

STRÖMUNGSMUSTER IM BEREICH VON WALDRÄNDERN

M. Zschke*, B. Ruck

Laboratorium für Gebäude- und Umweltaerodynamik, Institut für Hydromechanik, Universität Karlsruhe,
Kaiserstr. 12, 76228 Karlsruhe

*Graduiertenkolleg Naturkatastrophen

Zusammenfassung

Die Strömung über eine Waldkante wurde in einem atmosphärischen Windkanal simuliert. Besondere Aufmerksamkeit wurde dabei den Extrembelastungen gewidmet, die im Falle eines Starkwindes zu Windwurf führen können. Mit Hilfe einer *conditional sampling* - Methode wurde der Einfluss instationärer Böenbelastungen auf den Impulseintrag in das Modell untersucht. Es war festzustellen, dass auf die windberuhigte Zone unmittelbar hinter der Vorderkante ein Bereich starker Spitzenbelastungen folgt, die mit dem Auftreten bereits vor der Kante vorhandener Wirbelstrukturen zusammenhängen.

Einleitung

Der Übergang von einer wenig bewachsenen bzw. bebauten Fläche zu einem bewaldeten Gebiet stellt aus aerodynamischer Sicht nicht nur einen Rauigkeitssprung dar, sondern ist auch mit starken Druckgradienten und Vertikalkomponenten der Strömung verbunden, die durch die Hinderniswirkung der vordersten Bäume ("Traufkante") provoziert werden. Hinsichtlich der Belastung der Bäume lässt sich der Wald hinter der Traufkante grob in folgende Zonen unterteilen:

- I) Die Bäume unmittelbar an der Kante sind dem Wind frontal ausgesetzt und werden extrem belastet. Sie überstehen Stürme in der Regel aber aufgrund ihrer widerstandsfähigeren Physiologie (Fritzsche 1933).
- II) Es folgt ein weniger belasteter Bereich mit vergleichsweise geringen Windgeschwindigkeiten im Inneren des Waldes. Nach oben hin wird dieser beruhigte Bereich durch eine noch wenig entwickelte Scherschicht von der beschleunigten freien Strömung über dem Wald abgegrenzt.
- III) Weiter stromabwärts entwickelt sich die Scherschicht und der erhöhte Impulstransport nach unten führt zu höheren Belastungen und zur Beschleunigung der Strömung im Wald.
- IV) In und über dem Wald bildet sich ein neues Gleichgewichtsprofil heraus, das im Unterschied zu herkömmlichen rauen Grenzschichten ein höheres Maß an Organisation aufweist (siehe Finnigan 2000). So wird der vertikale Austausch zwischen Vegetation und Atmosphäre in hohem Maße durch großskalige Strukturen geleistet (siehe z.B. Raupach et al 1996), die auch zu intermittierenden Belastungen der Bäume führen (siehe Marshall et al 2002).

Windwurf setzt in der Regel erst in Zone III ein. Es stellt sich allerdings die Frage, ob sich am Anfang dieser Zone ein kritischer Bereich mit besonders hohen Extrembelastungen befindet, die maßgeblich von der Form der Traufkante abhängen und durch eine geeignete Gestaltung derselben vermindert werden könnten. Flächenhafter Windwurf wird möglicherweise durch initialen Windwurf in diesem kritischen Bereich ausgelöst und ließe sich somit vermeiden.

In den durchgeführten und noch durchzuführenden Untersuchungen liegt das Augenmerk auf der Strömung im stark gestörten kantennahen Bereich, in dem Druckschwankungen eine tragende Rolle beim Transport turbulenter Eigenschaften spielen und in dem sich der Einfluss der Grenzschichtturbulenz der Anströmung noch stark bemerkbar macht während sich die in (IV) genannten typischen Strömungsmuster noch nicht voll entwickelt haben.

Experimenteller Aufbau

A) Windkanalkonfiguration

Die Untersuchungen erfolgten in einem Niedergeschwindigkeitswindkanal, in dem durch Wirbelgeneratoren und Rauigkeitselemente, die ca. 4 % der Fläche besetzen, ein atmosphärisches Windprofil nachgebildet wurde (siehe Gromke, Ruck 2004). Sämtliche Messungen wurden vorerst für nur eine Referenzgeschwindigkeit ($u_{\text{ref}} = 10,3 \text{ m/s}$) durchgeführt, die mit Hilfe eines Pitot-Rohres in der Anlaufstrecke vor dem Modell in 50 cm Höhe gemessen wurde. Es wurde zunächst das vertikale Profil von u ohne Waldmodell gemessen. Bei Zugrundelegen des Exponentialgesetzes

$$\frac{u_z}{u_{\text{ref}}} = \left(\frac{z}{z_{\text{ref}}} \right)^\alpha$$

ergab sich als Profilkoeffizient $\alpha = 0,26$. In der Natur entspricht dies dem kleinstädtisch-ländlichen Raum.

B) Waldmodell

Der Wald wurde im Sinne möglichst weitgehender Vereinfachung mit einem luftdurchlässigen großporigen Schaumstoffkörper von 12 cm Höhe und 1,6 m Länge modelliert und erstreckte sich über die gesamte Breite des Windkanals. Der Druckverlustbeiwert bei Durchströmung des Schaumstoffes lag bei $c_p = 303 \text{ m}^{-1}$. Die einwirkende Kraft in der Impulsgleichung ergibt sich mit

$$\mathbf{f} = c_p |\mathbf{u}| \mathbf{u}.$$

C) LDA-System

Es wurde ein Zweikomponentensystem mit Argon-Ionen-Laser (4 W) verwendet, das mit Vorwärtsstreuung arbeitete. Die Datenauswertung erfolgte mit zwei TSI-Signalprozessoren vom Typ IFA 550. Als Nebelfluid wurde 1,2-Propandiol benutzt (Teilchendurchmesser 1-2 μm). Die Messungen erfolgten mit einer Abtastrate von 500 Hz im Coincidence-Modus. Eine Punktmessung dauerte jeweils 52 Sekunden.

D) Hitzdrahtmessungen

Es wurden verschiedene DISA-Hitzdrähte sowie vier Messbrücken vom Typ DISA M 550 benutzt und ebenfalls mit einer Abtastrate von 500 Hz und einer Messdauer von 52 Sekunden gearbeitet.

Messungen wurden sowohl mit einem einzelnen vertikalen Draht als Detektor (siehe Abschnitt „Conditional Sampling“) als auch mit einer Anordnung aus drei koplanaren Drähten zur Erfassung der horizontalen (in Strömungsrichtung) und vertikalen Komponenten durchgeführt (siehe Legg et al 1983). Im Unterschied zu herkömmlichen X-Drähten liegt bei dieser Anordnung der Akzeptanzwinkel der Anströmung bei 90 Grad.

Die Kalibrierung der Hitzdrähte erfolgte nicht in einer Kalibriervorrichtung mit niedrigem Turbulenzgrad sondern direkt im atmosphärischen Windkanal. Es wurden zu diesem Zweck an denselben Punkten LDA- und Hitzdrahtmessungen vorgenommen. Anhand der mittels LDA gemessenen Wahrscheinlichkeitsverteilung $f(u,w)$ wurden dann die Übertragungsfunktionen der einzelnen Drähte ermittelt. Die Beiwerte k_1 , k_2 und k_3 , die die Tangentialkühlung der Drähte beschreiben sowie die Standardabweichung σ_v der lateralen Geschwindigkeitsschwankungen, deren Wert benötigt wird, um aus den drei gemessenen effektiven Geschwindigkeitswerten in effizienter Weise die u - und w - Komponenten zu berechnen (Legg et al 1983, Gl. 6), wurden so angepasst, dass die Abweichung der Wahrscheinlichkeitsdichten von LDA- und Hitzdrahtmessungen minimiert wurde.

Auswertung der mit LDA gemessenen Ein-Punkt-Statistiken

Die Abbildungen 1,2 und 3 lassen das in der Einleitung erläuterte Grundmuster erkennen: In einer Höhe von $z \approx 1.5 h$ wird die freie Strömung über dem Modell aus Kontinuitätsgründen beschleunigt während sich darunter ein Bereich geringer Windgeschwindigkeiten befindet. Mit zunehmendem Abstand von der Kante wächst der Impulstransport von oben nach unten an und beschleunigt die Strömung direkt über dem Modell wieder. Eine Strömungsablösung mit Bildung einer Rezirkulationszone findet wegen der großen Durchlässigkeit des Materials nicht statt.

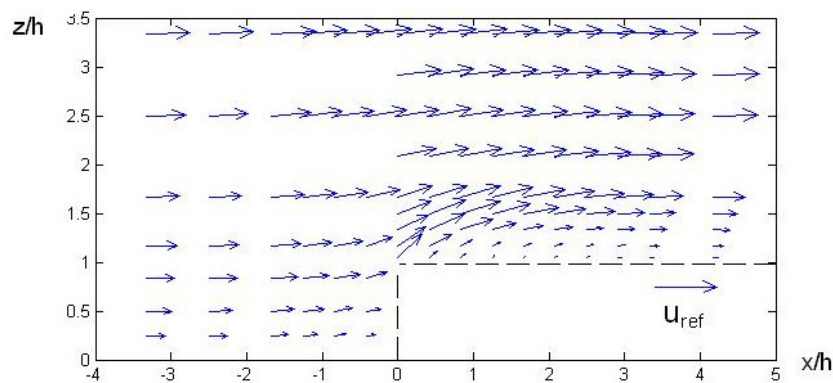


Abb. 1: Vektorplot der mittleren Geschwindigkeit (das Modell ist in dieser und den folgenden Darstellungen durch die gestrichelten Linien umrandet, die Koordinate x hat ihren Ursprung an der Traufkante)

Es ist davon auszugehen, dass das Anwachsen der in Abb. 2 und 3 erkennbaren Scherschicht von der Einwirkung der großskaligen Turbulenz in der Anströmung begünstigt wird. Nach (Judd et al, 1996) bildet sich hinter Windschutzstreifen eine vergleichsweise dünne klassische Scherschicht, deren Wachstum durch eine Kelvin-Helmholtz-Instabilität angetrieben wird, die aber durch die großskalige inaktive Turbulenz in der Anströmung zusätzlich in der Vertikalen auf und ab bewegt wird. Dies ist in vergleichbarer Weise auch für den Fall des Schaumstoffmodells plausibel. Dafür sprechen vor allem die in Abb. 5 dargestellten Verteilungsschiefen der beiden Geschwindigkeitskomponenten. Auffällig ist insbesondere eine Zone in geringer Höhe über der

Oberkante, die sich durch eine hohe positive Skewness für u und eine hohe negative Skewness für w auszeichnet. Dies deutet darauf hin, dass sich die Scherschicht gelegentlich stark nach unten verlagert und schnelle Luft in den ansonsten beruhigten Bereich eindringt.

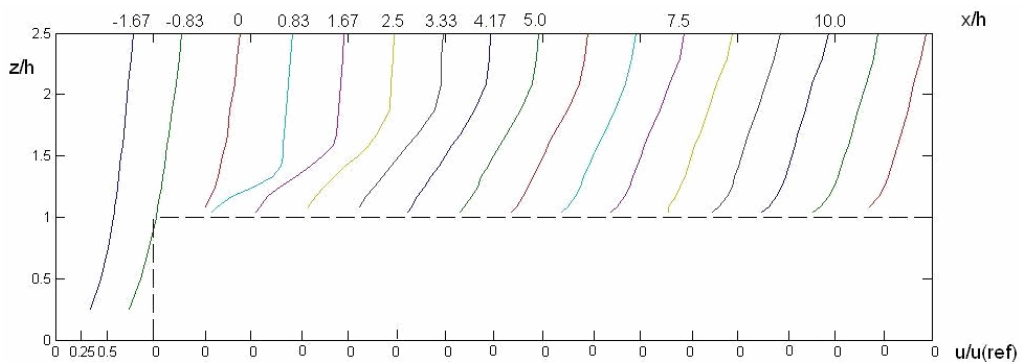


Abb. 2: Vertikalprofile der horizontalen mittleren Geschwindigkeiten \bar{u}

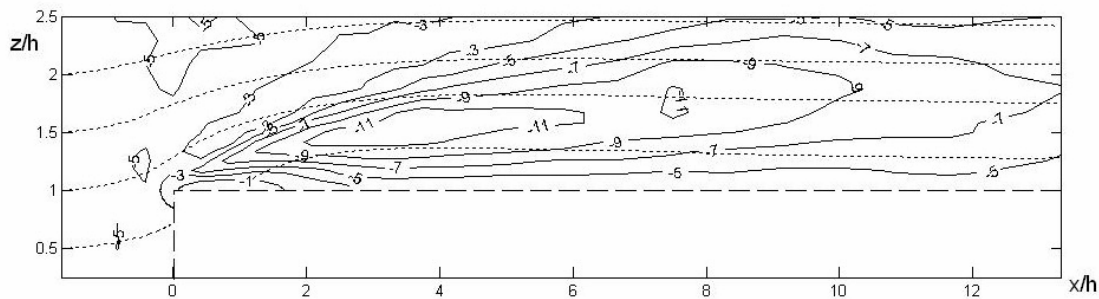


Abb. 3: Auf Stromlinienkoordinaten bezogene Reynoldsspannungen $\overline{u'_s u'_t} \cdot 1/u_{ref}^2 \cdot 10^3$; $\overline{u'_s u'_t}$... Schwankungen in Richtung der mittleren Strömung bzw. senkrecht dazu; Stromlinien gestrichelt dargestellt

Da sich an der Schaumstoffmatte keine angreifenden Kräfte direkt messen ließen, wurden, um eine Aussage über den Impulsfluss in das Modell machen zu können, die Zeitreihen für $u'w'$ direkt über der Oberkante gemessen und der Mittelwert sowie verschiedene Quantile ausgewertet. In Abb. 4 ist erkennbar, dass die kurzzeitigen Impulseinträge ihre Maxima in größerer Nähe zur Traufkante haben als die Reynoldsspannungen.

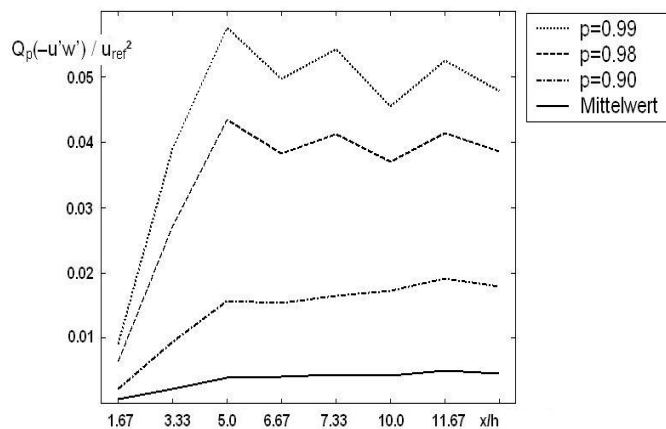


Abb. 4: Quantilwerte von $u'w'$ sowie Reynoldsspannung in 0.5 cm Höhe über dem Modell

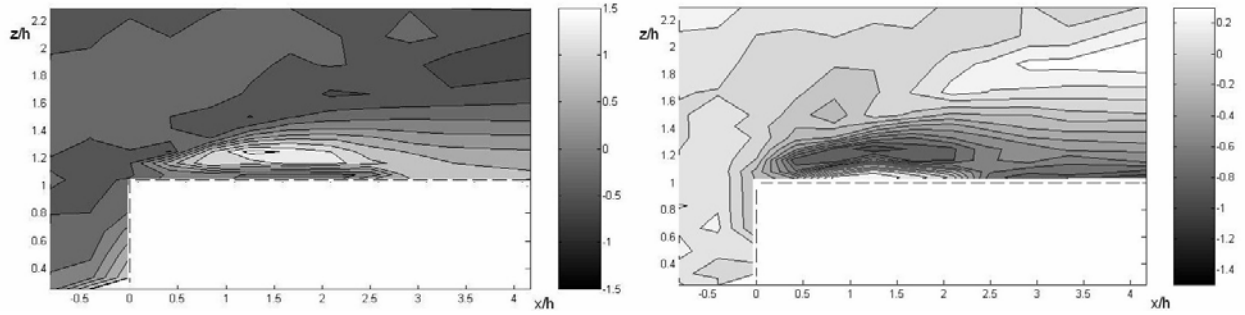


Abb. 5: Verteilungsschiefen der beiden Geschwindigkeitskomponenten im Nahbereich der Waldkante, links: $Sk(u)$, rechts: $Sk(w)$

Um zumindest eine grobe Aussage über die Struktur der Reynoldsspannungen zu machen, wurde an sämtlichen Messpunkten eine Quadrantenanalyse durchgeführt. Dabei wurden die einzelnen Werte der Zeitreihen für $u'w'$ nach Quadranten sortiert:

Quadrant 1 ($u' > 0, w' > 0$): *outward interaction*

Quadrant 2 ($u' < 0, w' > 0$): *burst / ejection*

Quadrant 3 ($u' < 0, w' < 0$): *inward interaction*

Quadrant 4 ($u' > 0, w' < 0$): *sweep*

In Abb. 6 ist das Verhältnis der gemittelten *burst*- zu den gemittelten *sweep*-Anteilen der Reynoldsspannungen

$$\frac{\langle u'w' \rangle_2}{\langle u'w' \rangle_4}$$

dargestellt. Auffällig ist der Anstieg der *burst*-Anteile vor der Traufkante. Dies liegt vermutlich an dem der Strömung entgegengesetzten Druckgradienten vor der Kante.

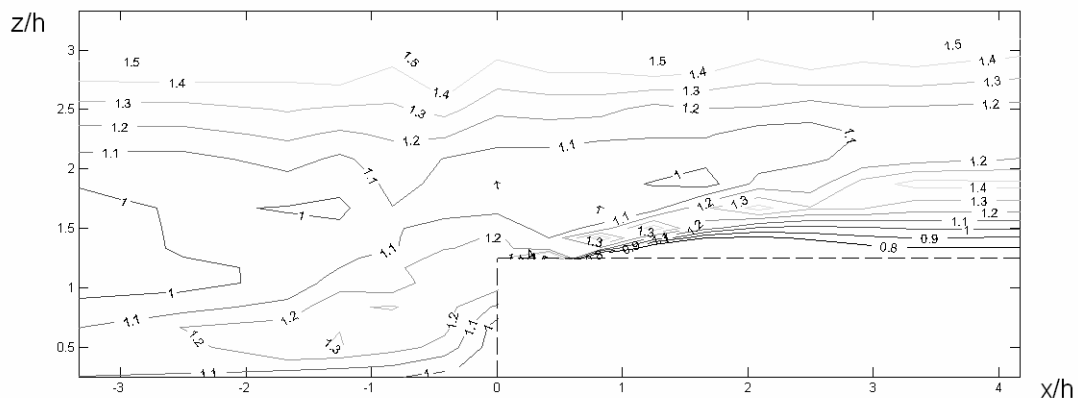


Abb. 6: Verhältnis der *burst*-Anteile zu den *sweep*-Anteilen der Reynoldsspannungen ($\langle u'w' \rangle_2 / \langle u'w' \rangle_4$)

Conditional Sampling

Um zusammenhängende räumliche Strömungsmuster erfassen zu können, die bei der Traufkantenüberströmung eine Rolle spielen, ist es erforderlich, eine Flächeninformation des Strömungsfeldes zu gewinnen. Da kein PIV-System zur Verfügung stand, das für diesen Zweck geeignet gewesen wäre, und die Strömung auch keine Periodizität aufwies, die eine phasengemittelte Auswertung einzelner Punktdaten erlaubt hätte, wurde auf Zweipunkt-Hitzdrahtmessungen und eine VITA-Auswertung (*variable interval time averaging*) zurückgegriffen. Die erfolgreiche Anwendung dieser Methode (siehe z.B. Blackwelder, Kaplan 1976) setzt voraus, dass ein bestimmtes Ereignis existiert, dass sich immer wieder unter einer annähernd gleichen Konstellation des Strömungsfeldes in der Umgebung wiederholt. Wenn das Auftreten des Ereignisses mit Hilfe eines entsprechenden Detektionskriteriums erkannt werden kann, lässt sich durch gleichzeitig ausgeführte Messungen an anderen Punkten und durch Mittlung über die variablen Detektionszeiträume ein räumliches Bild dieses Ereignisses gewinnen.

Das "Ereignis", das im vorliegenden Fall untersucht wurde, war das plötzliche mutmaßliche Nach-unten-Verlagern der Scherschicht über der Traufkante, das zu einer heftigen Erhöhung von u an den tiefer gelegenen Punkten führt. Als Detektionspunkt wurde die Stelle gewählt, an der $Sk(u)$ besonders groß ist ($x=1.5$ h, $z=1.2$ h; siehe Abb. 5). An dieser Position ist die Abweichung der Extrema vom Mittelwert besonders hoch und weniger häufig und daher leicht durch ein Detektionskriterium zu erkennen. Die Detektion erfolgte mit Hilfe einer kontinuierlichen Wavelet-Transformation der gemessenen u -Zeitreihe. Wavelets haben sich in den letzten ca. 15 Jahren als Hilfsmittel bei der Erfassung lokaler Eigenschaften von Funktionen etabliert, die mit der klassischen Fourier-Analyse oft nicht erkannt werden können. Einen Einblick in die Anwendungsmöglichkeiten der Wavelet-Analyse auf dem Gebiet der turbulenten Strömungen wird in (Farge 1992) gegeben.

In der durchgeführten Analyse wurde das Mexikanerhut-Wavelet verwendet, dessen Form dem Verlauf der plötzlichen Geschwindigkeitsspitzen ähnelt. Die Detektion erfolgte für die 10 % der größten Waveletkoeffizienten (siehe Abb. 7).

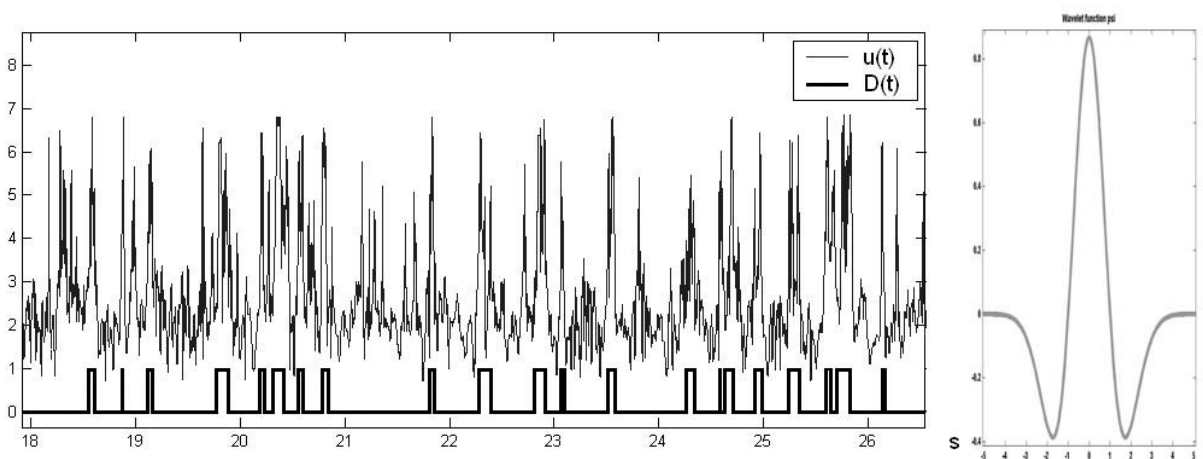


Abb. 7: links: Beispiel für gemessenen Geschwindigkeitsverlauf $u(t)$ am Detektionspunkt und Detektionsfunktion $D(t)$ [$D(t)=1$ wenn Ereignis stattfindet, sonst $D(t)=0$], rechts: Mexikanerhut-Wavelet

Zeitgleich mit den Messungen am Detektionspunkt erfolgte jeweils an den anderen Punkten des Messbereiches die Geschwindigkeitsmessung mit Hilfe der oben geschilderten Tripel-Hitzdrahtsonde. Die gemessenen Werte wurden für verschiedene Zeitdifferenzen Δt jeweils über die Detektionszeiträume ($D(t-\Delta t)=1$) gemittelt. So konnte der in Abb. 8 dargestellte Ablauf des Strömungsgeschehens extrahiert werden.

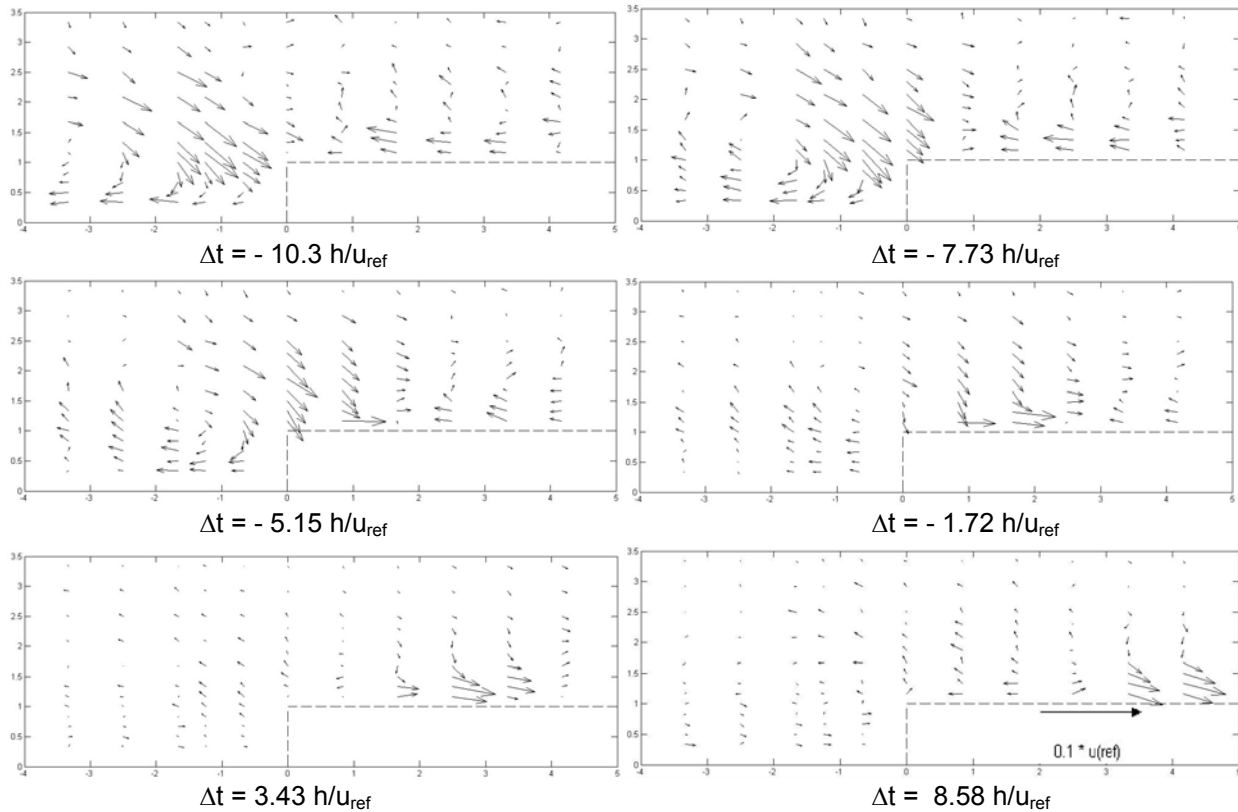


Abb. 8: Konditional gemittelte Abweichungen des Geschwindigkeitsfeldes vom zeitlichen Mittel für ($D(t-\Delta t)=1$); die einzelnen Bilder beziehen sich auf verschiedene Δt , d.h. auf verschiedene Zeitpunkte vor und nach dem detektierten Ereignis

Die Darstellungen lassen folgendes Muster erkennen:

- I. Den Geschwindigkeitsmaxima am Detektor geht ein *sweep-burst*-Vorgang vor dem Modell voraus, bei dem langsame Luft aus den tieferen Bereichen und aus dem Raum zwischen den Rauigkeitselementen nach oben transportiert wird während schnelle Luft nach unten vordringt. Es stellt sich die Frage, ob dieser Vorgang durch den Druckgradienten vor der Kante begünstigt wird. Die in Abb. 6 dargestellten Verhältnisse, die eine Zunahme der *burst*-Anteile vor der Traufkante zeigen, sprechen dafür.
- II. Die am Detektor festgestellte Geschwindigkeitsspitze pflanzt sich stromabwärts fort und richtet sich mit zunehmendem Abstand von der Traufkante nach unten aus, wo sie zum heftigen Impulseintrag in den Schaumstoffkörper führt. Dies würde die in Abb. 4 dargestellten Maxima von $u'w'$ für kurzzeitige Impulseinträge erklären. Allerdings wurden noch keine Messungen durchgeführt, um direkt die Korrelation zwischen der Position der maximalen Impulseinträge und dem Bereich vor der Traufkante zu bestimmen.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Es ist zu vermuten, dass heftige Belastungen in einem gewissen Abstand von der Traufkante von großräumigen Wirbelstrukturen verursacht werden, die bereits in der Anströmung vorhanden sind und bei ihrer Passage über die Traufkante einen Unterdruck hervorrufen, der sie nach unten auslenkt. Es ist von großem Interesse herauszufinden, inwiefern diese Böen bereits vor der Traufkante durch den dort vorherrschenden Druckgradienten beeinflusst werden. Die mit Hilfe des VITA-Schemas gewonnen räumlichen Bilder der Strömungsstruktur sind vorsichtig zu bewerten, da sie mit Hilfe eines eher subjektiven Detektionskriteriums gewonnen wurden. Ebenfalls kritisch zu betrachten sind die Ähnlichkeiten zwischen Windkanal und atmosphärischer Strömung, vor allem im Falle eines Sturmes.

Die Durchführung von Druckmessungen wird angestrebt. Mit Hilfe von Informationen über Druck-Geschwindigkeits-Korrelationen wird eine mit weniger Unsicherheiten behaftete Auswertung der Transportgleichungen turbulenter Größen möglich sein. Wegen der hohen Verteilungsschiefen einiger Größen, in denen sich möglicherweise der Einfluss relativ seltener aber heftiger Böen widerspiegelt, ist insbesondere der Transport von Momenten dritter Ordnung von Interesse.

Literatur

Blackwelder, R.F., Kaplan, R.E., 1976: „On the wall structure of the turbulent boundary layer“, J. Fluid Mech. 76, 89-112

Farge, M., 1992: „Wavelet transforms and their applications to turbulence“, Ann. Rev. Fluid Mech. 24, 395-457

Finnigan, J.J., 2000: „Turbulence in plant canopies“, Ann. Rev. Fluid Mech, 32, 519-571

Fritzsche, F., 1933, „Sturmgefahr und Anpassung: Physiologische und technische Fragen des Sturmschutzes“, Tharandter Forstliches Jahrbuch, 84(1), 1-94

Gromke, C., Ruck, B., 2005: „Die Simulation atmosphärischer Grenzschichten in Windkanälen“, Proc. der 13. Fachtagung „Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik“, Cottbus, ISBN 3-9805613-2-1, 51-1/8

Judd, M.J., Raupach, M.R., Finnigan, J.J., 1996: „A wind tunnel study of turbulent flow around single and multiple windbreaks, part I: velocity studies“, Boundary Layer Meteorol. 80, 127-156

Legg, B.J., Coppin, P.A., Raupach, M.R., 1984: „A three hot-wire anemometer for measuring two velocity components in high intensity turbulent boundary layers“, J. Phys. E: Sci. Instrum., Vol. 17, 970-976

Marshall, B.J., Wood, C.J., Gardiner, B.A., Belcher R.E., 2002, „Conditional sampling of forest canopy gusts“, Boundary Layer Meteorol. 102, 225-251

Raupach, M.R., Finnigan, J.J., Brunet, Y., 1996: „Coherent Eddies and turbulence in vegetation canopies: the mixing layer analogy“, Boundary Layer Meteorol. 78, 351-382