

Forschungsprogramm „Herausforderung Klimawandel“

Teilforschungsprojekt

„Strategien zur Reduzierung des Sturmschadensrisikos für Wälder“ (RESTER)

Unterprojekt

Verbesserung der Sturmstabilität von Waldbeständen

4. Interner RESTER – Workshop

22. September 2008

C. Frank & B. Ruck

Laboratorium für Gebäude- und Umweltaerodynamik

Institut für Hydromechanik, Universität Karlsruhe

Ziel

Untersuchung des Einflusses von verschiedenen Bestandseigenschaften auf die Sturmstabilität von Waldbeständen.

- Experimentelle Untersuchungen an statischen und dynamischen Bestandsmodellen in einem atmosphärischen Grenzschichtwindkanal und
- numerische Strömungsberechnungen (CFD, RANS – Modell).

Durchgeführte Arbeiten März – September 2008

Windkanaluntersuchungen

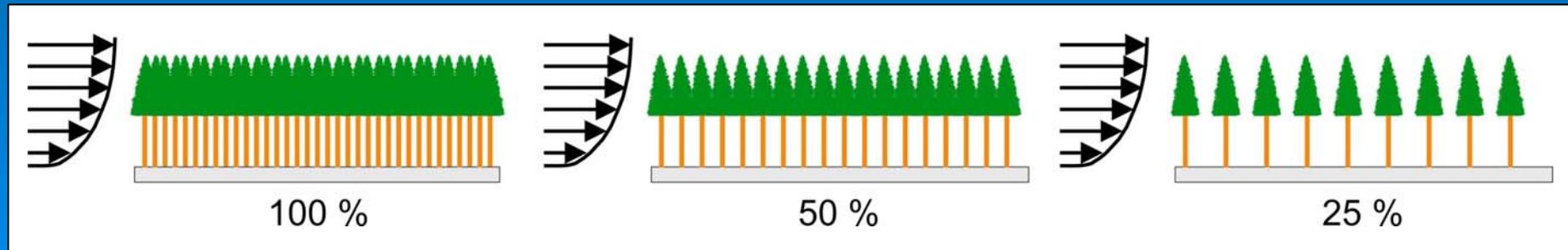
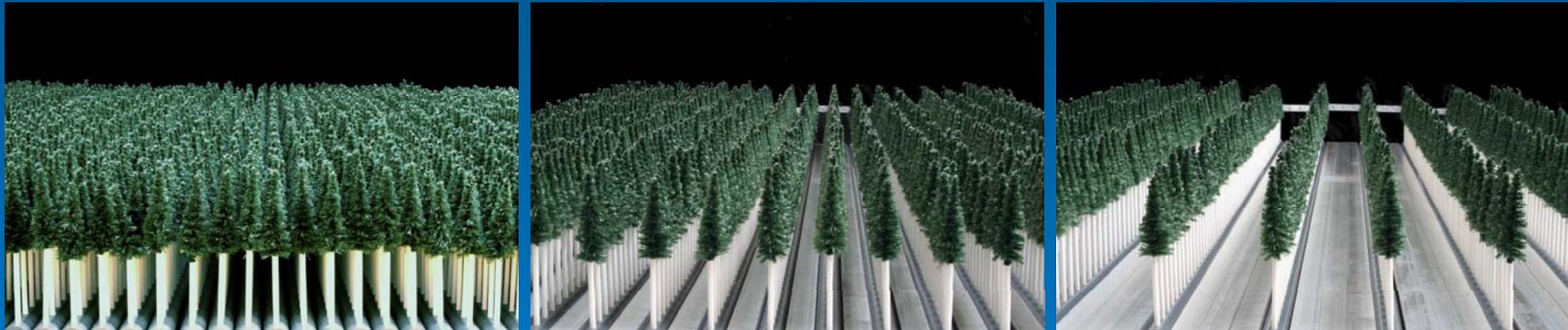
- Einfluss der Bestandsdichte bei gestaffelten Waldanordnungen, die sich aus lichten und dichten Teilbeständen unterschiedlicher Länge zusammensetzen (Ergebnisse siehe Zwischenbericht Juni 2008 und FRANK & RUCK 2008*)

Numerische Berechnungen

- Traufkantenform
- Hügel unterschiedlicher Hangneigung

* FRANK, C., RUCK, B.: 2008, Über den Einfluss der Bestandsdichte auf die Strömungsvorgänge an Waldkanten, *Proc. 16. GALA – Fachtagung „Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik“*, Sept. 2008, Karlsruhe, 40.1-40.10.

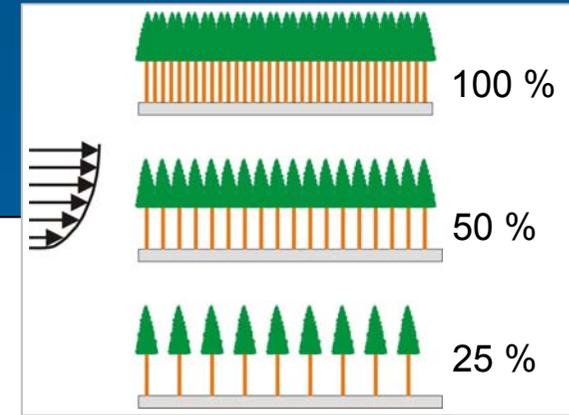
Einheitliche Waldbestände unterschiedlicher Bestandsdichte



	Bestandsdichte		ax/H	ay/H	Lw/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

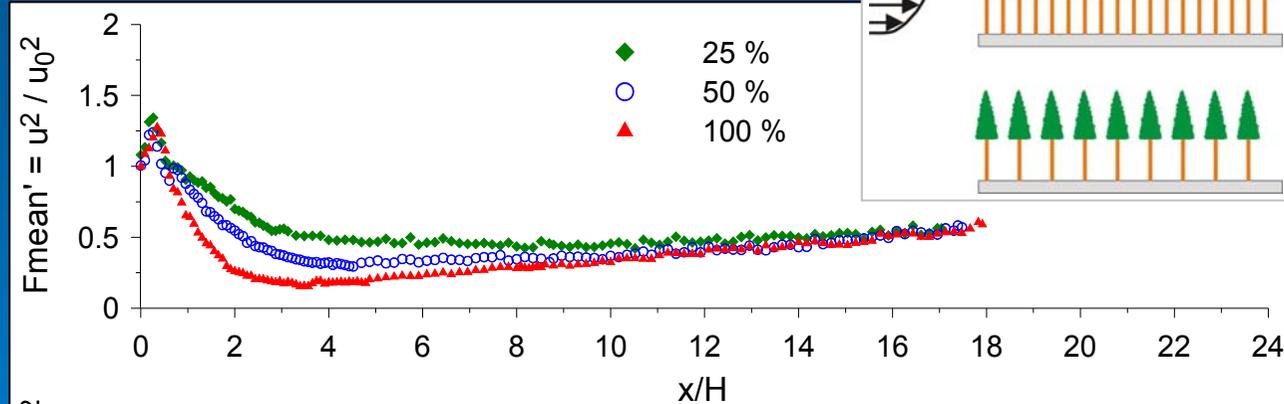
ax = Baumabstand in Hauptströmungsrichtung, ay = Baumabstand in lateraler Richtung
 Lw = Länge des Waldes, H = Bestandshöhe

Einheitliche Waldbestände: Windbelastung ($z/H = 1.13$)



Mittlere Belastung

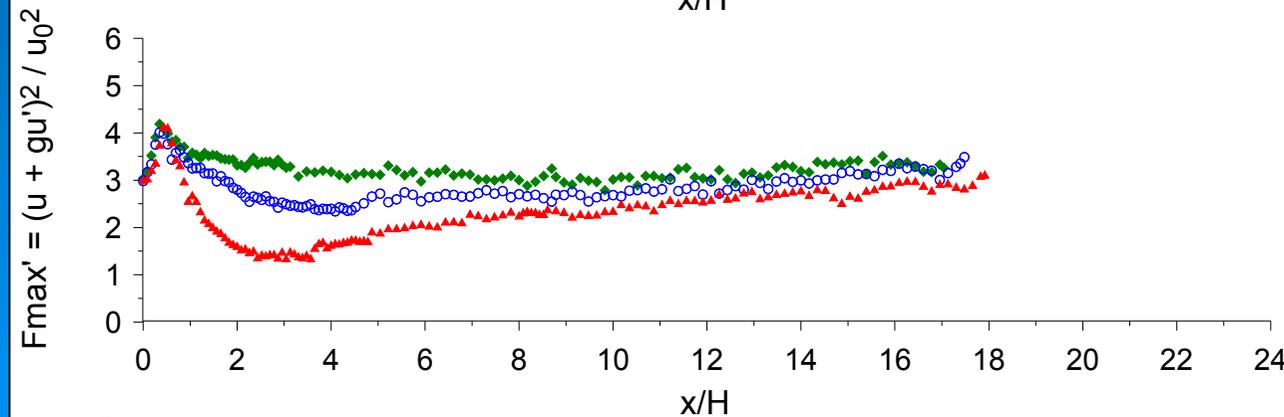
$$F_{\text{mean}} \propto u^2$$



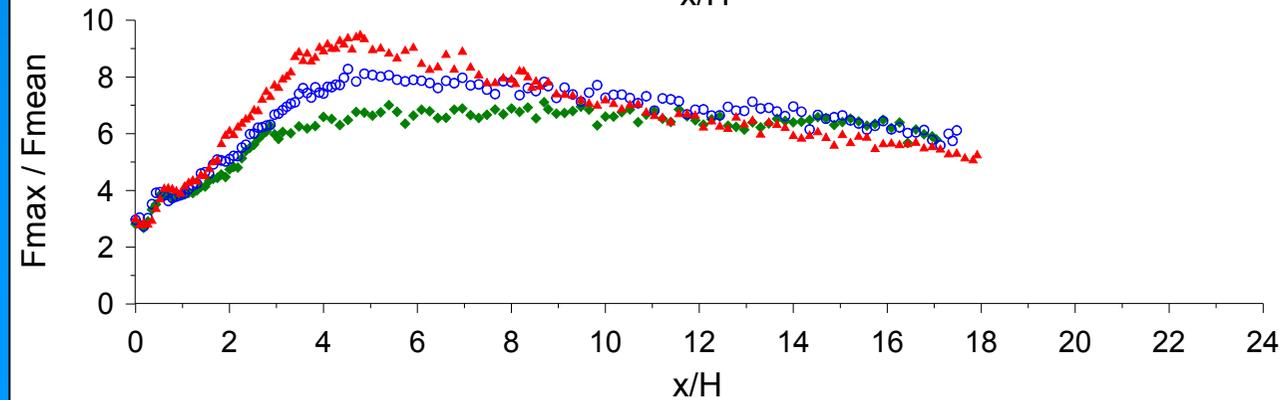
Maximale Belastung

$$F_{\text{max}} \propto (u + gu')^2$$

$$g = 3.5$$

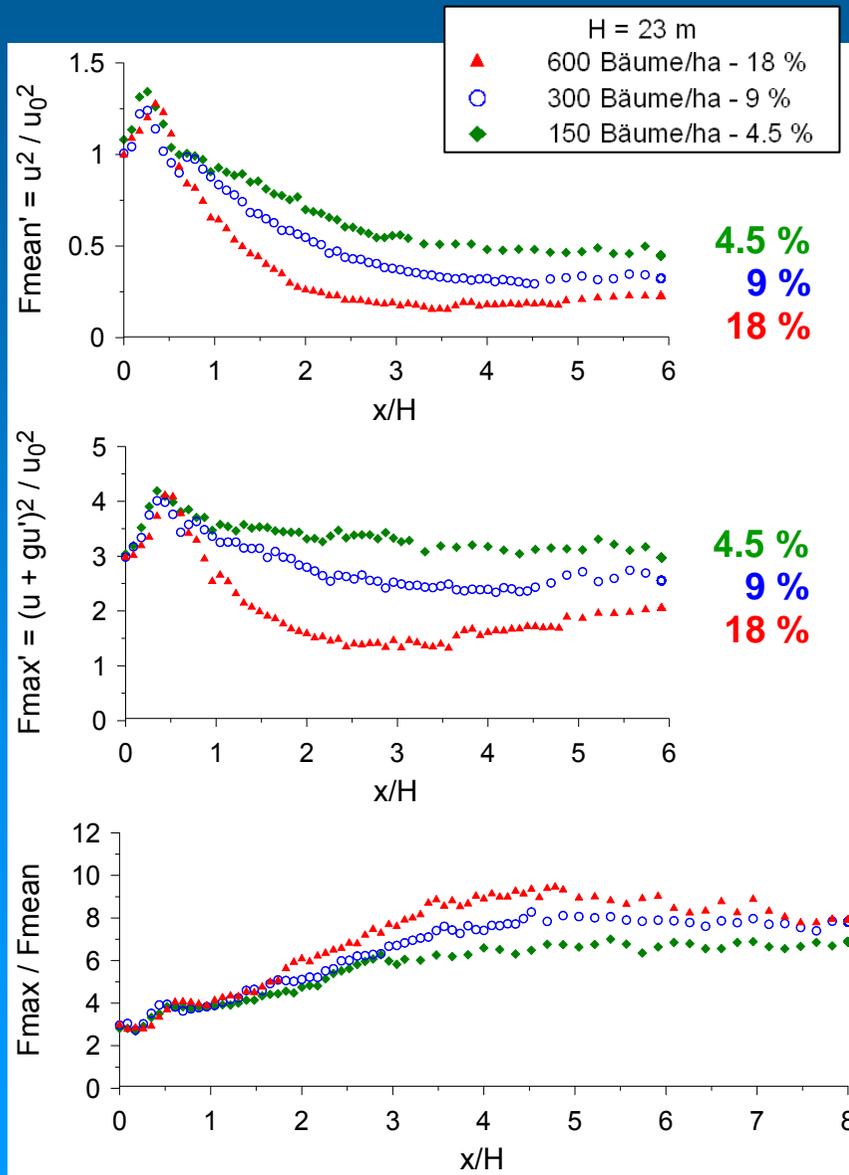


$F_{\text{max}} / F_{\text{mean}}$

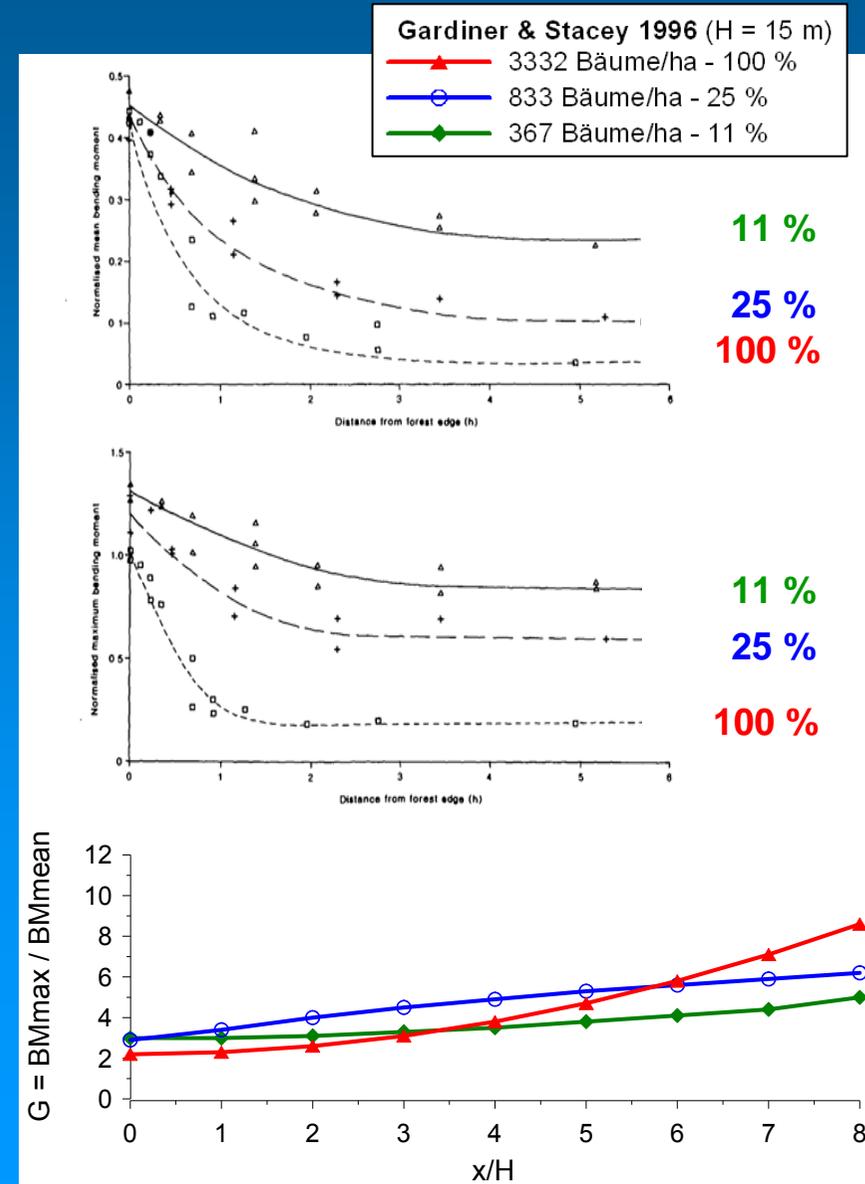


$$u_0 = 5.4 \text{ m/s}$$

Vergleich mit Literaturdaten: Windbelastung ($z/H = 1.13$)

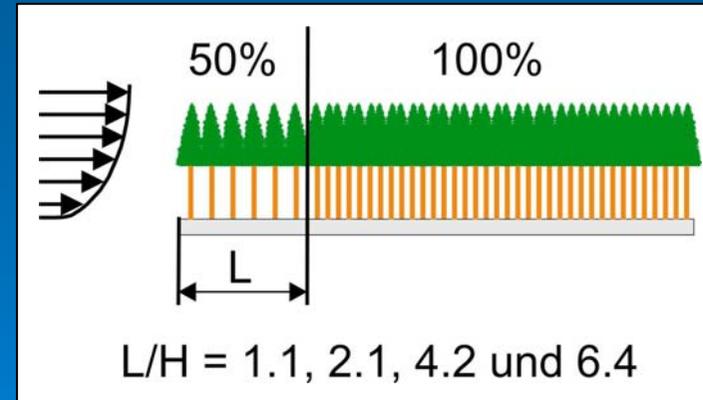
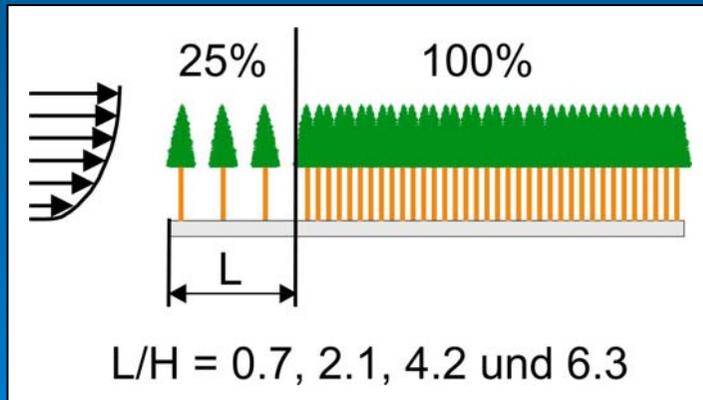


– Stammbiegemomente

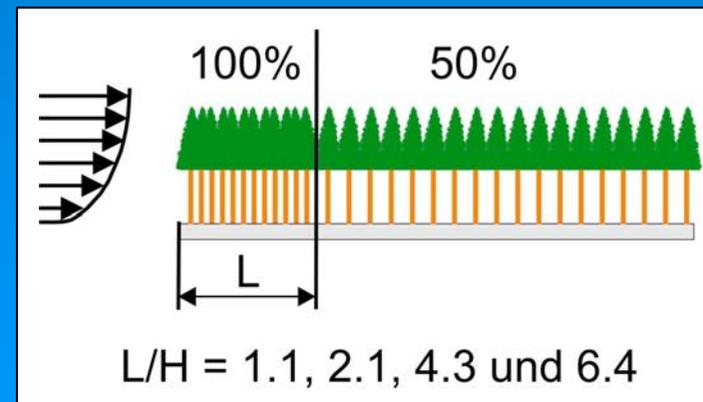
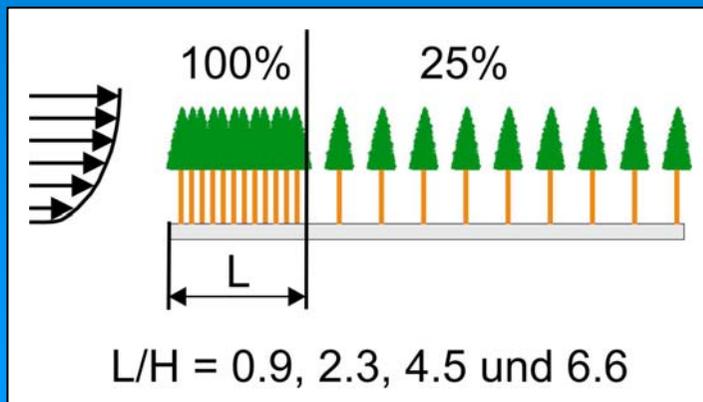


Gestaffelte Waldbestände

Typ „Licht – Dicht“



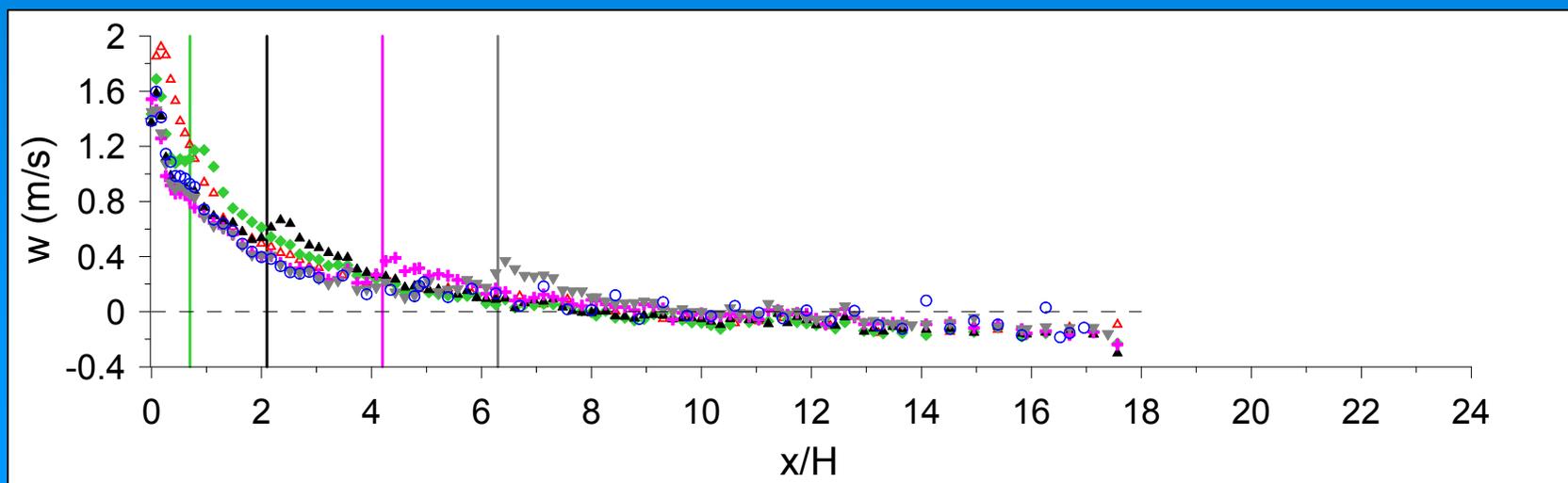
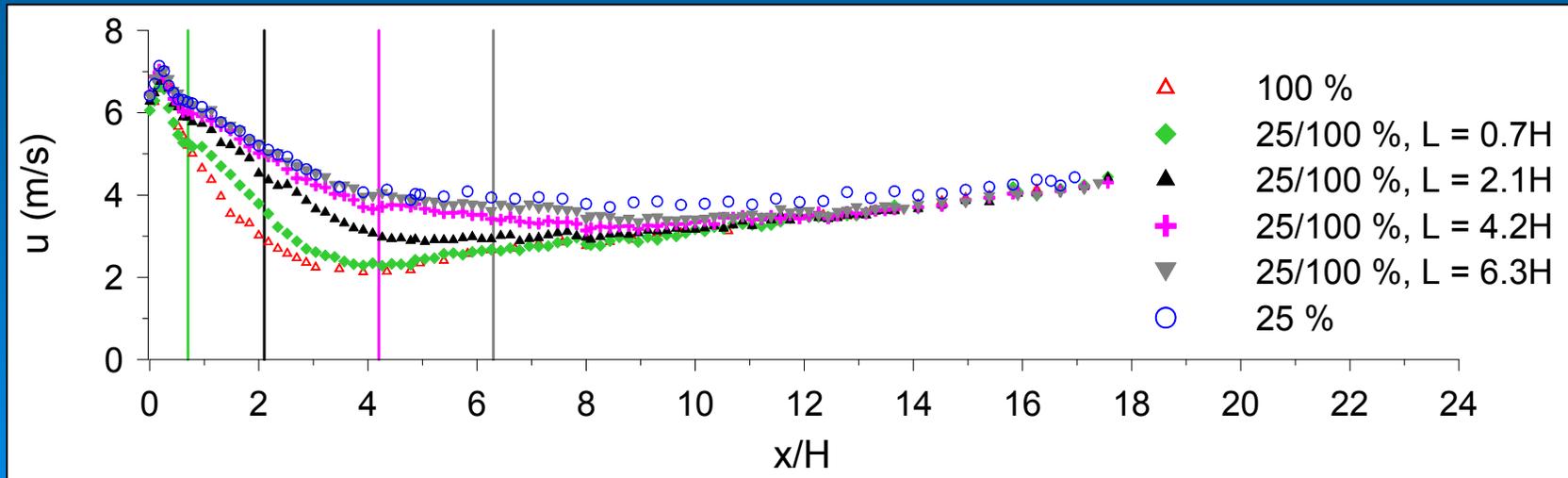
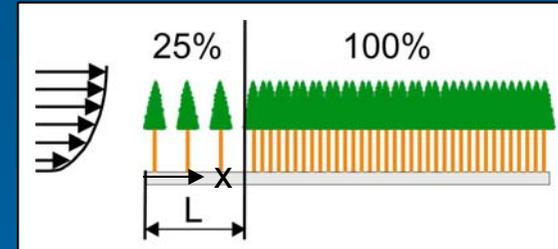
Typ „Dicht – Licht“



100 %: 600 Bäume/ha, 50 %: 300 Bäume/ha, 25 %: 150 Bäume/ha, H = Bestandshöhe

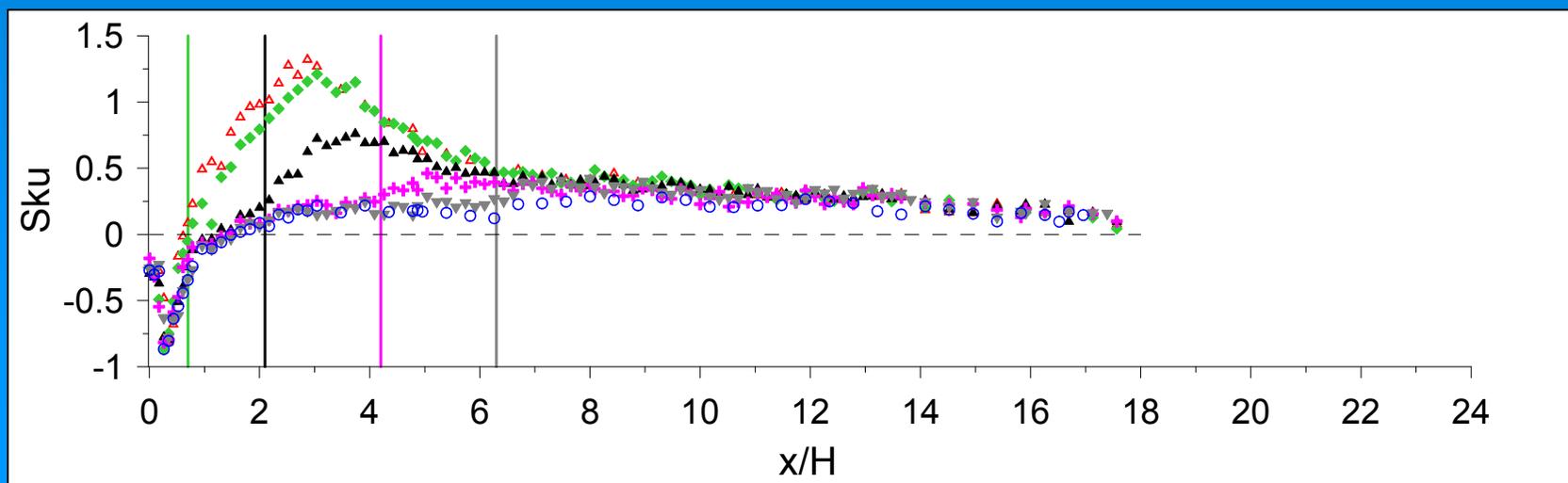
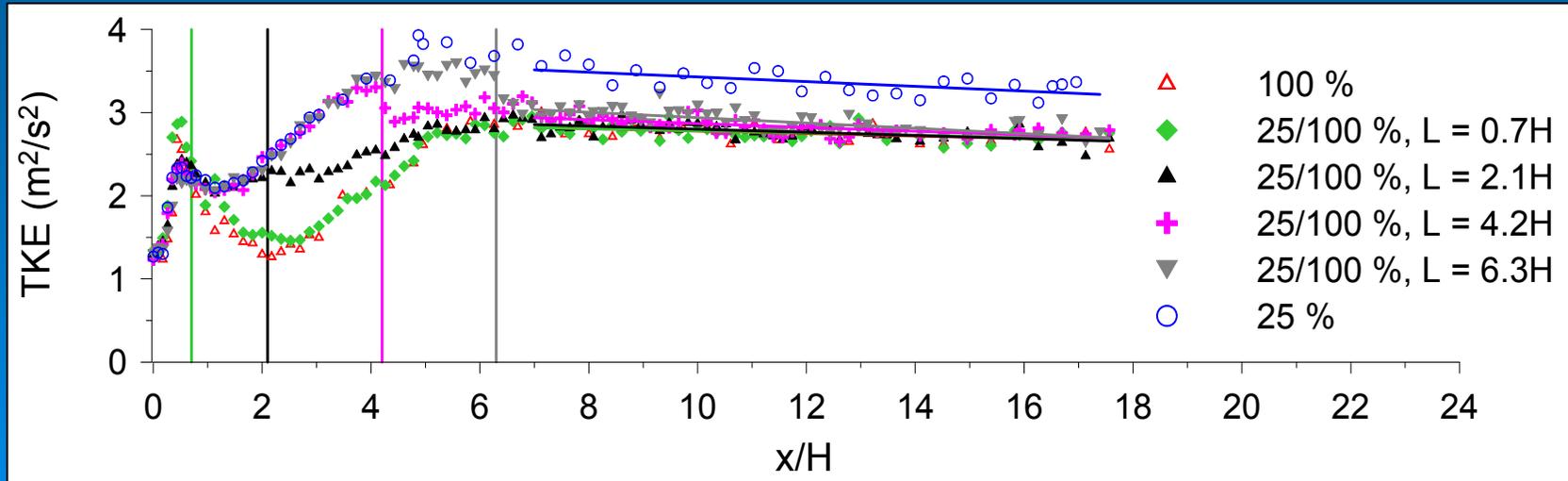
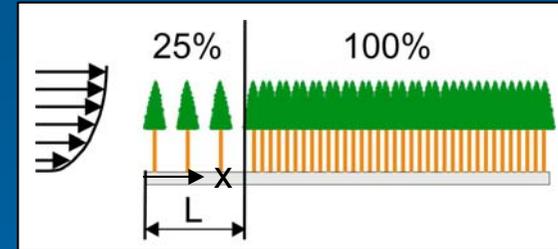
Gestaffelte Waldbestände Typ „Licht – Dicht“

($z/H = 1.13$)

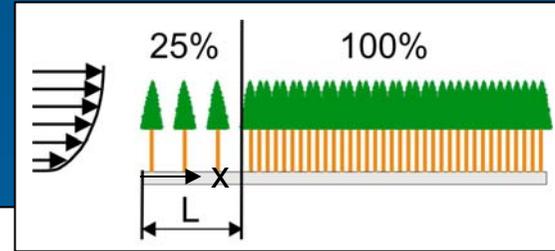


Gestaffelte Waldbestände Typ „Licht – Dicht“

($z/H = 1.13$)

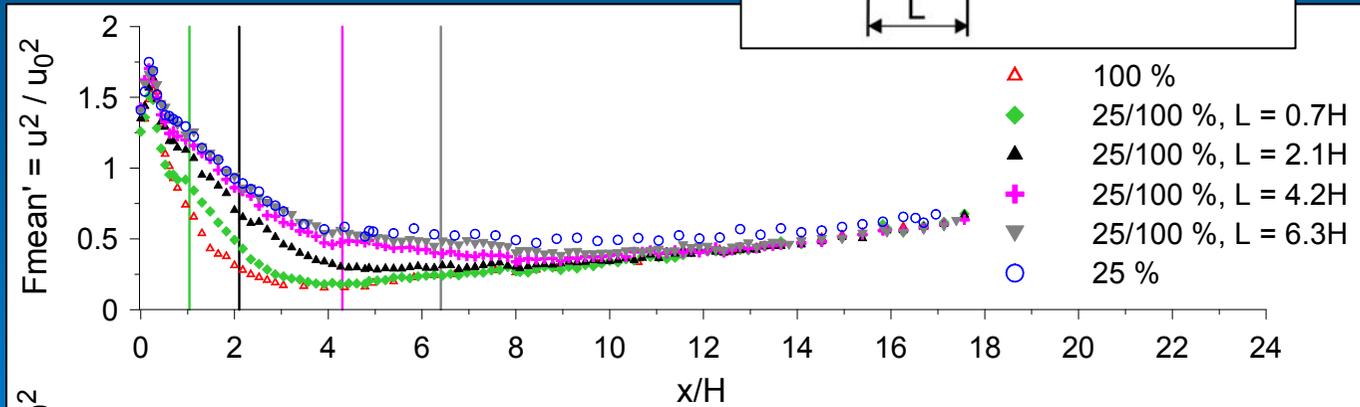


Windbelastung ($z/H = 1.13$)



Mittlere Belastung

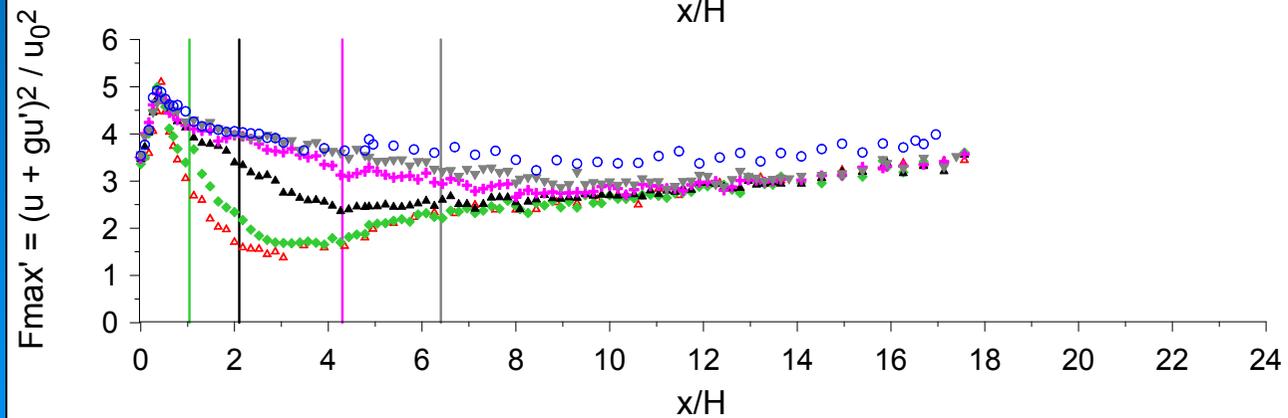
$$F_{\text{mean}} \propto u^2$$



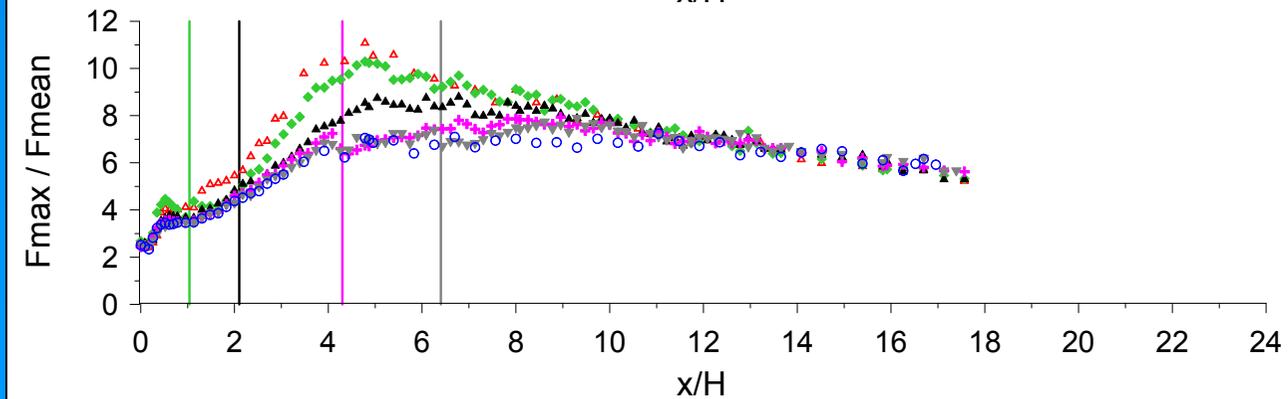
Maximale Belastung

$$F_{\text{max}} \propto (u + gu')^2$$

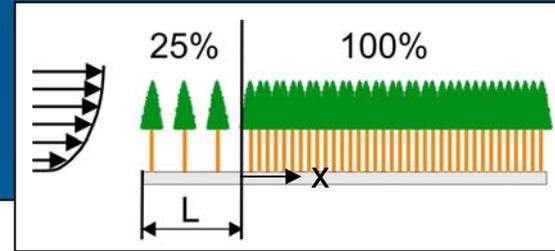
$$g = 3.5$$



$F_{\text{max}} / F_{\text{mean}}$

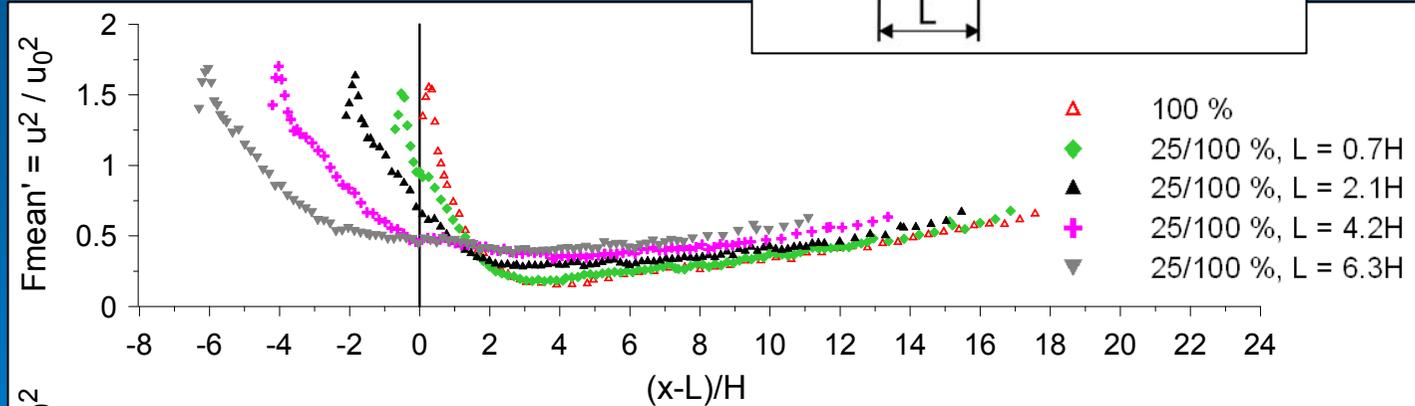


Windbelastung ($z/H = 1.13$)



Mittlere Belastung

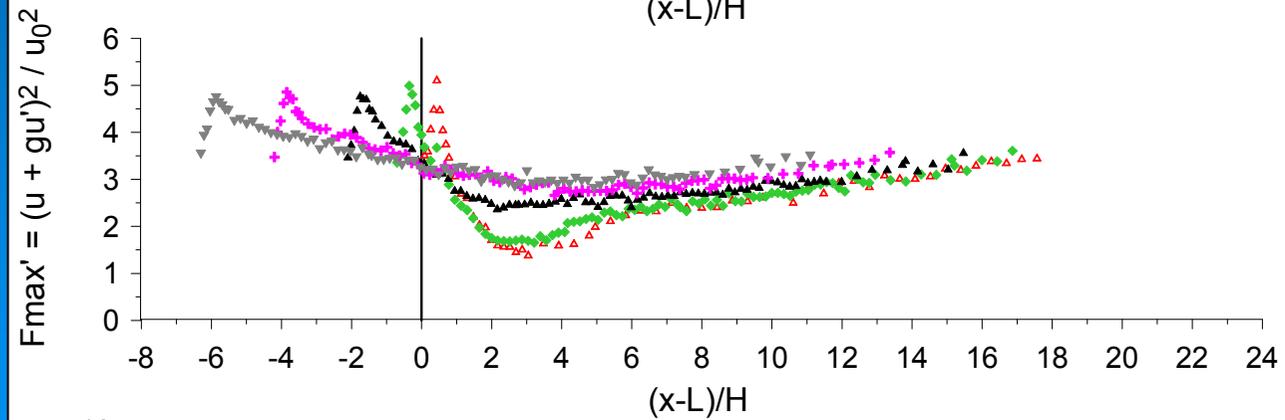
$$F_{\text{mean}} \propto u^2$$



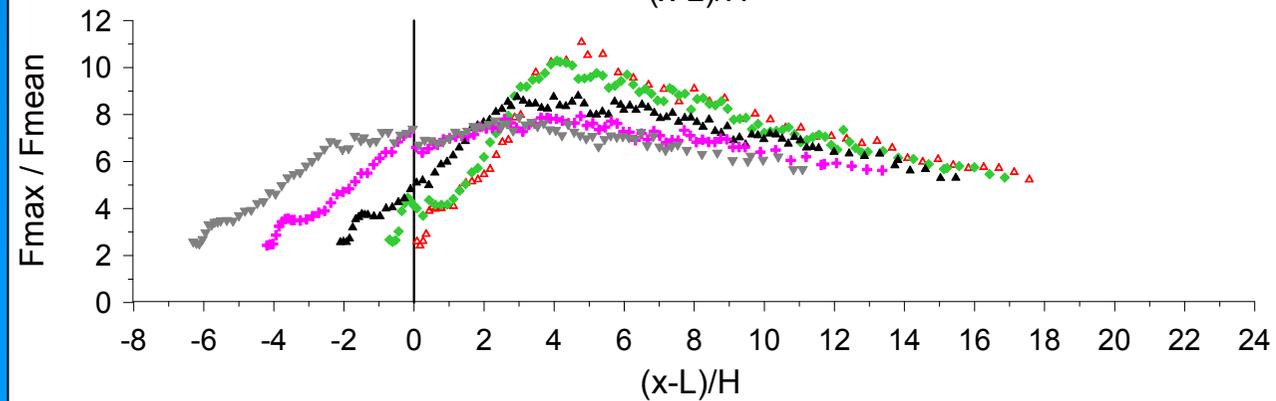
Maximale Belastung

$$F_{\text{max}} \propto (u + gu')^2$$

$$g = 3.5$$

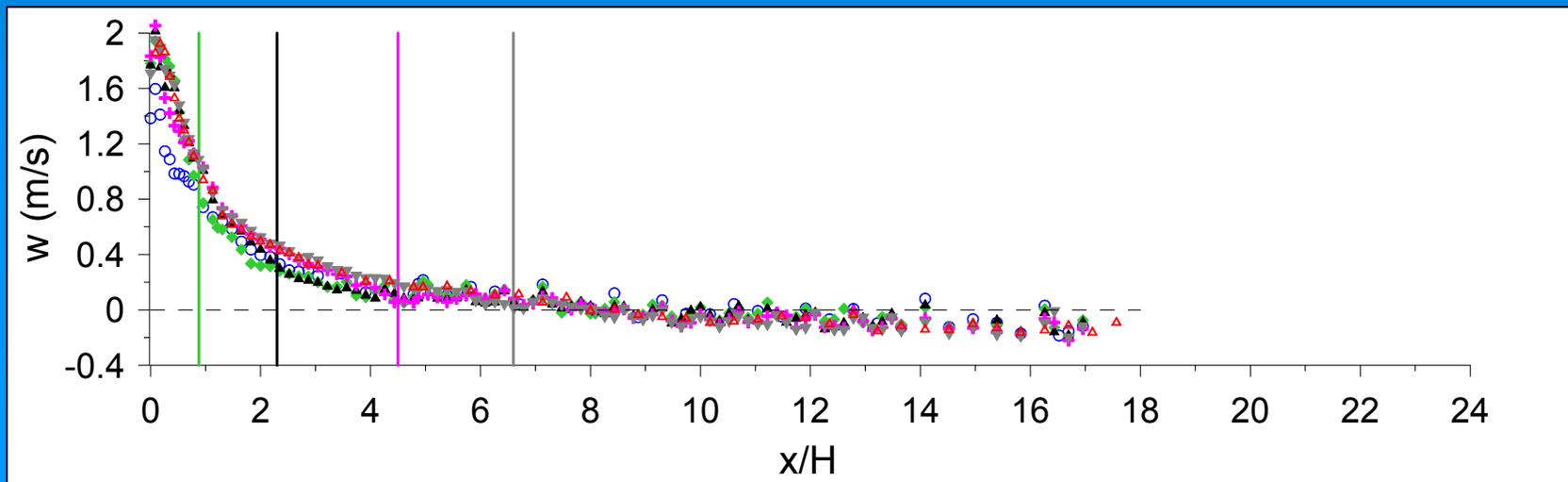
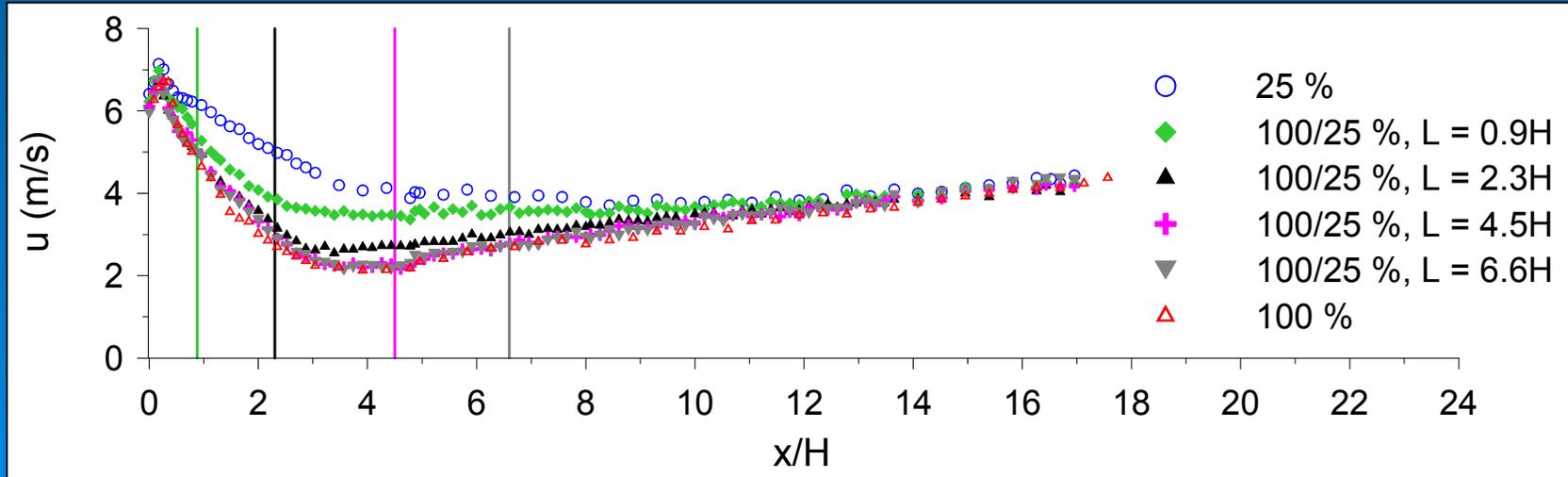
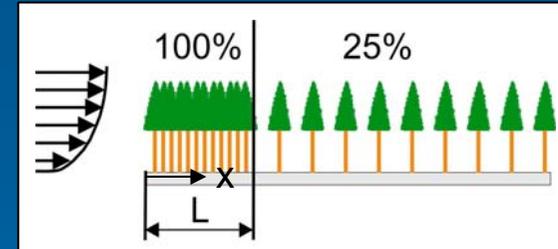


$F_{\text{max}} / F_{\text{mean}}$



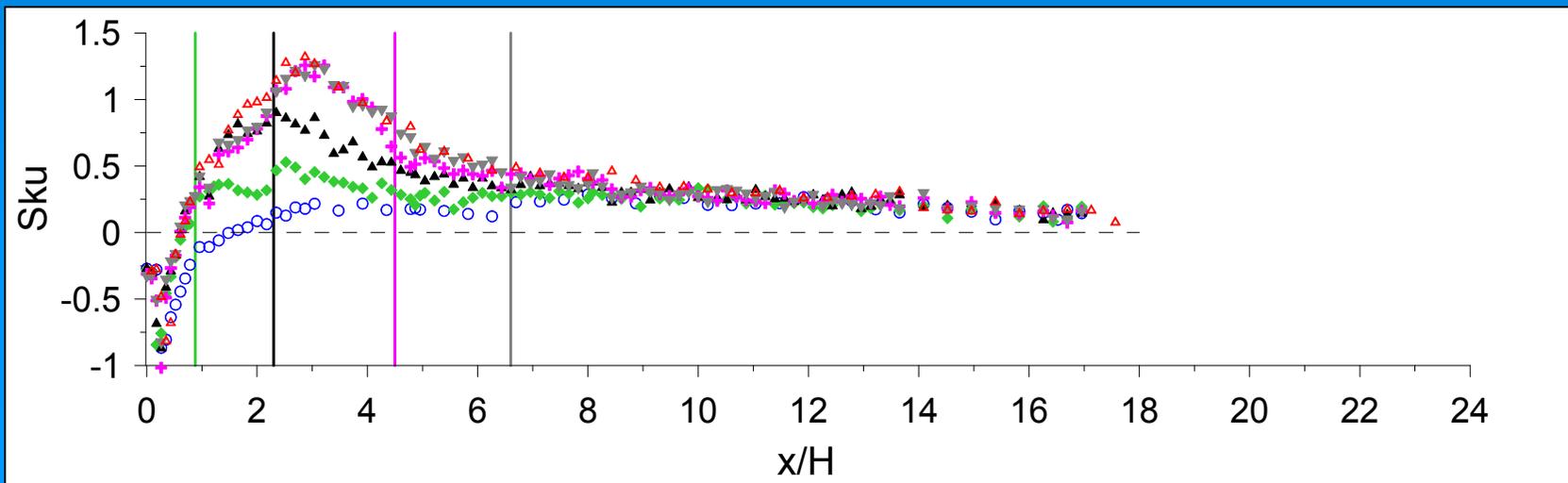
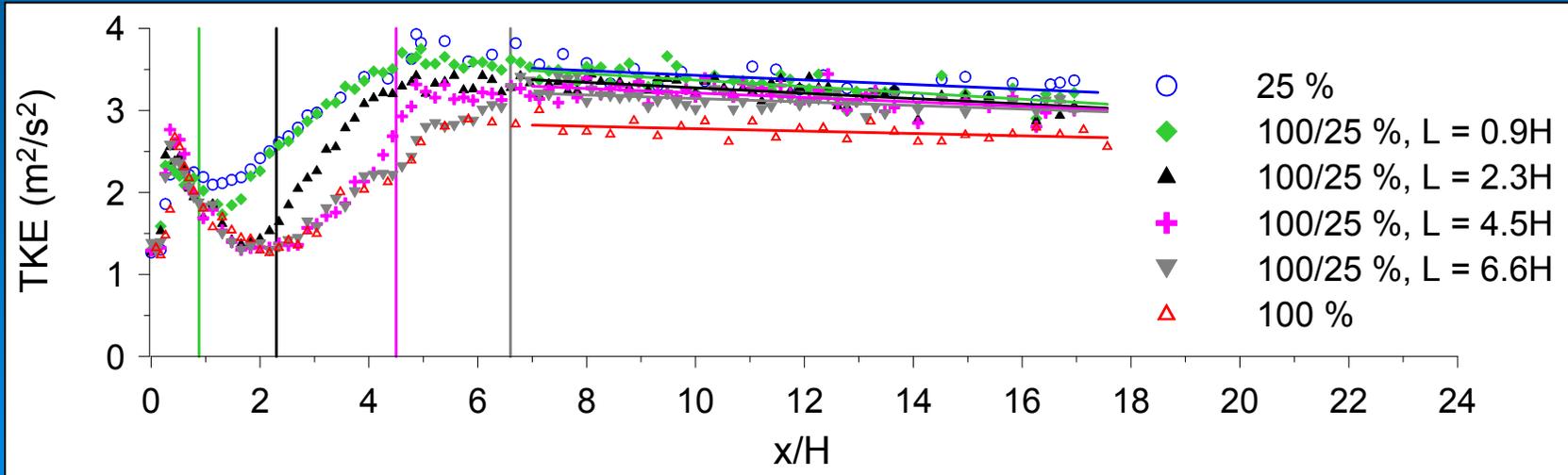
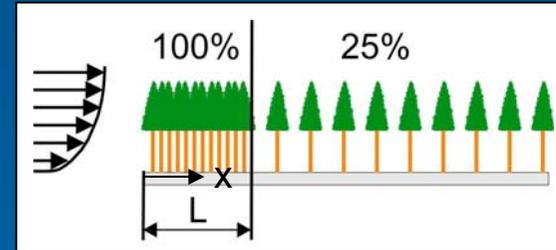
Gestaffelte Waldbestände Typ „Dicht – Licht“

($z/H = 1.13$)

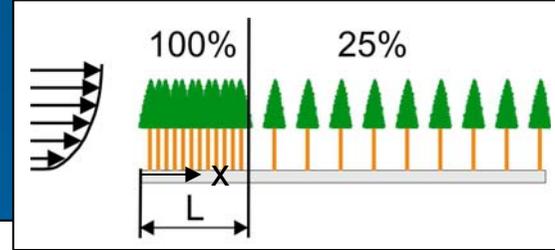


Gestaffelte Waldbestände Typ „Dicht – Licht“

($z/H = 1.13$)

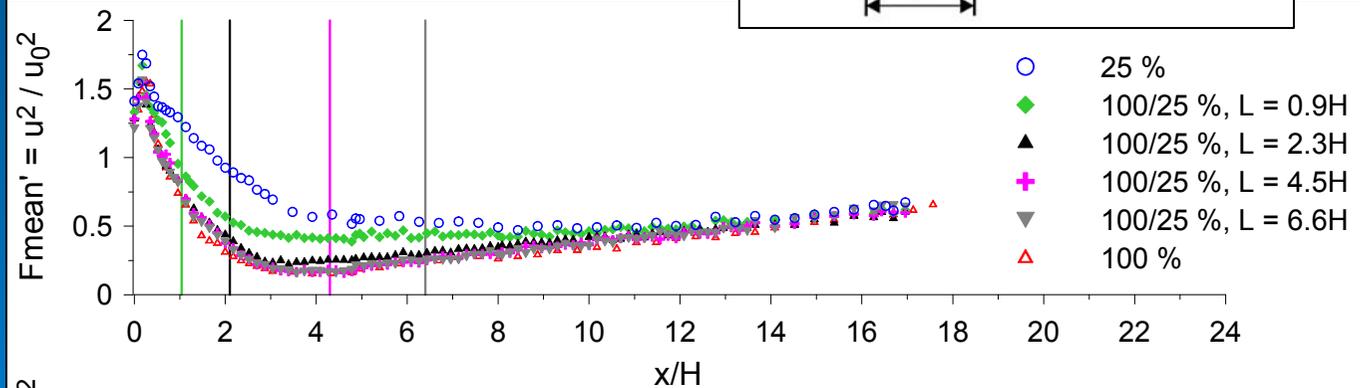


Windbelastung ($z/H = 1.13$)



Mittlere Belastung

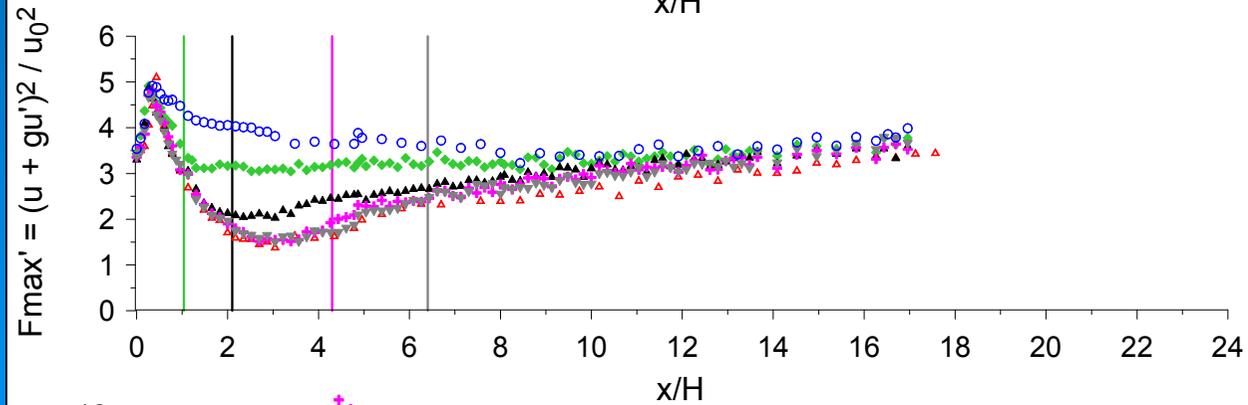
$$F_{\text{mean}} \propto u^2$$



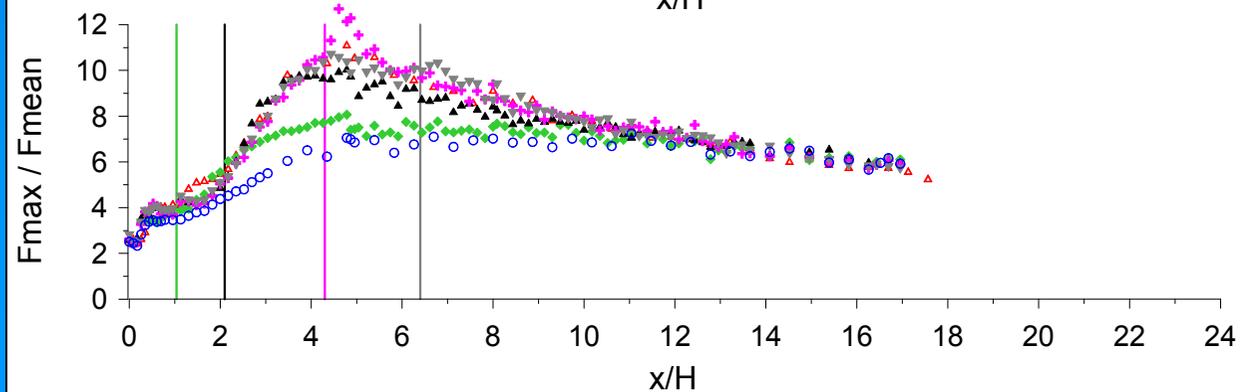
Maximale Belastung

$$F_{\text{max}} \propto (u + gu')^2$$

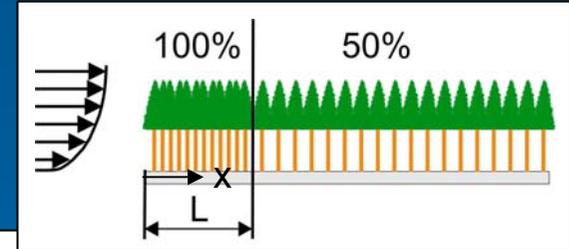
$$g = 3.5$$



$F_{\text{max}} / F_{\text{mean}}$



Vergleich mit Literaturdaten: Windbelastung ($z/H = 1.13$) – Stammbiegemomente



Mittlere Belastung

$$F_{\text{mean}} \propto u^2$$

$$* 350 \cdot Q_m$$

Maximale Belastung

$$F_{\text{max}} \propto (u + gu')^2$$

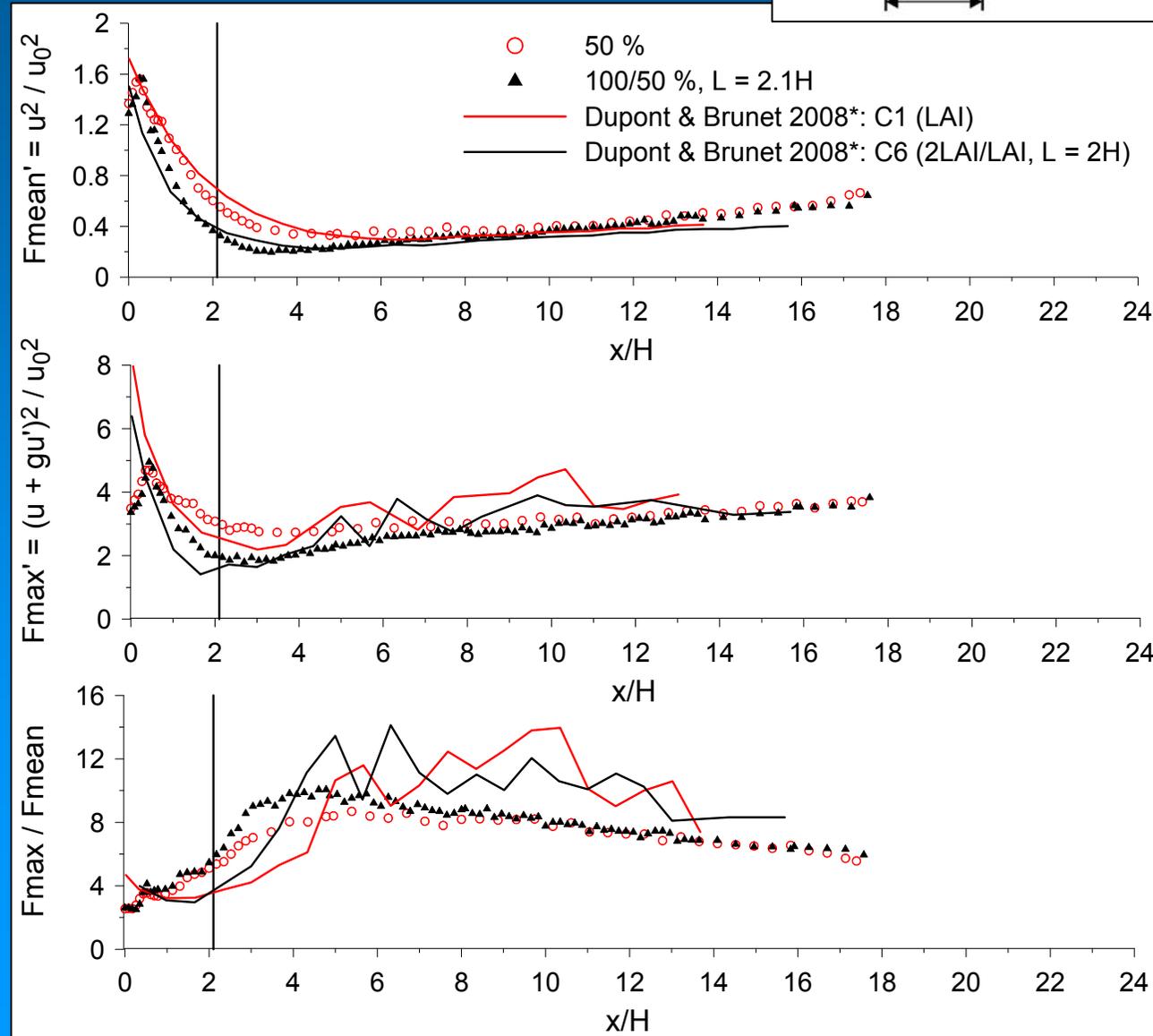
$$g = 3.5$$

$$* 350 \cdot Q_{\text{ex}}$$

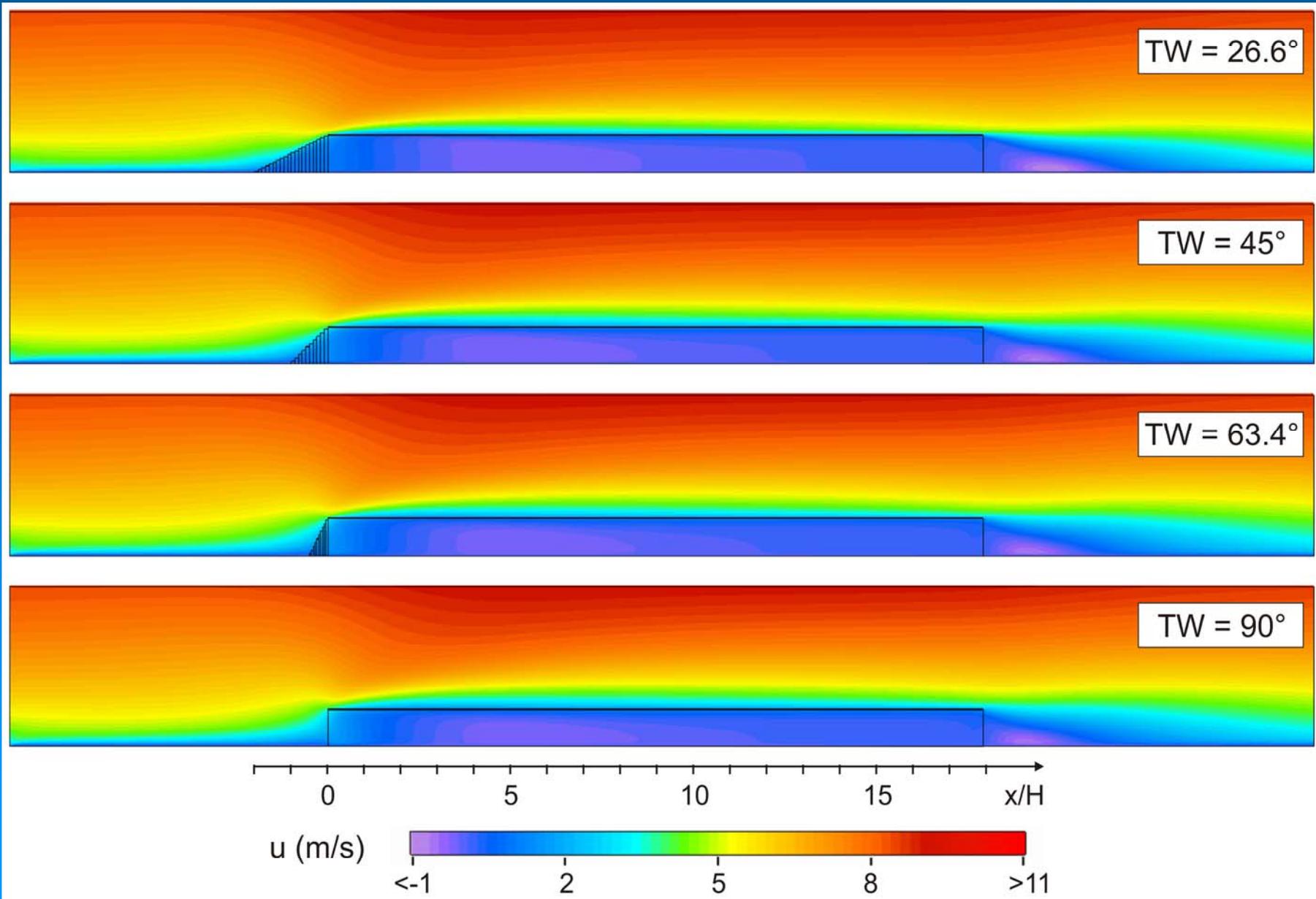
$F_{\text{max}} / F_{\text{mean}}$

$$* H = 18 \text{ m, LAI} = 2$$

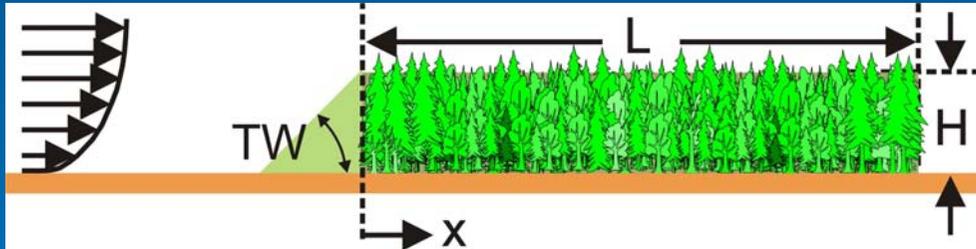
$$Q = BM / (\rho \cdot u_{\text{ref}}^2 \cdot H^3)$$



CFD: Einfluss der Traufkantenform



Einfluss der Traufkantenform auf den Verlauf des Biegemoments

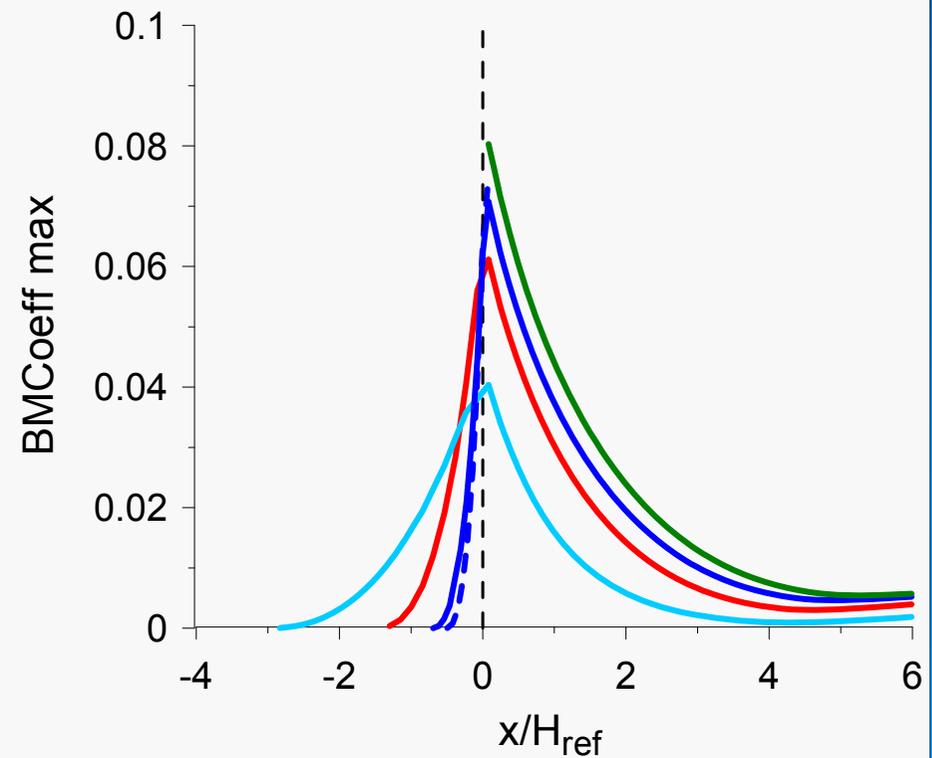
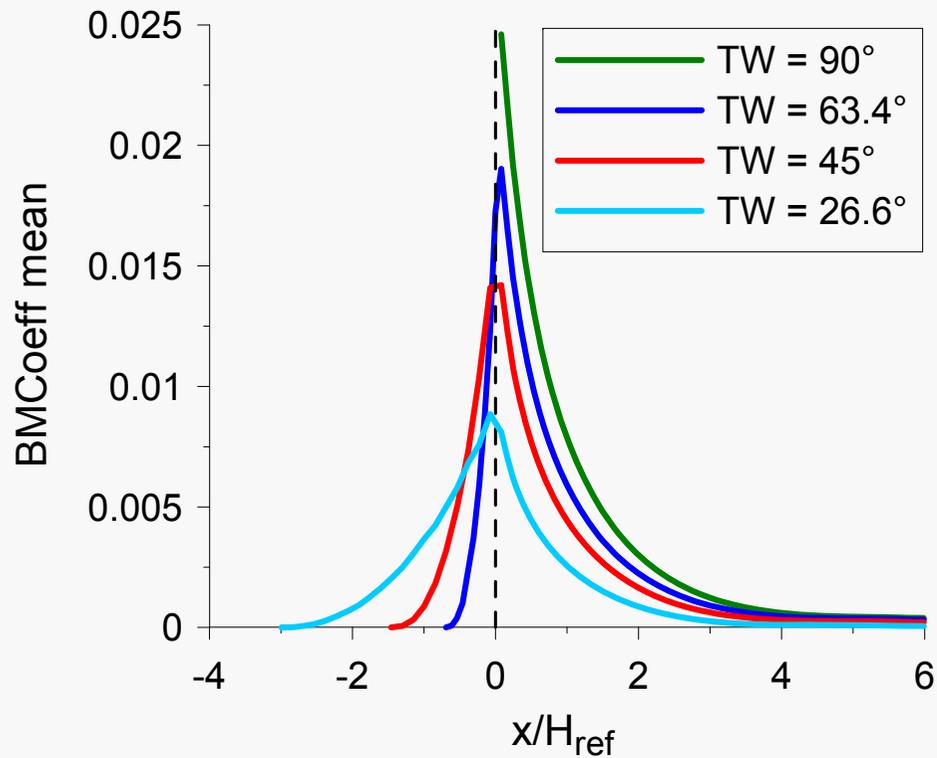


$$BM_{Coeff} = \frac{BM}{0.5 \cdot \rho \cdot u_{ref}^2 \cdot H_{ref}^3}$$

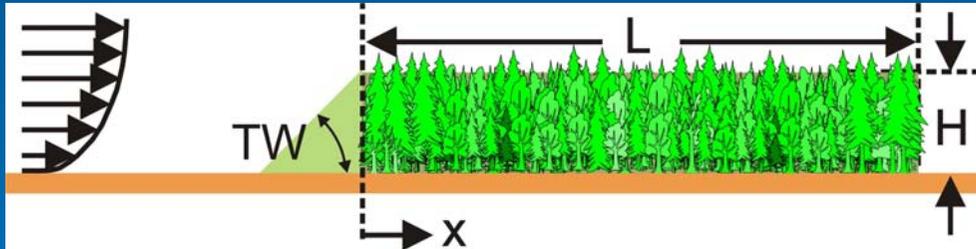
$u_{ref} = 6.7 \text{ m/s}$

$L = 412 \text{ m}$

$H = 23 \text{ m}, H_{ref} = 15 \text{ m}$



Einfluss der Traufkantenform auf den Verlauf des Biegemoments

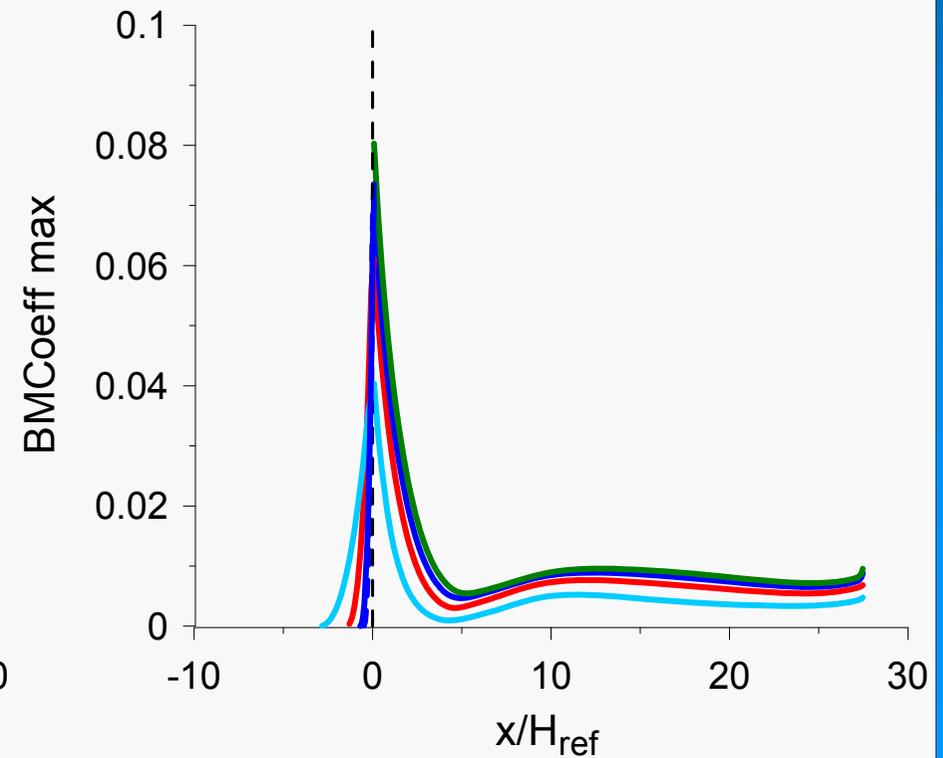
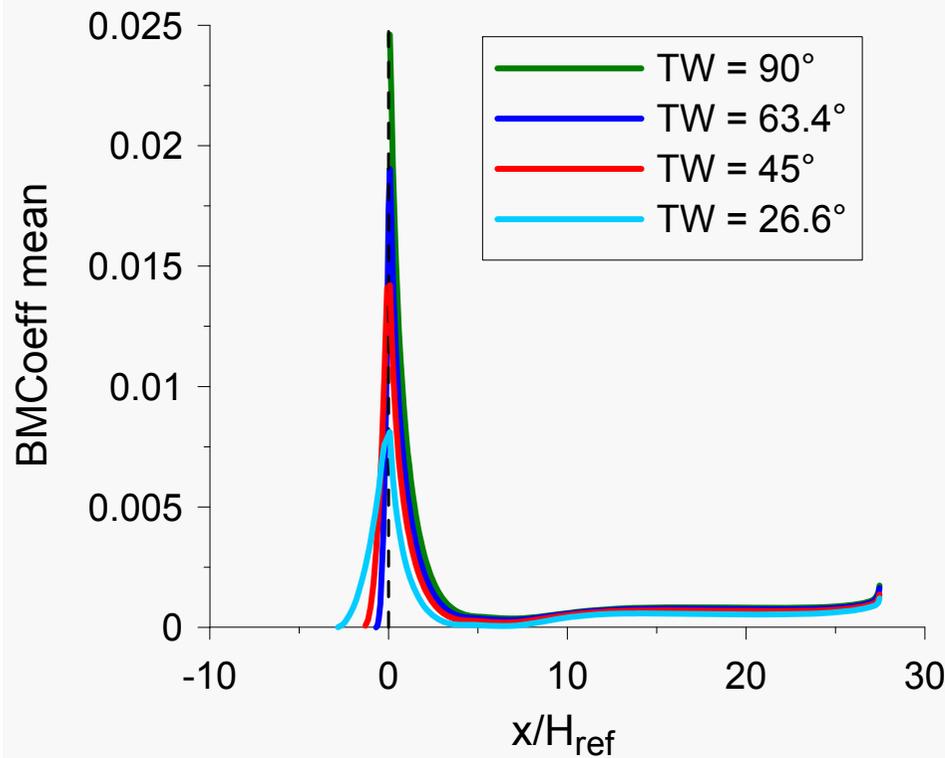


$$\text{BMCoeff} = \frac{\text{BM}}{0.5 \cdot \rho \cdot u_{\text{ref}}^2 \cdot H_{\text{ref}}^3}$$

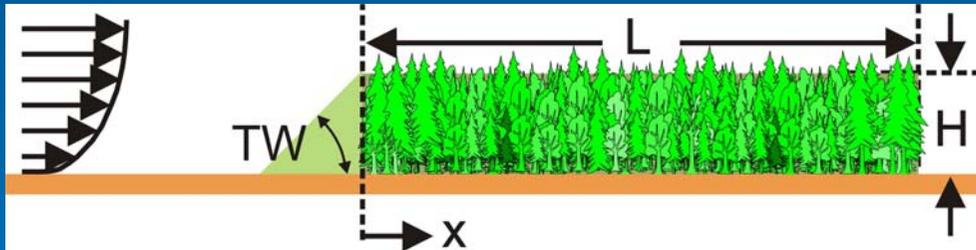
$u_{\text{ref}} = 6.7 \text{ m/s}$

$L = 412 \text{ m}$

$H = 23 \text{ m}, H_{\text{ref}} = 15 \text{ m}$



Einfluss der Traufkantenform auf den Verlauf des Biegemoments: Literaturvergleich



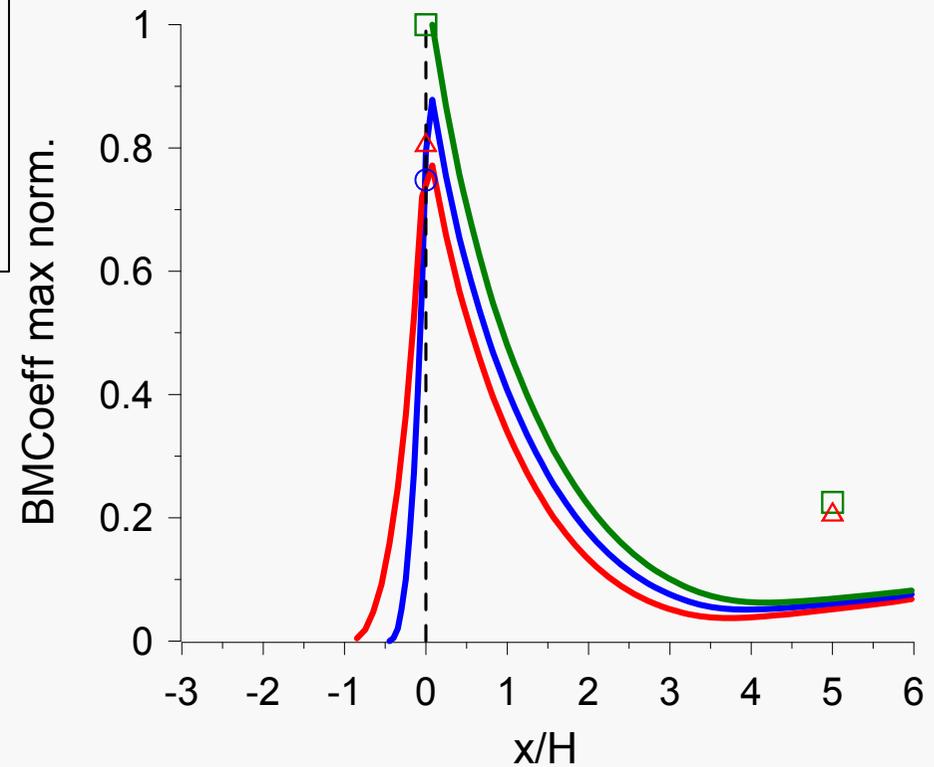
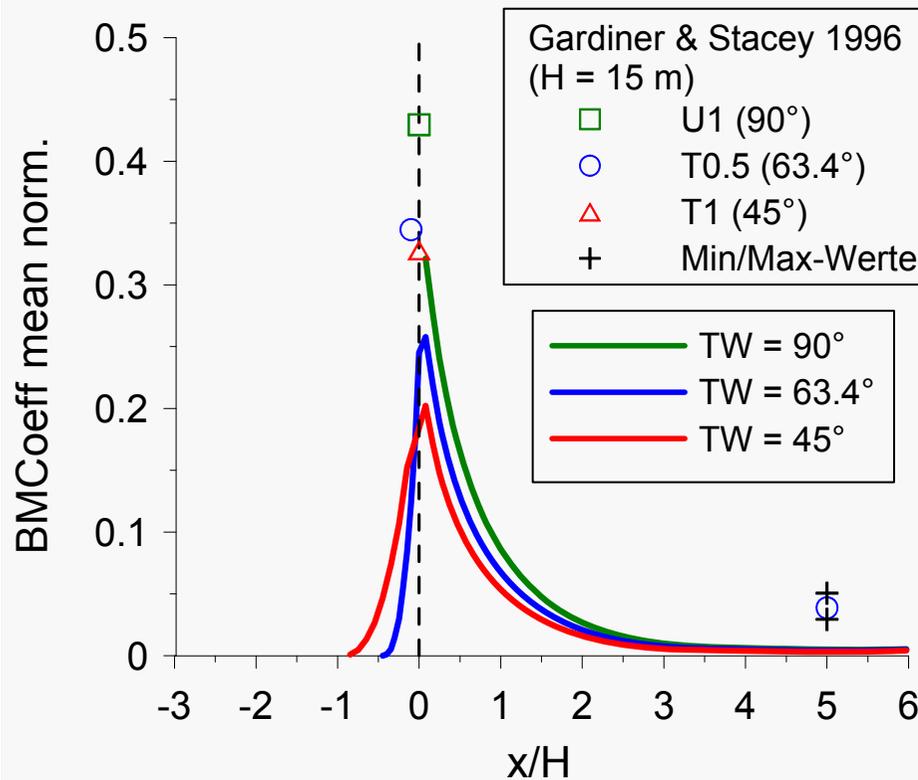
$$\text{BMCoeff} = \frac{\text{BM}}{0.5 \cdot \rho \cdot u_{\text{ref}}^2 \cdot H_{\text{ref}}^3}$$

$u_{\text{ref}} = 6.7 \text{ m/s}$

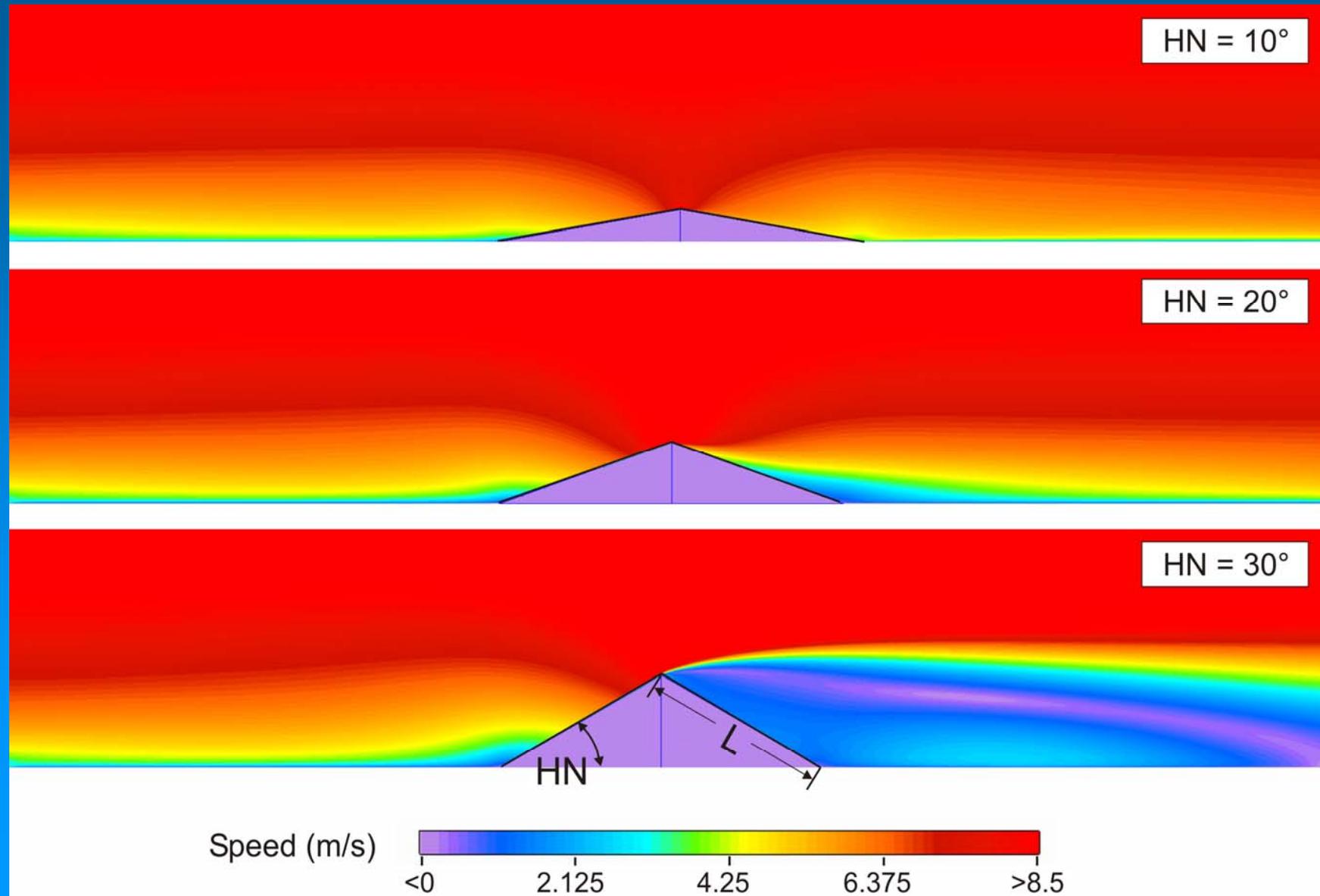
$L = 412 \text{ m}$

$H = H_{\text{ref}} = 15 \text{ m}$

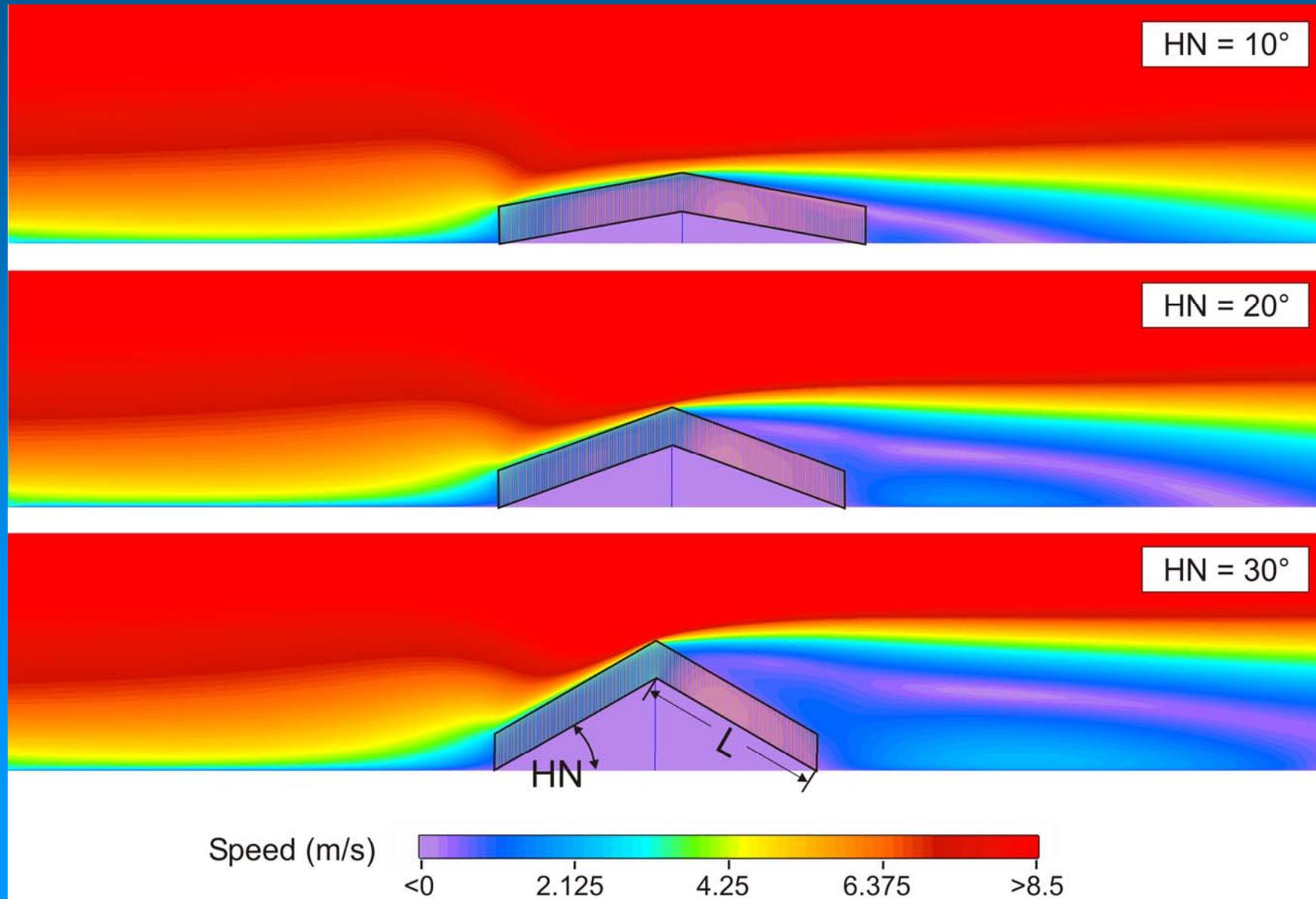
BMCoeff normiert mit BMCoeff max (TW = 90° bei x/H = 0)



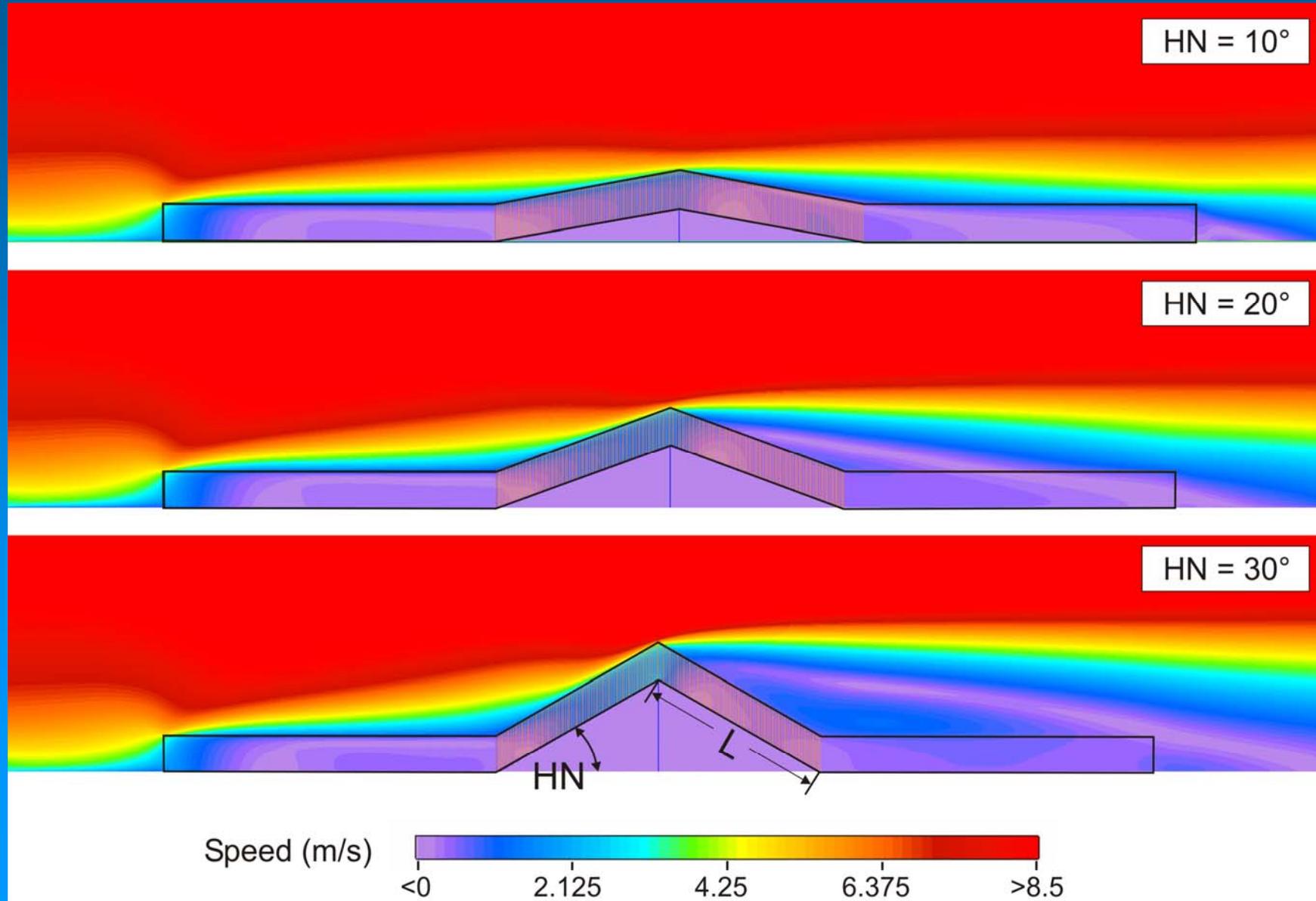
CFD: Hügel unterschiedlicher Neigung ($L = 115 \text{ m}$)



CFD: Hügel unterschiedlicher Neigung ($L = 115 \text{ m}$)

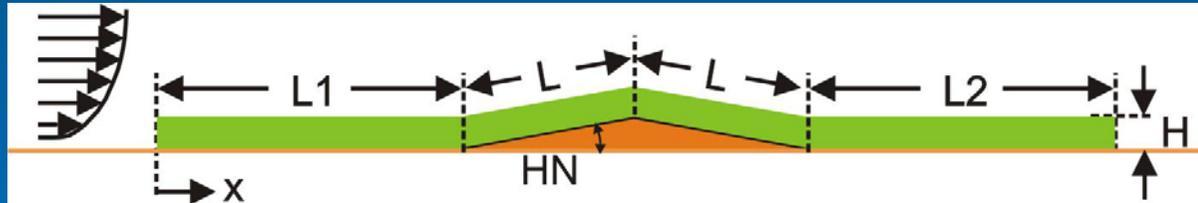


CFD: Hügel unterschiedlicher Neigung ($L = 115$ m)



CFD: Hügel unterschiedlicher Neigung (L = 115 m)

$$\text{BMCoeff} = \frac{\text{BM}}{0.5 \cdot \rho \cdot u_{\text{ref}}^2 \cdot H_{\text{ref}}^3}$$

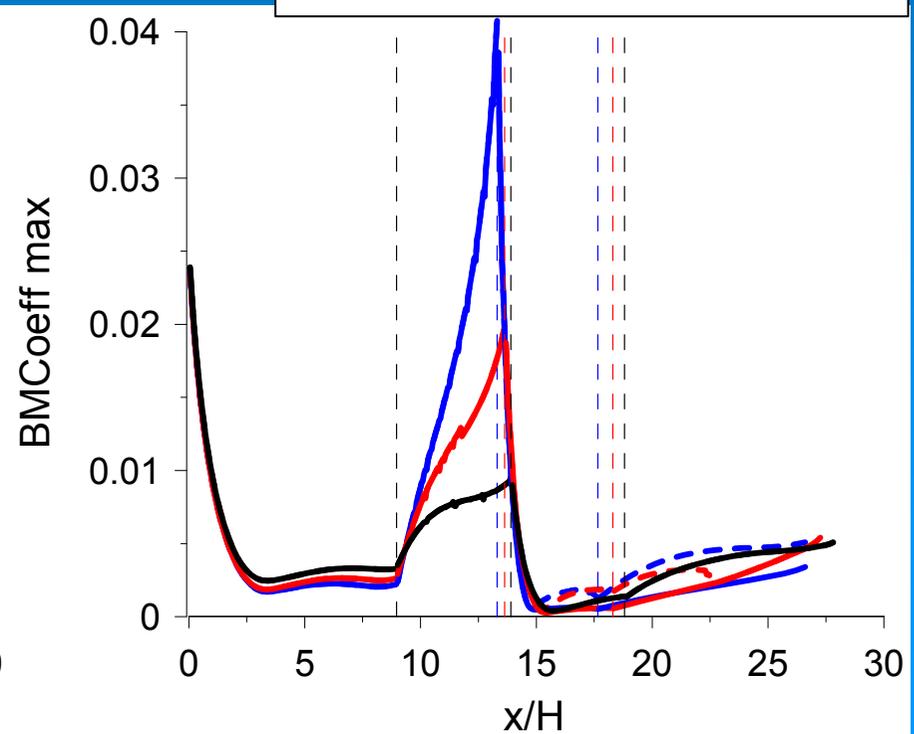
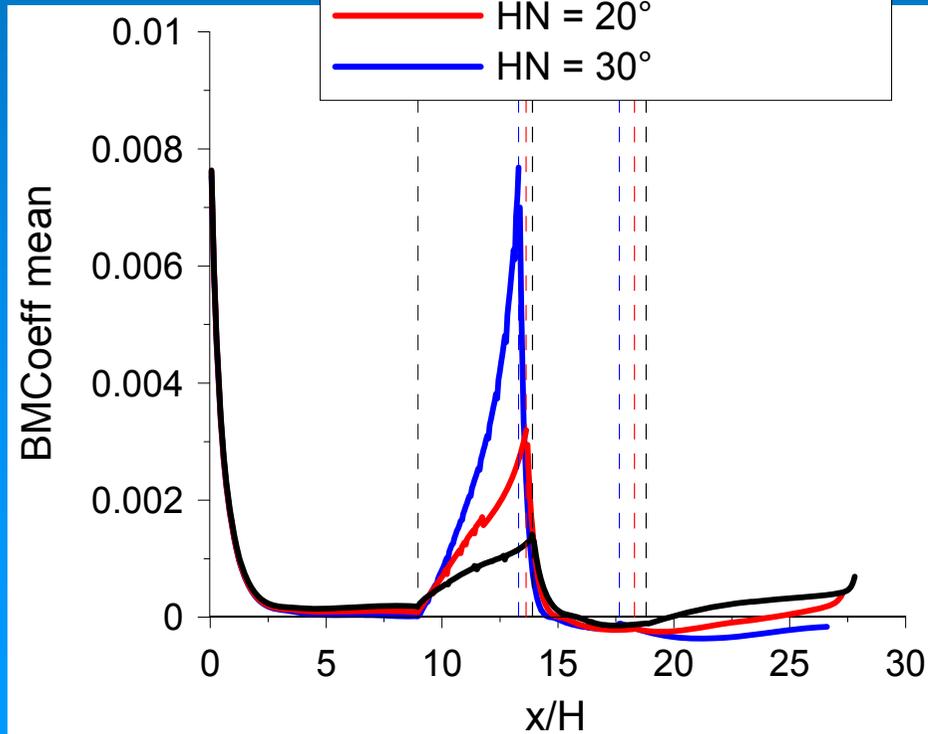


$u_{\text{ref}} = 6.7 \text{ m/s}$
 $H = H_{\text{ref}} = 23 \text{ m}$

Wald - bewaldeter Hügel - Wald
(L1 = L2 = 206 m, L = 115 m)

- HN = 10°
- HN = 20°
- HN = 30°

--- B1: $u' > 0$
--- B2: Vorzeichen u' wie u
— B3: Max(Betrag(B1, B2))



Zusammenfassung

Der Einfluss der Bestandsdichte auf die Strömungsvorgänge über Waldbeständen wurde für einheitliche und gestaffelte Waldanordnungen experimentell erfasst. Die Ergebnisse zeigen, dass

- bei Wäldern mit einheitlichem Bestandsaufbau sowohl die mittlere als auch die maximale Windbelastung über der luvseitigen Bestandshälfte mit abnehmender Bestandsdichte deutlich ansteigen. Die Böigkeit und das F_{max}/F_{mean} -Verhältnis nehmen im Gegensatz dazu merklich ab.
- die Kurven der gestaffelten Anordnungen (F_{mean} , F_{max} und F_{max}/F_{mean}) zwischen denen der entsprechenden einheitlichen Waldanordnungen verlaufen.
- bei den untersuchten Staffelanordnungen des Typs „Licht – Dicht“ mit zunehmender Länge des lichten Bestands über der luvseitigen Bestandshälfte ein Anstieg bei der mittleren und maximalen Windbelastung und eine Abnahme bei der Böigkeit und dem F_{max}/F_{mean} -Verhältnis zu beobachten ist. Bei Staffelanordnungen des Typs „Dicht – Licht“ verhält es sich umgekehrt: Mit zunehmender Länge des dichten Bestandes nimmt die mittlere und maximale Windbelastung ab und die Böigkeit und das F_{max}/F_{mean} -Verhältnis zu.

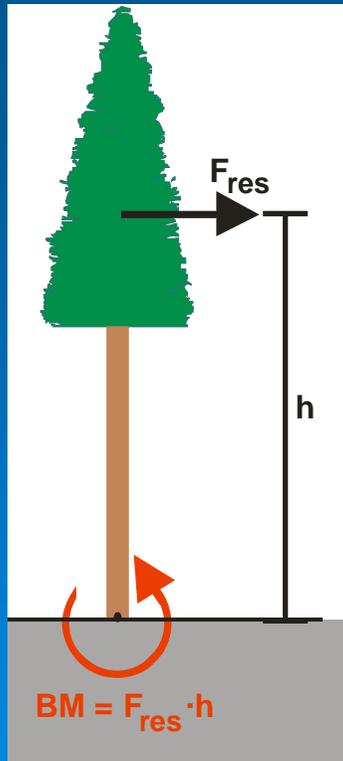
Zusammenfassung

Der Einfluss des Traufkantenwinkels sowie der Hangneigung von zweidimensionalen, dreieckförmigen Hügeln konstanter Hanglänge (Hügelhöhe variabel) auf den Stammbiegemomentenverlauf wurde numerisch erfasst. Die Ergebnisse zeigen, dass

- mit abnehmendem Traufkantenwinkel die mittleren und maximalen Biegemomente insbesondere im Kantenbereich abnehmen.
- mit zunehmender Hangneigung die mittleren und maximalen Biegemomente insbesondere am Gipfel der Hügel deutlich ansteigen.
- die höchsten maximalen Biegemomente bei steilen Hügeln (Hangneigung $HN = 30^\circ$) am Gipfel und bei den flacheren Hügeln ($HN = 10^\circ$ bzw. 20°) an der luvseitigen Waldkante auftreten.

Ausblick

- CFD-Berechnung von Hügeln unterschiedlicher Hangneigung und konstanter Hügelhöhe
- Weitere Windkanaluntersuchungen: Variation von Traufkantenwinkel, Bestandshöhe



Bestimmung Stammbiegemomente

Mittlere und maximale Biegemomente BM werden aus den numerisch (mit dem Programmpaket FLOVENT) berechneten Strömungsgrößen abgeleitet

$$BM \text{ mean} = \sum_{i=1}^n 0.5 \cdot \rho \cdot u_i \cdot |u_i| \cdot c_d \cdot a \cdot A(z_i) \cdot dz_i \cdot z_i$$

$$BM \text{ max} = \sum_{i=1}^n 0.5 \cdot \rho \cdot (u_i + g u'_i) \cdot (|u_i| + g |u'_i|) \cdot c_d \cdot a \cdot A(z_i) \cdot dz_i \cdot z_i$$

und in Form dimensionsloser Biegemomentenkoeffizienten dargestellt

$$BMCoeff = \frac{BM}{0.5 \cdot \rho \cdot u_{ref}^2 \cdot H_{ref}^3}$$

- u_i = mittlere horizontale Geschwindigkeit
- g = Böenfaktor ($g = 1.5$)
- u'_i = Standardabweichung der horizontalen Geschwindigkeit
Ann.: Isotrope Turbulenz ($u' = 0.82 \cdot TKE^{0.5}$)
- $A(z_i)$ = Grundfläche eines Baums,
Ann.: Vertikal homogener Aufbau ($A = 1.73 \times 1.73 \text{ m}^2$)
- ρ = Dichte der Luft
- $c_d \cdot a = k_r = 0.8 \text{ m}^{-1}$
- dz_i = Höhe Gitterzelle
- z_i = Hebelarm
- Index i = Wert der i -ten Gitterzelle
- $u_{ref} = 6.7 \text{ m/s}$ in $z_{ref} = 43.7 \text{ m}$
- H = Bestandshöhe

