

**TOMASZ JELONEK, RYSZARD WALKOWIAK, MARCIN JAKUBOWSKI,
ARKADIUSZ TOMCZAK**

Wskaźniki stabilności drzew w drzewostanach sosnowych uszkodzonych przez wiatr

Indices of tree stability in Scots pine stands damaged by wind

ABSTRACT

Jelonek T., Walkowiak R., Jakubowski M., Tomczak A. 2013. Wskaźniki stabilności drzew w drzewostanach sosnowych uszkodzonych przez wiatr. Sylwan 157 (5): 323-329.

The aim of the study was to determine the effect of selected tree stability indices described by individual biometric characteristics on the formation of their wind resistance. The analysis of tree stability was based on easily measurable tree traits, such as height, breast height diameter, crown parameters as well as the centre of gravity and slenderness factor.

Investigations were conducted in wind-damaged Scots pine stands, where a total of over 600 trees were measured, of which almost 40% specimens were wind-broken. Results indicate that a significant role in the modification of tree stability is played by the slenderness factor, the location of the centre of gravity and crown parameters. Most of the analysed traits are strongly cross-correlated. However, these are slenderness and crown length that describe tree stability the best.

KEY WORDS

Scots pine, stability, wind, damage

ADDRESSES

Tomasz Jelonek ⁽¹⁾ – e-mail: tomasz.jelonek@up.poznan.pl

Ryszard Walkowiak ⁽²⁾ – e-mail: rwal@up.poznan.pl

Marcin Jakubowski ⁽¹⁾ – e-mail: marcin.jakubowski@up.poznan.pl

Arkadiusz Tomczak ⁽¹⁾ – e-mail: aekadiusz.tomczak@up.poznan.pl

⁽¹⁾ Katedra Użytkowania Lasu; Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu; ul. Wojska Polskiego 71A; 60-625 Poznań

⁽²⁾ Katedra Metod Matematycznych i Statystycznych; Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu; ul. Wojska Polskiego 71A; 60-625 Poznań

Wstęp

Wiatr ma istotny wpływ na strukturę i funkcjonowanie ekosystemów leśnych w sposób ciągły i powoduje znaczne straty ekonomiczne w lasach gospodarczych, dlatego jego oddziaływanie stało się obiektem zainteresowania wielu badaczy [Fournier i in. 2006; Peltola 2006; Quine, Gardiner 2007]. W Europie katastrofalne w skutkach wichury miały miejsce między innymi w latach 1999 (Lothar), 2005 (Gudrun) czy 2007 (Kyrill). W 2011 roku szkody wywołane przez wiatr objęły ponad 400 000 m³ drewna, z czego we wrześniu na terenie RDLP Szczecin zniszczeniu uległo około 240 000 m³.

Szkody w lasach powodowane przez wiatr nie ograniczają się jedynie do wysokiego obciążenia statycznego drzew związanego z jego dużą prędkością. Mogą również wystąpić z powodu reakcji drzew na obciążenia dynamiczne [Mayer 1987; Peltola i in. 1993; Kerzenmacher, Gardiner 1998; Flesch, Wilson 1999]. W celu złagodzenia skutków działalności silnych wiatrów, wiele

badania koncentruje się na zrozumieniu sposobu, w jaki wiatr oddziałuje na pojedyncze drzewo [Mayer 1987; Gardiner 1994; Wood 1995]. James i in. [2006] stwierdzili, że wpływ na stabilność mechaniczną drzewa pod obciążeniem dynamicznym ma jego wielkość kształt i struktura. Zależność ta jest ściśle związana z procesem wzrostu, który w dużej mierze podyktowany jest ograniczeniami fizjologicznymi, zwłaszcza dotyczącymi fotosyntezy i transportu wody. Jeśli te nie zostałyby przekroczone, to dochodzą jeszcze ograniczenia wielkości i kształtu nałożone przez układy biomechaniczne [Spatz, Bruechert 2000].

W ujęciu historycznym biomechaniczne teorie wzrostu drzewa przedstawili Metzger oraz Jaccard [Zajączkowski 1991]. W teorii mechanicznej Metzgera założono, iż kształtowanie się pnia jest reakcją na siły zginania oraz nacisku, a formująca się strzała dąży do optymalizacji budowy w taki sposób, aby naprężenia rozkładały się możliwie równomiernie. W założeniach teorii fizjologicznej Jaccarda głównym czynnikiem kształtującym formę strzały jest funkcja przewodzenia wody. Obecnie teorie biomechaniczne dowodzą, że promieniowy wzrost drzewa jest odpowiedzią na mechaniczny stres spowodowany działaniem sił wiatru na drzewo [Baker 1995; Peltola 2006] bądź opisują biomechanikę strzały (statykę drzewa) jako odpowiedź na wzrost drzewa oraz przenoszenie środka ciężkości poddanego siłom grawitacji [Almérás, Fournier 2008]. Według Jaworskiego [2004] drzewo łamie się, gdy moment spowodowany przemieszczeniem się jego masy w powiązaniu z momentem wynikającym z naporu wiatru przekraczają wytrzymałość pnia na złamanie. Zatem drzewa, które charakteryzują się większym współczynnikiem smukłości, mają dłuższe okresy drgań wymuszonych, a co za tym idzie są silniej obciążane przez wiatr.

Pełniejsze zrozumienie zagadnień związanych z oddziaływaniem wiatru na drzewa daje poznanie teorii kształtu strzały, w których bierze się pod uwagę interakcje zachodzące między drzewem a siłami zewnętrznymi [Zajączkowski 1991]. Teorie te biorą pod uwagę takie czynniki jak szybkość wiatru, przewiewność koron, masę drzewa oraz zmianę właściwości mechanicznych tkanki drzewnej wzdłuż pnia [Ylinen 1952]. Według badań Camerona i Dunhamana [1999] na powstanie złamania drzew na skutek działania wiatru istotnie wpływa obecność drewna reakcyjnego oraz sęków.

W badaniach nad odpornością drzew i drzewostanów na działanie wiatru stabilność definiuje się współczynnikiem smukłości [Erteld, Hengst 1966; Jaworski 2004; Peltola 2006]. Jest on uznany za odpowiednią miarę do określania stabilności drzew oraz ich odporności na działanie wiatru. Jak podaje Zajączkowski [1991], sosny o współczynniku smukłości 71 (pierśnica 22,5 cm i wysokość 16 m) mają przy prędkości wiatru 17 m/s graniczny moment zginający wynoszący około 40 kNm, natomiast sosny o współczynniku smukłości 107 (odpowiednio 15 cm i 16 m) łamią się przy momencie gnącym wynoszącym zaledwie 12 kNm. Z badań prowadzonych przez Pettyego i Swaina [1985] wynika, że na uszkodzenie drzewa w wyniku działania silnego wiatru wpływa obciążenie przez wiatr górnej (4-metrowej) części korony, na którą przypada aż około 80% momentu gnącego. Można zatem przypuszczać, że czynnikiem istotnie wpływającym na stabilność drzewa jest wielkość/masa jego korony oraz jej ażurowość. Z czego ta ostatnia może powodować różnice momentu zginającego powodowanego przez wiatr sięgające nawet 60% i tym samym istotnie kształtować odporność drzewa na działanie wiatru.

Celem pracy jest analiza wpływu wybranych wskaźników opisujących stabilność drzew na kształtowanie się ich odporności na działanie wiatru.

Metodyka

Badania zostały przeprowadzone w 2011 roku na terenie RDLP Gdańsk, Szczecinek, Łódź i Radom oraz LZD Siemianice. Łącznie założono sześć powierzchni badawczych, które zlokali-

zowano w uszkodzonych przez wiatr drzewostanach sosnowych III i IV klasy wieku (tab. 1). Powierzchnie dobrano tak, aby szkody od wiatru stanowiły co najmniej 10%, ale nie więcej niż 30% uszkodzeń drzewostanu (połamanych drzew). Założony górny przedział uszkodzeń gwarantuje pomiar i wybór drzew rzeczywiście uszkodzonych przez wiatr, a nie połamanych na wskutek obalania i przemieszczania się innych.

Na każdej z powierzchni ponumerowano trwale farbą wszystkie drzewa połamane oraz bezpośrednio sąsiadujące z nimi drzewa nieuszkodzone. W dalszej kolejności, z dokładnością do 0,5 cm, zmierzono pierśnice wszystkich wyznaczonych drzew. Zmierzono również wysokość drzew stojących oraz złomów. Następnie ustalono długość i średnicę koron. Pomiarów dokonano z dokładnością do 10 cm z zastosowaniem dalmierzy laserowych firmy Nikon oraz Bosch. Łącznie zmierzono 662 drzewa, z czego 406 to drzewa nieuszkodzone przez wiatr, a 256 – złamane.

Aby wyróżnić grupy cech silnie ze sobą skorelowanych i wybrać najważniejsze w kształtowaniu stabilności drzew, zastosowano metodę składowych głównych [Jambu 1991]. W celu sprawdzenia, czy drzewa złamane różnią się istotnie od drzew stojących pod względem wybranych wskaźników stabilności, przeprowadzono wielozmienną jednoczynnikową analizę wariancji. Dalsze analizy statystyczne wykonano przy pomocy pakietu STATISTICA 9.0 (StatSoft, Inc.).

Wyniki

W obu analizowanych grupach drzew średnia pierśnica ($D_{1,3}$) oraz wysokość (H) drzew były do siebie zbliżone (tab. 2). Istotnie statystycznie różnice wystąpiły w przypadku smukłości drzew ($H/D_{1,3}$) oraz objętości (V_k) i długości (L_k) koron, a także środka ciężkości drzewa (L_k/H). Drzewa uszkodzone przez wiatr charakteryzowały się większą wartością smukłości niż drzewa nieuszkodzone. Ponadto miały one istotnie większe korony i nieco niżej umiejscowiony środek ciężkości (tab. 2). Zauważono również, że odchylenia standardowe w przypadku smukłości drzewa oraz

Tabela 1.

Charakterystyka powierzchni badawczych
Description of research plots

Lokalizacja	Oddział	STL	Udział sosny	Wiek [lata]	Zwarcie
Świdwin	678d	BMśw	9	54	umiarkowane
Kolbudy	194k	LMśw	10	62	umiarkowane
Opoczno	115j	BMśw	10	60	umiarkowane
Przysucha	70g	LMśw	7	54	umiarkowane
Siemianice	45j	BMśw	9	55	umiarkowane
Bytów	489g	BMśw	7	58	umiarkowane

Tabela 2.

Średnia (odchylenie standardowe) analizowanych wskaźników stabilności
Mean (standard deviation) of analysed stability indices

Drzewa	N [szt.]	$D_{1,3}$ [m]	H [m]	$H/D_{1,3}$
Uszkodzone	256	23,88 (5,64)	20,94 (3,61)	90,03* (19,74)
Nieuszkodzone	406	24,55 (5,72)	20,99 (3,20)	85,95* (14,81)
Razem	662	24,29 (5,70)	20,97 (3,36)	87,99 (16,90)
	V_k [m ³]	D_k [m]	L_k [m]	L_k/H
Uszkodzone	74,04* (57,01)	3,71 (1,20)	6,08* (1,93)	0,29* (0,09)
Nieuszkodzone	66,25* (49,06)	3,81 (1,04)	5,24* (1,63)	0,25* (0,09)
Razem	69,18 (52,28)	3,77 (1,11)	5,55 (1,86)	0,27 (0,09)

* istotnie różne przy $\alpha=0,05$; significantly different at $\alpha=0,05$

objętości, długości i średnicy korony były większe u drzew, które zostały połamane (tab. 2). Świadczy to o większym morfologicznym zróżnicowaniu tej grupy na tle drzew, które nie zostały uszkodzone przez wiatr.

Najsilniej skorelowane były ze sobą środek ciężkości drzewa oraz długość korony (tab. 3). W obu badanych grupach drzew współczynnik korelacji był dodatni i wynosił 0,86 dla drzew złamanych i 0,90 drzew nieuszkodzonych. Zbliżone wartości współczynnika korelacji uzyskano w przypadku zależności średnicy korony od jej objętości. Równie wysokie, ale ujemne, stwierdzono w relacji między smukłością i pierśnicą drzewa (tab. 3). Smukłość korelowała istotnie ze wszystkimi analizowanymi w pracy cechami za wyjątkiem wysokości w grupie drzew złamanych oraz długości korony i środka ciężkości drzewa w grupie drzew nieuszkodzonych.

Wykres osypiska (ryc.) i wartości własne (tab. 4) pokazują, że aby wyróżnić grupy cech silnie ze sobą skorelowanych i wybrać najważniejsze w kształtowaniu stabilności drzew, wystarczy wziąć pod uwagę trzy pierwsze składowe. Wyjaśniają one bowiem aż 89,61% zmienności. Na podstawie współrzędnych czynnikowych zmiennych (tab. 5) trzy pierwsze czynniki określają trzy grupy skorelowanych ze sobą cech:

1. V_k , D_k , $D_{1,3}$ oraz $H/D_{1,3}$;
2. L_k i L_k/H ;
3. H i $H/D_{1,3}$.

Smukłość jest istotnie skorelowana z pozostałymi cechami z pierwszej grupy i występuje w grupie trzeciej. Tak więc współczynnik ten, wraz z dowolnie wybraną cechą z grupy drugiej (L_k lub

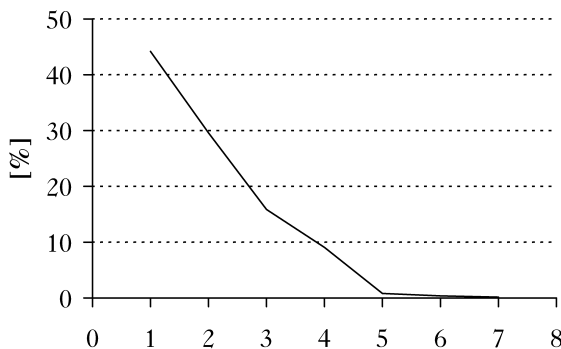
Tabela 3.

Współczynniki korelacji cząstkowych analizowanych zmiennych dla drzew uszkodzonych (prawa górna część) i nieuszkodzonych (lewa dolna część)

Partial correlation coefficients for analysed variables for damaged (upper right) and undamaged (bottom left) trees

	$D_{1,3}$	H	$H/D_{1,3}$	V_k	D_k	L_k	L_k/H_d
$D_{1,3}$		0,550*	-0,740*	0,521*	0,567*	0,164*	-0,116
H	0,624*		0,1052	0,362*	0,410*	0,074	-0,418*
$H/D_{1,3}$	-0,709*	0,060		-0,356*	-0,385*	-0,145*	-0,187*
V_k	0,463*	0,234*	-0,399*		0,899*	0,561*	0,314*
D_k	0,571*	0,288*	-0,508*	0,844*		0,255*	0,027
L_k	0,0863	0,092	-0,044	0,622*	0,231*		0,858*
L_k/H_d	-0,178*	-0,327*	-0,067	0,485*	0,113*	0,898*	

* istotne przy $\alpha=0,05$; significantl at $\alpha=0,05$



Ryc.

Wykres osypiska dla uzyskanych wartości własnych

Scree plot for obtained eigenvalues

Tabela 4.

Wartości własne składowych głównych
Eigenvalues of principal components

Wartość własna	% ogółu wariancji	Skumulowana wartość własna	Skumulowany % ogółu wariancji
3,092265	44,17522	3,092265	44,1752
2,070520	29,57886	5,162785	73,7541
1,110188	15,85983	6,272973	89,6139
0,634337	9,06196	6,907310	98,6759
0,055929	0,79898	6,963239	99,4748
0,026471	0,37816	6,989710	99,8530
0,010290	0,14700	7,000000	100,0000

Tabela 5.

Współrzędne czynnikowe zmiennych
Factorial coordinates of variables

Zmienne	Czynniki						
	1	2	3	4	5	6	7
$D_{1,3}$	-0,764939	-0,520311	0,102842	-0,347512	0,019740	0,111099	-0,008405
H	-0,422433	-0,512022	-0,703625	-0,240848	-0,036482	-0,061848	0,033640
$H/D_{1,3}$	0,614321	0,220632	-0,722542	0,208680	0,008895	0,090487	-0,007036
V_k	-0,907440	0,196687	-0,119209	0,306521	0,171261	-0,010305	0,016253
D_k	-0,848333	-0,171226	-0,003058	0,479716	-0,143375	0,011882	-0,013395
L_k	-0,546946	0,751698	-0,251668	-0,258961	-0,012625	-0,027454	-0,067002
L_k/H_d	-0,330193	0,925147	0,069995	-0,144478	-0,063898	0,033371	0,064075

L_k/H), powinien dobrze charakteryzować podatność drzew na złamanie. Okazało się, że ze względu na $H/D_{1,3}$ oraz L_k łącznie, drzewa złamane różniły się istotnie od drzew stojących. Podobnie było pod względem każdej z tych zmiennych oddzielnie. Smukłość drzew złamanych jest istotnie większa niż drzew stojących. Również długość korony drzew złamanych jest istotnie większa niż drzew stojących. Można więc sądzić, że dla badanego obszaru wskaźniki te, nieskorelowane ze sobą lub skorelowane bardzo słabo, traktowane łącznie, dobrze odzwierciedlają podatność drzewa na złamanie i mogą być użyte do predykcji uszkodzeń drzew przez wiatr.

Dyskusja

Wiatr kształtuje wiele cech drzewostanu, wywierając wpływ na jego skład i strukturę [Ulanova 2000] oraz w pewnym zakresie wpływając na jego wzrost i kondycję [Meng i in. 2006]. Podatność drzewostanów na szkody powodowane działaniem wiatru zależą od specyfiki tego czynnika (prędkości, czas trwania, porywistości), ale również od struktury drzewostanu, wysokości i pierśnicy drzew, wielkości koron, zwarcia, rodzaju gleby czy topografii terenu [Coutts, 1986; Lohmander, Helles 1987; Kerzenmacher, Gardiner 1998; Peltola i in. 2000, 2006; Gardiner i in. 2005]. W pracy podjęto próbę określenia wpływu wybranych wskaźników stabilności drzew, opisanych poprzez indywidualne cechy biometryczne, na kształtowanie się odporności drzewostanów sosnowych na działanie wiatru. W analizie stabilności drzew posłużono się prostymi do pomiaru cechami drzew, takimi jak wysokość, pierśnica, parametry koron oraz umiejscowieniem środka ciężkości drzewa i współczynnikiem smukłości, który istotnie wpływa na statykę drzewa [Sellier 2009] i w znacznej mierze decyduje o jego odporności na działanie wiatru.

Przeprowadzone badania wskazują, iż między drzewami uszkodzonymi przez wiatr oraz drzewami, które nie uległy złamaniu, występują istotne różnice w kształtowaniu się współczynnika smukłości, środka ciężkości oraz objętości i długości koron. Stwierdzono, iż drzewa uszkodzone cechowały się wysokim współczynnikiem smukłości, a więc miały stosunkowo niewielką pierśnicę przy znacznej wysokości. Ponadto były to sosny o stosunkowo długich, smukłych koronach i niżej umiejscowionym środku ciężkości. Duży wpływ współczynnika smukłości na kształtowanie się stabilności drzew został już stwierdzony między innymi przez Zajączkowskiego [1991], Jaworskiego [2004], Peltolę [2006] czy Selliera i Fourcauda [2009]. Ważna, lecz mało poznana w kształtowaniu odporności drzew, wydaje się rola wskaźnika opisanego stosunkiem długości korony do wysokości drzewa oraz sama długość korony, która wraz z współczynnikiem smukłości najlepiej opisuje stabilność drzew i może posłużyć do predykcji uszkodzeń powodowanych przez wiatr. Wielkość czy ażurowość koron jest w literaturze podawana jako jeden z czynników, który może wpływać na stabilność drzew [Petty, Swain 1985; Burschnel, Huss 1997]. Jest on jednak rozpatrywany jedynie pod kątem oporu, jaki stawia korona pod naporem wiatru. Należałoby w tym wypadku wielkość korony, a w tym przede wszystkim jej długość opisywać dodatkowo pod kątem formowania się tkanki drzewnej o charakterze młodocianym. Jak podają Hejnowicz [2002] czy Pazdrowski i in. [2005], drewno młodociane tworzy się pod silnym wpływem bliskości liści, a czas trwania tego zjawiska zależy od tego, jak nisko zbiega korona drzewa. Długość korony wpływa więc na zwiększenie się udziału w strzale mniej wytrzymałego na obciążenia mechaniczne drewna młodocianego.

Wnioski

- ✦ W kształtowaniu się stabilności drzew ważną rolę odgrywają smukłość i położenie środka ciężkości drzewa oraz długość i objętość korony. Sosny, które uległy złamaniu, charakteryzowały się istotnie wyższym współczynnikiem smukłości, dłuższymi koronami i niżej umiejscowionym środkiem ciężkości niż drzewa nieuszkodzone przez wiatr.
- ✦ Do predykcji uszkodzeń powodowanych przez wiatr najbardziej odpowiednie wydają się nieskorelowane ze sobą współczynniki smukłości i długość korony.
- ✦ Przeprowadzone badania wskazują na znaczną rolę długości korony w kształtowaniu się stabilności drzew, co może mieć związek z oporem, jaki stawia ona działaniu wiatru oraz tworzeniem się i udziałem w pniach drzew tkanki o charakterze młodocianym.

Literatura

- Alméras T., Fournier M. 2008. Biomechanical design and long-term stability of trees: Morphological and wood traits involved in the balance between weight increase and the gravitropic reaction. *J. T. Bio.* 256 (3): 370-381.
- Baker C. J. 1995. The development of a theoretical model for the wind throw of plants. *J. T. Bio.* 175: 355-372.
- Burschel P., Huss J. 1997. *Grundriss des Waldbau*. Berlin, Parey Buchverlag.
- Cameron A. D., Dunham R. A. 1999. Strength properties of wind- and snow-damaged stems of *Picea sitchensis* and *Pinus sylvestris* in comparison with undamaged trees. *Can. J. For. Res.* 29 (5): 595-599.
- Coutts M. P. 1986. Components of tree stability in Sitka spruce on peaty gley soil. *Forestry* 59: 173-197.
- Erteld W., Hengst E. 1966. *Waldtragslehre*. Radebeul. Neumann Verlag.
- Flesch T. K., Wilson J. D. 1999. Wind and remnant tree sway in forest cutblocks. II. Relating measured tree sway to wind statistics. *Agric. Forest Meteorol.* 93: 243-258.
- Fournier M., Stokes A., Coutand C., Fourcaud T., Moulia B. 2006. Tree biomechanics and growth strategies in the context of forest functional ecology. W: Herrel A., Speck T., Rowe N. [red.]. *Ecology and biomechanics: A mechanical approach to the ecology of animals and plants*. CRC Press Taylor & Francis, Boca Raton, Louisiana, USA. 1-33.
- Gardiner B. A. 1994. Wind and wind forces in a plantation spruce forest. *Boundary-Layer Meteorology* 67: 161-186.
- Gardiner B. A., Marshall B., Achim A., Belcher R., Wood C. 2005. The stability of different silvicultural systems: a wind-tunnel investigation. *Forestry* 78 (5): 471-484.

- Hejnowicz Z. 2002. Anatomia i histogeneza roślin naczyniowych. PWN, Warszawa.
- Jambu M. 1991. Exploratory and multivariate data analysis. Academic Press.
- James K., Haritos N., Ades P. 2006. Mechanical stability of trees under dynamic loads. *Am. J. Bot.* 93 (10): 1522-1530.
- Jaworski A. 2004. Podstawy przyrostowe i ekologiczne odnawiania oraz pielęgnacji drzewostanów. Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Warszawa.
- Kerzenmacher T., Gardiner B. A. 1998. A mathematical model to describe the dynamic response of a spruce tree to the wind. *Trees* 12: 385-394.
- Lohmander P., Helles F. 1987. Windthrow probability as a function of stand characteristics and shelter. *Scand. J. Forest Res.* 2: 227-238.
- Mayer H. 1987. Wind-induced tree sways. *Trees (Berlin)* 1: 195-206.
- Meng S. X., Rudnicki M., Loeffers V. J., Reid D. E. B., Silins U. 2006. Preventing crown collisions increases the crown cover and leaf area of maturing lodgepole pine. *J. Ecol.* 94: 681-686.
- Pazdrowski W., Tomeczak A., Kupczyk G., Jelonek T. 2005. Juvenile wood volume and proportion vs. selected biometric traits of stems of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) trees. *Acta Societatis Botanicorum Poloniae* 74 (4): 269-274.
- Peltola H. 2006. Mechanical stability of trees under static loads. *Am. J. Bot.* 93 (10): 1501-1511.
- Peltola H., Kellomaki S., Hassinen A., Granander M. 2000. Mechanical stability of Scots pine, Norway spruce and birch: analysis of tree pulling experiments in Finland. *For. Ecol. Manage.* 135: 143-153.
- Peltola H., Kellomaki S., Hassinen A., Lemettinen M., Aho J., 1993. Swaying of trees as caused by wind: analysis of field measurements. *Silva Fennica* 27: 113-126.
- Petty J. A., Swain C. 1985. Factors Influencing Stem Breakage of Conifers in High Winds. *Forestry* 58 (1): 75-84.
- Quine C. P., Gardiner B. A. 2007. Understanding how the interaction of wind and trees results in windthrow, stem breakage, and canopy gap formation. W: Johnson E. A., Miyaniishi K. [red.]. *Plant Disturbance Ecology – The Process and the Response*. Elsevier, Amsterdam.
- Sellier D., Fourcaud T. 2009. Crown structure and wood properties: influence on tree sway and response to high winds. *Am. J. Bot.* 96 (5): 885-896.
- Spatz H.-C., Bruechert F. 2000. Basic biomechanics of self-supporting plants: wind loads and gravitational loads on a Norway spruce tree. *For. Ecol. Manage.* 135: 33-44.
- Ulanova N. G. 2000. The effects of windthrow on forests at different spatial scales: a review. *For. Ecol. Manage.* 135: 155-167.
- Wood C. J. 1995. Understanding wind forces on trees. W: Coutts M. P., Grace J. [red.]. *Wind and trees..* Cambridge University Press, Cambridge, UK. 133-164.
- Ylinen A. 1952. Über die Mechaniszeschaftformthorie der Bäume. *Silva Fennica* 76: 1-51.
- Zajączkowski J. 1991. Odporność lasu na szkodliwe działanie wiatru i śniegu. Warszawa.

SUMMARY

Indices of tree stability in Scots pine stands damaged by wind

The paper presents an analysis of the selected tree stability indicators, described by the individual biometric parameters in the formation of the resistance of pine stands to wind action. The study was conducted in 2011, in six pine stands between 54 and 62 years of age affected by wind. Stands were chosen so that damage from the wind be at least 10 percent but not more than 30 percent of stand damage (broken trees). The biometric parameters of broken trees and undamaged trees were measured on research plots. A total of 662 trees were measured of which 406 were trees not damaged by wind, and 256 were broken trees.

The results of the studies indicate that the slenderness ratio, crown length and centre of gravity of trees play an important role in the development of tree stability. The broken trees were characterized by significantly higher slenderness ratio, longer crowns and lower centre of gravity than the standing trees (undamaged). It was also found that two characteristics not correlated or very weakly correlated with each other are most suitable for the prediction of damage caused by wind, i.e. slenderness ratio and crown length.