

Česká zemědělská univerzita
Fakulta lesnická a dřevařská
Katedra ochrany lesa a entomologie



Testování metody mechanického namáhání stojících stromů (*Picea abies*)

Diplomová práce

Autor: Bc. Martin Gregor
Vedoucí práce: Mgr. Karolina Lukášová, Ph.D.

2016

Czech University of Life Science
Faculty of Forestry and Wood Sciences
Department of Forest Protection and Entomology



Testing methods of mechanical stress of standing trees (*Picea abies*)

Diploma thesis

Author: Bc. Martin Gregor
Supervisor: Mgr. Karolina Lukášová, Ph.D.

2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Martin Gregor

Lesní inženýrství

Název práce

Testování metody mechanického namáhání stojících stromů (*Picea abies*)

Název anglicky

Testing methods of mechanical stress of standing trees (*Picea abies*)

Cíle práce

- otestovat metodu zjišťující mechanickou odolnost smrku ztepilého (*Picea abies*)

Metodika

- výzkum bude realizován pro smrk ztepilý (*Picea abies*) ve vybraném porostu
- mechanické namáhání bude simulováno tahem lanového systému poháněném přenosným motorovým navijákem
- reakce stromu bude zaznamenána pomocí kamery a měřícího uzlu (tenzometrický snímač s příslušenstvím)
- bude zaznamenáno postupné působení síly na strom až po (kritickou) sílu potřebnou k vytvoření zlomu nebo vývratu
- výsledky terénních experimentů zaměřených na mechanické namáhání a trhání stromů budou zpracovány pro účely stanovení předběžné hodnoty odolnosti stromů simulující působení větru
- získané údaje budou srovnány s doposud známými údaji z literatury

Doporučený rozsah práce

40 stran

Klíčová slova

abiotičtí škodliví činitelé, mechanické namáhání, smrk ztepilý, zlom

Doporučené zdroje informací

- Cremer, K. W., Borough, C. J., Carter, P. R. 1982: Effects of stocking and thinning on wind damage in plantations. *New Zealand Forest Science*, 12: 244–268.
- Gardiner, B. A., Byrne, K., Hale, S., Kamimura, K., Mitchell, S. J., Peltola H., Ruel, J. C. 2008: A review of mechanistic modelling of wind damage risk to forests. *Forestry*, 81: 447-463.
- Gardiner, B. A., Peltola, H., Kellomäki, S. 2000: Comparison of two models for predicting the critical wind speeds required to damage coniferous trees. *Ecology Modelling*, 129: 1–23.
- Gardiner, B. A., Quine, C. P. 2000: Management of forests to reduce the risk of abiotic damage—a review with particular reference to the effects of strong winds. *Forest Ecology and Management*, 135: 261–277.
- Kamimura, K., Shirashi, N. 2007: A review of strategies for wind damage assessment in Japanese forests. *Journal of Forest Research*, 12: 162–176.
- Lekes, V., Dandul, I. 2000: Using airflow modelling and spatial analysis for defining wind damage risk classification (WINDARC). *Forest Ecology and Management*, 135: 331–344.
- Peltola, H., Kellomäki, S., Väisänen, H., Ikonen, V. P. 1999: A mechanistic model for assessing the risk of wind and snow damage to single trees and stands of Scots pine, Norway spruce, and birch. *Canadian Journal of Forest Research*, 29: 647–661.
- Schelhaas, M. J., Nabuurs, G. J., Schuck, A. 2003: Natural disturbances in the European forests in the 19th and 20th centuries. *Global Change Biology*, 9: 1620–1633.
- Schütz, JP., Götze, M., Schmid, W., Mandallaz, D. 2006: Vulnerability of spruce (*Picea abies*) and beech (*Fagus sylvatica*) forest stands to storms and consequences for silviculture. *European Journal of Forest Research*, 125: 291–302.
- Valinger, E., Lundqvist, L., Bondesson, L. 1993: Assessing the risk of snow and wind damage from tree physical characteristics. *Forestry*, 66: 249-260.
-

Předběžný termín obhajoby

2015/16 LS – FLD

Vedoucí práce

Mgr. Karolína Lukášová, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra ochrany lesa a entomologie

Konzultant

Mgr. Jiří Trombik

Elektronicky schváleno dne 8. 10. 2015

prof. Ing. Jaroslav Holuša, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 30. 10. 2015

prof. Ing. Marek Turčáni, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 18. 04. 2016

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma testování metody mechanického namáhání stojících stromů (*Picea abies*) vypracoval samostatně pod vedením Mgr. Karoliny Lukášové, Ph.D. a použil jen prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů.

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

V Praze dne 18. 4. 2016

ABSTRAKT

Diplomová práce byla zaměřena na otestování metody mechanického namáhání stojících stromů smrku ztepilého (*Picea abies*) a zjištění nedostatků souvisejících s touto metodou pro usnadnění práce při dalších měřeních v následujících letech. Byly zjištěny škody větrem, ke kterým došlo za posledních 15 let. Škody byly zjišťovány ze zpráv o stavu lesního hospodářství a ze zpravodaje ochrany lesa. Metoda mechanického namáhání byla testována na dvou lokalitách (v Kostelci nad Černými lesy a v Bělčicích). Během testování bylo vyměněno ocelové lano za textilní, které má lepší vlastnosti a je bezpečnější. Úvazek v koruně stromu byl umístěn lezcem do těžiště koruny, dále bylo napojeno textilní lano, tenzometr s datalogerem a hák od lana navijáku. Samotný naviják byl pomocí úvazků stabilizován u kotevního stromu. Celkem bylo testováno 10 stromů, u kterých aplikované zatížení dosahovalo 320 až 1060 kg. V případě, že došlo ke zlomení stromu, byla zaznamenána výška, ve které ke zlomu došlo.

Klíčová slova: abiotičtí činitelé, mechanické namáhání, smrk ztepilý, zlom

ABSTRACT

The diploma thesis was focused on the methods of mechanical stress of standing trees of Norway spruce (*Picea abies*) and finding out the insufficiency associated with this method to facilitate the work for next measurements in the subsequent years. There were found wind damages that occurred in the last 15 years. Damages were determined from reports of state of forestry management and from reports of agency forest protection. The method was tested in two locations (in Kostelec and in Bělčice). During testing was wire rope changed for fabric rope, which has better qualities and it is safer. Round slings were placed near to the centre of tree crown, then was tied fabric rope, strain gauge with data logger and hook from the winch rope. The winch was secured by round sling to the anchoring tree. Overall there were tested 10 trees, the applied load was from 320 to 1,060 kg. In the case, when the tree become broken, there was noted the height of the break point.

Key words: abiotic factors, mechanical stress, Norway spruce, break

Obsah

Seznam tabulek a grafů.....	10
Seznam obrázků.....	11
1. Úvod.....	12
2. Cíle práce.....	14
3. Literární rešerše.....	15
3.1. Fyzikální podstata větru.....	15
3.1.1. Všeobecná cirkulace atmosféry.....	15
3.1.2. Klima České republiky.....	16
3.1.3. Rychlost větru a její měření.....	17
3.1.4. Bořivé větry dle Beaufortovy stupnice.....	18
3.1.5. Mimořádné větrné události.....	19
4. Zjišťování rizika poškození větrem.....	21
4.1. Určení CWS (critical wind speed).....	22
4.2. Tahové zkoušky ve Finsku (Peltola et al., 2000).....	22
4.2.1 Mechanismus a zjišťované veličiny.....	23
4.2.2 Měření stromových charakteristik.....	24
4.2.3 Měření kořenových charakteristik.....	24
4.2.4 Měření modulu elasticity.....	24
4.3. Tahové zkoušky ve Velké Británii (Nicoll et al., 2006).....	25
4.3.1. Mechanismus a zjišťované veličiny.....	25
4.3.2. Měření stromových charakteristik.....	27
4.3.3. Měření kořenových charakteristik.....	27
4.4. Tahové zkoušky ve Švýcarsku (Lundström et al., 2007).....	27
4.4.1 Mechanismus a zjišťované veličiny.....	28
4.4.2. Měření stromových charakteristik.....	28
4.4.3. Měření kořenových charakteristik.....	29
5. Metodika.....	29
5.1. Analýza škod způsobených větrem v posledních letech.....	29
5.2. Mechanické namáhání.....	29

5.2.1 Experimenty v Kostelci nad Černými lesy	31
5.2.2 Testování v Bělčicích.....	31
5.3. Statistická analýza.....	32
6. Výsledky	33
6.1. Škody větrem v lesích České republiky.....	33
6.2. Vyhodnocení evidence.....	36
6.3. Zjištěné hodnoty při prvotních experimentech	37
6.4. Pokusy v Bělčicích.....	38
6.5. Vyhodnocení porovnávaných parametrů	41
7. Diskuze	43
8. Závěr	45
Zdroje.....	46

Seznam tabulek a grafů

Tabulka č. 1: Beaufortova stupnice síly větru	19
Tabulka č. 2: Srovnání evidovaného dříví poškozeného abiotickými činiteli a kůrovci v letech 2000—2014	34
Tabulka č. 3: Podíl škod způsobených větrem na celkovém poškození abiotickými činiteli	35
Tabulka č. 4: Zjištěné hodnoty při pilotních experimentech	37
Tabulka č. 5: Zjištěné hodnoty při testování	38
Tabulka č. 6: Výsledky statistického vyhodnocení	42
Graf č. 1: Porovnání nahodilých kůrovcových těžeb dle ZZ MZe a ZOL v letech 2000—2014	34
Graf č. 2: Porovnání nahodilých těžeb vzniklých působením abiotickými činiteli dle ZZ MZe a ZOL v letech 2000—2014	35
Graf č. 3: Procentuální podíl škod způsobených větrem (ZZ MZe)	36
Graf č. 4: Procentuální podíl škod způsobených větrem (ZOL)	36
Graf č. 5: Srovnání objemu nahodilých těžeb dříví poškozeného větrem (mil. m ³) evidovaného v rámci Zpravodajů ochrany lesa (ZOL) a Zprávách o stavu lesa a lesního hospodářství (MZE) letech 2000-2014	37
Graf č. 6: Průběh tahové zkoušky u testovaného stromu TS 6	38
Graf č. 7: Průběh tahové zkoušky u testovaného stromu TS 7	39
Graf č. 8: Průběh tahové zkoušky u testovaného stromu TS 8	39
Graf č. 9: Průběh tahové zkoušky u testovaného stromu TS 9	40
Graf č. 10: Průběh tahové zkoušky u testovaného stromu TS 10	40
Graf č. 11: Závislost max. síly na výšce	41
Graf č. 12: Závislost max. síly na výčetní tloušťce	41
Graf č. 13: Závislost max. síly na štíhlostním koeficientu	42

Seznam obrázků

Obrázek 1: Cirkulační buňky atmosféry	16
Obrázek 2: Robinsonův kříž	17
Obrázek 3: Akustický anemometr	17
Obrázek 4: Rozsah kalamity z 2004	21
Obrázek 5: Nastavení pro měření modulu elasticity.....	23
Obrázek 6: Prostorové uspořádání mechanismu pro tahové zkoušky	24
Obrázek 7: (a) Schéma tahové zkoušky.....	26
Obrázek 7: (b) Postup měření používaný při výpočtu kritického momentu.....	26
Obrázek 8: Schéma průběhu tahové zkoušky a měřených veličin.....	28
Obrázek 9: Pohonná jednotka s navijákem Golemwinch	30
Obrázek 10: Připojený tenzometr	31
Obrázek 11: Vychýlení stromu při působení max. síly	38
Obrázek 12: Vychýlení stromu při působení síly	39

1. Úvod

Vítr a další abiotické faktory nezpůsobují jen rozsáhlé škody na stromech v mnoha částech světa, mají též vliv na růst stromů a ekologické podmínky (*Peltola et al., 2000*). Ekonomický dopad škod způsobených větrem je obzvláště závažný v obhospodařovaných lesích, protože je snížena výtěžnost využitelného dříví, zvyšují se náklady na nahodilé těžby a vznikají obecné problémy v souvislosti s lesohospodářským plánováním (*Gerendiain et al., 2012*). Dalším problémem jsou zlomené a vyvrácené stromy, které jsou ponechány v lese a vytváří tak zvýšené množství dostupného hostitelského materiálu pro hmyzí škůdce, kteří napadají i zbývající stromy (*Venäläinen et al., 2004*). V oblastech, které se potýkají s větrnějším klimatem, dochází často k těžbám v lesních porostech před jejich optimální ekonomickou návratností z důvodu snížení rizika následků, které by mohly silné větry způsobit (*Nicoll et al., 2006*).

V rámci Evropy se poškození dříví biotickými a abiotickými činiteli v letech 1950—2000 pohybovalo kolem 35 mil. m³ ročně, přičemž 53 % celkového poškození bylo způsobené větrem. Ke konci 20. století byly zaznamenány silné větrné kalamity v roce 1990, kdy bylo poškozeno 120 mil. m³ dříví, přičemž v průběhu jediné noci během silné bouře bylo poškozeno kolem 100 mil. m³ dříví (*Peltola et al., 2000*), a v roce 1999, kdy bylo poškozeno 180 mil. m³. Tyto škody mohly být ve skutečnosti vyšší, protože údaje pochází pouze z evidovaných údajů (*Schelhaas et al., 2003*).

Na počátku 21. století postihly střední a jižní Evropu další silné větrné události, během kterých bylo poškozeno asi 150 mil. m³ dříví. V severní Evropě, zejména ve Finsku a Švédsku bylo poškozeno během větrných bouří v letech 2001, 2005 a 2010 přes 85 mil. m³ dříví. U škod způsobených větrem se očekává nárůst v důsledku změn klimatu a častějších silných větrných bouří (*Dupont et al., 2015*).

Poškozování lesních porostů se nedotýká pouze území Evropy. Rozsáhlé škody na lesních porostech jsou evidovány například na území Japonska, kde jsou tajfuny doprovázeny velmi silnými větry a způsobují škody v řádech milionů m³ polomové dřevní hmoty. Ke škodám velkého měřítka dochází na území Japonska v průměru jednou za 30-40 let, ale každoročně jsou evidovány škody, které jsou způsobené větrem (*Kamimura, Shirashi, 2007*).

Náchylnost lesních porostů a stromů na poškození větrem je ovlivněna vlastnostmi klimatu (tj., rychlost větru, doba působení a poryvy větru), strukturou lesa a charakteristikami stromu, porostu a místními podmínkami (tj., druh stromu, výška

a tloušťka stromu, plocha koruny, hloubka a šířka kořenového systému, porostní hustota, půdní typ a topografie). Tyto vlastnosti mohou být studovány pomocí základní fyziky (tj. síly založené na větru a gravitaci), empirických experimentů (např. kývání stromů, tahové zkoušky a experimenty ve větrném tunelu) a mechanických modelů založených na přístupech vzájemného působení více činitelů. Tímto způsobem může být předpovězena prahová hodnota rychlosti větru (tzv. kritická rychlost větru), která je potřebná k poškození stromů uvnitř porostu pro daný druh stromu a konkrétní lokalitu (*Peltola, 2006*).

Náplní předložené práce je otestování metody tahových zkoušek, které jsou zaměřeny na smrk ztepilý, *Picea abies*, který má v lesích na území České republiky zastoupení 51 % (*MZE, 2014*). Porosty tvořené smrkem ztepilým jsou velice často poškozovány při větrných událostech a způsobené škody vytváří značná omezení při plánování lesního hospodářství.

Práce se zabývá analýzou rozsahu škod způsobených abiotickými činiteli (zejména pak větrem) v Evropě a na území České republiky. Poté je popsán vítr jako meteorologický prvek, fyzikální podstata vzniku větru se zaměřením na všeobecnou cirkulaci atmosféry, charakter bořivých větrů vycházejících z Beaufortovy stupnice a přístroje pro měření rychlosti větru. Dále jsou uvedeny základní informace o použitém stroji a měřicím přístroji pro zjištění napětí v tahu (tenzometr).

Praktickou částí je otestování samotné metody tahových zkoušek, která bude následně využívána pro další měření v dalších letech a která tak bude základním prvkem pro vytvoření modelu zaměřeného na predikci rizika škod způsobených větrem.

2. Cíle práce

- Otestovat metodu zjišťující mechanickou odolnost smrku ztepilého (*Picea abies*).

3. Literární rešerše

3.1. Fyzikální podstata větru

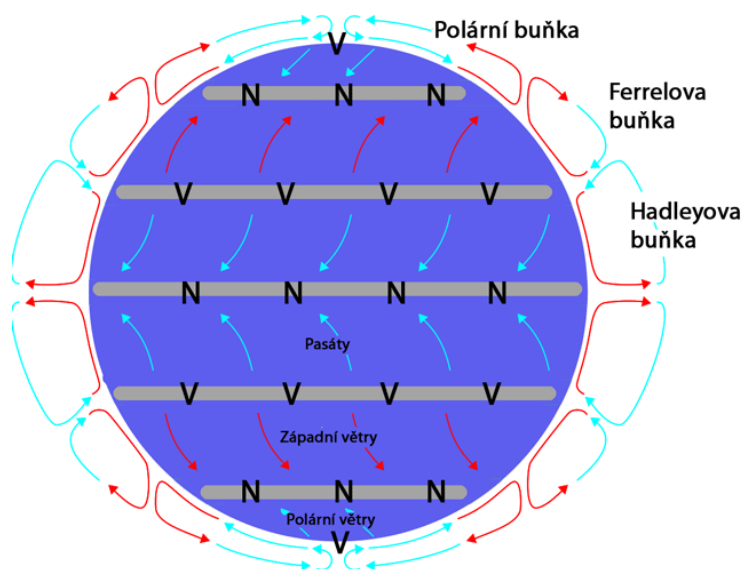
Vznik větru souvisí s všeobecnou cirkulací atmosféry planetárního nebo kontinentálního rozsahu, kdy dochází k výměně vzduchových hmot, se kterou souvisí přenos energie a vlhkosti v zemské atmosféře. Samotná cirkulace vzniká v důsledku nerovnoměrného rozložení pevnin a oceánů, a rozdílnosti dopadu slunečního záření v různých zeměpisných šířkách v souvislosti s rotací Země kolem Slunce a kolem své vlastní osy (*Bednář et al., 1993*). Vzduchové hmoty jsou do výšky 1–1,5 km nad zemským povrchem ovlivňovány též třením o zemský povrch (*Ruda, 2013*). Dochází tak k nerovnoměrnému ohřívání zemského povrchu a rozdílným klimatům v závislosti na zeměpisné šířce.

3.1.1. Všeobecná cirkulace atmosféry

Kolem planety jsou vytvořeny cirkulační buňky velkého měřítko (obr. 1), které vzájemně souvisejí a podmiňují se. V oblasti rovníku se vyskytují tzv. Hadleyovy buňky, v nichž dochází k výměně vzduchu mezi subtropickými tlakovými výšemi a tropickými tlakovými nížemi (tzv. pasátová cirkulace). V oblasti tropů pak dochází k vzestupu do vyšších vrstev atmosféry, odkud vzduch směřuje zpět do oblasti subtropů (jako tzv. antipasát), na jižní polokouli severozápadním směrem a na severní polokouli jihozápadním směrem. V oblasti subtropů sestupuje část vzduchu do nižších výšek a cirkulační buňka se tak uzavírá, a část vzduchu pokračuje směrem k pólům, kde se kolem 60° na obou polokoulích setkává se studeným polárním vzduchem. V rámci této cirkulační buňky je rychlost proudění relativně stálá a pohybuje se od 6 do 8 m.s⁻¹ (*Bednář et al., 1993*).

Na Hadleyovy buňky navazují kolem 30° tzv. Ferrelovy buňky. Část vzduchu sestupující kolem 30° se vrací zpět směrem k rovníku jako antipasát a část pokračuje směrem k 60° zeměpisné šířky. V těchto oblastech se vzestupnými proudy dostává do vyšších vrstev atmosféry, vrací se směrem k rovníku a dochází tak k uzavření cirkulační buňky. (*Smolka, 2013*)

Směrem k pólům na Ferrelovy buňky navazují Hadleyovy polární buňky. Tyto cirkulační buňky jsou obdobné, jako cirkulační buňky v oblastech rovníku. Vzestupné proudění je však slabší z důvodu menšího příjmu slunečního záření v polárních oblastech (*Soukupová, 2011*).



Obrázek 1: Cirkulační buňky atmosféry (online: in-pocasi.cz)

Cirkulační buňky nejsou v přímočarém směru od pólu k rovníku, ale vlivem Coriolisovy síly se horizontální složky větru s rostoucí zeměpisnou šířkou stáčíjí na severní polokouli vpravo a na jižní polokouli vlevo. Vertikální složky Coriolisovy síly jsou nejvyšší v oblastech rovníku a s rostoucí zeměpisnou šířkou tyto hodnoty klesají (*Bednář et al., 1993*).

3.1.2. Klima České republiky

Území České republiky je v průběhu roku ovlivňováno zejména čtyřmi tlakovými útvary (dvěma kontinentálními a dvěma oceánskými) a jejich rozložením nad zemským povrchem. Názvy těchto tlakových útvarů souvisí s místem jejich vzniku. Nejčastěji je území ovlivňováno islandskou tlakovou níží, která v letním období přináší chladné a deštivé počasí, v zimě teplé a deštivé počasí. Teplé počasí v letním období s bouřkami v zimním období s deštěm je způsobeno vlivem azorské tlakové výše. Méně často je území ovlivňováno íránskou tlakovou níží, kdy se na území České republiky dostává suchý a velmi teplý vzduch zejména v letním období, a sibiřskou tlakovou výší, která je spojena s velmi chladným počasím v zimě a suchým a horkým počasím v létě (*Soukupová, 2011*).

V souvislosti s cirkulací vzduchu dochází ke vzniku front, což jsou pomyslná rozhraní na okraji tlakových útvarů mezi vzduchovými hmotami s odlišnými vlastnostmi vzduchu. Atmosférické fronty jsou při přechodu přes území doprovázeny změnami vlhkosti, teplot, oblačnosti a tlaku. Jestliže jsou vlastnosti vzduchových hmot

výrazně odlišné, zejména teplotní a tlakové rozdíly, jsou fronty doprovázeny většími rychlostmi větru (*Bednář et al., 1993*). Změny v souvislosti s přechody front mohou být doprovázeny húlavami, tornády a orkány.

3.1.3. Rychlost větru a její měření

Rychlostí větru je obvykle myšlena horizontální složka pohybu vzduchové hmoty, která je určena směrem a velikostí. Rychlost větru je určována v $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, případně v $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$. Vedle horizontální složky existuje jako samostatná veličina vertikální složka rychlosti větru, která je určena výstupnou rychlostí vzduchové hmoty (*Bednář et al., 1993*).

Důsledkem procesů v atmosféře je snaha o vyrovnání teplotních rozdílů mezi jednotlivými vzduchovými hmotami. Rychlosti větru jsou úměrné s rostoucím rozdílem teplot a s rostoucí nadmořskou výškou (*Tolasz, 2007*), a doprovází tak přemísťování vzduchových hmot (*Hošek, 2009*).



Obrázek 2: Robinsonův kříž
(online: cs.wikipedia.org)



Obrázek 3: Akustický anemometr
(online: www3.nd.edu)

Rychlost větru, případně jeho směr, je možné zaznamenat pomocí přístrojů, které jsou nazývány anemometry. Tyto přístroje jsou různého druhu a fungují například na mechanických, aerodynamických, případně akustických principech. Poměrně rozšířeným typem je miskový anemometr, nazývaný též Robinsonův kříž (obr. 2) (*Tolasz, 2007*), který měří pouze rychlost větru na základě rotace kolem vertikální osy vlivem účinku proudění vzduchu. Směr větru bývá u takovýchto přístrojů určován

pomocí jednoduché směrovky. Akustický anemometr (obr. 3) je příkladem přístroje, který je schopen vedle rychlosti větru určovat i směr na základě šíření zvukových vln (Hošek, 2009). Dalším příkladem přístroje je tlakový anemometr, který využívá pro měření rychlosti větru aerodynamických principů na základě rozdílnosti tlaků, jež jsou vyvolány na čidle vlivem proudícího vzduchu (Bednář et al., 1993).

Rychlosti větru jsou zaznamenávány na klimatologických a meteorologických stanicích, na kterých se dlouhodobě zaznamenávají údaje o rychlostech větru standardně ve výšce 10 m nad zemským povrchem. Pro speciální účely jsou měřeny i ve vyšších výškách pomocí stožárového měření, a to až do výšky 70 m ve více úrovních (Hošek, 2009) nad zemským povrchem. Na základě dlouhodobých standardních měření jsou vytvořeny pro vybrané stanice větrné růžice, kdy uprostřed je procentuální hodnota bezvětří na stanici (Tolasz, 2007) a velikost paprsků, které vychází ze středu růžice, jsou úměrné četnostem větru daného směru (Bednář et al., 1993).

Na území České republiky dle větrných růžic převládají jihozápadní a západní větry. Východní část České republiky je více ovlivňována kontinentálním rázem klimatu a převažující směry jsou ovlivňovány i reliéfem, proto se na moravských stanicích vyskytují spíše severozápadní, případně jihovýchodní větry (Tolasz, 2007).

3.1.4. Bořivé větry dle Beaufortovy stupnice

Beaufortova stupnice byla původně vytvořena anglickým admirálem Francisem Beaufortem v letech 1805-1808 na základě účinků větru při různých rychlostech na lodní plachty. Stupnice původně měla 14 stupňů, přičemž stupeň 0 znamenalo bezvětří a stupeň 13 bouři. Mezinárodně přijatá stupnice má 13 stupňů, přičemž počáteční stupeň je označen jako 0 a jedná se o bezvětří, a poslední stupeň má číslo 12 s označením orkán (Bednář et al., 1993).

Bořivými větry jsou označovány větry, jejichž účinky mají na lesní porosty destruktivní vlivy, jejichž důsledkem je vznik polomů. Takové síle větru odpovídají stupně, které jsou shrnuty v tabulce (tab. č. 1).

Pro středoevropské lesy jsou velmi nebezpečné větry, které dosahují síly vichřice, zejména v období března, dubna a listopadu (Lubojacký, 2013), kdy půdy vlivem vlhkosti ztrácí soudržnost (Schütz et al., 2006) a neposkytují některým stromům a porostům dostatečnou stabilitu. Větší problémy způsobuje nárazovitý vítr, kdy dochází ke zvýšení rychlosti větru o více než $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ na krátkou dobu v důsledku změn proudění větru způsobených překážkami (Bednář et al., 1993).

Tabulka č. 1: Beaufortova stupnice síly větru

Zdroj: Bednář et al., 1993

stupeň	název	rychlost větru [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	rychlost větru [$\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$]
8	vítr bouřlivý	17,2 - 20,7	62 - 74
9	vichřice	20,8 - 24,4	75 - 88
10	silná vichřice	24,5 - 28,4	89 - 112
11	mohutná vichřice	28,5 - 32,6	103 - 117
12	orkán	32,7 a více	118 a více

3.1.5. Mimořádné větrné události

V přírodních podmínkách střední Evropy se z počátku roku setkáváme s poměrně silnými větry dosahujícími až síly orkánu, které doprovází přechody tlakových níží, zejména studené fronty, které se vyskytují na okrajích tlakových níží. Na počátku let 2007 a 2008 zasáhly území střední Evropy velmi silné větrné události, které byly spojeny s tlakovými nížemi pojmenovanými "Kyrill" a "Emma", kdy vznikl velmi velký rozdíl tlaku mezi dvěma tlakovými útvary nad Evropou, což mělo za následek velký tlakový gradient, tedy velkou změnu atmosférického tlaku na jednotku délky (*Bednář et al., 1993*), se kterou souviselo rychlejší proudění vzduchu. Přechody obou studených front byly doprovázeny velmi silnými nárazy větru, kdy v případě "Kyrilla" dosahovaly nárazy větru $57,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ na Labské boudě (na Sněžce až $60 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), o rok později v případě "Emmy" dosahovaly nárazy větru rychlostí $54,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ též na Labské boudě. Průměrné rychlosti větru se při těchto událostech pohybovaly od $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ do $25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (*Hostýnek, 2008*).

V letních obdobích jsou přechody studených front doprovázeny intenzivními bouřkami s húlavami, nebo se můžou při vzniku bouřek vyskytnout i tornáda. Húlavy jsou doprovodným jevem při přibližování bouřkové činnosti. Jsou charakteristické tím, že dochází k nárazovitému větrům, které mění často směr a mohou dosahovat rychlostí až $45 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Vyskytuje se především v odpoledních hodinách při bouřkách, které vznikají v místech s instabilními vzduchovými hmotami, tedy v místech, kde dosahují teplotní rozdíly vrstev ve vertikálním směru atmosféry kladných hodnot (*Bednář et al., 1993*).

Mezi doprovodné jevy, u kterých se nedá přesně předpovědět výskyt, patří tornáda. Jedná se o rotující víry zvané tromby, u kterých rychlost pohybu vzduchových částic na okrajích může dosahovat až $100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Škody na lesních porostech způsobené tornády bývají v pásech v trase tornáda a poškozená dřevní hmota se pohybuje v rádech

tisíců m³. Během posledních 10 let bylo na území České republiky zaznamenáno 21 tornád, z toho 10 bylo silnějších. Poslední výskyt silnějšího tornáda byl zaznamenán v okrese Bruntál, poblíž Krnova, kde bylo poškozeno kolem 6 tis. m³ dřevní hmoty (*Anonymous, 2013*).

K dalším jevům, které doprovázejí bouřkové činnosti, patří downburst. Jde o sestupný proud chladného vzduchu, který se vyskytuje na teplotním rozhraní bouřky a je doprovázen silným větrem. Z hlediska velikosti se tyto větry rozdělují na macrobursty, které dosahují průměru více jak 4 km, rychlosti větru až 60 m.s⁻¹ a trvají 5—30 min, a microbursty, které jsou menšího rozsahu, trvají 2—15 min a jsou doprovázeny rychlostí až 75 m.s⁻¹ (*Bednář et al., 1993*).

Poslední zařazenou událostí jsou bóry. Původně takto byly označeny větry, na pobřeží Dalmácie, kde přináší silné ochlazení od severovýchodu z vnitrozemské plošiny k moři. V dnešní době jsou takto označeny silné, studené a nárazovité větry, které jsou spojeny s orografií území (*Bednář et al., 1993*). Příkladem větru tohoto typu je tatranská bóra. V roce 2004 způsobila škody v oblasti Vysokých Tater. Studená vzduchová hmota se na návětrné straně (severní svah) nahromadí, zatímco na závětrné straně (jižní svah) je stále teplý vzduch. Po nahromadění a dosáhnutí vrcholu hlavního hřebene studený vzduch rychle padá na závětrnou stranu a způsobuje rozsáhlé škody. V historii se ve Vysokých Tatrách bóra vyskytla sedmkrát, avšak nikdy nedosáhla takových rozměrů, jaké byly v roce 2004 (obr. 4) - více než 12 tis. ha kalamitní plochy a přes 2 mil. m³ dřevní hmoty. Při této události byly naměřeny na meteorologických stanicích Lomnický štít a Skalnaté pleso rychlosti větru 166 km.h⁻¹, resp. 194 km.h⁻¹. Z toho vyplývá, že v dané lokalitě převládal padavý vítr (*Kunca, Zúbrik, 2006*).



Obrázek 4: Rozsah kalamity z roku 2004 - znázorněn červeně (Kunca, Zúbrik, 2006)

4. Zjišťování rizika poškození větrem

Citlivost lesních porostů a stromů uvnitř porostu na poškození větrem je řízeno vlastnostmi větru (tj. rychlost, délka trvání a nárazovitost), lesní strukturou, stromovými, porostními a stanovištními charakteristikami jako jsou druh stromu, výška a průměr stromu, plocha koruny, hloubka a šířka kořenového systému, porostní hustota, půdní typ a topografie. Účinky působení větru na jednotlivé stromy mohou být studovány na základě fyziky (tj. síla větru a gravitace), empirických experimentů (tj. kývání stromů, tahové zkoušky, experimenty ve větrném tunelu), a přístupů založených na základě mechanického modelování vycházejícího ze vzájemných vztahů. Tímto způsobem může být predikována prahová hodnota rychlosti větru (kritická rychlost větru), která je potřebná k poškození stromu uvnitř porostu (Peltola, 2006).

V průběhu posledních 20 let byly vyvinuty nástroje a empirické a mechanické modely na pomoc lesním správcům pro předpovídání rizika následků účinků větru. Empirické modely byly též vyvinuty pro posouzení pravděpodobnosti a očekávaného podílu způsobených škod v rámci lesního porostu založené na stromových a porostních vlastnostech. Tyto modely mohou být zcela přesné pro konkrétní místa a mohou být využité i pro jiná místa, poskytují ale jen obecný vhled do mechanismů následků větru (Gardiner et al., 2008).

Mechanické modely zkouší charakterizovat fyzikální procesy, které souvisí s vývraty nebo zlomy stromů. Zjištěné informace je potřeba přizpůsobit a modely ověřit v různých lesích a regionech (*Gardiner et al., 2008*).

4.1. Určení CWS (*critical wind speed*)

Počáteční fází samotných modelů poškození větrem je výpočet nadúrovňové kritické rychlosti větru (CWS), která je potřebná pro zlomení nebo vyvrácení stromu. CWS je vypočítána na základě použitých sil na jednotlivých stromech s ohledem na působení větru a odporové síly kmene a kořenů. Aplikované síly závisí na faktorech, jako jsou místní rychlost větru, návětrné podmínky, pozice stromu v úrovni, charakter koruny (např. hmotnost, velikost a aerodynamická) a kmene (např. tvar, délka a hmotnost). Proti těmto silám působí odporové síly stromu, které jsou určovány faktory, jako jsou charakteristiky kmene (např. průměr a pevnost dřeva), morfologie kořenového systému, půdní typ a vlhkost půdy. Tyto faktory jsou závislé na vertikálním a horizontálním umístění koruny stromu v úrovni, geografickém umístění stanoviště, náporu větru a druhu stromu (*Gardiner et al., 2008*).

Odolnost stromů vůči vyvrácení nebo zlomení je založena na empirických vztazích vyvinutých na základě tahových zkoušek a zkoušek pevnosti dřeva. Odolnost vůči vývrátům je založena na vztahu mezi ohybovým momentem potřebným k vývratu stromu a hmotnosti kmene nebo kořenového systému (hmotnost kmene a kořenů jsou ve vzájemné korelaci pro jednotlivé druhy dřevin). Odolnost vůči zlomu je vždy vypočtena jako ohybový moment potřebný pro překročení kritického napětí na povrchu kmene, kdy dojde ke zlomu dřeva. Toto napětí na povrchu kmene souvisí s druhem dřeviny a průměrem jednotlivých kmenů (*Gardiner et al., 2008*).

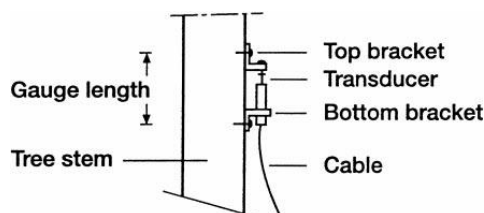
4.2. Tahové zkoušky ve Finsku (*Peltola et al., 2000*)

Na území východního Finska proběhly experimenty tahových zkoušek v letech 1995 a 1996 pro 3 různé dřeviny – borovice lesní (*Pinus sylvestris*), smrk ztepilý (*Picea abies*) a břízy (*Betula spp.*). Vyhodnocovaly se reakce stromů, závislost parametrů dřeviny a zaznamenávaly se naměřené údaje během tahových zkoušek. Celkem bylo studováno 111 stromů – 51 borovic, 33 smrků a 11 bříz na nezamrzlé půdě, a pro zjištění závislosti odolnosti stromů na vlastnostech půdy bylo vyhodnocováno 20 borovic na zamrzlé půdě. Veškeré tahové zkoušky byly prováděny na podzolových půdách, tedy půdách s nevhodnějšími podmínkami pro růst testovaných stromů.

4.2.1 Mechanismus a zjišťované veličiny

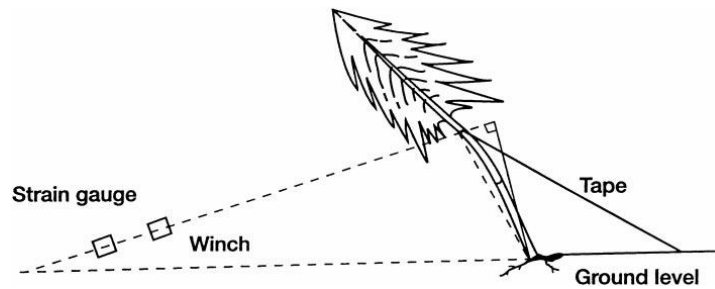
Pro tahové zkoušky byl použit navijákový systém a ve spodní části kmene byla měřena maximální síla, při které docházelo k vyvrácení nebo zlomení kmene. V závislosti na parametrech stromu byl použit buď ruční naviják, jehož tažná síla dosahovala 40 kN, nebo traktor Valmet Terra s navijákovým systémem (tažná síla 80 kN s dvojitým lanem). Tažné síly byly zaznamenány pomocí snímače zatížení (Phillips PR 6206 / 53N), který byl připojen k digitální vážící jednotce (Phillips Digital KS 380) a umožňoval měřit sílu až 5 000 kg.

Místo pro připevnění lana se nacházelo v konstantní výšce 6 m nad zemí, tedy zhruba v třetině až polovině výšky stromu. Výška připevnění byla vybrána z bezpečnostních důvodů pro lezení a připojení lana. Tato výška v blízkosti korunové báze (nebo pod ní) umožnila současné měření modulu elasticity kmene (obr. 5). V tomto případě však nedojde k rovnoměrnému napínání vláken, protože k tomu je potřebné mít umístěné lano v cca 80 % výšky stromu. Ve výsledcích tak převažovaly zlomy ve spodní části kmene, protože docházelo k větší zátěži. Počáteční tah byl šikmo dolů pro snížení výšky bodu připevnění, který se pohyboval kolem oblouku. V případě tahových zkoušek prováděných na zamrzlých půdách byla báze kmene udržována bez sněhové přikrývky, aby byla zajištěna dostatečná hloubka zamrznutí půdy.



Obrázek 5: Nastavení pro měření modulu elasticity

Průhyb kmene byl zaznamenán během namáhání stromu lanem připojeného ve výšce 6 m nad bází kmene (obr. 6). Změna souřadnic byla zjišťována přímo z měřicí pásky připojené jedním koncem do stejného bodu na strom a horizontální poloha byla odečítána z jiné pásky, která byla umístěna pod nataženým provazem směřujícím ve směru lana. Strom byl namáhán v několika fázích, kdy se síla zvyšovala postupně po 0,1 kN a zároveň byly zjišťovány hodnoty změněných souřadnic.



Obrázek 6: Prostorové uspořádání mechanismu pro tahové zkoušky

4.2.2 Měření stromových charakteristik

Pro všechny namáhané stromy byly měřeny následující kmenové a korunové charakteristiky: výška stromu, průměr kmene v různých výškách (tj. 0, 1,3, 6 m), hloubka a šířka koruny. Pokud došlo při namáhání ke zlomu, byla změřena výška k místu, kde ke zlomu došlo.

Koruna byla rozdělena na úseky o délce 1 m. V každém úseku byla změřena šířka koruny, která byla stanovena jako nejvzdálenější část větve v kolmém směru od kmene. Výška koruny byla změřena od vrcholu k nejnižší živé větvi, která měla průměr alespoň 1 cm. U některých stromů byla vedle těchto charakteristik měřena váha jednotlivých částí (koruna, kmen a kořenový systém) pomocí zátěžového optimalizátoru (KajaaniOy, Finsko). Váha kmene byla zjišťována v úsecích, které dosahovaly alespoň 6 cm v průměru. Části, jejichž průměr byl menší než 6 cm, byly zahrnuty do korunové části. Pro zjištění věku stromu a základní hustoty byly vzaty vzorky dřevní hmoty (kotouče) z výšky 1,3 m nad bází kmene.

4.2.3 Měření kořenových charakteristik

Šířka kořenového systému byla měřena jako vzdálenost od středu kmene k okraji hmoty kořenů a půdy. Hloubka kořenového systému byla stanovena jako hloubka, ve které dosahují kořeny průměru větší než 1 cm. Průměrná a maximální hloubka byla stanovena tlačáním měřící tyče skrz kořenový systém. Kořenové vlášení a délka kořenů, které byly poničeny během tahových zkoušek, měřeny nebyly. Hlavní funkce těchto kořenů byla považována především jako výživová. Měřený podíl kořenového systému byl pouze ten, který byl vytažen ze země během napínání. Střední hodnota šířky kořenového systému byla získána jako průměr dvou na sebe kolmých měření.

4.2.4 Měření modulu elasticity

Na počátku zatížení každého z dílčích stromů (10 stromů z každého druhu zastupující různé tloušťkové třídy) byla zaznamenávána deformace na kmeni

ve výšce 1,3 m pomocí senzoru Youngova modulu při mírném namáhání stromů se zátěží 500—600 N, aby byl kořenový systém mírně narušen. Senzor je složen ze snímačů, které umožňují výpočet deformace vnějších vláken kmene.

4.3. Tahové zkoušky ve Velké Británii (Nicoll et al., 2006)

Na území Velké Británie začaly tahové zkoušky v roce 1960. Celkem bylo zkoumáno 12 druhů jehličnatých dřevin a výzkum byl zaměřen zejména na vlastnosti kořenového systému v rámci různých lokalit. Byl zkoumán vzorek nejméně osmi stromů, které byly náhodně vybírány pro každý půdní typ a pěstební opatření. Od roku 1997 bylo vybráno 8 subdominantních, 8 kodominantních a 8 dominantních stromů na každém stanovišti, pokud to bylo možné.

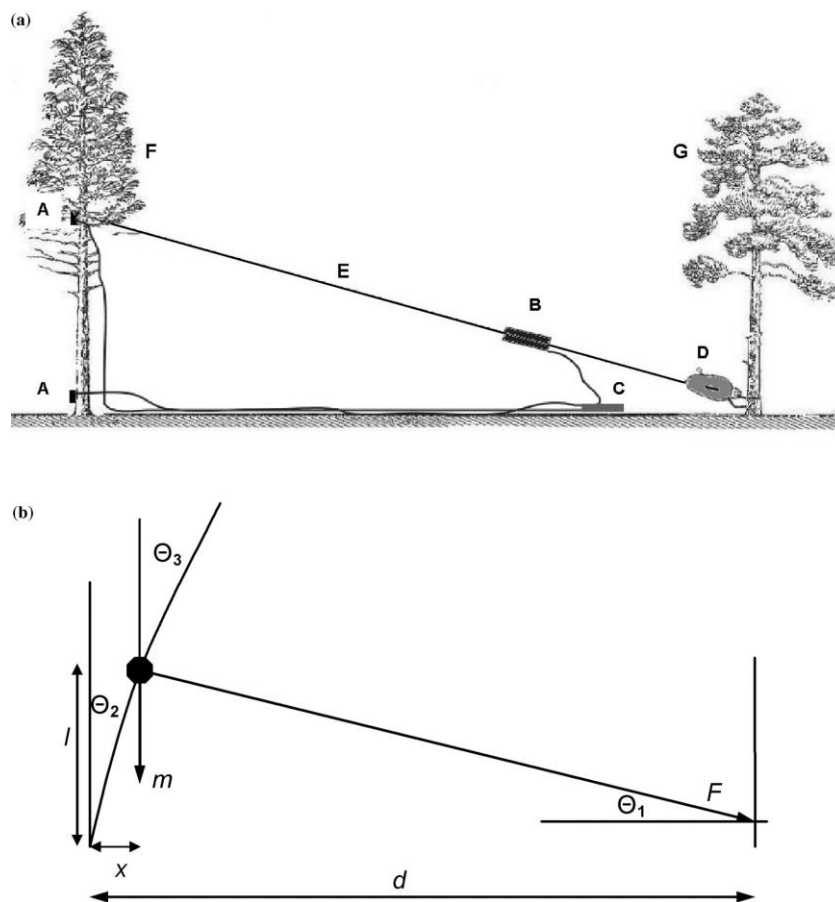
Původní myšlenkou bylo získat informace pro každý půdní typ. Vzhledem k tomu, že nebylo získáno dostatečné množství údajů, byly půdní typy sdruženy do skupin na základě podobných vlastností: A) vodě-propustné půdy, B) gleje, C) rašelinné půdy a D) hluboké rašelinné půdy, přičemž od A do D se zvyšuje půdní vlhkost. Skupina vodě-propustných půd zahrnovala kambizemě, podzoly, rendziny, rankery a skeletové půdy. Gleje zahrnují gleje pravé, gleje kambizemní a gleje podzolové. Do rašelin byly zahrnuty gleje rašelinné a rašelinné podzoly. Do poslední skupiny pak byly zahrnuty organozemě s hloubkou větší než 45 cm.

4.3.1. Mechanismus a zjišťované veličiny

Během počínajících pokusů byla vodorovná síla aplikována v jedné třetině výšky stromů, kde byl upevněn úvazek. Využíván byl systém kladkostrojů, ručního navijáku a nastavitelné podložky kladkostroje, který dokázal vyvézt kladkostroj do výšky, ve které byl prováděn tah. Během namáhání byly zaznamenávány hodnoty sil z číselníku na dynamometru pro každý stupeň pohybu stromu. Jakmile došlo k destrukci stromu, byly zaznamenány rozměry stromu (výška, výčetní tloušťka, šířka a délka koruny, hloubka kořenů). Hmotnost kmene, koruny a kořenového systému byly určovány zavěšením každé složky (v úsecích v případě potřeby) na vahách, které byly v lese zavěšeny pod trojnožkou.

Tato metoda byla používána s malými úpravami až do roku 1980. Větší změnu přinesli poprvé Ray a Nicoll v roce 1998, kdy docházelo k destrukci v horní části kmene dřívě. V rámci těchto experimentů byl pro tahové zkoušky využit naviják poháněný řetězovou pilou, který byl upevněn ke kotevnímu stromu pomocí 2m polyesterového úvazku s nosností kolem 5 t, snímač zatížení byl umístěn mezi naviják a kotevní strom.

Od snímače zatížení bylo vedeno tažné lano do koruny stromu, kde bylo připevněno k polyesterovému úvazku. Digitální dvouosé inklinometry (Applied Geomechanics, Santa Cruz, California) byly umístěny na bázi kmene ve výšce 1,3 m a v polovině výšky stromu. Vzdálenost byla zaznamenána mezi kotevním a namáhaným stromem, a úhel (vzhledem k horizontální rovině) byl zaznamenán z navijáku (nebo posunu stromu) použitím ručního sklonoměru (Suunto, Vantaa, Finsko). Poté, co byly odečteny nulové hodnoty u obou sklonoměrů a tenzometru, strom byl pomalu natahován pomocí navijáku. Inklinometry i snímač zatížení byly napojeny na dataloger, který byl naprogramován tak, aby zaznamenal maximální zatížení ze snímače zátěže a úhly z obou inklinometrů v době maximálního namáhání (obr. 7). Směr tahu byl náhodný natolik, jak jen to umožňovaly terénní podmínky. Pokud v namáhání bránily okolní stromy, byly pokáceny, aby se zabránilo drhnutí korun a možnému zkreslení výsledků tahových zkoušek.



Obrázek 7: (a) Schéma tahové zkoušky; A - inklinometry; B - tenzometr; C - dataloger; D - naviják připevněný nylonovým úvazkem na kotvící strom; E - 9 mm tažné lano; F - namáhaný strom; G - kotvící strom. (b) Postup měření používaný při výpočtu kritického momentu; m – tíha koruny; F – tažná síla

navijáku; d - vzdálenost mezi kotevním a namáhaným stromem; x - horizontální posun destruovaného stromu; l - výška těžiště v době maximálního zatížení; θ_1 - úhel lana ve vztahu k povrchu půdy; θ_2 - úhel odklonu stromu od původního stavu v době maximálního zatížení; θ_3 - úhel stromu nad bodem upevnění lana v okamžiku maximálního zatížení.

4.3.2. Měření stromových charakteristik

Byla měřena šířka koruny, pozice nejnižší živé větve a nejnižší přeslen živých větví. Dále byly odstraněny živé a uschlé větve, které byly zváženy věšením svazků pod 3 metry vysokým ocelovým stativem umístěným v lese. Po odstranění větví byl zaznamenán bod upevnění lana, výška obou sklonoměrů, nejnižší živé větve, nejnižší přeslen živých větví, celková výška stromu a hroubí kmene (tedy výška stromu do míst, kde průměr kmene dosahoval alespoň 7 cm). Od báze k vrcholu byl měřen kmen po úsecích dlouhých 1 m, poté byl vypočten objem kmene.

Zhruba uprostřed délky kmene byl odříznut 1 m dlouhý úsek pro odhad hustoty kmene a celkové hmotnosti kmene.

4.3.3. Měření kořenových charakteristik

Půdy byly rozlišeny dle skutečné nebo teoretické hloubky na mělké s hloubkou do 40 cm, střední 40—80 cm a hluboké nad 80 cm. Toto rozřídění bylo využito, protože umožňovalo zatřídit stanoviště podle půdního typu vzhledem k své široké škále. Jednotlivé stromy pak byly zařazeny do příslušné skupiny na základě skutečných měření, pokud to bylo možné, nebo dle jednotlivých půdních typů vycházející z ekologické klasifikace.

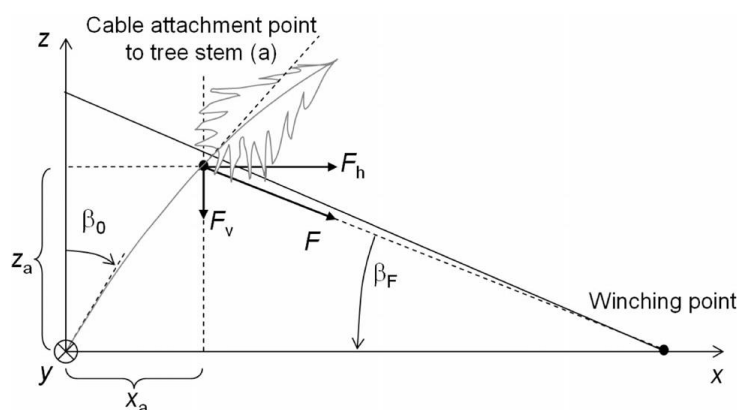
4.4. Tahové zkoušky ve Švýcarsku (Lundström et al., 2007)

Ve Švýcarsku, v okolí Curychu, byly prováděny tahové zkoušky na jaře roku 2000. Testování probíhalo v nadmořské výšce cca 460 m, kde bylo namáháno celkem 84 stromů - 57 smrků (*Picea abies*), 23 jedlí bělokorých (*Abies alba*) a 4 borovice lesní (*Pinus sylvestris*). Tyto stromy byly součástí smíšeného porostu, kde se ještě vyskytovaly buky (*Fagus sylvestris*) a jasaný (*Fraxinus excelsior*). Přestože se jedná o přirozené stanoviště buků, došlo vlivem selektivních pěstebních opatření k tomu, že na stanovišti dominuje smrk. Ačkoli se na lokalitě vyskytovaly paseky, namáhané stromy se nevyskytovaly na porostním okraji. Půdy na lokalitě byly středně hluboké až hluboké, dystrické kambizemě a některé luvizemě. Teplota byla po celou dobu testování nad bodem mrazu a množství srážek odpovídalo normálu pro dané období.

4.4.1 Mechanismus a zjišťované veličiny

Polohy namáhaných stromů byly nejdříve určeny pomocí tachymetru. Lano bylo jedním koncem připojeno do poloviny výšky stromu, druhý konec lana byl připevněn k navijáku nesenému na traktoru, který byl umístěn na vzdálenost větší než jedna výška stromu od paty kmene. Záznam vychýlení byl pořízen digitální video kamerou umístěnou ve směru navijáku. Před každým namáháním byl změřen úhel mezi napnutým lanem a zemí, vzdálenost digitální kamery umístěné relativně k bázi kmene, která reprezentuje osu x ve směru navijáku (obr. 8).

Stromy byly taženy východním až východoseverovýchodním směrem, tedy ve směru převládajících větrů. Aplikovaná síla (F) a stromové deformace byly zaznamenávány každou sekundu. Snímač síly MTS (Type 85081-6100- 144 V0000C0, 944860, Schaffhausen Messtechnik, Německo) zaznamenával sílu, zatímco poloha kmene byla sledována pomocí digitálních fotografií, které byly pořízeny v přibližně kolmém směru vzhledem ke směru tahu. Navíjení lana probíhalo přibližně konstantní rychlostí $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, dokud strom nezačal padat vlastní vahou. Veškeré experimenty probíhaly v podmínkách, které se blížily stavu bezvětří.



Obrázek 8: Schéma průběhu tahové zkoušky a měřených veličin (β_0 - odklon báze stromu; β_F - úhel napětí lana; z_a a x_a výška a horizontální vychýlení pro bod a, kde je lano připevněno ke stromu; F_h a F_v - horizontální a vertikální složky destruktivní síly F).

4.4.2. Měření stromových charakteristik

Ve výškách 0,3, 1,3, 3,0 m, a pak každé 3 m byl měřen průměr kmene. Roční přírůsty byly zjišťovány na řezech na bázi a vrcholu stromu. Hmotnost vzorku větví odebraného na metrovém úseku z relativní výšky koruny 1/8, 3/8, 5/8 a 7/8 byla zvážena na dynamometru.

4.4.3. Měření kořenových charakteristik

Byly měřeny rozměry kořenového valu - výška, šířka a hloubka. Vedle těchto rozměrů byl zjišťován tvar kořenového valu na základě digitálních fotografií tří profilů - v rovině $y = 0$, $x = 0$ a $z = 0$. Rozměry i tvar poukazují na kompaktnost kořenového valu. Vyčnívající kořeny nebyly brány v úvahu. Vlhkost půdy a kořenového valu byly vizuálně klasifikovány do třech kategorií - podmáčené, vlhké a suché.

5. Metodika

5.1. Analýza škod způsobených větrem v posledních letech

Ze zpráv ministerstva zemědělství o stavu lesa a lesního hospodářství a ze zpravodaje ochrany lesa byly vybrány ukazatele pro posouzení rozsahu škod, způsobených biotickými a abiotickými činiteli. Údaje byly zjištěny za posledních 15 let a ukazatele byly vybrány s ohledem na stejné jednotky, což umožnilo činitele porovnat. Škody způsobené abiotickými činiteli zahrnují objemy dříví, na kterých se podílí vítr, mokrý sníh, sucho a ostatní abiotické vlivy. Z oblasti biotického poškození bylo možné využít údaje o kůrovcovém dříví. Evidované objemy kůrovcového dříví byly seřazeny v tabulce vzestupně dle příslušného roku. Následně byly tyto objemy srovnávány s celkovým poškozením způsobeným abiotickými činiteli. Poté byl separován ze skupiny abiotických činitelů vítr a byl určen poměr tohoto poškození na celkovém abiotickém poškození. U obou publikací byl aplikován stejný postup, což umožnilo srovnání evidence (MZE, 2001; MZE, 2002; MZE, 2003; MZE, 2004; MZE, 2005; MZE, 2006; MZE, 2007; MZE, 2008; MZE, 2009; MZE, 2010; MZE, 2011; MZE, 2012; MZE, 2013; MZE, 2014; MZE, 2015; Kapitola, Knížek, 2001; Kapitola, Knížek, 2002; Kapitola, Knížek, 2003; Kapitola, Knížek, 2004; Kapitola, Baňář, 2005; Kapitola, 2006; Knížek, 2007; Knížek, Peškova, 2008; Knížek, 2009; Knížek, 2010; Knížek, 2011; Knížek, Modlinger, 2012; Knížek, Modlinger, 2013; Knížek et al., 2015).

5.2. Mechanické namáhání

Pro zjišťování účinků větru na dřeviny byl využit lanový systém poháněný přenosným motorickým navijákem. Působení sil bylo zaznamenáno pomocí kamery na stativu a tenzometrického snímače s příslušenstvím. Záznamy na obou zařízeních byly pořízeny současně a k ukončení záznamu docházelo po dosažení síly, která byla

potřebná pro způsobení vývratu nebo zlomu. Tahové zkoušky byly prováděny ve směru převládajících větrů, tzn., že směr tahu byl v jihovýchodním směru.

Tahové zkoušky byly v rámci testovacích experimentů provedeny na 2 lokalitách - v porostech ve správě Školního lesního podniku v Kostelci nad Černými lesy (50.0082631N, 14.8564803E) a v porostech ve správě organizace Kaiser, s.r.o. v okolí města Bělčice (49.5218403N, 13.8775006E). V rámci testování byl využit mechanismus složený z úvazku v těžišti koruny stromu, textilního lana (resp. ocelového), směrové kladky, tenzometru a zařízení pro mechanické namáhání.

Samotné zařízení pro tahové zkoušky je složeno ze dvou samostatných částí - tažné a pohonné jednotky. Obě části jsou na vozících, které usnadňují pojezd v terénu, a za chodu jsou propojeny párem hydraulických hadic s rychlospojkami.

Pohon celého zařízení je zajištěn jednoválcovým, čtyřtaktním, vzduchem chlazeným motorem KIPOR KG 390D (obr. 9). Pohonná jednotka je dále vybavena hnací hřídelí, vzduchovým filtrem, olejovým čerpadlem a regulátorem tlaku.

Tažnou jednotku tvoří hydraulický naviják Golemwinch 12000 HD (obr. 9), jehož tahová síla se pohybuje kolem 53 kN. Při využití jednoduchého kladkostroje může být tahová síla dvojnásobná. Naviják je umístěn na podvozku s koly a pro snadnější přesun v terénu je tažná jednotka vybavena odnímatelnou ojí. Tažné lano je na buben navijeno pomocí kabelového ovladače přímo u navijáku, anebo je navijení usnadněno dálkovým ovladačem.



Obrázek 9: Pohonná jednotka s navijákem Golemwinch; autor: Martin Gregor

Pro zaznamenání tahové síly byl využit tenzometr s připojeným datalogerem Formatic "Z" (obr. 10). Dataloger je vybaven vestavěným akumulátorem a konektorem pro připojení USB flash disku, na kterém jsou zaznamenány hodnoty zatížení. Na flash disk jsou hodnoty zatížení zaznamenávány v intervalu 0,3 s do textového souboru, ze kterého je možné následně informace dále zpracovat.

Tenzometr funguje jako snímač, který převádí zatížení nebo působí sílu na elektronický signál, který je dán změnou napětí. K této změně dochází vlivem tahu – čím více je tenzometr napínán, tím je dosahováno větší napětí. Využitý tenzometr je přizpůsobený i pro měření tlaku, kdy je využito obdobných zákonitostí – čím více je tenzometr stlačován, tím je větší zaznamenaná síla (Anonymous, 2016).



Obrázek 10: Připojený tenzometr; autor: Václav Štícha

5.2.1 Experimenty v Kostelci nad Černými lesy

Cílem prvotních experimentů, prováděných v Kostelci nad Černými lesy, bylo získat potřebné informace k vytvoření metodiky a pro sestavení zařízení pro mechanické namáhání stromů. Pomocí lezecké soupravy vystoupal kvalifikovaný pracovník do koruny stromu, kde do těžiště koruny upevnil úvazek (nosnost 4 t) a ocelové lano. K oku průmyslové závěsné váhy byl na jedné straně připojen konec ocelového lana, na druhé straně bylo upevněno lano navijáku traktoru, které bylo vedeno přes směrovou kladku. Když bylo zahájeno navíjení lana, byl zároveň zaznamenáván průběh sil, který se zobrazoval na displeji průmyslové váhy.

5.2.2 Testování v Bělčicích

Tahové zkoušky na druhé lokalitě již byly prováděny pomocí sestaveného zařízení pro mechanické namáhání. V rámci tahových zkoušek byl aplikován obdobný postup jako v Kostelci nad Černými lesy. Při výstupu do koruny stromu lezec označil pomocí lesnického spreje (Silvamark) metrové sekce. Místo ocelového lana pro vlastní

tahovou zkoušku zde bylo využito textilní lano DynaForce tl. 8 mm, které je vyrobeno z 12 propletených pramenů z velmi pevného vlákna. Jeden konec lana byl připevněn k úvazku v koruně stromu, druhý konec byl uvázán k tenzometru s datalogerem. K tenzometru byl z druhé strany připevněn do vysokopevnostního spojovacího článku úvazek, který na svém konci byl upevněn hákem lana navijáku. Kolem kotevního stromu byl umístěn úvazek, který byl napojen k navijáku a umožnil stabilitu stroje.

Stroj pro namáhání byl umístěn minimálně ve vzdálenosti dvou výšek namáhaného stromu a pomocí směrové kladky zároveň mimo směr tahu lana. Vzdálenost mezi směrovou kladkou a úvazkem v koruně stromu byla min. 60 m, přičemž tato vzdálenost umožnila zanedbat vliv úhlu mezi rovinou a tažným lanem na průběh sil při destrukci stromu. Ve vzdálenosti cca 60 m kolmo k ose lana byla umístěna kamera na stativu zaznamenávající průběh ohýbání. Pro přesnější interpretaci byla na pomyslné ose kamera-strom umístěna geodetická lať, která vytvořila vertikální osu vedle kmene namáhaného stromu a byla tak umožněna lepší interpretace pohybu označených částí kmene na záznamu. Po uvedení trhačího stroje do pohybu byl zároveň spuštěn kamerový záznam a záznam zatížení na datalogeru, který zaznamenával působící sílu v intervalu 0,3 s. Strom byl postupně namáhán do kritické síly, která způsobila zlom nebo vyvrácení stromu. Následně byly záznamy ukončeny.

5.3. Statistická analýza

V programu Excel 2016 byla v bodovém grafu z naměřených údajů proložena lineární spojnice trendu s rovnicí regrese a koeficientem determinace R^2 , který určuje, jak dobře proložená funkce vysvětluje závislou proměnnou, resp. jaký podíl rozptylu je vysvětlen regresí (výsledek 0 nevysvětleno nic, výsledek 1 vysvětleno všechno). Následně v programu STATISTICA 12 byly vytvořeny z tabulky grafy, u kterých byl zobrazen interval spolehlivosti (0,95).

Statistická analýza byla provedena v programu STATISTICA 12 (normalita dat, neparametrické analýzy: Kruskal Wallisův test). Porovnávány byly údaje ze zpráv ministerstva zemědělství o stavu lesa a lesního hospodářství a zpravodaje ochrany lesa.

6. Výsledky

6.1. Škody větrem v lesích České republiky

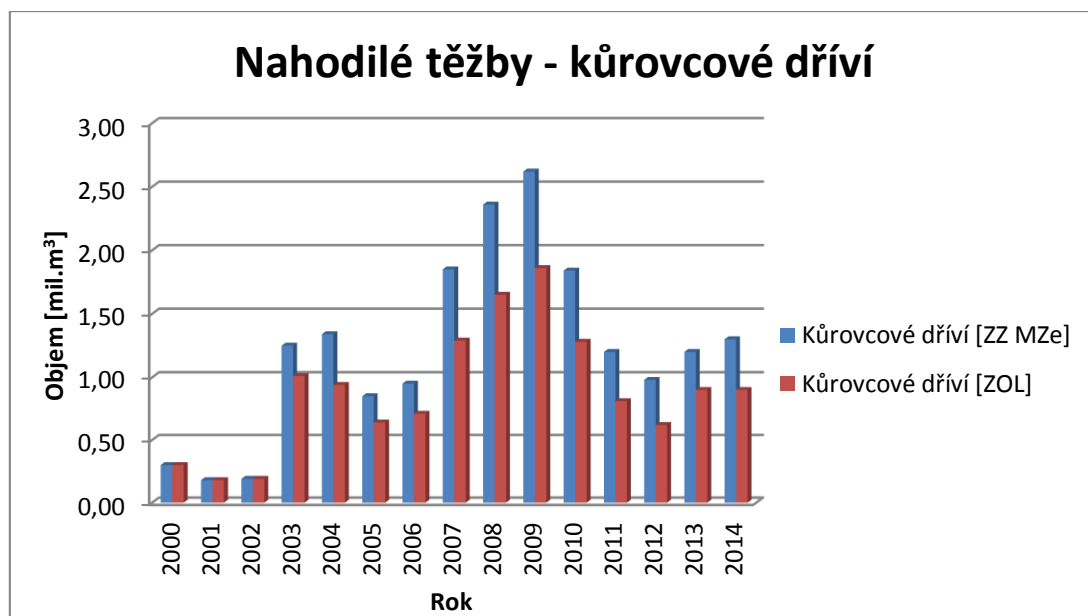
Ze zpráv Ministerstva zemědělství o stavu lesa a lesního hospodářství České republiky za posledních 15 let vyplývá, že na nahodilých těžbách se na našem území nejvíce podílejí abiotické vlivy a kůrovcové dříví (25—30 % z celkového objemu nahodilých těžeb). Kromě mimořádných událostí z let 2007 a 2008, kdy polomy způsobené větrem tvořily až 95 % objemu nahodilých těžeb způsobených abiotickými činiteli a bylo evidováno nad 5 mil. m³ dříví, se objem nahodilých těžeb způsobených poryvy větru pohybuje každoročně kolem 2 mil. m³ dříví. Na nahodilých těžbách způsobených abiotickými činiteli má vítr v posledních letech podíl více než 70%, výjimkou byl rok 2006, kdy byl evidován větší objem dříví z nahodilé těžby způsobený sněhem.

Pro lepší interpretaci zaznamenaných škod byla vytvořena nejdříve tabulka srovnání evidovaného dříví poškozeného abiotickými činiteli a kůrovci (tab. č. 2). Z této tabulky byly vytvořeny dva samostatné grafy. Nejdříve byly vyneseny údaje pro kůrovcové dříví ze zpráv o stavu lesa a lesního hospodářství, následně údaje ze zpravodaje ochrany lesa (graf č. 1). Stejný postup byl aplikován v případě abiotických činitelů (graf č. 2). V další tabulce jsou obdobným způsobem zaznamenány abiotičtí činitelé a podíl větrných škod na celkovém objemu poškozeného dříví (tab. č. 3). Ve výšečovém grafu jsou znázorněny podíly poškození způsobených větrem, nejdříve ze zpráv o stavu lesa a lesního hospodářství (graf č. 3), poté ze zpravodaje ochrany lesa (graf č. 4).

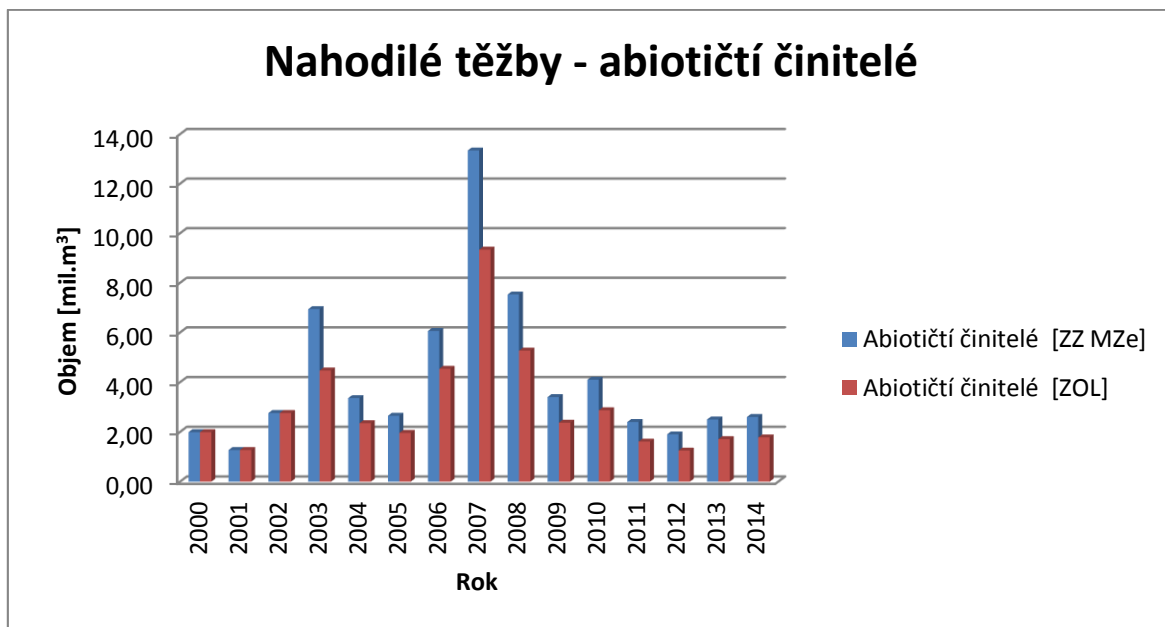
Tabulka č. 2: Srovnání evidovaného dříví poškozeného abiotickými činiteli a kůrovci v letech 2000—2014

Zdroj: Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství, Zpravodaj ochrany lesa

Nahodilé těžby						
Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství			Zpravodaj ochrany lesa			
Rok	Kůrovcové dříví [mil.m ³]	Abiotičtí činitelé [mil.m ³]	Celkem [mil.m ³]	Kůrovcové dříví [mil.m ³]	Abiotičtí činitelé [mil.m ³]	Celkem [mil.m ³]
2000	0,30	1,99	2,29	0,30	1,99	2,29
2001	0,18	1,27	1,45	0,18	1,27	1,45
2002	0,19	2,76	2,95	0,19	2,76	2,95
2003	1,25	6,94	8,19	1,01	4,47	5,48
2004	1,34	3,36	4,70	0,94	2,35	3,29
2005	0,85	2,65	3,50	0,64	1,96	2,60
2006	0,95	6,06	7,01	0,71	4,54	5,25
2007	1,85	13,34	15,19	1,29	9,34	10,63
2008	2,36	7,53	9,89	1,65	5,27	6,92
2009	2,62	3,40	6,02	1,86	2,37	4,23
2010	1,84	4,10	5,94	1,28	2,87	4,15
2011	1,20	2,40	3,60	0,81	1,61	2,42
2012	0,98	1,90	2,88	0,62	1,25	1,87
2013	1,20	2,50	3,70	0,90	1,71	2,61
2014	1,30	2,60	3,90	0,90	1,78	2,68



Graf č. 1: Porovnání nahodilých kůrovcových těžeb dle ZZ MZe a ZOL v letech 2000-2014.

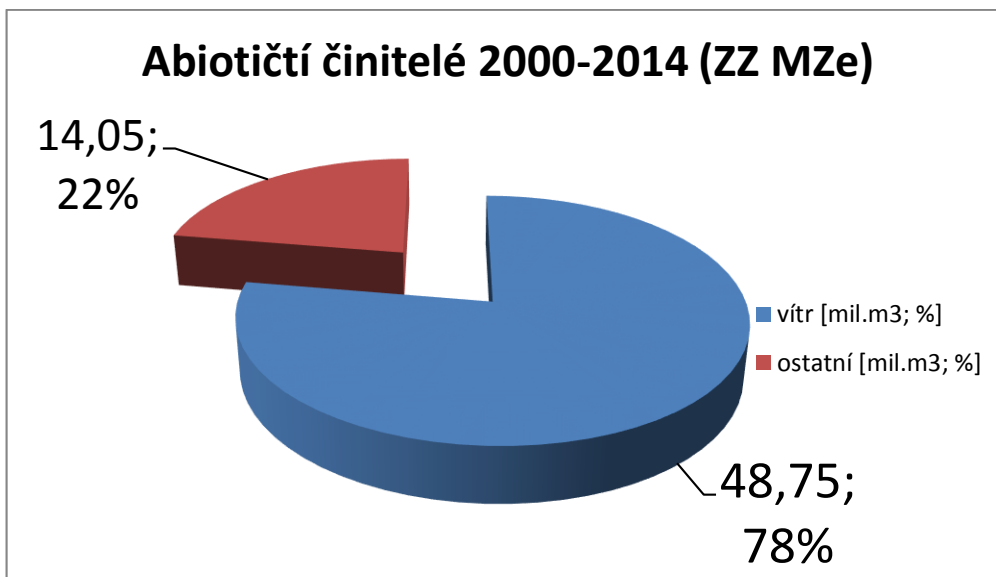


Graf č. 2: Porovnání nahodilých těžeb vzniklých působením abiotickými činiteli dle ZZ MZe a ZOL v letech 2000—2014.

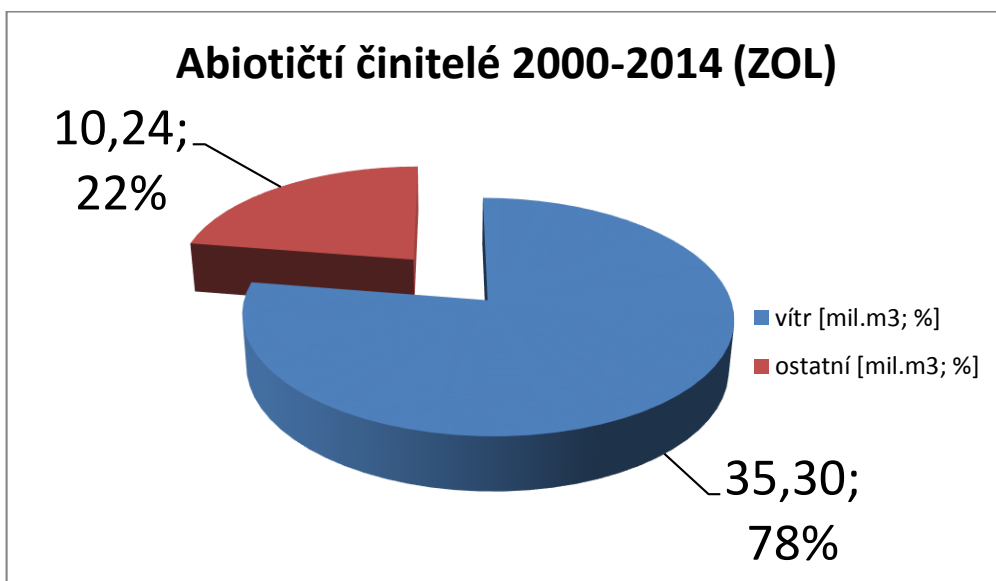
Tabulka č. 3: Podíl škod způsobených větrem na celkovém poškození abiotickými činiteli

Zdroj: Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství; Zpravodaj ochrany lesa

Abiotičtí činitelé				
Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství			Zpravodaj ochrany lesa	
Rok	Celkem [mil.m ³]	Vítr [mil.m ³]	Celkem [mil.m ³]	Vítr [mil.m ³]
2000	1,99	1,45	1,99	1,45
2001	1,27	0,98	1,27	0,97
2002	2,76	2,37	2,76	2,37
2003	6,94	5,90	4,47	3,93
2004	3,36	2,11	2,35	1,50
2005	2,65	1,88	1,96	1,41
2006	6,06	2,12	4,54	1,38
2007	13,34	12,67	9,34	8,84
2008	7,53	6,72	5,27	4,86
2009	3,40	2,89	2,37	2,00
2010	4,10	2,87	2,87	2,04
2011	2,40	1,68	1,61	1,10
2012	1,90	1,33	1,25	0,86
2013	2,50	1,88	1,71	1,28
2014	2,60	1,90	1,78	1,31



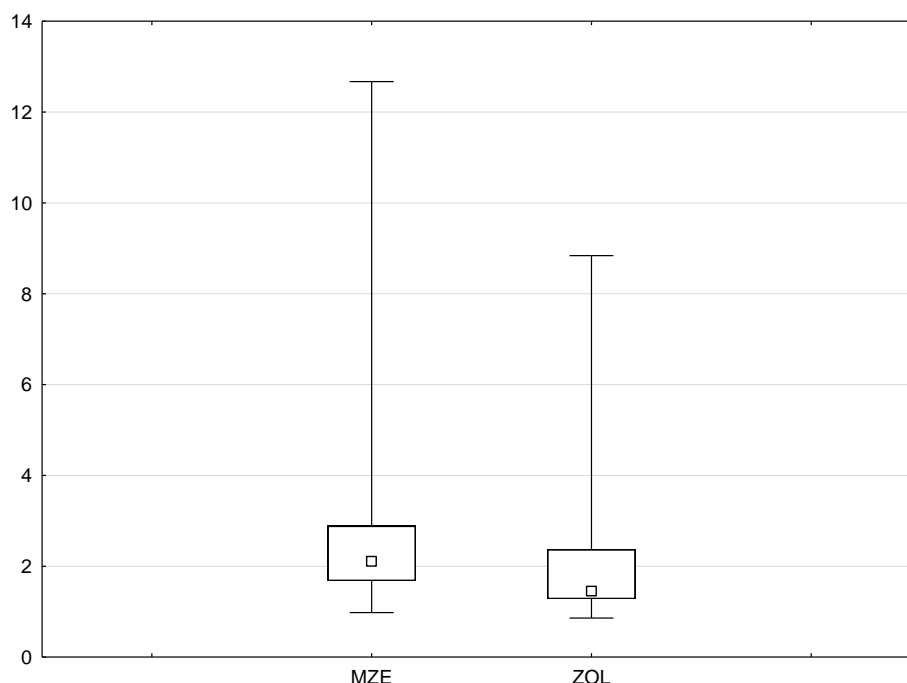
Graf č. 3: Procentuální podíl škod způsobených větrem (ZZ MZe)



Graf č. 4: Procentuální podíl škod způsobených větrem (ZOL)

6.2. Vyhodnocení evidence

Dostupné zdroje s přehledem objemu nahodilých těžeb vlivem abiotických činitelů (Shapiro Wilk test normality: $W=0,77$, $p<0,05$; Wilcoxonův párový test: $z= 3,06$, $p<0,01$), kůrovců (Shapiro Wilk test normality: $W=0,94$, $p>0,05$; t-test: $t= 5,52$, $p<0,0001$), případně škod přímo v důsledku působení větru (Shapiro Wilk test normality: $W=0,66$, $p<0,001$; Wilcoxonův párový test: $z= 3,18$, $p<0,05$; graf č. 5) se značně liší. Ve všech případech jsou údaje Ministerstva zemědělství vyšší než objemy dříví evidované Lesní ochrannou službou ve Zpravodajích ochrany lesa.



Graf č. 5: Srovnání objemu nahodilých těžeb dříví poškozeného větrem (mil. m³) evidovaného v rámci Zpravodajů ochrany lesa (ZOL) a Zprávách o stavu lesa a lesního hospodářství (MZE) v letech 2000—2014. Boxplot tvoří medián ± 25%-75% kvartil, svorka zobrazuje minimální a maximální hodnotu.

6.3. Zjištěné hodnoty při prvotních experimentech

Při prvotních pokusech bylo destruováno celkem 5 jedinců smrku, u kterých se zaznamenala celková výška, výška nasazení koruny, výška umístění úvazku, výčetní tloušťka, dráha, zlom/vývrat a maximální zatížení vyvinuté během namáhání (tab. č. 4)

Ke zlomení kmene došlo ve třech případech - dvakrát ve výšce kolem 4,5 m a jednou byl zlom ve výšce 1 m. Zlom vzniklý v metrové výšce byl způsoben přítomnou hnilobou. Ve dvou případech došlo k vyvrácení celého stromu.

Tabulka č. 4: Zjištěné hodnoty při pilotních experimentech

Kostelec n. Č. L.								
Označení stromu	Výška [m]	Výčetní tloušťka [cm]	Štíhlostní koeficient [cm/m]	Nasazení koruny [m]	Úvazek [m]	Vývrat [V] / Zlom [Z]	Zlom v [m]	Max. síla [kg]
TS 1	30,4	38	1,25	14	19	Z	4,4	680
TS 2	30,2	36,5	1,21	7	15	Z	4,9	414
TS 3	32,8	42	1,28	13,4	18,4	V	—	1060
TS 4	28,4	39	1,37	16	18	Z	1	750
TS 5	29,2	29	0,99	16,8	19,8	V	—	320

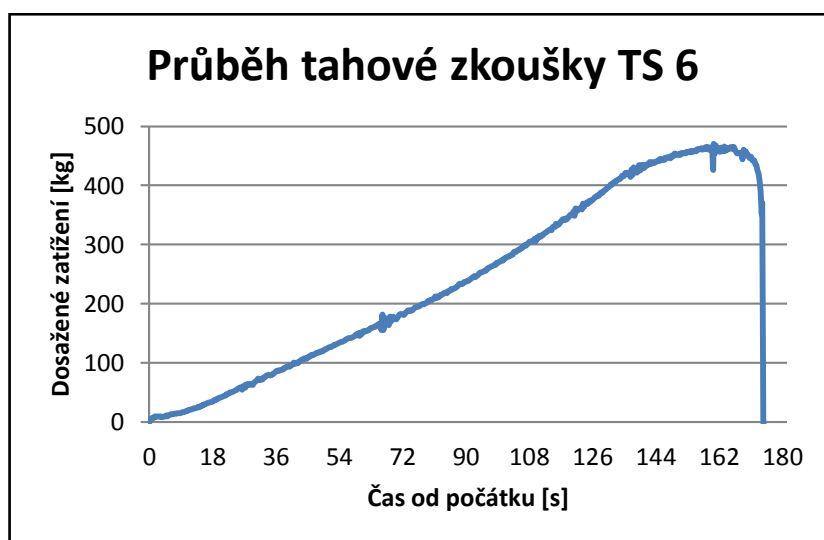
6.4. Pokusy v Bělčicích

Při testování v porostech u organizace Kaiser, s.r.o. bylo namáháno 5 smrků, u kterých byly zaznamenány stejné parametry (tab. č. 5). Ke zlomu došlo v jednom případě, kdy zlom nastal přibližně ve výšce 4 m. V ostatních případech došlo k vývratům.

Tabulka č. 5: Zjištěné hodnoty při testování

Bělčice								
Označení stromu	Výška [m]	Výčetní tloušťka [cm]	Štíhlostní koeficient [cm/m]	Nasazení koruny [m]	Úvazek [m]	Vývrat [V] / Zlom [Z]	Zlom v [m]	Max. síla [kg]
TS 6	27	31	1,15	16	18	Z	4,2	470
TS 7	27,2	27	0,99	15,7	19	V	—	446
TS 8	30,2	41,5	1,37	16,9	18	V	—	871
TS 9	27,7	35	1,26	15,9	19	V	—	545
TS 10	29,5	32	1,08	11,3	19	V	—	575

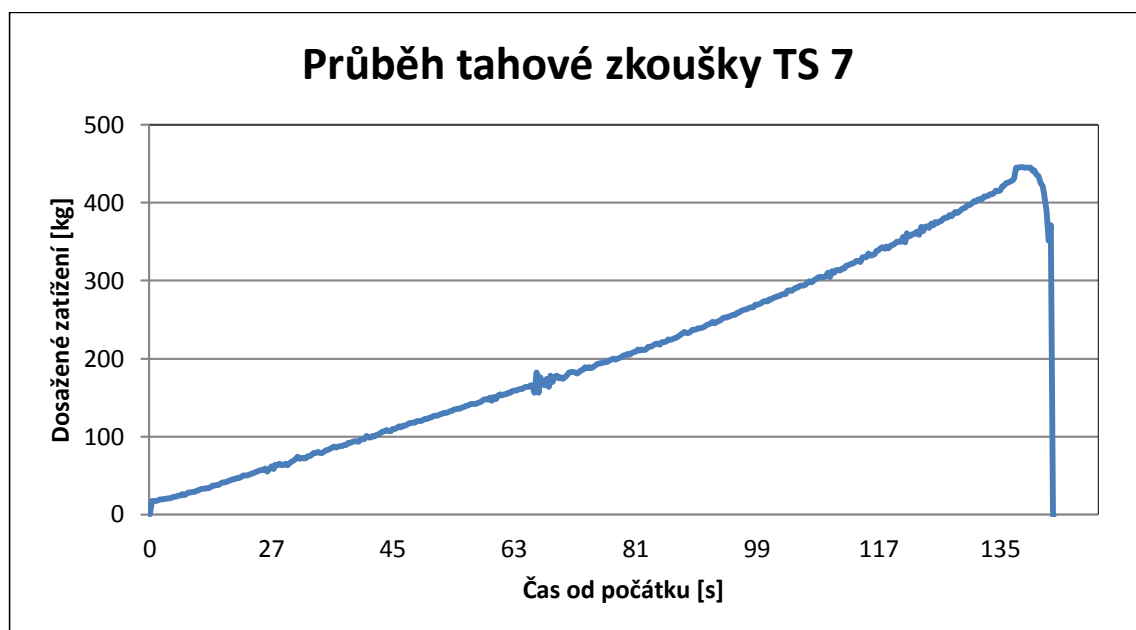
Zaznamenané hodnoty z datalogeru získané při testování byly přeneseny do programu Excel, ve kterém byly sestaveny grafy průběhu namáhání. Při prvním namáhaném stromu na této lokalitě došlo ke zlomu po cca 160 s od začátku záznamu při kritickém zatížení 470 kg (graf č. 6). Důsledek působení síly je zachycen vedle grafu (obr. 11).



Graf č. 6: Průběh tahové zkoušky u testovaného stromu TS 6

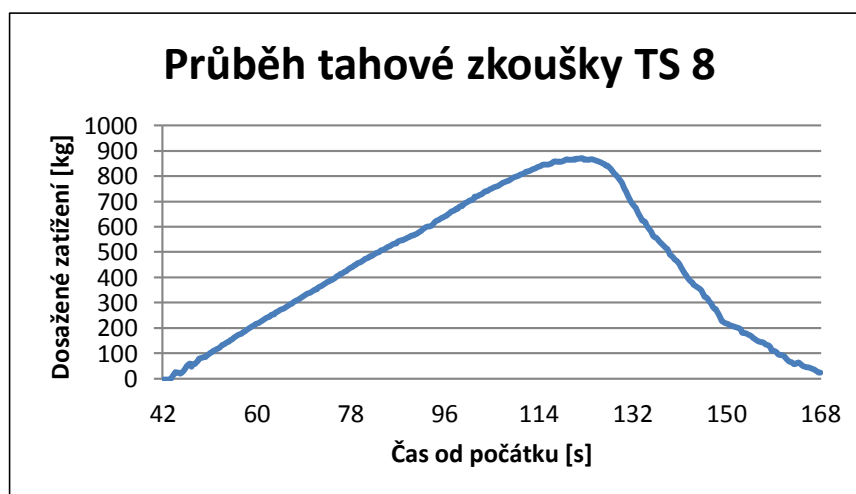
Obrázek 11: Vychýlení stromu při působení max. síly

Při testování druhého stromu došlo k vývratu po cca 140 s, kdy bylo dosaženo kritického zatížení 446 kg (graf č. 7).



Graf č. 7: Průběh tahové zkoušky u testovaného stromu TS 7

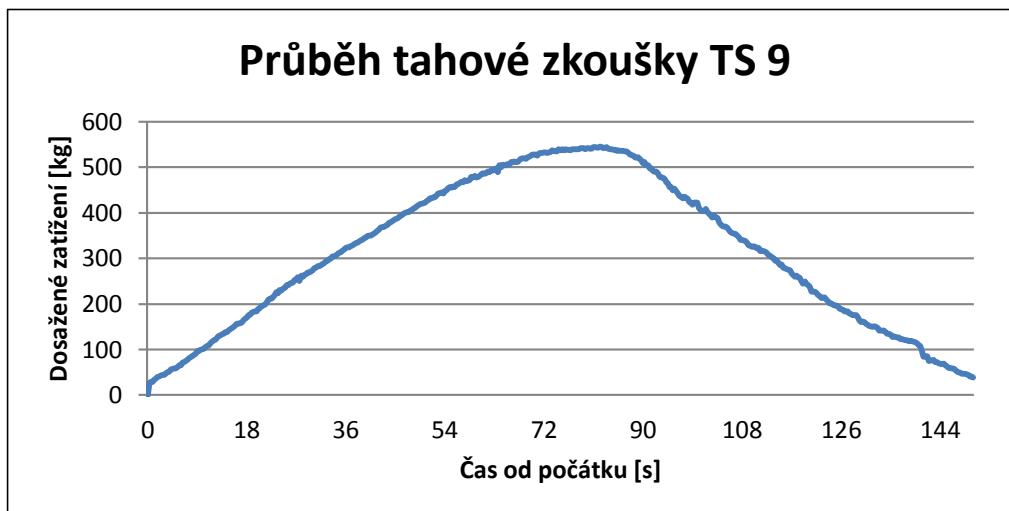
Průběh záznamu u testovacího stromu TS 8 je zobrazen na následujícím grafu (graf č. 8). Při namáhání bylo dosaženo kritického zatížení 871 kg po cca 75 s. Způsobené vychýlení stromu (obr. 12) je zachyceno vedle přiloženého grafu.



Graf č. 8: Průběh tahové zkoušky u testovaného stromu TS 8

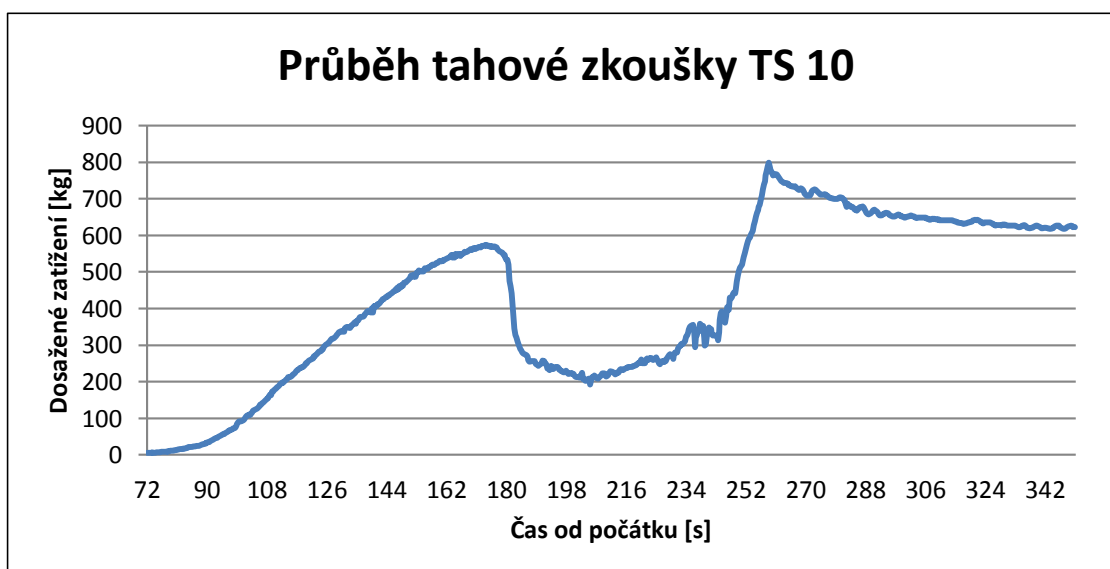
Obrázek 12: Vychýlení stromu při působení síly; Autor: Martin Gregor

Při namáhání čtvrtého stromu na stanovišti bylo dosaženo kritického zatížení 545 kg po cca 82 s záznamu (graf č. 9).



Graf č. 9: Průběh tahové zkoušky u testovaného stromu TS 9

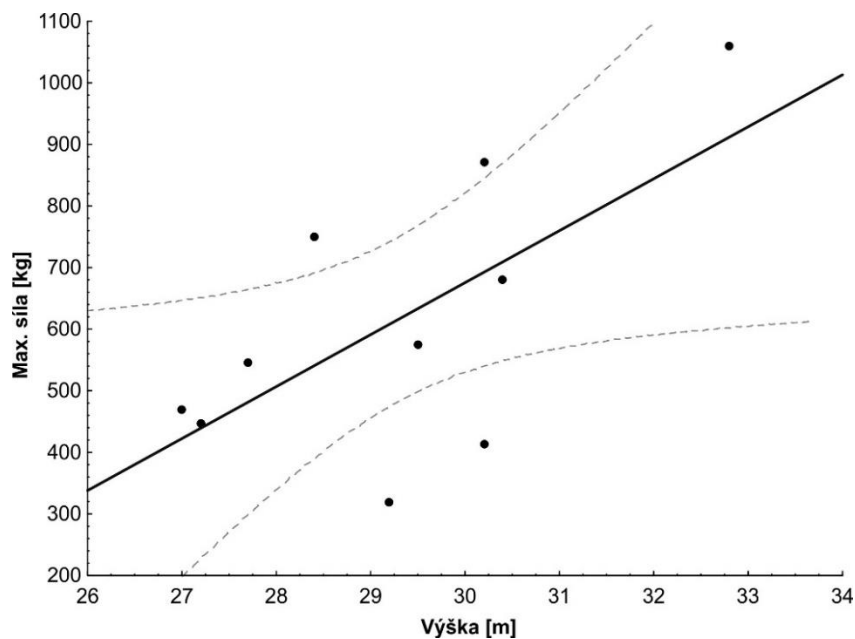
Při destruování posledního stromu na stanovišti došlo k vývratu po cca 96 s při kritické zátěži 575 kg (graf č. 10). Při namáhání se strom vychýlil mimo předpokládanou osu pádu a lano se zachytilo v koruně vedle stojícího stromu. Při pokračujícím navíjení lana navijáku tak byl destruovaný strom zvedán do doby, než bylo navíjení zastaveno (na záznamu možné vidět jako druhé stoupající zatížení). Vzhledem k pozici destruovaného stromu bylo lano povolováno, následně došlo k vývratu stromu, na němž bylo zachyceno lano v koruně.



Graf č. 10: Průběh tahové zkoušky u testovaného stromu TS10.

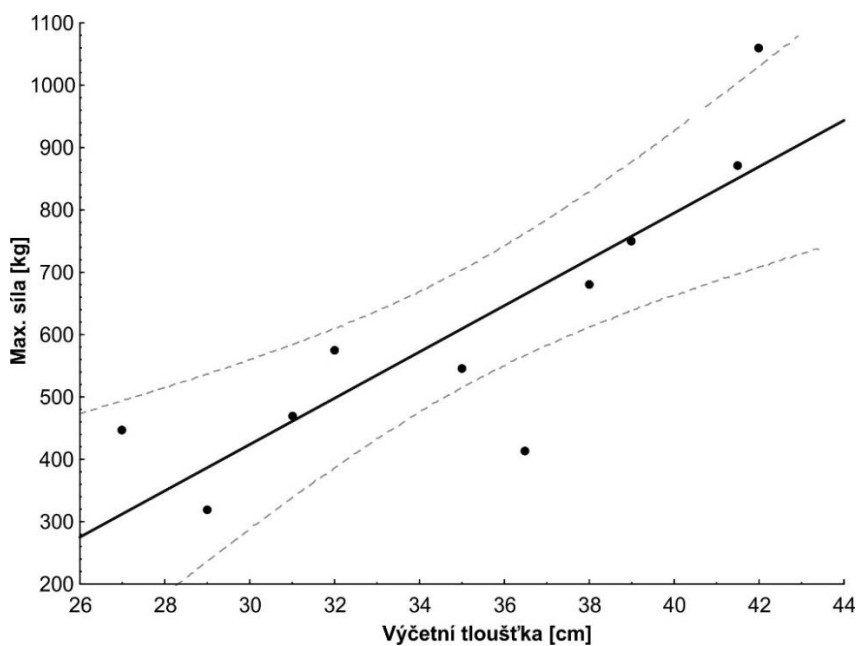
6.5. Vyhodnocení porovnávaných parametrů

Nejdříve byla zjišťována závislost max. síly na výšce. Z přiloženého grafu (graf č. 11) je patrná lineární závislost mezi výškou stromu a aplikovanou silou.



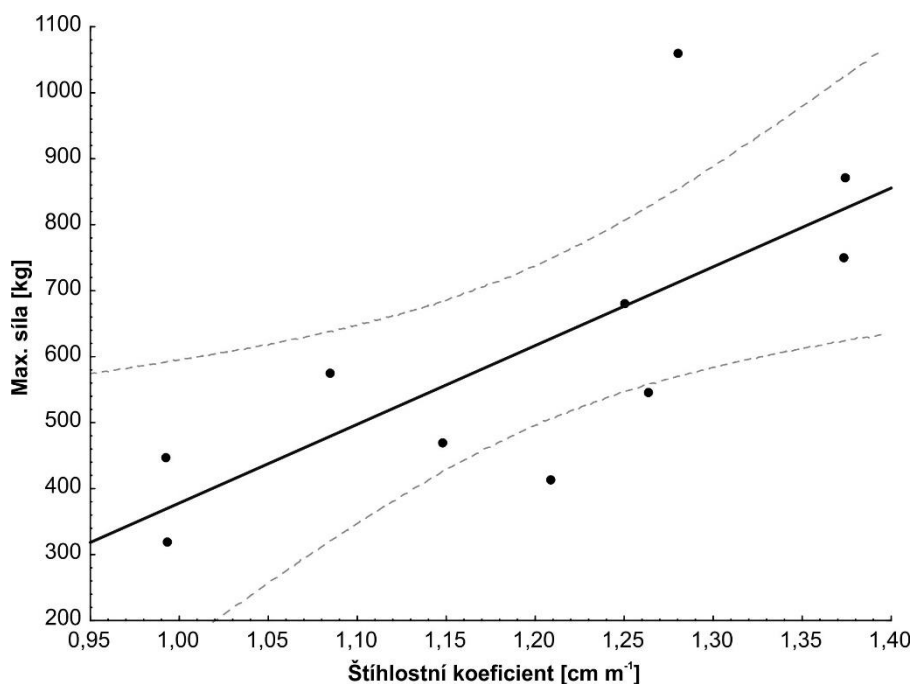
Graf č. 11: Závislost max. síly na výšce

Dále byla zjišťována závislost maximální síly na výčetní tloušťce (graf č. 12). V tomto případě byla zjištěna lineární závislost mezi tloušťkou a maximální aplikovanou silou.



Graf č. 12: Závislost max. síly na výčetní tloušťce

V posledním případě byla zjišťována maximální síla na štíhlostním koeficientu (graf č. 13). S rostoucím štíhlostním koeficientem dosahovala působící maximální síla vyšších hodnot.



Graf č. 13: Závislost max. síly na štíhlostním koeficientu

Ve všech případech bylo zjištěno, že stromy, dosahující větších dimenzí, jsou schopny odolávat větší působící mechanické síle. Ze zjišťovaných veličin dopadla regrese nejlépe na základě výčetní tloušťky (tab. č. 6), kde je vysvětleno regresi 71 % případů.

Tabulka č. 6: Výsledky statistického vyhodnocení

Proměnná	Rovnice regrese	r^2	p
Výška stromu	$y = -1855,8319 + 84,3791 \cdot x$	0,43	0,04
Výčetní tloušťka	$y = -690,0127 + 37,1257 \cdot x$	0,71	0,01
Štíhlostní koeficient	$y = -815,5234 + 1193,6291 \cdot x$	0,53	0,02

7. Diskuze

V rámci testované metody bylo pro prvotní pokusy použito ocelové lano, stejně tak, jako v případech tahových zkoušek v Británii (*Nicoll et al., 2006*), Švýcarsku (*Lundström et al., 2007*) a Finsku (*Peltola et al., 2000*). Toto lano bylo z bezpečnostních důvodů vyměněno za textilní. Ve srovnání s ocelovým lanem má dále nižší váhu – asi 1/10 hmotnosti ocelového lana o stejné délce a průměru. Mezi další výhody patří velká pevnost, odolnost proti vlhku, olejům, mazacím tukům a proti UV záření.

Během tahových zkoušek byla pro interpretaci využita nivelační lať, jejíž instalace je jednodušší oproti inklinometrům (*Nicoll et al., 2006*). Problémem nivelační latě je její stabilita při maximálním vysunutí, pokud začne vát vítr. Pro záznam zatížení byl využit dataloger, který umožnil zaznamenat působící sílu v intervalu 0,3 s. Ve srovnání s datalogerem využitým ve Švýcarsku, který zaznamenával sílu v intervalu 1 s (*Lundström et al., 2007*), je získaný záznam podrobnější.

Nejbližší stromy mohou ovlivňovat svým kořenovým systémem odolnost konkrétního jedince tím, že při vývoji kořenového systému může docházet k propletení kořenů s nejbližším stromem.

Okolní stromy ve směru tahu mohou ovlivňovat průběh tahové zkoušky svými korunami, kdy dochází k propletení větví v korunách stromů a ke zkreslení výsledků zatížení. Tato skutečnost byla řešena u tahových zkoušek ve Velké Británii odstraňováním těchto stromů (*Nicoll et al., 2006*). Stejně tak může dojít k ovlivnění tahové zkoušky okolními stromy v případě, že se destruovaný strom vychýlí mimo předpokládaný směr tahu.

Umístění úvazku v koruně stromů záviselo na určení těžiště koruny, které se většinou pohybovalo ve výšce kolem 18—19 m. Při tahových zkouškách ve Finsku byla určena konstantní výška 6 m s ohledem na bezpečnost (*Peltola et al., 2000*), ačkoli autorka poukazuje na to, že by úvazky měly být umístěny ve výšce cca 80 % výšky stromu pro lepší posouzení účinků působení větru. V rámci testování ve Velké Británii byla zvolena výška umístění úvazku v 1/3 výšky stromu s ohledem na získávané informace o kořenovém systému (*Nicoll et al., 2006*). Obdobné umístění úvazku bylo v případě tahových zkoušek na území Švýcarska, kdy byl úvazek umístěn do poloviny namáhaného stromu a destrukční zkoušky byl zkoumán vývoj kořenového systému s ohledem na směr působení vlivem větru (*Lundström et al., 2007*).

Během tahových zkoušek ve Finsku bylo prokázáno, že lesní porost a základní charakteristiky, mezi které patří druh dřeviny, porostní hustota a typ půdy, určují kritickou rychlost větru, tedy rychlost, při které dojde k poškození (k vývratu nebo zlomení kmene), zatímco místní charakter klimatu a topografie určí, s jakou pravděpodobností k takové události může dojít (*Peltola et al., 2000*).

Odolnost stromu souvisí se stromovými charakteristikami, jako jsou velikost koruny, výška stromu, síla kmene a velikost kořenového balu. Tyto charakteristiky jsou ovlivňovány zakmeněním a pěstebními opatřeními. Odolnost kmene dospělých jedinců spíše souvisí na prováděných výchovných zásazích v historii stromu, než na dosažených dimenzích. Stejně tak stromy na porostních okrajích mají zvýšenou odolnost ve srovnání se stromy uvnitř porostu (*Cremer et al., 1982*).

Při analyzování vlastností a vývoje kořenového systému byly v případě tahových zkoušek ve Velké Británii redukovány výsledky stromů, u kterých došlo ke zlomení (z důvodů chybějících údajů o kořenovém systému), a u kterých se vyskytla hniloba (*Nicoll et al., 2006*), která negativně ovlivňuje ukotvení stromů (*Lundström et al., 2007*). Dále byla v rámci těchto zkoušek prokázána závislost mezi pěstebním opatřením a hloubkou kořenového systému. (*Nicoll et al., 2006*)

Výsledky z tahových zkoušek mohou posloužit jako základ pro model působení větru na lesní porosty. Následně může být informací využito v rámci nástrojů na podporu rozhodování při plánování lesního hospodářství, kdy v rámci GIS softwaru jsou na základě růstového modelu a zjištěných informací o kritické rychlosti větru označeny lesní porosty odlišnými barvami v závislosti na předpokládaném riziku poškození větrem (*Zeng et al., 2007*).

8. Závěr

- Testované stromy byly schopny odolávat zatížení 320 až 1060 kg v závislosti na parametrech stromů a lokalitě.
- Odolnost stromů vůči zatížení koreluje zejména s výčetní tloušťkou.
- V průběhu testování došlo k výměně ocelového lana za textilní s ohledem na bezpečnost a na vlastnosti tohoto typu lana.

Zdroje

- BEDNÁŘ, J. Meteorologický slovník výkladový terminologický: s cizojazyčnými názvy hesel ve slovenštině, angličtině, němčině, francouzštině a ruštině. 1. vyd. Praha: Academia, 1993, 594 s.
- CREMER, K.W., BOROUGH, C.J., McKINNELL, F.H., CARTER, P.R. Effects of stocking and thinning on wind damage in plantations. *New Zealand Journal of Forestry Science* 12. 1982. str. 244—268
- DUPONT, S., IKONEN, V.P., VÄISÄNEN, H., PELTOLA, H. Predicting tree damage in fragmented landscapes using a wind risk model coupled with an airflow model. *Canadian Journal of Forest Research* 45. 2015. str. 1065—1076
- GARDINER, B., BYRNE, K., HALE, S., KAMIMURA, K., MITCHELL, S. J., PELTOLA, H., RUEL, J. C. A review of mechanistic modelling of wind damage risk to forests. *Forestry* 81. 2008. str.447—463
- HOSTÝNEK J., NOVÁK M., ŽÁK M. Kyrill a Emma v Česku - meteorologické příčiny, průběh bouří s hodnocením větrných extrémů. *Meteorologické zprávy*. 2008, ročník 61, číslo 3. str. 65—71.
- HOŠEK J. Vítr - jeho vznik a měření. *Geografické rozhledy*. 2009, ročník 18, číslo 2, str.2—3
- KUNCA, A., ZÚBRIK M. Vetrová kalamita z 19. novembra 2004. *Národné lesnícké centrum*, 2006, 40 s.
- KAMIMURA, K., SHIRAIISHI, N. A review of strategies for wind damage assessment in Japanese forests. *Journal of Forest Research* 12. 2007. str. 162—176
- KAPITOLA, P., KNÍŽEK M. Zpravodaj ochrany lesa: Výskyt lesních škodlivých činitelů v roce 2000 a jejich očekávaný stav v roce 2001. *Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti*. 2001. 77 s.
- KAPITOLA, P., KNÍŽEK M. Zpravodaj ochrany lesa: Výskyt lesních škodlivých činitelů v roce 2001 a jejich očekávaný stav v roce 2002. *Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti*. 2002. 69 s.
- KAPITOLA, P., KNÍŽEK M. Zpravodaj ochrany lesa: Výskyt lesních škodlivých činitelů v roce 2002 a jejich očekávaný stav v roce 2003. *Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti*. 2003. 64 s.
- KAPITOLA, P., KNÍŽEK, M., BAŇAŘ, P. Zpravodaj ochrany lesa: Výskyt lesních škodlivých činitelů v roce 2003 a jejich očekávaný stav v roce 2004. *Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti*. 2004. 81 s.

KAPITOLA, P., BAŇAŘ, P. Zpravodaj ochrany lesa: Výskyt lesních škodlivých činitelů v roce 2004 a jejich očekávaný stav v roce 2005. Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti. 2005. 74 s.

KAPITOLA, P. Zpravodaj ochrany lesa: Výskyt lesních škodlivých činitelů v roce 2005 a jejich očekávaný stav v roce 2006. Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti. 2006. 75 s.

KNÍŽEK, M. Zpravodaj ochrany lesa: Výskyt lesních škodlivých činitelů v roce 2006 a jejich očekávaný stav v roce 2007. Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti. 2007. 74 s.

KNÍŽEK, M., PEŠKOVÁ V. Zpravodaj ochrany lesa: Výskyt lesních škodlivých činitelů v roce 2007 a jejich očekávaný stav v roce 2008. Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti. 2008. 75 s.

KNÍŽEK, M. Zpravodaj ochrany lesa: Výskyt lesních škodlivých činitelů v roce 2008 a jejich očekávaný stav v roce 2009. Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti. 2009. 72 s.

KNÍŽEK, M. Zpravodaj ochrany lesa: Výskyt lesních škodlivých činitelů v roce 2009 a jejich očekávaný stav v roce 2010. Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti. 2010. 72 s.

KNÍŽEK, M. Zpravodaj ochrany lesa: Výskyt lesních škodlivých činitelů v roce 2010 a jejich očekávaný stav v roce 2011. Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti. 2011. 74 s.

KNÍŽEK, M., MODLINGER, R. Zpravodaj ochrany lesa: Výskyt lesních škodlivých činitelů v roce 2011 a jejich očekávaný stav v roce 2012. Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti. 2012. 79 s.

KNÍŽEK, M., MODLINGER, R. Zpravodaj ochrany lesa: Výskyt lesních škodlivých činitelů v roce 2012 a jejich očekávaný stav v roce 2013. Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti. 2013. 65 s.

KNÍŽEK, M., LIŠKA, J., MODLINGER, R. Zpravodaj ochrany lesa: Výskyt lesních škodlivých činitelů v roce 2014 a jejich očekávaný stav v roce 2015. Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti. 2015. 77 s.

LUBOJACKÝ, J. Škody způsobené větrem. Lesnické práce. 2013, ročník 92, číslo 12. Příloha - I.—IV.

LUNDSTRÖM, T., JONAS, T., STÖCKLI, V., AMMANN, W. Anchorage of mature conifers: resistive turning moment, root-soil plate geometry and root growth orientation. *Tree Physiology* 27. 2007. str. 1217—1227

MZE. Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství České republiky v roce 2000. Ministerstvo zemědělství, Praha. 2001, 121 s.

MZE. Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství České republiky v roce 2001. Ministerstvo zemědělství, Praha. 2002, 103 s.

MZE. Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství České republiky v roce 2002. Ministerstvo zemědělství, Praha. 2003, 115 s.

MZE. Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství České republiky v roce 2003. Ministerstvo zemědělství, Praha. 2004, 113 s.

MZE. Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství České republiky v roce 2004. Ministerstvo zemědělství, Praha. 2005, 107 s.

MZE. Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství České republiky v roce 2005. Ministerstvo zemědělství, Praha. 2006, 135 s.

MZE. Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství České republiky v roce 2006. Ministerstvo zemědělství, Praha. 2007, 126 s.

MZE. Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství České republiky v roce 2007. Ministerstvo zemědělství, Praha. 2008, 98 s.

MZE. Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství České republiky v roce 2008. Ministerstvo zemědělství, Praha. 2009, 128 s.

MZE. Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství České republiky v roce 2009. Ministerstvo zemědělství, Praha. 2010, 113 s.

MZE. Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství České republiky v roce 2010. Ministerstvo zemědělství, Praha. 2011, 128 s.

MZE. Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství České republiky v roce 2011. Ministerstvo zemědělství, Praha. 2012, 136 s.

MZE. Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství České republiky v roce 2012. Ministerstvo zemědělství, Praha. 2013, 132 s.

MZE. Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství České republiky v roce 2013. Ministerstvo zemědělství, Praha. 2014, 134 s.

MZE. Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství České republiky v roce 2014. Ministerstvo zemědělství, Praha. 2015, 108 s.

NICOLL, B. C., GARDINER, B. A., RAYNER, B., PEACE, A. J. Anchorage of coniferous trees in relation to species, soil type, and rooting depth. *Canadian Journal of Forest Research* 36. 2006. str. 1871—1883

PELTOLA, H., KELLOMÄKİ, S.; HASSINEN, A.; GRANANDER, M. Mechanical stability of Scots pine, Norway spruce and birch: an analysis of tree-pulling experiments in Finland. *Forest Ecology and Management* 135. 2000. str. 143—153.

PELTOLA, H., GARDINER, B., KELLOMÄKI, S., KOLSTRÖM, T., LÄSSIG, R., MOORE, J., QUINE, CH., RUEL, J. C. Wind and other abiotic risks to forests. *Forest Ecology and Management* 135. 2000. str. 1—2

PELTOLA, H. Mechanical stability of trees under static loads. *American Journal of Botany* 93. 2006. str. 1501—1511

SCHELHAAS, M. J., NABUURS, G. J., SCHUCK, A. Natural disturbances in the European forests in the 19th and 20th centuries. *Global Change Biology* 9. 2003. str. 1620—1633

SCHÜTZ, J. P., GÖTZ, M., SCHMID, W., MANDALLAZ, D. Vulnerability of spruce (*Picea abies*) and beech (*Fagus sylvatica*) forest stands to storms and consequences for silviculture. *European Journal of Forest Research* 125. 2006. str. 291—302

SOUKUPOVÁ, J. Atmosférické procesy. 6.vyd. ČZU, Praha, 2011, 204 s.

TOLASZ, R. Atlas podnebí Česka: Climate atlas of Czechia. 1. vyd., Český hydrometeorologický ústav, Praha. 2007, 255 s.

VENÄLÄINEN, A., ZENG, H., PELTOLA, H., TALKKARI, A., STRANDMAN, H., WANG, K., KELLOMÄKI, S. Simulations of the influence of forest management on wind climate on a regional scale. *Agricultural and Forest Meteorology* 123. 2004. str. 149—158

ZENG, H., TALKKARI, A., PELTOLA, H., KELLOMÄKI, S. A GIS-based decision support system for risk assessment of wind damage in forest management. *Environmental Modelling & Software* 22. 2007. str. 1240—1249

ZUBIZARRETA-GERENDIAIN, A., PELLIKKA, A., GARCIA-GONAZALO, J., IKONEN, V. P., PELTOLA, H. Factors affecting wind and snow damage of individual trees in a small management unit in Finland: assessment based on inventoried damage and mechanistic modelling. *Silva Fennica* 46. 2012. str.181—196

ANONYMOUS. Tornádo v Krnově [online]. 2013 [citováno 6.3.2016] Dostupné z WWW:< tornada-cz.cz>

ANONYMOUS. What is load cell? [online]. 2016 [citováno 13.4.2016]. Dostupné z WWW: < <http://www.loadstarsensors.com/what-is-a-load-cell.html>>

RUDA A. Fyzická geografie, multimediální elektronický výukový materiál, 1.vydání, Masarykova Univerzita, Brno [online], 2013 [citace 6.3.2016]. Dostupné z: <https://is.muni.cz/do/rect/el/estud/pedf/ps14/fyz_geogr/web/index.html>

SMOLKA, V. Všeobecná cirkulace atmosféry [online], 2013 [citováno 9.2.2016]. Dostupné z WWW: <<http://www.in-pocasi.cz/clanky/teorie/vseobecna-cirkulace-atmosfery/>>