

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

## **Zmiany w budowie i właściwościach drewna jako efekt oddziaływania wiatru na drzewa**

Changes in the structure and properties of wood as an effect of the impact of wind on trees

### **ABSTRACT**

Tomczak A., Jelonek T., Jakubowski M. 2012. Zmiany w budowie i właściwościach drewna jako efekt oddziaływania wiatru na drzewa. Sylwan 156 (10): 776-783.

The paper presents a review of studies on the structure and properties of wood in relation to loads and damage of trees caused by wind. These two are the characteristics commonly used in the analyses of relationships between the tree and conditions of its growth and development.

### **KEY WORDS**

adaptation, natural modifications, windbreaks, wood defects

### **ADDRESSES**

Arkadiusz Tomczak – e-mail: arkadiusz.tomczak@up.poznan.pl

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

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

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

## **Wstęp**

Wiatr jest jednym z czynników, które kształtują warunki wzrostu i rozwoju drzew oraz drzewostanów [Ennos 1997]. Jego oddziaływanie wywołac może reakcję fizjologiczną, co na etapie tworzenia się tkanki drzewnej prowadzi do zmian w jej budowie i właściwościach, lub objawic się uszkodzeniem mechanicznym ukształtowanej już wcześniej struktury drewna [Wade, Hewson 1997].

Przedstawiony w pracy przegląd literatury stanowi syntetyczne ujęcie zagadnienia budowy i właściwości drewna w relacji do obciążeń i uszkodzeń drzew wywołanych przez wiatr. W literaturze przedmiotu poświęcono temu zagadnieniu niewiele miejsca. Badania relacji drewno-wiatr napotykać na liczne problemy metodyczne z uwagi na losowy charakter występujących uszkodzeń. Wiele miejsca poświęca się natomiast zagadnieniom związanym z wpływem wiatru na morfologię i mechanikę pnia [Peltola i in. 1996, 1999; England i in. 2000; Spatz i in. 2000]. W szerokim ujęciu analizowane są szkody wywołane przez wiatr, ich przyczyny oraz skutki [Gardiner i in. 1997; Donoghue i in. 2006]. Opracowywane są modele ryzyka uszkodzeń drzewostanów przez wiatr oraz strategie gospodarcze mające to ryzyko minimalizować [Gardiner i in. 2000; Jalkanen, Mattila. 2000; Talkkari i in. 2000; Valinger i in. 2000]. Niewielka część prac ma charakter eksperymentalny, gdzie badacze próbują zainicjować uszkodzenia drewna lub reakcję kambium w sposób kontrolowany [Peltola i in. 2000].

## Zmiany adaptacyjne

Zmiany zachodzące w budowie i właściwościach drewna pod wpływem naprężeń wywołanych obciążeniem przez wiatr są zazwyczaj reakcją o charakterze adaptacyjnym. Pod tym pojęciem można zdefiniować niedziedziczone zmiany osobnicze, wykształcone pod wpływem środowiska, tj. wywołane na przykład przez stres mechaniczny. Pod wpływem wiatru w pniu drzewa powstają naprężenia zginające, torsyjne, ściskające oraz ich sprzężone formy. Na długotrwałe obciążenia drzewa reagują aktywnością kambium. Przyrost na grubość jest bardziej dynamiczny w obszarach poddawanych silniejszym naprężeniom [Brüchert, Gardiner 2006]. Reakcja kambium na działanie czynnika jest natychmiastowa, jednak zauważalne zmiany pojawiają się z upływem czasu, wraz z wykształcaniem nowych, zmodyfikowanych warstw drewna. Wywołane przez wiatr modyfikacje mają naturalny charakter i najczęściej obejmują ultrastrukturę drewna, co z kolei wpływa na właściwości mechaniczne. U drzew jest to jedna z dróg kształtowania odporności na permanentne oddziaływanie wiatru.

Zginane pnie drzew są podobne do belek umocowanych w jednym końcu, na które działa moment siły wynikający z masy własnej oraz oddziaływania sił zewnętrznych. Wartość momentu siły zmienia się wzdłuż organu i zawsze największa jest u jego nasady, natomiast na przekroju poprzecznym pnia największe naprężenia powstają w części przyobwodowej. Rozkład naprężeń w pniu drzewa jest porównywalny do zmienności, jaką prezentują właściwości drewna. Zależność ta jest szczególnie wyraźna w przypadku wybranych gatunków iglastych, gdzie przeciętna gęstość, wytrzymałość oraz elastyczność drewna zmniejsza się wraz ze wzrostem odległości od podstawy pnia [Machado, Cruz 2005; Repola 2006; Lundström i in. 2008; Tomczak i in. 2010]. Natomiast w układzie promieniowym zwiększa się ona w kierunku od rdzenia do obwodu [Verkasalo 1992; Kärenlampi, Riekkinen 2004].

Przyrost na grubość jest bardziej dynamiczny w obszarach będących pod wpływem zwiększonego naprężenia ściskającego. Józefaciukowa i Laurow [1974], analizując makrostrukturalną budowę drewna sosny zwyczajnej w zależności od kierunku geograficznego, stwierdzili, że najszersze słoje i największy udział drewna późnego występują zwykle po wschodniej stronie pnia. Biorąc pod uwagę panujący kierunek wiatrów w Polsce, wywołaną niejednorodność należy uznać za naturalną reakcję drzew na działanie sił ściskających. Badania Telewskiego i Jaffe [1986] polegające na regularnym zginaniu drzewek dowiodły, że pod wpływem stresu wystąpiły zmiany w strukturze drewna oraz wzrosła elastyczność pni. Wrażliwość tkanki drzewnej na działanie stresu mechanicznego można według Kocha i in. [2000] zaobserwować na pniach świerków. U drzew nagle wyeksponowanych na działanie wiatru pojawiają się zmiany, które wizualnie przypominają guzy (niem. Wustholz). W odróżnieniu jednak od sęków zarośniętych jest to intensywny i miejscowy przyrost tkanki drzewnej, której zadaniem jest prawdopodobnie ustabilizowanie układu biomechanicznego drzewa.

Wywołane przez wiatr odkształcenia modyfikują budowę drewna, prowadząc na przykład do wykształcenia tkanki reakcyjnej [Telewski 1995]. Większość z wad drewna negatywnie wpływa na funkcjonowanie układu biomechanicznego drzewa. Zdaniem Frey-Wysslinga [1938] pod wpływem silnych naprężeń w zginanych pniach mogą tworzyć się pęcherze żywiczne. Wiatr wywołać może również powstawanie innych niekorzystnych cech, takich jak np. pęknięcia okrężne i rdzeniowe oraz skręt włókien [Eklund, Säll 2000].

Pień drzewa jest strukturą sprężystą, a o istnieniu takiego stanu decydują naprężenia wzrostowe. U roślin strefy umiarkowanej zachodzące na przełomie okresu zimowego i wiosennego zmiany temperatury wywołują cykliczną aktywność kambium. Nowo powstające komórki różni-

cują się, a z chwilą osiągnięcia ostatecznego kształtu i maksymalnych wymiarów rozpoczynają wykształcanie wtórnej ściany komórkowej. Zmiany zachodzące w ścianach komórkowych po ich wykształceniu powodują, że nowo powstające drewno posiada tendencję do kurczenia się. Drewno powstałe wcześniej przeciwstawia się temu zjawisku i w efekcie zewnętrzna warstwa drewna pozostaje w stanie rozciągnięcia, a wewnętrzne w stanie ściśnięcia. Powstające w ten sposób naprężenia nazywane są wzrostowymi [Hejnowicz 2002]. Wytrzymałość drewna na rozciąganie jest zdecydowanie wyższa od wytrzymałości drewna na ściskanie. W stanie mokrym (wilgotność względna >30%) różnica ta jest niemal czterokrotna [Raczkowski i in. 1995]. Z tego względu rozkład naprężeń na przekroju poprzecznym pnia nie jest równy (strefa ściszana jest większa od powierzchni drewna rozciąganego), a wstępne rozciągnięcie peryferyjnych warstw drewna pozwala na przyjęcie większego obciążenia ściskającego. Warunkiem istnienia naprężeń wzrostowych jest stałe odkładanie drewna, które przeciwdziałać będzie relaksacji naprężeń. Zjawisko relaksacji to efekt zmian, jakie następują w wielkości i rozkładzie naprężeń w pniu drzewa w czasie jego rozwoju. Trwale ściśnięte warstwy drewna na skutek odkształcenia plastycznego tracą elastyczność i naprężenie zanika (ulega relaksacji). Sprężystość pnia może być wobec tego zachowana pod warunkiem stałego przyrostu drzewa na grubość. Gdy u dorosłego drzewa zmniejszy się dynamika przyrostu grubości, naprężenia wewnętrzne mogą zmaleć do tego stopnia, że pień straci na sprężystości i przestanie łagodnie przyjmować energię podmuchów wiatru [Hejnowicz 2002].

Odrębną kategorię badań stanowią analizy przyrostowe uwzględniające następstwa oddziaływania wiatru w całej sekwencji słoju rocznych. Busby i in. [2009] przedstawili badania dotyczące fluktuacji związanych z wpływem wiatrów o charakterze cyklonalnym. Wiatry takie uznawane są zazwyczaj za sprawców katastrofalnych zniszczeń. Autorzy skupili uwagę na słabo poznanym wpływie wiatrów o średniej sile, występujących w niektórych rejonach z dużą częstotliwością. W badaniach dotyczących dębu i buka oraz analizie obejmującej 150 lat wstecz nie znaleźli wyraźnej korelacji między reakcją przyrostową a oddziaływaniem wiatru (poza jednym huraganem z 1944 roku). Stwierdzili, że wpływ na reakcję słoja rocznego miało zbyt wiele innych czynników i odseparowanie oddziaływania tych czynników standardowymi metodami w badaniach dendrochronologicznych jest zbyt trudne. Podobną analizę przeprowadzili Zielonka i in. [2010] dla świerka i modrzewia występującego w Tatrach Słowackich. Natomiast Sheppard i in. [2005] w szczegółowy sposób analizują reakcję przyrostową na incydenty zaistniałe współcześnie, np. tornada.

## Uszkodzenia mechaniczne

W przypadku zjawisk ekstremalnych efekt widoczny jest głównie w postaci uszkodzeń mechanicznych. O ich powstawaniu decyduje cały układ czynników, w tym między innymi cechy morfologiczne drzewa oraz budowa i właściwości drewna. W odróżnieniu do wiatru wywołującego zmiany adaptacyjne są to najczęściej zjawiska gwałtowne i krótkotrwałe. Powstawanie złomów związane jest najczęściej z występowaniem wiatrów o dużej prędkości i porywistości. Złamaniom towarzyszą uszkodzenia mechaniczne surowca drzewnego niewidoczne na drewnie okrągłym, ujawniające się po jego przetarciu lub po analizie parametrów technicznych.

Złamanie pnia następuje, gdy całkowity moment zginający przewyższa wartością maksymalny moment wytrzymałości drewna równający się naprężeniom łamiącym [Zajaczkowski 1991]. Poza siłą wiatru na wielkość momentu gnącego wpływają między innymi masa pnia i korony, grawitacja, opór wynikający ze sprężystości strzały (wytrzymałości na zginanie) oraz aerodynamiczne cechy korony (pole powierzchni rzutu korony prostopadłe do kierunku stru-

mienia powietrza oraz jej średnica i ażurowość) [Petty, Swain 1985; Peltola, Kellomäki 1993; Ancelin i in. 2004; Nishimura 2005; Peltola 2006]. Odporność drzew na działanie wiatru silnie związana jest również z ich ekspozycją oraz ze strukturą drzewostanu [Zajączkowski 1991; Stathers i in. 1994; Gil, Zachara 2006].

Z badań Jakubowskiego i Pazdrowskiego [2005] wynika, że u sosny zwyczajnej złamanie pnia występuje z reguły w miejscu występowania okółka sęków i/lub drewna reakcyjnego. Podobne zjawisko zaobserwowali też Cameron i Dunham [1999], Dunham i Cameron [2000] oraz Jakubowski [2010]. Sęki są naturalną pozostałością po obumarłych lub odciętych gałęziach. Żywe gałęzie rokrocznie wykształcają nowy słoń, który anatomicznie połączony jest z elementami przewodzącymi pnia. Przepływ wody z solami utrzymywany jest do osiągnięcia punktu kompensacyjnego, po przekroczeniu którego rozpoczyna się stopniowy proces obumierania gałęzi. W jego trakcie nasadowa część gałęzi zostanie otoczona przez nowo narastające drewno, bez zachowania ciągłości między elementami anatomicznymi. Z punktu widzenia biomechaniki obecność sęka niezrośniętego z otaczającym drewnem jest niepożądana, ponieważ w porównaniu do sęka zrośniętego, rozkład powstających wokół niego naprężeń jest bardziej niejednorodny [Buknowitz i in. 2010]. Obecne w pniu sęki stanowią więc potencjalne miejsca, w których może wystąpić złamanie [Mattheck 1991]. Zagrożenie uszkodzeniem wrośnie więc w sytuacji, gdy sęki będą skupione (najczęściej w okółkach), a duża ich część będzie niezrośnięta z otaczającym drewnem (dynamika procesu oczyszczania się pnia z gałęzi).

Bardzo poważnym zagrożeniem dla statyki drzewa jest zgnilizna. W początkowej fazie rozkładu drewna (zgnilizna twarda) spadek wytrzymałości osiągnąć może bowiem poziom kilkudziesięciu procent [Curling i in. 2002]. W fazie zaawansowanej (zgnilizna miękka) wytrzymałość drewna spada do zera. Zgnilizna najczęściej występuje w pniach drzew starych lub wcześniej uszkodzonych (zabitki). W młodszych drzewostanach sosnowych i świerkowych wpływ na powstawanie wiatrolomów i wiatrowałów ma zgnilizna, wywołana przez *Heterobasidion annosum* [Łakomy i in. 2001].

Nawet u zdrowych drzew parametry techniczne drewna drzew uszkodzonych są zazwyczaj gorsze od parametrów drewna z drzew nieuszkodzonych. Meyer i in. [2008], analizując gęstość drewna świerka pospolitego, stwierdzili, że w stanie suchym (wilgotność względna=0%) różnice nie były istotnie statystycznie, natomiast w stanie świeżym (wilgotność>30%) stwierdzono zróżnicowanie wyraźne i statystycznie istotne. Podobna analiza przeprowadzona przez Camerona i Dunhama [1999] dla sosny zwyczajnej wykazała, że drewno drzew uszkodzonych charakteryzowało się w porównaniu do drewna drzew nieuszkodzonych podobną gęstością i wytrzymałością na zginanie statyczne, ale wyraźnie niższą wartością współczynnika sprężystości. Analogiczne wyniki przedstawili również Jakubowski i in. [2011a, b] oraz Tomczak i in. [2011a, b].

Jak zauważa Arnold [2003], destrukcyjny wpływ wiatru nie objawia się wyłącznie w postaci złamań pnia. Swoją wyraz ma również w uszkodzeniach mechanicznych niewidocznych na drewnie okrągłym. Zgniecenia, które powstają w następstwie silnych naprężeń ściskających (ang. compression failures), najczęściej są zauważalne dopiero po przetarciu surowca, a parametry techniczne takiego drewna (wytrzymałość na ściskanie wzdłuż włókien, moduł elastyczności) są wyraźnie gorsze w porównaniu do drewna nieuszkodzonego [Arnold, Steiger 2006]. Naprężenia w pniu drzewa powstające pod wpływem wiatru mogą prowadzić także do uszkodzeń, które często widoczne są dopiero po analizie parametrów technicznych drewna. Przypuszcza się, że pod wpływem mikropęknięć obniża się wytrzymałość mechaniczną drewna, przy czym stopień degradacji uzależniony jest między innymi od odległości między złomem a miejscem badania [Jakubowski i in. 2007]. Jakubowski i Pazdrowski [2006] stwierdzili, że u sosny zwyczajnej

wytrzymałość drewna na zginanie statyczne w sekcjach położonych w bezpośrednim sąsiedztwie złomu była obniżona i wykazywała duże wahania wartości. Natomiast w przypadku buka zauważone różnice były niewielkie [Jakubowski i in. 2008].

## Podsumowanie

Drewno jest funkcjonalną biostrukturą, a jego właściwości są mierzalnym efektem wpływu warunków wzrostu i rozwoju drzewa na proces ksylogenezy. Budowa i właściwości drewna muszą stanowić kompromis między funkcjami fizjologicznymi i mechanicznymi. Rosnące drzewo dąży więc do rozwoju optymalnej struktury, w której zachowana zostanie zarówno funkcjonalność fizjologiczna, jak i mechaniczna [Mencuccini i in. 1997]. Wiatr jest jednym z czynników kształtujących warunki wzrostu, który fizycznie oddziałuje na rozwój roślin. Wywoływane przez niego obciążenia o wartości niższej od krytycznej indukują zmiany w budowie drewna, a przekraczające tę wartość prowadzą do uszkodzeń mechanicznych.

W leśnictwie szkody od wiatru występują bardzo często. Z uwagi na ten fakt podejmowane są między innymi próby mające na celu ocenę zagrożenia, wyrażenia go mierzalną wartością i przyjęcie odpowiednio ukierunkowanej strategii działań gospodarczych [Lekes, Dandul 2000; Heinonen i in. 2009; Bruchwald, Dmyterko 2010, 2011], a także badania w innych obszarach tego ważnego dla gospodarki leśnej problemu [Zhu i in. 2004].

## Literatura

- Anclin P., Courbaud B., Fourcaud T. 2004. Development of an individual tree-based mechanical model to predict wind damage within forest stands. *For. Ecol. Manage.* 203: 101-112.
- Arnold M. 2003. Storm-induced compression failures in spruce wood. *EMPA Activities, Materials and Systems for Civil Engineering*: 52-53.
- Arnold M., Steiger R. 2006. The influence of wind-induced compression failures on the mechanical properties of spruce structural timber. *Material and Structures* 40: 57-68.
- Brüchert F., Gardiner B. 2006. The effect of wind exposure on the tree aerial architecture and biomechanics of Sitka spruce (*Picea sitchensis*, *Pinaceae*). *Am. J. Bot.* 93 (10): 1512-1521.
- Bruchwald A., Dmyterko E. 2010. Metoda określania ryzyka uszkodzenia drzewostanu przez wiatr. *Leśne Prace Badawcze* 71 (2): 165-173.
- Bruchwald A., Dmyterko E. 2011. Zastosowanie modeli ryzyka uszkodzenia drzewostanu przez wiatr do oceny zagrożenia lasów nadleśnictwa. *Sylvan* 155 (7): 459-471.
- Buksnowitz Ch., Hackspiel Ch., Hofstetter K., Müller U., Gindl W., Teischinger A., Konnerth J. 2010. Knots in trees: strain distribution in a naturally optimised structure. *Wood Sci. Technol.* 44: 389-398.
- Busby P. E., Canham C. D., Motzkin G., Foster D. R. 2009. Forest response to chronic hurricane disturbance in coastal. *New England. J. Veg. Sci.* 20: 487-497.
- 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.
- Curling S. F., Clausen C. A., Winandy J. E. 2002. Relationships between mechanical properties, weight loose, and chemical composition of wood during incipient brown rot decay. *For. Prod. J.* 52 (7/8): 34-39.
- Donoghue D. N. M., McManus K. B., Dunford R. W., Watt P. J. 2006. European windstorm and the role of remote sensing in helping to assess damage to forestry. 4th International Workshop on Remote Sensing for Post-Disaster Response Sept 25-26, Cripps Court, Magdalene College, Cambridge.
- Dunham R. A., Cameron A. D. 2000. Crown, stem and wood properties of wind-damaged and undamaged Sitka spruce. *For. Ecol. Manage.* 135: 73-81.
- Eklund L., Säll H. 2000. The influence of wind on spiral grain formation in conifer trees. *Trees* 14: 324-328.
- England A. H., Baker C. J., Saunderson S. E. T. 2000. A dynamic analysis of windthrow of trees. *Forestry* 73 (3): 225-237.
- Ennos A. R. 1997. Wind as an ecological factor. *Trends in Ecology & Evolution* 12 (3): 108-111.
- Frey-Wyssling A. 1938. Über die Entstehung von Harztachen. *Holz als Roh- und Werkstoff* 1 (9): 329-332.
- Gardiner B. A., Quine C. P. 2000. Management of forests to reduce the risk of abiotic damage – a review with particular reference to the effects of strong winds. *For. Ecol. Manage.* 135: 261-277.
- Gardiner B. A., Stacey G. R., Belcher R. E., Wood C. J. 1997. Field and wind tunnel assessments of the implications of respacing and thinning for tree stability. *Forestry* 70 (3): 233-252.

- Gil W., Zachara T. 2006. Analiza szkód od wiatru w wybranych drzewostanach świerkowych i sosnowych. *Leśne Prace Badawcze* 4: 77-99.
- Heinonen T., Pukkala T., Ikonen V.-P., Peltola H., Vena A., Venäläinen A., Dupont S. 2009. Integrating the risk of wind damage into forest planning. *For. Ecol. Manage.* 258: 1567-1577.
- Hejnowicz Z. 2002. Anatomia i histogeneza roślin naczyniowych. PWN.
- Jakubowski M. 2010. Promieniowa zmienność makrostruktury drewna wiatrolomów sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) i świerka pospolitego (*Picea abies* Karst.) w relacji do niektórych właściwości drewna. *Rozprawy Naukowe* 407, UP w Poznaniu.
- Jakubowski M., Jelonek T., Tomczak A. 2011a. Modulus of rupture in twin samples (wet and absolutely dry) coming from wood of wind-broken trees of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *Ann. WULS-SGGW, For. and Wood Technol.* 74: 110-114.
- Jakubowski M., Pazdrowski W. 2005. Wood defects accompanying windbreaks of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) trees. *Ann. WULS-SGGW, For. and Wood Technol.* 56: 286-290.
- Jakubowski M., Pazdrowski W. 2006. The bending static strength of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood comes from the trees damaged by the wind. *Ann. WULS-SGGW, For. and Wood Technol.* 58: 362-366.
- Jakubowski M., Pazdrowski W., Jelonek T., Szaban J., Tomczak A., Pagórska M. 2007. The compressive strength along fibers of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood comes from the trees broken by the wind. *Ann. WULS-SGGW, For. and Wood Technol.* 61: 270-271.
- Jakubowski M., Pazdrowski W., Jelonek T., Tomczak A., Szaban J. 2008. Selected properties of wood comes from beech (*Fagus sylvatica* L.) windbreaks. *Ann. WULS-SGGW, For. and Wood Technol.* 65: 122-125.
- Jakubowski M., Tomczak A., Jelonek T. 2011b. Compression strength along the grain in twin samples (wet and absolutely dry) coming from wood of wind-broken trees from Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *Ann. WULS-SGGW, For. and Wood Technol.* 74: 104-109.
- Jalkanen A., Mattila U. 2000. Logistic regression models for wind and snow damage in northern Finland based on National Forest Inventory data. *For. Ecol. Manage.* 135: 315-330.
- Józefaciukowa W., Laurou Z. 1974. Zmienność niektórych cech makrostrukturalnych drewna sosny zwyczajnej na tle typów pokrojowych. *Prace IBL* 446: 25-51.
- Kärenlampi P. P., Riekkinen M. 2004. Maturity and growth rate effects on Scots pine basic density. *Wood Sci. Technol.* 38: 465-473.
- Koch G., Bauch J., Puls J., Schwab E. 2000. Biological, chemical and mechanical characteristics of „Wulsholz” as a response to mechanical stress in living trees of *Picea abies* [L.] Karst. *Holzforschung* 54: 137-143.
- Lekes V., Dandul I. 2000. Using airflow modelling and spatial analysis for defining wind damage risk classification (WINDARC). *For. Ecol. Manage.* 135: 331-344.
- Lundström T., Stoffel M., Stöckli V. 2008. Fresh-stem bending of silver fir and Norway spruce. *Tree Physiol.* 28: 355-366.
- Łakomy P., Cieślak R., Rodak W., Kostrzewski T. 2001. Wpływ porażenia przez *Heterobasidion annosum* wybranych drzewostanów sosnowych i świerkowych na powstawanie wiatrolomów i wiatrowalów w 1999 i 2000 roku. *Sylwan* 145 (7): 43-54.
- Machado J. S., Cruz H. P. 2005. Within stem variation of maritime pine timber mechanical properties. *Holz als Roh- und Werkstoff* 63: 154-159.
- Mattheck C. 1997. Design in nature – learning from trees. Springer Verlag Berlin Heidelberg New York.
- Mennuccini M., Grace J., Fioravanti M. 1997. Biomechanical and hydraulic determinants of tree structure in Scots pine: anatomical characteristics. *Tree Physiol.* 17: 105-113.
- Meyer F. D., Paulsen J., Körner Ch. 2008. Windthrow damage in *Picea abies* is associated with physical and chemical stem wood properties. *Trees* 22: 463-473.
- Nishimura T. B. 2005. Tree characteristics related to stem breakage of *Picea glehnii* and *Abies sachalinensis*. *For. Ecol. Manage.* 215: 295-306.
- Peltola H. 1996. Swaying of trees in response to wind and thinning in stand of Scots pine. *Bound. Layer Meteo.* 77: 285-304.
- Peltola H. M. 2006. Mechanical stability of trees under static loads. *Am. J. Bot.* 93 (10): 1501-1511.
- Peltola H., Kellomäki S. 1993. A mechanistic model for calculating windthrow and stem breakage of Scots pine at stand edge. *Silva Fennica* 27 (2): 99-111.
- Peltola H., Kellomäki S., Hassinen A., Granander M. 2000. Mechanical stability of Scots pine, Norway spruce and birch: an analysis of tree-pulling experiments in Finland. *For. Ecol. Manage.* 135: 143-153.
- Peltola H., Kellomäki S., Väisänen H., Ikonen V. P. 1999. A mechanistic model of assessing the risk of wind and snow damage to single trees and stands of Scots pine, Norway spruce and birch. *Can. J. For. Res.* 29 (6): 647-660.
- Petty J. A., Swain C. 1985. Factors influencing stem breakage of conifers in high wind. *Forestry* 58 (1): 75-83.
- Raczkowski J., Jakubów S., Majchrzak A. 1995. Zależność między wytrzymałością drewna na rozciąganie i ścisłaniem wzdłuż włókien. Wpływ wilgotności. *Fol. For. Pol., Seria B*, 26: 151-159.

- Repolá J. 2006. Models for vertical wood density of Scots pine, Norway spruce and birch stems, and their application to determine average wood density. *Silva Fennica* 40 (4): 673-685.
- Sheppard P. R., May E. M., Ort M. H., Anderson K. C., Elson M. D. 2005. Dendrochronological responses to the 24 October 1992 tornado at Sunset Crater, northern Arizona. *Can. J. For. Res.* 35: 2911-2919.
- Spatz H-Ch., 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.
- Stathers R. J., Rollerson T. P., Mitchell S. J. 1994. Windthrow Handbook for British Columbia Forests. B.C. Min. For., Victoria, B.C. Working Paper 9401.
- Talkkari A., Peltola H., Kellomäki S., Strandman H. 2000. Integration of component models from the tree, stand and regional levels to assess the risk of wind damage at forest margins. *For. Ecol. Manage.* 135: 303-313.
- Telewski F. W. 1995. Wind-induced physiological and developmental responses in trees. W: Cottus M. P., Grace J. [red.]. *Wind and trees.* 237-263.
- Telewski F. W., Jaffe M. J. 1986. Thigmomorphogenesis: Anatomical, morphological and mechanical analysis of genetically different sibs of *Pinus taeda* in response to mechanical perturbation. *Plant Physiol.* 66: 219-226.
- Tomczak A. 2008. Basic density of juvenile wood and its variation in stem profile of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *Ann. WULS-SGGW, For. and Wood Technol.* 66: 151-154.
- Tomczak A., Jelonek T., Jakubowski M. 2011a. Modulus of elasticity of twin samples (wet and absolute dry) origin from Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) trees broken by wind. *Ann. WULS-SGGW, For. and Wood Technol.* 76: 149-153.
- Tomczak A., Jelonek T., Jakubowski M. 2011b. Wood density of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) trees broken by wind. *Annals Ann. WULS-SGGW, For. and Wood Technol.* 76: 144-148.
- Tomczak A., Jelonek T., Zoń L. 2010. Porównanie wybranych właściwości fizycznych drewna młodocianego i dojrzałego sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) z drzewostanów rębnych. *Sylwan* 154 (12): 809-817.
- Valinger E., Fridman J. 1997. Modeling probability of snow and wind damage in Scots pine stands using tree characteristics. *For. Ecol. Manage.* 97: 215-222.
- Verkasalo E. 1992. Relationships of the modulus of elasticity and the structure of Finnish Scots pine wood. *Silva Fennica* 16 (3): 155-168.
- Wade J. E., Hewson E. W. 1979. Trees as a local climatic wind indicator. *J. App. Meteo.* 18: 1182-1187.
- Zajączkowski J. 1991. Odporność lasu na szkodliwe działanie wiatru i śniegu. Wydawnictwo Świat. Warszawa.
- Zhu J.-J., Liu Z.-G., Li X.-F., Matsuzaki T., Gonda Y. 2004. Review: effects of wind trees. *J. For. Res.* 15 (2): 153-160.
- Zielonka T., Holeksa J., Fleischer F., Kapusta P. 2010. A tree-ring reconstruction of wind disturbances in a forest of the Slovakian Tatra Mountains, Western Carpathians. *J. Veg. Sci.* 21: 31-42.

## SUMMARY

### Changes in the structure and properties of wood as an effect of the impact of wind on trees

Wind is the primary ecological factor determining growth conditions for individual trees and stands, physically affecting their development. Long-term loads cause first of all changes in tree form, particularly crown form and the form of stem cross-sections. Violent and short-term phenomena, associated with the occurrence of winds with high velocity and strength, are most frequently related with mechanical damage in the form of broken stems.

Changes occurring in wood structure and properties under the influence of stresses caused by wind are typically adaptation reactions. This term refers to non-heritable individual traits, developed as a result of the environmental effect. In areas influenced by strong compressive stresses increment in diameter is more dynamic, with changes occurring in wood ultrastructure and the formation of reaction wood tissue. Extreme types of wind action on trees include different categories of mechanical damage. Apart from breakage in round wood we observe damage manifested after sawing or after an analysis of technical parameters. Wood from wind-broken trees is inferior in terms of technical parameters in comparison to wood from undamaged trees.

Wind-caused losses are highly frequent in forestry. In view of this fact attempts are undertaken to assess the risk, to express it in the form of a measurable value and to adopt an appropriate strategy of management actions, as well as to conduct studies in other areas of the problem, crucial for forest management.