

# Wybrane wskaźniki stabilności drzew w drzewostanach sosnowych narażonych na wiatr

*Tomasz Jelonek, Arkadiusz Tomczak, Witold Pazdrowski*

*Praca finansowana ze środków na naukę w latach 2011–2014 jako projekt badawczy o numerze N N309 108240.*

**Abstrakt:** W pracy porównano architekturę drzew oraz ich stabilność określoną na podstawie czterech wskaźników wyliczonych w oparciu o cechy biometryczne drzew, tj. wysokość, pierśnicę oraz wybrane parametry koron. Badania przeprowadzono w dziesięciu rębnych drzewostanach sosnowych narażonych na działanie wiatru. Uzyskane wyniki rozpatrywano oddzielnie w każdej z trzech przyjętych stref narażenia drzewostanu o różnym obciążeniu drzew przez wiatr. Uzyskane wyniki wskazują, iż w drzewostanach gospodarczych wiatr istotnie kształtuje architekturę drzew, a w szczególności wysokość drzew oraz szerokość koron. Wpływ wiatru na cechy morfologiczne drzew ogranicza się jedynie do okołozewnętrznej strefy drzewostanu, której szerokość wahała się w granicach 20–30 m. Stwierdzono również, iż sosny w pierwszej strefie obciążenia przez wiatr w porównaniu z pozostałymi strefami cechowały się istotnie większą zbieżnością pni, niższej umiejscowionym środkiem ciężkości, większym współczynnikiem wychylenia koron oraz niższym współczynnikiem proporcjonalności koron.

**Słowa kluczowe:** Sosna zwyczajna, stabilność drzew, wiatr, współczynnik smukłości.

**Abstract: Selected indexes of tree stability in wind-exposed pine stands.** The paper presents a comparison of tree architecture and their stability defined on the basis of four indexes calculated on the basis of biometric characteristics of trees, i.e. height, diameter breast height and crown parameters. Analyses were conducted in ten mature pine stands exposed to winds. Results were investigated separately in each of the three assumed stand zones varying in terms of wind load on trees. Recorded results indicate that in production stands wind has a significant effect on tree architecture, particularly tree height and crown width. The effect of wind on morphological traits of trees is limited only to the 20- to 30-meter outer tree zone. It was also found that pines in the first wind load zone in comparison to the other zones were characterized by a significantly smaller stem tapering, a lower-located center of gravity, a greater crown deflection ratio and a lower crown proportionality coefficient.

**Key words:** Scots pine, tree stability, wind, slenderness ratio.

## Wstęp

Prowadzone badania nad stabilnością drzew i drzewostanów wskazują, iż w znacznej mierze jest ona uwarunkowana wielkością obciążenia zewnętrznego oraz strukturą drzewostanu, w ramach której istotne znaczenie mają takie cechy jak skład gatunkowy, wysokość drzew ich pierśnica, powierzchnia koron, głębokość i szerokość ukorzenia, zadrzewienie oraz rodzaj gleby (Coutts 1986, Kerzenmacher i Gardiner 1998, Peltola i in. 2000, Hale i in. 2004, Scott i Mitchell 2005, Peltola 2006). James i in. (2006) stwierdzili, że wpływ na stabilność pojedynczego drzewa pod obciążeniem dynamicznym ma jego wielkość, kształt i struktura. Tak rozumiana stabilność jest ściśle związana z procesem wzrostu, który w dużej mierze podyktowany jest ograniczeniami fizjologicznymi, zwłaszcza tymi dotyczącymi fotosyntezy i transportu wody, a do nich dochodzą jeszcze ograniczenia wielkości i kształtu nałożone przez układy biomechaniczne (Spatz i Bruechert 2000).

Dlatego też struktura drzewa zaprojektowana jest tak, aby podczas wzrostu mogło ono przenosić coraz większe obciążenia. Optymalizacja wzrostu, która prowadzi do formowania drzew, związana jest z dwoma rodzajami obciążeń. Pierwsze to obciążenia statyczne drzew wynikające z masy pnia i korony, drugie zaś to obciążenia dynamiczne pochodzące od wiatru, wywołujące największy stres mechaniczny w obwodowych częściach pnia (Mitchell 2012). W związku z powyższym drzewa w celu zachowania optymalnej, możliwie efektywnej struktury nowe drewno tworzą w sposób, który powoduje stały rozkład naprężeń w zewnętrznej części pnia (teoria równomiernego stresu – Morgan i Cannell 1994).

Często stabilność drzew definiuje się współczynnikiem smukłości, który uwzględnia dwie cechy biometryczne drzewa, tj. jego wysokość i pierśnicę (Erteld i Hengst 1966, Jaworski 2004, Peltola 2006, Jelonek i in. 2010, 2011). Współczynnik ten jest uznany za odpowiednią miarę do określania stabilności drzew oraz ich odporności, głównie na działanie wiatru (Jaworski 2004, Peltola 2006, Jelonek 2013). Kolejnym czynnikiem istotnie warunkującym stabilność drzewa jest wielkość, kształt jego korony (Petty i Swain 1985). Cucchi i Bert (2003) zauważyli, że mniejsze szkody od wiatru występują w drzewostanach, gdzie u drzew długość korony oraz obwody pni są jednorodne. Drzewa, które zostały uszkodzone, posiadają zazwyczaj cieńsze pnie i relatywnie krótsze korony oraz wyższe współczynniki smukłości w stosunku do drzew, które nie zostały uszkodzone przez wiatr.

W Polsce względnie dokładny przegląd teorii dotyczących formowania się drzew oraz ich stabilności przedstawił Zajączkowski (1991), a analizę biomechanicznej stabilności drzew oraz struktury drewna drzew uszkodzonych przez wiatr badał Jakubowski (2010), Jakubowski i in. (2011a, 2011b), Jelonek i in. (2011), Tomczak i in. (2011). Ostatni z cytowanych autorów stwierdzili, że wielkość oraz architektura drzew w większym stopniu wpływa na ich stabilność pod obciążeniami dynamicznymi aniżeli właściwości tkanki drzewnej. Do podobnych wniosków doszli również Niklas i Spatz (2006). Stwierdzili oni, że obciążenia drzew przez wiatr zmieniają się w rozkładzie osiowym pnia i uzależnione są przede wszystkim od zbieżystości drzewa i kształtu jego korony.

Celem pracy jest analiza architektury oraz stabilności drzew wyrosłych w drzewostanach narażonych na działanie wiatru. W pracy założono, że w zależności od ich ekspozycji na działanie wiatru występuje wzrost adaptacyjny drzew, który powoduje zróżnicowanie się drzew w drzewostanie pod względem cech morfologicznych, które z kolei decydują o ich stabilności.

## Metodyka

Badania zostały przeprowadzone w 10 drzewostanach sosnowych V klasy wieku wyrosłych w warunkach boru mieszanego świeżego na terenie RDLP Szczecinek (tab. 1). Drzewostany zostały dobrane tak, aby były podobne pod względem cech taksacyjnych, a jednocześnie od zachodniej strony świata sąsiadowały z otwartą przestrzenią. W każdym z drzewostanów wybrano jedną powierzchnię próbną w kształcie prostokąta, którego jeden z boków (100 m) przylegał do skraju drzewostanu graniczącego z otwartą przestrzenią. Drugi zaś z boków sięgał w głąb drzewostanu na odległość równą trzem średnim wysokościami drzew w drzewostanie. W dalszej kolejności każda powierzchnia próbna została podzielona na trzy strefy obciążenia drzew przez wiatr. Strefa A – obciążenia najsilniejsze, strefa sąsiadująca z otwartą przestrzenią. Strefa B – obciążenia przeciętne strefa C – obciążenia najmniejsze, strefa najdalej od brzegu drzewostanu.

Następnie zmierzono pierśnice ( $D_{1,3}$ ), wysokości ( $H_d$ ) oraz cechy biometryczne koron, tj. długość ( $L_k$ ) i promień ( $R_k$ ) w czterech kierunkach świata wszystkich drzew z wyjątkiem sosen tworzących okrajek drzewostanu i drugie piętro.

Zebrałe dane empiryczne analizowano metodami statystycznymi z zastosowaniem pakietu *STATISTICA 10PL*.

**Tab. 1.** Lokalizacja oraz wybrane cechy taksacyjne badanych drzewostanów  
*Table 1. Location and selected taxation characteristics of analyzed stands*

Nadleśnictwa	Oddział	STL	Skład	Wiek	Zd	Bonitacja	Zwarcie
Miastko	193b	BMśw	10So	84	0,9	I	PRZ
Miastko	125d	BMśw	10 So	89	0,7	I	PRZ
Niedźwiady	147k	BMśw	8So2So	89	0,8	I	UM
Warcino	106c	BMśw	10So	86	0,9	I	PRZ
Czaplinek	101c	BMśw	10So	87	1	I	PRZ
Czaplinek	231f	BMśw	8So2So	87	1,1	I	PRZ
Łupawa	291a	BMśw	10So	83	0,7	I	PRZ
Świdwin	7a	BMśw	10 So	83	1,1	I	PRZ
Złotów	43d	BMśw	10 So	82	0,9	I	PRZ
Czarnobór	129g	BMśw	10 So	82	0,8	I	PRZ

## Wyniki

Na dziesięciu powierzchniach badawczych w sumie pomierzono cechy biometryczne 1875 drzew, 627 w pierwszej strefie obciążenia wiatrem (A), 613 w strefie drugiej (B) i 635 w strefie trzeciej (C). Wraz z przechodzeniem w głąb drzewostanu od strefy A do C stopniowo wzrastały wysokości drzew oraz ich pierśnice. Natomiast długości koron ( $L_k$ ) oraz ich średnice ( $D_k$ ) nie wykazywały wyraźnego trendu. Statystycznie istotne różnice pomiędzy badanymi cechami wystąpiły tylko pomiędzy strefą A i B oraz A i C i dotyczyły wysokości drzew i średnicy koron (tab. 2).

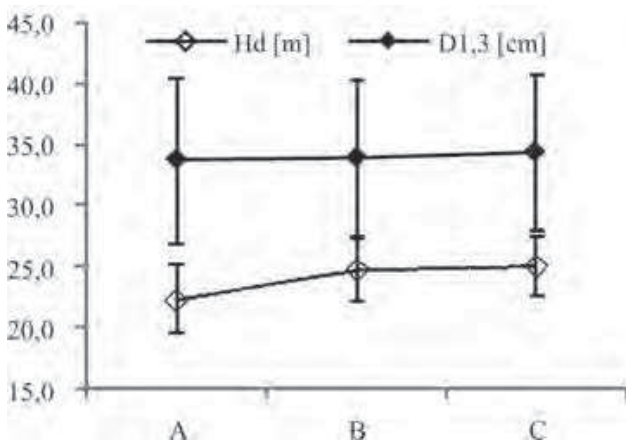
**Tab. 2.** Charakterystyka statystyczna cech biometrycznych drzew w poszczególnych strefach oddziaływania wiatru

*Table 2. Statistical characteristics of biometric traits of trees in individual wind load zones*

	N	Średnie ± Odch. St.	Minimum	Maksimum	A-B p≤ 0,05	A-C p≤ 0,05	B-C p≤ 0,05
A	627	22,32 ± 2,18	13,80	30,40			
B	613	24,69 ± 2,58	14,80	31,60			
C	635	25,05 ± 2,41	17,40	32,00	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	0,1850
Ogół	1875	24,02 ± 2,87	13,80	32,00			
A	627	33,68 ± 6,76	18,00	59,50			
B	613	33,86 ± 6,33	19,00	54,00	1,0000	0,1686	0,7042
C	635	34,30 ± 6,43	17,50	59,00			
Ogół	1875	33,95 ± 6,51	17,50	59,50			
A	627	6,35 ± 2,20	1,00	16,20			
B	613	6,52 ± 1,98	1,10	14,80	0,1503	1,0000	0,1010
C	635	6,28 ± 2,17	1,10	14,20			
Ogół	1875	6,38 ± 2,12	1,00	16,20			
A	627	4,26 ± 1,47	1,10	9,15			
B	613	4,02 ± 1,48	1,50	8,46	<b>0,0041</b>	<b>0,0006</b>	1,0000
C	635	4,03 ± 1,65	1,18	10,06			
Ogół	1875	4,10 ± 1,54	1,10	10,06			

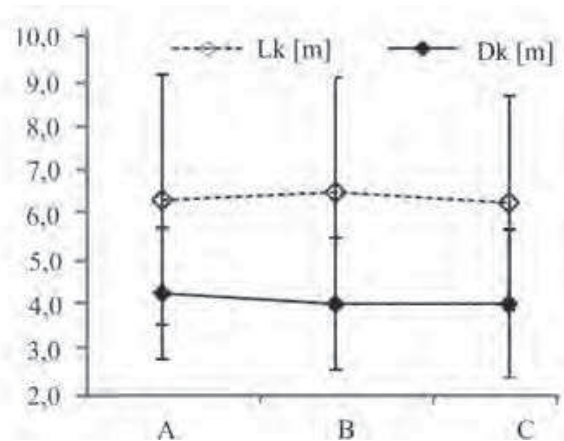
Analiza rozkładu cech biometrycznych, na podstawie których określana była smukłość drzew, tj. wysokości i pierśnicy drzewa oraz jego statyka, tj. długość i szerokość korony zostały przedstawione na rycinie 1 i 2. W przypadku rozkładu pierśnicy i wysokość to ta druga znacząco zmienia się wraz z przechodzeniem od strefy A do C przy stosunkowo niezmiennie

się pierśnicy drzew (ryc. 1). W stosunku do cech korony, które decydują o statyce drzewa, stwierdzono jedynie w odniesieniu do średnicy korony ( $D_k$ ) jej znaczny wzrost w pierwszej z porównywanych stref (A) przy stosunkowo małej zmienności drugiej z cech, tj. długości korony (ryc. 2).



**Ryc. 1.** Rozkład wysokości drzew ( $H_d$ ) oraz ich pierśnic ( $D_{1,3}$ ) w poszczególnych strefach obciążenia wiatrem

*Fig. 1. Distribution of tree height ( $H_d$ ) and breast diameters ( $D_{1,3}$ ) in individual wind load zones*



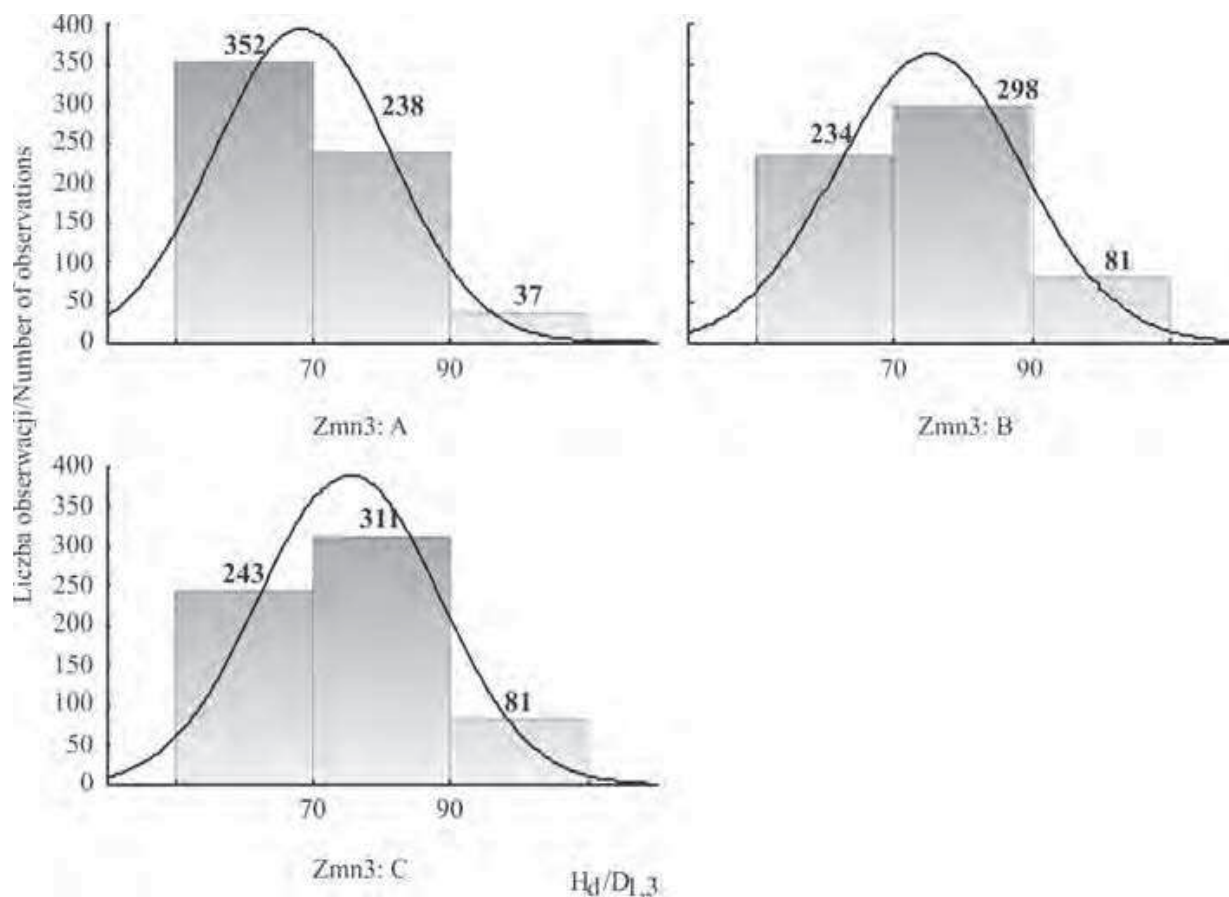
**Ryc. 2.** Rozkład długości korony ( $L_k$ ) oraz promienia korony ( $R_k$ ) w poszczególnych strefach obciążenia wiatrem

*Fig. 2. Distribution of crown length ( $L_k$ ) and crown radius ( $R_k$ ) in individual wind load zones*

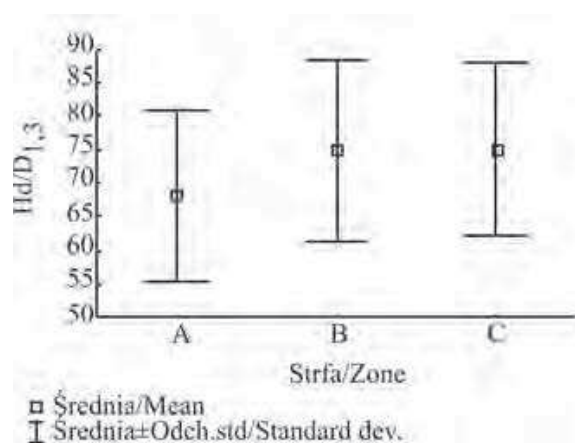
Na podstawie pomierzonych cech morfologicznych drzew określono cztery allometryczne wskaźniki opisujące stabilność drzew –  $H_d/D_{1,3}$  (współczynnik smukłości),  $L_k/D_k$  (współczynnik proporcjonalności koron),  $R_k/H_d$  (współczynnik wychylenia koron) oraz  $L_k/H_d$  (środek ciężkości drzew).

W pierwszej kolejności przeprowadzono analizę struktury każdej ze stref pod względem liczebności drzew w trzech przedziałach stabilności. Pierwszy do 70 to drzewa bardzo stabilne, od 70 do 90 to drzewa stabilne i powyżej 90 to drzewa ograniczonej stabilności (ryc. 3). W pierwszej strefie, najbardziej narażonej na działanie wiatru struktura liczebności drzew w poszczególnych przedziałach była schodkowa. Najwięcej drzew znalazło się w grupie o współczynniku smukłości poniżej 70, następnie 70–90 i najmniej drzew stwierdzono w grupie o współczynniku smukłości powyżej 90. Natomiast w dwóch kolejnych strefach rozkład liczebności drzew był do siebie bardzo zbliżony. Najwięcej drzew znalazło się w przedziale współczynnika smukłości pomiędzy 70 a 90, najmniej zaś powyżej 90 (ryc. 3).

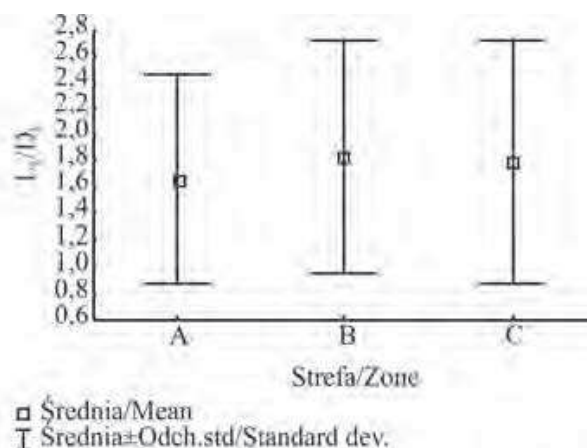
Drzewa ze strefy najbardziej narażonej na działanie wiatru cechowały się współczynnikiem smukłości wynoszącym  $68,2 \pm 12,8$  i był on statystycznie istotnie niższy aniżeli średni współczynnik smukłości dla strefy B ( $75,0 \pm 13,5$ ) i strefy C ( $75,1 \pm 13,0$ ) (ryc. 4, tab. 3). Współczynnik proporcjonalności koron  $L_k/D_k$  był statystycznie istotnie najniższy w pierwszej z porównywanych stref i wyniósł 1,66 w stosunku do strefy B i C, gdzie jego wartości wyniosły odpowiednio 1,84 oraz 1,79 (ryc. 5, tab. 3).



**Ryc. 3.** Liczebności drzew w przedziałach stabilności opisanych współczynnikiem smukłości  $H_d/D_{1,3}$   
*Fig. 3.* Numbers of trees in stability ranges described by slenderness ratio  $H_d/D_{1,3}$



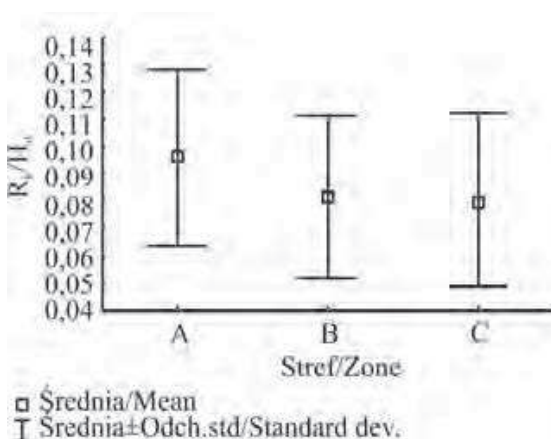
**Ryc. 4.** Współczynnik smukłości  $H_d/D_{1,3}$  w trzech strefach obciążenia drzewostanu wiatrem  
*Fig. 4.* Slenderness ratio  $H_d/D_{1,3}$  in three wind load zones of the stand



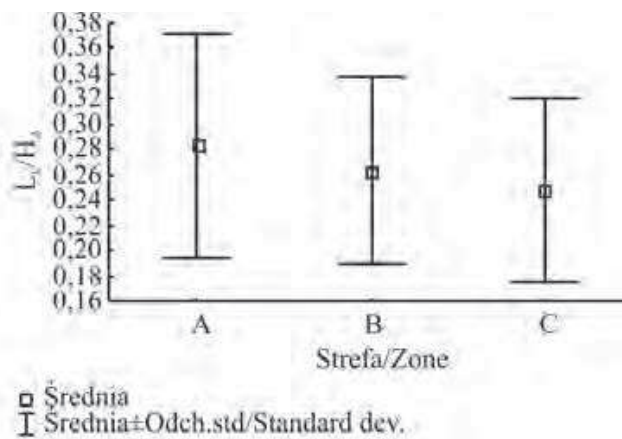
**Ryc. 5.** Współczynnik proporcjonalności koron  $L_k/D_k$  w trzech strefach obciążenia drzewostanu wiatrem  
*Fig. 5.* Crown proportionality ratio  $L_k/D_k$  in three wind load zones of the stand

Pozostałe dwa wskaźniki stabilności drzew, tj. współczynnik wychylenia koron –  $R_k/H_d$  oraz środek ciężkości drzewa  $L_k/H_d$  cechowały się tendencją malejącą wraz z przechodzeniem od brzegu drzewostanu do kolejnych stref w jego głębi (ryc. 6, 7).

W przypadku strefy najsilniej obciążonej przez wiatr współczynnik wychylenia koron wyniósł  $0,096 \pm 0,03$ , w strefie B  $0,082 \pm 0,03$ , a w strefie najsłabiej obciążonej przez wiatr  $0,08 \pm 0,03$ . Natomiast środek ciężkości drzewa wynosił odpowiednio  $1,66 \pm 0,80$  w strefie A,  $1,84 \pm 0,88$  w strefie B i  $1,79 \pm 0,92$  w strefie C. Zarówno w przypadku współczynnika  $R_k/H_d$ , jak i  $L_k/H_d$  statystycznie istotne różnice stwierdzono pomiędzy strefą A a B oraz A a C (tab. 3).



**Ryc. 6.** Współczynnik wychylenia koron  $R_k/H_d$  w trzech strefach obciążenia drzewostanu wiatrem  
*Fig. 6. Crown inclination rate  $R_k/H_d$  in three wind load zones of the stand*



**Ryc. 7.** Środek ciężkości drzew  $L_k/H_d$  w trzech strefach obciążenia drzewostanu wiatrem  
*Fig. 7. Centre of gravity  $L_k/H_d$  of trees in three wind load zones of the stand*

Największą zmiennością (49%) z omawianych w pracy wskaźników stabilności drzew cechował się środek ciężkości drzewa, najmniejszą zaś (18%) współczynnik smukłości. W przypadku dwóch wskaźników, tj. środka ciężkości drzewa oraz współczynnika wychylenia koron najbardziej zmienną była ostatnia strefa obciążenia (C), natomiast w przypadku współczynnika smukłości oraz środka ciężkości drzewa najbardziej zróżnicowana była strefa A.

**Tab. 3.** Wartość p dla porównań wielokrotnych wskaźników stabilności drzew w trzech strefach obciążenia drzewostanu przez wiatr  
*Table 3. Values of p for multiple comparisons of tree stability coefficients in three wind load zones of the stand*

Wskaźniki stabilności drzew	A-B	A-C	B-C
$L_k/H_d$	0,00062	0,00000	0,00173
$R_k/H_d$	0,00000	0,00000	1,00000
$H_d/D_{1,3}$	0,00000	0,00000	1,00000
$L_k/D_k$	0,00061	0,07686	0,39572

W celu analizy struktury oraz ogólnych prawidłowości w związkach między wskaźnikami stabilności drzew przeprowadzono analizę czynnikową. Wykazała ona, że analizowane w pracy wskaźniki stabilności są opisywane przez dwa czynniki, które w ponad 80% wyjaśniają całkowitą wariancję. Z czego pierwszy stosunkowo dobrze opisuje współczynnik wychylenia koron ( $R_k/H_d$ ) oraz współczynnik proporcjonalności koron ( $L_k/D_k$ ), drugi zaś pozostałe dwa wskaźniki, tj. współczynnik smukłości ( $H_d/D_{1,3}$ ) oraz środek ciężkości drzewa ( $L_k/H_d$ ).

## Podsumowanie i dyskusja

Wiatr w sposób istotny wpływa na kształtowanie się ekosystemów leśnych i jest jednym z czynników decydujących o formowaniu się drzew, krajobrazu, siedliska (Mitchell 2012).

Ponadto powoduje on w sposób ciągły znaczne straty ekonomiczne w lasach gospodarczych, dlatego jego oddziaływanie stało się obiektem zainteresowania wielu badaczy (Zajączkowski i in. 1991, 2004, Peltola 2006, Quine i Gardiner 2007). Coraz częściej poprzez modelowanie nauka próbuje prognozować uszkodzenia, które mogą być spowodowane działalnością wiatru (Baker 1995, Saunderson i in. 1999, England i in. 2000). W określaniu stabilności oraz modelowaniu uszkodzeń całych drzewostanów bierze się pod uwagę głównie średnie wartości wysokości drzew, ich średnią smukłość oraz wiek (Bruchwald i Dmyterko 2011). Pomija się natomiast parametry koron, które z punktu widzenia statyki drzew odgrywają niebagatelną rolę w ich odporności na działanie wiatru. Wskazują na to między innymi badania przeprowadzone przez Niklasa i Spatza (2006), którzy zauważyli, że osiągnięcie stabilności drzewa wiąże się z odpowiednią alokacją biomasy, w tym również korony, a w szczególności z jej kształtem, ażurowością i masą. Jednocześnie autorzy podkreślają, że owa alokacja musi być kompromisem pomiędzy funkcjami mechanicznymi a fizjologicznymi drzewa. Natomiast Moore i Maguire (2004, 2005) wykazali wpływ wielkości korony na drgania drzew wywołane wiatrem. Efekt tłumienia drgań obniżał się wraz ze wzrostem redukcji korony. Jednocześnie na tłumienie kołysania drzewa ma wpływ również ingerencja gałęzi drzew sąsiednich, aerodynamiki ulistnienia oraz tłumienie drgań przez pień i system korzeniowy (Milne 1991).

W pracy określono stabilność drzew oraz poddano analizie ich architekturę w dojrzałych drzewostanach gospodarczych narażonych na działanie wiatru. Jako wskaźniki stabilności przyjęto oprócz powszechnie stosowanej smukłości drzew również wskaźniki oparte o cechy biometryczne koron i w dwóch przypadkach odniesiono je do wysokości drzew. Uzyskane wyniki rozpatrywano oddzielnie w każdej z przyjętych stref drzewostanu o różnym obciążeniu drzew przez wiatr.

Analizy rozkładu cech biometrycznych w poszczególnych strefach wskazały, że największy wpływ na stabilność drzew ma ich wysokość, która cechowała się największym zróżnicowaniem pomiędzy poszczególnymi strefami. Różnica w wysokości pomiędzy pierwszą strefą obciążenia a kolejnymi kształtowała się na poziomie 10–11%. Druga z cech, która wydaje się, iż istotnie wpływa na statykę drzewa, to średnica korony. Szersze korony drzew w pierwszej strefie obciążenia wiatrem w porównaniu z pozostałymi dwoma oraz mniejsze wysokości przy stosunkowo podobnych pierśnicach i długościach koron powodują poprawę statyki drzew w tej strefie. Potwierdzają to również określone w pracy wskaźniki stabilności. Drzewa wyrosłe w pierwszej strefie cechowały się znacznie mniejszą smukłością strzał, co pokrywa się z wynikami, jakie uzyskał Petty i Worrell (1981). Według nich najbardziej stabilne są drzewa wyrosłe w rozluźnieniu, które cechują się dużą zbieżystością pni i stosunkowo małą wysokością.



Przeprowadzona analiza struktury drzewostanu pod względem smukłości drzew wykazała różnice w rozkładzie liczebności drzew w wyróżnionych kategoriach stabilności jedynie w strefie A. W strefie tej stwierdzono największą liczbę drzew o współczynniku smukłości poniżej 70 i najmniejszą liczbę drzew charakteryzujących się smukłością powyżej 90. W pozostałych dwóch strefach najwięcej drzew stwierdzono w przedziale smukłości pomiędzy 70 a 90, a liczba drzew o smukłości powyżej 90 była o ponad raz większa aniżeli w strefie najbardziej eksponowanej na działanie wiatru.

Analiza pozostałych wskaźników opisujących stabilność drzew wykazała, że sosny wyrosłe w pierwszej strefie obciążenia wiatrem miały istotnie niżej umiejscowiony środek ciężkości ( $L_k/H_d$ ), który jako jedyny z badanych wskaźników istotnie wzrastał w każdej z kolejnych stref. Również pod względem dwóch kolejnych wskaźników stabilności, tj. współczynnikami proporcjonalności i wychylenia koron wystąpiły istotne różnice pomiędzy pierwszą strefą (A) a pozostałymi (B, C). Drzewa wyrosłe w pierwszej strefie cechowały się mniejszym współczynnikiem proporcjonalności koron, a więc ich korony były stosunkowo krótkie i szerokie, oraz znacznie większym współczynnikiem wychylenia koron ( $R_k/H_d$ ). Takie zróżnicowanie drzewostanu pod względem architektury drzew potwierdzają badania przeprowadzone przez Brücherta i Gardinera (2006) oraz Jelonka (2013). Brüchert i Gardiner (2006) stwierdzili znaczną zmienność formy drzew w zależności od ich ekspozycji na wiatr. Drzewa najbardziej eksponowane, wyrosłe na obrzeżach drzewostanu, charakteryzowały się przede wszystkim mniejszą wysokością i większą zbieżnością strzał w stosunku do drzew, które wyrosły w głębi drzewostanu. Natomiast badania przeprowadzone przez Jelonka i in. (2013) dowodzą, że w kształtowaniu się stabilności drzew narażonych na działanie obciążeń dynamicznych ważną rolę odgrywa współczynnik smukłości, parametry korony oraz położenie środka ciężkości drzewa.

Uzyskane wyniki pozwalają na sformułowanie wniosku mówiącego, iż w drzewostanach gospodarczych wiatr istotnie kształtuje architekturę drzew, a jego wpływ ogranicza się do 20–30-metrowej strefy drzewostanu bezpośrednio narażonej na jego działanie. W głębszych partiach drzewostanu, po przekroczeniu około jednej wysokości drzew cechy morfologiczne drzew oraz badane wskaźniki stabilności były do siebie zbliżone.

Adaptacyjny wzrost sosen był widoczny przede wszystkim przez zmiany w wysokości drzew, co wpłynęło na znaczne zróżnicowanie smukłości drzew w badanych strefach obciążenia wiatrem. Ponadto wyższy współczynnik wychylenia koron oraz niżej umiejscowiony środek ciężkości sosen w pierwszej strefie związane jest najprawdopodobniej z tłumieniem drgań, które będą większe przy stosunkowo niskich drzewach o długich i szerokich koronach.

## Literatura

- Baker C.J. 1995. The development of a theoretical model for the wind throw of plants. *Journal of Theoretical Biology*, 175: 355–372.
- Brüchert F., Gardiner B. 2006. The effect of wind exposure on the tree aerial architecture and biomechanics of Sitka spruce (*Picea sitchensis*, *Pinaceae*). *American Journal of Botany*, 93(10): 1512–1521.
- Bruchwald A., Dmyterko E. 2011. Zastosowanie modeli ryzyka uszkodzenia drzewostanu przez wiatr do oceny zagrożenia lasów nadleśnictwa. *Sylwan*, 155 (7): 459–471.
- Coutts, M. P. 1986. Components of tree stability in Sitka spruce on peaty gley soil. *Forestry*, 59: 173–197.

- Cucchi V., Bert D. 2003. Wind firmness of *Pinus pinaster* Ait. stands in Southwest France: influence of stand density, fertilization and breeding in two experimental stands damaged during the 1999 storm. *Annals of Forest Science*, 60: 209–226.
- England A.H., Baker C.J., Saunderson S.E.T. 2000. A dynamic analysis of windthrow of trees. *Forestry*, 73(3): 225–238.
- Erteld W., Hengst, E. 1966. *Waldtragslehre*. Radebeul. Neumann Verlag.
- Hale S.E., Levy P.E., Gardiner B.A. 2004. Trade-offs between seedling growth, thinning and stand stability in Sitka spruce stands: a modelling analysis. *Forest Ecology and Management*, 187: 105–115.
- Jakubowski M. 2010. Promieniowa zmienność makrostruktury drewna sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) i świerka pospolitego (*Picea abies* Karst.) w relacji do niektórych właściwości drewna. *Rozprawy Naukowe 407*. Wydawnictwo UP w Poznaniu.
- Jakubowski M., Jelonek T., Tomczak A. 2011b. Modulus of Rupture in twin samples (wet and absolutely dry) coming from wood of wind- broken trees of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *Ann. Warsaw Univ. of Life Sci. – SGGW, For and Wood Technol.*, 74: 110–114.
- Jakubowski M., Tomczak A., Jelonek T. 2011a. Compression strength along the grain in twin samples (wet and absolutely dry) coming from wood of wind- broken trees of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *Ann. Warsaw Univ. of Life Sci. – SGGW, For. and Wood Technol.*, 74: 104–109.
- James K., Haritos N., Ades P. 2006. Mechanical stability of trees under dynamic loads. *American Journal of Botany*, 93(10): 1522–1530.
- Jaworski, A. 2004. *Podstawy przyrostowe i ekologiczne odnawiania oraz pielęgnacji drzewostanów*. Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Warszawa.
- Jelonek T. 2013. Analiza wskaźników stabilności drzew w drzewostanach sosnowych uszkodzonych przez wiatr. *Sylvan*, 157 (5): 323–329.
- Jelonek T. 2013. Biomechaniczna stabilność drzew a wybrane właściwości fizyczne, mechaniczne i strukturalne ksylemu sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) wyrosłej w warunkach gruntów porolnych i leśnych, *Rozprawy naukowe 455*, Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu, Poznań 2013.
- Jelonek T., Jakubowski M., Tomczak 2011. A. The effect of wind exposure on the selected stability parameters of the Scots pine stands. *Ann. Warsaw Univ. of Life Sci. – SGGW, For. and Wood Technol.*, 74: 143–149.
- Jelonek T., Tomczak A. 2010. Biomechanics of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) trees coming from mature stands. *Ann. Warsaw Agricult. Univ. – SGGW, For. and Wood Technol.* 71: 328–335.
- 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.
- Milne R. 1991. Dynamics of swaying of *Picea sitchensis*. *Tree Physiol.*, 9 (3): 383–399.
- Mitchell SJ 2012. Wind as a natural disturbance agent in forests – an integrative overview. *Forestry* (accepted subject to revisions). *Forestry* 2012, 00, 1–11, doi:10.1093/forestry/cps058.
- Moore J.R., Maguire D.A. 2004. Natural swaying frequency and damping ratios of trees: concepts, review and synthesis of previous studies. *Trees – Structure and Function*, 18: 195–203.
- Moore J.R., Maguire D. A. 2005. Natural swaying frequency and damping ratios of trees: influence of the crown structure. *Trees – Structure and Function*, 19: 363–373.

- Morgan J., Cannell G.R. 1994. Shape of tree stems: a reexamination of the uniform stress hypothesis. *Tree Physiology*, 14 (1): 49–62.
- Niklas K.J., Spatz H.-C. 2006. Allometric theory and the mechanical stability of large trees: proof and conjecture. *American Journal of Botany*, 93: 824–828.
- Peltola H., Kellomaki S., Hassinen A., Granander M. 2000. Mechanical stability of Scots pine, Norway spruce and birch: an analysis of tree pulling experiments in Finland. *Forest Ecology and Management*, 135: 143–153.
- Peltola H.M. 2006. Mechanical stability of trees under static loads. *American Journal of Botany*, 93(10): 1501–1511.
- Petty J.A., Swain C. 1985. Factors Influencing Stem Breakage of Conifers in High Winds. *Forestry*, 58 (1): 75–84.
- Petty J.A., Worrell R. 1981. Stability of coniferous tree stems in relation to damage by snow. *Forestry*, 54: 115–128.
- Quine, C.P., Gardiner, B. A. 2007. Understanding how the interaction of wind and trees results in windthrow, stem breakage and canopy gap formation. In Johnson, E. (Ed) *Plant disturbance ecology: the process and the response*. Academic Press.
- Saunderson S.E.T., England A.H., Baker C.J. 1999. A dynamic model of the behavior of Sitka spruce in high winds. *Journal of Theoretical Biology*, 200(3): 249–259.
- Scott R.E., And Mitchell S.J. 2005. Empirical modeling of windthrow risk in partially harvested stands using tree, neighbourhood, and stand attributes. *Forest Ecology and Management*, 218: 193–209.
- Spatz H.-C., F. Bruechert. 2000. Basic biomechanics of selfsupporting plants: wind loads and gravitational loads on a Norway spruce tree. *Forest Ecology and Management*, 135: 33–44.
- Tomczak A., Jelonek T., Jakubowski M. 2011. Modulus of elasticity of twin samples (wet and absolute dry) origin from Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) trees broken by wind. *Ann. Warsaw Univ. of Life Sci. – SGGW, For. and Wood Technol.*, 77: 149–153.
- Zajączkowski J. 1991. *Odporność lasu na szkodliwe działanie wiatru i śniegu*. Wydawnictwo Świat. Warszawa.
- Zajączkowski J., Mikułowski M., Zachara T., Gil W., Kopryk W. 2004. *Możliwości zwiększenia efektywności zabiegów hodowlanych w kształtowaniu odporności lasu na szkodliwe działanie wiatru i śniegu*. IBL, Warszawa.

**Tomasz Jelonek**  
Katedra Użytkowania Lasu  
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu  
tomasz.jelonek@up.poznan.pl