

ÜBER DEN EINFLUSS DER BESTANDSDICHTE AUF DIE STRÖMUNGSVORGÄNGE AN WALDKANTEN

ABOUT THE INFLUENCE OF THE STAND DENSITY ON THE FLOW AT FOREST EDGES

C. Frank & B. Ruck

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

Schlagworte: Wald, Bestandsdichte, Windkanal

Key Words: Forest, stand density, wind tunnel

Zusammenfassung

Experimentelle Untersuchungen wurden in einem atmosphärischen Grenzschichtwindkanal durchgeführt, um den Einfluss der Bestandsdichte auf die Strömungsvorgänge im Bereich von Waldkanten zu erfassen. Die Bestandsdichte wurde dreifach variiert, indem ganze Reihen des ursprünglich dichten Modellwalds gleichmäßig entfernt wurden. Zusätzlich wurden gestaffelte Waldanordnungen untersucht, die sich aus lichten und dichten Streifen unterschiedlicher Länge zusammensetzen. Die mittleren und turbulenten Strömungsgrößen wurden mit Hilfe eines 2D-LDA-Systems erfasst. Die unterschiedlichen Messdaten werden in Form von Isolinienplots und Horizontalprofilen in unmittelbarer Kronendachnähe dargestellt.

1. Einleitung

Der Grad der Schädigung eines Waldbestands durch Sturm hängt von zahlreichen Parametern wie Topographie, Bestandsdichte, Kronendachrauigkeit, Baumartenzusammensetzung, Ausbildung der Traufkanten, Bodeneigenschaften etc. ab. Um waldbauliche Strategien zur Reduzierung des Sturmschadensrisikos zu entwickeln bzw. um die Sturmschadensanfälligkeit von Waldbeständen überhaupt abschätzen zu können, ist eine detaillierte Kenntnis der Zusammenhänge zwischen diesen verschiedenen Einflussparametern und dem Strömungsfeld notwendig.

2. Methoden

Die experimentellen Untersuchungen wurden im geschlossenen, 29 m langen atmosphärischen Grenzschichtwindkanal des Laboratoriums für Gebäude- und Umweltaerodynamik, Institut für Hydromechanik, Universität Karlsruhe durchgeführt. Die Eigenschaften der im Windkanal mit Hilfe von Wirbelgeneratoren und Rauheitselementen erzeugten, neutral geschichteten atmosphärischen Grenzschicht wurden bereits in FRANK und RUCK 2007 beschrieben. Die simulierte Grenzschicht ist charakteristisch für vorstädtisches Terrain bzw. für Waldgebiete.

Messtechnik

Die Geschwindigkeitsmessungen wurden mit Hilfe eines 2D-LDA-Systems durchgeführt. Der eingesetzte Argon-Ionen Laser hat eine maximale Leistung von 4 Watt. Das System arbeitet mit Vorwärtslichtstreuung und besitzt eine Brennweite von 1,5 m. Zwei Doppel – Braggzellen

sorgen für die zur Detektion von Rückströmgeschwindigkeiten notwendigen Frequenzverschiebungen der Laserstrahlen. Die Datenauswertung erfolgt mit Hilfe von 2 TSI Signalprozessoren, Modell IFA 550. Die Streuteilchen werden mit einem Nebelgenerator und dem Nebelfluid 1,2-Propandiol generiert und besitzen einen Durchmesser von 1 – 2 μm .

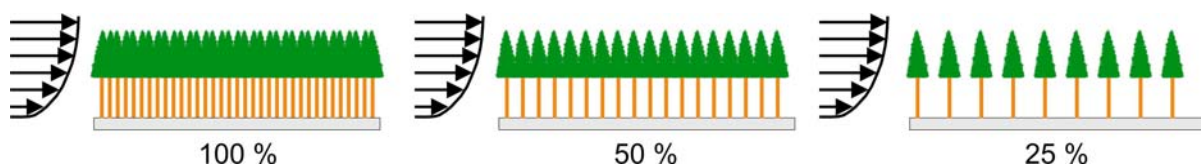
An jedem Messpunkt wurden rund 26 600 Datenpunkte mit einer Frequenz von 500 Hz im Coincidence Mode aufgenommen. Eine Punktmessung dauerte somit 53 s.

Waldmodell

Der ursprünglich dichte Modellwald setzte sich aus 6 800 Einzelbäumen zusammen. Er erstreckte sich über eine Länge L_w von $2.06 \text{ m} = 17.9 \cdot H$ in Hauptströmungsrichtung (was bei dem zugrunde gelegten Modellmaßstab von 1:200 einer Waldlänge von 412 m in der Natur entspricht) und annähernd über die gesamte Windkanalbreite. Die Stämme, auf welche die Kronen von Modelltannen befestigt wurden, sind aus Polystyrol - Rundstäben gefertigt. Die Gesamthöhe des Waldes betrug im Mittel $H = 11.5 \text{ cm}$ (23 m in Natur); sie setzt sich zusammen aus einer Stammhöhe $S = 5.5 \text{ cm} = 0.48 \cdot H$ (11 m) und einer mittleren Kronendachhöhe $K = 6 \text{ cm} = 0.52 \cdot H$ (12 m). Der Abstand zwischen den Bäumen ist in Hauptströmungsrichtung und in lateraler Richtung bei der dichten Anordnung annähernd gleich: $a_x = 2.06 \text{ cm} = 0.18 \cdot H$ (4.1 m) und $a_y = 2.0 \text{ cm} = 0.17 \cdot H$ (4.0 m). Damit wird eine Bestandsdichte von 2400 Bäumen je Quadratmeter im Modell bzw. von 600 Bäumen je Hektar in der Natur erzielt. Diese Bestandsdichte wird im weiteren Verlauf zu 100 % festgesetzt.

Die Bestandsdichte des einheitlichen Modellwalds wurde dreifach variiert, indem systematisch ganze Baumreihen des dichten Bestands entfernt wurden, siehe Abb. 1. Darüber hinaus wurden gestaffelte Waldanordnungen untersucht, bei denen lichte und dichte Waldbestände unterschiedlicher Länge hintereinander angeordnet wurden, siehe Abb. 2. Die Länge L des lichten Bestandes wurde dabei jeweils vierfach variiert. Im Rahmen dieses Papers werden exemplarisch Ergebnisse der gestaffelten Anordnung „25 % – 100 %“ dargestellt.

Die Anströmung erfolgt senkrecht zur Waldkante. Der Ursprung des verwendeten x,z- Koordinatensystems liegt auf der Windkanalbodenplatte am luvseitigen Waldrand mit der x-Koordinate in horizontaler Hauptströmungsrichtung und mit der z-Koordinate in nach oben gerichteter, vertikaler Richtung.



	Bestandsdichte *		a_x/H	a_y/H	L_w/H	
	[%]	Modell				Natur
		[Bäume/m ²]				[Bäume/ha]
Referenzfall	100	2400	600	0.18	0.17	17.9
Jede 2. Reihe entfernt	50	1200	300	0.35		17.3
Jede 2.-4. Reihe entfernt	25	600	150	0.70		17.0

Abb. 1: Waldbestände mit einheitlichem Aufbau: Versuchsübersicht (a_x = Abstand zwischen den Bäumen in Strömungsrichtung, a_y = Abstand zwischen den Bäumen in lateraler Richtung (quer zur Anströmung), L_w = Länge des Waldbestands = Distanz zwischen erster und letzter Baumreihe, H = mittlere Bestandshöhe = 23 m, *Bestandsdichte jeweils bezogen auf die Grundfläche des Referenzfalls).

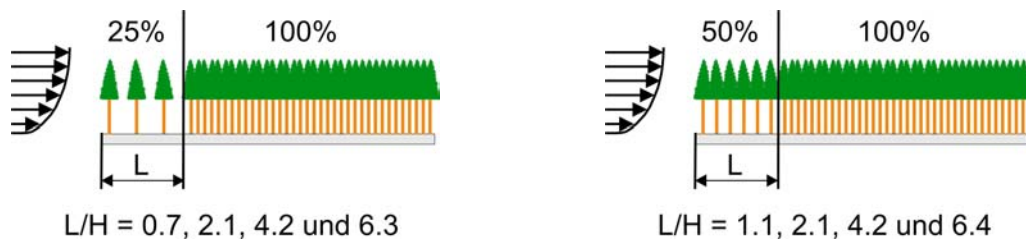


Abb. 2: Gestaffelte Waldanordnungen

Um die Strömungsvorgänge in Kronendachnähe zu erfassen, wurden Horizontalprofile in einer Höhe $z/H = 1.13$ mit einer sehr feinen horizontalen Auflösung aufgenommen (zwischen $1\text{ cm} = 0.087 \cdot H$ (2 m) im Bereich des luvseitigen Waldrands und $5\text{ cm} = 0.435 \cdot H$ (10 m) in der Nähe des leeseitigen Waldrands). Für die einheitlichen Waldbestände wurden zudem mehrere vertikale Profile vermessen, deren genaue Positionen in Tab. 1 zusammengestellt sind. Die Profile im Luv der Waldbestände ($x/H = -0.26$) bestehen aus jeweils 24 Messpunkten ($0.08 < z/H < 4.35$) und die Profile über dem Kronendach aus je 17 Messpunkten ($1.04 < z/H < 4.35$). Die Messwerte dieser vertikalen Profile sind Grundlage der im nächsten Kapitel gezeigten Isolinienplots.

BD	x/H			
100 %	-0,26, 1.26, 2.26, 4.26, 6.26, 8.17	9.96, 10.96	12.96, 14.83	16.96, 17.91
50 %		10.43		17.30
25 %				16.96

Tab. 1: Lage der vertikalen Messprofile

3. Ergebnisse

3.1 Einheitliche Waldbestände

Der Einfluss der Bestandsdichte auf das Strömungsfeld über den untersuchten Waldbeständen mit einheitlichem Aufbau wird im Folgenden anhand von Isolinien Darstellungen in der xz -Ebene und anhand von Horizontalprofilen in unmittelbarer Kronendachnähe veranschaulicht. Dargestellt werden die mittleren horizontalen und vertikalen Geschwindigkeiten (Abb. 3-4 bzw. Abb. 5-6), die turbulente kinetische Energie TKE (Abb. 7-8) sowie die Schiefe der horizontalen Geschwindigkeiten (Abb. 9-10). In den Isolinien Darstellungen sind - im Gegensatz zu den Horizontalprofilen - alle Strömungsgrößen in normierter Form aufgetragen.

Mit abnehmender Bestandsdichte nimmt die mittlere horizontale Geschwindigkeit u im bodennahen Bereich im Luv des Waldbestands sowie über der Wind zugewandten Bestands-hälfte ab einer Entfernung vom luvseitigen Bestandsrand von $x \approx 1H$ in Kronendachnähe deutlich zu (Abb. 3-4). Für $x > \text{ca. } 12H$ und unmittelbar im Bereich des luvseitigen Bestandsrands ($0 < x/H < 1$) sind die Unterschiede jedoch gering. Gleichzeitig nimmt die mittlere vertikale Geschwindigkeit w im Bereich der luvseitigen Traufkante leicht ab (Abb. 5-6), d.h. die Strömung wird bei lichten Beständen weniger stark nach oben abgelenkt als bei dichten Beständen. Weiter stromab sind die Unterschiede zwischen den w -Werten sehr gering. Abb. 5 macht deutlich, dass sich die Strömung bei dichten Beständen bereits bei niedrigeren x -Werten (also in geringerem Abstand zur luvseitigen Traufkante) leicht nach unten zum Wald hin ausrichtet (für Bestandsdichte $BD = 100\%$ ab $x/H \approx 8$, für $BD = 50\%$ ab $x/H \approx 10$ und für $BD = 25\%$ ab $x/H \approx 12$).

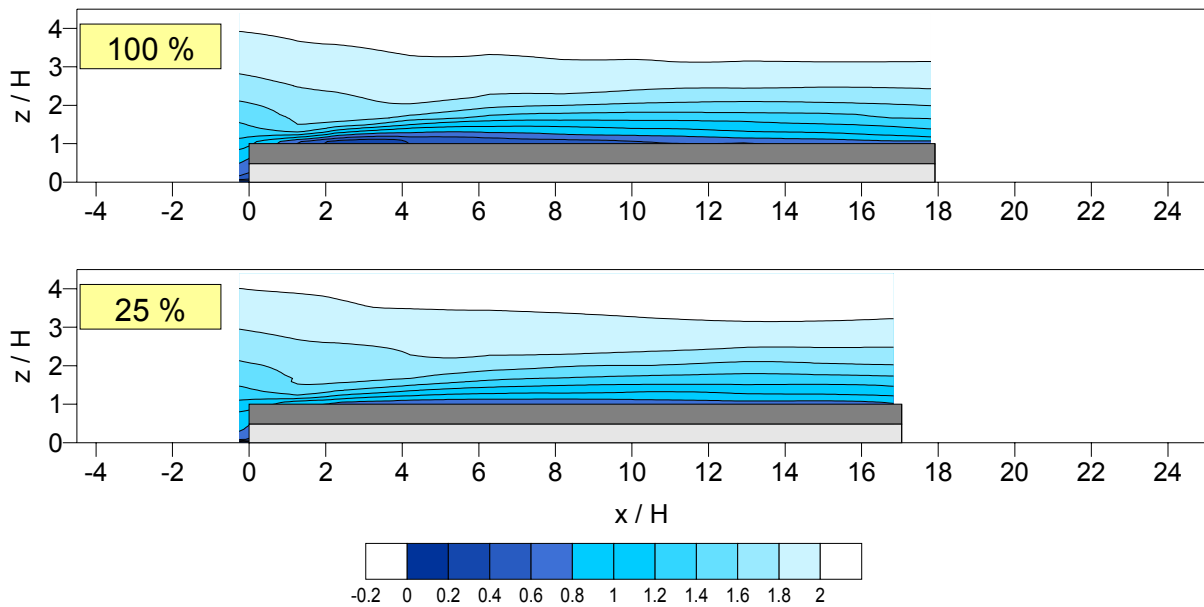


Abb. 3: Mittlere horizontale Geschwindigkeit u / u_{ref} über unterschiedlich dichten Waldbeständen ($u_{ref} = 4.34 \text{ m/s}$ in $z_{ref} / H = 0.43$)

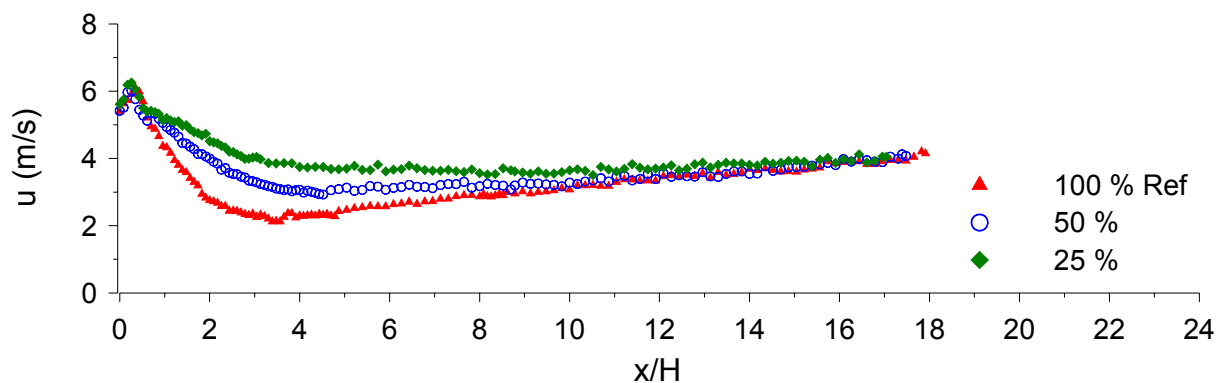


Abb. 4: Verlauf der mittleren horizontalen Geschwindigkeit u in unmittelbarer Kronendachnähe ($z/H = 1.13$) von unterschiedlich dichten Waldbeständen ($u_0 = 5.4 \text{ m/s}$ in $z/H = 1.13$)

Sowohl die horizontalen als auch die vertikalen Standardabweichungen nehmen für $x > \text{ca. } 1H$ mit abnehmender Bestandsdichte in Kronendachnähe zu, wobei der Anstieg bei der Horizontal Komponente größer ist als bei der Vertikalkomponente. Dies führt dazu, dass in diesem Bereich auch die turbulente kinetische Energie (Abb. 7-8) zunimmt (wiederum für $x > \text{ca. } 1H$). Eine deutliche Zunahme ist auch beim Betrag der Korrelationen der Geschwindigkeitsschwankungen zu beobachten, d.h. die turbulenten Schubspannungen $\tau = -\rho \cdot u'w'$ nehmen ebenfalls zu. Infolge der abnehmenden Bestandsdichte erhöhen sich die Werte der zweiten Momente, der TKE und der Schubspannungen über der leeseitigen Bestandshälfte bis in eine Höhe von etwa $z = 1.7H$ (Abb. 7).

Die Schiefe ist ein Maß für die Böigkeit und beschreibt allgemein die Asymmetrie einer Verteilung ($Sk_u = u^3M / u'^3 = \text{Quotient aus dem dritten Moment der horizontalen Geschwindigkeit } u^3M \text{ und der dritten Potenz der horizontalen Standardabweichung } u'$). Ist die Schiefe positiv, ist die Verteilung rechtsschief bzw. linkssteil. In diesem Fall streuen die Werte, die größer als der Mittelwert sind, stärker als die, welche kleiner als der Mittelwert sind. Abb. 9 zeigt, dass die Schiefe Sk_u für $x > \text{ca. } 1H$ mit abnehmender Bestandsdichte über der luvseitigen Waldfläche deutlich abnimmt (dies gilt auch für den Betrag von Sk_w), d.h. die Asymmetrie der Geschwindigkeitsverteilungen verringert sich, die Werte streuen weniger stark und die Böigkeit nimmt ab.

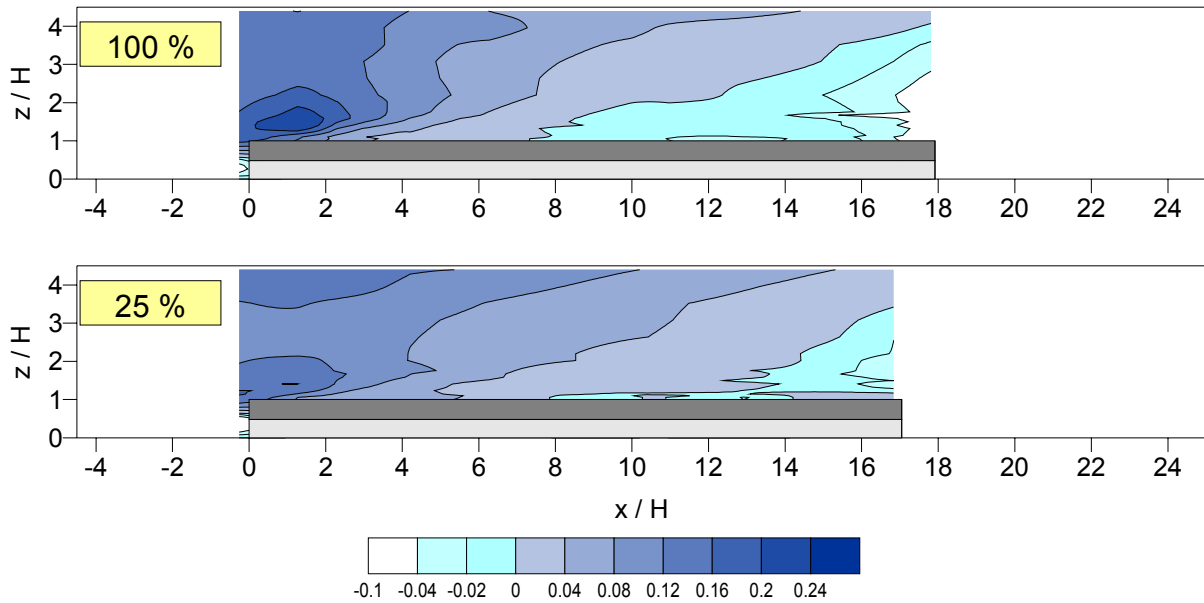


Abb. 5: Mittlere vertikale Geschwindigkeit w / u_{ref} über unterschiedlich dichten Waldbeständen ($u_{ref} = 4.34 \text{ m/s}$ in $z_{ref} / H = 0.43$)

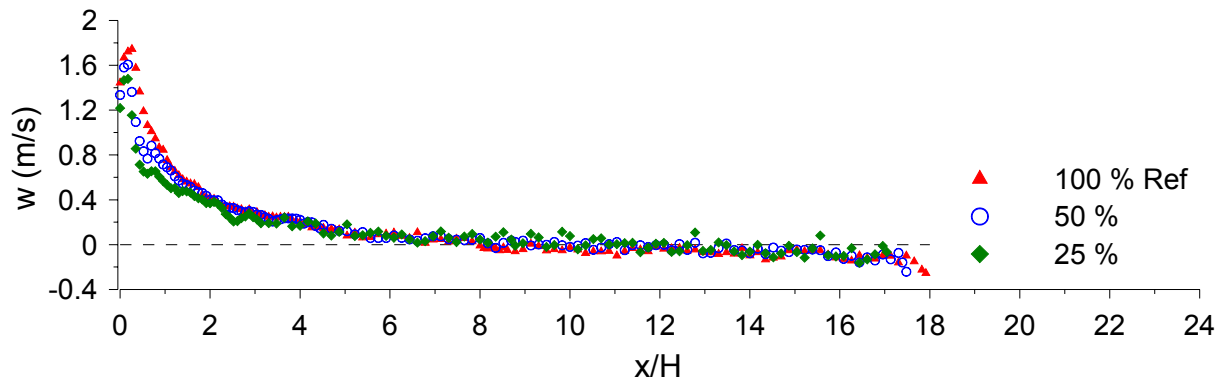


Abb. 6: Verlauf der mittleren vertikalen Geschwindigkeit w in unmittelbarer Kronendachnähe ($z/H = 1.13$) von unterschiedlich dichten Waldbeständen ($w_0 = 0.07 \text{ m/s}$ in $z/H = 1.13$)

Der Verlauf aller dargestellten Horizontalprofile ist über lichten Beständen insgesamt gleichmäßiger als über Dichten. Dies führt dazu, dass in Kronendachnähe bereits in geringerer Entfernung stromab der Waldkante die für den Bestand charakteristischen Gleichgewichtswerte näherungsweise erreicht werden.

Diskussion

Die experimentellen Ergebnisse zeigen, dass die Bestandsdichte insbesondere im kanten-nahen Bereich einen großen Einfluss auf die Strömungsvorgänge hat. Dies lässt sich dadurch erklären, dass dichte Bestände einen größeren Widerstand auf die Anströmung ausüben als lichte, was zu einem höheren Impulsaustausch im Traufbereich führt. Die durch die luvseitige Traufkante in den Bestand einströmende Luft wird infolge des höheren "inneren" Widerstands des dichteren Bestandes stärker und auch schneller abgebremst. Gleichfalls wird die eindringende Luft aufgrund des größeren Durchströmwiderstands innerhalb einer kürzeren Strecke nach oben abgelenkt. Die horizontale Ausdehnung der im unmittelbaren Lee der Traufkante liegenden Anpassungsregion nimmt also mit zunehmender Bestandsdichte ab.

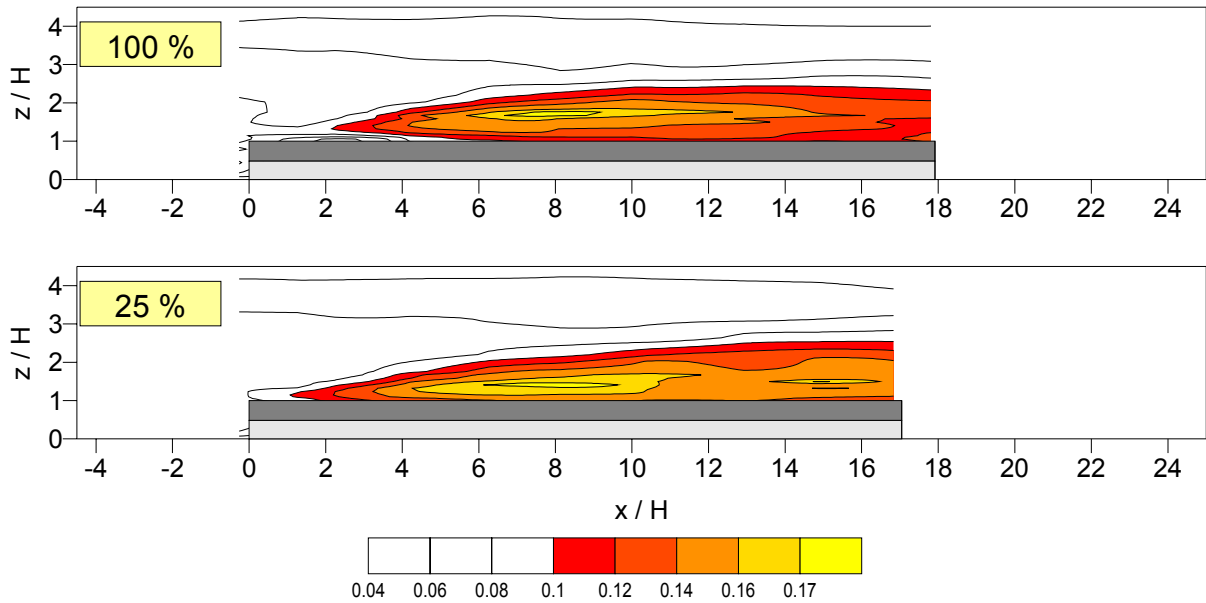


Abb. 7: Turbulente kinetische Energie TKE / u_{ref}^2 über unterschiedlich dichten Waldbeständen ($u_{ref} = 4.34 \text{ m/s}$ in $z_{ref} / H = 0.43$)

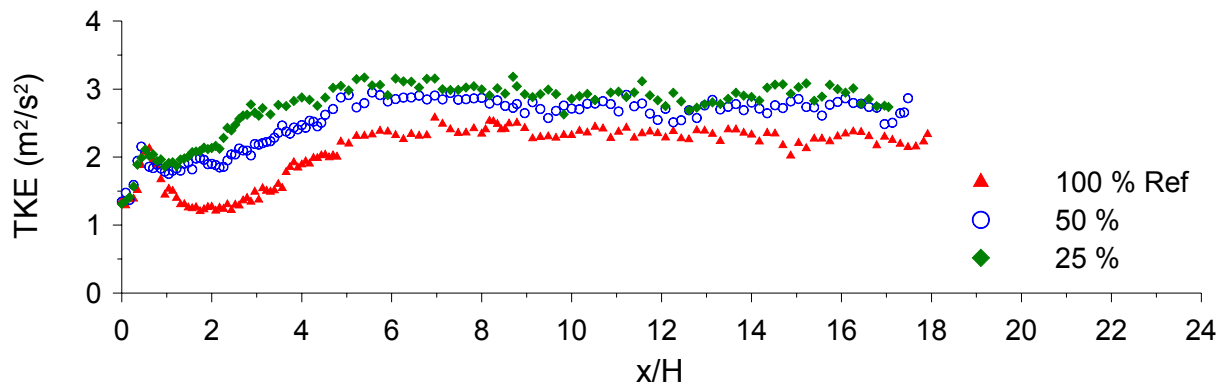


Abb. 8: Verlauf der turbulenten kinetischen Energie TKE in unmittelbarer Kronendachnähe ($z/H = 1.13$) von unterschiedlich dichten Waldbeständen ($TKE_0 = 1.60 \text{ m}^2/\text{s}^2$ in $z/H = 1.13$)

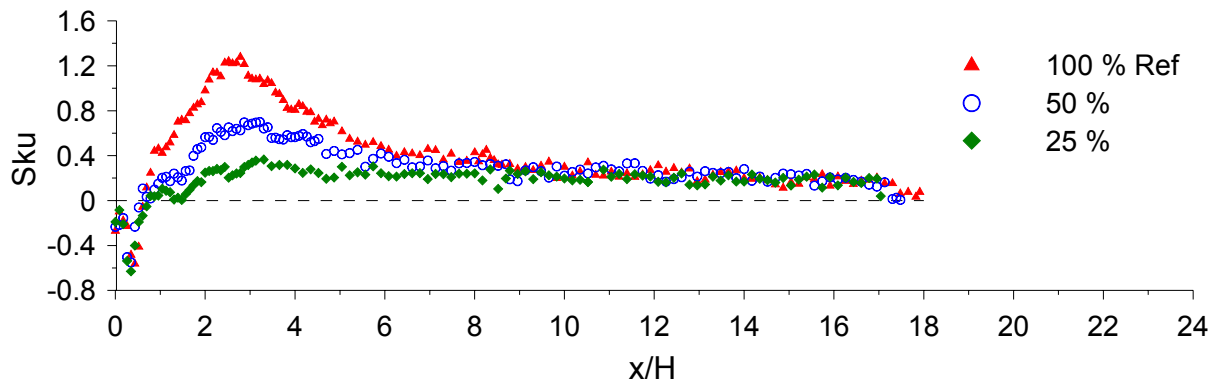


Abb. 9: Verlauf der Schiefe der horizontalen Geschwindigkeit Sku in unmittelbarer Kronendachnähe ($z/H = 1.13$) von unterschiedlich dichten Waldbeständen ($Sku_0 = 0.01$ in $z/H = 1.13$)

Die Turbulenzintensität nimmt im Kronendach eines Bestands infolge der Gegenwart von kleinen Nachlaufwirbeln, welche durch die Bestandselemente verursacht werden und die turbulente Dissipationsrate erhöhen, ab (siehe BELCHER et al 2003, DUPONT und BRUNET 2008a). Durch vertikale Advektion gelangt dann turbulenz- und impulsarme Luft über die Länge der Anpassungsregion aus dem Bestandsinneren in die freie Atmosphäre. In Kronendachnähe nehmen infolgedessen im kantennahen Bereich die mittlere horizontale Geschwindigkeit, die Standardabweichungen und auch die turbulente kinetische Energie ab. Diese Abnahme verringert sich jedoch mit zunehmender Bestandsdichte, da die Strömung innerhalb von lichten Beständen impuls- und turbulenzreicher ist.

Die Schiefe- und Kurtosiswerte der Geschwindigkeitsverteilungen nehmen innerhalb der mit abnehmender Bestandsdichte größer werdenden Anpassungsregion in Kantennähe betragsmäßig ab. Eine ähnliche Abnahme der Schiefe- und Kurtosiswerte mit zunehmender Größe der Anpassungsregion wurde auch in der numerischen Studie von DUPONT und BRUNET 2008a beobachtet, die den Einfluss der Bestandsmorphologie auf das Strömungsfeld untersuchten. DUPONT und BRUNET 2008a haben gezeigt, dass der Ort und die Intensität der erhöhten Böenzone („enhanced gust zone“, kurz: EGZ, charakterisiert durch hohe Schiefewerte) mit der Intensität der mittleren Aufwärtsbewegung an der Bestandsoberkante korreliert; dies gilt jedoch nicht direkt an der Traufkante. Die EGZ bildet sich demnach im oberen Teil des Kronendachs aus und zwar in einem Bereich, in dem sich die Strömung noch nicht an den Bestand angepasst hat (in dem die vertikale Geschwindigkeit w hoch ist und die TKE niedrig).

Bei den mittleren Geschwindigkeiten wie auch bei den Schiefen und der Kurtosis zeigen sich signifikante Änderungen nur über der windzugewandten Waldhälfte, bei den Standardabweichungen, TKE und $u'w'$ sind deutliche Änderungen über dem gesamten Bestand zu erkennen. Die turbulenten Strömungsgrößen zweiter Ordnung sind in unmittelbarer Kronendachnähe bei lichten Beständen über die gesamte Bestandslänge hinweg höher als bei Dichten, was damit erklärt werden kann, dass mit abnehmender Bestandsdichte die Rauigkeit des Kronendachs zunimmt.

Dass die Unterschiede zwischen den Profilen der mittleren horizontalen Geschwindigkeit u für die drei untersuchten Bestandsdichten in der Nähe der leeseitigen Traufkante so gering sind (Abb 3-4), ist überraschend, vergegenwärtigt man sich die Ergebnisse von GARDINER et al 1997, GREEN et al 1995 und NOVAK et al 2000, die über ausgedehnten Waldflächen in Kronendachnähe einen doch recht deutlichen Anstieg bei der horizontalen Geschwindigkeit mit abnehmender Bestandsdichte beobachteten.

Der mit abnehmender Bestandsdichte über dem Kronendach beobachtete Anstieg bei der mittleren horizontalen Geschwindigkeit und bei der turbulenten kinetischen Energie deutet darauf hin, dass in lichten Waldbeständen für in Kantennähe stehende Bäume sowohl die mittlere als auch die extreme Windbelastung deutlich zunimmt (Die mittlere Windbelastung ist proportional zu u^2 , die extreme Windbelastung proportional zu $(u+g \cdot u')^2$ mit g = Böenfaktor, u' = Standardabweichung von u). In größerer Entfernung von der luvseitigen Bestandskante nimmt die extreme Windbelastung infolge des Anstiegs der TKE ebenfalls merklich zu, die Unterschiede bei der mittleren Windbelastung sind für die untersuchten Waldbestände indes gering. Bei dichten Beständen nimmt jedoch in Kantennähe die Böigkeit merklich zu.

3.2 Gestaffelte Waldanordnungen

In Abb. 10 sind Horizontalprofile verschiedener Strömungsgrößen in unmittelbarer Kronendachnähe von gestaffelten Waldanordnungen und zusätzlich von den einheitlichen Waldbeständen vergleichbarer Bestandsdichten aufgetragen. Die vertikalen Linien markieren jeweils den Übergang vom lichten zum dichten Waldbestand, also die Lage der inneren Bestandsränder.

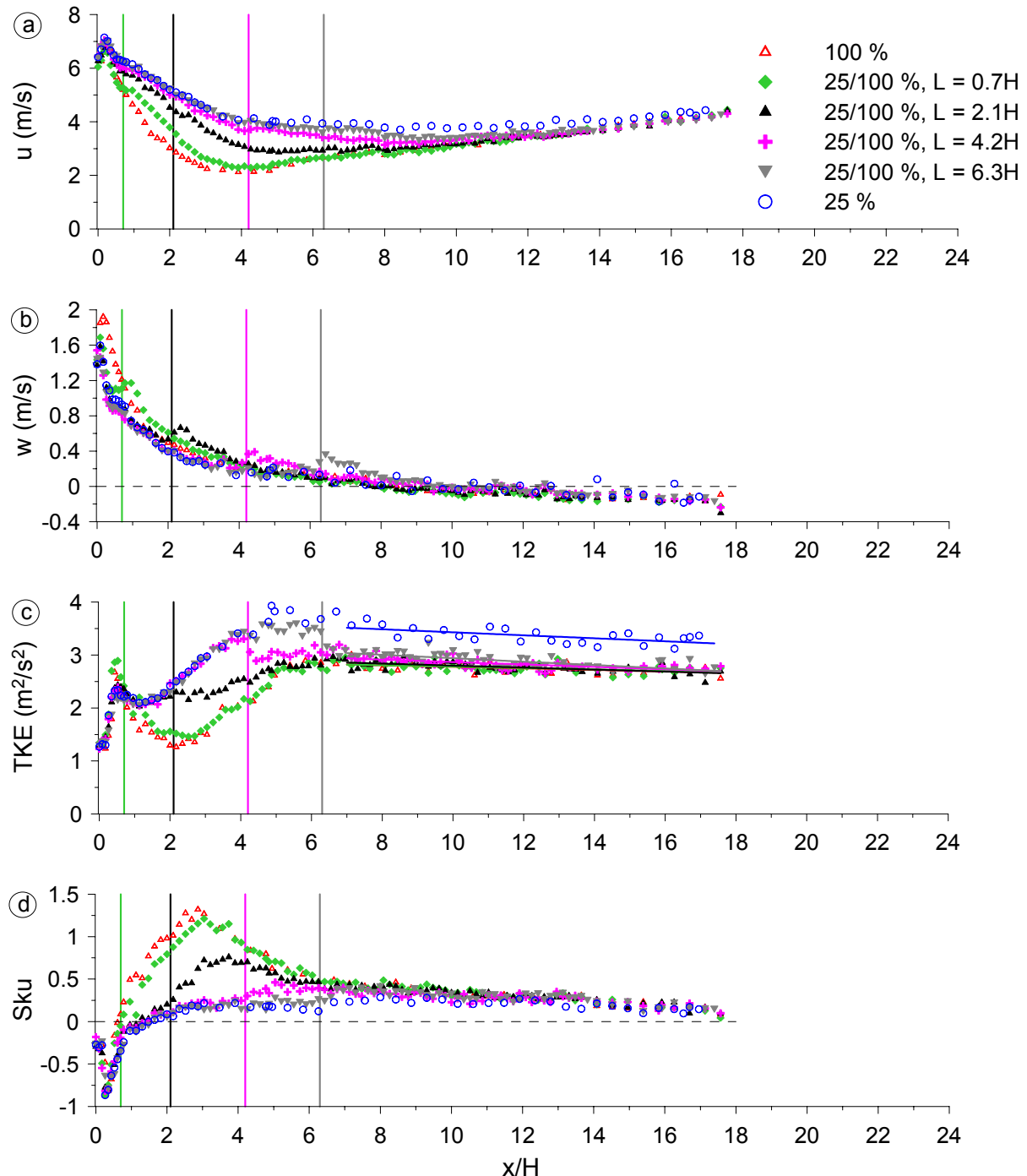


Abb. 10: Horizontalprofile in unmittelbarer Kronendachnähe ($z/H = 1.13$) von gestaffelten Waldanordnungen (BD25 – BD100) unterschiedlicher Länge: a) mittlere horizontale Geschwindigkeit u , b) mittlere vertikale Geschwindigkeit w , c) turbulente kinetische Energie TKE und d) Schiefe der horizontalen Geschwindigkeitskomponente Sk_u . Dargestellt sind auch die Profile der einheitlichen Waldbestände entsprechender Bestandsdichten.

Abb. 10a zeigt Profile der mittleren horizontalen Geschwindigkeit u . Die Kurven der Staffelanordnungen werden von den Kurven der beiden einheitlichen Bestände eingeschlossen. Ist der luvseitig angeordnete lichte Waldbestand kurz ($L = 0.7H$), ähnelt die Kurve der mittleren horizontalen Geschwindigkeit noch sehr der des einheitlich dichten Bestands; im kantennahen Bereich bis etwa $x = 4H$ ist die Geschwindigkeit jedoch leicht erhöht. Weist der lichte Bestand eine Länge von $2.1H$ auf, ist stromauf des inneren Bestandsrands die Geschwindigkeit noch deutlich niedriger als bei dem einheitlich lichten Bestand und stromab des Übergangs bis etwa $x = 7H$ deutlich höher als beim dichten Bestand. Bei lichten Beständen größerer Länge ($L/H = 4.2$ und 6.3) sind die Kurven der gestaffelten Anordnungen im Bereich der luvseitigen Waldkante nahezu identisch mit der Kurve des einheitlich lichten Bestands und ab einer gewissen Entfernung stromab der inneren Bestandsränder vergleichbar mit der des einheitlich dichten Waldbestands. Die mittlere horizontale Geschwindigkeit passt sich in einem Bereich zwischen rund $1 - 2H$ stromauf und $4 - 5H$ stromab des inneren Bestandsrands an die veränderte Bestandsdichte an.

Die Horizontalprofile der mittleren vertikalen Geschwindigkeit (Abb. 10b) weisen unmittelbar stromab der inneren Bestandskanten deutliche Peaks auf; leicht erhöhte Werte sind bis etwa $2H$ stromab der Übergänge zu beobachten. Dies deutet darauf hin, dass in den Übergangsbereichen die im Bestand strömende Luft nochmals abgebremst und nach oben umgelenkt wird, ähnlich zu den Strömungsvorgängen an der luvseitigen Bestandskante.

Die Kurven der turbulenten kinetischen Energie TKE (Abb. 10c) von den gestaffelten Anordnungen sind stromauf der inneren Bestandsränder nahezu identisch zur Kurve der einheitlich lichten Anordnung und passen sich wiederum bereits nach wenigen Baumhöhen an die Kurve des einheitlich dichten Waldbestands an.

Bei der Schiefe der horizontalen Geschwindigkeitskomponente S_{ku} geht mit zunehmender Länge des lichten Waldbestands eine Abnahme des Maximalwertes einher. Die Lage des Maximalwerts verschiebt sich dabei von der luvseitigen Bestandskante weg nach Unterstrom.

Diskussion

Mit zunehmender Länge des lichten Waldbestands erhöhen sich im kantennahen Bereich sowohl die mittlere horizontale Geschwindigkeit als auch die turbulente kinetische Energie, was wiederum auf einen Anstieg der mittleren wie auch der extremen Windbelastung hinweist. Insbesondere im kantennahen Bereich ist daher von einer Auslichtung dicht stehender, alter Waldbestände abzuraten, da hier die größte Zunahme bei der Windbelastung zu erwarten ist. Wenn eine Auslichtung durchgeführt wird, ist - zumindest in den ersten Jahren nach dieser waldbaulichen Maßnahme, in denen sich die Bäume noch nicht durch adaptives Wachstum an die erhöhte Windbelastung angepasst haben - mit einer höheren Sturmschadensanfälligkeit zu rechnen.

GARDINER und STACEY 1996 wie auch DUPONT und BRUNET 2008b führten Studien über den Einfluss der Traufkantenausbildung auf die Höhe der einwirkenden Biegemomente durch und stellten fest, dass vorgelagerte lichte Bestände mit einer Länge von $2H$ zu einer Reduktion der Biegemomente im kantennahen Bereich des dichten Bestands führen (Die Biegemomente an der ursprünglich frei angeströmten Kante des einheitlich dichten Bestands wurden dabei mit denen am inneren Bestandsrand der gestaffelten Anordnung verglichen). Unsere Messungen bestätigen tendenziell deren Ergebnisse, siehe Abb. 11. Sie zeigen jedoch auch, dass weiter stromab, in größerem Abstand zur inneren Bestandskante mit einem Anstieg der Windbelastung zu rechnen ist.

Ob „etablierte“ Staffelanordnungen stabiler sind als einheitliche Waldbestände und ob dichte Waldbestände stabiler sind als lichte Bestände ist allein mit Hilfe unserer Ergebnisse nicht zu

beurteilen, da hierfür nicht nur die auf Bäume einwirkenden Windlasten bekannt sein müssen, sondern auch der Widerstand der Bäume gegenüber Windwurf bzw. Windbruch. In lichten Beständen aufgewachsene Bäume sind im Allgemeinen sicherlich stabiler als Bäume, die in dichten Beständen stehen.

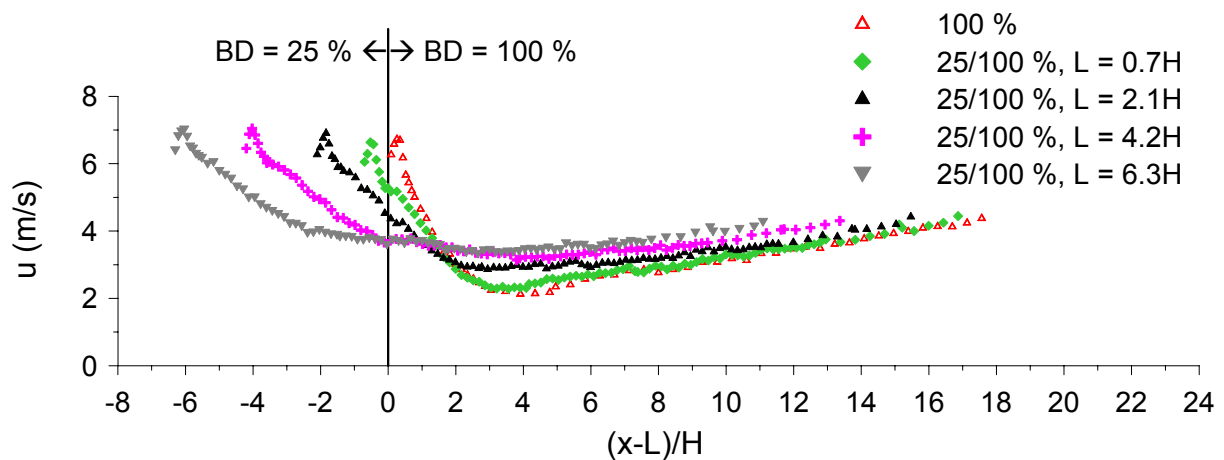


Abb. 11: Verlauf der mittleren horizontalen Geschwindigkeit in unmittelbarer Kronendachnähe ($z/H = 1.13$) von gestaffelten Waldanordnungen (BD25 – BD100) unterschiedlicher Länge

Dankesworte

Die Untersuchungen wurden im Rahmen des Projekts „Verbesserung der Sturmstabilität von Waldbeständen“ durchgeführt, welches Teil des RESTER - Verbundprojekts „Strategien zur Reduzierung des Sturmschadensrisikos für Wälder“ innerhalb des Forschungsprogramms „Herausforderung Klimawandel“ ist. Die Autoren möchten sich an dieser Stelle beim Umweltministerium Baden-Württemberg für die gewährte Förderung aus der Zukunftsoffensive IV bedanken.

Literatur

- BELCHER, S.E., JERRAM, N., HUNT, J.C.R.: 2003, Adjustment of a Turbulent Boundary Layer to a Canopy of Roughness Elements, *J. Fluid Mech.* 488, 369-398.
- DUPONT, S., BRUNET, Y.: 2008a, Edge Flow and Canopy Structure: A Large-Eddy Simulation Study, *Boundary-Layer Meteorology* 126(1), 51-71.
- DUPONT, S., BRUNET, Y.: 2008b, Impact of Forest Edge Shape on Tree Stability: A Large-Eddy Simulation Study, *Forestry Advance Access* published on March 22, 2008. doi:10.1093/forestry/cpn006
- FRANK, C., RUCK, B.: 2007, Windkanalstudie zur Strömung in Waldlichtungen, *Proc. 15. GALA-Fachtagung „Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik“*, Universität Rostock, Sept. 2007, 9.1-9.9
- GARDINER, B., STACEY, G.: 1996, Designing Forest Edges to Improve Wind Stability, Forestry Commission, Technical Paper 16, 8 p.
- 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, 233-252.
- GREEN, S.R., GRACE, J., HUTCHINGS, N.J.: 1995, Observations of Turbulent Air Flow in Three Stands of Widely Spaced Sitka Spruce, *Agricultural and Forest Meteorology* 74, 205-225.
- NOVAK, M.D., WARLAND, J.S., ORCHANSKY, A.L., KETLER, R., GREEN, S.: 2000, Wind Tunnel and Field Measurements of Turbulent Flow in Forests. Part I: Uniformly Thinned Stands, *Boundary-Layer Meteorology* 95, 457-495.