

## **WYKORZYSTANIE DWUWYMIAROWEGO MODELU PRZEPIYU DO OCENY STATECZNOŚCI DRZEWOSTANÓW ŁĘGOWYCH NA PRZYKŁADZIE DOLINY WISŁY W OKOLICY PUŁAW**

Tomasz Kałuża

Akademia Rolnicza im. A. Cieszkowskiego w Poznaniu

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono zastosowanie modelu numerycznego do analizy warunków, w jakich może dojść do utraty stateczności drzewostanów. Wykorzystując program ArcView i dwuwymiarowy model przepływu Rismo, stworzono aplikację pozwalającą obliczyć wartości krytycznych momentów stateczności drzew. Do weryfikacji numerycznego modelu stateczności drzewostanów wybrano lasy łągowe doliny rzeki Wisły w okolicy Puław. Lasy te zostały zniszczone w dniu 4 sierpnia 2001 roku w czasie gwałtownej burzy. Wystąpienie w okolicy Puław wichury zbiegło się z przejściem fali powodziowej na Wiśle. Na wybranym odcinku rzeki Wisły wykonano szczegółowe pomiary parametrów drzew i podłoża. Korzystając z danych hydrologicznych i meteorologicznych, możliwe było wykonanie symulacji warunków, w jakich doszło do wywrócenia drzew.

**Słowa kluczowe:** momenty krytyczne drzew, stateczność drzewostanów

### **WSTĘP**

Zniszczenia drzewostanów porastających tereny zalewowe związane są z działaniem gwałtownych wiatrów. Dodatkowym czynnikiem są wezbrania powodziowe. Wyrwane i pływające z nurtem drzewa stanowią zagrożenie budowli hydrotechnicznych. Rozpoznanie ryzyka utraty stateczności drzew stanowi istotny aspekt racjonalnej gospodarki w zbiorowiskach roślinnych terenów zalewowych, prowadzącej do minimalizowania ewentualnych szkód w czasie przepływów powodziowych połączonych z wichurami.

W pracy przedstawiono wyniki oceny stateczności drzewostanów. Zależności opisujące momenty sił w wyniku działania naporu wiatru i wody wykorzystano do analizy zniszczenia lasów łągowych doliny rzeki Wisły w okolicy Puław. Wyniki posłużyły do

przetestowania i weryfikacji teoretycznego modelu wytrzymałości drzewostanów na wywrwanie.

Praca naukowa finansowana ze środków Komitetu Badań Naukowych w latach 2003–2005 jako projekt badawczy KBN – 3P06S 033 25 oraz w latach 2005-2007 jako projekt badawczy KBN – 2P06S 078 28.

## STATECZNOŚĆ DRZEWOSTANÓW

Rozpatrując możliwość wywrócenia się drzewa, należy porównać ze sobą moment sił zewnętrznych działających na drzewo oraz moment krytyczny [Hartge 1993], którego przekroczenie wywróci drzewo. Drzewo nie ulegnie wywróceniu, gdy spełniony jest warunek:

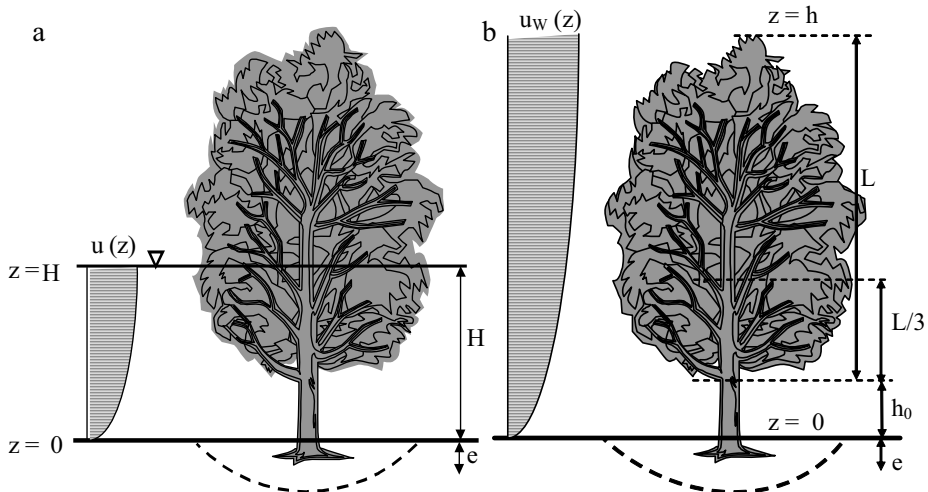
$$\frac{M_c}{M_W + M_Q} > 1 \quad (1)$$

gdzie:  $M_c$  – moment krytyczny,

$M_Q$  – moment wywracający na skutek działania wody,

$M_W$  – moment wywracający na skutek działania wiatru.

W rozpatrywaniu zagadnienia wywrócenia się drzewa należy uwzględnić zarówno wpływ parcia dynamicznego wody, jak i wiatru (rys. 1). Siła wywracająca zależy od wielkości drzewa i równa jest oporowi stawianemu powietrzu i wodzie przez strukturę roślinną. Przy założeniu jednego kierunku działania wody i wiatru, stałej wartości prędkości wody i wiatru oraz stałej wartości współczynników oporu wody i powietrza momenty sił wywracających w wyniku działania naporu wiatru i wody można przedstawić w postaci [Proposed guidelines... 1994]:



Rys. 1. Działanie na drzewo: a – parcia dynamicznego wody, b – wiatru

Fig. 1. View on tree: a – of flowing water influence, b – of wind influence

$$M_Q = \frac{1}{2} \rho_W C_D u^2 S_Q \left( e + \frac{H}{2} \right) \quad (2)$$

$$M_W = \frac{1}{2} \rho_P C_K u_W^2 S_W \left( e + h_o + \frac{L}{3} \right) \quad (3)$$

gdzie:  $H$  – głębokość wody [m],  
 $\rho_W$  – gęstość wody [ $\text{kg/m}^3$ ],  
 $C_D$  – współczynnik oporu optywu drzewa przez wodę [–],  
 $u$  – prędkość wody [m/s],  
 $S_Q$  – powierzchnia drzewa, na którą działa woda [ $\text{m}^2$ ],  
 $e$  – zagłębienie punktu obrotu bryły korzeniowej [m],  
 $\rho_P$  – gęstość powietrza [ $\text{kg/m}^3$ ],  
 $C_K$  – współczynnik oporu optywu drzewa przez powietrze [–],  
 $u_W$  – prędkość wiatru [m/s],  
 $S_W$  – powierzchnia drzewa, na którą działa wiatr [ $\text{m}^2$ ],  
 $h_o$  – wysokość pnia drzewa [m],  
 $L$  – długość korony drzewa [m].

Odporność na wywrócenie zależy od systemu korzeniowego rośliny, który jest charakterystyczny dla danego gatunku, oraz od rodzaju gruntu. Krytyczny moment wywrócenia drzewa ( $M_c$ ) opisano w literaturze równaniem [Proposed guidelines... 1994]:

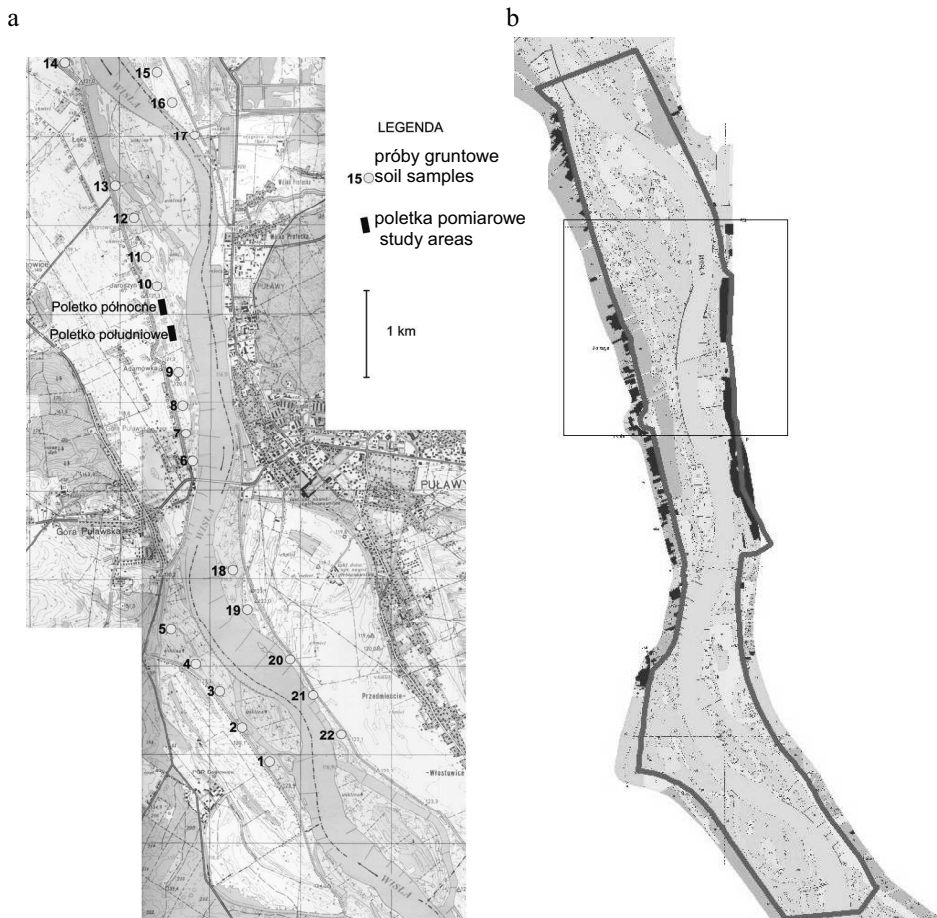
$$M_c = \alpha D^a \quad (4)$$

gdzie:  $a$ ,  $\alpha$  – stałe wyznaczone doświadczalnie; w Proposed guidelines... [1994] znaleźć można wartości tych stałych dla różnych gatunków drzew,  
 $D$  – pierśnica drzewa [m].

## CHARAKTERYSTYKA OBIEKTU BADAWCZEGO

Analizę stateczności drzewostanów przeprowadzono dla lasów łęgowych doliny Wisły w okolicy Puław. W dniu 4 sierpnia 2001 roku o godzinie 20.15 na tym terenie wystąpiła gwałtowna burza połączona z wicherą (prędkość wiatru przekraczała 15 m/s). Najwięcej zniszczeń w drzewostanach wicherą poczyniła na lewym brzegu Wisły na wysokości wsi Adamówka i Jaroszyn. Wystąpienie w dniu 4 sierpnia 2001 roku silnej wicherury zbiegło się z przejściem fali wezbraniowej na Wiśle, która w kulminacji w dniu 29 lipca 2001 roku osiągnęła na wodowskazie w Puławach stan 121,12 m n.p.m. Stan ten odpowiada przepływowi  $Q = 7650 \text{ m}^3/\text{s}$ , a więc wartości zbliżonej do wody stuletniej  $Q_{1\%} = 7520 \text{ m}^3/\text{s}$ . W dniu 4 sierpnia 2001 roku stan wody obniżył się do poziomu 118,36 m n.p.m.

Analizowany obiekt badawczy (rys. 2a) położony jest na puławskim odcinku Wisły środkowej, pomiędzy przekrojem km 367,47 (wieś Adamówka), a przekrojem km 376,95 (wieś Łęka). Na tym odcinku, oprócz budowli regulacyjnych, zlokalizowany jest także most drogowy (km 371,5) i port rzeczny (dawna baza PBW). W korycie głównym na wysokości brzegów wypukłych w sąsiedztwie ostróg tworzą się liczne wyspy. Brzegi, tereny zalewowe i wyspy pokryte są różnorodną roślinnością: łąkami, nieużytkami, krzewami i drzewami.



Rys. 2. Lokalizacja odcinka badawczego z planem rozmieszczenia punktów badawczych (a), wektoryzacja mapy użytkowania ziemi i pokrycia terenu (b)

Fig. 2. Localization of the research object together with the map of distribution of research points (a), vectorial map of land use and plant coverage (b)

## MATERIAŁY I METODY

Rozpoznanie przyrodnicze badanego odcinka Wisły uzupełniono informacjami zawartymi w opracowaniu Hydroprojektu w Warszawie [Ankiersztejn 2001]. W badaniach wykorzystano aktualne komplety map dla odcinka Wisły środkowej wykonane na zlecenie Regionalnego Zarządu Gospodarki Wodnej w Warszawie. W skład kompletu map w skali 1 : 10 000 wchodziły: mapy sytuacyjno-wysokościowe, mapy użytkowania ziemi i pokrycia terenu, kolorowe ortofotomapy sytuacyjno-wysokościowe. Dysponowano również 33 przekrojami hydrometrycznymi. Dla posterunku w Puławach posiadano aktualny operat hydrologiczny oraz informacje o sytuacji hydrologicznej podczas przejścia fali powodziowej na tym odcinku latem 2001 roku.

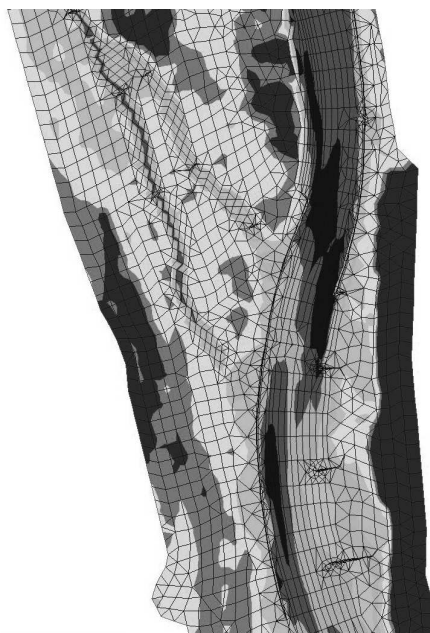
Rozpoznanie parametrów geotechnicznych podłoża obejmowało wiercenia i sondowania w 22 punktach, rozmieszczonych w miarę możliwości równomiernie po obu stronach Wisły (rys. 2b). Wszystkie punkty badawcze zlokalizowano na tej samej tarasie zalewowej, kierując się możliwością zbadania zmienności podłoża w obrębie tego samego elementu morfologicznego. Badania prowadzono do głębokości 2 m, przyjmując tę strefę podłoża za decydującą o stateczności drzew. Drugi etap prac badawczych zakładał szczegółowe rozpoznanie podłoża w rejonie, w którym zaobserwowano dużą liczbę wyrwconych drzew. Na niewielkim obszarze zlokalizowano 22 punkty badawcze, rozmieszczone w dwóch rejonach: południowym i północnym (rys. 2b).

## WYNIKI BADAŃ

Numeryczną mapę wektorową badanego odcinka Wisły stworzono za pomocą cyfrowej technologii fotogrametrycznej na podstawie wektoryzacji dostępnych materiałów kartograficznych oraz przekrojów hydrometrycznych, którą stworzono w systemie ArcViewGIS 3.2. Na rysunku 2, jako przykład procesu wektoryzacji, przedstawiono mapę użytkowania ziemi i pokrycia terenu badanego odcinka Wisły. Z uwagi na długość odcinka oraz skalę map przy omawianiu kolejnych etapów prac posłużono się wycinkiem map (prostokątna ramka na rys. 2), obejmującym szczególnie interesujący z punktu widzenia badań obszar, gdzie doszło do zniszczenia największej liczby drzew. Numeryczny model terenu wygenerowano w programie Tiegris, uwzględniając siatkę dla odnóg i starorzeczy oraz model terenów zalewowych i koryta głównego.

Kolejnym etapem było przygotowanie siatki obliczeniowej. Dla obszaru badań wygenerowano w programie Tiegris siatkę o bokach długości około 30 m. Wzdłuż osi koryta głównego szerokości 80 m wygenerowano siatkę elementów prostokątnych. Elementy na brzegach zostały zagęszczone. W celu poprawienia modelu w siatce obliczeniowej uwzględniono budowle regulacyjne – tamy podłużne oraz poprzeczki i ostrogi. Z mapy inwentaryzacyjnej budowli regulacyjnych przyjęto parametry budowli. Dane te wykorzystano w programie Tiegris do wygenerowania siatki elementów skończonych (rys. 3). Uzyskano numeryczny model terenu oraz siatkę obliczeniową, uwzględniającą obecność budowli regulacyjnych. Siatka składała się z 11 623 elementów opartych na 29 628 węzłach. Siatka miała charakter hybrydowy, składała się zarówno z elementów prostokątnych, jak i trójkątnych.

Ocenę szorstkości obszaru przepływu (zarówno koryta głównego, jak i terenów zalewowych) oparto na analizie rozmieszczenia różnorodnych zbiorowisk roślinnych [Ankiersztejn 2001], mapach użytkowania i pokrycia terenu, zdjęciach lotniczych oraz bezpośredniej wizji terenowej w czerwcu 2005 roku. Wydzielono 14 typów powierzchni. Opracowano numeryczną mapę typów roślinności. Na jej podstawie dokonano analizy badanego odcinka Wisły, określając udział poszczególnych rodzajów powierzchni. Całkowita powierzchnia odcinka badanego wynosiła około 8,23 km<sup>2</sup>, z czego przy stanach średnich Wisły, wody zajmowały 2,90 km<sup>2</sup> (co stanowiło 35%). Analizując formy użytkowania terenu, zwrócić można uwagę na dominujący udział zakrzaczeń – około 20%, oraz łąk i pastwisk – ok. 20,3%, w tym około 7% łąk i pastwisk zakrzaczonych lub z pojedynczymi drzewami.



Rys. 3. Numeryczny model terenu i siatka elementów skończonych dla Wisły w Puławach  
 Fig. 3. Digital Terrain Model and finite elements mesh for Vistula River nearby Puławy

Następnie każdemu elementowi siatki elementów skończonych przypisano zróżnicowane parametry szorstkości (tab. 1), opracowane na podstawie analizy przejścia fali wezbraniowej na tym odcinku Wisły w 1997 roku [Kałuża i Kuźniar 2002]. W ten sposób uzyskano numeryczny model szorstkości terenu. W wykazie rodzajów powierzchni wyodrębniono pas wody w obszarze mostu drogowego w Puławach z racji odmiennych cech hydraulicznych dna koryta na tym obszarze, wynikających z umocnień dna oraz obecności filarów mostowych. Istotnym elementem wpływającym na szorstkość jest obecność drzew i krzewów na terenach zalewowych oraz licznych wyspach występujących na tym terenie. Wpływ roślinności obliczono, uwzględniając zaproponowaną przez Lindnera [1982], a zmodyfikowaną przez Pasche [1984] zależność na współczynnik oporu roślinności ( $\lambda_V$ ):

$$\lambda_V = \frac{4hd_p}{a_x^2} c_{WR} \quad (3)$$

gdzie:  $h$  – głębokość przepływu,  
 $d_p$  – zastępcza średnica roślin,  
 $a_x$  – zastępcza rozstawa roślin,  
 $c_{WR}$  – bezwymiarowy współczynnik oporu dla opływu roślin.

Do obliczeń hydraulicznych zastosowano model Rismo [Schröder 1997], opracowany przez Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Rheinisch – Westfälische Technische

Tabela 1. Wydzielone typy szorstkości koryta wielkiej wody  
Table 1. Types of roughness floodplains

$n$ [m <sup>-1/3</sup> ·s]	$d_p$ [m]	$a_x$ [m]	Typy szorstkości – Types of roughness
0,018	0,00	0,00	koryto główne – main channel
0,020	0,00	0,00	piaski – sand
0,022	0,02	0,30	piaski i rzadka roślinność – sand with bushes
0,030	0,00	0,00	łąka czysta – meadow
0,030	0,50	5,00	łąka z drzewami i krzewami – meadow with trees and bushes
0,035	0,05	1,00	nieużytki z krzewami – barren with bushes
0,025	0,00	0,00	pole uprawne – cultivated area
0,030	0,50	3,00	sady i ogrody – orchard and garden
0,010	15,00	30,00	teren zabudowany – building area
0,010	0,00	0,00	drogi – road
0,030	0,35	5,00	zwarte drzewostany liściaste młodsze – compact, deciduous stand young
0,035	0,50	12,00	zwarte drzewostany liściaste starsze – compact, deciduous mature forest
0,035	0,50	12,00	zwarte drzewostany iglaste starsze – compact, coniferous mature forest
0,040	10,00	100,00	most – bridge

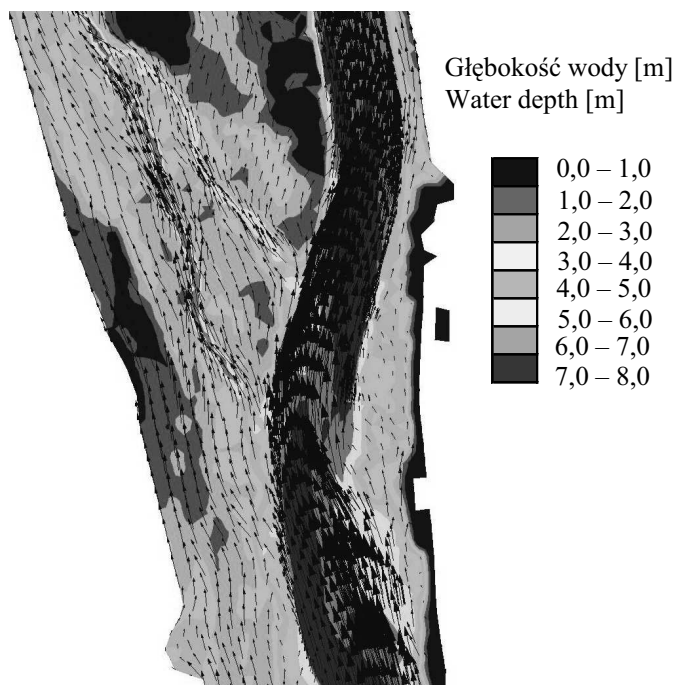
Hochschule Aachen, a obecnie rozwijany także przez firmę Valitec Aachen. Jest to dwuwymiarowy system modelowania wykorzystywany do symulacji przepływów nieustalonych o swobodnym zwierciadle wody. Moduł hydrodynamiczny programu bazuje na rozwiązaniu równań różniczkowych przepływu Naviera-Stokesa i równaniu ciągłości.

Jako warunki brzegowe zadawano w przekroju początkowym km 367,47 wartość przepływu, a w przekroju końcowym km 376,95 stany wody wyznaczone z krzywej natężenia przepływu. Do analizy przepływów nieustalonych przyjęto hydrogram fali powodziowej z lipca 2001 roku. Podstawowymi danymi wyjściowymi z modelu są stany wody, rozkłady prędkości przepływu w rzece i na terenach zalewowych oraz m.in. naprężenia przy dnie, wartości liczby Reynoldsa i Froude'a. Na rysunku 4 przedstawiono wyniki symulacji przepływu w postaci głębokości i rozkładu prędkości dla przepływu 7500 m<sup>3</sup>/s.

Do oceny stateczności drzewostanów wykorzystano model, zakładający wyrwanie drzewa wraz z korzeniami, który opracowano w Katedrze Budownictwa Wodnego i Katedrze Geotechniki Akademii Rolniczej w Poznaniu. Model ten udało się sprawdzić i wytarować na podstawie wartości wyznaczonych momentów krytycznych [Kałuża i Wierzbicki 2005]. Na podstawie wyników badań eksperymentalnych model uzupełniono zależnościami empirycznymi, pozwalającymi na uzyskanie rozwiązania przy wykorzystaniu charakterystyk drzew (gatunek drzewa, jego ciężar i pierśnica) oraz podstawowych parametrów geotechnicznych podłoża (kąta tarcia wewnętrznego i spójność). Tak opracowany model przyjmuje postać:

$$M_c = 12,832D^{1,3013} \cdot \frac{4,125D^{0,706} + D}{3} \cdot \left[ \frac{0,5 \operatorname{tg} \phi' \cdot Qb}{13,357D^{1,412}} + c_u \right] \quad (5)$$

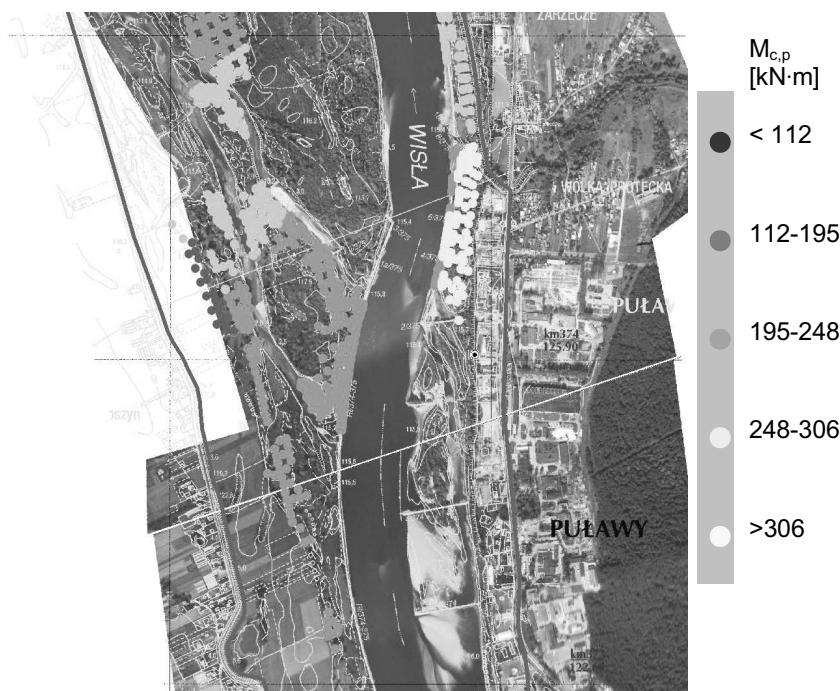
gdzie:  $M_c$  – moment krytyczny [kN·m],  
 $D$  – pierśnica [m],  
 $Q$  – ciężar drzewa [N],  
 $b$  – współczynnik empiryczny, zależny od gatunku drzew,  
 $\phi'$  – efektywny kąt tarcia wewnętrznego gruntu [°],  
 $c_u$  – spójność gruntu [kPa].



Rys. 4. Głębokości wraz z wektorami prędkości strumienia dla przepływu  $7500 \text{ m}^3/\text{s}$   
 Fig. 4. Water depth with the velocity vector for discharge  $7500 \text{ m}^3/\text{s}$

Opierając się na wynikach badań geotechnicznych, w programie ArcViewGIS 3.2 zbudowano numeryczny model zmienności parametrów wytrzymałości nawodnionych gruntów. Dane obejmowały zarówno parametry gruntu przy niskich stanach wody, jak i ich wartości przy długookresowym zalewie. Obszary występowania drzew oraz ich średnice przyjęto zgodnie z numerycznym modelem szorstkości terenu. Z równania (5) obliczono krytyczne momenty wywracające dla drzew z badanego odcinka Wisły w sytuacji przedłużającego się wezbrania powodziowego (rys. 5). W tabeli 2 zestawiono obliczone z równania (5) momenty krytyczne wybranych drzew na poletkach badawczych. Obliczenia wykonano w dwóch wariantach. Pierwszy obejmował wyznaczenie wartości momentów krytycznych przy niskich stanach wody ( $M_c$ ). Natomiast drugi uwzględniał zmianę parametrów podłoża pod wpływem wody ( $M_{c,P}$ ). Wyniki obliczeń potwierdzają obserwowany w naturze spadek wartości momentów krytycznych w wyniku działania wody (tab. 2).





Rys. 5. Rozkład wartości krytycznych momentów w badanym obszarze  
 Fig. 5. Distribution value of critical moment in investigate area

Tabela 2. Obliczone wartości krytycznych momentów dla wybranych drzew  
 Table 2. Evaluation value of critical moment for any tree

Lp. – No	Drzewo – Tree	$D$ [m]	$h$ [m]	$M_c$ [kN·m]	$M_{c,p}$ [kN·m]
1	<i>Populus</i>	0,8	25	1388	818
2	<i>Populus</i>	0,7	22	913	531
3	<i>Populus</i>	0,8	29	1582	1311
4	<i>Populus</i>	0,8	28	1582	1311
5	<i>Populus</i>	0,3	22	60	49
6	<i>Populus</i>	0,5	26	328	272
7	<i>Populus</i>	0,9	27	2017	1200
8	<i>Populus</i>	0,5	24	385	182
9	<i>Salix</i>	0,5	–	385	182
10	<i>Salix</i>	0,55	–	517	246

W celu zweryfikowania tezy o istotności wpływu parcia dynamicznego wody na stateczność drzewostanów obliczono także momenty wywracające drzew, dla parcia dynamicznego wody – według wzoru (2) i wiatru – według wzoru (3). Głębokości i prędkości na obszarze zalewowym określono z wyników obliczeń przepływu, wykonanych za pomocą programu Rismo. Na ich podstawie obliczono momenty wywracające na skutek działania parcia dynamicznego wody (rys. 6).



Rys. 6. Rozkład wartości krytycznych momentów na skutek działania parcia dynamicznego wody w badanym obszarze

Fig. 6. Distribution value of critical moment for effect of hydrodynamic pressure action in investigate area

W trakcie wichury głębokość wody na badanym obszarze była niewielka (miejscami wynosiła kilka centymetrów, a w najniższym punkcie 0,96 m – nie sięgała więc do konarów drzewa). Średnia głębokość wody była równa 0,5 m. Średnia prędkość wody w tym obszarze nie przekraczała 0,5 m/s. Maksymalne momenty sił, powstałe w wyniku działania wody, są niewielkie i nie przekraczają w pobliżu koryta głównego 9 kN·m, gdzie prędkości i głębokości są największe. Na wspomnianych wyżej poletkach badawczych, gdzie było szczególnie dużo wyrwanych drzew, momenty na skutek działania wody zmieniały się od 0,6 do 3,5 kN·m, były więc dużo mniejsze niż wartości momentów krytycznych.

Wykorzystując równanie (3), przeanalizowano również wpływ wiatru na tym terenie. W badaniach szczegółowo zajęto się zniszczonym drzewostanem na poletkach badawczych. Dominującym gatunkiem na badanym obszarze była odmiana topoli, pospolicie nazywana białodrzewiem, wysokości 25–30 m, oraz wierzby. Przeciętna średnica drzew na badanym obszarze wynosiła 0,7 m. Powierzchnie korony drzewa określono na podstawie wyskalowanych fotografii drzew sąsiadujących z drzewami wyrwanymi oraz wyników pomiarów terenowych indeksu ulistowienia LAI. Wysokość pnia aż do punktu rozgałęzienia korony ( $h_0$ ) wynosiła przeciętnie około 5 m. Zbadane wykroty po zwalonych drzewach pozwoliły określić wymiary bryły korzeniowej, która zajmowała średnicę 4–5 m oraz głębokość około 0,4 m. Wynikało to z płytkiego zalegania wody gruntowej (drzewa korzeniły

się tylko w warstwie przypowierzchniowej). W obliczeniach, wobec braku informacji o rzeczywistej maksymalnej prędkości wiatru (awaria automatycznej stacji meteorologicznej w Puławach), przyjęto wartość  $u_w = 20$  m/s, co odpowiada wiatrom I klasy według Klasyfikacji maksymalnych... [http:], nazywanych także wiatrami gwałtownymi. Współczynnik oporu ( $C_k$ ) zależy od gęstości struktury roślinnej. Przeciętnie przyjmować można wartości od 0,6 do 1,2. Jako przeciętny dla naturalnych struktur roślinnych [Proposed guidelines... 1994] przyjmuje się  $C_k = 0,7$ . Przy przyjętej gęstości powietrza  $1,29 \text{ kg/m}^3$  i powierzchni roślinnej wynoszącej  $S_w = h_0 d_p + \text{LAI}(\pi R^2)$ , gdzie  $R$  oznacza promień zasięgu gałęzi drzew (przeciętnie  $R = 3$  m), maksymalne momenty sił powstałe w wyniku działania wiatru obliczono ze wzoru (3):

$$M_W = \frac{1}{2} \cdot 1,29 \cdot 9,81 \cdot 0,7 \cdot 20^2 \cdot 24,7 \left( 0,4 + 5 + \frac{25}{3} \right) = 601 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

przy czym:

$$S_w = 5 \cdot 0,7 + 0,75 \cdot (\pi \cdot 3^2) = 24,7 \text{ m}^2$$

Obliczona wartość momentu wywracającego w wielu przypadkach przekracza krytyczne momenty utrzymujące dla wielu drzew z obszaru badawczego, dotyczy to zwłaszcza sytuacji długookresowego trwania wezbrania. Świadczy to o tym, że na skutek działania wiatru istotnie na badanym terenie mogło dojść do chwilowej (wywołanej gwałtowną burzą) utraty stateczności drzew porastających tereny zalewowe Wisły.

## PODSUMOWANIE

Na modelu numerycznym opartym na dwuwymiarowym modelu przepływu odtworzono warunki, w jakich doszło do zniszczeń drzewostanów łęgowych Wisły w okolicy Puław. Przeprowadzono ocenę parametrów wytrzymałościowych podłoża na tarasach zalewowych Wisły. Korzystając z danych hydrologicznych i meteorologicznych, wykonano symulację warunków, w jakich doszło do wywrócenia drzew. Na tej podstawie sprawdzono, czy przyjęty model stateczności można skorelować z rzeczywistymi rozmiarami zniszczeń drzewostanów.

Jak wynika z obliczeń, wartości momentów wywracających na skutek działania parcia dynamicznego wody można pominąć ze względu na niewielkie wartości w porównaniu do momentów wywołanych parciem wiatru. Wezbranie powodziowe wpływa głównie na zmianę parametrów wytrzymałościowych podłoża. Z tego względu istotnym czynnikiem dodatkowo intensyfikującym zniszczenia drzewostanów było wezbranie powodziowe na Wiśle, którego kulminacja przetoczyła się na badanym odcinku rzeki pięć dni wcześniej. Analizując hydrogram fali powodziowej z lata 2001 roku, zauważyć należy, iż drzewa na badanym obszarze, aż do wystąpienia wichury, były przez co najmniej dziewięć dni całkowicie podtopione (od 26 lipca do 4 sierpnia 2001 roku). W tym czasie mogło dojść do całkowitego wypełnienia wodą wszystkich porów gruntu oraz zmiany parametrów wytrzymałościowych w warstwie korzeniowej.

## PIŚMIENNICTWO

- Ankiersztejn I., 2001. Koncepcja programowo-przestrzenna zagospodarowania doliny i regulacji Wisły, odcinek puławski do ujścia Sanny do ujścia Pilicy (km 295–456). Charakterystyka stanu istniejącego (część opisowa). Maszynopis. Hydroprojekt, Warszawa.
- Hartge K.H., 1993. Ingenieurbilogie. Wurzelwerk Standsicherheit von Boscungen Hagen. Sepia Verlag Aachen.
- Kałuża T., Kuźniar P., 2002. Ocena warunków przepływu wód wielkich na odcinku Wisły Środkowej od Puław do Dębłina. Materiały XXII Ogólnopolskiej Szkoły Hydrauliki. Instytut Budownictwa Wodnego PAN, Gdańsk.
- Kałuża T., Wierzbicki J., 2005. Ocena momentu krytycznego podatności drzewostanów na ekstremalne czynniki hydro-meteorologiczne. Maszynopis. Katedra Budownictwa Wodnego, Akademia Rolnicza w Poznaniu, Poznań.
- Klasyfikacja maksymalnych prędkości wiatru w Polsce i ich skutki działania. [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)
- Lindner K., 1982. Der Strömungswiderstand von Pflanzenbeständen. Mitteilungen Leichtweiss – Institut für Wasserbau. Heft 75, Technische Universität Braunschweig.
- Pasche E., 1984. Turbulenzmechanismen in naturnahen Fließgewässern und die Möglichkeiten ihrer mathematischen Erfassung. Mitteilungen des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft. Heft 52, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen.
- Proposed guidelines on the clearing and planting of trees in rivers, 1994. River improvement and mangement division river bureau ministry of construction. Tokyo.
- Schröder P., 1997. Zur numerischen Simulation turbulenter Freispiegelströmungen mit ausgeprägt dreidimensionaler Charakteristik, Mitteilungen des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft, RWTH Aachen, Heft 108.

## THE APPLICATION OF A TWO-DIMENSIONAL FLOW PATTERN TO ASSESS WIND FIRMNESS OF RIPARIAN FOREST STANDS BASED ON THE VISTULA RIVER VALLEY NEAR PUŁAWY

**Abstract.** The study presents the application of a numerical model to analyze conditions under which tree stands may lose wind firmness. Using the ArcView software and a Rismo two-dimensional flow pattern model an application software was created to calculate critical holding moment values of trees. Riparian forests of the Vistula River valley near the town of Puławy were selected to verify the numerical model of tree stand wind resistance. Those forests were destroyed on August 4th, 2001 during a violent storm. The storm in the area of Puławy coincided with the passage of a flood wave on the Vistula River. On the selected stretch of the Vistula detailed measurements of tree and subsoil parameters were taken. Using hydrological and meteorological data it was possible to simulate conditions, under which wind falling occurred.

**Key words:** critical momentum, forest stand stability

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 22.02.2007