

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra ochrany lesa a entomologie

**Stanovení kritické rychlosti větru v porostech smrku ztepilého  
(*Picea abies*) na základě výsledků tahových zkoušek**

Diplomová práce

Autor: Bc. Eliška Pařízková

Vedoucí práce: doc. RNDr. Tomáš Hlásny, PhD.

2019

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Eliška Pařízková

Lesní inženýrství

Název práce

**Stanovení kritické rychlosti větru v porostech smrku ztepilého (*Picea abies*) na základě výsledků tahových zkoušek**

Název anglicky

**Determination of critical wind speed in Norway spruce (*Picea abies*) forest based on results of tree-pulling experiments**

---

### Cíle práce

- na vybraných lokalitách v rámci ČR provést měření odolnosti smrku ztepilého a na základě získaných údajů stanovit hodnoty kritických sil
- kvantifikovat jednotlivé parametry stromu
- přepočítat kritické síly nutné k poškození stromu na kritickou rychlost větru (resp. stanovit rychlost větru, která je na daný strom schopná vyvinout požadovaný tlak)

### Metodika

- mechanická odolnost vybraných jedinců bude měřena pomocí terénní destruktivní zkoušky statickým namáháním navijákem
- u jednotlivých vzorníků bude pořízen záznam působených sil a určena kritická síla, při které dojde k poškození stromu. Déle budou změřeny veškeré parametry stromů (výška, tloušťka v metrových intervalech, zelená koruna včetně orientace jednotlivých větví atd.)
- kritické síly nutné k poškození stromu budou přepočítány na kritickou rychlost větru na základě získaných parametrů stromu pomocí platných českých norem a dalších postupů

## **Doporučený rozsah práce**

40 stran včetně příloh

## **Klíčová slova**

smrk ztepilý, mechanická odolnost, kritická rychlost větru, abiotické poškození

---

## **Doporučené zdroje informací**

ČSN 73 0035 Zatížení stavebních konstrukcí.

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., PELTOLA H., KELLOMAKI S., 2000: Comparison of two models for predicting the critical wind speeds required to damage coniferous trees. *Ecology Modelling*, 129, 1–23.

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.

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.

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

---

## **Předběžný termín obhajoby**

2017/18 LS – FLD

## **Vedoucí práce**

doc. RNDr. Tomáš Hlásny, PhD.

## **Garantující pracoviště**

Katedra ochrany lesa a entomologie

## **Konzultant**

Mgr. Jiří Trombik

Elektronicky schváleno dne 14. 12. 2018

**prof. Ing. Jaroslav Holuša, Ph.D.**

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 8. 2. 2019

**prof. Ing. Marek Turčáni, Ph.D.**

Děkan

V Praze dne 10. 04. 2019

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Stanovení kritické rychlosti větru v porostech smrku ztepilého (*Picea abies*) na základě výsledků tahových zkoušek vypracovala samostatně pod vedením doc. RNDr. Tomáše Hlásného, PhD., a použila jen prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů.

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

V.....dne.....

Podpis.....

## **Poděkování**

Ráda bych poděkovala panu doc. RNDr. Tomáši Hlásnému PhD., za vedení mé diplomové práce, cenné rady a připomínky. Dále všem členům týmu STROMOTRH, kteří se účastnili terénních prací a rodině za podporu.

## **Abstrakt**

Diplomová práce se zabývá možností odvozením kritické rychlosti větru, nutné ke vzniku poškození smrku ztepilého na základě výsledků tahových zkoušek. Tahové zkoušky probíhaly na 3 lokalitách v rámci České republiky tak, aby byla zastoupena charakteristická stanoviště typická pro pěstování smrku v České republice. Výzkumné práce probíhaly v období 2016 – 2018 a bylo změřeno celkem 120 stromů. Během výzkumných měření byly zdokumentovány kritické síly potřebné k vyvrácení či zlomení stromu, dále byly zaznamenány jednotlivé stromové a korunové charakteristiky, které byly následně použity ke stanovení kritické rychlosti větru na základě platných norem.

V rámci celého výzkumu byl převládajícím typem poškození zlom. Analýzou dat byl prokázán úzký vztah mezi hodnotami kritických sil a výčetní tloušťkou a štíhlostním koeficientem. Dopočítané hodnoty kritických rychlostí větru (CWS) signifikantně korelovaly s kritickou silou a s nárazovou plochou koruny. Nejméně odolné stromy se vyskytovaly na lokalitě Kutná Hora (průměrná CWS=21,43 m/s) na vodou ovlivněném stanovišti s poměrně štíhlými stromy a vysoko nasazenou korunou. V lokalitě Jihlava byla zaznamenána kritická rychlost větru 26,00 m/s, kde se vyskytovaly stromy s největší průměrnou výčetní tloušťkou (42,13 cm) i výškou (33,88 m). V lokalitě Nejdek byla průměrná hodnota CWS 26,81 m/s, zde se jednalo o více zavětvené stromy s poměrně velkou průměrnou výčetní tloušťkou (39,06 cm) a nízkým těžištěm (56,97 %).

Práce přispívá kvantitativními poznatky k problematice odolnosti smrku ztepilého a větrných polomů.

**Klíčová slova:** Smrk ztepilý, mechanická odolnost, kritická rychlost větru (CWS), abiotické poškození

## **Abstrakt**

The diploma thesis applies to the possibility of deriving the critical wind speed necessary for the causing damage of Norway spruce based on the results of tree pulling. The research was conducted at 3 different localities within the Czech Republic, which represent the typical location for spruce growing in the Czech Republic. The research took place between 2016 and 2018. The measurement was performed on 120 trees. The critical force, needed to uprooting or break stem was documented during the research measurements. The individual tree and crown characteristics, which were subsequently used to determine the critical wind speed based, were also documented.

The predominant type of damage was a break stem throughout the research. Furthermore, a close relationship between critical force, height/diameter ratio, DBH and the center of gravity of the tree height was demonstrated. From the analyses of the obtained values of critical wind speed, a strong bond between the critical force, the critical force of the crown impact area and CWS was found. The least resistant trees were found in the locality Kutná Hora (average CWS=21.43 m/s) in a water-affected habitat with relatively slender trees and a high laid crown. A critical wind speed of 26.00 m/s was recorded, where trees with the highest diameter (42.13 cm) and height (33.88 m) were found in the locality Jihlava. In the Nejdeč locality, the average CWS was 26.81 m/s, with more branched trees with a relatively large average DBH (39.06 cm) and a low center of gravity (56.97%).

The thesis contributes quantitative knowledge to the issue of windbreaks.

**Keywords:** Norway spruce, mechanical resistance, Critical wind speed (CWS), abiotic damage

## Obsah

1	Úvod.....	12
1.1	Cíle práce.....	14
2	Rozbor problematiky .....	15
2.1	Vítr .....	15
2.1.1	Větrné kalamity v Evropě.....	17
2.1.2	Historie polomů v Českých zemích.....	21
2.1.3	Recentní škody způsobené větrem na území ČR.....	22
2.2	Smrk.....	25
2.2.1	Smrk .....	25
2.2.2	Smrk ztepilý.....	25
2.2.3	Smrk jako hospodářská dřevina .....	27
2.3	Faktory ovlivňující stabilitu lesních porostů .....	29
2.3.1	Stabilita jedince .....	30
2.3.2	Druh dřeviny .....	31
2.3.3	Kořenový systém a půdní typ .....	31
2.3.4	Věk porostu .....	32
2.3.5	Štíhlostní koeficient .....	33
2.4	Modelování rizika porostů větrem .....	34
2.4.1	Empirické modely .....	34
2.4.2	Statistické modely.....	35
2.4.3	Mechanické modely.....	36
2.4.3.1	ForestGALES.....	37
2.4.3.2	HWIND.....	38
3	Metodika .....	40
3.1	Charakteristika lokalit.....	41



3.1.1	Jihlava – Sokolíčko a Hosov.....	41
3.1.2	Nejdek – Nové Hamry .....	43
3.1.3	Kutná Hora – Opatovice .....	43
3.2	Terénní destruktivní zkoušky .....	44
3.3	Přepočet kritických sil na CWS na základě parametrů stromu.....	48
3.4	Statistické zpracování dat .....	50
4	Výsledky.....	52
4.1	Závislost hodnot kritické síly a vybraných parametrů stromu .....	53
4.2	Přepočet kritických sil na kritickou rychlost větru .....	55
4.3	Porovnání naměřených hodnot mezi lokalitami.....	58
5	Diskuze .....	61
6	Závěr.....	64
7	Seznam literatury a použitých zdrojů .....	65
7.1	Tištěná literatura .....	65
7.2	Online literatura.....	68
8	Seznam příloh.....	70
9	Přílohy.....	71

## Seznam obrázků, tabulek a grafů

Obrázek č. 1 Větrná mapa ČR – průměrné rychlosti větru v m/s. Zdroj: Český hydrologický ústav.....	16
Obrázek č. 2 Objem poškozeného dřeva větrem v evropských zemích v letech 1850 - 2000, a upravený pro celou Evropu pro roky 1950 - 2000. Zdroj: Schelhaas et al., 2003.....	18
Obrázek č. 3 Počet silných větrných reportů na jednotlivých územích ČR během 19. století. Zdroj: Brázdil et al., 2004 .....	21
Obrázek č. 4 Evidované poškození porostů větrem, sněhem a námrazou v ČR v letech 1990 – 2016 Zdroj: Zpravodaj ochrany lesa, svazek 20/2017.....	23
Obrázek č. 5 Smrk ztepilý ( <i>Picea abies</i> ). Zdroj: <a href="https://deti.vls.cz">https://deti.vls.cz</a> .....	25
Obrázek č. 6 Zastoupení smrku ztepilého v Evropě. Zdroj: <a href="http://www.euforgen.org">http://www.euforgen.org</a> .....	28
Obrázek č. 7 Zastoupení smrku ztepilého v krajích dle Výsledků NIL2 (2011-2015) Zdroj: ÚHÚL .....	29
Obrázek č. 8 Studované lokality.....	40
Obrázek č. 9 Lokalita Jihlava – Sokolíčko. Zdroj: <a href="http://geoportal.uhul.cz/mapy/MapyOpri.html">http://geoportal.uhul.cz/mapy/MapyOpri.html</a> .....	42
Obrázek č. 10 Lokalita Jihlava – Hosov. Zdroj: <a href="http://geoportal.uhul.cz/mapy/MapyOpri.html">http://geoportal.uhul.cz/mapy/MapyOpri.html</a> .....	42
Obrázek č. 11 Lokalita Nejdek – Nové Hamry. Zdroj: <a href="http://geoportal.uhul.cz/mapy/MapyOpri.html">http://geoportal.uhul.cz/mapy/MapyOpri.html</a> .....	43
Obrázek č. 12 Lokalita Kutná Hora – Opatovice. Zdroj: <a href="http://geoportal.uhul.cz/mapy/MapyOpri.html">http://geoportal.uhul.cz/mapy/MapyOpri.html</a> .....	44
Obrázek č. 13 Schéma průběhu tahové zkoušky. Zdroj: Neperiodická zpráva za rok 2015, QJ1520006, Hodnocení rizika poškození lesních porostů větrem....	45
Obrázek č. 14 Měření koruny stromu. Foto: Eliška Pařízková .....	47
Obrázek č. 15 Ukázka zápisu zaznamenávaných veličin u koruny stromů. ....	48
Obrázek č. 16 Přehled směru trhání stromu a zaujatých větví.....	49
Obrázek č. 17 Počty vývrátů a zlomů na jednotlivých lokalitách. ....	52
Obrázek č. 18 Histogram naměřených hodnot kritické síly nutné ke vzniku poškození. Červená křivka naznačuje očekávané normální rozdělení.....	53

Obrázek č. 19 Vztah mezi kritikou silou a a) výčetní tloušťkou, b) štíhlostním koeficientem, c) výškou stromu a d) těžištěm.....	54
Obrázek č. 20 Vztah mezi kritickou silou, výčetní tloušťkou a štíhlostním koeficientem.....	55
Obrázek č. 21 Histogram vypočítaných hodnot kritické rychlosti větru (CWS). Červená křivka naznačuje očekávané normální rozdělení. ....	56
Obrázek č. 22 Vztah mezi kritickou silou a kritickou rychlostí větru (CWS).....	57
Obrázek č. 23 Vztah mezi CWS a jednotkou plochy koruny. ....	57
Obrázek č. 24 Porovnání proměnných v rámci lokalit. Tmavomodrý čtverec - průměr, světlemodrý obdélník - směrodatná chyba a svorka - směrodatná odchylka. Červeně jsou vyznačeny klíčové rozdíly v jednotlivých parametrech. ....	59
Tabulka č. 1 Beaufortova stupnice síly větru – působení na souši. Zdroj: Old.Chmi.cz2014.....	17
Tabulka č. 2 – Databáze největších větrných kalamit 1953 - 2014. Zdroj: <a href="http://www.iefc.net/storm/">http://www.iefc.net/storm/</a> .....	19
Tabulka č. 3 Historické záznamy největších větrných polomů na území České republiky. Zdroj: Lesnická práce.....	22
Tabulka č. 4 Celkový objem nahodilých těžeb dosažených v letech 2013 – 2017. Zdroj: Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství České republiky v roce 2017 .....	24
Tabulka č. 5 Přehled nejvíce postižených krajů větrem v letech 2010-2017, uvedená čísla jsou polomy v tis. m <sup>3</sup> dřeva. Zdroj: Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství ČR za roky 2010-2017.....	24
Tabulka č. 6 Přehled studijních lokalit.....	41
Tabulka č. 7 Naměřené a vypočítané parametry.....	46
Tabulka č. 8 Korelační matice vybraných proměnných. Červeně jsou zvýrazněny statisticky signifikantní korelace ( $p < 0,05$ ).....	53
Tabulka č. 9 Přehled průměrných hodnot za lokalitu a jejich směrodatné odchylky (v závorce). ....	58

## 1 Úvod

Lesy a lesní porosty se řadí mezi největší přírodní bohatství, tvoří důležitou a nezbytnou složku životního prostředí, mají nezastupitelnou funkci v krajině a slouží jako zdroj materiálu pro dřevařský průmysl.

Poškození lesů abiotickými faktory je velice častým fenoménem v zemích, kde je lesní hospodářství založeno na umělé obnově s jednou převažující dřevinou (Spiecker, 2000). Pěstování těchto dřevin často v nevhodných ekologických podmínkách narušuje jejich zdravotní stav a vytváří predispozici pro vznik biotických a abiotických škod (Waisová, 2012). Tato situace je běžná ve všech střeoevropských zemích, ale také ve Velké Británii, Austrálii, Novém Zélandě nebo Japonsku (Slodičák, 1996).

Mezi lety 1950 – 2000 bylo v Evropě každoročně průměrně poškozeno 35 milionů m<sup>3</sup> dřeva, z toho větrné kalamity způsobily více než polovinu těchto škod - téměř 53% evidovaného poškozeného dříví (Schelhass, 2003). Mezi další příčiny lesních katastrof se řadí oheň s 16%, sníh s 5% a na ostatní abiotické činitele připadá dalších 5% (Schelhass, 2003). Na biotické činitele pak připadá 21%.

V intenzivně řízených ekosystémech, jako jsou lesy v Evropě, je přirozená dynamika s nepředvídatelnými a nepravidelnými výskytů přírodních disturbancí nahrazena pravidelným režimem řízeným člověkem (probírky, prořezávky, umělá obnova) (Lassig, 2000), přes tuto skutečnost (a částečně kvůli ní) evropské lesy poměrně pravidelně postihují velkoplošné větrné kalamity, což dokazují např. větrné smrště z let 1990 a 1999, kdy bylo poškozeno 120 a 180 milionů m<sup>3</sup> dřeva (Lassig, 2000). Škody způsobené silným větrem v lednu roku 2007 a 2009 měly za následek jen ve střední a jižní Evropě přibližně 150 mil. m<sup>3</sup> dřeva (Peltola, 2010).

I v České republice jsou abiotičtí činitelé nejvýznamnějšími disturbačními činiteli lesa (Rychtecká a Urbaňcová, 2008). Mezi ty nejdůležitější rozhodně patří vítr, voda ve všech svých skupenstvích a lesní požáry. Bouřlivé větry se u nás řadí k těm, které zanechávají největší škody na lesních porostech. Působení těchto činitelů výrazně ovlivňuje i člověk hospodařením s nevhodnými

a pro daná stanoviště nepůvodními dřevinami, jako je v současnosti nejrozšířenější dřevina – smrk, ta je vzhledem ke svému kořenovému systému a parametrům koruny, k vyvrácení či zlomení mimořádně náchylná (Musil a Hamerník, 2003).

Větrné kalamity se vznikem polomů mají značný vliv na plynulost produkce dřeva a dřevařský průmysl, rovněž narušují a někdy zcela eliminují i mimoprodukční funkce lesa (ochranné prvky – půdy, proti erozi, stabilita krajiny či rekreace). Ochrana proti působení větru patří k jedněm ze zásadních cílů moderního lesnického hospodaření (Mikita, 2009).

Předložená diplomová práce se zabývá mechanickým modelem poškození smrku ztepilého a jeho odolnosti proti účinkům větru na základě jeho charakteristických vlastností. Riziko poškození je pak stanoveno na základě terénního měření kritické síly, přepočítané na kritickou rychlost větru (CWS). Zpracovaná data jsou součástí modelu, který má navrhnout co nejlepší způsob hospodaření se smrkovými porosty.

## 1.1 Cíle práce

- Ve vybraných lokalitách v rámci ČR provést měření odolnosti smrku ztepilého a na základě získaných údajů stanovit hodnoty kritických sil
- Kvantifikovat jednotlivé parametry stromu
- Přepočítat kritické síly nutné k poškození stromu na kritickou rychlost větru (resp. stanovit rychlost větru, která je na daný strom schopná vyvinout požadovaný tlak)

## 2 Rozbor problematiky

### 2.1 Vítr

Jako vítr se označuje horizontální přemísťování vzduchu vzhledem k zemskému povrchu. Horizontální složka větru vzniká působením horizontální složky síly tlakového gradientu a Coriolisovy síly. Vítr vzniká jako důsledek vyrovnávání tlakových rozdílů vzduchu nad zemí. Od místa s vyšším atmosférickým tlakem proudí vzduch do oblasti s nižším tlakem tak, aby docházelo k jejich vyrovnání. V důsledku otáčení Země však na toto proudění působí ještě Coriolisova síla, která ho odklání na severní polokouli doprava od původního směru (Vysoudil, 2013). Vertikální složka vektoru větru pak vzniká jako důsledek pohybu vzduchu v cirkulačních a frontálních systémech, konvence, obtékání překážek atd.

Vítr v atmosféře zvyšuje intenzitu výparu z vodní hladiny a zemského povrchu, a tak současně odnímá teplo, působí na objekty v krajinné sféře dynamickým tlakem, ovlivňuje vytváření sněhových závějí, tvorbu námrazy apod. V meteorologii a klimatologii charakterizujeme vítr rychlostí a směrem (Vysoudil, 2013).

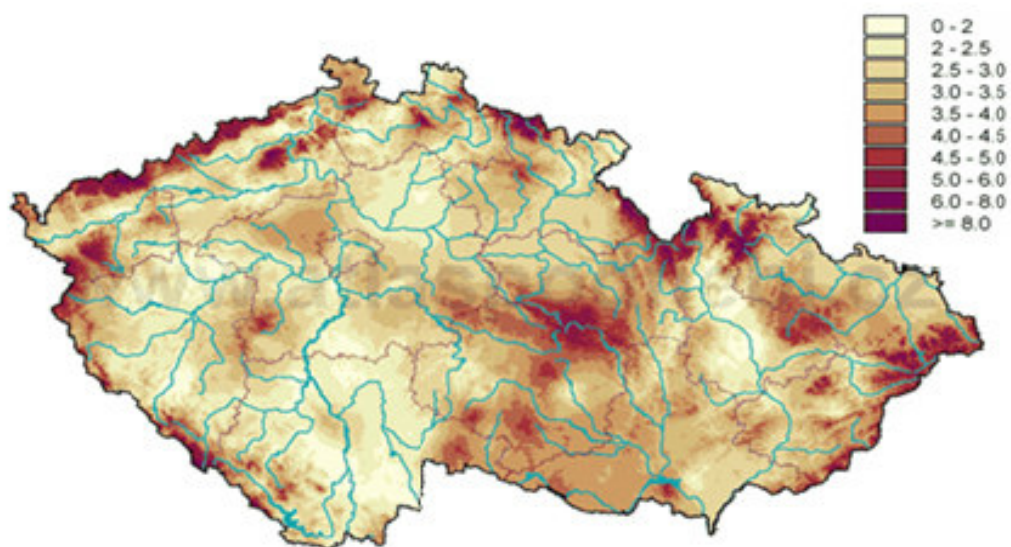
Rychlostí větru se rozumí průměrná rychlost větru za dobu 10 minut. Rychlost větru je udávána v m/s nebo v km/h ( $1 \text{ m/s} = 3,6 \text{ km/h}$ ) a je měřena anemometrem. Čidlo měřidla je zpravidla umístěno 10 m nad zemí tak, aby nebylo ovlivňováno terénními nerovnostmi. Obvyklý rozsah rychlosti větru je od 0 m/s do cca 100 m/s. Průměrná rychlost větru se pohybuje od 2 do 8 m/s v závislosti s nadmořskou výškou.

Směr větru je udáván v úhlových stupních. Rozsah je od  $0^\circ$  do  $360^\circ$ , kdy severní vítr označujeme  $360^\circ$ ,  $90^\circ$  je vítr východní,  $180^\circ$  vítr jižní, západní vítr je  $270^\circ$  a  $0^\circ$  bezvětří. K měření směru větru slouží větrné směrovky.

Nárazovitý vítr je krátkodobé (od 1 s do max. 20 s) zvýšení rychlosti větru o minimálně 5 m/s nad průměrnou rychlost větru, zpravidla nad hranici 12 m/s.

V České republice se mimořádně vysoké rychlosti větru vyskytují především na jaře a na podzim. V tomto období je zaznamenán nejčetnější výskyt tlakových níží postupujících východním směrem, tzn., že na našem území převládá západní směr větru pronikající od Atlantského oceánu. V letních měsících jsou vichřice součástí intenzivní bouřkové činnosti. Na našem území (Obrázek č. 1)

mohou nárazy větru dosahovat až hodnot v rozmezí 100 – 200 km/h (27,7 – 55,5 m/s), to znamená až síly orkánu. Například průměrná rychlost větru při orkánu Kyrill (2007), dosahovala až 72 km/h (20 m/s), ale v nárazech ojediněle až 216 km/h (60 m/s).



Obrázek č. 1 Větrná mapa ČR – průměrné rychlosti větru v m/s. Zdroj: Český hydrologický ústav

Škody na lesních porostech zpravidla způsobují bouřlivé větry, které jsou na Beaufortově stupnici (Tabulka č. 1) pod číslem 8 a výše, to znamená, že dosahují 60 km/h (16,7 m/s) a více. Největší a nejrozsáhlejší škody v lesích pak způsobují prudké, nárazovité větry s rychlostí nad 100 km/h (27,8 m/s).

Pro určování rychlosti – síly větru bez použití přístrojů slouží Beaufortova stupnice. Původní stupnice, kterou sestavil anglický admirál Francis Beaufort mezi lety 1805 až 1808, měla 13 stupňů od 0 do 12 a sloužila k odhadu síly větru působící na plachtoví. V roce 1810 přidal Francis Beaufort ke každému stupni i slovní popis. Pro použití mimo námořní sektor byla později upravena a v roce 1923 byla standardizována. Od poloviny 70 let se používá ještě dalších 5 stupňů Saffirovo – Simpsonovy hurikánové stupnice pro stanovení síly tropické cyklony.



Tabulka č. 1 Beaufortova stupnice síly větru – působení na souši. Zdroj: Old.Chmi.cz2014

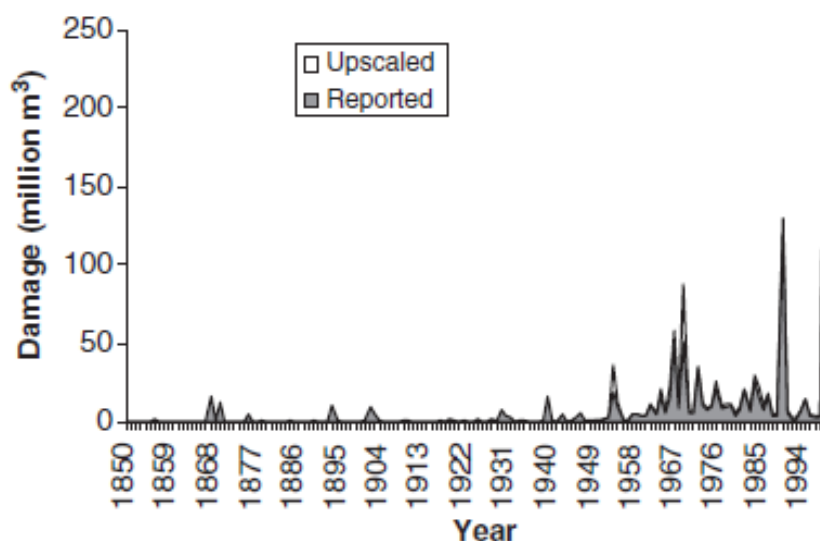
Beaufortův stupeň	Rychlost km/h	Název	Jak ho poznáme
0	< 1	bezvětrí	kouř stoupá kolmo vzhůru
1	1 – 5	vánek	směr větru poznatelný podle pohybu kouře
2	6 – 11	větrík	listí stromů šelestí
3	12 – 19	slabý vítr	listy stromů a větvičky v trvalém pohybu
4	20 – 28	mírný vítr	zdvihá prach a útržky papíru
5	29 – 39	čerstvý vítr	listnaté keře se začínají hýbat
6	40 – 49	silný vítr	telegrafní dráty sviští, používání deštníků je nesnadné
7	50 – 61	mírný vichr	chůze proti větru je nesnadná, celé stromy se pohybují
8	62 – 74	čerstvý vichr	ulamují se větve, chůze proti větru je normálně nemožná
9	75 – 88	silný vichr	vítr strhává komíny, tašky a břidlice se střech
10	89 – 102	plný vichr	vyvrací stromy, působí škody na obydlích
11	103 – 114	vichřice	působí rozsáhlá pustošení
12 až 17	> 117	orkán	ničivé účinky (odnáší střechy, hýbe těžkými hmotami)

### 2.1.1 Větrné kalamity v Evropě

Z ekonomického hlediska narušení hospodářských lesů větrem snižuje výnos z těžby dříví a naopak zvyšuje náklady na nahodilé těžby, obnovu a způsobuje další problémy v lesním hospodářství (Savill, 1983).

Větrné kalamity nejsou častým fenoménem jen v České republice, s následky bouřlivých vichřic se potýká celý evropský kontinent (Obrázek č. 2) i jiné oblasti světa (Severní Amerika, Japonsko, Nový Zéland apod.). Nejčastěji dochází k větrným kalamitám v severských zemích v pásmu boreálních lesů Finska, Švédska a Kanady. Hlavním důvodem je kombinovaný vliv sněhu, mrazu

a druhová skladba porostu s převahou jehličnatých dřevin náchylnějších ke zlomu či vyvrácení (Mikita, 2009).



Obrázek č. 2 Objem poškozeného dřeva větrem v evropských zemích v letech 1850 - 2000, a upravený pro celou Evropu pro roky 1950 - 2000. Zdroj: Schelhaas et al., 2003

Studie EFI „Past and future impacts of storms to European forests“ uvádí, že v současnosti je frekvence bořivých větrů poškozujících evropské lesy dvakrát až čtyřikrát četnější, než před sto lety (Tabulka č. 2), a s průměrně dvěma vichřicemi ročně působí přes 50 % živelných škod na lesích. (Schelhaas et al., 2003; Simanov, 2011) Podle výsledků analýzy jedenácti největších vichřic od roku 1950 byl vyvinut systém odvíjející se od velikosti poškozených podílů zásob, které vichřice způsobily. Rozsah škod je tedy možné předpokládat podle síly nárazovitého větru, kdy k extrémnímu poškození lesního porostu dochází při rychlosti vyšší, než 45 m/s. U vichřice s rychlostí větru do 30 m/s lze předpokládat pouze malý rozsah polomů. K nejvíce postiženým dřevinám pak patří smrk a topol. Studie předpovídá, že pokud se současná praxe pěstování lesa nezmění, zvýší se do konce století škody způsobené vichřicemi ještě 2 – 4x oproti současné úrovni (Simanov, 2011).

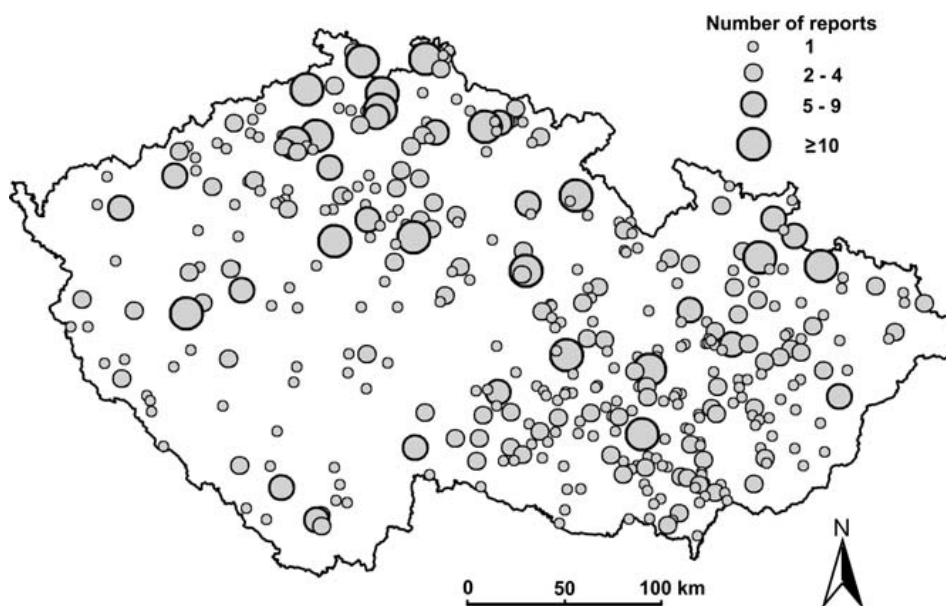
Tabulka č. 2 – Databáze největších větrných kalamit 1953 - 2014. Zdroj: <http://www.iefc.net/storm/>

Rok	Jméno bouře	Země	Primární poškození (Mm <sup>3</sup> )	Odhodované rostoucí zásoby (Mm <sup>3</sup> )	Odstranění (Mm <sup>3</sup> )	Maximální rychlost větru (m/s)
1953-01		UK	1,80	124,69	3,69	50
1954-01		Švédsko	18,45	2062,13	52,00	36
1956-01		Dánsko	3,50	42,05	2,05	
1956-01		Švédsko	0,20	2111,59	54,46	
1957-01		Švédsko	0,20			
1957-05		Ukrajina	1,20			
1962-01		Dánsko	2,00	43,59	1,98	
1962-03		Ukrajina	1,20			
1962-03		Švýcarsko	2,10	283,99	6,14	
1964-02		Švédsko	0,20			
1964-02?		Slovinsko	5,00	279,67		
1965-03		Slovinsko				
1967-01		Dánsko	0,83	43,80	2,22	
1967-01		Německo	11,30	1353,25	42,46	
1967-04		Estonsko				
1967-05		Dánsko	2,34	43,80	2,22	
1967-05		Švédsko	4,47	2326,78	74,07	41
1967-05		Rusko				
1969-03		Švédsko	42,20	2433,00	78,23	35
1972-06		Nizozemsko	1,00	22,46	1,40	
1972-06		Německo	18,00	1411,78	44,49	
1973-01		Nizozemsko	0,57	22,57	1,40	
1973-02		Rumunsko	3,10	22,65	24,86	
1973-02		Švédsko	1,60	2338,47	77,60	
1975-?		Rusko	22,40			
1981-03		Dánsko	3,23	45,30	2,00	
1982-04		Francie	12,00	1657,40	47,77	
1984-07		Belgie	1,22	93,22	3,35	
1985-01		Švédsko	1,50	2362,03	67,00	
1985-?		Česká republika	7,00	580,15		
1987-01		UK	3,91	228,81	6,69	41
1987-01		Francie	7,50	1862,46	53,10	40
1990-01		Francie	8,00	1985,50	56,30	
1990-01	Daria, Herta, Judith, Nana, Otilie, Polly, Vivian, Wiebke	Lucembur -sko	1,60	24,40	0,71	
1990-01		Dánsko	1,10	49,00	2,02	
1990-01		Belgie	5,50	126,72	4,35	
1990-01		Česká republika	11,30	596,11	13,03	
1990-01		Německo	72,50	2685,20	42,18	
1990-01		Švýcarsko	4,90	387,67	7,46	45

1990-01		UK	6,00	222,00	8,00	44
1990-01		Švédsko	0,60			
1999-02	Anatol	Švédsko	5,00	2928,10	72,95	37
1999-02	Anatol/ Carola	Dánsko	3,50	54,85	2,09	48
1999-04	Lothar	Německo	34,00	3288,96	48,15	48
1999-04		Litva	0,40	362,60	6,09	
1999-04		Balt	2,00			
1999-04		Francie	176,00	2105,97	62,44	55
1999-04		Švýcarsko	13,80	424,70	7,23	44
2000-01		Dánsko	3,60	55,50	2,10	
2001-02		Švédsko	2,10			
2004-02		Slovensko	5,40	451,59	7,14	
2005-01	Gudrun (Erwin)	UK	0,50	300,00	9,90	46
2005-01		Dánsko	2,00	58,20	1,84	46
2005-01		Švédsko	75,00	3233,00	78,13	42
2005-01		Lotyšsko	7,80	573,00	11,29	40
2005-01		Estonsko	1,00		5,73	37
2005-01		Litva	1,00			
2007-02	Per	Norsko		725,13		
2007-02		Švédsko	12,00	3266,00		38
2007-03	Kyrill	UK	0,10	300,00	9,46	44
2007-03		Nizozemsko	0,25	51,82		
2007-03		Německo	37,00	3356,05		
2007-03		Česká republika	12,00	705,45		
2007-03		Polsko	3,00	1724,25		
2009-02	Klaus	Francie	43,10	2407,00	43,00	
2009-02		Španělsko	1,10	689,00		55
2009-03	Quinten	Švýcarsko	0,2	449,38		31
2010-01	Xynthia	Francie	0,26			43
2010-01		Španělsko	0,25			
2010-01		Lucembur - sko	0,09			32
2010-01		Německo	3,59			
2010-01		Portugalsko				39
2010-01		Belgie				27
2013-01		Francie		2400		
2014-01		Irsko				

### 2.1.2 Historie polomů v Českých zemích

Z historických záznamů je zřejmé, že silné větry a vichřice nejsou na území České republiky ničím výjimečným. Informace lze nalézt již ve starých kronikách. První zmínky, i když pravděpodobně převzaté z kronik německých, jsou z roku 987 (Brázdil et al., 2004), věrohodnější je však až informace o tornádu v Praze z roku 1119. V průběhu 12. až 17. století došlo k řadě větrných kalamit, zvýšený výskyt byl zaznamenán na přelomu 16. a 17. století a pak mezi lety 1770 - 1830. Relativně přesně jsou uvedeny lokalizace místní i časové, méně přesné údaje lze najít o rozsahu poškození porostu. Podrobné údaje o vichřicích i silných větrech v českých zemích od roku 1500 do roku 1999 jsou přehledně zpracovány v publikaci *History of Weather and Climate in Czech Lands VI: Strong Winds* (Brázdil et al., 2004). Příkladem je mapa na Obrázku č. 3 znázorňující počet silných větrů na našem území během 19. století.



Obrázek č. 3 Počet silných větrných reportů na jednotlivých územích ČR během 19. století. Zdroj: Brázdil et al., 2004

Zkracující se intervaly mezi výskyty větrných kalamit ve druhé polovině 20. století (Tabulka č. 3) a stále se zvyšující škody vedly k tomu, že se problematikou polomů a jejich příčinami začalo zabývat více odborníků. Za zmínku stojí např. publikace *Ochrana proti polomům* (Vicena, 1964). Jedním z prvních odborníků, který se začal zabývat otázkou polomových kalamit a způsobům, jak jim předcházet, byl Gustav Vincent. Jeho publikace

Předcházíme polomům (Vincent, 1943) patří mezi první ucelené práce, které se věnují problematice polomů (Krejčí, 2013). Vítr je dlouhodobě hlavní příčinou narušení lesních ekosystémů v České republice (Holuša, 2018).

**Tabulka č. 3 Historické záznamy největších větrných polomů na území České republiky. Zdroj: Lesnická práce**

<b>Rok</b>	<b>Objem kalamitního dřeva v milionech m<sup>3</sup></b>
<b>1833</b>	3
<b>1868</b>	6
<b>1870</b>	6
<b>1929</b>	3
<b>1955</b>	3,5
<b>1976</b>	6
<b>1979</b>	6
<b>1984</b>	12
<b>1985</b>	5

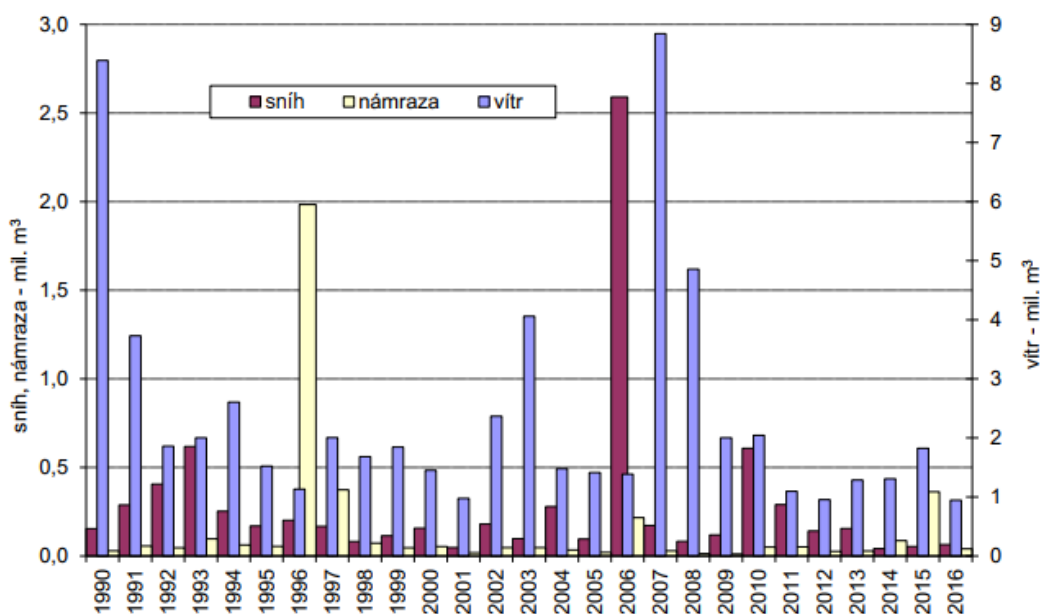
### **2.1.3 Recentní škody způsobené větrem na území ČR**

Od roku 1990 se Česká republika potýkala s několika větrnými kalamitami. Podle autorů Brázdil a Dobrovolný (2000) a podle Dobrovolný (2003) patří pak mezi největší větrnou kalamitu 20. století v Evropě vichřice z konce února 1990, kdy byly nejvíce postiženy lesy v jižních Čechách a v Brdech.

K dalším významným poškozením porostů větrem došlo v roce 2007 a 2008 (Obrázek č. 4), kdy v roce 2007 zasáhl střední Evropu orkán Kyrill a hned následující jaro 2008 mimořádně silná vichřice Emma. Obě kalamity se řadí jak z ekonomického hlediska, tak i množstvím poškozených porostů k těm nejničivějším.

Orkán Kyrill vznikl vlivem velké rozdílu tlaku mezi tlakovou výší nad jižní Evropou a tlakovou níží nad Skandinávským poloostrovem. Zasáhl celou střední Evropu - Česko, Německo, Polsko a Slovensko. Maximální nárazy naměřené na Sněžce dosáhly až 206 km/h (57 m/s), na území Šumavy 176 km/h (49 m/s). V Praze, Brně, Ostravě byla rychlost v noci z 18. ledna "jen" kolem 80 km/h (22 m/s). Škody na lesních porostech zasažených silným

nárazovým větrem byly na území České republiky vyčísleny v objemu na 10 mil. m<sup>3</sup> dřeva, nejvíce byla zasažena Šumava se 700 tis. m<sup>3</sup> dřeva.



Obrázek č. 4 Evidované poškození porostů větrem, sněhem a námrazou v ČR v letech 1990 – 2016  
Zdroj: Zpravodaj ochrany lesa, svazek 20/2017

V březnu 2008 zasáhla střední Evropu vichřice Emma jako důsledek tlakové níže nad jižní Skandinávií. Západnímu proudění větru bylo vystaveno území Beneluxu, Dánska, Německa, Rakouska a České republiky.

Ve srovnání maximální rychlosti větru byla sice slabší než Kyrill, ale v nížinách byly nárazy větru celý víkend vyšší. Také plošně zasáhla Emma větší území. Vítr pozvolna zesiloval, až dosáhl rychlosti 100 km/h (27,8 m/s). V nárazech například na Sněžce až 169 km/h (47 m/s). V lesích spravovaných státem způsobila vichřice Emma odhadem jen třetinové škody než orkán Kyrill, zasáhla ale větší území.

Nahodilé těžby způsobené abiotickými a biotickými činiteli představují v posledních dekádách průměrně 2/5 z celkové těžby dřeva v České republice a z toho 50 – 60% ročně je způsobeno silným větrem (Obrázek č. 4). Celkový objem nahodilých těžeb dosažených v letech 2010 – 2017 je uveden v Tabulce č. 4.

Tabulka č. 4 Celkový objem nahodilých těžeb dosažených v letech 2013 – 2017. Zdroj: Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství České republiky v roce 2017

rok	objem NT v mil. m <sup>3</sup>	z toho podíl větru v tis. m <sup>3</sup> a v % z celkového objemu NT
2010	4,1	2870 = 70%
2011	2,4	1680 = 70%
2012	2,9	1200 = 70%
2013	2,5	1875 = 75%
2014	2,6	1898 = 73%
2015	4,2	2538 = 65%
2016	3,5	1352 = 38%
2017	4,8	2957 = 62%

K nejvíce zasaženým oblastem větrnými polomy patří lesy v horských hraničních pásmech – Krušné hory, Šumava, Krkonoše, Beskydy a Jeseníky, ve střední části Čech pak Brdy. Tomu odpovídají i data v Tabulce č. 5, kde je přehled nejpostiženějších krajů za poslední roky.

Tabulka č. 5 Přehled nejvíce postižených krajů větrem v letech 2010-2017, uvedená čísla jsou polomy v tis. m<sup>3</sup> dřeva. Zdroj: Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství ČR za roky 2010-2017

Kraje	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Vysočina	neudán	neudán	neudán	340	167	286	neudán	287
Jihočeský	neudán	240	214	285	199	646	166	474
Moravskoslezský	169	418	277	224	351	304	175	362
Karlovarský	288	349	189	184	neudán	254	110	neudán
Středočeský	neudán	neudán	neudán	249	116	293	106	261
Plzeňský	306	291	137	227	147	421	122	neudán
Olomoucký	309	179	173	146	377	326	240	469
Zlínský	neudán	neudán	111	neudán	261	neudán	neudán	neudán
Jihomoravský	413	neudán	neudán	neudán	134	306	neudán	neudán



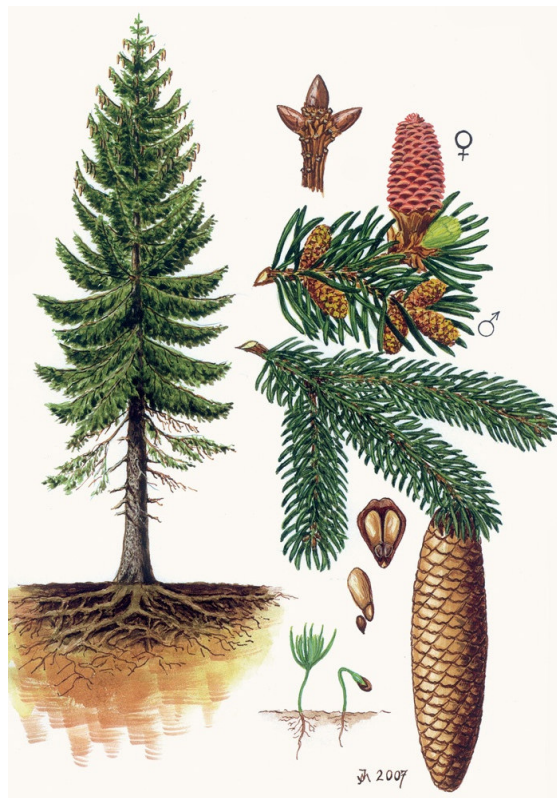
## 2.2 Smrk

### 2.2.1 Smrk

Taxonomicky se smrk řadí do nahosemenných (*Pinophyta*), oddělení jehličnanů (*Pinopsida*), řádů borovicotvarých (*Pinales*), čeledi borovicovité (*Pinaceae*) a rodu smrk (*Picea*). Rozlišuje se 34 - 40 druhů. (Musil a Hamerník, 2003). Mezi nejrozšířenější druhy rodu smrk patří, kromě nejvýznamnějšího smrku ztepilého (*Picea abies*, (L.) H. Karst), například: smrk pichlavý (*Picea pungens*, ENGELM.), smrk omorika (*Picea omorika* (PANČIČ) PURKYNĚ), smrk sitka (*Picea sitchensis* (BONG.) CARRIERE), smrk východní (*Picea orientalis* (L.) LINK) a další.

### 2.2.2 Smrk ztepilý

Smrk ztepilý (Obrázek č. 5) je vždyzelený jehličnatý strom, dorůstající výšky až 70 m (většinou však jen 30-50 m), (Kremer, 1995). Výčetní tloušťka se pohybuje mezi 1 - 1,5 (-1,82) m. V průměru se smrky dožívají 300 - 400 (600) let (Musil a Hamerník, 2003). Mýtní věk pro smrk je dle lesního zákona č. 289/1995 Sb. 80 let.



Obrázek č. 5 Smrk ztepilý (*Picea abies*). Zdroj: <https://deti.vls.cz>

Smrk je stinná až polostinná dřevina, v mládí snáší zástin. Má vyšší nároky na vlhkost půdy a vzduchu. Na půdu a geologické podloží velké nároky nemá. Nejlépe se mu daří ve vyšších polohách s ročními srážkami nad 700 mm. Na severních svazích prospívá ve středních polohách, v nížinách preferuje dna údolí, kde je dostatečná vlhkost.

Smrk ztepilý tvoří kuželovitou (pyramidální) korunu s pravidelnými přesleny. Má velmi variabilní větvení. Na horských lokalitách mohou vinou častých větrů z převážně jednoho směru vznikat jednostranné vlajkové koruny.

Jehlice jsou tmavě zelené, až 2 cm dlouhé. Na svislých výhonech a větévkách jsou radiálně uspořádané. Na stromě vytrvávají jehlice 6-9 let, při imisním zatížení přiměřeně méně.

Smrk kvete v průběhu dubna – června. Šišťice samčí jsou červené, dlouhé až 2 cm, šišťice samičí jsou červené nebo zelené, dlouhé do 6 cm. Šišky jsou tmavě hnědé, válcovitě-vejcovité, 6 – 16 cm dlouhé, 3 – 4,5 cm široké. Dozrávají na podzim prvního roku a potom, co se otevřou, opadávají celé (Musil a Hamerník, 2003). Smrk začíná v porostech plodit v průměru kolem 60 roku. Plodnost se opakuje v intervalu každých 4 - 5 let.

Smrkový kmen je štíhlý až válcovitý s často značně vyvinutými kořenovými náběhy. Kůra je zpočátku světle hnědá, tenká, šupinatá, ve spodní části kmene bývá podélně rozpraskaná. Proměnlivost kůry je veliká a vzrůstá se stářím.

Kořenový systém smrku je považován za druh s plochým kořenovým systémem s bohatě větvenými vedlejšími kořeny, které jsou nedostatečně zakořeněné v půdě. Nejsnadněji z našich dřevin podléhá bořivým větrům. Dle B. Konopyky (2001) je smrk považován za nejvíce větrem ohrožený taxon. Nejlabilnějšími jsou smrkové monokultury na podmáčených půdách. Pokud je půda však promrzlá, dochází spíše ke zlomům než vývratům (Musil a Hamerník, 2003).

Smrk ztepilý je nejpolymorfnějším taxonem svého rodu, navíc s relativně rozsáhlým areálem. Smrk se skládá v rámci většího areálu z geneticky odlišných, geograficky diferencovaných a ekologicky přizpůsobených ras (Musil a Hamerník, 2003). V rámci České republiky rozlišujeme 3 ekotypy smrku ztepilého – vysokohorský, horský a chlumní. Variabilitu smrku najdeme

například ve tvaru koruny, větvení, jehlicích, formách semenných šupin, velikostí šišek.

Smrk je, vzhledem ke svým růstovým vlastnostem, nejběžněji využívanou hospodářskou dřevinou v České republice. Dřevo smrku je bledě nažloutlé, měkké, lehké, pružné a pevné, snadno opracovatelné s drobnými pryskyřičnými kanálky a vícevrstevnými dřevnými paprsky. Jádru není zřetelně odlišeno. (Musil a Hamerník, 2003). Vhodným uskladněním velmi snadno vysychá.

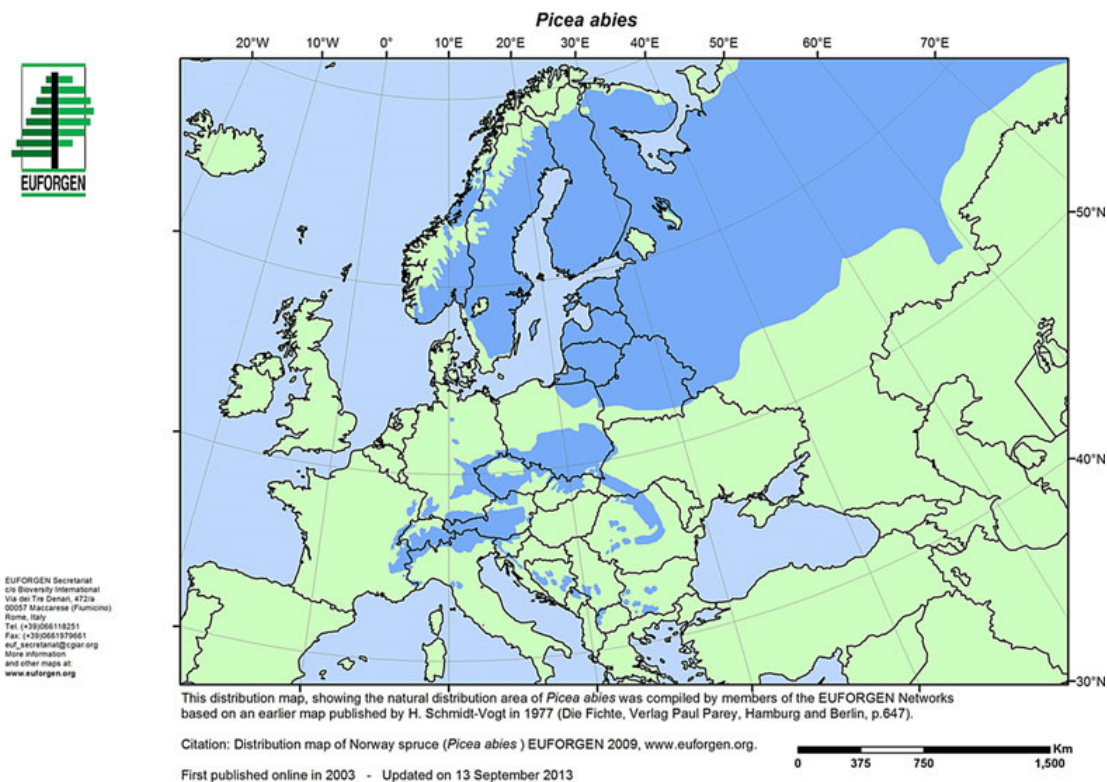
Má všestranné využití. Využívá se ve dřevozpracujícím průmyslu, truhlářství, nábytkářství, stavitelství. Smrková vláknina je nezbytná pro papírenský průmysl. Rezonanční dřevo se používá při výrobě hudebních nástrojů, zejména vrchní desky smyčcových a strunných nástrojů. Podléhá ale značnému množství kritérií (roční přírůstek dřeva, rovnost vláken apod.). Využívá se i jako palivové dřevo. Smrky do výšky 250 cm jsou vhodné jako vánoční stromky.

Tím, že vysazování smrku neprobíhalo vždy jen na přirozených a vhodných stanovištích, dochází v mnoha českých oblastech v posledních desetiletích k jeho odumírání, které souvisí s více faktory (Křístek et al., 2007), např.: výsadbou na nevhodných lokalitách, abiotickými činiteli kterými jsou periody sucha, poškozování větrem, sněhem a biotickými činiteli. Těmi jsou houbové infekce, podkorní a listožravý hmyz.

### **2.2.3 Smrk jako hospodářská dřevina**

Smrk ztepilý je celkově nejběžnější a ekonomicky nejdůležitější hospodářská dřevina střední a severní Evropy a pro svoje dobré produkční vlastnosti patří k oporám dřevařského průmyslu.

Smrk ztepilý je rozšířen po celé severní polokouli, avšak jeho původním stanovištěm jsou především vysoké polohy Evropy s přesahem do Asie. Smrkovými porosty jsou pokryté téměř celé skandinávské státy, Baltské státy a Bělorusko a severní část evropského Ruska (Obrázek č. 6). Zde dosahuje zastoupení 68% (Švédsko) až 73% (Finsko). Poměrně vysoké procento zastoupení smrku má i Slovinsko (62%).



**Obrázek č. 6 Zastoupení smrku ztepilého v Evropě. Zdroj: <http://www.euforgen.org>**

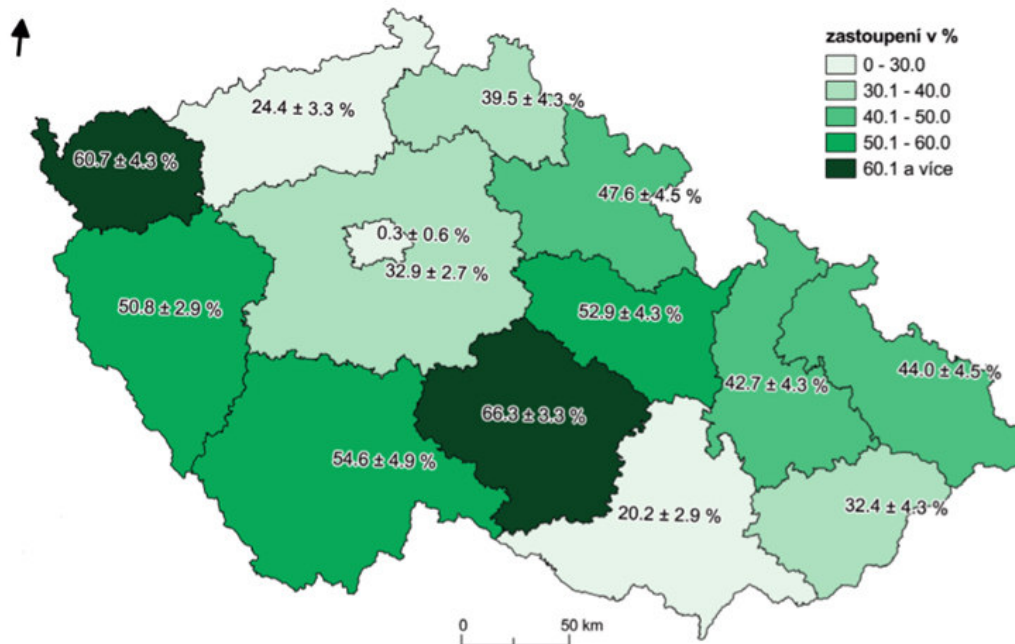
Cílené pěstování smrku ve střední Evropě vedlo k zavádění této dřeviny daleko mimo její původní rozšíření (Euforgen, 2013), kde je smrk uměle vysazován již od 16. století (Trnka, 2018). V lesním hospodářství je pěstován i v oblastech oceánských (mimo svůj přirozený areál) – např. ve Velké Británii, Irsku, Islandu a části Severní Ameriky.

I v České republice patří smrk mezi nejdůležitější hospodářské dřeviny. Jeho jediným domácím zástupcem tohoto rodu u nás je smrk ztepilý (Musil a Hamerník, 2003). Původem patří na horské svahy, roste však už od nížin, kde často vytváří rozsáhlé monokultury. V nížinách roste především z lesohospodářských důvodů, tzn., že do těchto lokalit byl uměle vysazen.

Je rozšířen na celém území České republiky a zaujímá 50,3%, (Mze, 2017) celkové plochy lesa, převážně ve stejnověkových porostech. V současnosti je zastoupen na více jak 1 308 432 ha z celkové půdní porostní plochy (Mze, 2017), (Obrázek č. 7). Přirozeně se vyskytuje v lokalitách s vyšší půdní vlhkostí, kyselých půdách, rašeliništích, horských lesích a inverzních údolích.

Přirozené zastoupení smrků na našem území je 11,2% a doporučené zastoupení smrku je v současnosti 36,5% (Mze 2017).

## ZASTOUPENÍ SMRKU ZTEPILÉHO



Obrázek č. 7 Zastoupení smrku ztepilého v krajích dle Výsledků NIL2 (2011-2015) Zdroj: ÚHÚL

2016

### 2.3 Faktory ovlivňující stabilitu lesních porostů

Stabilita stromů proti větru závisí jak na vlastnostech jednotlivých stromů a porostů, tak i topografických faktorech, klimatu, typu půdy, obsahu vody v půdě (Nielsen, 1995; Ruel, 2000). Stabilita porostů je zpravidla charakterizována dřevinným složením (např. Gardiner a Quine, 1994), kotvící silou kořenů (např. Nielsen, 1995) ve vztahu s půdními podmínkami (např. Stathers et al., 1994), věkem stromu (např. Lekes a Dandul, 2000; Kuboyama et al, 2003) a štíhlostním koeficientem, (např. Cremer et al., 1982; Wilson a Baker, 2001). Tyto charakteristiky odrážejí zranitelnost stromu vůči větru a mohou být ovlivněny lesním hospodařením, jako jsou prořezávky, probírky a těžba, zatímco environmentální faktory jako je lokální klima a topologie větru, nemohou být řízeny či měněny (Kamimura a Shirashi, 2007).

Není snadné určit, který z faktorů je nejvýznamnější příčinou ovlivňující stabilitu porostů vůči větru, protože tyto faktory jsou obvykle vzájemně provázané. Je proto obtížné vybrat si z nich jednotlivé činitele, na které je třeba se zaměřit při stanovení rizika vzniku poškození větrem (Cremer et al., 1982). Vysoká rychlost

větru může snadno zničit jakýkoliv strom. Jinými slovy, vlastnosti stromů nemají žádný vztah k poškození větrem v případě jeho drasticky se zvyšující rychlosti (Talkkari et al., 2000). Na druhé straně, několik studií naznačuje, že katastrofický vítr ne vždy ovlivňuje všechny porosty v zasažených oblastech (Hokkaido Forest Products Research Institut, 2005).

### 2.3.1 Stabilita jedince

Stabilita obecně je schopnost tělesa se po vychýlení vracet do původní polohy. Stabilita stromu je definována vztahem mezi působícím zatížením a pevností kořenů, kmene a větví stromu (Praus, 2015). Mezi nejdůležitější zdroje zatížení působící na porosty patří vítr. Odolnost stromu proti působení větru, tedy mechanickému namáhání, je závislá především na materiálových vlastnostech dřeva, kde se tuhost a pevnost řadí k těm nejdůležitějším. Ovlivněna je velikostí a tvarem koruny, rozložením větví, množstvím kořenů a vlastnostmi půdy. K selhání dojde v případě, že mechanické zatížení působící na strom překročí pevnost jeho materiálu. Záleží na velikosti zatížení a dostatečnou nebo nedostatečnou pevností a tuhostí stromu (Praus, 2015).

Rozlišují se dva základní typy selhání stromu – zlom a vývrát (Praus, 2015). K vývratu dochází v případě, kdy celkový moment síly způsobený větrem převyšuje pevnost kořenového systému (Gardiner et al., 2000). Jeho pevnost závisí na typu půdy, obsahu vlhkosti, objemu kořenů a kořenových tvarech (Cremer et al., 1982; Gardiner a Quine, 1994). Odolnost vůči vyvrácení je limitována mechanickou pevností ukotvení stromu a ta je definována množstvím kořenů (Danjon et al., 2005), prostorovým uspořádáním kořenového systému a vlastnostmi půdy.

Ke zlomení kmene dochází tehdy, když je tlak nebo tlak v tahu způsobený ohybovým momentem silnější, než je odpor dřevního vlákna (Gardiner a Quine, 1994) a k poškození může dojít v jakékoliv výšce kmene (Peltola et al., 1997). Kmeny poškozené hnilobou, hmyzem atd. jsou častěji zlomené (Chiba, 2000). Odolnost stromu je v tomto případě odvislá od vlastností dřevní hmoty, rozložením větví v koruně stromu a jejím tvarem.

### 2.3.2 Druh dřeviny

Druhovému zastoupení dřevin má podstatný vliv na odolnost porostů proti větru (Pasztor et al., 2014). Náchylnost ke škodám způsobených větrem je ovlivněna různými typy dřevin a jejich vlastnostmi (Isamoto et al., 1992; Valinger et al., 1993; Gardiner et al., 1994). Každá dřevina má jiné charakteristické vlastnosti ovlivňující statiku stromu. Mezi nejdůležitější patří vlastnosti dřevní hmoty, tvar kořenů a jejich hloubka zakořenění, tvar kmene a tvar korun. Podle Savilla (1983) nejvíce inklinují k poškození větrem smrk, borovice a jedle.

Stabilita stromu není vždy závislá jen na druhu stromu, ale souvisí například i s hloubkou kořenů a typem půdy. Studie Nicoll et al., 2006 ukázala, že stromy s hlubšími kořeny (více než 80 cm) byly stabilnější než stromy s mělkými kořeny (méně než 80 cm).

Lesní porosty nejsou jen jednoduchá seskupení stromů, ale složitý organický celek, v jehož rámci se vytváří prostředí i určité růstové podmínky. Jednotlivé stromy se navzájem ovlivňují. Celková odolnost porostu je proto výsledkem vzájemného působení všech statických prvků. Také vliv zastoupení dřevin není možné odvodit jen podle údajů o statických vlastnostech jednotlivých dřevin (Vicena et al., 1979).

### 2.3.3 Kořenový systém a půdní typ

Stabilita stromu vůči větru závisí na ukotvení kořenů v půdě stejně jako na pevnosti kmene. U zdravých stromů jsou zpravidla koruna, tuhost kmene a kořenový systém dostatečně vzájemně propojeny (Mattheck et al., 1995). Pevnost kořenového systému společně s kmenem stromu odolávají tahové síle a ohybovému momentu, které vznikají silou větru do koruny stromu (Papesch et al., 1997; Mitchell, 2000). Působením větru na korunu stromu vzniká tahová síla a ohybový moment, kterému vzdoruje vzájemně propojený kmen stromu společně s kořenovým systémem a dojde k rozhoupání stromu, které zasáhne i kořenový systém. Vzniklá pohybová energie je většinou využita k návratu stromu do původní polohy, zatímco zbytek je rozptýlen formou tepla do okolního vzduchu (O'Sullivan et al., 1993).

Důležité je rozložení celého kořenového systému. Způsob kotvení kořenů závisí i na typu půdy a velikosti kořenové biomasy (Nielsen, 1995). Po rozvoji svislých

kořenů dojde následně k rozvoji kořenů bočních. Jejich růst je však omezen sousedními stromy (Fraser et al., 1967). Rozšíření kořenového systému souvisí také s hmotností kmene. S rostoucí vahou - tíhou kmene se zvyšuje i pevnost půdy ve smyku. Výsledkem je, že tenké a lehké stromy vyžadují větší kořenovou plochu k ukotvení kořenů než velké stromy (Mattheck et al., 1995).

Odolnost kořenového systému je zvláště závislá na množství vody v půdě. Větší pravděpodobnost poškození větrem je tedy ve vlhkých než v suchých podmínkách a spíše na minerální než na organické půdě (Stathers et al., 1994; Mitchell et al., 2001).

#### 2.3.4 Věk porostu

Škody způsobené větrem mají větší dopad spíše na starší než mladý porost. Jinými slovy, pravděpodobnost poškození porostu se zvyšuje s jeho věkem (Lekes a Dandul, 2000; Kuboyama et al., 2003). Příkladem je Japonsko, kde je u stromů starších než 41 let zvýšené riziko polomů z větrných kalamit (Kuboyama et al., 2003). Takové poškození je přímo úměrné změnám ve struktuře stromů, jako jsou změny výšky a výčetní tloušťky a velikost koruny.

Studie borovice montereyské (*Pinus radiata* D. Don) na Novém Zélandu zkoumala a potvrdila významný vztah mezi maximem odporového ohybového momentu a výškou stromu, výčetní tloušťkou a objemem kmene. (Papesch et al., 1997). Navíc model pružnosti (Modulus of elasticity – MOE) kmene se mění s věkem stromu (Kato a Nakatani, 2000). Stromy středních a velkých rozměrů jsou proto častěji poškozovány větrem. Konkrétně stromy středních velikostí mají vysokou pravděpodobnost zlomení kmene, zatímco riziko vyvrácení se zvyšuje s velikostí stromu (Wolf et al., 2004).

Ekologicky relativně nejméně stabilní, minimálně odolné vůči větru a sněhu a maximálně náchylné ke katastrofickému rozpadu je stadium zralosti - „optima“, a naopak nejvyšší stabilitou se vyznačuje stadium dorůstání s nejvyšší výškovou, tloušťkovou a prostorovou diferenciací. Větší věkové rozdíly znamenají větší diferenciaci stromů i porostních částí lesa a tím i jeho vyšší stabilitu. Větší trvalá přítomnost mladších a mladých vývojových stadií v různověkém lese prohlubuje a prodlužuje trvání resilience, která klesá s věkem (Košulič st., 2006).



### 2.3.5 Štíhlostní koeficient

Navzdory obtížnosti výběru jediného faktoru, na němž lze založit měření rizika poškození větrem, se štíhlostní koeficient často používá jako významný ukazatel (Stathers et al., 1994; Mitchell, 2000).

Štíhlostní koeficient charakterizuje poměr mezi výškou ( $h$ ) a výčetní tloušťkou kmenu ( $d_{1,3}$ ) stromu, která patří mezi jeho základní veličiny. Jeho hodnota je zpravidla menší než  $1,00 \text{ m.cm}^{-1}$ . Štíhlostní koeficient je vhodným a často používaným ukazatelem stability stromu proti škodám způsobenými sněhem, větrem apod. Čím vyšší štíhlostní koeficient je, tím jsou stromy méně odolné. Jeho velikost závisí na hustotě porostu. Štíhlostní koeficient velmi úzce souvisí s tvarem kmene a s velikostí koruny (Sequens, 2007).

Obecně platí, že stromy s nízkým štíhlostním koeficientem nemají vysoké riziko poškození větrem (Valinger a Fridman, 1997). Strom s větším štíhlostním koeficientem než 1 má sníženou stabilitu. U stromů s menším štíhlostním koeficientem než 0,60 je snížené riziko zlomení kmene (Stathers et al., 1994; Lekes a Dandul, 2000). Zejména štíhlý smrk ztepilý a borovice lesní jsou náchylné ke zlomení kmene způsobného větrem a sněhem (Peltola et al., 1997; Wilson a Baker, 2001).

Hodnota štíhlostního koeficientu se mění s rostoucím věkem, avšak může být ovlivněna konkurencí okolních stromů. Ve velmi hustých porostech zůstávají často stromy s vysokým štíhlostním koeficientem, které budou zranitelné proti větru. Pravděpodobnost poškození větrem naznačuje pozitivní lineární korelace se štíhlostním koeficientem (Cremer a kol. 1982). Stromy vysázené s větším odstupem mají nízký štíhlostní koeficient. Z toho vyplývá, že sázení stromů s většími rozestupy může snížit riziko poškození větrem (Gardinera a Quine 2000).

Na druhou stranu se nelze spoléhat pouze na štíhlostní koeficient jako ukazatel odolnosti proti větru po prořezávce (snížení hustoty porostu). Ve skutečnosti dochází ke snížení tohoto koeficientu až následně během několika let, jako důsledek ovlivňování i okolním porostem. V průběhu 3 - 4 let po prořezávce (snížení hustoty porostu) se vzrůst porostu každým rokem snižuje a naopak u něj dochází ke zvýšení radiálního růstu (Mitchell, 2000). Je však

zřejmé, že okamžitě po prořezávce jsou řídké osázená stanoviště velmi citlivá na poškození větrem (Cremer a kol. 1982; Savill 1983; Isamoto a Takamiya 1992; Stathers a kol. 1994; Ruel a kol. 2000). Studie Aoyagi a Matsui (2003) vykazala významné škody na jedli sachalinské (*Abies sachalinensis*) během prvních 5 let po prořezávce (snížení hustoty porostu). Kromě toho Šimizu et al., (1982) nezaznamenal žádný vztah mezi štíhlostním koeficientem stojících japonských modřínů a míře jejich poškození. Ačkoli štíhlostní koeficient a kuželovitý tvar kmene může být vhodným ukazatelem pro míru poškození větrem, v některých případech je nezbytné použít i jiné ukazatele pro posouzení škod, například v době od prořezávky (snížení hustoty porostu) nebo při existenci jiných faktorů se silným dopadem.

## **2.4 Modelování rizika porostů větrem**

Pravděpodobnost a intenzita působení abiotických škod mohou být hodnoceny různými metodami. Podle použitých postupů mohou být rozděleny do třech kategorií: pozorovací/empirické, statistické a mechanické (Kamimura a Shirashi, 2007). Všechny modely však potřebují podrobná data o poškození lesních porostů a jednotlivých stromů. Získání takových dat je časově i finančně náročné a může následovat až po vzniku poškození. Většina studií proto bere v úvahu pouze poškození vedoucí k odumření stromů (Peltola et al., 2000; Klopčic et al., 2009; Gardiner a Quine, 2000) nebo intenzitu poškození (Jalkanen a Matilla, 2000), často jen na základě evidence nahodilých těžeb lesním provozem. Situace, kdy strom přežívá (korunový, vrcholový zlom), stabilita a kvalita je narušena, nebyla studována (Křístek et al, 2012).

### **2.4.1 Empirické modely**

Empirické modely jsou založeny především na terénních pracích a (nebo) historických záznamech (literárních přehledech), ve kterých jsou vymezeny rizikové oblasti. Metody rozdělují lesní porosty nebo oblasti do rizikových tříd (Hanewinkel et al., 2004). Konkrétněji, pozorovací metody popisují porosty a (nebo) oblasti spojené s vyšším výskytem poškození. Empirické metody jsou obecně vyjádřeny jako jednoduchá regresní analýza faktorů, např. topologických a biologických faktorů. V důsledku toho jsou tyto metody silně spojeny s další prezentovanou metodou – statistickou (Kamimura a Shirashi, 2007). Metody jsou užitečné, pokud jsou podmínky komplexní ve struktuře

a složení jako je topografie a druhy dřevin (Mitchell et al., 2001). Je tedy obtížné předvídat poškození větrem tam, kde model není parametrizován.

Booleova metoda je jednou z empirických metod, které indikují pravděpodobnost poškození. Metoda umožňuje snadno pochopit ohrožení porostů, na druhé straně nemůže reprezentovat větrné nebezpečí a neposkytuje statistickou jistotu (Gardiner a Quine, 2000). Obecně platí, že současné hodnocení ohroženosti spoléhá spíše na odborné znalosti než na modelové studie (Gadow, 2000). Moore a Mahuire (2004) uvedli, že mnoho hodnocení založených na empirických přístupech, vykazují pouze kvalitativní aspekty škod. Naproti tomu modely využívající mechanické informace mohou poskytnout kvantitativní posouzení procesu poškození větrem (Moore a Maguire, 2004). Empirické modely tedy předkládají srozumitelné výsledky, ale nedokážou detailně statisticky zhodnotit způsobené škody (Gardiner a Quine, 2000).

#### **2.4.2 Statistické modely**

Statistické modely analyzují a prognózuji škody vzniklé za dlouhé časové období pomocí regresních analýz a modelů, umožňujících hodnotit pouze jednotlivé porosty (Kamimura a Shirashi, 2007). Modely obecně vyžadují historické informace o poškození větru a (nebo) klasifikaci zranitelnosti (Gardiner et al., 2000; Hanewinkel et al., 2004). Pokud by byly k dispozici dostatečné údaje, metody by nám umožnily snadno posoudit konkrétní porost. Jeden z typických přístupů zahrnuje stanovení pravděpodobnosti podle věkových tříd každého typu porostu (Hanewinkel et al., 2004). Jalkanen a Mattila (2000) vyvinuli logistický regresní model pro předpovídání škod sněhem a větrem s využitím údajů z NIL (Národní inventarizace lesů) ve Finsku. Existuje omezení statistických metod – vytvoření spolehlivých statistik vyžaduje dlouhodobé soubory dat (které je často obtížné získat), jejichž množství významně ovlivňuje metodu, za třetí statistické přístupy neobjasňují vztah mezi parametry stromů a zranitelností vůči větru (Gardiner et al., 2000). To znamená, že statistický model vytvořený pro konkrétní porost, by nemohl být využit pro další porosty (Cucchi et al., 2005). Statistické metody neindikují vysoký výskyt škod v porostu, ale absolutní rizika poškození u jednotlivých lesních porostů (Jalkanen a Mattila, 2000). Ačkoliv statistické metody jsou užitečné při predikci

rizika poškození větrem konkrétního porostu, použití statistických metod je omezené z hlediska dostupnosti dat a modelové obecnosti (Kamimura a Shirashi, 2007).

### 2.4.3 Mechanické modely

Mechanická metoda je integrovaný přístup modelu hodnocení rizika poškození větrem a modelu proudění vzduchu. Mechanický model předpovídá kritickou rychlost větru vedoucí k vyvrácení nebo zlomení kmene a model proudění vzduchu odhaduje větrné klima na jakémkoli daném místě (Kamimura a Shirashi, 2007). Poškození větrem je pravděpodobné, pokud místní rychlost větru překročí kritickou hodnotu. Predikce rizika se provádí s ohledem na charakteristiky chování stromů a porostů v silném větru a kořenového systému v půdě (Gardiner et al., 2000). Metody zahrnují kvantitativní analýzu, zatímco mnoho studií poškození větru poskytuje pouze kvalitativní výsledky. Částečně je to proto, že většina výzkumných pracovníků v oblasti hodnocení rizika poškození větrem spoléhá většinou jen na empirické informace (Moore a Maguire, 2004).

Mechanické metody můžeme definovat jako deterministické pravděpodobnostní přístupy, které se vyhýbají omezením booleovské metody, včetně nadměrného zjednodušení s využitím některých z faktorů statistického postupu (Gardiner a Quine, 2000). Výhodou mechanických modelů hodnocení rizika poškození větrem je možnost přizpůsobení modelu několika situacím (Gardiner et al., 2000). Metody by navíc mohly poskytnout návrhy vhodných opatření lesního hospodářství, které povede ke snížení rizika poškození větrem (Kerzenmacher a Gardiner, 1998; Talkkari et al., 2000).

Získání informací o maximálním ohybovém momentu k danému typu dřeviny nám umožňuje, aby byly metody přizpůsobené pro různé oblasti. Mechanické metody včetně modelů proudění vzduchu jsou navíc jednou z obecných metod předvídání poškození (Gardiner a Quine, 1994). Integrace s dalšími technikami, jako je geografický informační systém (GIS) a počítačová simulace, zajistí dostatečné informace pro vytvoření systémů pro podporu rozhodování (Mitchell et al., 2001; Blennow a Sallnas, 2004).

I když mechanické metody nemají omezení prvních dvou výše uvedených metod, stále mají problémy s přesností v odhadu míry poškození větrem. Například současné mechanické přístupy nemusí přesně odhadovat riziko poškození větrem na úrovni lesních komplexů, protože jsou obecně založeny na údajích jednotlivých porostů (Gardiner a Quine, 1994). Metody byly navíc omezeny na specifické typy lesů. Většina modelů se zaměřuje na škody způsobené větrem na jehličnatých stromech (Gardiner et al., 2000), částečně z důvodů nedostatku informací o jiných druzích dřevin (Kamimura a Shirashi, 2007). V současné době existují především dva následující dostupné mechanické modely – ForestGALES a WINDA.

#### **2.4.3.1 ForestGALES**

Model ForestGALES byl vyvinut pro jehličnaté porosty ve Velké Británii (Gardiner a Quine, 2000; Quine et al., 2002). ForestGALES se skládá z empiricko-mechanického modelu GALES a lokálního systému předpovídání výskytu daných rychlostí větru (DAMS; Quine a White, 1993). Systém GALES poskytuje informace o rychlosti větru způsobujícího vyvrácení nebo zlomení stromu na základě výsledků tahových zkoušek (Gardiner a Quine, 2000; Gardiner et al., 2003).

Model GALES vypočítává kritickou rychlost větru (CWS), která způsobuje poškození stromu (tj. pravděpodobnost, že strom utrpí průměrné poškození) v prostředí lesního porostu. Pro odhad kritické rychlosti větru jsou potřebné charakteristické vlastnosti stromů a porostů. Parametry modelu byly získávány přibližně z 2000 studijních stromů, které byly uměle vyvráceny/zlomeny pomocí tahových zkoušek.

Hlavními vstupními parametry jsou druhy dřevin, výška stromu, výčetní tloušťka, zakmenění, typ půdy, půdní vlhkosti a vzdálenost od okraje porostu za předpokladu, že celková síla větru, která působí na porost, je rovnoměrně rozložena mezi jednotlivé stromy. Pro přesné posouzení rizik v modelu jsou nutné zejména velmi přesné údaje o půdě (Quine et al., 2002).

Odolnost stromu vůči zlomu je počítána na základě momentu ohybu stromu. Výpočet vychází z charakteristik nerovnosti terénu před překážkou, faktoru

turbulence, rozestupu stromů, výčetní tloušťky, výšky stromu, hustoty vzduchu a vzdáleností od porostního okraje.

Odolnost vůči vývratu vychází z experimentů provedených v aerodynamických tunelech a dle autora je nejvíce závislá na celkové váze kmene a koruny doplněné o vzdálenost od porostního okraje, půdního typu a velikosti kořenového systému.

Model je optimalizován pro stejnověké porosty smrku sitky (*Picea sitchensis*), smrku ztepilého (*Picea abies*) a borovice lesní (*Pinus sylvestris*).

Model GALES byl primárně vytvořen pro území Velké Británie pro účely hodnocení poškození větrem a modifikován pro další druhy dřevin v Kanadě, Novém Zélandu či Francii. (Ruel et al., 2000; Achim et al., 2005; Moore a Quine, 2000; Cuchi et al., 2005)

#### **2.4.3.2 HWIND**

Model HWIND (Peltola et al., 1999) byl optimalizován pro podzolové půdy na území Finska s nejčastějšími dřevinami smrkem ztepilým (*Picea abies*), borovicí lesní (*Pinus sylvestris*) a břízou (*Betula pendula* Roth; *Betula pubescens* Ehrh). Původně byl navržený pro vyhodnocení kritické síly větru na dřeviny na porostních okrajích, ale může být také využit pro stromy v různé vzdálenosti od těchto okrajů.

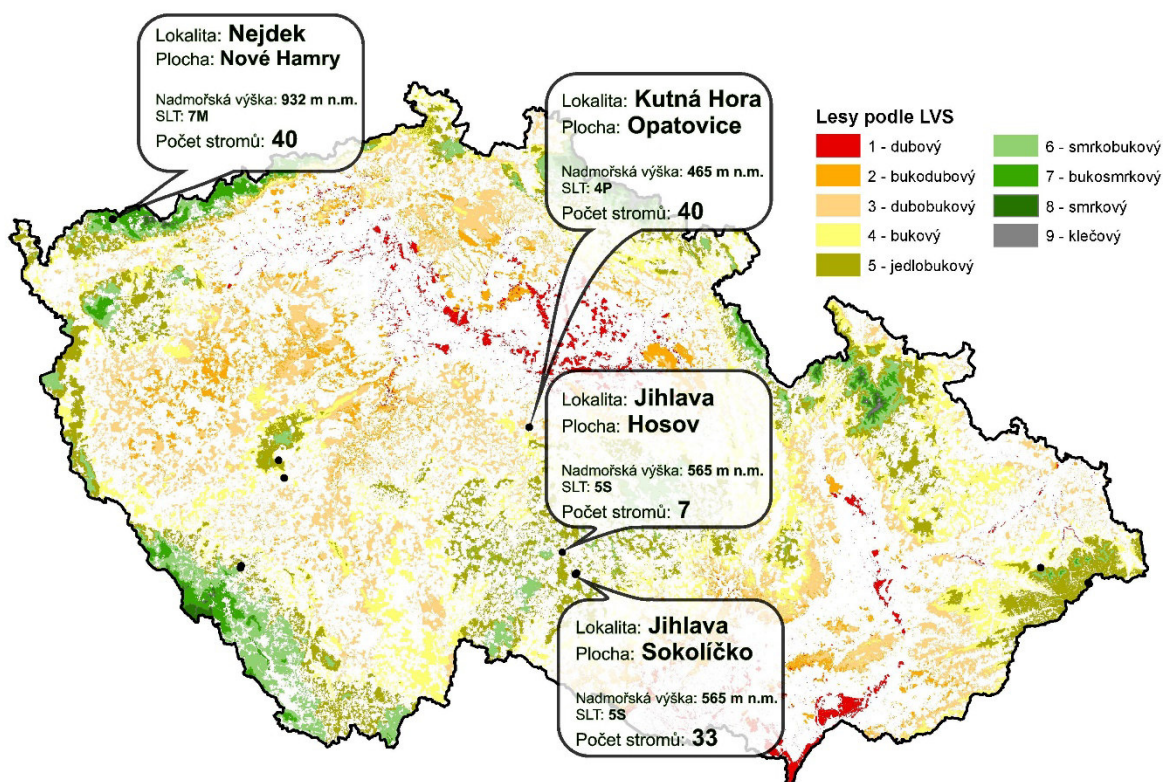
HWIND předpovídá průměrnou kritickou sílu větru (CWS) trvající 10 minut ve výšce 10 m nad úrovní terénu (na okraji porostu). Síla působící na strom je rozdělena na horizontální sílu větru a vertikální sílu způsobenou gravitací, včetně váhy kmene a koruny, případně hmotností sněhu. Předpokládá se, že stromy, na které působí vítr konstantní rychlostí a směrem, jsou vychýleny do bodu, ze kterého se už nevrátí. Zatížení větrem a gravitační silou se vypočítá v každém bodě kmene a koruny s použitím predikovaného profilu větru na okraji porostu a vertikálního rozložení váhy kmene a koruny. Celková síla vyvolaná větrem je součtem sil větru, působících v každém bodě (Jones, 1983; Peltola a Kellomaki, 1993; Peltola et al., 1999). U modelu se předpokládá vyvrácení stromu v případě, kdy maximální ohybový moment překročí odpor kořenového systému. Předpokladem pro zlom stromu je překročení kritické hodnoty MOR (Modulus of rapture) pro napětí kmene. Vstupními daty pro model HWIND jsou

druh dřeviny, výška stromu, výčetní tloušťka, hustota porostu, vzdálenost od okraje porostu a zakmenění. Obvykle se jako vstupy v simulacích modelu HWIND používají pouze průměrné charakteristiky porostu. (Peltola et al., 1999; Gardiner et al., 2000).

### 3 Metodika

#### 3.1 Studijní lokality

Terénní měření probíhala během let 2016 – 2018. Praktická část výzkumu byla situována na různých lokalitách v rámci celé České republiky (Obrázek č. 8). V roce 2016 bylo měřeno na lokalitách Nejdeček - Nové Hamry (Krušné hory) a Jihlava - Sokolíčko (Křižanovská vrchovina). V roce 2017 byly vybrány lokality Sokolíčko, Hosov (Křižanovská vrchovina), Nejdeček - Nové Hamry (Krušné hory) a Kutná Hora - Opatovice (Hornosázavská pahorkatina). V roce 2018 měření probíhalo opět na stanovištích Kutná Hora - Opatovice (Hornosázavská pahorkatina).



Obrázek č. 8 Studované lokality

Lokality byly vytipovány tak, aby zohlednily charakter stanovišť typických pro pěstování smrku v České republice. Jednotlivé lokality (Tabulka č. 6) se nachází v polohách 4, 5 a 7 LVS, tzn., že pokrývají nejvíce zastoupené lesní vegetační stupně. Reprezentují rovněž ekologickou řadu kyselou (7M), kyselou/bohatou (5S) a oglejenou (4P). Studované porosty byly vždy charakterizovány výrazným zastoupením smrku (více jak 80%) a věkem porostu



nad 100 let. Rozpětí nadmořské výšky se pohybovalo od 465 m. n. m. (Opatovice – Kutná Hora) do 932 m. n. m. (Nové Hamry – Nejdek).

Tabulka č. 6 Přehled studijních lokalit.

Lokalita	Plocha	Datum	Počet stromů	Nadmořská výška (m. n. m.)	LVS
Jihlava	Hosov	23 - 24. 8. 2017	7	565	5
	Sokolíčko	16 - 20. 8. 2016 21 - 22. 8. 2017	33	630	5
Nejdek	Nové Hamry	12 - 16. 9. 2016 26. 6. - 1. 7. 2017	40	932	7
Kutná Hora	Opatovice	18 - 20. 9. 2017 12 - 14. 5. 2018	40	465	4

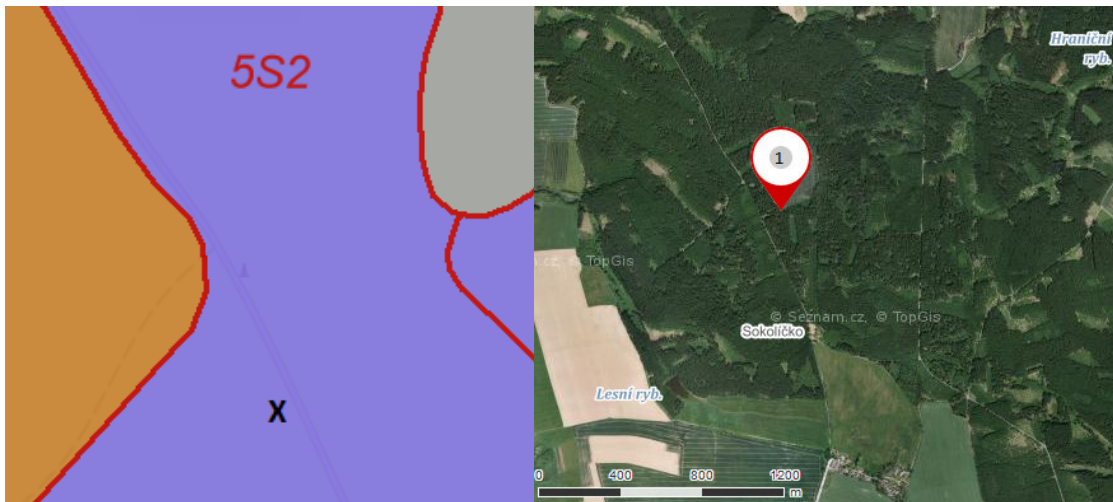
Výzkumná měření probíhala vždy od jara do podzimu. Na každé lokalitě probíhala měření během 3 – 7 dnů, záleželo na počtu vzorků, které byly na dané lokalitě zpracovávány. V rámci terénních prací se měření v každé lokalitě zúčastnilo 10 až 11 pracovníků – 3 stromolezci, 4 - 5 měřičů, 2 obsluhovači navijáku a kameraman.

V rámci uvedeného období bylo testováno celkem 120 stromů. Průběh každého měření stromu byl zdokumentován kamerou, naměřené síly byly zaznamenány pomocí tenzometru a dataloggeru. Po ukončení experimentu (vývratem nebo zlomením stromu) byly změřeny veličiny stromu (výška, tloušťka, atd.) a zapsány do formuláře. Zaznamenány byly i základní informace o okolním porostu. Poté byly formuláře přepsány do tabulek a byla vytvořena databáze záznamů.

## 3.2 Charakteristika lokalit

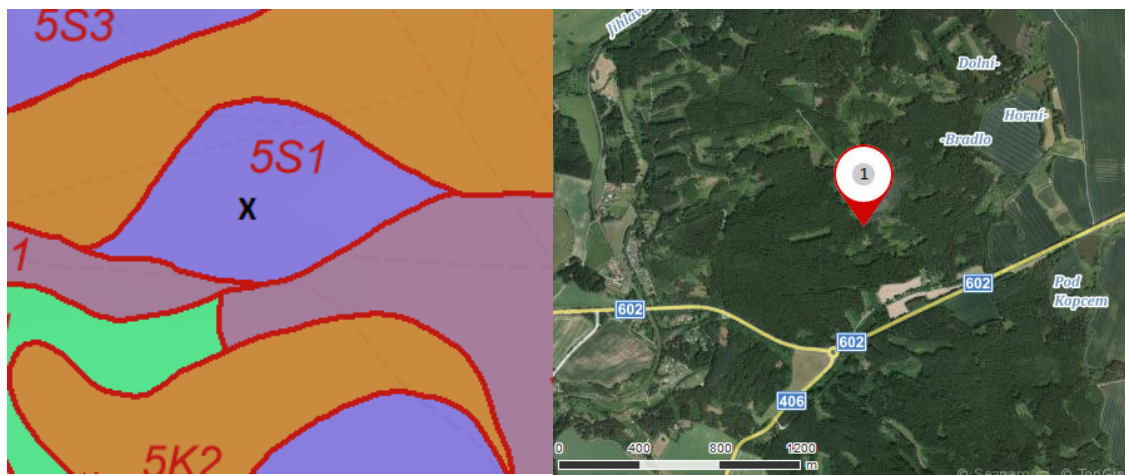
### 3.2.1 Jihlava – Sokolíčko a Hosov

Lokalita Sokolíčko (Obrázek č. 9) je situována 630 m. n. m., leží na souřadnicích 49.3113975N, 15.6021744E. Soubor lesních typů 5S – Svěží jedlová bučina. Terénní práce zde probíhaly 16. srpna – 20. srpna 2016 a 26. června – 1. července 2017.



Obrázek č. 9 Lokality Jihlava – Sokolíčko. Zdroj: <http://geoportal.uhul.cz/mapy/MapyOpri.html>

Lokalita Hosov (Obrázek č. 10) je položena v nadmořské výšce 565 m. n. m., na souřadnicích 49.3864950N, 15.5145375E. SLT je 5S – Svěží jedlová bučina. Měření zde trvalo od 23. srpna - 24. srpna 2017.

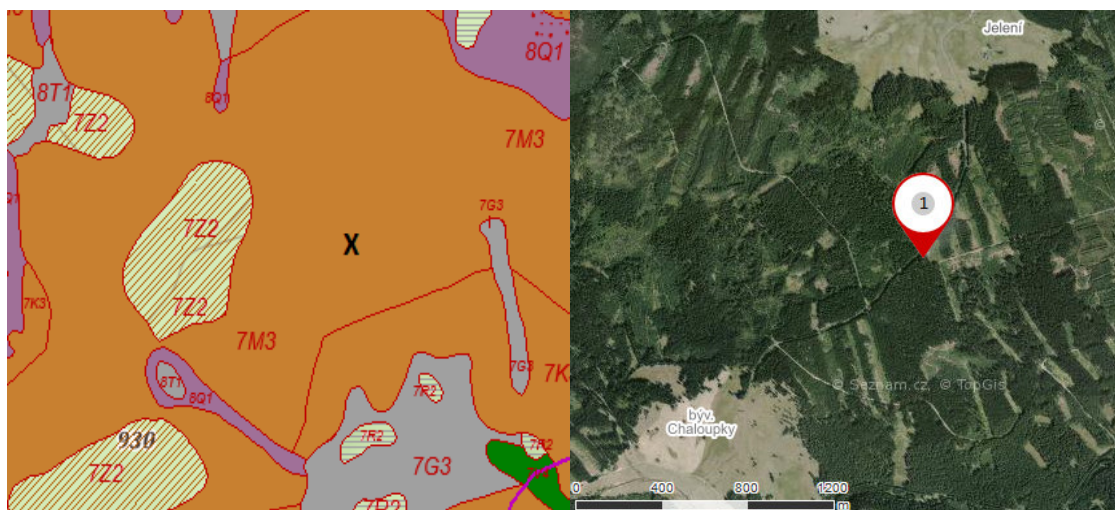


Obrázek č. 10 Lokality Jihlava – Hosov. Zdroj: <http://geoportal.uhul.cz/mapy/MapyOpri.html>

Nejrozšířenější půdní typ v okolí Jihlavy a na Vysočině je kambizem, což je zároveň nejrozšířenější půdní typ v ČR. Probíhá zde typický proces hnědnutí – zvětrávání a metamorfóza půdního materiálu in situ. Dochází zde k uvolňování železa z primárních minerálů a k tvorbě sekundárních jílových minerálů avšak bez jejich translokace. Vytváří se tak pro kambizemě typický horizont B. Při procesu hnědnutí se uvolňují dvojmocné kationty a jsou vylouhovány do nižších vrstev. Kvalita půd a základní fyzikální, chemické a biologické vlastnosti jsou velmi rozdílné, v závislosti na substrátu (Uhul).

### 3.2.2 Nejdek – Nové Hamry

Lokalita (Obrázek č. 11) leží v nadmořské výšce 932 m. n. m. Soubor lesních typů 7M – Chudá buková bučina. Terénní práce probíhaly v období od 12. září - 16. září 2016 a 26. června – 1. července 2017. Lokalita je situována na 50.3841817N, 12.6692992E.



Obrázek č. 11 Lokalita Nejdek – Nové Hamry. Zdroj: <http://geoportal.uhul.cz/mapy/MapyOpri.html>

Typickým půdním typem pro Nejdek a okolí, speciálně v jeho severní části, je podzol. Podzoly se vyvinuly v nejvyšších horských polohách ve velmi vlhkém a chladném klimatu, kde roční úhrn srážek zpravidla přesahuje 800 mm. Substrátem pro vznik podzolů jsou většinou minerálně slabé a kyselé půdy (žuly, ruly, svory, pískovce apod.). Podzoly jsou půdy s ochuzeným podzolovým Ep-horizontem a obohaceným podzolovým Bs-horizontem pod ochrnickým Ao-horizontem, případně melanickým Al-horizontem. Jeho sorpční komplex je vždy nenasycený. Produkční schopnost podzolů je většinou snižena nebo nízká (Uhul).

### 3.2.3 Kutná Hora – Opatovice

Lokalita (Obrázek č. 12) je situována v nadmořské výšce 465 m. n. m. Soubor lesních typů je 4P – Kyselá dubová jedlina. Terénní práce probíhaly mezi 18. - 20. zářím 2017 a 12. - 14. květnem 2018. Bylo změřeno 20 stromů. Lokalita leží na souřadnicích 49.8366203N, 15.2347219E.



Obrázek č. 12 Lokalita Kutná Hora – Opatovice. Zdroj: <http://geoportal.uhul.cz/mapy/MapyOpri.html>

Půdní typ vyskytující se na lokalitě Kutná Hora – Opatovice je pseudoglej. Je to typ půdy s mramorovaným pseudoglejovým BM – horizontem, který se vyvinul následkem přítomnosti vrstvy se sníženou drenážní schopností. Leží pod ochrnickým Ao-horizontem, případně (a to nejčastěji) pod eluviálním En-horizontem. Vzniká pseudoglejovým půdotvorným procesem, pro který je charakteristické střídání silného provlhčení a vysychání v horní části půdy, vlivem zasakující srážkové vody, která se zadržuje na níže ležící nepropustné vrstvě nebo horizontu. Nepropustná vrstva vzniká dvojitým způsobem. Buď jako následek procesu ilimerizace, při které se částice jílu vyplavené ze svrchních vrstev půdy akumulují níže a vytváří vrstvu těžce propustnou pro vodu. Nebo vzniká geologickými pochody, při kterých byl na jílovitý sediment uložen zrnitostně lehčí materiál, např. sprašová hlína. V půdním typu pseudoglej se velmi často tvoří drobné rezivé až černavě hnědé novotvary – konkrerce, bročky, v nichž je koncentrováno Fe a Mn a jsou barevně ostře odděleny od vyběleného okolí. U pseudogleje (hlavně v nižších polohách) převažují během roku sušší půdní stavy. Proschnutí půdy bývá spojeno s jejím zatvrdnutím (zvláště svrchní částí). Pseudogleje se vyskytují na rovinách, plošinách, mírně skloněných úpatích svahů, v plochých úžlabinách a pokleslinách terénu (Uhul).

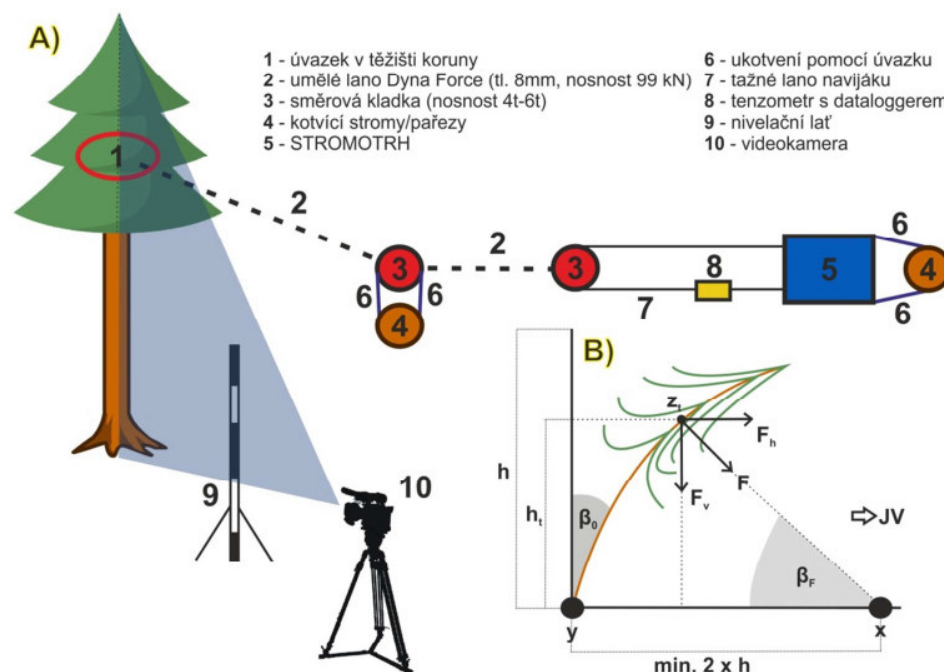
### 3.3 Terénní destruktivní zkoušky

Vzhledem k tomu, že tato práce navazuje na mou bakalářskou práci, následující popis terénního měření je zestručněn. Podrobnější popis přípravných prací,

práce a měření v terénu je uveden v bakalářské práci: Reakce smrku ztepilého (*Picea abies*, (L.) Karst.) na namáhání ohybem (2017).

Terénní práce začaly výběrem správné plochy v dané lokalitě a určením měřeného stromu (výběr místa z hlediska vhodnosti je popsán v kapitole 2). Vybírány byly stromy zdravé, úrovňové s průměrnými dendrometrickými charakteristikami studovaných porostů. Další přípravnou částí bylo určení těžiště stromu, které je odvislé od tvaru koruny. Ve většině případů bylo stanoveno řádově v jedné třetině výšky koruny. Před vlastním měřením proběhla také příprava stanoviště z hlediska bezpečnosti práce.

Další fáze měření pokračovala přípravou lezců na výstup do těžiště vybraného stromu. Při výstupu na strom lezci odřezávali živé i mrtvé větve stromu tak, aby mohli hladce postupovat vzhůru po stromu. Úkolem lezce bylo přivázání úvazku na strom ve výši těžiště, změření výšky stromu a označení metrových sekcí na kmeni od těžiště až po patu stromu pomocí měřičského pásma a barevného spreje.



Obrázek č. 13 Schéma průběhu tahové zkoušky. Zdroj: Neperiodická zpráva za rok 2015, QJ1520006, Hodnocení rizika poškození lesních porostů větrem.

Další část tahové zkoušky zajišťovala obsluha navijáku, která pro zaznamenání síly vynaložené k vyvrácení či zlomení stromu k lanu navijáku připevnila tenzometr. Všechna data, která tenzometr s dataloggerem zaznamenaly, byla přesunuta na datový disk. Po připojení navijáku k pohonné jednotce byla spuštěna tahová zkouška navíjením lana na buben. Vznikla tak tahová síla působící na kmen stromu, kde po 2 - 5 minutách došlo ke zlomení či vyvrácení stromu. Pomocí kladek šlo korigovat směr pádu ohýbajícího se stromu. Zvolena byla jihovýchodní strana proti směru převládajících větrů (Obr. č. 13).

Po skončení tahové zkoušky začalo měření veškerých dendrometrických veličin stromu, nadzemní a podzemní části (Tabulka č. 7).

**Tabulka č. 7 Naměřené a vypočítané parametry**

<b>Parametr</b>	<b>Jednotky</b>	<b>Popis</b>
<b>Kritická síla</b>	kgf	Síla vynaložená na vyvrácení či zlomení stromu.
<b>CWS</b>	m/s	Kritická rychlost větru potřebná k vyvrácení či zlomení stromu.
<b>d1,3</b>	cm	Výčetní tloušťka stromu.
<b>Výška stromu</b>	m	Celková výška stromu.
<b>Štíhlostní koeficient</b>	-	Poměr výšky stromu a výčetní tloušťky.
<b>Koruna</b>	%	Procento zelené koruny.
<b>Nárazová plocha koruny</b>	m <sup>2</sup>	Plocha koruny, na kterou působí síla větru.
<b>Kritická síla na 1m<sup>2</sup> koruny</b>	kgf/m <sup>2</sup>	Poměr kritické síly a nárazové plochy koruny.
<b>Těžiště</b>	m	Výška těžiště stromu v m.
<b>Těžiště</b>	%	Poměr těžiště (m) k celkové výšce stromu.
<b>Délka koruny</b>	m	Délka od nasazení prvních zelených větví po vrchol stromu.
<b>Šířka koruny na bázi</b>	m	Šířka křídla v místě nasazení první zelené větve.

Při hodnocení nadzemní části jednotlivých subjektů byly změřeny základní určující parametry kmene a koruny – výška stromu, výčetní tloušťka, výška báze, délka a šířka koruny na bázi.

U kmene rozděleného na metrové části, byl každý z označených průměrů změřen ve dvou na sebe kolmých směrech. První měřená část byla u země. Měření pokračovalo ve 20 cm nad zemí, dále pak ve výčetní tloušťce (1,3 m) a pak vždy po metru až ke koruně.

Změřené a vypočítané parametry jsou uvedeny v Tabulce č. 7.



Obrázek č. 14 Měření koruny stromu. Foto: Eliška Pařízková

U měření koruny (Obrázek č. 14) bylo postupováno od špičky stromu, tedy od prvního – letošního přeslenu sestupně ke kořenové části. Měřenou veličinou byla délka a tloušťka každé z živých větví v přeslenech, zaznamenán byl i směr jejich růstu podle světových stran (Obrázek č. 15). Změřeny a dopsány byly i větve odstraněné lezci. Pro zvážení byly vybrány v pořadí první, desátý a pak každý pátý přeslen větví.

Výškové přírůsty a délka větví koruny (zjišťuje se až po bázi živé koruny)																									
Vznik letarostu (rok)	Výškový přírůstek (cm)	Délka větví (cm)								Tloušťka větví (cm)								Váha větví (kg)							
		S	SZ	Z	JZ	J	JV	V	SV	S	SZ	Z	JZ	J	JV	V	SV	S	SZ	Z	JZ	J	JV	V	SV
2015	17																								
2014	16	9				9		7		0,5			0,5		0,5										
2013	13			13		6		12			0,5		0,5		0,5										
2012	10	13				16				0,5			0,5												
2011	17		14	9		12	8			0,5	0,5		0,5	0,5											
2010	13		33		15	37				0,5		0,5	1				0,5								
2009	35	54		49	26	28		26		1,5		1,5	0,5	0,5		0,5									
2008	10			28		30		16			0,5		1				0,5								
Vznik letarostu (rok)	Výškový přírůstek (cm)	Délka větví (cm)								Tloušťka větví (cm)								Váha větví (kg)							
		S	SZ	Z	JZ	J	JV	V	SV	S	SZ	Z	JZ	J	JV	V	SV	S	SZ	Z	JZ	J	JV	V	SV
2007	26	72			69	77				2			2	2											
		108		86		107				2		2		2				0,9		0,7		0,9			

Obrázek č. 15 Ukázka zápisu zaznamenávaných veličin u koruny stromů.

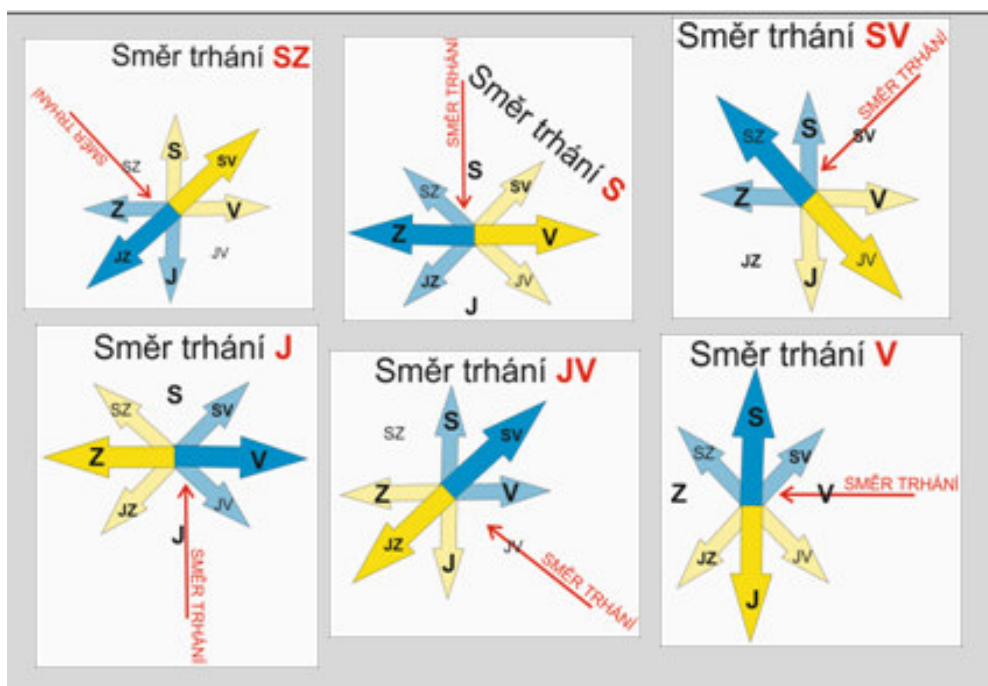
Součástí měření je i výpočet báze, délky a šířky koruny stromu.

### 3.4 Přepočítání kritických sil na CWS na základě parametrů stromu

Tato kapitola se věnuje přepočtu kritických sil na CWS z parametrů, které byly naměřeny ve studijních lokalitách. Každý naměřený strom měl svůj vzorník, z kterého byly parametry (směr trháni stromu, výška stromu, výška úvazku, tahová síla, délka větví atd.) použity k výpočtům.

Nejdříve bylo nutno vypočítat plochu koruny každého stromu. K výpočtu bylo nutné znát délku přírůstu a délku zaujatých větví. Zaujaté větve byly zjištěny dle směru trháni stromu (Obrázek č. 16). Příkladně: pokud byl směr trháni SV, dále bylo počítáno s větvemi, které byly na severozápadní a jihovýchodní straně. Tmavší barva na dílčích obrázcích určuje vždy prioritní větve. Pokud nebyly větve na prioritní straně, počítalo se s větvemi vedlejšími, tj. větvemi světlejší barvy (Obrázek č. 17). V případě, že se v zaujatých směrech nacházelo více větví, do výpočtu se zahrnula pouze delší větev.





Obrázek č. 16 Přehled směru trháni stromu a zaujatých větví.

Plocha koruny byla dána součtem všech ploch přírůstu koruny daného stromu. Plochy přírůstu se vypočítaly z délky zaujatých větví a délky přírůstu v daném roce. Součtem délek přírůstů v jednotlivých letech byla získána délka koruny. Následně byla plocha koruny rozdělena podle výšky na jednotlivé metrové segmenty.

K výpočtu kritických rychlostí větru, které by u daných naměřených jedinců způsobily vyvrácení či zlomení, byly použity postupy z příručky ČSN EN 1991-1-4 – část 1-4: Obecná zatížení - zatížení větrem. Pro tento výpočet jsou potřebné právě metrové segmenty rozdělující strom, které byly vypočítány v předešlém kroku. U těchto metrových segmentů se vypočítá síla, kterou vítr na daný segment působí. Pro výpočet zatížení větrem segmentu ve výšce (i) byl použit následující vzorec:

$$F_{vitr}(i) = \frac{1}{2} \cdot A(i) \cdot c_x \cdot \rho \cdot \left[ 1 + \frac{7}{\ln \frac{z}{z_0}} \right] \cdot \left[ \left( 0,19 \left( \frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0,07} \right) \cdot \left( \ln \frac{z}{z_0} \right) \cdot v_b \right]^2 ;$$

pro  $z \geq z_{min}$  [N].

Vzorec vychází z výpočtu maximálního dynamického tlaku v konkrétní výšce s kombinací velikosti nárazové plochy segmentu  $A$  ( $m^2$ ) ve výšce (i) a součinitele aerodynamického odporu ( $c_x$ ), u kterého jsou dosazovány hodnoty

zvlášť pro část stromu s asimilačním aparátem (zelená koruna) a část stromu bez asimilačního aparátu (kmen).

Součinitel aerodynamického odporu koruny má pro smrk ztepilý (*Picea abies*) hodnotu 0,2 pro střední rychlost větru  $v_m$  ( $m \cdot s^{-1}$ ) do  $20 m \cdot s^{-1}$ . V okamžiku, kdy střední rychlost větru překročí hodnotu  $20 m \cdot s^{-1}$ , je nutno počítat se součinitelem dvojnásobně vyšším, tedy 0,4.

Následně můžeme výsledné zatížení jednotlivých segmentů přepočítat na ohybový moment  $OM_{segment}$  (Nm). S rostoucí vzdáleností od kotevního bodu stromu (pata kmene) roste i velikost ohybového momentu. K výpočtu ohybového momentu  $OM_{segment}$  použijeme hodnotu zatížení větrem v jednotlivých výškách (segmentech)  $F_{vitr}(i)$ , kterou násobíme výškou daného segmentu. Sečtením ohybových momentů jednotlivých segmentů získáváme hodnotu ohybového momentu stromu  $OM_{stromu}$  (NM). Výsledkem je ohybový moment stromu s prozatímní hodnotou běžné rychlosti větru  $v_b$   $1 m \cdot s^{-1}$ .

Výpočet kritické rychlosti větru probíhá následujícím způsobem. Tažná síla (kg) změřená při terénních pracích pomocí tenzometru, která je potřebná pro zlomení či vyvrácení stromu, je přepočítána na Newtony a následně násobená výškou zachycení úvazku (m). Tímto jednoduchým výpočtem dostaneme tažnou sílu TS (Nm), která byla potřebná ke zlomení či vyvrácení stromu. Výslednou tažnou sílu TS (Nm) porovnáváme s ohybovým momentem stromu  $OM_{stromu}$  (NM). Hodnotu ohybového momentu zvyšujeme zvětšováním hodnoty běžné rychlosti větru  $v_b(m \cdot s^{-1})$ . Pokračujeme ve zvyšování, dokud hodnota ohybového momentu stromu  $OM_{stromu}$  nepřekročí hodnotu výsledné tažné síly TS. Nejnižší hodnota  $v_b(m \cdot s^{-1})$ , která způsobí, že  $OM_{stromu}$  je větší než tažná síla TS, je výslednou hodnotou kritické rychlosti větru ( $m \cdot s^{-1}$ ).

### 3.5 Statistické zpracování dat

U zpracovaných dat byly statisticky zkoumány jednorozměrné vztahy mezi mechanickou odolností stromu a vybranými proměnnými - lineární regresí a korelací.

Lineární regrese je matematická metoda používaná pro proložení souboru bodů v grafu přímkou. O bodech reprezentujících měřená data se předpokládá, že jejich x-ové souřadnice jsou přesné, zatímco ypsilonové souřadnice mohou být

zatíženy náhodnou chybou, přičemž předpokládáme, že závislost  $y$  na  $x$  lze graficky vyjádřit přímkou. Pokud měřené body proložíme přímkou, tak při odečítání z grafu bude mezi ypsilonovou hodnotou měřeného bodu a ypsilonovou hodnotou ležící na přímce odchylka. Podstatou lineární regrese je nalezení takové přímky, aby součet druhých mocnin těchto odchylek byl co nejmenší.

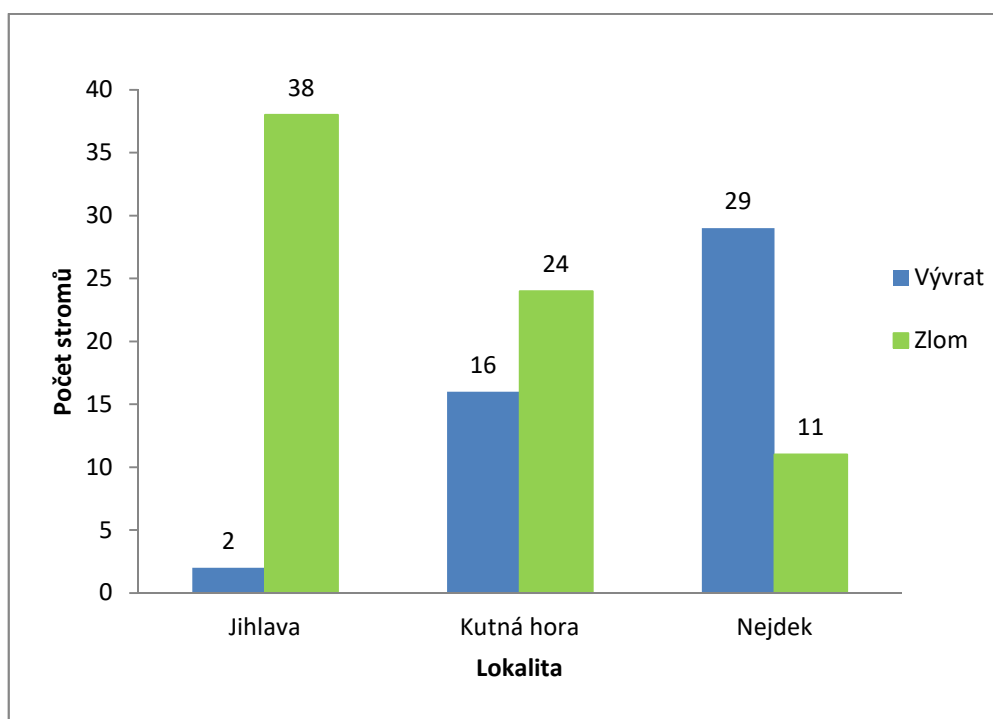
Korelace značí vzájemný vztah mezi dvěma veličinami nebo procesy. Pokud se jedna veličina mění, mění se korelativně i druhá a naopak. Pokud se mezi dvěma veličinami ukáže korelace, je pravděpodobné, že na sobě závisejí. V přesnějším slova smyslu se pojem korelace užívá ve statistice, kde znamená vzájemný lineární vztah mezi znaky či veličinami  $x$  a  $y$ . Míru korelace pak vyjadřuje korelační koeficient, který může nabývat hodnot od  $-1$  až po  $+1$ . Korelační vztah mezi veličinami může být pozitivní nebo negativní. V pozitivním vztahu se obě veličiny zvyšují, negativní korelace značí vztah, kdy se jedna veličina zvyšuje a druhá veličina se snižuje.

Nakonec byly porovnávány zjištěné hodnoty závislých i nezávislých proměnných mezi jednotlivými lokalitami pomocí Kruskal – Wallisova testu. Kruskal – Wallisův test je neparametrická metoda pro testování, zda vzorky pocházejí ze stejného měření. Používá se pro porovnání dvou nebo více nezávislých měření se stejnou nebo odlišnou velikostí vzorku. Kruskal – Wallisův test ukazuje dominanci alespoň jednoho vzorku. Protože se jedná o neparametrickou metodu, Kruskal – Wallisův test nepředpokládá normální rozdělení.

Všechny statistické analýzy byly provedeny v programu STATISTICA (Dell) a programu Microsoft Excel.

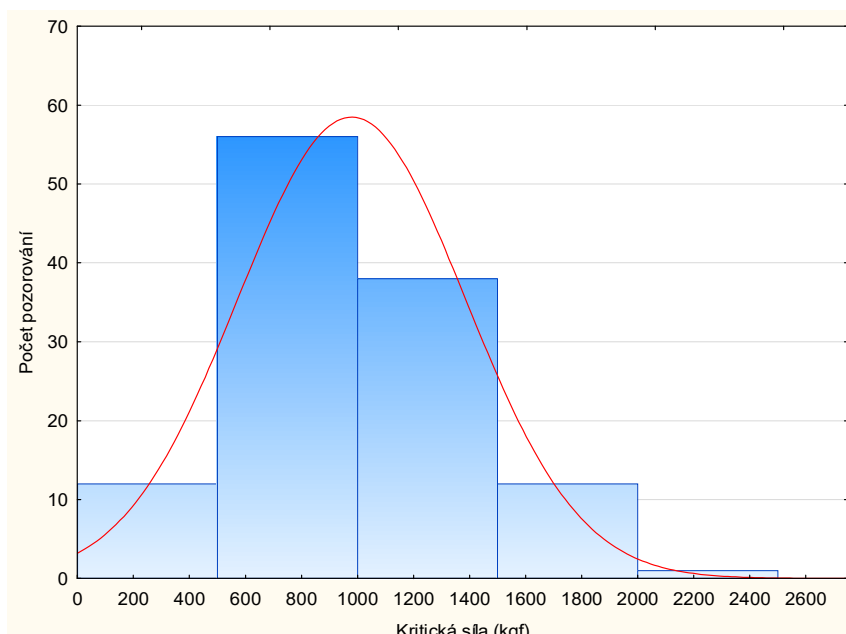
## 4 Výsledky

Celkově bylo v lokalitách zhodnoceno 120 stromů. Výsledkem bylo 47 vývrátů a 73 zlomů. Obrázek č. 17 prezentuje podíl vývrátů a zlomů naměřených v jednotlivých lokalitách - v Jihlavě byly zdokumentovány 2 vývraty a 38 zlomů. V Kutné Hoře bylo 24 zlomů a 16 vývrátů a v lokalitě Nejdek 29 vývrátů a 11 zlomů. Z Obrázku č. 17 můžeme usoudit, že v lokalitě Jihlava (SLT – 5S, kambizem) převládaly zlomy. V lokalitě Nejdek (SLT 7M, a porosty jsou zde přizpůsobeny horskému terénu) převládaly vývraty. Kutná Hora (SLT 4P, pseudoglej) je vzhledem k počtu vývrátů a zlomů nejvyrovnanější ze všech tří lokalit.



Obrázek č. 17 Počty vývrátů a zlomů na jednotlivých lokalitách.

Obrázek č. 18 zobrazuje naměřené hodnoty kritické síly. Hodnoty mají rozsah od 280 kgf do 2500 kgf. U většiny naměřených stromů se hodnoty kritické síly pohybovaly mezi 600 - 1000 kgf. U 12 stromů bylo rozpětí 200 - 400 kgf. Kritická síla 2040 - 2500 kgf se vyskytla pouze ve 2 případech, a to na lokalitě Jihlava.



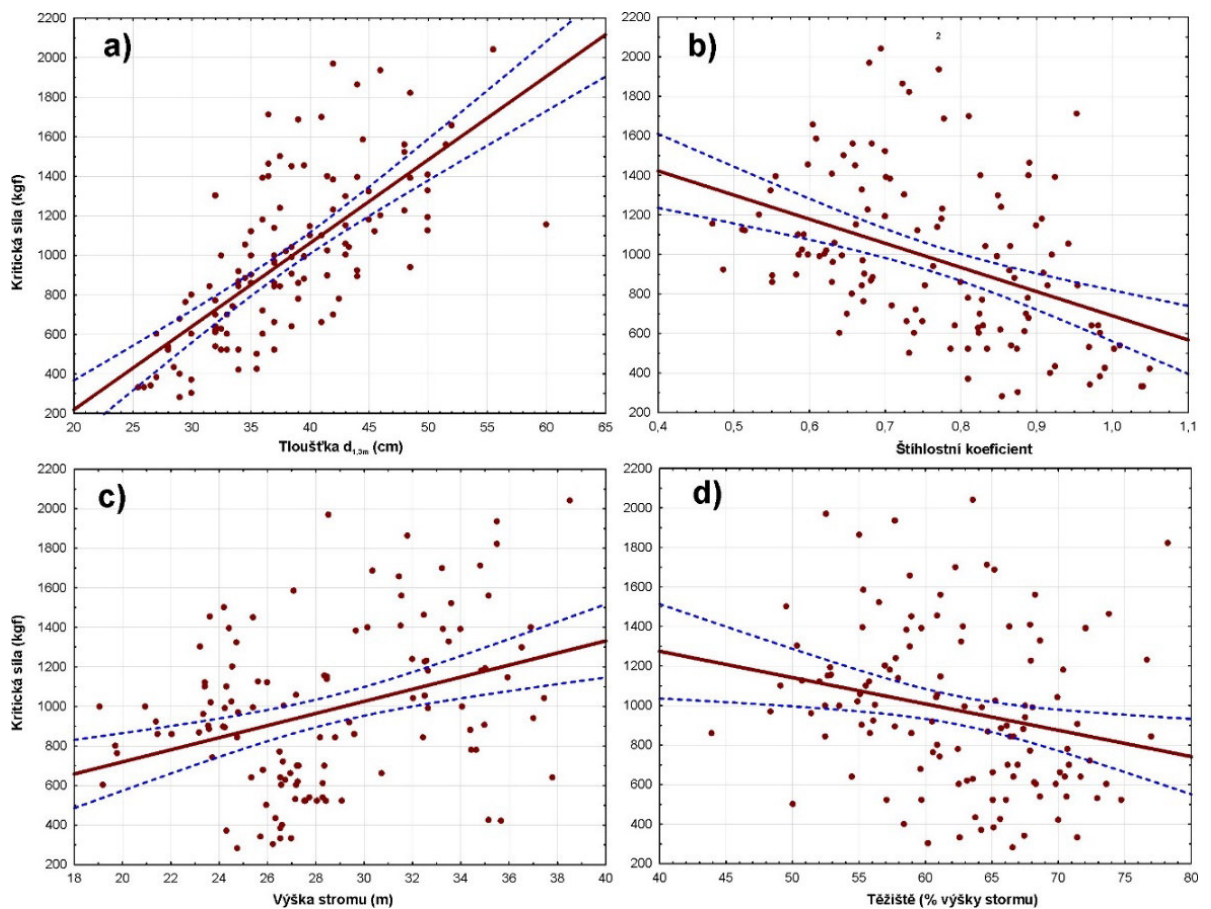
Obrázek č. 18 Histogram naměřených hodnot kritické síly nutné ke vzniku poškození. Červená křivka naznačuje očekávané normální rozdělení.

#### 4.1 Závislost hodnot kritické síly a vybraných parametrů stromu

V této části kapitoly je zhodnocena závislost kritické síly na základě rozboru literatury nejvýznamnějších parametrů – štíhlostního koeficientu, výčetní tloušťky (cm), těžiště koruny (%) a výšky stromu (m). Korelační matice proměnných je uvedena v Tabulce č. 8. Graficky je potom znázorněna na Obrázku č. 19. Je patrné, že kritická síla má největší vazbu s výčetní tloušťkou stromu ( $r=0,70$ ,  $p<0,05$ ), dále negativně koreluje se štíhlostním koeficientem ( $r=-0,42$ ,  $p<0,05$ ) a méně výrazně s těžištěm ( $r=-0,24$ ,  $p<0,05$ ). Korelace s výškou stromu je rovněž méně signifikantní ( $r=0,35$ ,  $p<0,05$ ).

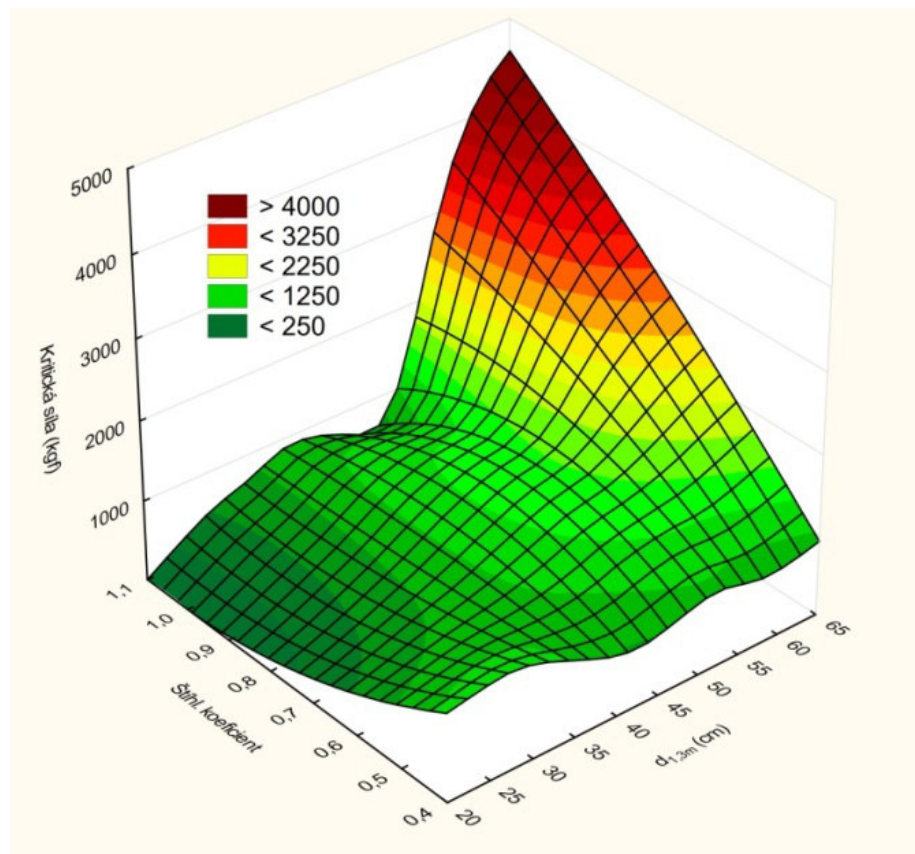
Tabulka č. 8 Korelační matice vybraných proměnných. Červeně jsou zvýrazněny statisticky signifikantní korelace ( $p < 0,05$ ).

Proměnná	Kritická síla (kgf)	Výška stromu (m)	Výčetní tloušťka (cm)	Štíhlostní koeficient	Těžiště (%)
Kritická síla (kgf)	1	0,35	0,70	-0,42	-0,24
Výška stromu (m)	0,35	1	0,42	0,46	0,35
Výčetní tloušťka (cm)	0,70	0,42	1	-0,60	-0,23
Štíhlostní koeficient	-0,42	0,46	-0,60	1	0,54
Těžiště (%)	-0,24	0,35	-0,23	0,54	1



Obrázek č. 19 Vztah mezi kritikou silou a a) výčetní tloušťkou, b) štíhlostním koeficientem, c) výškou stromu a d) těžištěm.

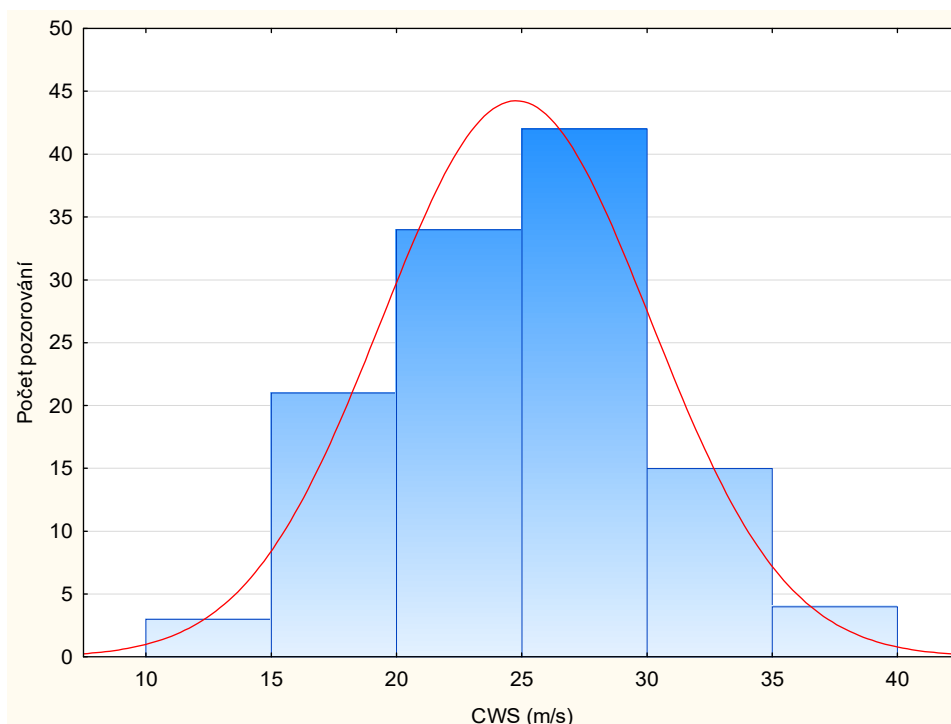
Obrázek č. 20 zobrazuje kombinovaný vztah mezi kritikou silou, výčetní tloušťkou a štíhlostním koeficientem, tedy dvěma nejvýznamnějšími prediktory. Potvrzuje pravidlo, že s rostoucí tloušťkou se zvyšuje potřebná kritická síla a potvrzuje negativní korelace mezi kritikou silou a štíhlostním koeficientem tzn., čím je větší hodnota štíhlostního koeficientu, tím jsou stromy méně odolné.



Obrázek č. 20 Vztah mezi kritickou silou, výčetní tloušťkou a štíhlostním koeficientem.

#### 4.2 Přepočet kritických sil na kritickou rychlost větru

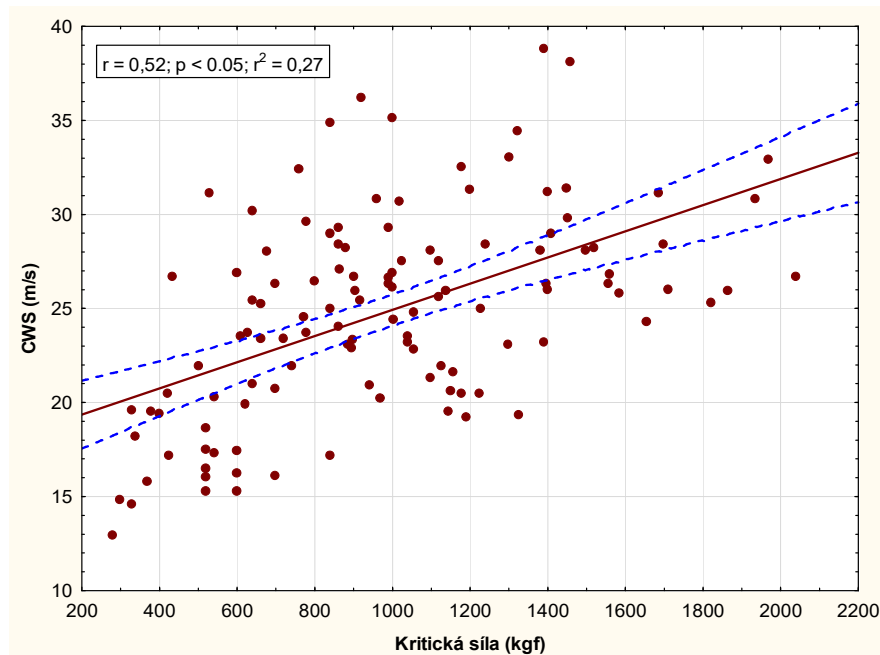
Přepočítané hodnoty kritických rychlostí větru (CWS), získané na základě výpočtu ohybového momentu s ohledem na vypočítanou nárazovou plochu koruny, dosahovaly hodnot od 12,9 m/s do 38,8 m/s. CWS se pro většinu měřených jedinců pohybovala v rozmezí 20 – 30 m/s. Hodnota kritické rychlosti větru do 15 m/s se vyskytla u 3 jedinců. Vysoké, extrémní hodnoty CWS nad 38 m/s se objevily ve 2 případech (Obrázek č. 21).



Obrázek č. 21 Histogram vypočítaných hodnot kritické rychlosti větru (CWS). Červená křivka naznačuje očekávané normální rozdělení.

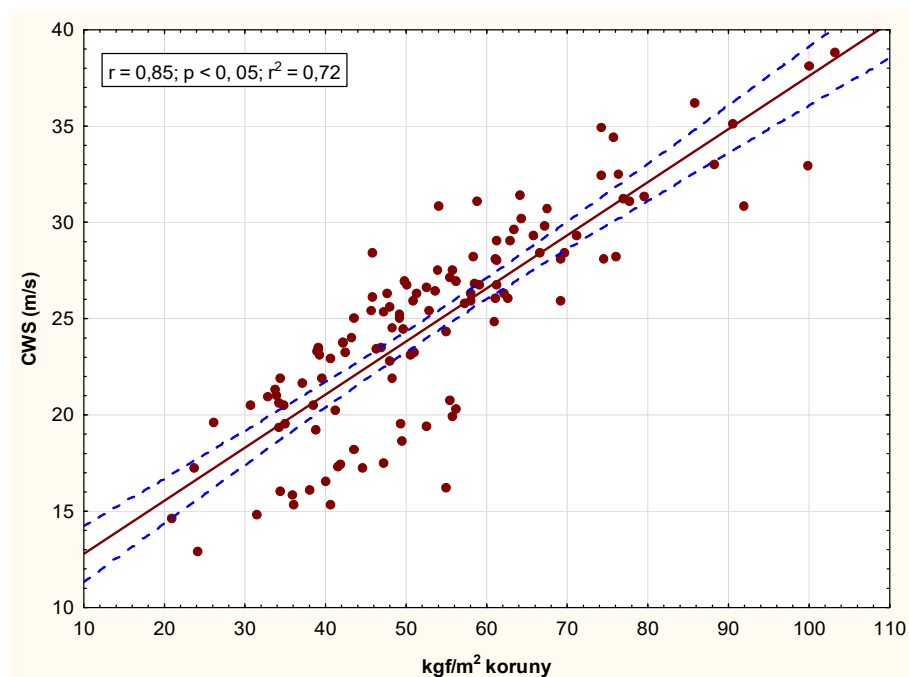
Vztah mezi kritickou silou a kritickou rychlostí větru je zobrazen na Obrázku č. 22. Obecně platí, že čím vyšší kritická síla, tím vyšší je potřebná kritická rychlost větru. I přes signifikantní vazbu těchto proměnných ( $r=0,52$ ,  $p<0,05$ ), tento vzájemný vztah vysvětluje pouze 27% variabilitu hodnot (Obrázek č. 23). Je z toho patrné, že je zde vazba mezi kritickou silou a CWS, ale je třeba zohlednit i další faktory (především nárazovou plochu koruny). Neplatí zde přímá úměra mezi kritickou silou a CWS. Se zvětšující se korunou je potřeba menší síla větru na jednotku plochy.





Obrázek č. 22 Vztah mezi kritickou silou a kritickou rychlostí větru (CWS).

Přesněji lze proto tento vztah mezi kritickou silou a CWS vyjádřit při zohlednění nárazové plochy koruny stromu. Po tomto účel byla kritická síla vydělena celkovou plochou nárazové koruny. Vztah výsledného koeficientu ( $\text{kg}/\text{m}^2$  koruny) představujícího sílu na  $\text{m}^2$  koruny, při které dojde k poškození stromu a CWS, je zobrazen na Obrázku č. 23. Výsledná korelace hodnoty  $r=0,85$ ,  $p<0,05$  a vysvětluje 72% variabilitu hodnot (Obrázek č. 23).

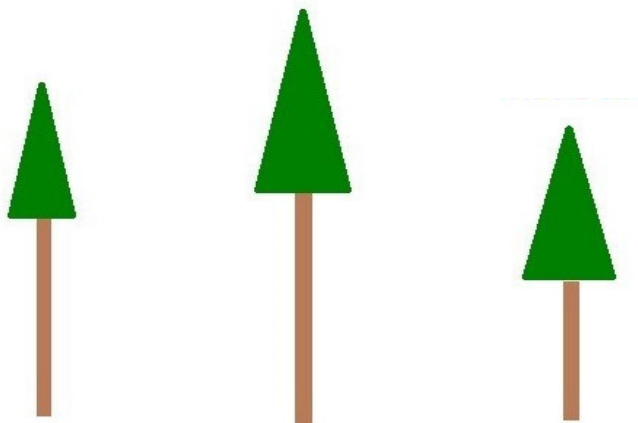


Obrázek č. 23 Vztah mezi CWS a jednotkou plochy koruny.

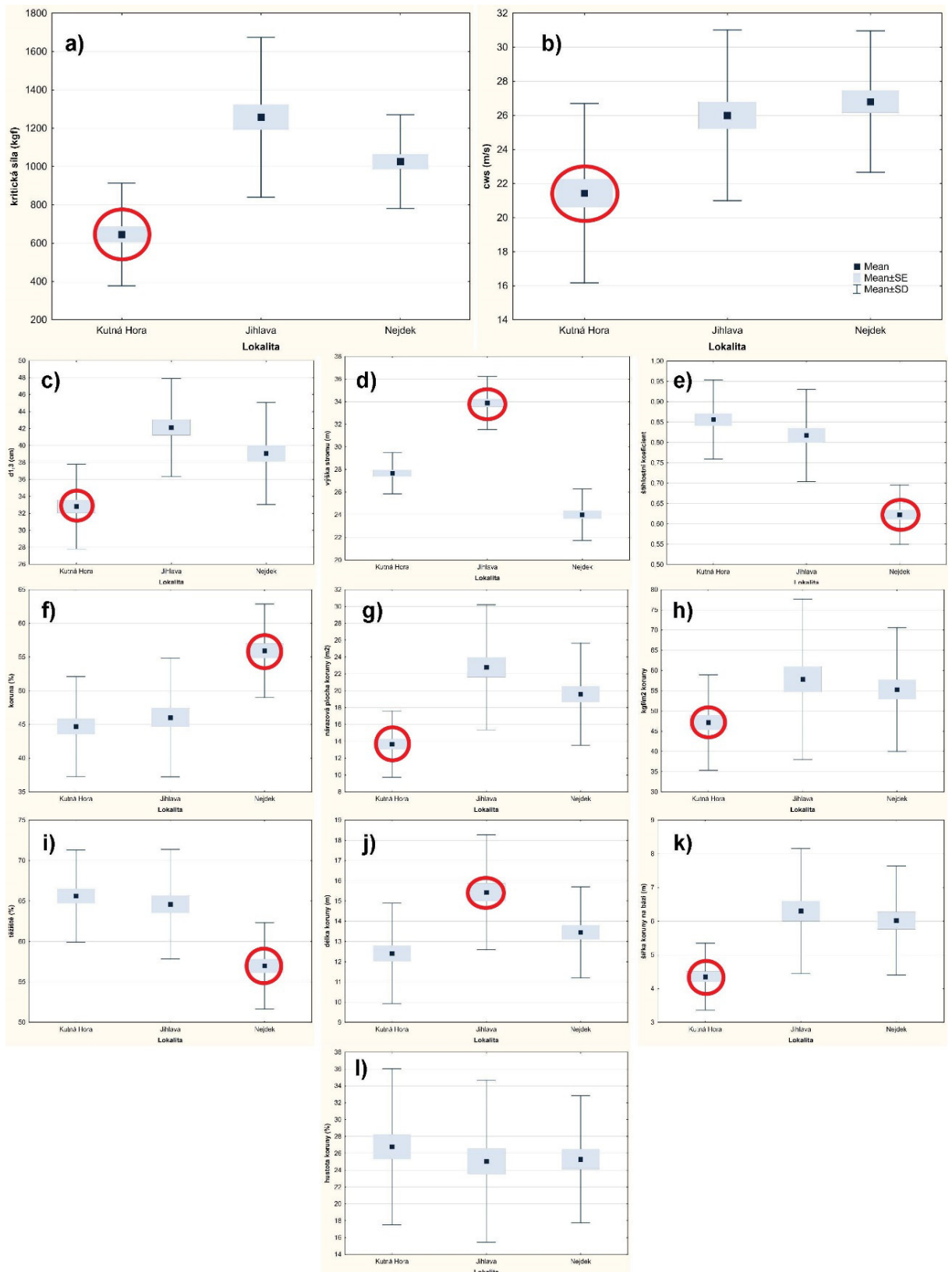
### 4.3 Porovnání naměřených hodnot mezi lokalitami

Následující kapitola se věnuje porovnání naměřených a vypočítaných hodnot mezi lokalitami. V Tabulce č. 9 jsou uvedeny aritmetické průměry naměřených veličin pro každou lokalitu a jejich směrodatné odchylky. Graficky jsou lokality porovnány na Obrázku č. 24 a výsledky K-W testu mezi lokalitami jsou uvedeny v Příloze č. 1.

Tabulka č. 9 Přehled průměrných hodnot za lokalitu a jejich směrodatné odchylky (v závorce).



	Kutná Hora	Jihlava	Nejdek
<b>Kritická síla (kgf)</b>	645,50 (±246,90)	1257,05 (±412,16)	1026,00 (±241,12)
<b>CWS (m/s)</b>	21,43 (±5,20)	26,00 (±4,95)	26,81 (±4,09)
<b>d<sub>1,3m</sub> (cm)</b>	32,81 (±4,93)	42,13 (±5,69)	39,06 (±5,94)
<b>Výška stromu (m)</b>	27,67 (±1,79)	33,88 (±2,32)	24,00 (±2,25)
<b>Štíhlostní koeficient</b>	0,85 (±0,09)	0,81 (±0,12)	0,62 (±0,07)
<b>Koruna (%)</b>	40,20 (±5,72)	44,16 (±11,47)	52,71 (±9,12)
<b>Nárazová plocha koruny (m<sup>2</sup>)</b>	13,66 (±3,87)	22,78 (±7,32)	19,57 (±5,97)
<b>kgf/m<sup>2</sup> koruny</b>	47,22 (±11,67)	55,15 (±19,56)	52,42 (±15,09)
<b>Těžiště (%)</b>	65,61 (±5,62)	64,60 (±6,68)	56,97 (±5,26)
<b>Délka koruny (m)</b>	10,99 (±1,70)	14,92 (±3,89)	12,65 (±2,52)
<b>Šířka koruny na bázi (m)</b>	4,35 (±0,98)	6,27 (±1,81)	6,02 (±1,59)
<b>Hustota koruny (%)</b>	26,72 (±8,98)	25,00 (±9,08)	25,41 (±6,68)



Obrázek č. 24 Porovnání proměnných v rámci lokalit. Tmavomodrý čtverec - průměr, světlemodrý obdélník - směrodatná chyba a svorka - směrodatná odchylka. Červeně jsou vyznačeny klíčové rozdíly v jednotlivých parametrech.

Naměřené hodnoty kritické síly byly výrazně nižší na lokalitě Kutná Hora (645,50 kgf), vzhledem k lokalitám Nejdek (1026 kgf) a Jihlava (1257,05 kgf), které se v naměřených hodnotách výrazně neliší (Obrázek č. 24a; Příloha č. 1). Podobně je tomu i v případě parametru CWS s výsledky - Kutná Hora (21,43 m/s), Jihlava (26 m/s) a Nejdek (26,81 m/s), (Obrázek č. 24b; Příloha č. 1), ale vzhledem k nejvyšší hodnotě kritické síly v lokalitě Jihlava a nejvyšší hodnotě CWS v Nejdku, lze usuzovat, že hodnoty CWS závisí i na dalších veličinách (Obrázek č. 24; Příloha č. 1). Na lokalitě Nejdek pozorujeme výrazně menší (24 m), více zavětvené stromy s poměrně velkou průměrnou výčetní tloušťkou (39,06 cm) a nízkým těžištěm (56,97 %) (Obrázek č. 24d,f,i; Příloha č. 1). Lokalita Jihlava představuje stromy s největší průměrnou výčetní tloušťkou (42,13 cm) i výškou (33,88 m) (Obrázek č. 24c,d; Příloha č. 1). Naopak stromy s nejmenší průměrnou výčetní tloušťkou (32,81 cm) jsou na lokalitě Nejdek (Obrázek č. 24c; Příloha č. 1)

Jedním z významných ukazatelů ovlivňujících rozdílnou odolnost je bezesporu štíhlostní koeficient (Obrázek č. 24e; Příloha č. 1), u kterého vidíme výrazně nižší hodnotu v Nejdku (0,62) v porovnání s Jihlavou (0,81) a Kutnou Horou (0,85) (Obrázek č. 24e; Příloha č. 1). Výrazně vyšší procento zelené koruny (Obrázek č. 24f; Příloha č. 1) vidíme opět u Nejdku (52,71 %), nejnižší u Kutné Hory (40,20 %). Nejnižší nárazová plocha koruny je na lokalitě Kutná Hora (13,66 m<sup>2</sup>), následuje lokalita Nejdek (19,57 m<sup>2</sup>) a největší plocha potom v Jihlavě (22,78 m<sup>2</sup>) (Obrázek č. 24g; Příloha č. 1), s čímž souvisí další zkoumaný parametr kritická síla na 1 m<sup>2</sup> koruny (Obrázek č. 24h; Příloha č. 1). Zde nejsou hodnoty tolik odlišné vzhledem ke vztahu kritické síly a nárazové plochy koruny - Kutná Hora (47,22 kgf/m<sup>2</sup>), Jihlava (55,15 kgf/m<sup>2</sup>), Nejdek (52,42 kgf/m<sup>2</sup>). Dalším významným parametrem pro výslednou CWS je těžiště koruny (Obrázek č. 24i; Příloha č. 1). Je zřejmý rozdíl mezi Nejdkem (56,97 %) a lokalitami Kutná Hora (65,61 %) a Jihlava (64,60 %). Nejdelší (14,92 m) i nejširší koruny na bázi (6,27 m) vidíme na lokalitě Jihlava, naopak Kutná Hora vykazuje nejmenší hodnoty těchto veličin, délka koruny (10,99 m), šířka koruny na bázi (4,35 m) (Obrázek č. 24h,j,k; Příloha č. 1). Vyrovnané jsou hodnoty hustoty koruny, kde pozorujeme hodnoty od 25 % v Jihlavě do 26,72 % v Kutné Hoře (Obrázek č. 24l; Příloha č. 1).

## 5 Diskuze

Vítr a větrné kalamity nejsou častým jevem pouze v České republice. Vítr je jedním z nejvýznamnějších disturbančních činitelů i v jiných státech, všude tam kde převažují jehličnaté porosty. S následky větru a vichřic se potýká převážně centrální a severní Evropa, zejména Finsko, Švédsko (Gerendiaian et al., 2012), Německo, Francie, Švýcarsko, Slovensko, Polsko či Velká Británie (Slodičák, 1995; Nicoll et al., 2006). Vítr nepoškozuje lesy jen v Evropě, ale i v oblastech Severní Ameriky, Japonska nebo Nového Zélandu (Slodičák 1995; Kamimura a Shirashi, 2007).

Ve většině zemí potýkajících se s větrnými kalamitami již byly prováděny výzkumy zaměřující se na odolnost dřevin proti působení větru. Ve Finsku se touto problematikou zabýval např. Peltola et al., 2000, ve Velké Británii Gardiner et al., 2000 a Nicoll et al., 2006, dále probíhaly studie ve Švýcarsku Lundström et al., 2007 či Francii Gardiner et al., 2000. Mimo Evropu se touto problematikou zabýval například v Kanadě Ruel et al., 2000. V České republice rozsáhlejší studie této problematiky chybí. Geoinformační analýza poškození lesních porostů větrem (Mikita, 2009) se zabývala rozbohem příčin vzniku škod větrem v lesních porostech v oblasti Národního parku Šumava.

Z dlouhodobých meteorologických predikcí se s větrem, větrnými kalamitami a jejich následky budeme potýkat i v budoucnosti (Brázdil et al., 2004). Negativní povětrnostní podmínky ovlivňují i rozšíření sekundárních škůdců, kterým je například kůrovec (*Ips typographus*, *Pityogenes chalcographus*, *Ips duplicatus* atd.), a to vede k zvýšení kalamitních a nahodilých těžeb (Lubojacký et al., 2018). Výsledkem jsou velké finanční ztráty nejen lesního hospodářství, ale i dřevozpracujícího průmyslu (Pernica, 2016). Klimatické změny a jejich negativní dopady na lesní hospodářství nejsou ničím novým a projevují se již poměrně dlouhou dobu (Pernica, 2016). Obecně oteplování by mělo zvýšit nestabilitu tepelné stratifikace a obsah vodní páry, který by mohl být příznivý po vyšší frekvenci, jakož i intenzitu silných větru, stejně tak v případě větrných bouří. Současně nelze pochybovat o tom, že silný vítr bude spolu se srážkami a teplotními extrémy patřit mezi významné faktory ovlivňující lidskou společnost ve 21. století (Brázdil et al., 2004).

V posledních letech byly vyvinuty mechanické modely jako je HWIND (Peltola et al., 1999) a ForestGALES (Gardiner et al., 2000, 2008), vhodné pro posuzování rizik škod způsobených větrem a sněhem v souvislosti s obhospodařováním lesů. Modely jsou často využívanou metodou pro vědecké stanovení odolnosti jednotlivých dřevin. Finská studie se ve svých experimentech zaměřila na nejčastější dřeviny svého území – smrk, borovici a břízu (Peltola et al., 2000), zatímco Gardiner et al., 2000 na území Velké Británie testoval stejnověké porosty smrku sitka.

Model ForestGALES byl modifikován i na další druhy dřevin v Kanadě (Ruel et al., 2000; Byrne a Mitchell, 2013), Francii (Cucchi et al., 2005), Japonsku (Kamimura et al., 2008) a Novém Zélandu (Moore a Quine, 2000). Model HWIND byl využit při studiích ve Švédsku (Blennow a Sallnäs, 2004) a Nizozemsku (Schelhass et al., 2007).

Uvedené modely se neliší pouze testovanou dřevinou, ale i principem výpočtu. Model HWIND počítá s celkovou výškou kmene a váhou koruny a kmene (Peltola et al., 2000). U modelu ForestGALES vycházejí výpočty z charakteristik nerovností povrchu před překážkou, faktoru turbulence větru, hustoty porostu, výčetní tloušťky, výšky stromu a vzdálenosti stromu od porostního okraje (Gardiner a Quine, 2000). Dalším rozdílem mezi modelem HWIND a ForestGALES je, že do výpočtu kritického momentu vývratu jsou započítány i kořenové dimenze (kořenové hmoty) na rozdíl od studií empirického vztahu stromových tahových zkoušek, založeného na odhadu kmenové hmoty (Mitchell a Ruel, 2015). Společným atributem obou modelů je předpovídání kritické rychlosti větru na základě základních parametrů porostu, jako je výčetní tloušťka a štíhlostní koeficient. Potenciál pro využití těchto snadně zjistitelných parametrů pro zjišťování odolnosti smrkových porostů na území ČR byl potvrzen i v rámci této práce. Hodnoty kritických sil i CWS výrazně korelovaly jak s výčetní tloušťkou, tak i štíhlostním koeficientem a parametry korun.

Výskyt větrného poškození je závislý především na lokálním klimatu, srážkách, topografii, typu půdy, druhu dřeviny, vlastnostech dané dřeviny, kořenovém systému a rozměru stromů (Cremer et al., 1982; Gardiner a Quine 2000; Ruel et al., 2000).

Studie ve Finsku pomocí výše zmíněného modelu (HWIND) prokázala, že porosty s vyšším štíhlostním koeficientem potřebovaly nižší rychlost větru k vyvrácení či zlomení stromu (Gerendiaian et al., 2012). Získaná data v této práci jejich výsledky potvrzují. V lokalitě Nejdek byl nejnižší štíhlostní koeficient a nejvyšší kritická rychlost větru, naopak v lokalitě Kutná Hora byl štíhlostní koeficient a kritická rychlost větru nejnižší. Peltola et al., 2000 zjistila, že stromy s vysokým štíhlostním koeficientem jsou rovněž náchylnější ke zlomům než k vývrátům, což potvrzují i naše data. Lokalita Jihlava a lokalita Kutná Hora s vyšším štíhlostním koeficientem, měly významně vyšší počet zlomených stromů než lokalita Nejdek s nízkým štíhlostním koeficientem.

Offergeld, 1986; Laiho, 1987; Poeppel, 1994 tvrdí, že podmáčené půdy poskytují menší podporu kořenovým systémům a mají větší náchylnost k poškození větrem. Stejněho výsledku bylo dosaženo i v našem měření v lokalitě Kutná Hora, kde je půda výrazně ovlivněna vodou (půdní typ pseudoglej). Zde byla potřeba nižší kritická síla na vývrát či zlom stromu než v lokalitách v Jihlavě a Nejdku, kde je půdní typ kambizem respektive podzol. Stejně výsledky podporuje i studie ve Velké Británii (Nicoll et al., 2006). Ta prokázala spojitost mezi typem půdy v lokalitě a kritickou silou potřebnou k poškození stromu. Uvádí, že u stromů, které mají přibližně stejné parametry, může vliv půdy tvořit až třetinový rozdíl tažné síly potřebné k vyvrácení či zlomení stromu.

Vlastníkům lesů a jejich managementu, by ideální model odolnosti stromu založený na dendrometrických parametrech umožnil předvídat poškození větrem pro konkrétní místa či porosty a ukázal by možnosti, které by tuto pravděpodobnost mohly ovlivnit – pěstební činnost, probírky, těžbu. Přenesení těchto modelů do prostředí GIS (Geografické informační systémy), který by byl k dispozici lesnímu managementu (Mitchell a Ruel, 2015), tvoří potenciální základ k vytvoření sofistikovaného systému na podporu rozhodování a předpovídání a prevenci škod větrem pro vlastníky lesa a lesní hospodáře.

## 6 Závěr

Uvedené výsledky potvrdily, že mechanická stabilita smrku závisí především na jeho parametrech – výčetní tloušťce, štíhlostnímu koeficientu, výšce těžiště stromu a délce koruny. V případě štíhlostního koeficientu, který představuje poměr mezi tloušťkou a výškou stromu, byla potvrzena negativní korelace, tzn. čím větší štíhlostní koeficient je, tím jsou stromy méně odolné. Přestože vztah kritické síly a kritické rychlosti větru je statisticky významný, při zohlednění dalšího faktoru nárazové plochy koruny lze přepoččet výrazně zpřesnit. Dosažené výsledky jsou v souladu s obecnými závěry ostatních studií již dříve publikovaných v zahraničí.

Provedený výzkum byl specifický tím, že se zabýval, oproti zahraničním studiím, pouze smrkem ztepilým v mýtním věku, který je v současné době nejběžnější dřevinou v lesích České republiky a zároveň patří k nejvíce ohroženým dřevinám při větrných kalamitách. Získaná data potom mohou tvořit základ např. při parametrizaci existujících modelů na podmínky ČR.

Vhodným hospodařením v lesních porostech lze modifikací klíčových parametrů lesních porostů zvýšit jejich mechanickou odolnost. Znamenalo by to věnovat při obnově i pěstování lesa pozornost výběru vhodné dřeviny pro daný typ stanoviště, zaměřit se na vhodné pěstební zásahy a v neposlední řadě využívat výsledky současných vědeckých (výzkumných) metod.



## 7 Seznam literatury a použitých zdrojů

### 7.1 Tištěná literatura

BRÁZDIL, R. *History of weather and climate in the Czech lands volume VI: Strong winds*. 1. Brno: Masarykova univerzita v Brně, 2004. 377s.

GARDINER, B., B. NICOLL, S. HALE, A. PEACE, B. RAYNER, J. SUÁREZ, S. BATHGATE a M. BRADY. *ForestGALES: A wind risk decision support tool for forest management in Britain*. Forest Research. 2015. 28s.

GARDINER, B., H. PELTOLA a S. KELLOMAKI. Comparison of two models for predicting the critical wind speeds required to damage coniferous trees. *Ecological Modelling*. 2000, **129**(1), 1-23.

GARDINER, B., K. BYRNE, S. HALE, K. KAMIMURA, S. MITCHELL, H. PELTOLA a J. C. RUEL. A review of mechanistic modelling of wind damage risk to forest. *Forestry: An International Journal of Forest Research*. 2008, **81**(3), 447-463s.

HIEKE, K. *Encyklopedie jehličnatých stromů a keřů*. Brno: Computer Press, 2008, 248s.

HOLUŠA, J., B. KONOPKA, V. ŠTÍCHA, et al. *Neperiodická zpráva za rok 2015: QJ1520006 „Hodnocení rizika poškození lesních porostů větrem: Vývoj a kalibrace národního prediktivního modelu*. Praha, 2015. 45s.

HOLUŠA, J., B. KONOPKA, V. ŠTÍCHA, et al. *Neperiodická zpráva za rok 2016: QJ1520006 „Hodnocení rizika poškození lesních porostů větrem: Vývoj a kalibrace národního prediktivního modelu*. Praha, 2016. 121s.

HOLUŠA, J., B. KONOPKA, V. ŠTÍCHA, et al. *Neperiodická zpráva za rok 2017: QJ1520006 „Hodnocení rizika poškození lesních porostů větrem: Vývoj a kalibrace národního prediktivního modelu*. Praha, 2017. 65s.

KAMIMURA, K. a N. SHIRAISHI. A review of strategies for wind damage assessment in Japanese forests. *Journal of Forest Research*, 2007, (12). 162-176s.

KNÍŽEK, M. *Zpravodaj ochrany lesa: Škodliví činitelé v lesích Česka 2018/2019*. Jíloviště: Lesní ochranná služba, 2019. 65s.

- KOLEKTIV AUTORŮ. *Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství České republiky v roce 2017*. Praha: Ministerstvo zemědělství, 2018. 118s.
- KOLEKTIV AUTORŮ. *Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství České republiky 2015*, Praha: Ministerstvo zemědělství, 2016. 132s.
- KOŠULIČ ST., M. Stabilita přírodního lesa. *Lesnická práce*. Kostelec nad Černými lesy: Lesnická práce, 2006, **85**(1), 24-25s.
- KRÁL, J. *Navrhování konstrukcí na zatížení větrem: příručka k ČSN EN 1991-1-4*. Praha: Pro Ministerstvo pro místní rozvoj a Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě vydalo Informační centrum ČKAIT, 2010. 116s.
- KREJČÍ, L. Geografická analýzy lokálního výskytu lesních polomů na základě empirického přístupu. *Silva Gabreta*. Vimperk, 2013, **19**(2), 81-104s.
- KREMER, B., P. *Stromy: v Evropě zdomácnělé a zavedené druhy*. Praha: Knižní klub, 1995. 287s.
- KŘÍSTEK, Š., URBAŇCOVÁ, N., HOLUŠA, J. *Hodnocení škod způsobených sněhem na lesních porostech: certifikovaná metodika*. 2012. 42s.
- LUBOJACKÝ, J. *Škody působené větrem*. Lesnická práce, příloha. Kostelec nad Černými lesy: Lesnická práce, 2013, 92, 12, I.-IV. 4s.
- MIKITA, T. *Geoinformační analýza poškození lesních porostů větrem*. Brno, 2009. Disertační práce. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně. Vedoucí práce Dr. Klimánek.
- MOORE, J. R. *Differences in maximum resistive bending moments of Pinus radiata trees grow on a range of soil types*. Forest Ecology and Management. 2000, 135, 63-71s.
- MUSIL, I., HAMERNÍK, J. *Lesnická dendrologie 1: jehličnaté dřeviny: přehled nahosemenných (i výtrusných) dřevin*. 2. Praha: Česká zemědělská univerzita, 2003. 177s.
- NICOLL, B. C., B. GARDINER, B. RAYNER a A. J. PEACE. Anchorage of coniferous trees in relation to species, soil type and rooting depth. *Canadian Journal of Forest Research*. 2017, **36**(7), 1871-1883s.

- PAŘÍZKOVÁ, E. *Reakce smrku ztepilého (Picea abies, (L.) Karst.) na namáhání ohybem*. Praha, 2017. Bakalářská práce. Česká zemědělská univerzita v Praze. Vedoucí práce Ing. Václav Štícha, Ph. D.
- PELTOLA, H., KELLOMAKI S., HASSINEN A., GRANANDER M. *Mechanical stability of Scots pine, Norway spruce and birch: an analysis of tree-pulling experiments in Finland*. 2000, 135, 143-153s.
- PERERA, A. H., L. J. BUSE a L. J. BUSE. *Simulation Modeling of Forest Landscape Disturbances*. 2015, 17-39s.
- PLÍVA, K. *Typologický klasifikační systém ÚHUL*. Brandýs nad Labem: ÚHUL, 1987. 52s.
- PRAUS, L. *Mechanická stabilita stromů a metody jejího zjišťování. Plošné poškození lesů způsobené povětrnostními vlivy*. 2006, 33-41s.
- SAVILL, P. S. *Silviculture in windy climate*. Forest Abstrakt. [S.l.]: [s.n.], 1983, 44, 473-488s.
- SEQUENS, J. *Dendrometrie*. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze. 2007, 152s.
- SCHELHASS, M. J., G.J. NABUURS a A. SCHUCK. *Natural disturbances in the European forests in the 19th and 20th centuries. Global change biology*. 2000, **9**(11), 1620-1633s.
- SIMANOV, V. *Vichřice – rostoucí hrozba evropským lesům. Lesnické práce*. 2011, **90**(9), 42-45s.
- ŠNYTR, O. *Vyhodnocení genových zdrojů lesních dřevin na území CHKO Jizerské hory*. Loučná nad Nisou, 2009. Disertační práce. Česká zemědělská univerzita v Praze. Vedoucí práce Prof. Ing. Jaroslav Kobliha, CSc.
- TOLASZ, Radim. *Atlas podnebí Česka: Climate atlas of Czechia*. 1. Praha: Český hydrometeorologický ústav, 2007. 255s.
- ÚHUL. *Taxonomický klasifikační systém půd ČR: Půdní typy, subtypy, variety*. Brandýs nad Labem. [1990]. [12s].

VÚLHM. *Škodliví činitelé v lesích Česka: sborník referátů z celostátního semináře s mezinárodní účastí*. Praha: Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti, 2013.

VYSOUDIL, M. *Základy fyzické geografie 1: Meteorologie a klimatologie*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2013. [55 s].

WAISOVÁ, J. *Analýzy škodlivých biotických a abiotických činitelů na jehličnaté a listnaté porosty LHC Škola Žlutice*. Praha, 2012. Disertace. Česká zemědělská univerzita. Vedoucí práce Prof. Ing. M. Turčáni, Ph.D.

## 7.2 Online literatura

Distribution map of Norway spruce (*Picea abies*). In: euforgen.org [online]. 2009, Bonn, Německo: EUFORGEN 2009, 2013 [cit. 2019-01-30]. Dostupné z: [http://www.euforgen.org/fileadmin/templates/euforgen.org/upload/Documents/Maps/PDF/Picea\\_abies.pdf](http://www.euforgen.org/fileadmin/templates/euforgen.org/upload/Documents/Maps/PDF/Picea_abies.pdf)

Forestorm. In: *Institut Européen de la Forêt Cultivée* [online]. Francie, 1998, 2014 [cit. 2019-02-17]. Dostupné z: <http://www.iefc.net/storm/>

Oblastní plány rozvoje lesů. *Ústav pro hospodářskou úpravu lesa* [online]. Brandýs nad Labem: 2019 [cit. 2019-02-14]. Dostupné z: <http://geoportal.uhul.cz/mapy/MapyOprl.html>

*Picea abies* - Smrk ztepilý. In: *Natura Bohemica příroda České republiky* [online]. Filip Trnka, 2008, 2018 [cit. 2019-01-31]. Dostupné z: <http://www.naturabohemica.cz/picea-abies/>

*Picea abies*. In: *Botany.cz* [online]. 2007, Petr Krása, 2007 [cit. 2019-01-30]. Dostupné z: <https://botany.cz/cs/picea-abies/>

Přehled lesních typů a souborů lesních typů v ČR. In: *UHUL* [online]. Brandýs nad Labem, ÚHÚL, 2003, 2003 [cit. 2019-02-10]. Dostupné z: [http://www.uhul.cz/images/typologie/tab\\_LT\\_web.pdf](http://www.uhul.cz/images/typologie/tab_LT_web.pdf)

Smrk ztepilý. In: *Vojenské lesy a statky dětem* [online]. Praha, 2016, 2019 [cit. 2019-04-16]. Dostupné z: <https://deti.vls.cz/data/web/brevire/stromy/smrk-ztepily.jpg>

Sucho a kůrovec letošním společným nepřítelem lesů. In: *Silvarium.cz* [online]. 2016, Michal, 2016 Pernica [cit. 2019-04-17]. Dostupné z: <http://www.silvarium.cz/lesnictvi/sucho-a-kurovec-letosnim-spolecnym-nepritelem-lesu>

The Beaufort Scale. In: *Met office* [online]. Exeter: Devon, 2017, 2018 [cit. 2019-02-17]. Dostupné z: <https://www.metoffice.gov.uk/learning/library/archive-hidden-treasures/beaufort-scale>

Vítr. In: *Český hydrometeorologický ústav* [online]. 2005, 2005 [cit. 2019-02-17]. Dostupné z: <http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/om/sivs/vitr.html>

## **8 Seznam příloh**

Příloha č. 1 Porovnání lokalit pomocí Kruskal-Wallisova testu.....	71
--	----

## 9 Přílohy

Příloha č. 1 Výsledky Kruskal-Wallisova testu porovnání jednotlivých proměnných mezi lokalitami. Červeně jsou vyznačeny statisticky signifikantní rozdíly mezi lokalitami.

Kritická síla (kgf)	Kruskal-Wallis test		
	Kutná Hora (R:29,938)	Jihlava (R:83,718)	Nejdek (R:66,938)
Kutná Hora		<b>6,927869</b>	<b>4,796708</b>
Jihlava	<b>6,927869</b>		2,161617
Nejdek	<b>4,796708</b>	2,161617	

CWS (m/s)	Kruskal-Wallis test		
	Kutná Hora (R:40,000)	Jihlava (R:67,026)	Nejdek (R:73,150)
Kutná Hora		<b>3,481379</b>	<b>4,297591</b>
Jihlava	<b>3,481379</b>		0,788925
Nejdek	<b>4,297591</b>	0,788925	

Výčetní tloušťka (d1,3m)	Kruskal-Wallis test		
	Kutná Hora (R:31,875)	Jihlava (R:82,372)	Nejdek (R:66,313)
Kutná Hora		<b>6,504877</b>	<b>4,464503</b>
Jihlava	<b>6,504877</b>		2,068720
Nejdek	<b>4,464503</b>	2,068720	

Výška stromu (m)	Kruskal-Wallis test		
	Kutná Hora (R:57,525)	Jihlava (R:99,103)	Nejdek (R:24,350)
Kutná Hora		<b>5,355923</b>	<b>4,300832</b>
Jihlava	<b>5,355923</b>		<b>9,629447</b>
Nejdek	<b>4,300832</b>	<b>9,629447</b>	

Štíhlostní koef.	Kruskal-Wallis test		
	Kutná Hora (R:82,900)	Jihlava (R:73,103)	Nejdek (R:24,325)
Kutná Hora		1,262082	<b>7,593707</b>
Jihlava	1,262082		<b>6,283410</b>
Nejdek	<b>7,593707</b>	<b>6,283410</b>	

Koruna (%)	Kruskal-Wallis test		
	Kutná Hora (R:43,075)	Jihlava (R:49,333)	Nejdek (R:87,325)
Kutná Hora		0,806184	<b>5,736603</b>
Jihlava	0,806184		<b>4,893996</b>
Nejdek	<b>5,736603</b>	<b>4,893996</b>	

Nárazová plocha koruny (m <sup>2</sup> )	Kruskal-Wallis test		
	Kutná Hora (R:33,775)	Jihlava (R:79,872)	Nejdek (R:66,850)
Kutná Hora		<b>5,938079</b>	<b>4,287868</b>
Jihlava	<b>5,938079</b>		1,677437
Nejdek	<b>4,287868</b>	1,677437	

Kritická síla/plocha a koruny (kgf/m <sup>2</sup> )	Kruskal-Wallis test		
	Kutná Hora (R:48,300)	Jihlava (R:68,103)	Nejdek (R:63,800)
Kutná Hora		<b>2,550919</b>	2,009432
Jihlava	<b>2,550919</b>		0,554246
Nejdek	2,009432	0,554246	

Těžiště (%)	Kruskal-Wallis test		
	Kutná Hora (R:76,925)	Jihlava (R:70,667)	Nejdek (R:32,675)
Kutná Hora		0,806184	<b>5,736603</b>
Jihlava	0,806184		<b>4,893996</b>
Nejdek	<b>5,736603</b>	<b>4,893996</b>	

Délka koruny (m)	Kruskal-Wallis test		
	Kutná Hora (R:42,263)	Jihlava (R:80,359)	Nejdek (R:57,888)
Kutná Hora		<b>4,907497</b>	2,025637
Jihlava	<b>4,907497</b>		<b>2,894722</b>
Nejdek	2,025637	<b>2,894722</b>	

Šířka koruny na bázi (m)	Kruskal-Wallis test		
	Kutná Hora (R:34,450)	Jihlava (R:74,500)	Nejdek (R:71,412)
Kutná Hora		<b>5,159146</b>	<b>4,791846</b>
Jihlava	<b>5,159146</b>		0,397724
Nejdek	<b>4,791846</b>	0,397724	

Hustota koruny (%)	Kruskal-Wallis test		
	Kutná Hora (R:64,175)	Jihlava (R:56,513 )	Nejdek (R:59,225)
Kutná Hora		0,987024	0,641722
Jihlava	0,987024		0,349377
Nejdek	0,641722	0,349377	