

TOMASZ KALUŻA<sup>1</sup>, JACEK LEŚNY<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Katedra Budownictwa Wodnego  
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

<sup>2</sup>Katedra Agrometeorologii  
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

## ANALIZA STATECZNOŚCI DRZEWOSTANÓW WZGLĘDEM SILNYCH WIATRÓW

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono wyniki oceny momentów krytycznych badanych drzewostanów sosnowych i czarnej olchy. Prace polowe polegały na wrywaniu drzew z jednoczesnym pomiarem momentów krytycznych. Wyniki porównano z wartościami momentów sił wywracających powstających na skutek działania ekstremalnych wiatrów. Uzyskane wyniki pozwalają na podstawie oszacowania wielkości korony drzewa oraz parametrów gruntu określić stateczność drzewostanów.

**Słowa kluczowe:** silne wiatry, momenty wywracające drzew

### Wstęp

Bardzo silne wiatry mogą powodować duże zniszczenia zarówno wśród elementów krajobrazu będących wytworem ludzi, jak i w drzewostanach (GIL 2005). Sygnalizowany przez meteorologów wzrost liczby ekstremalnych zdarzeń pogodowych (CLIMATE CHANGE... 2007), do których należą m.in. silne wiatry, skłania do zajmowania się nie tylko bezpośrednio tymi zjawiskami, lecz także skutkami, jakie mogą one wywoływać. Stateczność pojedynczego drzewa, a w rezultacie i całego drzewostanu, zależy od jego odporności na wywrócenie, czyli momentu siły, jaka musiałaby zostać przyłożona, aby naruszyć jego strukturę korzeniową i doprowadzić do wywrócenia (moment krytyczny). Wartości graniczne momentu siły wywracającej drzewa zależą od parametrów zarówno rośliny, jak i podłoża. W pracy przedstawiono wyniki oceny momentów krytycznych badanych drzewostanów sosnowych i olszy. Prace polowe polegały na wrywaniu (przewracaniu) drzew z jednoczesnym pomiarem przyłożonej siły i wyznaczaniu na tej podstawie momentów krytycznych. Wyniki porównywano z wartościami momentów sił wywracających, jakie mogłyby zaistnieć na skutek działania silnych wiatrów. Wielkość

tych momentów powiązano z klasyfikacją maksymalnych prędkości wiatrów zaproponowaną przez IMiGW (LORENC 2008).

### Moment wywracający powstający na skutek działania wiatru

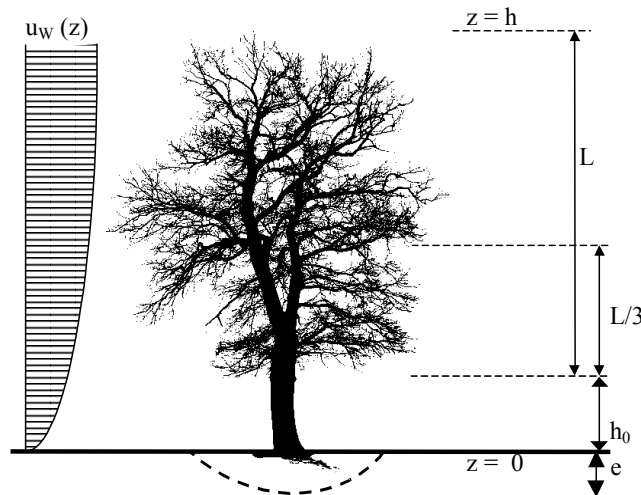
Niebezpieczeństwo wywrócenia się drzewa zależy od wartości momentów sił zewnętrznych na nie działających oraz od jego odporności na wywrócenie, co przedstawia zależność (HARTGE 1993):

$$\frac{M_c}{M_w} > 1 \quad (1)$$

w której:  $M_c$  – moment krytyczny,  $M_w$  – moment wywracający na skutek działania wiatru. Moment wywracający zależy od wielkości drzewa, która wpływa na opór, jaki będzie ono stawiać przepływającej strudze powietrza. Przy założeniu niezmiennej wraz z wysokością prędkości wiatru oraz stałej wartości współczynników oporu powietrza zależność opisującą moment siły w wyniku działania na drzewo naporu wiatru można przedstawić w postaci (rys. 1):

$$M_w = \frac{1}{2} \rho_p C_K u_w^2 S \left( e + h_0 + \frac{L}{3} \right) \quad (2)$$

gdzie:  $M_w$  – moment wywracający na skutek działania wiatru,  $\rho_p$  – gęstość powietrza,  $C_K$  – współczynnik oporu opływu drzewa przez powietrze,  $u_w$  – prędkość wiatru,  $S$  – powierzchnia rośliny, na którą działa wiatr,  $e$  – zagłębienie bryły korzeniowej,  $h_0$  – wysokość pnia drzewa,  $L$  – wysokość korony drzewa.



Rys. 1. Schemat działania siły wiatru na drzewo  
Fig. 1. Schematic view of wind influence on tree

W celu wyznaczenia momentów wywracających na skutek działania wiatru niezbędna jest m.in. znajomość parametrów struktury drzew: średnicy pnia i powierzchni drzewa, na którą działa wiatr. Powierzchnia ta odpowiada rzutowi korony drzewa na płaszczyznę pionową. Odporność na wywrócenie zależy od systemu korzeniowego rośliny, który jest charakterystyczny dla danego gatunku, oraz od rodzaju gruntu i jego parametrów. Szczególną uwagę zwrócić należy na określenie kąta tarcia wewnętrznego, spójności oraz wytrzymałości na ścinanie z wykorzystaniem metod *in situ* (WIERZBICKI 1997). Uwzględnić również należy wpływ poziomego zalegania zwierciadła wody na zmiany wilgotności gruntu i związane z tym zmiany cech wytrzymałościowych podłoża.

### Pomiary terenowe

Wyznaczenie momentu krytycznego w warunkach polowych polega na pomiarze momentu siły potrzebnej do wyrwania drzewa. Wybierając homogeniczną pod względem gatunkowym próbę losową drzew, pamiętać należy o zachowaniu jednorodności warunków podłoża oraz o tym, iż drzewa są zróżnicowane pod względem pierśnicy. Zasadniczym elementem polowego stanowiska do mierzenia momentów krytycznych był dynamometr oparty na czujniku siły CL 15 o zakresie od 0 do 200 kN skonstruowany w Zakładzie Elektroniki Pomiarowej Wielkości Nielektrycznych w Markach. W skład układu pomiarowego wchodziły: układ przetwarzający CL 10, karta analogowo-cyfrowa oraz laptop ze specjalistycznym oprogramowaniem do śledzenia i rejestracji wyników. Źródłem siły był ciężki sprzęt budowlany wykorzystywany przy zrębie lasu i pracach drogowych.

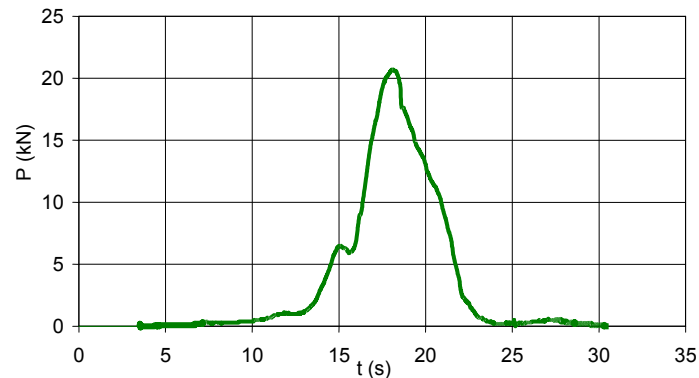
Wysokość położenia liny opasującej  $l$  powiększona o głębokość wykrotu  $e$  stanowiła jednocześnie ramię siły służącej do oceny momentu krytycznego  $M_c$ :

$$M_c = (l + e)P \quad (3)$$

gdzie:  $(l + e)$  – ramię siły – wysokość zaczepienia liny liczona od podstawy bryły korzeniowej,  $P$  – maksymalna siła potrzebna do wyrwania drzewa.

Wyznaczenie momentu krytycznego wymagało określenia maksymalnej siły potrzebnej do wyrwania drzewa przy zadanej wysokości przyłożenia siły. Dzięki współpracy dynamometru z komputerem możliwe było precyzyjne notowanie narastania siły  $P$  w czasie  $t$ , aż do momentu wywrócenia drzewa (rys. 2), czyli od momentu, gdy siła ta przyjęła poszukiwaną wartość maksymalną.

Eksperymentalnej oceny granicznego momentu wywracającego drzew dokonano w dwóch obiektach doświadczalnych. Pierwszy zlokalizowany był na terenach zalewowych rzeki Warty w Częstochowie od km 739+065 do km 740+260. Teren ten znajdował się za przebudowywanym wałem przeciwpowodziowym i charakteryzowały go (zarówno brzeg prawy, jak i lewy) na odcinku około 1200 m gęste zadrzewienia olszy czarnej (*Alnus glutinosa*) z domieszką klonu jesionolistego (*Acer negundo*) i wierzy białej (*Salix alba*). Część tych drzew w ramach realizowanej inwestycji przebudowy wałów przeciwpowodziowych miała zostać wycięta. Do badań wybrano tylko olsze szarą. Na lewym brzegu było to 30 drzew, a na prawym jeszcze 12. Pierśnica ich wynosiła od 7 do 43 cm, a wysokość – od około 6 do 16 m.



Rys. 2. Przebieg procesu wyrywania drzewa na przykładzie sosny D24, dolina rzeki Samy, Żurawiniec

Fig. 2. The course of a tree uprooting process on the example of pine D24, valley of the Sama River, Żurawiniec

Drugi obszar badawczy zlokalizowano na obrzeżach doliny rzeki Samy w pobliżu Obrzycka w woj. wielkopolskim. Przedmiotem zainteresowania były dwa oddziały leśne drzew sosny pospolitej (*Pinus sylvestris*) w obrębie Nadleśnictwa Oborniki, Leśnictwo Żurawiniec: oddział 1072d i oddział 1095b. Lasy różniły się wiekiem, a co z tym związane: wysokością, grubością pni oraz liczbą roślin na jednostce powierzchni. Pierśnica badanych drzew zawierała się w granicach od 12 do 43 cm, a ich wysokość wynosiła od 15 do 30 m. Z analizy mapy geologicznej utworów powierzchniowych wynika, że teren badań znajdował się w obrębie wychodni piaszczystych osadów sandrowych związanych z fazą poznańską zlodowacenia Wisły. Osady te tworzą powierzchnię o nieznacznych deniwelacjach, w wyraźny sposób wyniesioną ponad dolinę rzeki Samy.

W ramach prac terenowych wykonano również pomiary indeksu ulistowienia (LAI) i gęstości ulistowienia (LAD), wykorzystując urządzenie LAI-2000. Pomiary LAI na niewielkim obszarze dość gęsto rosnących drzew potraktowano jako badania homogenicznej warstwy roślinności. Znając liczbę drzew, jaka rosła na obszarze pomiarowym, oraz powierzchnię rzutu koron drzew na płaszczyznę poziomą, można było wyznaczyć powierzchnie przekroju wszystkich gałęzi, konarów oraz pnia średnio dla jednego drzewa.

### Klasyfikacja IMiGW wywracających prędkości wiatrów a rzeczywiste szkody w drzewostanie

Wykorzystując wyniki pomiarów wartości momentów wywracających oraz wartości pozostałych parametrów geometrycznych wywracanych drzew, oszacowano prędkości wiatru, który mógłby wyrwać poszczególne drzewa. Do szacowania tych prędkości wykorzystano przekształcone równanie (2). Dla drzewostanu sosnowego, którego korony tworzą względnie jednorodną warstwę, przyjęto uproszczenie, że korona każdego z drzew zajmuje obszar prostopadłościanu. Do obliczeń wykorzystano także wartości

indeks ulistowienia (LAI), którego wartość określała całkowitą jednostronną powierzchnię liści (igieł), jakie znajdowały się w obszarze korony drzewa. Wartość ta oraz odległość korony od osi obrotu w chwili wywracania się drzewa determinują wartość momentu siły w trakcie działania wiatru na drzewo. W tabeli 1 pokazano udział wywracanych sosni i olch w poszczególnych przedziałach prędkości wiatru. Nieregularność uzyskanego rozkładu wynika prawdopodobnie ze zróżnicowania wiekowego badanych drzew, a co za tym idzie – ze zróżnicowania wielkości systemów korzeniowych. Dodatkowym czynnikiem są niejednakowe warunki gruntowe podłoża.

Tabela 1. Udział wywracanych drzew sosny i olszy szarej w poszczególnych przedziałach prędkości wiatru (%)

Table 1. Frequency of overturning of pine and alder trees for individual range of wind velocity (%)

Gatunek drzewa	$\leq 17,2$ m/s	Klasa I $\leq 20,7$ m/s	Klasa II $\leq 24,4$ m/s	Klasa III $\leq 28,5$ m/s	Klasa IV $\leq 32,6$ m/s	Klasa V $\leq 35,1$ m/s	Klasa V-1 $\leq 50,1$ m/s	Klasa V-2 $\leq 70,2$ m/s
Sosna	10,3	24,1	31,0	13,8	3,4	6,9	10,3	0,0
Olsza szara	19,0	7,1	14,3	11,9	16,7	11,9	4,8	14,3

W tabeli 1 zaznaczono również klasy maksymalnych prędkości wiatrów zaproponowane przez IMiGW. Na 29 przebadanych (wywróconych) drzew tylko trzy zostałyby wyrwane przy wietrze poniżej I klasy prędkości, większość drzew zostałaby uszkodzona, gdyby wiatr osiągnął II klasę prędkości, a tylko trzy przetrwałyby V klasę prędkości. Należy tu jednak zaznaczyć, że badania były wykonywane w zwartych drzewostanach sosnowych, wewnątrz których rzadko występują tak duże prędkości wiatru. Prawdopodobnie sosny rosnące w terenie otwartym miałyby bardziej rozbudowany system korzeniowy, a tym samym byłyby bardziej odporne na wywrócenia powodowane silnym wiatrem. W przypadku zwartych drzewostanów doświadczenie pokazuje, że najbardziej narażone na uszkodzenia są drzewa rosnące na granicach tych obszarów, przy czym możliwy jest efekt domina, czyli wywrócenie się drzew na granicy powoduje, że kolejne drzewa stają się granicznymi i są wywracane itd. Reasumując, stwierdzamy iż przeprowadzone doświadczenia pokazują, że już wiatry określone w klasyfikacji IMiGW jako gwałtowne mogą powodować relatywnie duże uszkodzenia w drzewostanach sosnowych. Oznacza to, że prawdopodobnie będzie rosła liczba uszkodzanych corocznie w wyniku silnych wiatrów drzewostanów, gdyż większość prognoz zmian klimatycznych przewiduje zwiększenie się liczby zjawisk ekstremalnych. Będą to susze, upały, intensywne opady oraz także burze i silne wiatry.

W tabeli 1 pokazano również udział wywracanych drzew olchy szarej w poszczególnych przedziałach prędkości wiatru. W przypadku olchy szarej przebadano (wywrócono) łącznie 42 drzewa. Osiem z nich zostałyby wyrwane przy wietrze kwalifikowanym poniżej I klasy prędkości. Tak mała odporność na wiatr tych kilku drzew wynika raczej z charakteru gruntu, na którym rosły; doświadczenia robiono w trakcie oczyszczania wału przeciwpowodziowego i terenu bezpośrednio do niego przyległego, zatem na sztucznie ukształtowanym podłożu, stąd też duża niejednorodność podłoża, które miejscami wykazywało bardzo małą nośność, a w konsekwencji część drzew wywróciła się przy zastosowaniu relatywnie niewielkiej siły. Warto tu zaznaczyć, że

w dolinach rzecznych bardzo często występują różnego typu niejednorodności podłoża, a przy jego dużym uwilgotnieniu na tych terenach może to powodować, że część drzew zostanie wyrwana z korzeniami nawet przy niezbyt silnym wietrze. Połowa wszystkich badanych drzew zostałaby wyrwana przy wiatrach o prędkości z przedziału od klasy II do V. Sześć drzew (około 14%) zostałoby przewróconych dopiero wówczas, gdyby wiatr osiągnął klasę prędkości V-2, czyli powyżej 50,1 m/s, co należy uznać za bardzo dużą odporność.

## Podsumowanie

Symptomatyczne jest, że chyba najbardziej znana skala prędkości wiatru: skala Beauforta powstawała właśnie jako skala opisująca skutki, jakie może wywoływać wiatr. A ponieważ opisuje ona skutki, jakie wiatr wywołuje na morzu, określono ją tylko do 12° (32,6 m/s), gdyż dla wiatrów silniejszych stan powierzchni morza już się nie zmienia (MEADEN i IN. 2007, AKADEMIA... 2008). Niestety, inaczej jest na lądzie, gdzie już wiatr o prędkości kilkunastu metrów na sekundę może powodować pewne uszkodzenia i im będzie on szybszy, tym szkody będą większe, przy czym zdecydowanie trudniej niż na morzu jest przewidzieć, jak wielkie one będą. IMiGW, jako jedna z głównych instytucji w Polsce zajmujących się szeroko rozumianymi zjawiskami pogodowymi, zaproponował zastosowanie specjalnej skali prędkości wiatru (LORENC 2008). Skalę tę ułożono, opierając się głównie na skutkach, jakie wiatr może wywoływać, ale jednocześnie zdefiniowano też przedziały prędkości wiatru. Korzystając z opisanych w niniejszej pracy wyników doświadczeń terenowych, określono, przy jakich klasach prędkości wiatrów nastąpiłyby znaczące straty w drzewostanach sosnowych i olchowych.

W badanych drzewostanach sosnowych znaczące straty powstałyby już przy I klasie prędkości, czyli przy wiatrach do 20,7 m/s. Zostałyby wówczas uszkodzonych już ponad 30% drzewostanu. Dalsze duże zniszczenia nastąpiłyby przy wiatrach dochodzących do II i III klasy prędkości. Wiatry o takiej sile przetrwałyby tylko około 20% drzewostanu. Niestety, długoterminowe prognozy klimatyczne mówią o zwiększającej się liczbie zjawisk ekstremalnych, w tym silnych wiatrów, zatem należy się spodziewać wzrostu ilości strat w stosunkowo mało odpornych drzewostanach sosnowych. Jedynym pocieszeniem może być fakt, że wewnątrz zwartej drzewostanu prędkość ruchu powietrza jest mniejsza niż ponad nim, jednak na skraju takich drzewostanów drzewa będą narażone na oddziaływanie wiatrów o dużej prędkości.

Drzewostany olchowe są zdecydowanie bardziej odporne, jednak z przedstawionych badań wynika, że w ich wypadku dużą rolę odgrywa podłoże, na którym rosną. A ponieważ rosną one często na obszarach podmokłych o mało spoistym gruncie, można się spodziewać, że część drzew (w badaniach około 20%) może zostać wyrwana już przy wiatrach o prędkości poniżej I klasy, jednak blisko 50% drzew przetrwa wiatry III klasy prędkości.

Wydaje się, że aby lepiej określić zagrożenia najczęstszych w Polsce drzewostanów sosnowych, celowe byłoby przeprowadzenie badań nad rozkładem prędkości wiatru wewnątrz szaty roślinnej i w miarę możliwości wykonanie dodatkowych doświadczeń z wyrwaniem drzew w tego typu drzewostanach, ale różniących się wiekiem i rosnących na różnych gruntach.

## Literatura

- AKADEMIA Morska w Gdyni. 2008. [http://ocean.am.gdynia.pl/student/meteo1/sila\\_wia.html](http://ocean.am.gdynia.pl/student/meteo1/sila_wia.html).
- CLIMATE CHANGE 2007: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 2007. Red. S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, H.L. Miller. Cambridge University Press, Cambridge. <http://www.ipcc.ch/SPM2feb07.pdf>: 18.
- GIL W., 2005. Huragan znowu niszczy lasy. *Poznajmy las* 1: 1-11.
- HARTGE K.H., 1993. *Ingenieurbiologie. Wurzelwerk Standsicherheit von Boschungen* Hangen. Sepia, Aachen.
- LORENC H., 2008. Wiatr w Polsce jako element zagrożenia. [http://www.imgw.pl/wl/internet/zz/wiedza/klimat/\\_klimat/archiwum/klimat\\_29012005.html](http://www.imgw.pl/wl/internet/zz/wiedza/klimat/_klimat/archiwum/klimat_29012005.html)
- MEADEN G.T., KOICHEV S., KOLENDOWICZ L., KOSA-KISS A., MARCINONIENE I., SIOUTAS M., TOMING H., TYRRELL J., 2007. Comparing the theoretical versions of the Beaufort scale, the T-scale and the Fujita scale. *Atmos. Res.* 83: 446-449.
- WIERZBICKI J., 1997. Budowa geologiczna i parametry geotechniczne podłoża w obrębie pradolin i rynien podlodowcowych. W: II Ogólnopolska Konferencja Naukowa „Przyrodnicze i techniczne problemy ochrony i kształtowania środowiska rolniczego”, Poznań, 4-5 września 1997 roku. Wyd. Akademii Rolniczej, Poznań: 187-195.

## ANALYSIS OF FOREST STANDS STABILITY IN RELATION TO STRONG WINDS

**Summary.** The paper shows the results of the investigation on critical moments for different trees species: *Pinus* and *Alnus*. The critical moment was measured the moment trees were uprooting. The results were compared to critical fall over forces of strong wind. The obtained results allow estimating the stability of forest stand on the basis of sizes of tree crowns and soil parameters.

**Key words:** strong wind, moments of tree fall over

*Adres do korespondencji – Corresponding address:*  
*Tomasz Kałuża, Katedra Budownictwa Wodnego, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, ul. Piątkowska 94 A, 60-649 Poznań, Poland, e-mail: kaltom@gmx.net*

*Zaakceptowano do druku – Accepted for print:*  
 8.10.2009

*Do cytowania – For citation:*  
 Kałuża T., Leśny J., 2009. Analiza stateczności drzewostanów względem silnych wiatrów. *Nauka Przyr. Technol.* 3, 3, #87.

