

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra ochrany lesa a entomologie



Vliv parametrů stromů na mechanickou stabilitu smrku ztepilého

Diplomová práce

Autor: Bc. Josef Kaiser

Vedoucí práce: prof. Ing. Jaroslav Holuša, Ph.D.

2018

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Josef Kaiser

Lesní inženýrství

Název práce

Vliv parametrů stromů na mechanickou stabilitu smrku ztepilého

Název anglicky

Impact of tree characteristic on mechanic stability of Norway spruce

Cíle práce

Zjistit, které ze stromových charakteristik ovlivňují mechanickou odolnost smrku proti zlomení.

Metodika

Na pěti lokalitách v různých nadmořských výškách České republiky se pomocí tahových zkoušek zjistí mechanická odolnost smrků. To se provede pomocí speciální navijákové soupravy sestavené pro tyto účely. Lano se umístí do těžiště koruny a postupným navijáním se zaznamenává okamžité napětí. Výsledná síla při zlomení stromu se vztáhne ke stromovým parametrům, jako je tloušťka a výška stromů, výška nasazení koruny, délka koruny, štíhlostní koeficient a biomasa větví.

Provedou se mnohorozměrné regresní analýzy stromových parametrů a síly při zlomení smrků.

Doporučený rozsah práce

40 s.

Klíčová slova

smrk, mechanické namáhání, mnohorozměrné analýzy

Doporučené zdroje informací

- BRÜCHERT F., GARDINER B. 2000. Wind Exposure Effects on the Mechanical Properties of Sitka Spruce (*Picea sitchensis* (Bong.) Carr.). In: Spatz H. – Ch., Speck T. (eds), Plant Biomechanics 2000, Georg Thieme Verlag Stuttgart, pp 403–412
- MATTHECK C. 1991. Trees – the mechanical design. Springer-Verlag, New York.
- PELTOLA H., KELLOMÄKI S., HASSINEN A., GRANANDER M. 2000. Mechanical stability of Scots pine, Norway spruce and birch: an analysis of PELTOLA H., KELLOMÄKI S., HASSINEN A., GRANANDER M. 2000. Mechanical stability of Scots pine, Norway spruce and tree-pulling experiments in Finland. Forest Ecology and Management 135: 143-153.
- PRAUS L., HORACEK P. 2005. Assessment of tree stability – The mechanical behaviour of a tree. Wood research 50: 9-18
- VICENA I., PAŘEZ J., KONŮPKA J. 1979. Ochrana lesa proti polomům. Ministerstvo lesního a vodního hospodářství ČSR, Praha.

Předběžný termín obhajoby

2017/18 LS – FLD

Vedoucí práce

prof. Ing. Jaroslav Holuša, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra ochrany lesa a entomologie

Elektronicky schváleno dne 5. 10. 2017

prof. Ing. Jaroslav Holuša, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 5. 2. 2018

prof. Ing. Marek Turčáni, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 15. 02. 2018

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Vliv parametrů stromů na mechanickou stabilitu smrku ztepilého“ vypracoval samostatně pod vedením prof. Ing. Jaroslav Holuša, Ph.D. a použil jen prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů. Jsem si vědom, že zveřejněním bakalářské 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 20. 4. 2018

Bc. Josef Kaiser

Rád bych touto cestou poděkoval všem, kteří se podíleli jakýmkoliv způsobem na zpracování této bakalářské práce. Především bych chtěl poděkovat mému vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Jaroslav Holuša, Ph.D. za jeho ochotu a spolupráci při tvorbě diplomové práce. Nesmím opomenout poděkovat svým rodičům a prarodičům, kteří mě během studia podporovali.

Diplomová práce byla zpracována v rámci řešení výzkumného projektu NAZV QJ1520006 „Hodnocení rizika poškození lesních porostů větrem: vývoj a kalibrace národního prediktivního modelu“.

Abstrakt

Tato diplomová práce je navázaná na řešení výzkumného projektu NAZV QJ1520006 „Hodnocení rizika poškození lesních porostů větrem: vývoj a kalibrace národního prediktivního modelu“. V rámci měření bylo vybráno deset lokalit v rámci České republiky. Získávání dat probíhalo v období let 2016-2017. Pro následné statistické vyhodnocení, bylo zapotřebí získat údaje o jednotlivých stromech. Těmi jsou výška a šířka koruny, celková délka stromu, průměr $d_{1,3}$. Dále bylo zapotřebí udělat vlastní měření tahové síly za pomoci lanového systému s přenosným motorovým navijákem (Stromotr). Měření napětí bylo zaznamenáno dataloggerem, na který zaznamenal působení síly destruktivních tahových zkoušek odolnosti smrku ztepilého (*Picea abies*), kdy došlo ke zlomení nebo vyvrácení. Kritická hodnota, byla ovlivněná vzrůstem jednotlivých stromů, ale ze všech testovaných veličin vykazuje nejvyšší hodnotu spolehlivosti štíhlostní koeficient, kdy při zvyšování štíhlostního koeficientu (cm/m) klesá i síla, která byla nezbytná pro vyvrácení či zlomení kmene.

Klíčová slova: stromotr, mnohorozměrné analýzy, kritická hodnota, model, *Picea abies*

Abstract

This diploma thesis is connected with the research project NAZV QJ1520006 "Evaluation of the risk of damage of forest vegetation by wind: development and calibration of the national predictive model". Ten locations within the Czech Republic were selected within the framework of the measurement. Data acquisition took place between 2016 and 2017. For the subsequent statistical evaluation, it was necessary to obtain data on individual trees. These are the height and width of the crown, the total length of the tree, the diameter $d_{1,3}$. In addition, it was necessary to make a custom tensile force measurement using a rope system with a portable motor winch (Stromotr). Measurement of the stress was recorded by a datalogger, which recorded the force of the destructive tensile tests of the resistance of Norway spruce (*Picea abies*), when it broke or reversed. Critical value was influenced by the growth of individual trees, but from all tested variables the highest value of reliability is the slenderness coefficient where the force necessary for truncation or breakage of the strain decreases with the increase in the slender coefficient (cm / m).

Key words: stromotr, multidimensional analysis, critical value, model, *Picea abies*

Obsah

1.	Úvod	9
2.	Cíle	11
3.	Rozbor problematiky	12
3.1	Škody větrem v Evropě	12
3.2.1	Empirické modely	17
3.2.1.1	Empirické modely orientované na analýzu rizik	17
3.2.1.2	Empirické modely orientované na výstupy	18
3.2.2	Mechanické modely	19
3.2.2.1	Modelování pravděpodobnosti výskytu bořivých větrů	20
3.3	Interakce mezi dalšími disturbačními činiteli	21
4.	Metodika	22
4.1	Výběr lokalit	22
4.2	Získávání dat v terénu	23
5.	Výsledky	26
6.	Diskuze	30
7.	Závěr	33
8.	Použitá literatura a materiály	34

1. Úvod

S disturbancemi lesů způsobenými abiotickými živelními faktory se lesníci setkávají od počátku cílevědomé hospodářské úpravy lesů. Při zakládání porostů umělou obnovou s jednou převažující dřevinou (Spiecker 2000) se nejčastěji setkáváme se škody způsobené větrem, sněhem a námrazou, které jsou častým fenoménem v lesním hospodářství při odpovídajících klimatických podmínkách – v České republice zejména v pohraničních horách, Karpatech, ale také v Brdech nebo na Českomoravské vrchovině (Tolasz et al. 2007). Lesní kalamity a polomy způsobené abiotickými činiteli se běžně vyskytují nejen ve všech středoevropských zemích ale také na Britských ostrovech, v Austrálii, na Novém Zélandě, nebo v Japonsku (Slodičák 1996). Každým rokem je v Evropských lesích vytěženo cca 35 mil. m³ dříví jako důsledek přirozených disturbancí, způsobených především větrem (Schelhaas et al. 2003). Mezi nejvýznamnější příčiny nahodilých těžeb patří v České republice škody způsobené sněhem, námrazou a především větrnými bouřemi (Rychtecká & Urbaňcová 2008).

Různými metodami hodnotíme pravděpodobnost a intenzitu škod způsobené abiotickými faktory (vítr a sníh). Postupy podle použití rozdělujeme do tří kategorií: empirické, statistické a mechanické (Kamimura & Shirashi 2007). Empirické metody zakládáme především na terénních pracích a (nebo) historických záznamech, ze kterých jsou vymezeny rizikové oblasti. Postupy, které nám předkládají snadno srozumitelné výsledky, nedokáží detailně statisticky zachytit způsobené škody (Gardiner & Quine 2000). Historické záznamy neobsahují dostatečné ani podrobné a úplné informace (Holuša et al. 2010), terénní šetření má zase omezený prostorový a hlavně časový rozsah a naráží na velkou časovou proměnlivost obrazu poškození (Křístek et al. 2012).

Statistické metody vyhodnocují a předpovídají škody z dlouhého časového období za pomoci regresních analýz a modelů v úrovni i jednotlivých porostů (Jalkanen & Mattila 2000, Kamimura & Shirashi 2007). Při použití statistických modelů je omezena dostupnost a věrohodnost použitých dat (Kamimura & Shirashi 2007).

Mechanické modely nám poukazují na strom jako na jednostranně vetknutý nosník resp. na porost jako soustavu jednostranně vetknutých nosníků a hodnotí odolnost této soustavy vůči namáhání větrem a sněhovou zátěží fyzikálními metodami technické mechaniky. Za pomoci modelů kritických rychlostí větru nebo kombinace výšky sněhu se s touto rychlostí odhadne pravděpodobnostní výskyt škod v lesních porostech. Také spolu s klimatickými modely zachycující předpokládané rychlosti větru a výšky sněhové pokrývky v daném území. Výhoda těchto modelů je přizpůsobivá pro různé klimatické

podmínky a charakteristiky porostů, včetně zhodnocení vlivu lesního hospodářství na stabilitu lesního ekosystému (Gardiner et al. 2000).

Pro tvorbu dobrých modelů je nezbytné znát odolnost dřevin. I přesto, že existují data o smrku ztepilém, nepocházejí z území střední Evropy a studovaní jedinci nedosahují dimenzí střeoevropských jedinců smrku (Křístek a Holuša 2014).

2.Cíle

Cílem této práce je zjistit, které ze stromových charakteristik smrku ztepilého ovlivňují mechanickou odolnost smrku proti zlomení.

3. Rozbor problematiky

3.1 Škody větrem v Evropě

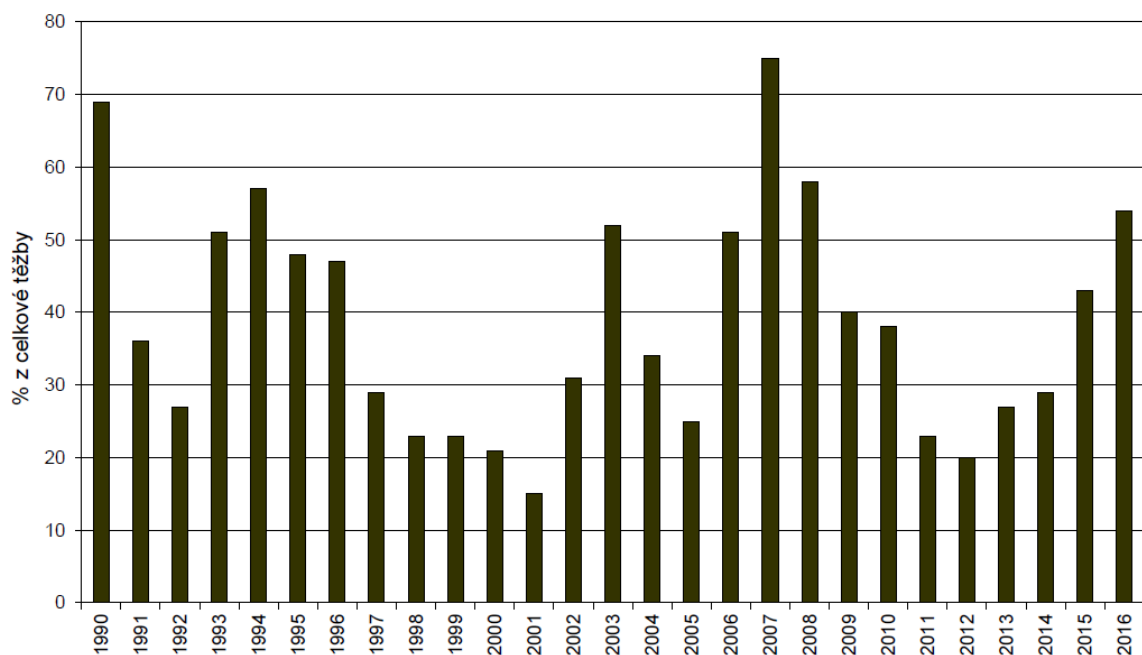
Vítr patří mezi nejvážnější škodlivé činitele v Evropě (Rottman 1986). V období 1950-2000 bylo poškozeno v Evropě ročně 18,7 milionů m³ dříví (Schelhaas et al. 2003). V posledních třech desetiletí byly zaznamenány největší větrné události ve Střední Evropě, které poškodily více než 100 milionů m³ (Vivien/Wiebke v 1990). Od roku 2005 byla Evropa postižena několika velkými větrnými bouřemi, např. v severní oblasti Německa poškodila lesy větrná smršť „Kyrill“ v roce 2007, další smršť „Paula“ postihla Rakousko v roce 2008 a následující rok 2009 působil „Klaus“ ve Francii.

Podle výsledných modelových studií vyhotovených ve Švédsku (Blennow a Olofsson 2008), které se zabývají poškození smrštěmi v rámci změny „větrného klimatu“, neukazují současné trendy a predikce jednoznačný sklon k zesilování větrných bouří do budoucnosti, které by způsobovaly narůstající poškození lesních porostů. Na druhé straně existují i data o zvyšujícím se počtu větrných bouří v Evropě s vysokými rychlostmi větru (např. Albrecht et al. 2009). Výsledky těchto studií předpovídají větší riziko poškození u porostů a také pozměněné klimatické podmínky, při kterých častěji dochází v průběhu zimy k výkyvům počasí s četnými srážky, vlhkou půdou a nedostatkem zimních mrazů (Majunke et al. 2008).

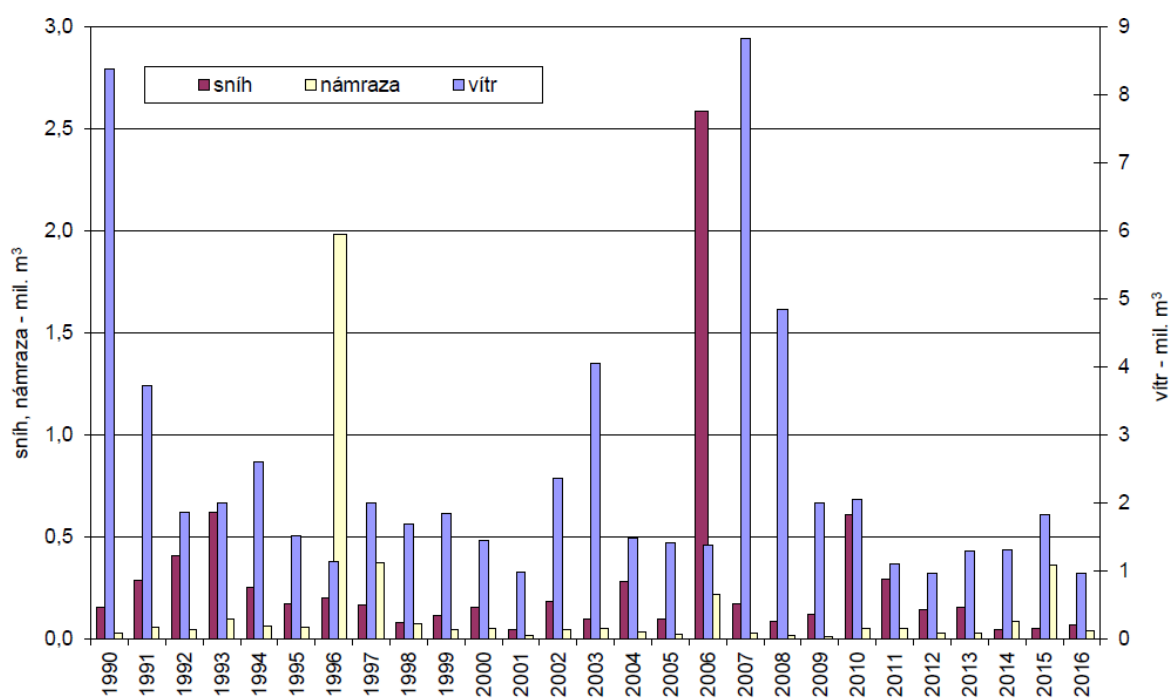
Studiem poškození porostů bouřemi v Černém lese v Německu, byla zjištěna periodičita 10-11 let, kterou uvádí Hanewinkel et al. (2008). Zatímco Schütz et al. (2006) odhaduje, že výskyt mohutných bouří např. jako „Lothar“ může být mnohem sporadičtější.

Obr. 1 znázorňuje vývoj nahodilých těžeb na území České republiky s největším poškozením v roce 1990 od větrné bouře Vivien, v roce 2007 Kyril. Následné nahodilé těžby vznikaly od menších větrných bouří a od kůrovce v nezpracované hmotě.

Evidence poškození abiotickými činiteli od roku 1990, kdy byla zasažena Česká republika větrnou bouří Vivien a následné roky byly rozvolněné porosty poškozovány i menšími bouřemi. V roce 1996 na vzniklých zalesněných kulturách a rozvolněných mlazinách, vznikaly škody způsobené námrazou. Následné roky byly poškozovány v malém množství větrem do roku 2006, kdy byly škody na porostech způsobené mokřím sněhem v důsledku nesouvislé zimy s častými oblevy a přívaly mokrého sněhu. Takto poškozené porosty následující rok 2007 smetla bouře Kyril s návazností na další roky sužované větrem ohrožené rozvolněné porosty (Obr. 2).



Obr. 1: Vývoj nahodilých těžeb na území České republiky (vulhm.cz)



Obr. 2: Evidované poškození větrem, sněhem a námrazou od roku 1990 na území České republiky (vulhm.cz)

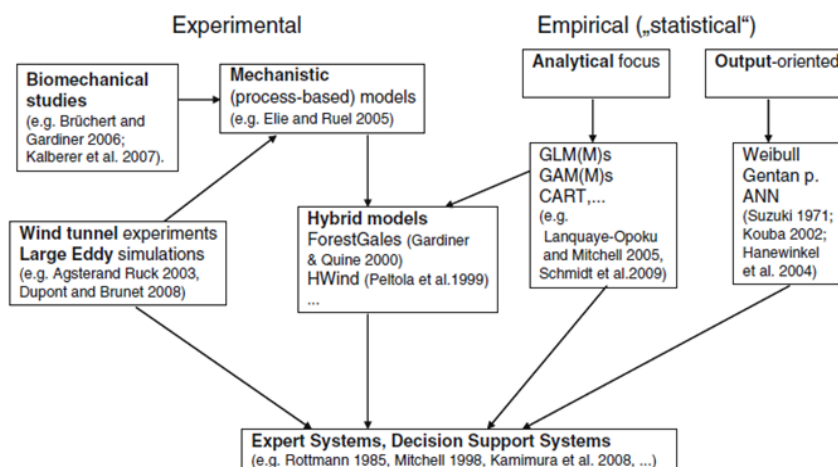
3.2. Metody pro posuzování a modelování rizik poškození větrem

Citlivost lesních ekosystémů na větrná poškození je definována samotnými stromy nebo charakteristikou porostu jako například dřevinná skladba, výška stromu/porostu, štíhlostní koeficient, koruna a kořenová charakteristika ale také hustota porostu. Větrná poškození ovlivňuje i charakteristika stanoviště jako typ půdy (např. pokud je ovlivněné vodou). Na těchto základech kvalitativního posuzování byly dříve hojně využívány tzv. empirické modely (např. Tang et al. 1997, Mitchell 1998). Tzv. penalty point-based predisposition rating systems byl použit pro kombinaci porostních a místních geografických faktorů v expertních systémech (Führer and Nopp, 2001). Neparametrické kvantitativní modely jako klasifikace nebo tzv. gradient boosting byly rovněž nedávno využity v modelech citlivosti na větrné polomy (např. Dobbertin 2002, Lindemann a Baker 2002, Kupfer et al. 2008). Mezi nejčastější přístup k hodnocení citlivosti lesních ekosystémů patří definice vztahů na základě porostních a stanovištních charakteristik jako logická regrese za použití stanovištních proměnných (např. Kramer et al. 2001), stanovištních a porostních proměnných (např. Lohmander a Helles 1987, Jalkanen a Mattila 2000, Mitchell et al. 2001), proměnných jednotlivých stromů (např. Peterson 2004, Rich et al. 2007) nebo kombinace těchto proměnných (např. Valinger a Fridman 1999, Fonseca 2004; ModisPinaster, Mayer et al. 2005). Prostorové vztahy v rámci porostu (horizontální a vertikální struktura porostu) byly rovněž zahrnuty jako vysvětlující proměnné v některých studiích (např. Scott a Michtell 2005, Schindler et al. 2009). Zatímco u většiny provedených studií dosahovaly uspokojivé vypovídající hodnoty, značná chybovost a náhodnost byla také dokumentována (Schülz et al. 2006). S ohledem na specifičnost dat pro modelování disturbancí, se rovněž začalo využívat neuronových sítí a jiných pokročilých metod tzv. umělé inteligence (Hanewinkel et al. 2004).

Zjištěné nedostatky empirických modelů jsou eliminovány tzv. mechanickými modely, které pracují s disturbancemi na základě fyzikálních vztahů mezi větrem a vlastnostmi stromu případně porostu (např. kritická rychlost větru pro polom nebo vývrát, Gardiner et al. 2008). Například model Forest-GALES, využívá typ půdy a hloubku kořenů jako vysvětlující proměnné v regresivním modelu, který determinuje odolnost proti vyvrácení (Gardiner a Quine 2000). Peltola et al. (1999a: HWIND) používá ve své práci objemovou hmotnost zeminy a výslednou váhu kořenového koláče k modelování síly protipůsobící při vyvrácení stromu. V současnosti jsou tyto mechanistické přístupy široce využívány (např. Achim et al. 2005: GALES, Nicoll et al. 2005: GALES). Avšak, tyto

modely jsou omezeny pouze na stejnorodé monokulturní porosty (Gardiner et al. 2000). V tomto směru učinily výrazný pokrok práce Ancelin et al. (2004: FOREOLE) a Schelhaas et al. (2007: ForGEM-W), které do kalkulací kritických rychlostí větru zahrnuli komplexnost lesní zapojené struktury porostu.

Obrázek č. 3 nám znázorňuje přehled hlavních metodologických přístupů k modelování rizik poškození větrem. V přehledu jsou zahrnuty mechanické modely, hybridní modely, které kombinují empirické a mechanistické modely a empirické modely.



Obr. 3: Přehled metodologických přístupů pro odhad nebezpečí poškození větrem (GL(M)Ms generalizované lineární (smíšené) modely, GA(M)Ms zobecněné aditivní (smíšené) modely, CART klasifikační a regresní stromy, ANN umělé neuronové sítě)

Seidl et al. (2010) v rámci své práce publikovali současné poznatky v rámci modelování přírodních disturbancí v lesních ekosystémech (Tab. 1). V práci se zaměřil na rozdělení modelů definujících jednotlivé složky disturbančního režimu, tedy citlivost a pravděpodobnost výskytu.

Table 1 Studies concerning storm damage and tested variables

Study Authors (year)	Tree and stand characteristics									Site characteristics	
	Species	Height (or age or diameter)	Crown properties	h/d-ratio	Density/structure	Stand edge	Thinning characteristics	Root properties	Root rot	Orographic exposure (exposition/slope)	Soil (water regime, soil texture)
Agster and Ruck (2003)					o	o					
Aldinger et al. (1996)	o	o			o		o	o			o
Cremer et al. (1982)			o	o	o		o				o
Cucchi et al. (2005)		o	o	o			o				o
Dobbertin (2002)	o	o			o		o			o	o
Dobbertin et al. (2002)	o	o			o		o			o	o
Dunham and Cameron (2000)		o	o	o							o
Dupont and Brunet (2008)					o	o					
Gardiner (1995)		o	o		o						
Gromke and Ruck (2008)			o		o						
Hanewinkel et al. (2008)	o	o			o		o			o	o
Hanewinkel (2005)	o	o			o					o	o
Hautala and Vanha-Majamaa (2006)					o	o					o
Hütte (1967)								o		o	o
König (1995)	o	o			o		o		o	o	o
Lanquaye-Opoku and Mitchell (2005)		o					o			o	o
Lohmander and Helles (1987)	o	o					o			o	o
Mayer (1988)										o	o
Mayer et al. (2005)	o	o								o	o
Moore et al. (2003)			o	o		o					
Morse et al. (2003)					o	o					
Müller (2002)	o	o	o	o	o		o		o		o
Nagel and Diaci (2006)	o	o									

Table 1 continued

Study Authors (year)	Tree and stand characteristics									Site characteristics	
	Species	Height (or age or diameter)	Crown properties	h/d-ratio	Density/structure	Stand edge	Thinning characteristics	Root properties	Root rot	Orographic exposure (exposition/slope)	Soil (water regime, soil texture)
Peltola et al. (1999)	o	o	o	o		o	o	o			o
Quine (1995)					o		o			o	o
Saidani (2004)	o	o		o	o		o			o	o
Schmid-Haas and Bachofen (1991)	o	o	o		o		o	o	o	o	o
Schmoeckel (2005)										o	o
Schütz et al. (2006)	o	o		o	o		o			o	
Scott and Mitchell (2005)		o	o	o	o	o				o	o
Valinger and Fridman (1997)		o		o							
Wangler (1974)	o	o							o	o	o
Zhu et al. (2006)	o	o			o					o	o

Tab. 1: Přehled studií zabývajících se škodami větrem a proměnnými (xxxxxx)

3.2.1 Empirické modely

Empirické nebo statistické modely můžeme dále rozdělit do dvou skupin. Lze je rozdělit na základě jejich zaměření, kdy jedna skupina analyzuje rizika a druhá skupina je zaměřená na výstupy. Modely první skupiny směřují k zjištění významných ukazatelů, které souvisí s typem a intenzitou poškození, které jsou modelovány. Významnými ukazateli pro tvorbu těchto modelů jsou výška, druh dřeviny, štíhlostní koeficient (poměr výšky a průměru kmene v 1,3m). Rovněž parametry stanoviště jsou používány pro tyto expertní systémy. Ideálně jsou tyto ukazatele, (často nazýváme nezávislými proměnnými, ačkoliv mnoho z nich nejsou opravdu závislé) vyjádřeny v podmínkách kritických hodnot, např. jestliže dominantní výška lesního porostu přesahuje kritickou úroveň, riziko poškození roste exponenciálně.

3.2.1.1 Empirické modely orientované na analýzu rizik

Modely první skupiny, často nazývané „statistické modely“ používají data historických událostí, velkokapacitní data nebo na region omezené data případových studií k předpovídání budoucích událostí nebo ke klasifikaci porostů podle jejich náchylnosti k rizikům. Nástrojem, který je standardním pro předpovídání rizik v lesích nebo lesních porostech je obvykle varianta regresivního modelu. Logistickým regresivní model je často využíván jako nejběžnější statistický přístup k řešení větrných poškození v lesích (Hinrichs 1994, König 1995, Fridman a Valinger 1998, Valinger a Fridman 1999, Jalkanen a Mattila 2000, Mitchell et al. 2001, Lanquaye-Opoku a Mitchell 2005, Schültz et al. 2006). Tato technika byla úspěšně aplikována především pro statistické analýzy hlavních faktorů ovlivňujících větrné poškození. Jak uvádí ve své práci Hanewinkel et al. (2004), který použil logickou regresi jako základní model k porovnání s výstupy neuronových sítí.

V rámci statistických modelů byl zaznamenán velký pokrok. Modely obsahující tzv. neparametrická „hladítka“ (smoothers) v regresivních modelech jako generalized additive models (GAM), které byly vyvinuty pro modelování možných rizik. Schmidt et al. (2009) použil GAM k modelování prostorových trendů v poškození způsobenými bouří „Lothar“. Použití GAM, podobně jako generalized linear mixed models (GLMMs) nebo generalized additive mixed models (GAMMs), odstraňuje nedostatek ve formě nezávislosti pozorování umožňující rozdělení odchylky do části „fixed effects“, která je definována prediktivními proměnnými, a náhodná část na druhé straně, která řeší hierarchickou strukturu dat (Singer 1998, Collett 2003, Browne et al. 2005, Littell et al. 2006, Meng et al. 2008)). Kvalifikační a regresivní stromy „classification and regression trees (CART)“ mohou být rovněž využity

k modelování a identifikaci významných faktorů (Therneau a Atkinson 2002, Například Dobbertin a Biging (1998) použily dvojitou klasifikaci pro predikování mortality borovice těžké (*Pinus ponderosa*) a jedle ojíněné (*Abies concolor*) a Kamimura et al. (2008) včlenil regresní stromy do rozhodovacího podpůrného systému k redukování poškození bouřemi v lesích kryptomerie japonské (*Cryptomeria japonica*) v Japonsku.

Možnost předpovídání poškození v lesních porostech se v jednotlivých modelech značně snižuje, pokud se počty nepoškozených a poškozených porostů významně liší od vzorku dat vybraných pro logické regresivní modely. Studie Fridman a Valinger (1998), například ukázala, že se souborem specifických dat použitých k předpovídání podílu poškozených ploch, byly hodnoty vysoce nadhodnoceny. Ačkoliv v modelech byly používány charakteristiky stromů, porostů a stanovištní proměnné, plochy poškozených porostů byly při modelování značně nadhodnoceny (22% lesů oproti pozorovaným 3%). Přenost modelů, které použil Schültz et al. (2006) byla také poměrně nízká. Jeden z důvodů pro relativní nepřesnost statistických modelů v předpovídání rizik může být složitost kombinovat analytickou schopnost modelů v hledání významných ukazatelů a schopnost modelů zevšeobecnit a dodat spolehlivé prognózy. Hlavní problém při využívání dat z kalamitních událostí je ověření dat s nezávislými datovými zdroji. Při velkých větrných kalamitách je mimořádně složité kvantifikovat a zhodnotit poškozené stromy před tím, než budou zpracovány. V takových případech je v lesnictví upřednostňováno co nejrychlejší zpracování kalamity a na zjišťování přesných dat není dáována taková priorita, zároveň je velká část porostů pro vědce nepřístupná.

3.2.1.2 Empirické modely orientované na výstupy

Další skupina empirických modelů se soustředí na výstupy. K odvození pravděpodobnosti používá tato skupina modelů buď statistické přístupy s úzkým výběrem ukazatelů (Suzuki 1971), nebo spoléhají na neparametrické přístupy jako umělé neuronové sítě (Hanewinkel et al. 2004, Hanewinkel 2005). Neuronové sítě byly také využity k modelování biomických posunů „biom shifts“ (Guisan a Zimmermann 2000). Klasický deterministický přístup v rámci této studie je odvození přechodových pravděpodobností na definované územní jednotce pro věkové třídy porostních typů. Tato teorie modelů byla vyvinuta hlavně Suzukim (1971) na základě teorie tzv. Markovových řetězů. Přístup pro tento druh modelů byl široce aplikován ve východním Německu k řešení pravděpodobností přežití pro věkové třídy lesů, ve kterých dominoval smrk ztepilý (Kurth et al. 1987) a vedl k modifikaci modelů normálního lesa do takzvaného „modelu cílového lesa“ (Kurth et al.

1987, Klocek a Oesten 1991). Pravděpodobnosti přežití i s ohledem na větrné disturbance jsou často modelovány s pomocí pravděpodobností rozdělení „probability distributions“. Praktické aplikace Weibullova rozdělení v analýzách rizika pro lesní porosty byly publikovány např. v pracích Kouba (2002) a Gadow (2000).

3.2.2 Mechanické modely

Nové poznatky o aerodynamických vlastnostech lesních porostů přinesly studie zabývající se simulací namáhání stromů ve větrných tunelech a simulace velkých větrných vírů, které společně přináší další poznatky o proudění vzduchu a turbulenci na okrajích porostů. Na základě těchto informací byly rekonstruovány vztahy mezi poryvy větru, koeficienty tlaku a modely porostů v malém měřítku (small-scale model forests) v experimentálních podmínkách (Fraser 1964, Chen et al. 1995, Gardiner et al. 1997, Agster and Ruck 2003, Brunet et al. 2003, Morse et al. 2003, Dupont and Brunet 2008, Gromke and Ruck 2008).

U dalších experimentů se pracuje s mechanistickými a mechanickými vlastnostmi pevností v ohybu, ohybovým momentem a „rozhoupáním“ stromů (např. Guitard a Castera 1995, Milne 1995, Brücher et al. 2000, Brüchert a Gardiner 2006, Kalberer et al. 2007), kterými se snaží popsat náchylnost stromů k poškození při smršti na základě vlastností dřeva nebo stromu. Všechny tyto základní experimentální přístupy slouží jako podklad pro vývoj mechanických modelů.

Princip mechanických modelů je někdy označován jako „process-based“. Modely kladou speciální důraz na poškození větrem, jak uvedl ve své práci Gardiner et al. (2008). Účelem mechanických modelů je analyzovat fyzikální procesy mezi zlomy kmene nebo vývratu stromu kvůli větru nebo sněhu. Zjištěné principy jsou následně použity pro definici proměnných jako kritická rychlost větru (CWS). U mechanických modelů jako jsou HWIND (Peltola et al. 1999), Forest-GALES (Gardiner a Quine 2000) nebo WINDA (Blennow a Sallnas 2004) jsou vyvinuty obecné nástroje pro posouzení rizik, tyto 2 modely byly rovněž testovány navzájem (Gardiner et al. 2000). Všechny mechanické modely jsou parametrizovány na základě experimentálních zkoušek odolnosti dřeva jako je tahová zkouška stromů (tree pulling), dynamické kývání (dynamic rocking) nebo experimenty prováděné ve větrném tunelu, které jsou primárně určeny k hodnocení rizik spojených s dřevinou a určitým typem obhospodařování. Hlavním cílem těchto modelů je vyhotovit

Wind Risk Management tools (WRH), který vyhotovuje výstupy modelů ve formě CWS nutné k vyvrácení nebo zlomení stromů a pravděpodobnost výskytu překročení CWS v rámci lesních porostů. Fyzikální procesy kmenových zlomů nebo vývrátů nelze u většiny modelů popsat, jelikož obsahují empirické aspekty, a proto jsou často nazývány hybridními empiricko/mechanickými modely. Kritický empirismus (pouze zkušenost) těchto modelů je obvykle odvození faktorů nárazů větrů (Gardiner et al. 2008). Dalšími pokusy pracující s mechanickými přístupy pro posouzení poškození bouřemi se zabývali Nicoll et al. (2005), Mason (2002), Cucchi et al. (2003), Ancelin et al. (2004), Cucchi et al. (2005), Achim et al. (2005), Elie a Ruel (2005).

Hodnocení rizik v jednotlivých modelech pracuje zpravidla na odlišné úrovni, od jednotlivého stromu, přes porosty po celé regiony (Talkkari et al. 2000). Mechanické modely obvykle pracují i s meteorologickými daty jako je rychlost větru nebo modelování proudění vzduchu (König 1995, Lekes a Dandul 2000) a tím upřesňují výstupy pro posuzování rizika.

3.2.2.1 Modelování pravděpodobnosti výskytu bořivých větrů

Pravděpodobnost výskytu kritických rychlostí větru potřebných pro poškození, a tedy výskyt poškození může být odhadována na základě modelů pravděpodobnosti (např. Weibullovo rozdělení) větrných rychlostí (pro každý směr) s použitím údajů časové řady nejbližší meteorostanice např. (Thürig et al. 2005: MASSIMO, Schelhaas 2008: ForGEM-W). Bengtsson a Nilsson (2007) použily pro předpovídání výskytu bořivých větrů statistickou teorii extrémních hodnot na základě předchozích historických bouřkových událostí (statistical extreme value theory). Alternativní empirický přístup ke kvantifikování výskytu bouří byl představen v práci Canham et al. (2001: SORTIE).

Mezi další metody modelování pravděpodobností výskytu bořivých větrů patří simulace větrného disturbančního režimu na základě orientace a polohy například: Detailed Aspect Method of Scoring (DAMS) ve ForestGALES (Quine a White 1994). Několik dřívějších analýz (např. Ruel et al. 1997, Suarez et al. 1999) potvrdilo, že v modelování větrných polomů jednoduché topografické indexy fungují stejně dobře jako lokální odhadování rychlosti větru na základě meteorologických dat. Mitchell et al. (2008) potvrdili užitečnost a použitelnost tzv. numerických dat pro předpověď počasí ve středním měřítku (mesoscale numerical weather prediction data) pro modelování výskytu větrných událostí.

Modely využívající místního proudění vzduchu jsou často navrženy k simulování výskytu kritických rychlostí větru, vypočítávané pro lokální topografii (Talkkari et al. 2000: MS-Micro/3, Zeng et al. 2006: WAsP) ale také umožňují vyhodnocování vlivů struktury porostů na výskyt kritických rychlostí větru (Blennow a Sallnäs, 2004: WINDA, Venäläinen et al. 2004: WAsP, Panferov a Sogachev 2008: SCADIS). Tyto process-based přístupy k vypočítávání výskytu kritických rychlostí větru jsou rovněž vhodné při regionálních klimatických projekcích. Blennow a Olofsson (2008: WINDA) vytvořili místní model proudění vzduchu z dat z regionálních klimatických modelů k posouzení výskytu větrných polomů s ohledem na klimatické změny. Nicméně klimatický vliv na výskyt větrných polomů není dán pouze změnami v rychlostech a výskytu bořivého větru. Peltola et al. (1999b) představil přístup k testování indukované zpětné vazby změny klimatu na kritickou rychlost větru kvůli změnám teplot a tím spojeným režimem zamrzání půdy.

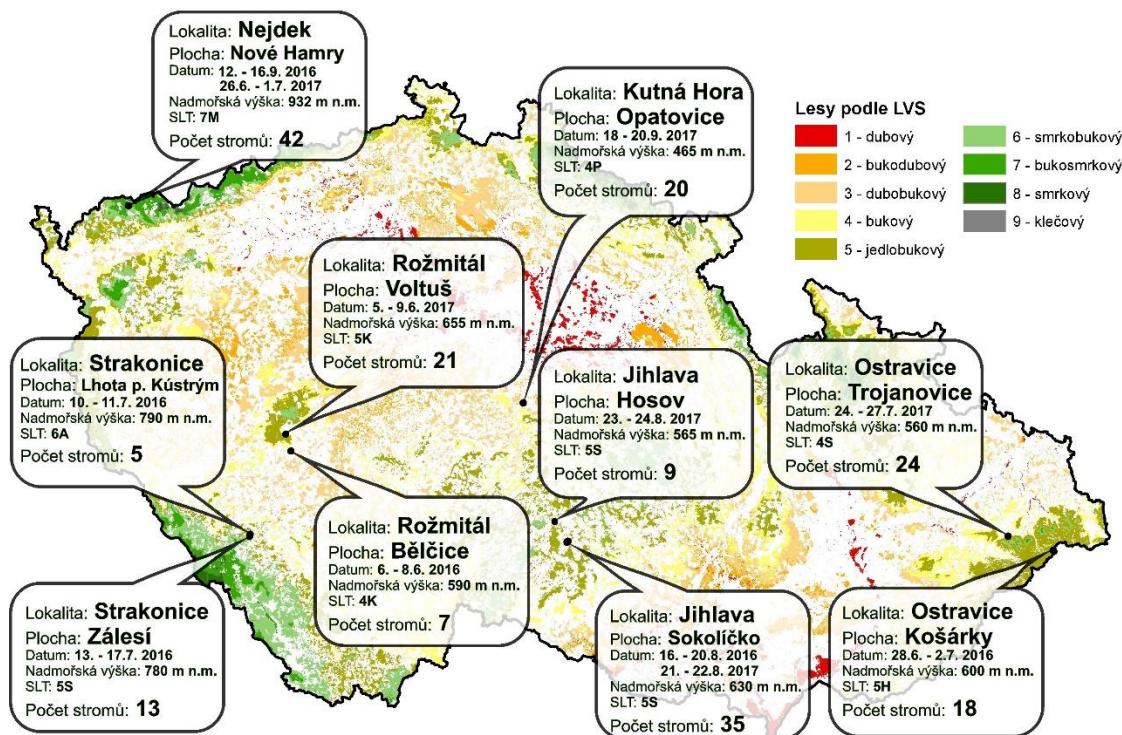
3.3 Interakce mezi dalšími disturbačními činiteli

Další vliv distrubačních činitelů na větrné události je omezen především na nepřímé účinky, např. zprostředkované změnou ve věkové struktuře způsobené úmrtností při vzájemně působících disturbancích. V krajinném přístupu jsou tyto účinky často modelovány. Scheller a Mladenoff (2005: LANDIS-II) demonstrují dopady vztahu mezi disturbančními činiteli vítr-oheň na vývoj lesa. Disturbanční činitelé jako houby a jiné patogeny mají také schopnost ovlivňovat odolnost stromů proti zlomům a vývrátům. Papaik et al. (2005: SORTIE) začlenil tento vztah ve své práci v modelovém přístupu k rozlišení parametrů citlivosti stromů na vítr pro různé úrovně napadení patogeny. Podle výsledků jeho simulací mají patogeny na polomy a zásadní vliv následný vývoj vegetace.

4. Metodika

4.1 Výběr lokalit

Měření bylo realizováno pro smrk ztepilý (*Picea abies*) a to celkem v deseti porostech rozmístěných rovnoměrně na území České republiky (obr. 4). Zájmové lokality byly vybírány s ohledem na stanoviště, nadmořskou výšku a věk porostu, aby co nejlépe postihly přírodní podmínky státu.



Obr. 4: Přehled lokalit destruktivního měření a jejich stručná charakteristika za roky 2016 a 2017

Měření proběhla na osmi odlišných lokalitách lesních souborů. Jednotlivé lokality se nacházely v polohách 4. až 7. LVS, které pokrývají nejvíce zastoupené lesní vegetační stupně, které nám rovněž reprezentují ekologickou řadu kyselou (4K, 5K, 7K, 7M), kyselo/bohatou (4S, 5S, 5H), obohacenou humusem (6A), oglejenou (4P) (obr. 5).

Přehled lesních typů a souborů lesních typů v ČR

Obr. 5: Soubory lesních typů studovaných lokalit v typologické tabulce

Plochy byly vybíraný také s ohledem na nadmořskou výšku tak, abychom vystihli výškový gradient na základě lesních vegetačních stupňů (LVS). Nejnižše umístěná plocha se nacházela nedaleko Kutné Hory na lokalitě Opatovice s nadmořskou výškou 465 m. n. m. a naopak nejvýše položenou plochou se stala lokalita Nejdek s 932 m. n. m., která se nacházela v Krušných horách.

Byly studovány smrkové porosty s vysokým zastoupením smrku (<60%) a stářím 80 a více let. Dalším pomocný ukazatelem byla rovněž průměrná výška porostu, která byla stanovena na 20m.

4.2 Získávání dat v terénu

Práce v terénu sestávaly z několika základních úkonů: tahová zkouška, kvantifikace nadzemní části kmene, kvantifikace koruny a stanovení přírůstků a stanovení podzemní části kmene a kořenový systém

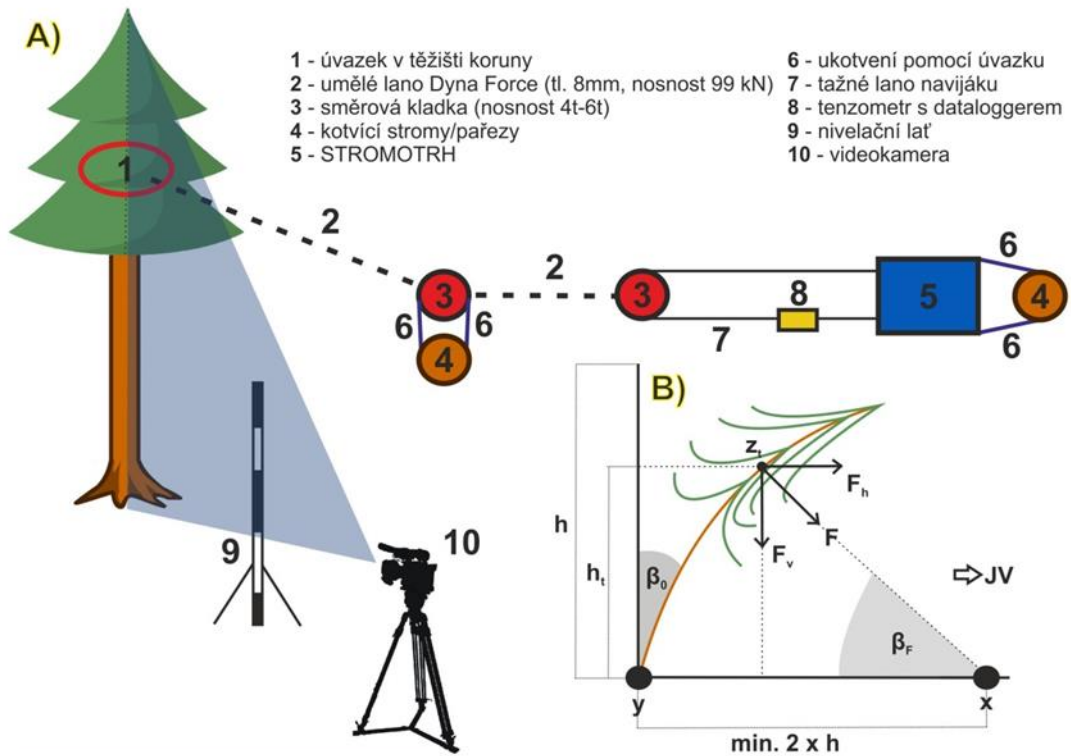
Pro zajištění správnosti těchto dat bylo třeba vybrat v porostu takové stromy, které představují průměrné jedince v daném porostu. Vybírali jsme si takové jedince v porostu, aby se u nich nevyskytovaly růstové vady, znatelná poškození na kmenu nebo viditelná poškození kořenů. Vybrané stromy byly vybrány v náhodném postavení tak, aby získávaná data nebyly ovlivněni lokálními půdními a růstovými podmínky. Hodnoty byly zapsány do terénních zápisníků, které byly přepsány do elektronické podoby v programu Microsoft Office Excel 2013.

Za pomoci lanového systému s přenosným motorovým navijákem (Stromotr) jsme simulovali působení namáhání větru na strom. Tažné lano bylo vždy umístěné v těžišti zelené koruny stromu, které bylo stanoveno okulárně (Obr. 6). Výstup do koruny pro ukotvení tažného lana prováděl kvalifikovaný proškolený pracovník skupiny za pomoci lezecké soupravy. Dle pokynů ostatních členů skupiny umístil do geometrického těžiště koruny kolem kmene úvazek, ke kterému poté připevnil tažné lano (Dyna Force tl. 8mm). Toto lano je vyrobeno z velmi pevného vlákna Dyneema, a jeho hlavní předností je minimální váha oproti ocelovému lanu asi okolo 1/10 při stejném průměru a délce. Navíc disponuje extrémně velkou pevností, je odolné vůči vlhku, olejům, mazacím tukům a proti UV záření. Při slaňování lezec popisuje strom pořadovým číslem.

Tahová zkouška byla vždy prováděna ve směru převládajícího větru severo-západ, tzn. směr tahu směrem jihovýchod. Při vlastní takové zkoušce se přes směrovou kladku pomalu navíjí lano. Hodnota okamžitého napětí je zaznamenávána dataloggrem (tenzometrický snímač s příslušenstvím) (v kg), na který se zaznamenalo působení síly na strom až po kritickou sílu, kdy došlo buď k vytvoření zlomu nebo vývratu. Zároveň je zaznamenána i okamžitá maximální hodnota.

Po ukončení pokusu byla změřena výška stromu (m), výčetní tloušťka (cm) a délka zelené koruny (m). Práce provádí 8-12 členný tým.

Základní statistické charakteristiky a regresní analýzy mezi parametry stromu a výslednou destrukční silou byly provedeny v programu Statistica 12.0.



Obr. 6 Schéma průběhu tahové zkoušky (A); (B) Měřené veličiny v průběhu zkoušky (h – výška stromu, h_c – těžiště koruny, β_0 - inklinace báze stromu, β_F - úhel napínání lana, F_h a F_v - horizontální a vertikální složky napínací síly F); (C) detail směrové kladky; (D) úvazky; (E) umístění úvazku v koruně pomocí lezecké soupravy; (F) tenzometr; (G) Stromotrh

5. Výsledky

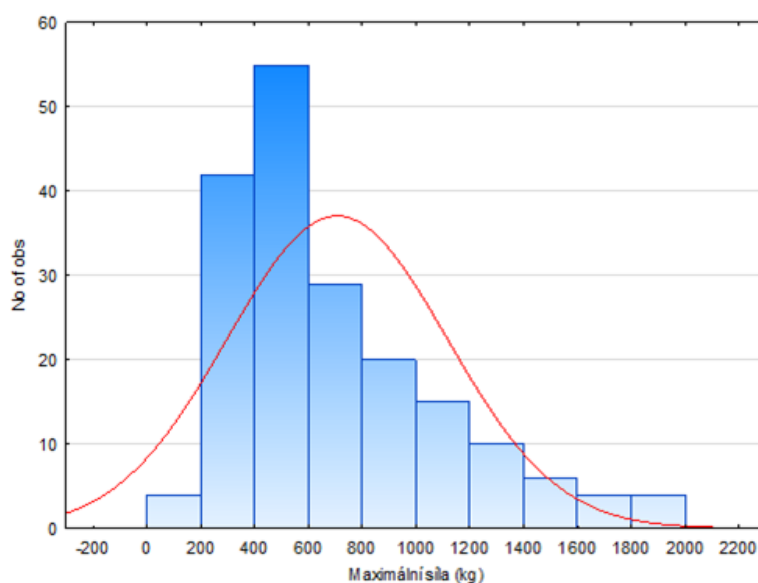
Rozdělení hodnot kritické síly všech stromů je přibližně normální s průměrem 960 kg a mediánem 900 kg. Minimální hodnoty se pohybují kolem 200 kg a maximální kolem 2000 kg (Tab. 2). Rozdíl v hodnotách síly dosažených při vyvrácení a zlomení stromu nebyl významný, zlom však vykazoval mírně vyšší medián a vyšší variabilitu hodnot (mezikvartilový rozsah, Obr. 7).

Proměnná					
	N platných	Průměr	Minimum	Maximum	Směrod. Chyba
Délka koruny (m)	191	12,8525	4,4600	24,840	0,23957
Tenzometr (max síla)	189	702,3492	101,0000	1968,000	29,60241
Výška stromu (m)	191	29,9230	19,0500	41,630	0,33517
Tloušťka d1,3 (cm)	180	38,8878	25,5000	60,000	0,49098

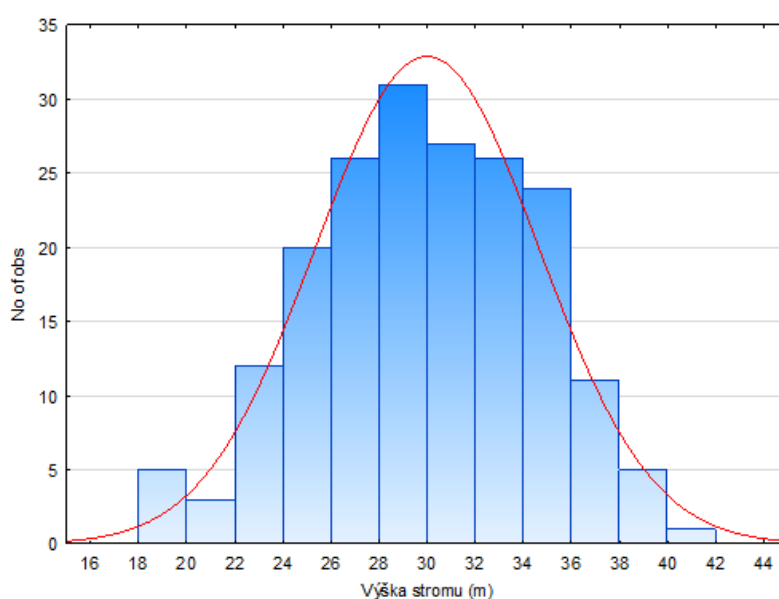
Tab. č. 2: Popisné statistiky studovaných veličin

Vhodnými statistickými metodami byly vyhodnoceny data, nasbíraná v terénu v rámci destruktivních tahových zkoušek odolnosti smrku ztepilého (*Picea abies*). Četnost maximálních sil (kg) potřebných pro vývrat či zlom testovaných jedinců vykazovala přibližně normální rozdělení (Obr. 7). Nejvíce jedinců bylo při tahových zkouškách vyvráceno či zlomeno při tažné síle okolo 500 kg, celkově se jednalo o cca 55 jedinců z 189 testovaných stromů. Popisná statistika studovaných jedinců (Tab. 2) ukazuje, že bylo destruktivně testováno celkem 191 jedinců, z nichž 189 bylo vzhledem k průběhu destruktivních zkoušek a dalších okolností vyhodnoceno jako vhodných k dalšímu statistickému zpracování. Průměrná tažná síla potřebná pro zlomení či vyvrácení jedince byla cca 702 kg. Nejnižší naměřená hodnota, při které byl strom zlomen či vyvrácen byla 101 kg, naopak nejvyšší hodnota se výrazně přibližovala 2000 kg. Výšky jednotlivých stromů byly poměrně různorodé vzhledem k terénním podmínkám v různých částech České republiky s odlišnými přírodními podmínkami, soubory lesních typů či absolutními výškovými bonitami. Nejnižší jedinec zvolen pro destruktivní tahovou zkoušku dosahoval výšky přibližně 19 metrů, zatímco největší jedince, konkrétně jedinec z Moravskoslezských Beskyd dosahoval výšky přes 41,5 metru. Průměrný výšky testovaných jedinců činila cca 30 metrů. Rozdělení četností jednotlivých výšek studovaných jedinců vykazuje normální rozdělení (Obr. 8) s nejčtetnějšími výškami okolo

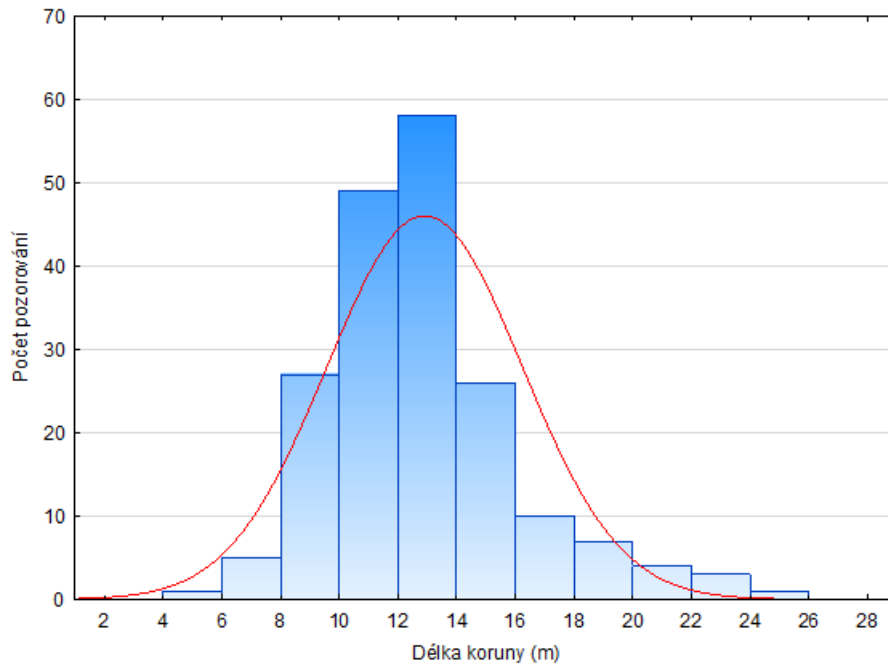
29 metrů. Délka korun byla taky velmi různorodá, od délky 4,5 metrů až po téměř 23 metrů dlouhou korunu, průměr činil 12,85 metru. Porovnání průměrné délky koruny a průměrné výšky stromu ukazuje, že poměr mezi těmito hodnotami je přibližně 1:2. Stejně jako v případě výšky jednotlivých studovaných stromů i rozdělení četností destruktivně testovaných stromů vykazuje normální rozdělení s nejčetnější délkou koruny cca 13 metrů (Obr. 9). Tloušťky testovaných jedinců, měřeny v d1,3 měli rozsah od 25,5 centimetru až po 60 centimetrů s průměrem přibližně 39 cm. Četnosti měřených tlouštěk jsou stejně jako v předchozích případech normálně rozděleny (Obr. 10)



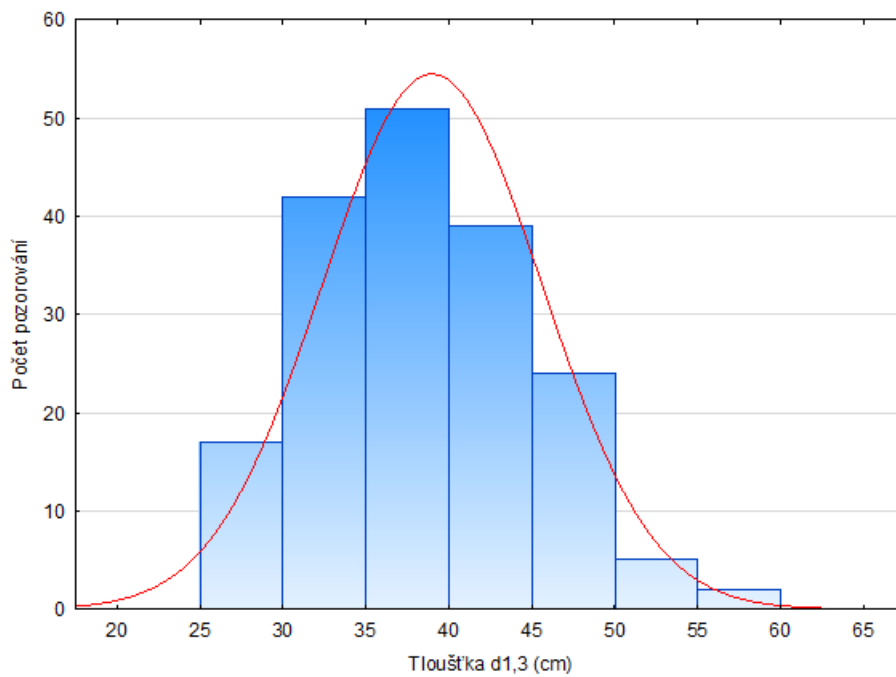
Obr. 7: Distribuce hodnot kritické síly [kg] pro celý dataset destruktivně testovaných jedinců.



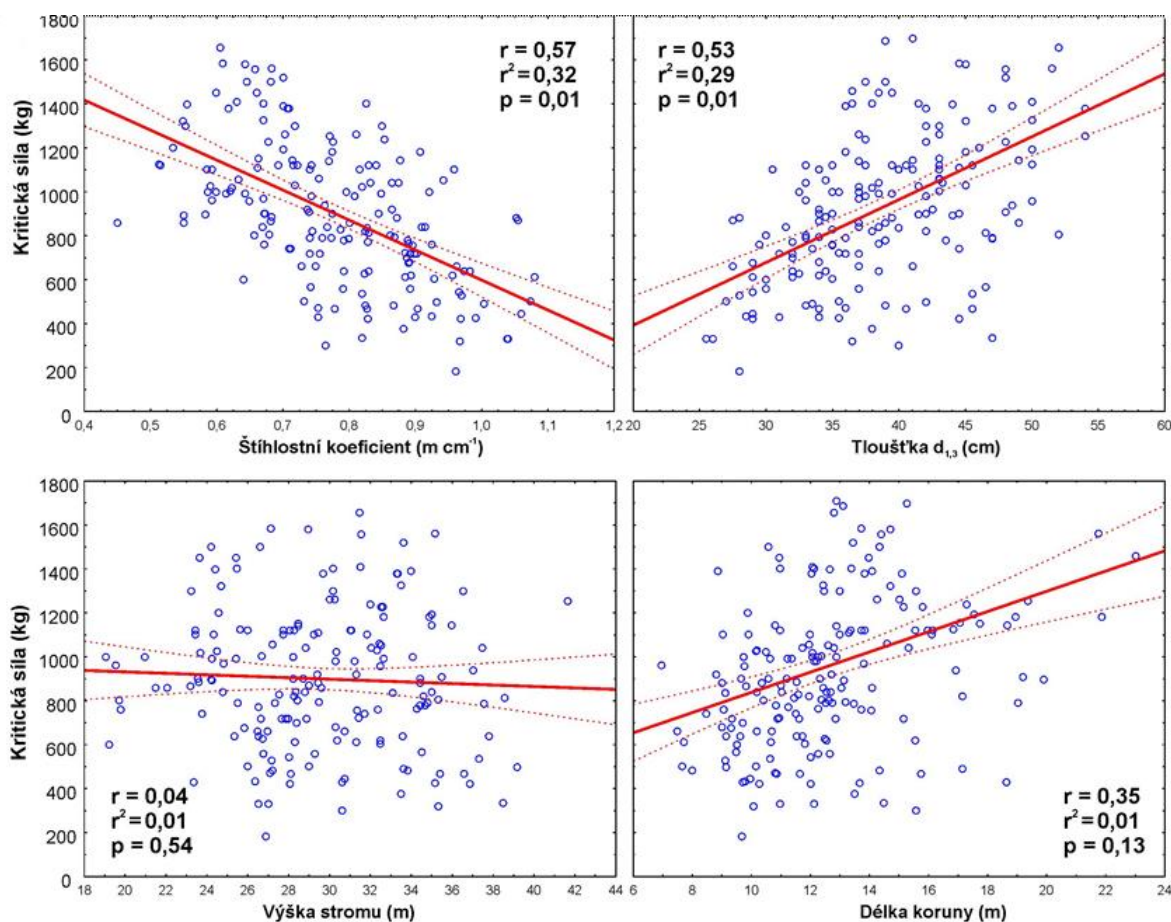
Obr. 8: Rozdělení hodnot výšek (m) jednotlivých testovaných stromů.



Obr. 9: Četnost jednotlivých délek korun (m) v rámci všech testovaných jedinců.



Obr. 10: Četnost jednotlivých naměřených výčetních tloušťek d1,3 (cm) v rámci všech testovaných jedinců.

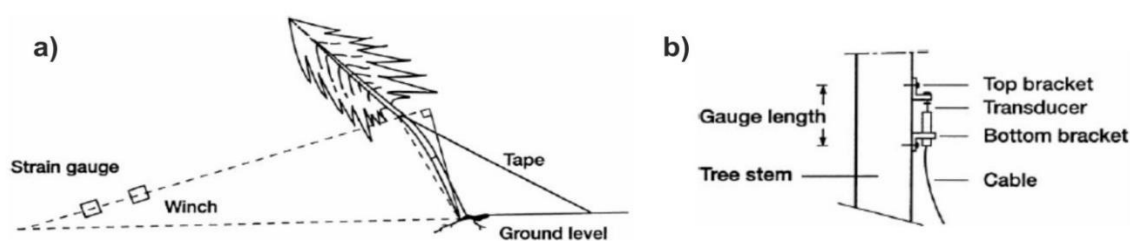


Obr. 11: Odezva hodnot kritické síly na spojité prediktory použité v regresní analýze

Ke statistickému vyhodnocení, zda lze hodnota kritické síly potřebné ke zlomení či vyvrácení kmene odvozovat na základě různých stromových a stanovištních veličin bylo využito regresní analýzy. Ze všech testovaných veličin vykazuje nejvyšší hodnotu spolehlivosti štíhlostní koeficient, kdy při zvyšování štíhlostního koeficientu (cm.m) klesá i síla, která byla nezbytná pro vyvrácení či zlomení kmene. Porovnání těchto dvou proměnných vykazovalo hodnotu $r = 0,57$ a míra spolehlivosti této analýzy byla 32 % ($r^2 = 0,32$). Další testovanou proměnou, která vykazovala slušné odezvy na hodnotu tažné (kritickou) síly byla výčetní tloušťka d_{1,3} (cm). S rostoucí výčetní tloušťkou narůstala i hodnota kritické síly, výsledná regresní analýza ukázala hodnotu $r = 0,53$ a spolehlivost $r^2 = 0,29$. Další testované proměnné již vykazovaly velmi nízkou nebo téměř žádnou odezvu - změny kritické síly v závislosti na změně hodnot těchto proměnných (výška stromu $r=0,04$, $r^2=0,01$; délka koruny $r=0,35$, $r^2=0,01$; vlhkost půdy 0-30 cm $r=0,15$; $r^2=0,02$).

6. Diskuze

Mechanické namáhání stromů destruktivní metodou je poměrně často využívanou metodou pro vědecké stanovení odolnosti jednotlivých dřevin. Sbíráním hodnot kritických sil destruktivní metodou a následné měření stromových veličin umožňuje zpřesňovat již vyvinuté modely (např. Hwind, ForestGales) pro stanovování kritických rychlostí větru, při které by došlo k poškození daných porostů. Uživatel těchto modelů tedy může poměrně snadno zjistit odolnostní potenciál svých porostů. Destruktivním testováním odolnosti dřevin a následným zpracováním těchto dat pro výpočet kritické rychlosti větru se zabývali vědci z Finska (Peltola et al. 2000) (Obr. 12). Testování probíhala v období 1995 až 1996 v borových porostech. Celkově bylo destruktivně testováno 115 stromů, z nichž bylo 71 borovic, 33 smrků a jedenáct bříz (Peltola et al. 2000).



Obr. 12: Schéma destruktivního testování odolnosti dřevin (Peltola et al. 2000).

Ve Velké Británii se tématem odolnosti dřevin vůči působení větru zabývali Nicoll et al. 2006. Při pokusech, které započali již v roce 1960 bylo testováno celkově 12 druhů dřevin. Lano bylo kotveno do jedné třetiny výšky stromu a tah byl vybírán náhodně v závislosti na terénních podmínkách nikoli ve směru převládajících větrů (Fraser, Gardiner 1967). Vzhledem k tomu, že stromy byly trhány v různých směrech, mohou být výsledky těchto měření zkreslené, pravděpodobně podhodnocené. Stromy se totiž často brání proti působení větru zesilováním kořenových náběhů ve směru převládajících větrů. Další zemí, kde byla testována odolnost dřevin destruktivní metodou bylo Švýcarsko (Lundström et al. 2007) nebo Francie (Gardiner xx),

Výskyt a intenzita poškození závisí na mnoha často vzájemně propojených faktorech. Především potom na lokálních klimatických podmínkách (směr a síla větru, průměrné množství srážek, délka vegetačního období apod.), orografických poměrech (nadmořská výška, sklon a orientace svahů, zakřivení reliéfu apod.), půdních charakteristikách (půdní typy, vlhkost půdy) (Ruel et. al 2000; Kamimura, Shirashi 2007). Mimo těchto geografických faktorů se na stabilitě lesních ekosystémů podílí charakteristiky jednotlivých stromů a porostů (Gardiner, Quine 2000). Odolnost jednotlivých stromů a porostů je charakterizována druhem dřeviny (např. Gardiner, Quine 2000), kořenovým

systémem, šířkou, výškou a tvarem stromové koruny (Valinger, Fridman 1997), věkem porostu (např. Lekes, Dandul 2000; Kuboyama et al. 2003) a štíhlostním koeficientem (např. Cremer et al. 1982). Tyto znaky nejen determinují odolnost k poškození, ale také určují převládající typ poškození (Kamimura, Shirashi 2007).

Dva známé faktory s náchylností pro poškozování bouřemi je druh dřeviny a výška jednotlivého stromu nebo celého porostu. Dalšími charakteristiky je štíhlostní koeficient (poměr výšky a průmětu stromu), délka zelené části koruny, zdravotní stav (napadení kořenů nebo kmene hnilobou), hustota a struktura porostu, intenzita a počet prováděných zásahů. Nejdůležitější aspektem je charakteristika stanoviště a tím je složení půdy, sklon, expozice a vodní režim má také vliv na rizika způsobení poškození jednotlivých stromů nebo celých lesních porostů z důvodů větrných bouří. V oblastech, kde hrozí větrné kalamity, lze považovat za vysoce stabilní a větru odolávající (přirozené) smrkové hospodářská exponovaných stanovišť. Na těchto lokalitách zaujímají smrkové porosty zejména kamenité, až balvanité, vysoce svažitě terény, popřípadě hřebenové partie hor. Smrkové porosty na exponovaných stanovištích mají většinou spádné kmene s velkými korunami. Velmi dobré zakotvení stromů v půdě zvyšuje celkovou stabilitu porostů na těchto lokalitách (Plíva 1975). Smrkové porosty průměrných až podprůměrných bonit s dobře zakotvenými kořeny v půdě vzdorují na kyselých stanovištích vcelku dobře náporu větru (Vicena et al. 1979). Mnohem více jsou však větrem ohrožovány porosty živných stanovišť. Půdy na živných stanovištích jsou zpravidla hluboké, čerstvé, písčitohlinité až hlinitopísčité, obvykle velmi produktivní. Kořenový systém smrku tak často nachází vše potřebné pro růst již několik desítek centimetrů pod povrchem půdy. Vytváří tzv. „kořenové koláče“ velkých průměrů, avšak nedostatečně hluboké a při intenzivním působení silnějších větrů dochází k vývratu těchto stromů. Na živných stanovištích dosahují smrkové porosty v průměru jen lepších bonit. V mýtním věku jsou pak výšky stromů v těchto porostech značné, kmene jsou štíhlé, plnodřevné. Po uvolnění se koruny stromů značně rozrůstají do šířky, což působí negativně na jejich stabilitu. Takové porosty vyžadují zvýšený ohled na bezpečnost porostů a na jejich ochranu proti větru. Stabilita porostů (především smrkových) a jejich odolnost vůči tlaku větru se výrazně zhoršuje se stoupající vlhkostí stanovišť (Vicena et al. 1979).

Smrkové porosty s vysokými středními výškami jsou mimořádně citlivé zejména na náhlé snížení zakmenění: čím větší byla intenzita těžebních zásahů v porostech pěstovaných až do vysokého věku v zápoji, tím větší pak byl u ní i rozsah větrných polomů (Vicena et al. 1979).

Slodičák, Novák (2007) tvrdí, že porosty nejvíce ohrožené abiotickými škodlivými činiteli jsou porosty na bohatých živných stanovištích CHS 45 a CHS 55, na stanovištích oglejených CHS 57 (případně CHS 77) a na stanovištích podmáčených CHS 39, CHS 59, CHS 79.

V Československé republice se odolností stromů vůči zlomení či vyvrácení zabýval také Pfeffer (1955). Na základě svých pokusů a následujících výpočtů tvrdí, že tloušťka kmene má vliv na stabilitu jedince mnohem více než ostatní stromové charakteristiky. Proto poukazuje, že v oblastech ohrožovaných větrnými kalamitami by mělo úsilí lesního hospodáře včasnými pěstebními zásahy dosáhnout co největších tlouštěk stromů. (Vicena et al. 1979; Pfeffer 1955).

Stromy se stejnou výčetní tloušťkou a stejně velkou korunou, ale různě vysoké, jsou vůči tlaku větru i různě odolné. Při zvětšení výšky stromu o 25 % poklesne stabilita kmene rovněž o 25 %; u stromů s výškami o 25 % menšími je naopak stabilita až o 50 % vyšší (Vicena et al. 1979).

Prodloužením koruny se zvětší i šířka koruny a její náporová plocha, současně se posune těžiště působení větru směrem k bázi kmene. Stromy stejně vysoké a na pařezu stejně tlusté snesou, pokud mají koruny o délce odpovídající např. 80 % výšky stromu, zatížení o 12 % menší v porovnání se stromy, u nichž koruna sahá do poloviny kmene. Z tohoto poznatku vyplývá, že u stromů s velkými korunami musí tedy vyšší stabilitu kmene zabezpečit především tloušťka kmene.

Podle našich výsledků byl veličinou, která nejvíce prokazuje stabilitu daných studovaných stromů štíhlostní koeficient. Vicena et al. (1979) potvrzuje, že štíhlostního koeficientu se používá jako pomocného ukazatele při posuzování stability stromu vůči tlaku větru. U jednotlivých stromů může štíhlostní koeficient nabývat hodnoty tak od 0,5 do 1,4, v extrémních případech i hodnot vyšších. Všeobecně se soudí, že stromy jsou stabilnější, čím nižší je hodnota jejich štíhlostního koeficientu. Poněvadž se však v tomto ukazateli nebere zřetel na náporovou plochu koruny ani na polohu těžiště koruny, na rychlost větru a na pevnost dřeva v jednotlivých výškách, může jeho použití vést někdy i k nesprávným závěrům. Posuzujeme-li např. dva stejně vysoké a stejně tlusté stromy, budou mít oba stejné štíhlostní koeficienty; mají-li však různě velkou náporovou plochu koruny, bude jejich stabilita rozdílná.

7. Závěr

Větrné kalamity nás budou sužovat i nadále, vzhledem k velké míře narušených porostních zápoju, které souvisí i s kůrovcovou kalamitou a následné těžby napadených stromů. Bylo by dobré co nejdříve dbát na výchovu stávajících porostů a zakládání nových porostu s důrazem na rychle měnící klimatické podmínky. V rámci našeho výzkumu jsme vyhotovili v takových to ohrožených porostech měření, při kterém bylo změřeno v rozmezí dvou let 191 stromu v 10 různých stanovištích po celé České republice. Stanoviště se nacházeli v různých nadmořských výškách, kdy nejnižší jsme měřili na lokalitě Opatovice s nadmořskou výškou 465 m. n. m. a naopak nejvýše položenou plochou se stala lokalita Nejdek s 932 m. n. m. Naměřené hodnoty síly změřené za pomoci tenzometru se pohybovali v průměru 702 kg na jednice stromu. Průměrný strom vyhodnocený z dat má délku koruny 12,85 m, celková výška stromu je 29,92 m a tloušťku v $d_{1,3}$ je 38,88 m. Velkou roli zde má štíhlostní koeficient, který má hodnotu u našeho průměrného stromu 0,77. Pokud má porost hodnotu koeficientu pod 1,00 měly by být tyto porosty odolné vůči větru a sněhu.

Pro lepší vyhodnocování a zpracování modelů je zapotřebí měřit v rámci celé republiky. Je to namáhavé a časově náročné, ale pokud chceme model se správnými údaji, musíme zapojit spousty lidí, práce a financí tak jako v našem případě, kdy byla tato diplomová práce v řešení výzkumného projektu NAZV QJ1520006 „Hodnocení rizika poškození lesních porostů větrem: vývoj a kalibrace národního prediktivního modelu“.

8. Použitá literatura a materiály

- ACHIM A, RUEL J.C., GARDINER B.A., LAFLAMME G., MEUNIER S. 2005: Modelling the vulnerability of balsam fir forests to wind damage. *Forest Ecology and Management*, 204,35–50.
- AGSTER W., RUCK B. 2003: The influence of aerodynamic properties of forest edges and stands on the pressure pattern within a forest. In: Ruck B., Kottmeier C., Mattheck C., Quine C., Wilhelm G. (eds) *Wind effects on trees*, Karlsruhe, 25–32.
- ALBRECHT A., SCHINDLER D., GREBHAN K., KOHNLE U., MAYER H. 2009: Sturmaktivität über der nordatlantisch-europäischen Region vor dem Hintergrund des Klimawandels—eine Literaturübersicht. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*, 180, 347–360.
- ANCELIN P., COURBAUD B., FOURCAUD T. 2004: Development of an individual tree-based mechanical model to predict wind damage within forest stands. *Forest Ecology and Management*, 203, 101–121.
- BENGTSSON A., NILSSON C. 2007: Extreme value modelling of storm damage in Swedish forests. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 7, 515–521.
- BLENNOW K., OLOFSSON E. 2008: The probability of wind damage in forestry under a changed wind climate. *Climate Change*, 87, 347–360.
- BLENNOW K., SALLNÄS O. 2004: WINDA A system of models for assessing the probability of wind damage to forest stands within a landscape. *Ecological Modelling*, 175, 87–99.
- BRUNET Y., FOURCAUD T., ACHIM A., BELCHER R. 2003: The VENFOR project: wind and forest interactions from the tree scale to the landscape scale. In: Ruck B. et al. (ed) *Wind effects on trees*. Laboratory for Building and Environmental Aerodynamics, University of Karlsruhe, 3–8.
- BRÜCHERT F., BECKER G., SPECK T. 2000: The mechanics of Norway Spruce [*Picea abies* (L.) Karst]: mechanical properties of standing trees from different thinning regimes. *Forest Ecology and Management*, 135, 45–62.
- BRÜCHERT F., GARDINER B.A. 2006: The effect of wind exposure on the tree aerial architecture and biomechanics of Sitka spruce (*Picea sitchensis*, Pinaceae). *American Journal of Botany*, 93, 1512–1521

- BROWNE W.J., SUBRAMANIAN S.V., JONES K, GOLDSTEIN H. 2005: Variance partitioning in multilevel logistic models that exhibit overdispersion. *Journal of the Royal Statistical Society*, 168, 599–613.
- CANHAM C.D., PAPAİK M.J., LATTY E.F. 2001: Interspecific variation in susceptibility to windthrow as a function of tree size and storm severity for northern temperate tree species. *Canadian Journal of Forest Research*, 31, 1–10.
- CHEN J.M., BLACK T.A., NOVAK M.D., ADAMS R.S. 1995: A wind tunnel study of turbulent airflow in forest clearcuts. In: Coutts M.P., Grace J. (eds) *Wind and trees*. Cambridge University Press, Cambridge, 71–87.
- COLLETT D. 2003: *Modelling binary data*, 2nd edn. Chapman Hall/ CRC, Boca Raton.
- CREMER, K. W., et al. Effects of stocking and thinning on wind damage in plantations. *NZJ For. Sci*, 1982, 12.2: 244-268.
- CUCCHI V., MEREDIEU C., STOKES A., COLIGNY F.D., SUAREZ J., GARDINER B.A. 2005: Modelling the windthrow risk for simulated forest stands of maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.). *Forest Ecology and Management*, 184–196.
- CUCCHI V., STOKES A., MEREDIEU C., BERTHIER S., NAJAR M., BERT D. 2003: Root anchorage of Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) growing in different soil conditions. In: Ruck B., Kottmeier C., Mattheck C., Quine C., Wilhelm G. (eds) *Wind effects on trees*, Karlsruhe, 307–314.
- DOBBERTIN M. 2002: Influence of stand structure and site factors on wind damage comparing the storms Vivian and Lothar. *Forest Snow and Landscape Research*, 77(1/2), 187–205.
- DOBBERTIN M., BIGNING G.S. 1998: Using the non-parametric classifier CART to model forest tree mortality. *Forest Science*, 44(4), 507–516.
- DUPONT S., BRUNET Y. 2008: Impact of forest edge shape on tree stability: a large-eddy simulation study. *Forestry*, 81, 299–315.
- ELIE J.G., RUEL J.C. 2005: Windthrow hazard modelling in boreal forests of black spruce and jack pine. *Canadian Journal of Forest Research*, 35, 2655–2663.
- FONSECA T.F. 2004: Modelação do crescimento, mortalidade e distribuição diamétrica, do pinhal bravo no Vale do Tamega. PhD Thesis. Vila Real, UTAD, Portugal, 248.

- FRASER A.I. 1964: Wind tunnel and other related studies on coniferous trees and tree crops. *Scottish Forest*, 18, 84–92.
- FRASER, A.I., GARDINER, J.B.H. 1967: Rooting and stability in Sitka spruce. *For. Comm. Bull.* 40. HMSO, London.
- FRIDMAN J., VALINGER E. 1998: Modelling probability of snow and wind damage using tree, stand, and site characteristics from *Pinus sylvestris* sample plots. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 13, 348–356.
- FÜHRER E., NOPP U. 2001. Ursachen, Vorbeugung und Sanierung von Waldschaden. *Facultas*, Vienna, Austria.
- GADOW K.V. 2000: Evaluating risk in forest planning models. *Silva Fennica*, 34, 181–191.
- GARDINER, B. A., PELTOLA, H., KELLOMÄKI, S., 2000: Comparison of two models for predicting the critical wind speeds required to damage coniferous trees. *Ecol. Model.*, 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. *For. Exil. Manage.*, 135:261–277.
- GARDINER B., BYRNE K., HALE S., KAMIMURA K., MITCHELL S., PELTOLA H., RUEL J.C. 2008: A review of mechanistic modelling of wind damage risk to forests. *Forestry*, 81, 447–461.
- GARDINER B. A., STACEY R., BELCHIER R.E., WOOD C.J. 1997: Field and wind tunnel assessments of the implications of respacing and thinning for tree stability. *Forestry*, 70, 233–252.
- GROMKE C., RUCK B. 2008: Aerodynamic modelling of trees for smallscale wind tunnel studies. *Forestry*, 81, 243–258
- GUISAN A., ZIMMERMANN N.E. 2000: Predictive habitat distribution models in ekology. *Ecological Modelling*, 135, 147–186.
- GUITARD D.G.E., CASTERA P. 1995: Experimental analysis and mechanical modelling of wind-induced tree sways. In: Coutts M.P., Grace J. (eds) *Wind and trees*. Cambridge University Press, Cambridge, 182–194.

- HANEWINKEL M. 2005: Neural networks for assessing the risk of windthrow on the forest division level: a case study in southwest Germany. *European Journal of Forest Research*, 124, 243–249.
- HANEWINKEL M., BREIDENBACH J., NEEFF T., KUBLIN E. 2008: 77 years of natural disturbances in a mountain forest area—the influence of storm, snow and insect damage analysed with a long-term timeseries. *Canadian Journal of Forest Research*, 38, 2249–2261.
- HANEWINKEL M., ZHOU W., SCHILL C. 2004: A neural network approach to identify forest stands susceptible to wind damage. *Forest Ecology and Management*, 196, 227–243.
- HINRICHS A. 1994: Geographische Informationssysteme als Hilfsmittel der forstlichen Betriebsführung (Geographical Information Systems as Tool for Forest Management—PhD-thesis). PhD. Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg.
- HOLUŠA, J., KŘÍSTEK, Š., TROMBIK, J., 2010: Stability of spruce forests in the Beskids: an analysis of wind, snow and drought damages. *Beskydy*, 3(1):43–54.
- JALKANEN, A., MATTILA, U., 2000: Logistic regression models for wind and snow damage in northern Finland based on the National Forest Inventory data. *Forest Ecology and Management*, 135:315–330.
- KALBERER M., AMMANN M., JONSSON M. 2007: Mechanical properties of Norway spruce: experiments for the analysis of natural hazards. *Schweizerische Zeitschrift für das Forstwesen*, 158, 166–175.
- KAMIMARU, K., SHIRASHI, N., 2007: A review of strategies for wind damage assessment in Japanese forests. *J. For. Res.*, 12:162–176.
- KAMIMURA K., GARDINER B., KATO A., HIROSHIMA T., SHIRAISHI N. 2008: Developing a decision support approach to reduce wind damage risk—a case study on sugi (*Cryptomeria japonica* (L.f.) D.Don) forests in Japan. *Forestry*. doi: 10.1093/forestry/cpn029
- KLOCEK A., OESTEN G. 1991: Optimale Umtriebszeit im Normal- und im Zielwaldmodell. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*, 162, 92–99.

- KOUBA J 2002: Das Leben des Waldes und seine Lebensunsicherheit. Forstwissenschaftliches Centralblatt, 121, 211–228.
- KÖNIG A 1995: Sturmgefährdung von Beständen im Altersklassenwald. J.D. Sauerländer's, Frankfurt am Main.
- KRAMER M.G., HANSEN A.J., TAPER M.L., KISSINGER E.J. 2001: Abiotic controls on longterm windthrow disturbance and temperate rain forest dynamics in southeast Alaska. Ecology, 82, 2749–2768.
- KŘÍSTEK Š., HOLUŠA J., 2014, Abiotické poškození smrkových porostů ve střední Evropě: příkladová studie sněhových polomů z let 2005-2011 v Moravskoslezských Beskydech, Lesn. Cas. For. J. 60
- KŘÍSTEK, Š., URBAŇCOVÁ, N., HOLUŠA, J., 2012: Hodnocení škod způsobených sněhem na lesních porostech. Certifikovaná metodika. Lesnický průvodce 7/2012. Strnady, Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti, v.v.i., 40 p.
- KUBOYAMA, H., ZHENG, Y., OKA H. 2003: Study about damage probabilities on major forest climatic risks according to ageclasses (in Japanese with English summary). Journal of Japanese Forest Science, 85: 191–198.
- KUPFER J.A., MYERS A.T., MCLANE S.E., MELTON G. 2008: Patterns of forest damage in a southern Mississippi landscape caused by hurricane Katrina. Ecosystems, 11, 45–60.
- KURTH H., GEROLD D., DITTRICH K. 1987: Reale Waldentwicklung und Zielwald–Grundlagen nachhaltiger Systemregelung des Waldes. Wissenschaftliche Zeitschrift der TU Dresden, 36, 121–137.
- LANQUAYE-OPOKU N., MITCHELL S.J. 2005: Portability of stand-level empirical windthrow risk models. Forest Ecology and Management, 216, 134–148.
- 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.
- LINDEMANN J.D., BAKER W.L. 2002: Using GIS to analyse a severe forest blowdown in the Southern Rocky Mountains. International Journal of Geographical Information Science, 16, 377–399.
- LITTELL R.C., MILLIKEN G.A., STROUP W.W., WOLFINGER R.D., SCHABENBERGER O. 2006: SAS for mixed models, 2nd edn. SAS Institute Inc., Cary, NC.

- LOHMANDER P., HELLES F. 1987: Windthrow probability as a function of stand characteristics and shelter. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2, 227–238.
- LUNDSTRÖM T., JONAS T., STÖCKLI V., AMMANN W. (2007): Anchorage of mature conifers: resistive turning moment, root–soil plate geometry and root growth orientation. *Tree Physiology* 27: 1217–1227.
- MAJUNKE C., MATZ S., MÜLLER M. 2008: Sturmschäden in Deutschlands Wäldern von 1920 bis 2007. *Allgemeine Forst und Jagdzeitung*, 63, 380–381.
- MASON W.L. 2002: Are irregular stands more windfirm? *Forestry*, 75, 347–355.
- MAYER P.B.P., DOBBERTIN M., HALLENBARTER D., RENAUD J.-P., WALTHERT L., ZIMMERMANN S. 2005: Forest storm damage is more frequent on acidic soils. *Annals of Forest Science*, 62, 303–311.
- MENG S.X., HUANG S., LIEFFERS V.J., NUNIFU T., YANG Y. 2008: Wind speed and crown class influence the height-diameter relationship of lodgepole pine: nonlinear mixed effects modeling. *Forest Ecology and Management*, 256, 570–577.
- MITCHELL S. 1998: A diagnostic framework for windthrow risk estimation. *For Chron*, 74, 100–105.
- MITCHELL S., HAILEMARIAM T., KULIS Y. 2001: Empirical modeling of cutblock edge windthrow risk on Vancouver Island, Canada, using stand level information. *Forest Ecology and Management*, 154, 117–130.
- MITCHELL S.J., LANQUAYE-OPOKU N., MODZELEWSKI H., SHEN Y., STULL R., JACKSON P., MURPHY B., RUEL J.C. 2008: Comparison of wind speeds obtained using numerical weather prediction models and topographic exposure indices for predicting windthrow in mountainous terrain. *Forest Ecology and Management*, 254, 193–204.
- MILNE R. 1995: Modelling mechanical stresses in living Sitka spruce stems. In: Coutts M.P., Grace J. (eds) *Wind and trees*. Cambridge University Press, Cambridge, 165–181.
- MILLER D.R., DUNHAM R., BROADGATE M.L., ASPINALL R.J., LAW A.N.R. 2000: A demonstrator of models for assessing wind, snow and fire damage to forests using the WWW. *Forest Ecology and Management*, 135, 355–363.

- MORSE A.P., BRUNET Y., DEVALANCE M., GAMBOA-MARRUFO M., IRVINE M.R., MARSHALL B.J., PAW K.T.U. 2003: The venfor project: the role of forest edges in the patterns of turbulence development—findings from a field experiment, wind tunnel experiment and a large eddy simulation model experiment. In: Ruck B., Kottmeier C., Mattheck C., Quine C., Wilhelm G. (eds) *Wind Effects on Trees*, Karlsruhe, 33–38.
- NICOLL B.C., ACHIM A., MOCHAN S., GARDINER B.A. 2005: Does steep terrain influence tree stability? A field investigation. *Canadian Journal of Forest Research*, 2005, 2360–2367.
- NICOLL B.C., GARDINER B.A., RAYNER B., PEACE A.J. (2006): Anchorage of coniferous trees in relation to species, soil type, and rooting depth. *Canadian Journal of Forest Research* 36: 1871–1883.
- PANFEROV O., SOGACHEV A. 2008. Influence of gap size on wind damage variables in a forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148, 1869–1881.
- PAPAIK M.J., CANHAM C.D., LATTY E.F., WOODS K.D. 2005: Effects of an introduced pathogen on resistance to natural disturbance: beech bark disease and windthrow. *Canadian Journal of Forest Research*, 35, 1832–1843.
- PELTOLA H., KELLOMAKI S., VAISANEN H., IKONEN V.P. 1999a: 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.
- PELTOLA H., KELLOMAKI S., VAISANEN H. 1999b: Model computations of the impact of climatic change on the windthrow risk of trees. *Climatic Change*, 41, 17–36.
- PELTOLA H., KELLOMÄKI S., HASSINEN A., GRANANDER M. (2000): Mechanical stability of Scots pine, Norway spruce and birch: an analysis of tree-pulling experiments in Finland. *Forest Ecology and Management* 135 (1): 143-153.
- PETERSON C.J., 2004: Within-stand variation in windthrow in southern boreal forests of Minnesota: is it predictable? *Canadian Journal of Forest Research*, 34, 365–375.
- PFEFFER A. 1955: O vzniku sněhových polomů v lese. *Lesnictví*, 28, 315–324.
- PLÍVA K. 1975: Návrh diferenciacie způsobů obnovy porostů. *ÚHÚL Brandýs nad Labem*, 27.
- QUINE C.P., WHITE I.M.S. 1994: Using the relationship between rate of tatter and topographic variables to predict site windiness in upland Britain. *Forestry*, 67, 245–256.

- RICH R.L., FRELICH L.E., REICH P.B. 2007: Wind-throw mortality in the southern boreal forest: effects of species, diameter and stand age. *Journal of Ecology*, 95, 1261–1273.
- RUEL, J. C. 2000: Factors influencing windthrow in balsam fir forests: From landscape studies to individual tree studies. *Forest Ecology and Management*, 135: 169–178.
- RUEL J.-C., PIN D., SPACEK L., COOPER K., BENOIT R. 1997: The estimation of wind exposure for windthrow hazard rating: comparison between Strongblow, MC2, Topex and a wind tunnel study. *Forestry*, 70, 253–266.
- ROTTMANN M. 1986: Wind- und Sturmschäden im Wald. J.D. Sauerländer's, Frankfurt am Main.
- RYCHTECKÁ, P., URBAŇCOVÁ, N., 2008: Škodliví činitelé lesa v letech 1996–2006 – I. Část Abiotičtí a antropogenní činitelé. *Lesnická práce*, 6:14–15
- SHELLER R.M., MLADENOFF D.J. 2005: A spatially interactive simulation of climate change, harvesting, wind, and tree species migration and projected changes to forest composition and biomass in northern Wisconsin, USA. *Global Change Biology*, 11, 307–321.
- SHELHAAS M.J. 2008: The wind stability of different silvicultural systems for Douglas-fir in The Netherlands: a model-based approach. *Forestry*, 81, 399–414.
- SHELHAAS M.J., KRAMERA K., PELTOLA H., VAN DER WERF D.C., WIJDEVEN S.M.J. 2007: Introducing tree interactions in wind damage simulation. *Ecological Modelling*.
- SHELHAAS 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
- SCHMIDT M., HANEWINKEL M., KÄNDLER G., KUBLIN E., KOHNLE U. 2009: An inventory-based approach for modeling single tree storm damage—experiences with the winter storm 1999 in southwestern Germany. *Canadian Journal of Forest Research* (in review).
- SCHÜTZ J.-P., GÖTZ 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

- SCHÜLTZ J.J., COLLINS M.E., FALSETTI A.B. 2006: Sequential monitoring of burials containing large pig cadavers using ground-penetrating radar. *Journal of Forensic Science*, 51, 607–616.
- SCHINDLER D., GREBHAN K., ALBRECHT A., SCHONBORN J. 2009: Modelling the wind damage probability in forests in Southwestern Germany for the 1999 winter storm 'Lothar'. *International Journal of Biometeorology*, 53, 543–554.
- SCOTT R.E., MITCHELL S.J. 2005: Empirical modelling of windthrow risk in partially harvested stands using tree, neighbourhood, and stand attributes. *Forest Ecology and Management*, 218, 193–209.
- SEIDL R., RAMMER W., BELLOS P., HOCHBICHLER E., LEXER M.J. 2010: Testing generalized allometries in allocation modeling within an individual-based simulation framework. *Trees*, 24, 139–150.
- SINGER J. 1998: Using SAS PROC MIXED to fit multilevel models, hierarchical models, and individual growth models. *Journal of Education and Behavioral Statistics*, 24, 323–355.
- SUAREZ J., GARDINER B.A., QUINE C.P. 1999: A comparison of three methods for predicting wind speeds in complex forested terrain. *Meteorological Applications*, 6, 329–342.
- SUZUKI T. 1971: Forest transition as a stochastic process. *Mitt Forstlichen Bundesversuchsanstalt (FBVA)*, 91, 137–150.
- SLODIČÁK, M., 1996: Stabilizace lesních porostů výchovou. *Lesnický průvodce, Jíloviště Strnady, Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti*, 52 p.
- SLODIČÁK M., NOVÁK J. 2007: *Výchova lesních porostů hlavních hospodářských dřevin*. Strnady: Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti. *Lesnický průvodce*. ISBN 978-80-86461-89-2.
- TALKKARI A., PELTOLA H., KELLOMÄKI S., STRANDMANN H. 2000: Integration of component models from the tree, stand and regional levels to assess the risk of wind damage at forest margins. *Forest Ecology and Management*, 135, 303–313.
- THÜRIG E., PALOSUO BUCHER J., KAUFMANN E. 2005: The impact of windthrow on carbon sequestration in Switzerland: a model-based assessment. *Forest Ecology and Management*, 210, 337–350.

- SPIECKER, H., 2000: The growth of Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.) in Europe within and beyond its natural range. In: Hasenauer, H. (ed.): International Conference on Forest Ecosystem Restoration. Ecological and Economic Impacts of Restoration Processes in secondary coniferous Forests. Proceedings of the International Conference held in Vienna, Austria, 10–12 April 2000, p. 247–256.
- TALKKARI A., PELTOLA H., KELLOMÄKI S., STRANDMANN H. 2000: Integration of component models from the tree, stand and regional levels to assess the risk of wind damage at forest margins. *Forest Ecology and Management*, 135, 303–313.
- TANG S.M., FRANKLIN J.F., MONTGOMERY D.R. 1997: Forest harvest patterns and landscape disturbance processes. *Landscape Ecology*, 12, 349–363.
- THERNEAU T.M., ATKINSON B. 2002: Recursive partitioning and regression trees, R package, R port by Brian Ripley.
- TOLASZ, R., BRÁZDIL, R., BULÍŘ, O., DOBROVOLNÝ, P., DUBROVSKÝ, M., HÁJKOVÁ, L. et al., 2007: Atlas podnebí Česka. 1. vydání. Praha, Olomouc, Český hydrometeorologický ústav, Universita Palackého, 255 p.
- VALINGER, E., FRIDMAN, J. 1997: Modelling probability of snow and wind damage in Scots pine stands using tree characteristics *Forest Ecology and Management*, 97: 215-222.
- VALINGER E., FRIDMAN J. 1999: Models to assess the risk of snow and wind damage in pine, spruce and birch forests in Sweden. *Environmental Management*, 24, 209–217.
- VENÄLÄINEN A., ZENG H., PELTOLA H., TALKKARI A., STRANDMAN H., WANG K., KELLOMAKI S. 2004: Simulations of the influence of forest management on wind climate on a regional scale. *Agricultural and Forest Meteorology*, 123, 149–158.
- VICENA I., PAŘEZ J., KONOPKA J. 1979: Ochrana lesa proti polomům. Ministerstvo lesního a vodního hospodářství ČSR. I. vydání, 244.
- ZENG H., PELTOLA H., TALKKARI A., STRANDMAN H., VENALAINEN A., WANG K., KELLOMAKI S. 2006: Simulations of the influence of clear-cutting on the risk of wind damage on a regional scale over a 20-year period. *Canadian Journal of Forest Research*, 36, 2247–2258.