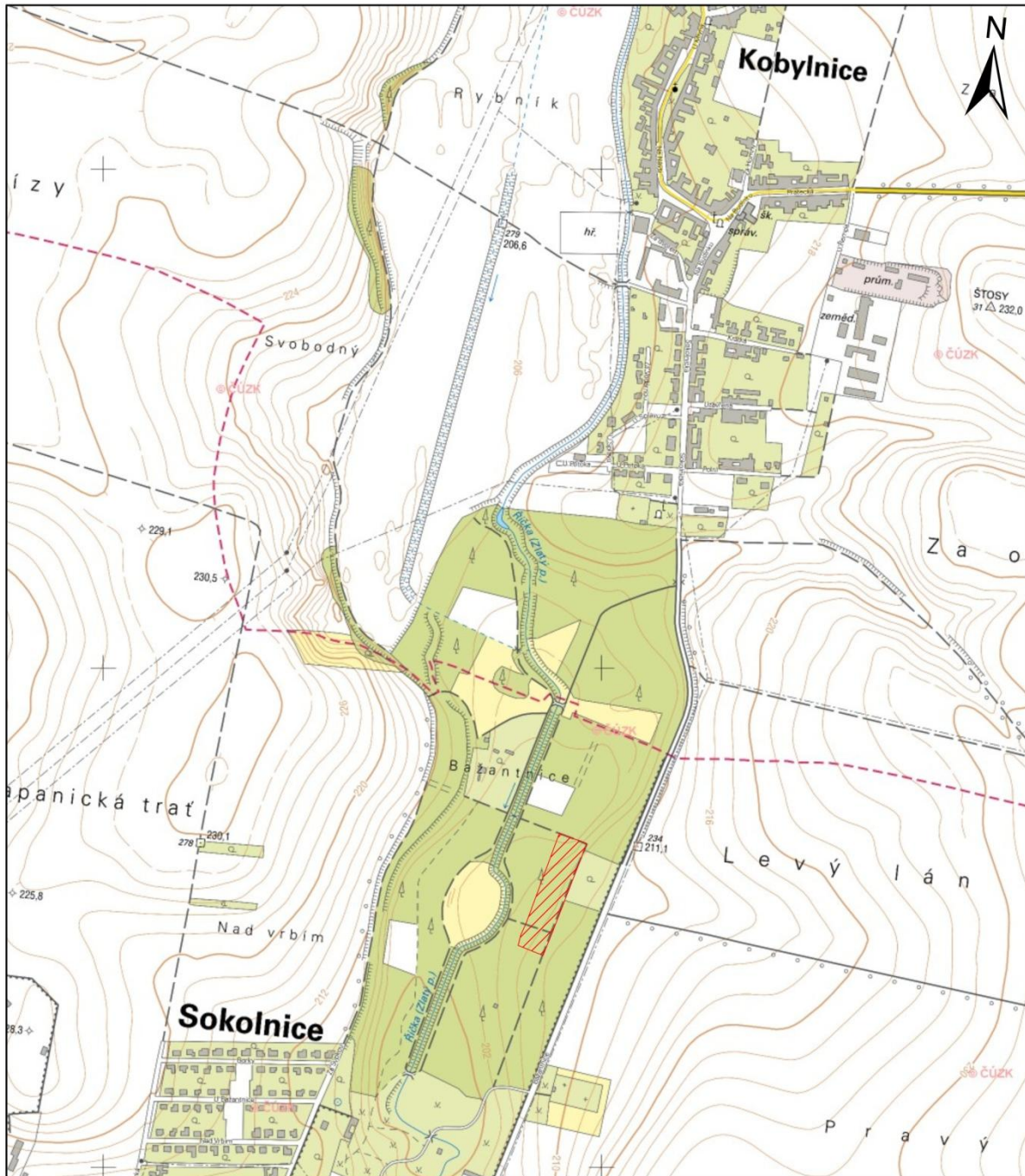
URL:<<http://www.slpkrtiny.cz/slp-krtiny/napsali-o-nas/nova-naucna-stezka-v-obore-sokolnice-a2226635>>

Mapomap. 2015. *Portál informačního systému ochrany přírody. Přírodní poměry*. portál AOPK ČR. [online] citováno 8. března 2015. URL:< <http://mapy.nature.cz/>>

10. Přílohová část

10.1. Přehledová mapa

Přehledová mapa



Legenda:

 Zájmové území

1:10 000

0 70 140 280 420 560
Metřů

Zpracovala Klára Šponarová, Brno 2015

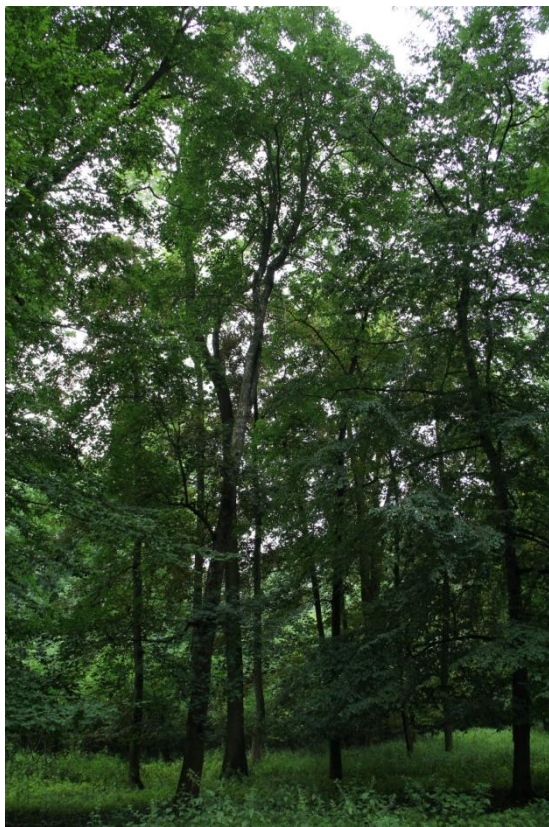
10.2. Fotodokumentace šetřených stromů



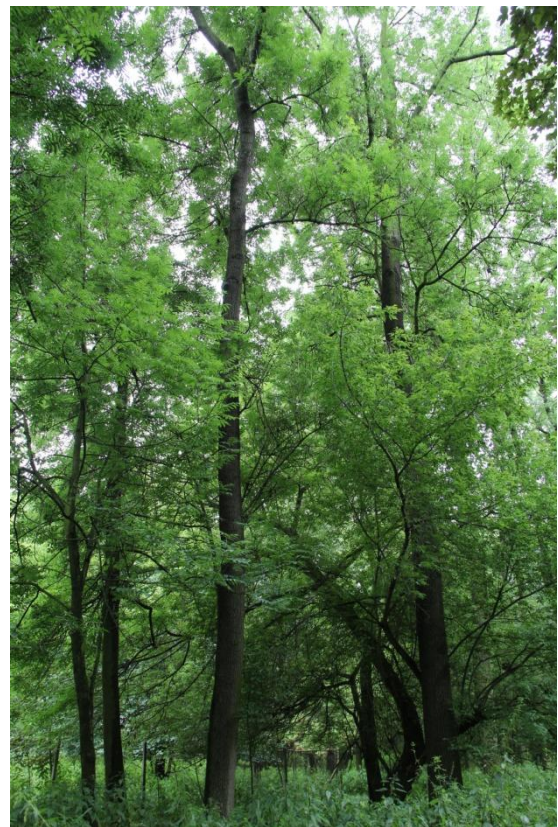
Příloha 1. Strom č. 1



Příloha 2. Strom č. 2



Příloha 3. Strom č. 3



Příloha 4. Strom č. 4



Příloha 5. Strom č. 5



Příloha 6. Strom č. 6



Příloha 7. Strom č. 7



Příloha 8. Strom č. 8



Příloha 9. Strom č. 9



Příloha 10. Strom č. 10

10.3. Fotodokumentace umístění akcelerometrů



Příloha 11. Umístění akcelerometru na kmeni stromu ve výšce dva metry, strom č. 8



Příloha 12. Umístění akcelerometru na bázi kmene, strom č. 1

10.4. Fotodokumentace poškození kořenového systému



Príloha 13. Poškození kořenového systému ve vzdálenosti 1,5 m od kmene, strom č. 2



Príloha 14. Poškození kořenového systému ve vzdálenosti 1,5 m od kmene, strom č. 2



Příloha 15. Umístění inklinometru a elastometru, strom č. 2



Příloha 16. Poškození kořenového systému ve vzdálenosti 0,5 m od kmene, strom č. 2