

EIN ANSATZ ZUR MODELLIERUNG VON VEGETATION FÜR GEBÄUDE- UND UMWELTAERODYNAMISCHE WIND- KANALUNTERSUCHUNGEN

AN APPROACH FOR MODELING OF VEGETATION FOR BUILDING- AND ENVIRONMENTAL WIND TUNNEL STUDIES

Gromke, Christof; Ruck, Bodo

Laboratorium für Gebäude- und Umweltaerodynamik, Institut für Hydromechanik,
Universität Karlsruhe, Kaiserstr. 12, 76128 Karlsruhe, Germany

**Vegetation, Bäume, Windkanal, LDA-Messungen, Umweltaerodynamik
Vegetation, Trees, Wind Tunnel, LDV-Measurements, Environmental Aerodynamics**

Zusammenfassung

Modellbäume für gebäude- und umweltaerodynamische Windkanaluntersuchungen wurden nach einem speziellen Modellierungsansatz, der eine Realisierung verschiedener Kronenporositäten erlaubt, hergestellt. Ziel war es, die Auswirkungen der Porosität auf den Strömungswiderstand und das Geschwindigkeitsfeld der Um- bzw. Nachlaufströmung zu untersuchen und die aerodynamischen Eigenschaften realer Bäume nachzubilden.

Die Ergebnisse der Widerstands- und Geschwindigkeitsmessungen zeigen keine ausgeprägten Abhängigkeiten vom Kronenporositätsgrad. Die Widerstandskoeffizienten der Modellbäume sind denen von Naturbäumen bei Windgeschwindigkeiten unter 10 m/s vergleichbar. Sämtliche Strömungsgrößen der Nachlaufgebiete besitzen die typischen Charakteristiken durchströmter poröser Körper mit im Vergleich zu nicht-porösen Strukturen weiter stromab ausgedehnten Nachlaufgebieten.

Die Ergebnisse legen den Widerstandsbeiwert als eine grundlegend bestimmende Ähnlichkeitszahl für die kleinskalige strömungsmechanische Modellierung nahe. Der Modellierungsansatz zeigt sich geeignet, poröse Vegetationsstrukturen wie Bäume oder Sträucher für den Einsatz in gebäude- und umweltaerodynamischen Windkanaluntersuchungen nachzubilden, sofern keine Starkwindsituationen vorliegen. Beispiele hierfür sind Untersuchungen zum Windkomfort, zur Schadstoffausbreitung und Deposition luftgetragener Partikel, zur Ausbreitung von Waldbränden sowie zu Austauschprozessen skalarer Größen wie Feuchte, Wärme und biogenen Emissionen zwischen Waldbeständen und der Atmosphäre.

Einleitung

In der Gebäude- und Umweltaerodynamik werden Wechselwirkungen zwischen Wind und Struktur in der atmosphärischen Grenzschicht behandelt. Typische Fragestellungen betreffen die Windbelastung auf Gebäude oder Ingenieurtragwerke, die Ausbreitung, den Austausch und die Deposition von Schadstoffen, den Windkomfort sowie Fragen der Sturmstabilität von Vegetationsflächen unterschiedlicher Art. Zur Klärung dieser Sachverhalte werden häufig Windkanaluntersuchungen durchgeführt, die eine auf Ähnlichkeitskriterien beruhende Nachbildung der Untersuchungsgegenstände erfordern. Während die ähnlichkeitsgerechte Model-

lierung von Gebäuden und Ingenieurtragwerken in der Vielzahl der Fälle unproblematisch ist, bestehen bei der Nachbildung von Vegetationsstrukturen wie Bäumen oder Sträuchern Ungewissheiten. Diese liegen vor allem in der Porosität und der damit verbundenen Windpermeabilität dieser Strukturen begründet, deren aerodynamische Eigenschaften sich signifikant von denen nicht-poröser Körper unterscheiden und weit weniger verstanden werden.

Modellbäume

Die Modellbaumkronen wurden aus Materialien von bänder- bzw. fadenartiger Morphologie zu einem porösen Geflecht zusammengesetzt. Als Materialien dienten Holzwollestreifen (bänderartig) und Sisalgrasfasern (fadenartig) die in ein Baumgrundgerüst eingebracht wurden (Abb. 1). Der Porositätsgrad wurde durch Variation der Packungsdichte, d.h. durch Einbringen unterschiedlicher Mengen kronenbildenden Materials in ein definiertes Kugelvolumen, verändert. Des Weiteren wurde eine kugelförmige Modellbaumkrone aus Schaumstoff 10 ppi (10 pores per inch) mit 97 % Porenvolumenanteil und zu Vergleichszwecken eine unporöse Modellbaumkrone aus Styropor angefertigt.



Abb. 1: Modellbäume (v.l.n.r.: Baumgrundgerüst, Holzwollebaum, Sisalgrasbaum, Schaumstoffbaum).

In Tab. 1 ist ein Überblick zu den untersuchten und hier behandelten Modellbäumen gegeben. Weitere Untersuchungen an zusätzlichen Modellbäumen finden sich in Gromke und Ruck 2008. Es sei darauf hingewiesen, dass die Menge bzw. Masse des in das Baumgrundgerüst eingebrachten Materials bei den Holzwollebäumen um den Faktor 3 und bei den Sisalgrasbäumen um den Faktor 1.6 zwischen den Extremfällen mit minimaler und maximaler Packungsdichte variiert.

Nr.	Material	Masse [g]	Kronendurchmesser D [dm]	Packungsdichte PD [g/l]
1	Baumgrundgerüst	-	0.8	0.0
2	Holzwolle	1.3	0.85	4.0
3	Holzwolle	2.5	0.85	7.8
4	Holzwolle	3.9	0.85	12.1
5	Sisalgras	3.6	0.9	9.4
6	Sisalgras	4.4	0.9	11.5
7	Sisalgras	5.6	0.9	14.7
8	Schaumstoff	-	0.6	-
9	Styropor	-	0.7	-

Tab. 1: Übersicht und Daten zu den Modellbäumen.

Der Stammdurchmesser beträgt in allen Fällen 0.4 cm, die astfreie Stammhöhe der Holzwollebäume 3 cm, der Sisalgrasbäume 2.5 cm und des Schaumstoff- bzw. Styroporbaumes

4 cm. Die Modellbäume sind relativ starr und zeigten keine geschwindigkeitsbedingten Verformungen bei den Windkanalversuchen.

Windkanal und Messtechnik

Die Widerstandsmessungen wurden in einem Windkanal Göttinger Bauart bei gleichförmiger, relativ turbulenzarmer Anströmung ($I < 3\%$) durchgeführt, die Geschwindigkeitsmessungen erfolgten in einem speziell für umweltaerodynamische Untersuchungen ausgestatteten Windkanal mit Grenzschichtanströmung. Der Hintergrund hierfür ist, dass die in der Literatur zu findenden Widerstandsbeiwerte von Naturbäumen bei gleichförmiger Anströmung ermittelt wurden und somit als Vergleichsgrundlage ebenfalls eine solche Anströmung bei den Modelluntersuchungen erfordern. Im Hinblick auf eine aussagekräftige Modellbaumum- und Nachlaufströmung ist aber eine naturähnliche Grenzschichtanströmung von Interesse, weshalb die Geschwindigkeitsfelduntersuchungen in einem atmosphärischen Grenzschichtwindkanal durchgeführt wurden. Die Vertikalprofile der Horizontalgeschwindigkeit $u(z)$ und Turbulenzintensität $I_u(z)$ der vorliegenden simulierten Grenzschicht lassen sich durch Potenzansätze beschreiben, mit

$$\frac{u(z)}{u(z_{ref})} = \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^\alpha \quad (1)$$

$$\frac{I_u(z)}{I_u(z_{ref})} = \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^{-\alpha_I} \quad (2)$$

wobei $z_{ref} = 0.1$ m, $u(z_{ref}) = 9.0$ ms⁻¹, $\alpha = 0.22$, $I_u(z_{ref}) = 18.3\%$ und $\alpha_I = 0.19$. Detailliertere Angaben zur Grenzschichtsimulation- und Anströmung sind in Frank und Ruck 2005 sowie in Ikhwan und Ruck 2006 dokumentiert.

Zur Bestimmung der Widerstandsbeiwerte c_d kam eine mechanisch basierte Messeinrichtung zum Einsatz, deren Funktionsfähigkeit in Gromke und Ruck 2008 validiert wurde. Die Geschwindigkeitsmessungen wurden mit einem 2D LDA System durchgeführt. Als Laserlichtquelle kam ein Argon-Ionen-Laser mit einer Leistung von 4 Watt zum Einsatz. Das LDA-System arbeitet im Zweistrahlverfahren mit Vorwärtsstreuung. Über Doppel-Braggzellen werden den Laserstrahlen Frequenzverschiebungen aufgeprägt und somit eine Richtungsdiskriminierung der Strömung im Messvolumen ermöglicht. Das Streulicht wird von Photomultipliern detektiert. Die Datenauswertung erfolgt mit TSI Signalprozessoren (Modell IFA 550). Für den Streuprozess erforderliche Partikel mit einem Durchmesser von 1-2 μ m wurden durch Verdampfen und anschließendes Kondensieren von 1,2-Propandiol ($\rho_{SATP} = 1.04$ kg/l) erzeugt. Untersuchungen zum Teilchenfolgevermögen von Ruck 1990 ergaben das bei dem vorliegenden Dichteverhältnis von Partikel zu Trägerfluid ein ideales Teilchenfolgevermögen, definiert über das Amplitudenverhältnis von $\eta = 0.99$, bis zu einer Grenzfrequenz von etwa 1500 Hz vorliegt.

Messergebnisse und Diskussion

Widerstandsmessungen

Die Widerstandsmessungen wurden bei Anströmungsgeschwindigkeiten zwischen 5 m/s $< u < 14$ m/s durchgeführt. Aus den gemessenen Widerstandskräften wurden die Widerstandsbeiwerte c_d gemäß

$$c_d(u) = \frac{2F_{W,mess}(u)}{\rho u^2 A_{ref}(u)} \quad (3)$$

mit $F_{W,mess}$ - gemessene Widerstandskraft, ρ - Dichte der Luft, A_{ref} - projizierte Kronenfrontalfläche, berechnet. Im untersuchten Geschwindigkeitsbereich traten keine Verformungen an den Modellbäumen auf, so dass für $A_{ref}(u) = const$ gilt.

Die Widerstandsbeiwerte c_d der Modellbäume weisen nahezu konstante, von der Anströmungsgeschwindigkeit u unabhängige Verläufe auf (Abb. 2). Die Beiwerte der Holzwollebäume liegen i. d. R. über denen der Sisalgrasbäume. Es zeigt sich kein signifikanter Einfluss der Kronenporosität bzw. Packungsdichte auf den Widerstand der Modellbäume. Obwohl die Packungsdichte bei den Holzwolle- und Sisalgrasbäumen um den Faktor 3 bzw. 1.6 variiert, treten kaum Unterschiede in den Widerstandsbeiwerten auf. Systematische Abhängigkeiten, wie eine kontinuierliche Zu- oder Abnahme der c_d -Werte mit höherer Packungsdichte lassen sich nicht erschließen. Die Beiwerte des porösen Schaumstoffbaums liegen zwischen denen der Sisalgras- und Holzwollebäume. Auffällig ist jedoch die große Differenz der bestückten Modellbäume zum Baumgrundgerüst und zum unporösen Styroporbaum.

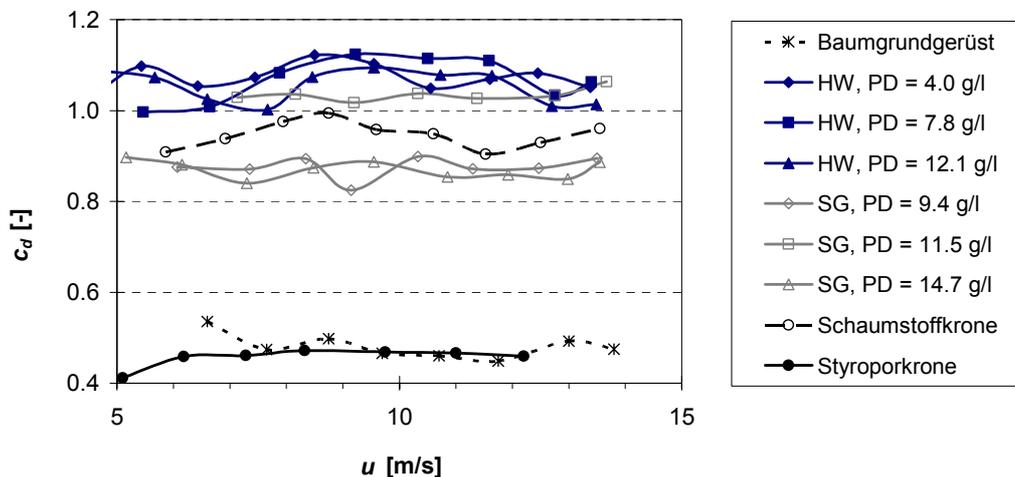


Abb. 2: Widerstandsbeiwerte c_d der Modellbäume (HW: Holzwolle, SG: Sisalgras).

Die höheren Widerstandsbeiwerte der porösen Modellbäume sind durch deren größere volumenspezifische Oberfläche bedingt. Daraus resultieren nun nicht mehr zu vernachlässigende Reibungswiderstände, die zusammen mit dem Form- bzw. Druckwiderstand den Gesamtwiderstand ergeben. Die weitgehende Unabhängigkeit der Widerstandsbeiwerte von der Kronenporosität (Packungsdichte) ist auf den so genannten Schutzeffekt zurückzuführen. Ein Großteil des Kronenmaterials befindet sich im Windschatten vorgelagerter Krongenelemente. Durch deren Schutz sind sie nicht mehr der direkten Anströmung ausgesetzt. Untersuchungen von Mayhead 1975 an Naturbäumen zeigten erst bei Kronenausdünnungen von mehr 50 % eine merkliche Veränderung in den Widerständen.

Ein Vergleich zu Widerstandsbeiwerten von Naturbäumen in Abb. 3 (Laub- und Nadelbäume) zeigt eine Übereinstimmung bis zu Geschwindigkeiten von etwa 10 m/s (Ruck 2008, Rudnicki et al. 2004, Vollsinger et al. 2005). Bei höheren Anströmungsgeschwindigkeiten kommt es bei Naturbäumen aufgrund deren Flexibilität zu einer Kronenkompaktierung und Inwindausrichtung (streamlining) des gesamten Baumes sowie seiner einzelnen Elemente, die zusammen in einer Abnahme der Widerstandsbeiwerte resultieren. In Abb. 3 sind dynamische Widerstandsbeiwerte $c_{d,dyn}$ aufgetragen, d.h. es werden die Verformungen der projizierten Kronenfrontalfläche $A_{ref}(u)$ aufgrund der Kronenkompaktierung in Abhängigkeit von

der Anströmungsgeschwindigkeit u gemäß Gl. (3) berücksichtigt. Da die Reduzierung der Frontfläche infolge einer Kronenkompaktierung bei kleinen Anströmungsgeschwindigkeiten gering ist, können die dynamischen Widerstandsbeiwerte zum Vergleich mit den (statischen) Widerstandsbeiwerten c_d der Modelnbäume (Abb. 2) herangezogen werden.

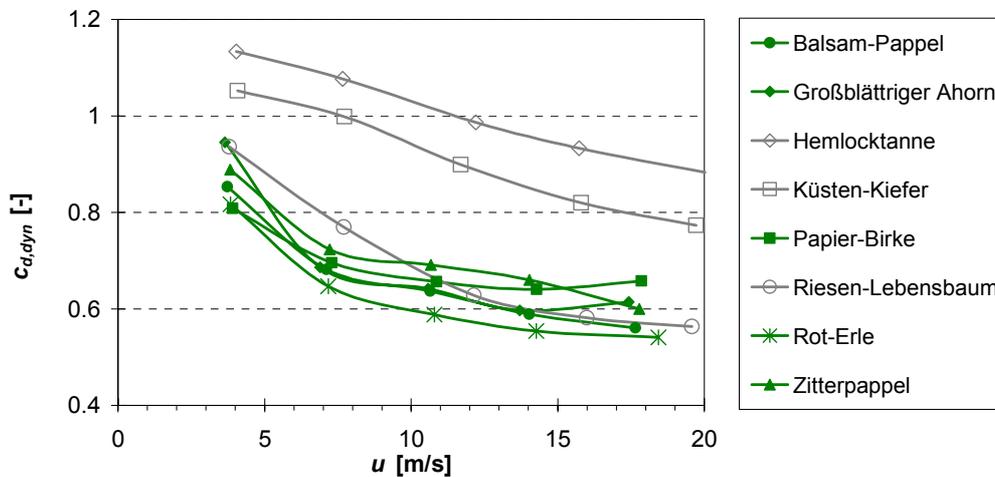


Abb. 3: Widerstandsbeiwerte $c_{d,dyn}$ von Naturbäumen (Rudnicki et al. 2004, Vollsinger et al. 2005).

Geschwindigkeitsmessungen

2D-LDA Messungen der Horizontal- und Vertikalgeschwindigkeitskomponente (u , w) wurden in der vertikalen, anströmungsparallelen x - z Ebene durch die Modellbaummitte durchgeführt. Das Strömungsfeld wurde mit einer Frequenz von 500 Hz bei simultaner Erfassung beider Komponenten abgetastet. Die Messzeit betrug 54 s und wurde auf Grundlage des integralen Längenmaßes L_{ux} der ungestörten Anströmung sowie der charakteristischen Wirbelablösefrequenz am Strömungshindernis Modellbaum festgelegt. Das integrale Längenmaß in Höhe der Baumoberkante z_{BO} wurde zu $L_{ux}(z_{BO}) = 0.2$ m ermittelt. Die mittlere Strömungsgeschwindigkeit, mit der die integralen Längenmaßböen in dieser Höhe advektiv transportiert werden, beträgt nach Gl. (1) $u(z_{BO}) = 9.5$ m/s. Daraus ergibt sich eine charakteristische Böenereigniszeit von 0.021 s bzw. Böenfrequenz von 47.5 Hz. Die Wirbelablösefrequenz an den Kugelkronen kann über die Strouhalbeziehung mit dem Kronendurchmesser und der Anströmungsgeschwindigkeit in halber Kronenhöhe als charakteristischen Eingangsgrößen zu 15 Hz abgeschätzt werden. Die Integrationszeit umfasst somit über 2500 charakteristische Anströmungsböenereignisse und mehr als 800 charakteristische hindernisbewirkte Ablöseereignisse, womit ausreichende Mittelungsgrundlagen gegeben sind.

Die Geschwindigkeitszeitreihen beider Komponenten wurden hinsichtlich der mittleren und fluktuierenden Strömungsanteile (Abb. 4 bzw. Abb. 5) sowie der Summe der quadrierten Schwankungsanteile ($u'^2 + w'^2$) als Maß für die kinetische Energie der Turbulenz ausgewertet (Abb. 6). Sämtliche Strömungsfeldgrößen wurden auf die ungestörte Anströmungsgeschwindigkeit in Baumoberkante $u(z_{BO})$ und die Längenabmaße mit dem Kronendurchmesser D normiert. Weitere Zeitreihenanalysen und Darstellungen der Schubspannungsgeschwindigkeit ($u'w'$), den Stromlinien und der spektralen Verteilung der kinetischen Energie finden sich in Gromke und Ruck 2008.

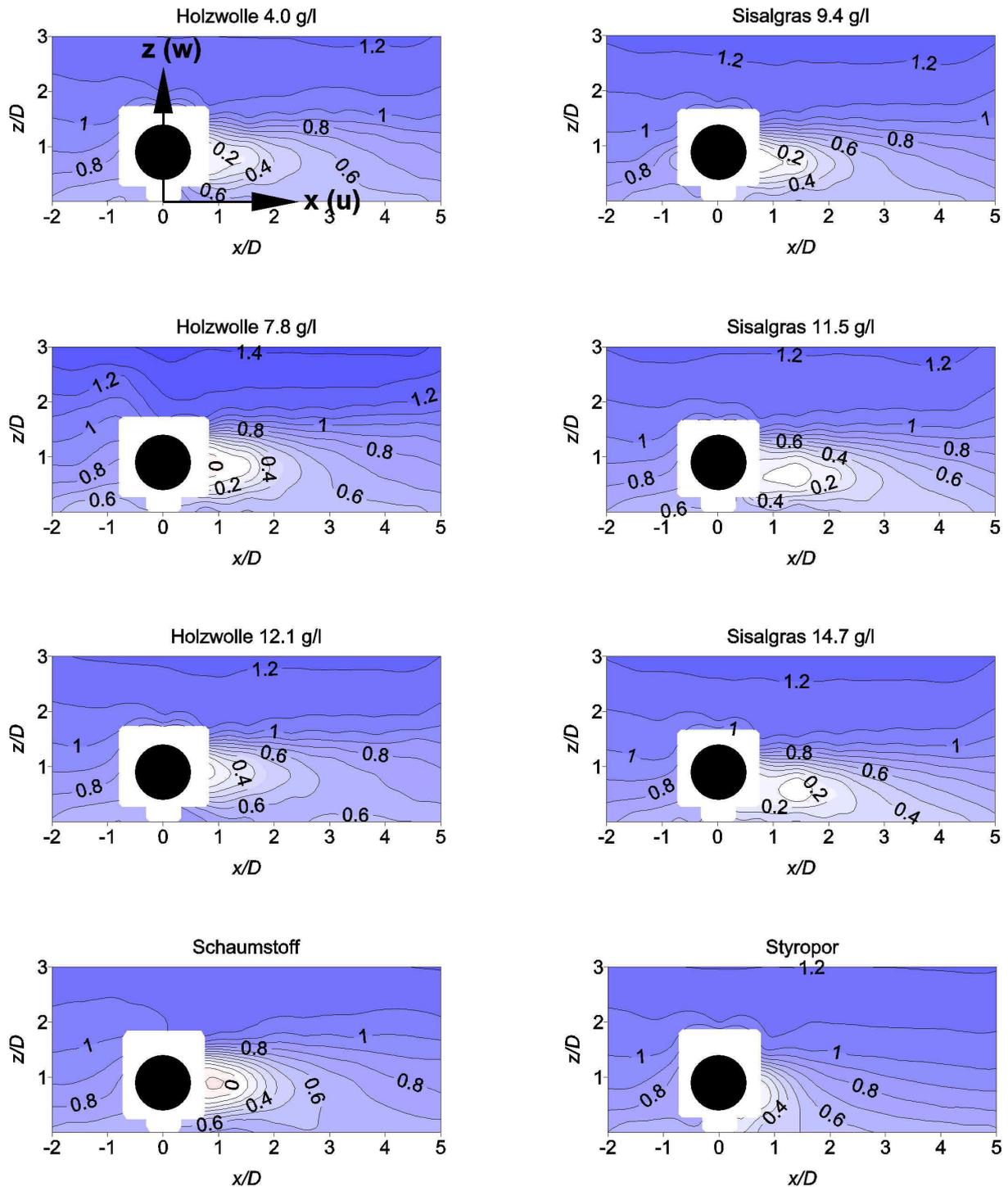


Abb. 4: Normierte Horizontalgeschwindigkeiten $u^+ = u/u(z_{B0})$.

Die Konturbilder der normierten Horizontalgeschwindigkeiten u^+ (Abb. 4) zeigen, dass allenfalls nur kleine Rezirkulationszonen ($u^+ < 0$) im unmittelbaren Lee der Kronen vorhanden sind. Signifikante Einflüsse des Porositätsgrades (Packungsdichte) auf die Strömungsnachlauffelder der porösen Modellbäume können nicht festgestellt werden. Obwohl die Packungsdichte bei den Holzwollebäumen um den Faktor 3 verschieden ist, sind nur minimale Abweichungen in den u^+ Konturbildern erkennbar. Im Gegensatz dazu können jedoch deutliche Unterschiede zum Nachlaufströmungsfeld des unporösen Styroporbaumes festgestellt werden. Hier ist bereits nach einer Lauflänge von etwa $3 D$ die Rückkehr zur ungestörten

Anströmung abgeschlossen, wohingegen bei den porösen Modellbäumen dies im Abstand $5 D$ noch nicht der Fall ist. Ähnliche Ergebnisse waren auch von Gross 1987 gefunden worden. Seine numerischen Untersuchungen zur Einzelbaumumströmung zeigten Strömungsfelder die hinsichtlich der Horizontalgeschwindigkeitskomponente noch im Abstand von 4 Kronendurchmessern D Abweichungen zur ungestörten Anströmungssituation aufwiesen. Die Geschwindigkeitsfelder bei der Umströmung einer Zuckerhutfichte von Ruck und Schmidt 1986 bzw. Ruck und Adams 1991 weisen auch noch am Ende des erfassten Messbereichs bei $2.5 D$ eine stark hindernisbeeinflusste Nachlaufströmung auf.

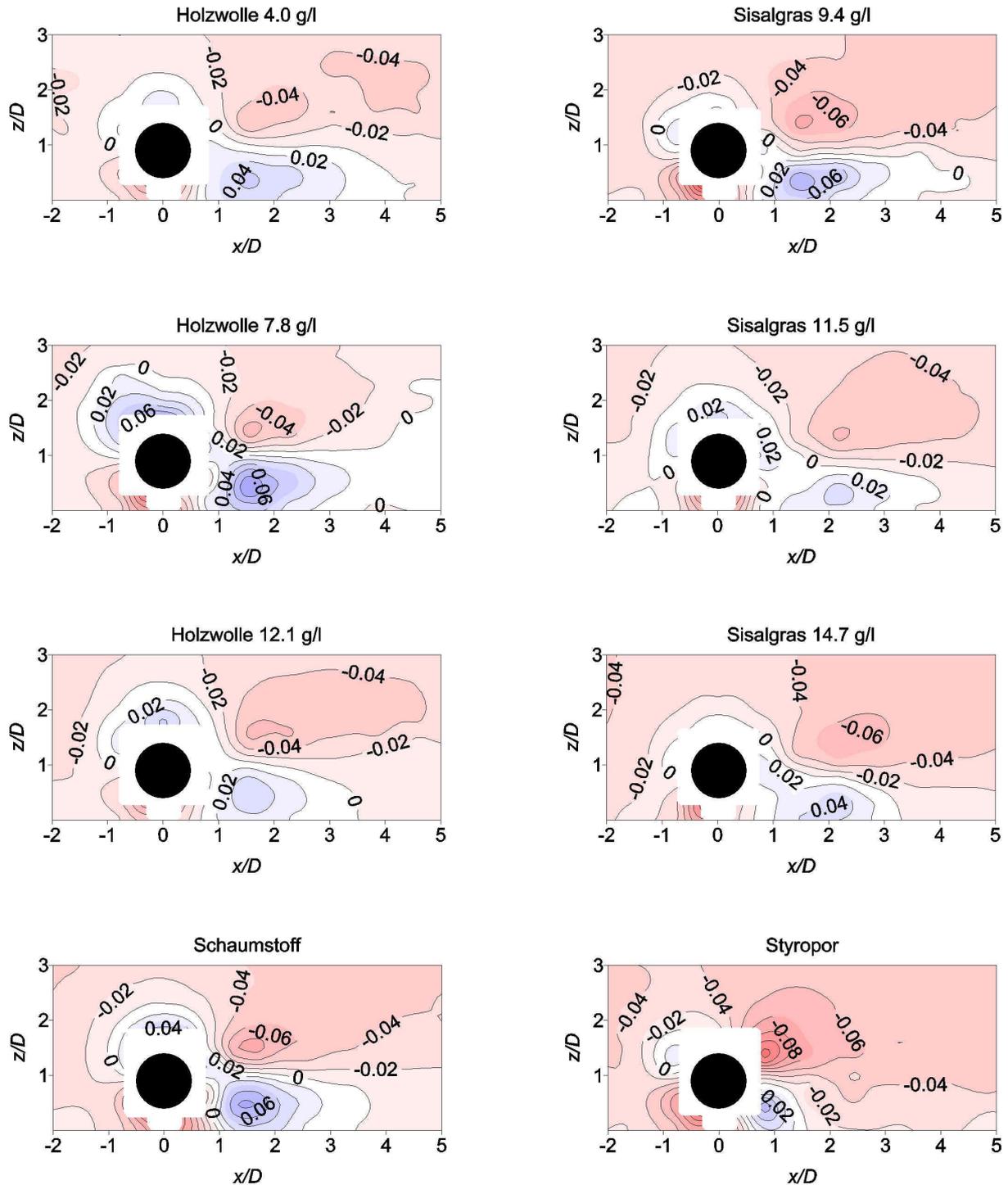


Abb. 5: Normierte Vertikalgeschwindigkeiten $w^+ = w/u(z_{B0})$.

In den Konturbildern der normierten Vertikalgeschwindigkeiten w^+ (Abb. 5) sind große Gebiete positiver bzw. negativer Vertikalgeschwindigkeiten im direkten Luv- und Leebereich der Kronen vorhanden. Im Vergleich zum unporösen Styroporbaum sind die Zonen nicht verschwindender Vertikalkomponente im Hindernisnachlauf wesentlich weiter stromab gedehnt und zudem von der Modelbaumkrone räumlich abgetrennt. Auch in den zuvor bereits genannten Untersuchungen von Gross 1987, Ruck und Schmidt 1986 sowie Ruck und Adams 1991 sind große, hindernisabgelöste Gebiete mit Vertikalbewegungen im Lee der Bäume vorhanden.

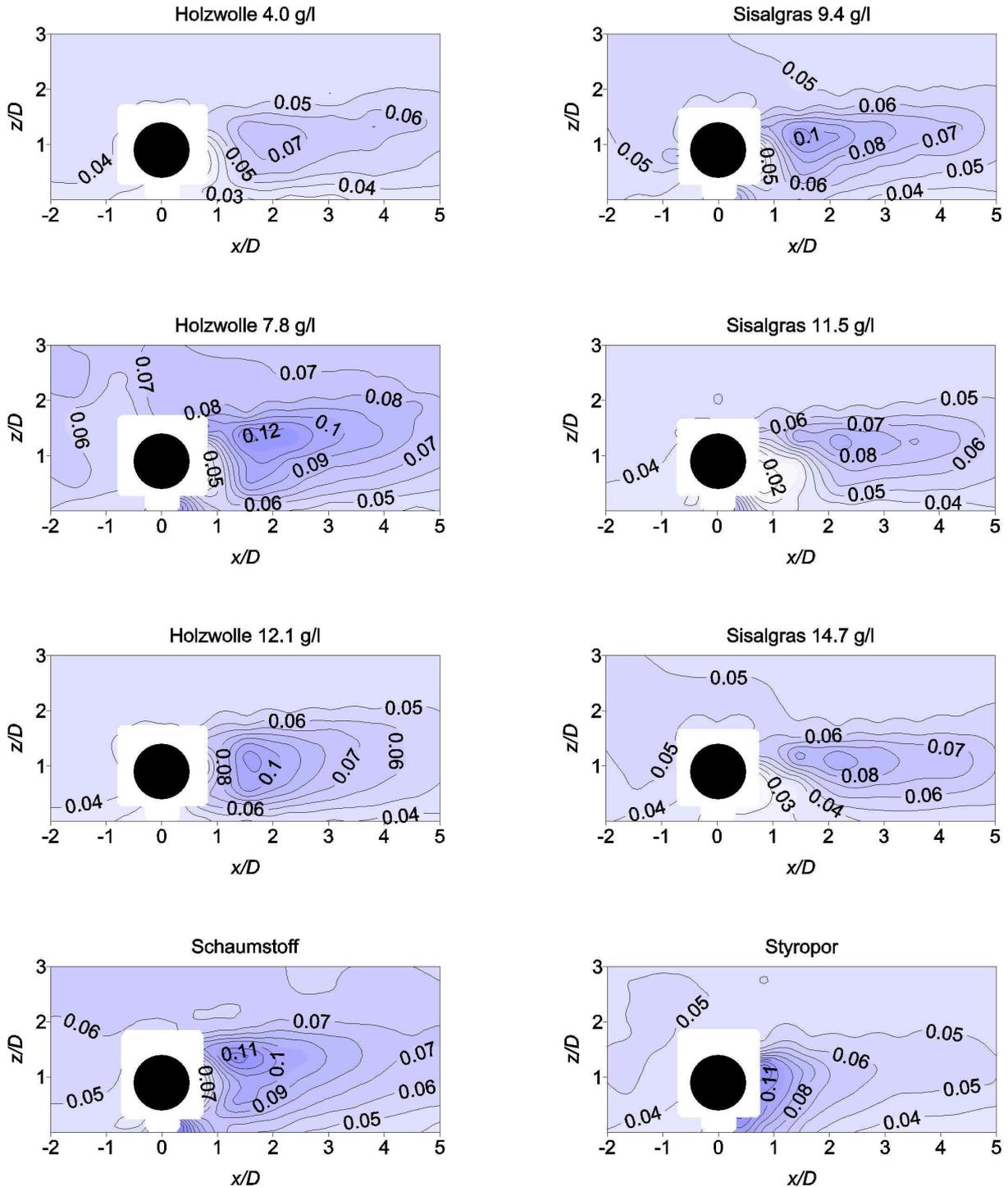


Abb. 6: Normierte Maße für die turbulente kinetische Energie $tke^+ = (u^2 + w^2) / u^2(z_{BO})$.

Die Konturbilder von Abb. 6 zeigen die Verteilung von $(u^2 + w^2)^+$ als Maß für die kinetische Energie der Turbulenz. Leeseitig der porösen Kronen sind im Vergleich zur unporösen Styroporkrone große, ausgedehnte Gebiete mit erhöhter turbulenter kinetischer Energie vorhanden. Deren Schwerpunkte befinden sich etwa auf Höhe der Baumoberkante z_{OB} bzw. leicht darunter. Aufgrund der großen Horizontalgeschwindigkeitsgradienten $\partial u/\partial z$ in diesem Bereich (Abb. 4) findet hier auch eine verstärkte Produktion turbulenter kinetischer Energie statt. Weiterhin legen die Konturbilder in Abb. 6 auch eine erhöhte Produktion turbulenter kinetischer Energie im bodennahen Bereich unmittelbar unterhalb Kronen nahe. Ähnliche Verteilungen der turbulenten kinetischen Energie im Strömungsnachlauf mit maximalen Werten im Bereich der Baumoberkante wurden auch von Ruck und Schmidt 1986 bei den Untersuchungen an der Zuckerhutfichte gefunden.

Die Abbildungen der Strömungsfeldgrößen (Abb. 4 - Abb. 6) zeigen deutlich größere Ausmaße der hindernisbeeinflussten Nachlaufgebiete bei porösen Modellbäumen gegenüber dem unporösen Styropormodellbaum. Die Durchströmung der porösen Kronen wirkt der leeseitigen Konvergenz der den Baum umströmenden Luftmassen entgegen. Dadurch bleiben vom Hindernis hervorgerufene Störungen länger präsent und werden weiter stromab transportiert.

Ähnlichkeitsbetrachtungen

Der Widerstandsbeiwert stellt eine grundlegend bestimmende Ähnlichkeitskennzahl bei der kleinskaligen aerodynamischen Modellierung von Bäumen, oder allgemeiner Vegetationsstrukturen, dar. Sämtliche Modellbäume mit poröser Krone besitzen trotz großer Variationen in Packungsdichte und Morphologie des kronenbildenden Materials annähernd gleiche Widerstandskoeffizienten und ähnliche Um- sowie Nachlaufströmungsfelder. Da jedoch die Bandbreite der Widerstandsbeiwerte relativ schmal ist, ermöglichen die Untersuchungsergebnisse keinen Beweis im strengen Sinne. Dennoch, die Relevanz des Widerstandsbeiwertes für die kleinskalige strömungsmechanische Modellierung von Vegetationsstrukturen ist offensichtlich. Der Widerstandsbeiwert stellt ein Maß für die Impulsextraktion aus der Strömung dar. Das Impulsdefizit und die durch das Hindernis eingebrachten Störungen in den Strömungsnachlauf werden bei maßstäblich angepasster Geometrie in einer integralen Betrachtung folglich korrekt skaliert.

Weiterhin ergaben die Untersuchungen, dass die Hindernisporosität unerlässlich, der Grad der Porosität und der innere Aufbau der porösen Struktur aber nicht entscheidend für die Ausbildung der Strömungsgrößen im Nachlauf sind. Die typischen Charakteristiken durchströmter poröser Körper mit im Vergleich zum nicht-porösen Pendant weiter stromab ausgedehnten Nachlaufgebieten wurden von allen porösen Modellbäumen generiert.

Die Zusammenfassung beider o. a. Aspekte resultiert in folgendem Fazit: Für die ähnlichkeitgerechte Modellierung von Vegetation ist somit zum einen auf die Einhaltung der Widerstandsbeiwertähnlichkeit und zum anderen auf eine porös geartete Ausbildung der Modellstruktur zu achten.

Dankesworte

Die Autoren bedanken sich bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG für die finanzielle Unterstützung (Ru 345/28). Herrn M.Sc. Tushar Kanti Guha sei gedankt für die Unterstützung während der Messungen und Frau Dr.-Ing. Cornelia Frank für die Bereitstellung ihrer Daten von Naturbaumwiderstandsbeiwerten.

Literatur

- Frank, C., Ruck, B., 2005: "Double-Arranged Mound-Mounted Shelterbelts: Influence of Porosity on Wind Reduction between the Shelters", *Environmental Fluid Mechanics*, Vol. 5, pp. 267-292
- Gromke, C., Ruck, B., 2008: "Aerodynamic modeling of trees for small scale wind tunnel studies", *Forestry, Special Issue: Wind and Trees*
- Gross, G., 1987: "A numerical study of the air flow within and around a single tree", *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 40, pp. 311-327
- Ikhwan, M., Ruck, B., 2006: "Flow and pressure field characteristics around pyramidal buildings", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 94, pp. 745-765
- Mayhead, G.J., Gardiner, J.B.H., Durrant, D.W., 1975: "Physical properties of conifers in relation to plantation stability", Forestry Commission, Edinburgh, unpublished report
- Ruck, B., Schmidt, F., 1986: "Das Strömungsfeld der Einzelbaumumströmung – Abschätzung von Depositionswahrscheinlichkeiten für Feinsttröpfchen", *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, Vol. 105, pp. 178-196
- Ruck, B., Adams, E., 1991: "Fluid mechanical aspects of the pollutant transport to coniferous trees", *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 56, pp. 163-195
- Ruck, B., 2008: "Lecture notes on environmental aerodynamics", University of Karlsruhe, www.umweltaerodynamik.de
- Rudnicki, M., Mitchell, S.J., Novak, M.D., 2004: "Wind tunnel measurements of crown streamlining and drag relationships for three conifer species", *Canadian Journal of Forest Research*, Vol. 34, pp. 666-676
- Vollsinger, S., Mitchell, S.J., Byrne, K.E., Novak, M.D., Rudnicki, M., 2005: "Wind tunnel measurements of crown streamlining and drag relationships for several hardwood species", *Canadian Journal of Forest Research*, Vol. 35, pp. 1238-1249