

Forschungsprogramm „Herausforderung Klimawandel“

Teilforschungsprojekt

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

Unterprojekt

Verbesserung der Sturmstabilität von Waldbeständen

5. Interner RESTER – Workshop

09. März 2009

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 Oktober 2008 – März 2009

Windkanaluntersuchungen

- Waldanordnungen mit unterschiedlichen luvseitigen Traufkanten (Ergebnisse siehe Zwischenbericht Dez. 2008)
- Der turbulente Impulsaustausch über homogenen Bestände unterschiedlicher Bestandsdichte wurde mit Hilfe der Quadrantenanalyse analysiert

Numerische Berechnungen

- Hügel unterschiedlicher Hangneigung (Ergebnisse siehe Zwischenbericht Dez. 2008)

Ausbildung der Traufkante

Dichter Bestand mit
offenem Stammraum
(TW = 90°)



Waldkanten aus Einzelbäumen:



Schaumstoffkanten:



TW = 63°



TW = 45°



TW = 27°

Dichte Waldbestände mit unterschiedlichen Kanten: Windbelastung ($z/H = 1.13$)

Mittlere Belastung

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

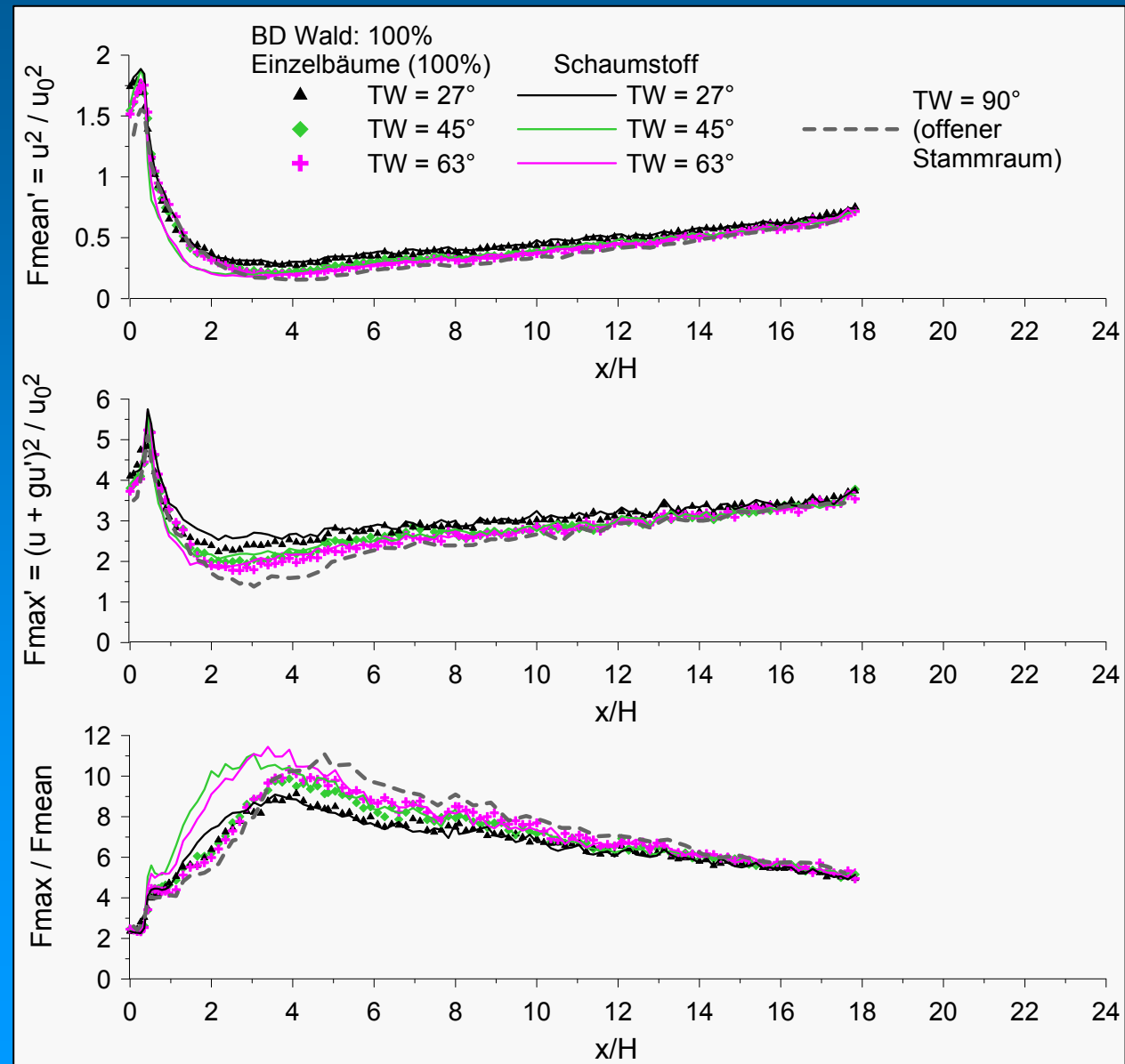
Maximale Belastung

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

$$g = 3.5$$

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

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



Lichte Waldbestände mit unterschiedlichen Kanten: Windbelastung ($z/H = 1.13$)

Mittlere Belastung

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

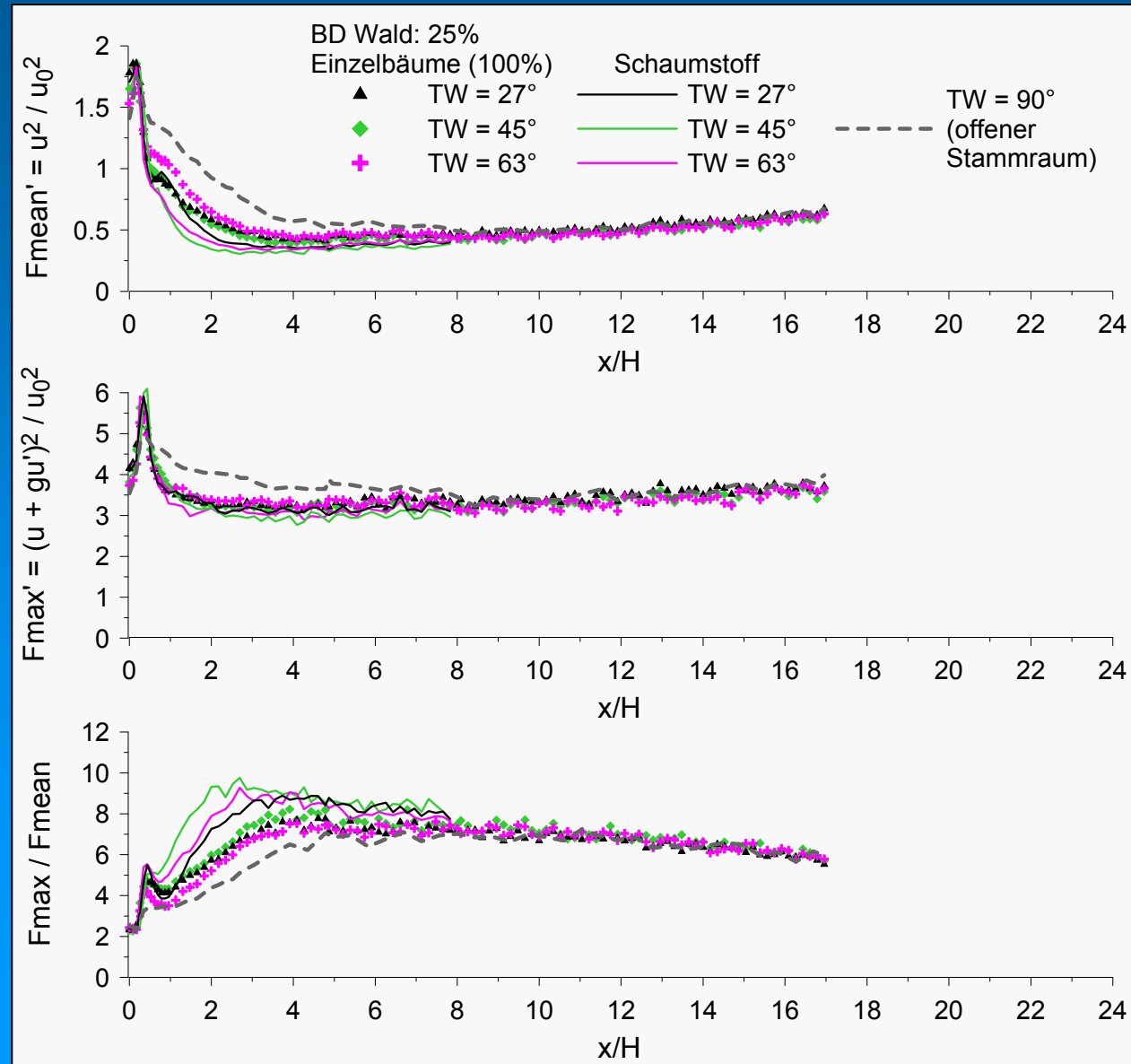
Maximale Belastung

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

$$g = 3.5$$

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

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



Lichte und dichte Waldbestände mit Einzelbaumkanten: Windbelastung ($z/H = 1.13$)

Mittlere Belastung

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

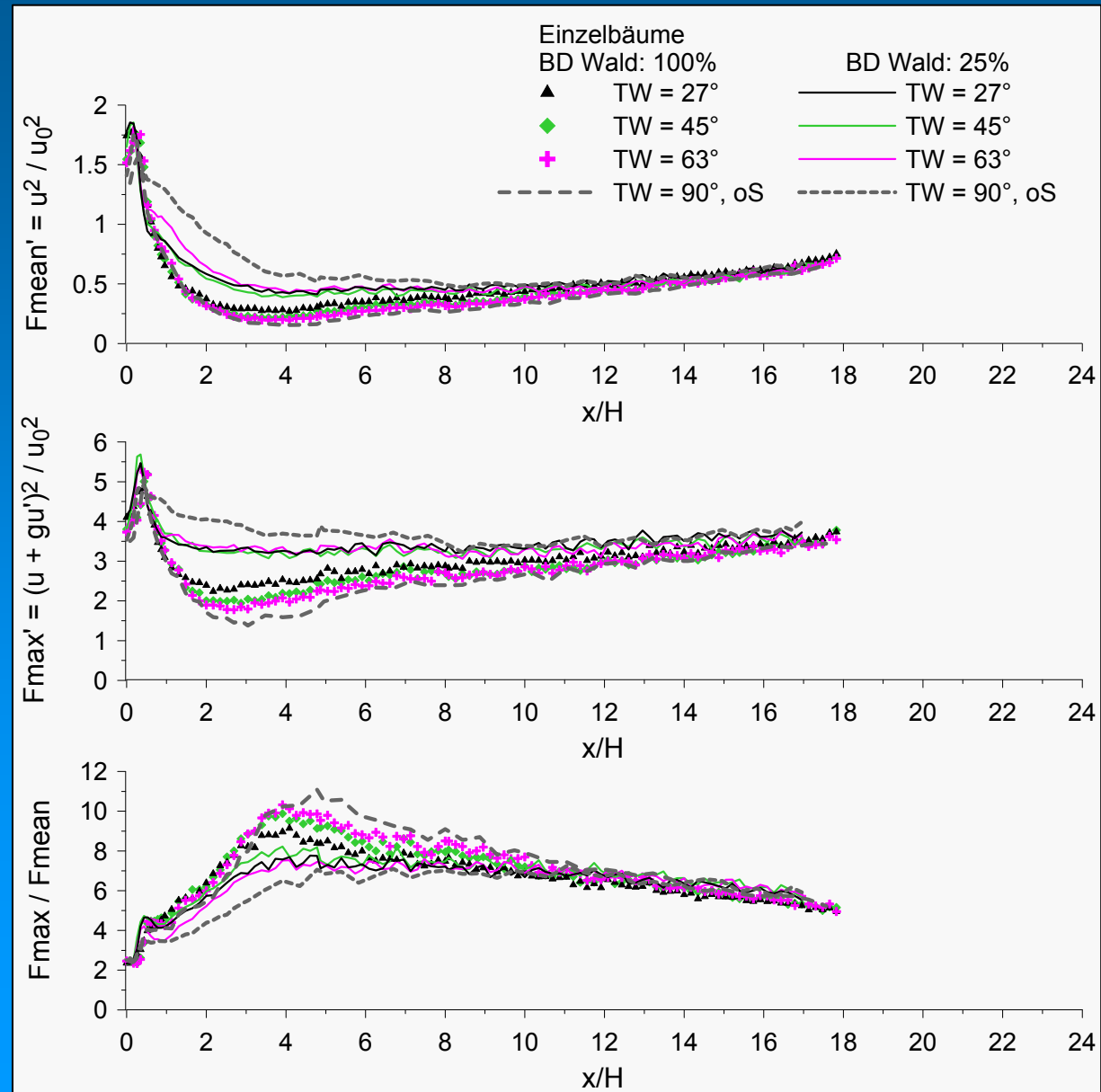
Maximale Belastung

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

$$g = 3.5$$

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

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

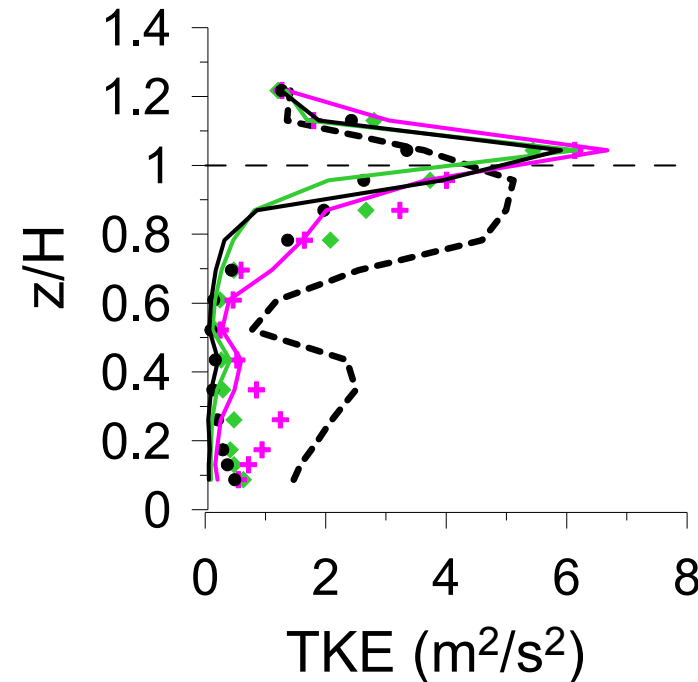
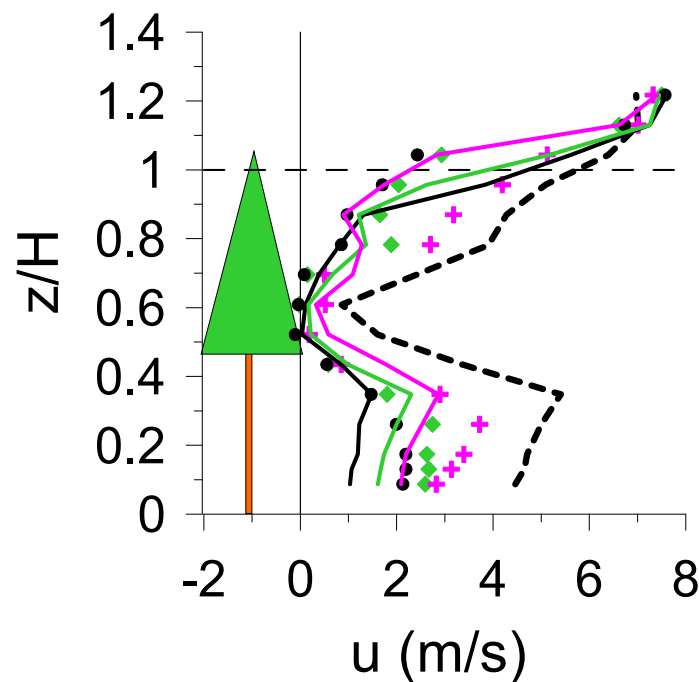
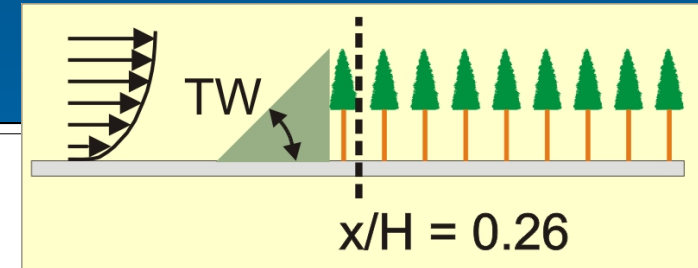


Vertikalprofile im Lee von unterschiedlichen Waldkanten Lichter Bestand

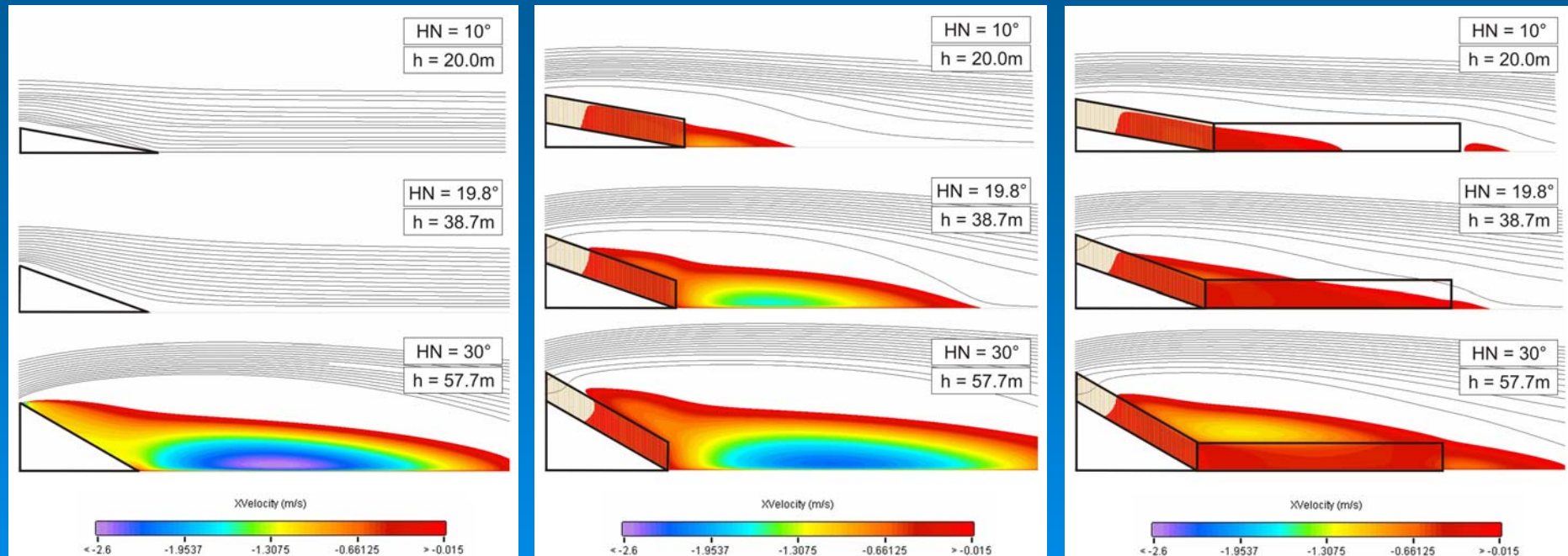
BD Wald = 25% ($x/H = 0.26$)

Einzelbäume

Schaumstoff



CFD: Hügel unterschiedlicher Neigung



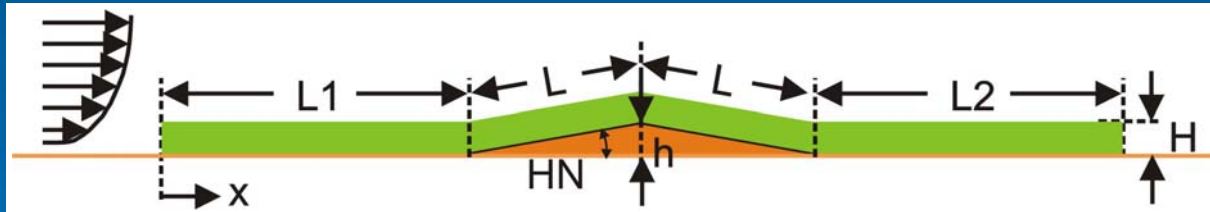
- Die Hangneigung ist entscheidend dafür, ob sich ein Rezirkulationsgebiet ausbildet oder nicht.
- Bei relativ flachen Hügeln, in deren Lee im unbewaldeten Zustand die Strömung nicht ablöst, kann die Anordnung von Vegetation zur Ausbildung eines Ablösegebiets führen.
- Vegetation am Hügel führt zu einer Verschiebung des Ablösepunkts vom Hügelgipfel weg nach Unterstrom.
- Die Größe des Rezirkulationsgebiets und die Intensität der Rotationsbewegung werden hauptsächlich von der Hügelhöhe beeinflusst.

CFD: Hügel unterschiedlicher Neigung (L = 115 m, h variabel)

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

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

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

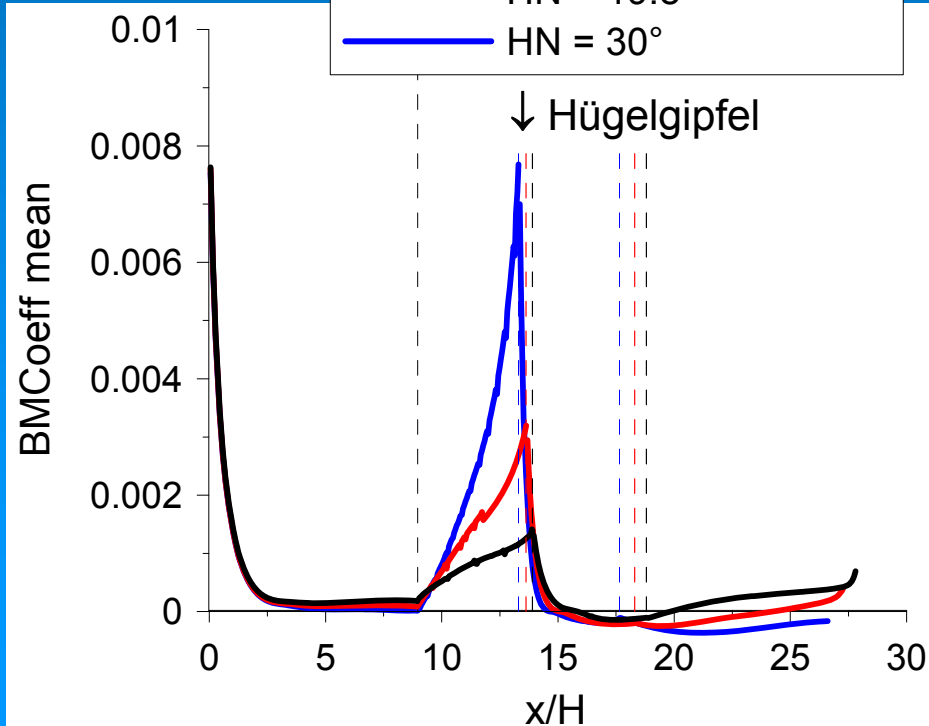


Wald - bewaldeter Hügel - Wald
(L1 = L2 = 206 m, L = 115 m)

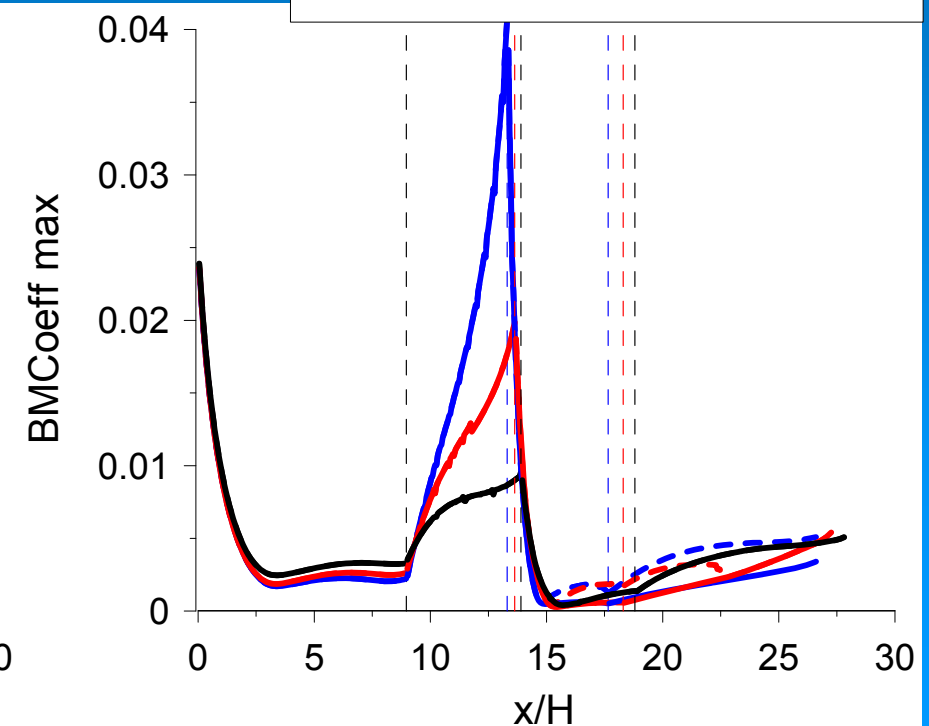
— HN = 10°

— HN = 19.8°

— HN = 30°



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

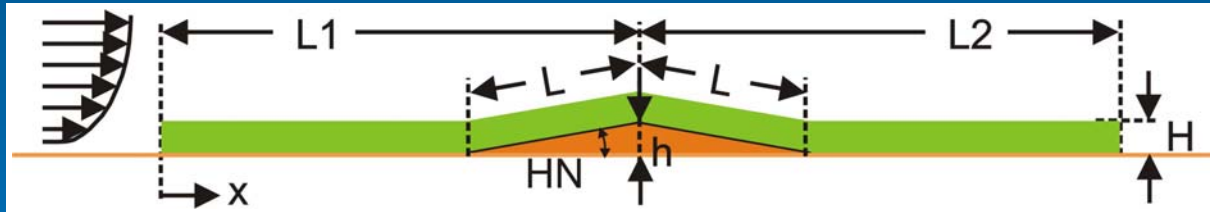


CFD: Hügel unterschiedlicher Neigung (h = 20 m, L variabel)

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

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

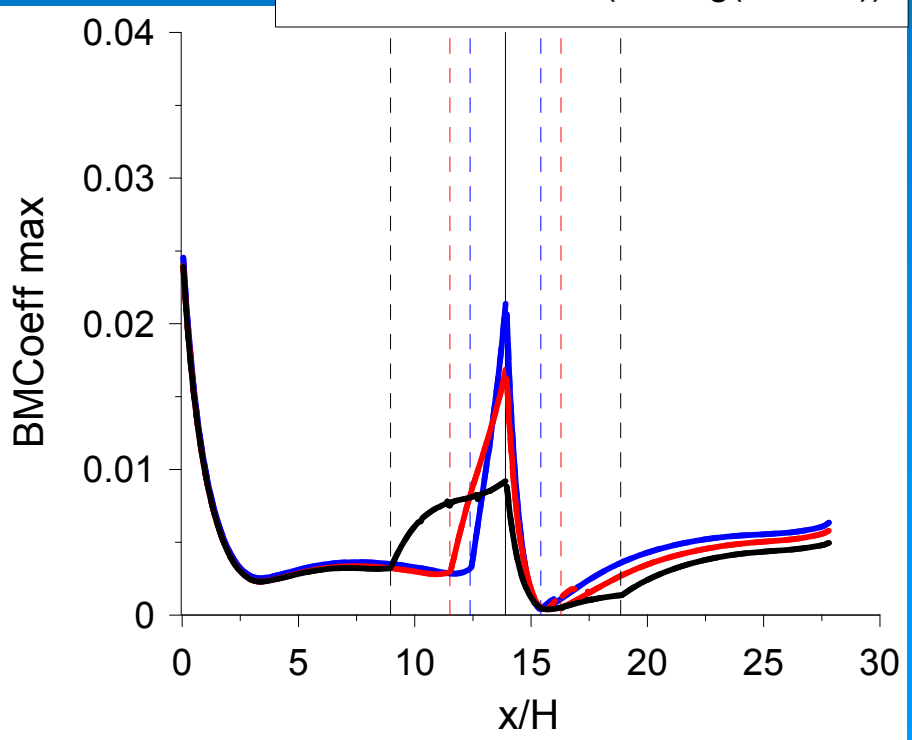
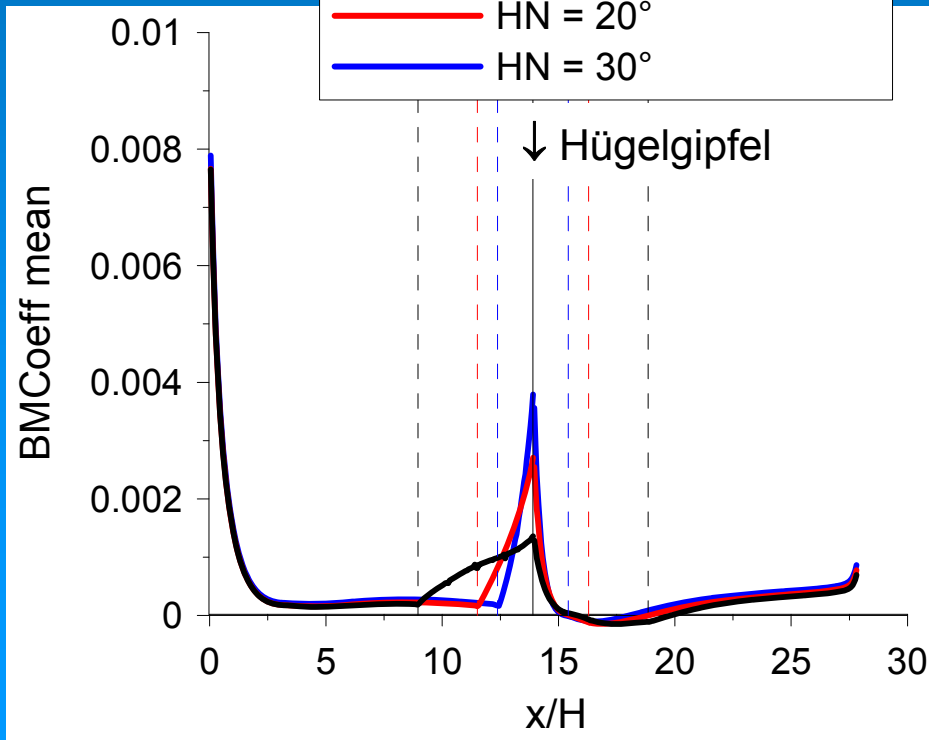
$H = H_{ref} = 23 \text{ m}$



Wald - bewaldeter Hügel - Wald
(h = 20m, L1 = L2 = 320m)

- HN = 10°
- HN = 20°
- HN = 30°

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

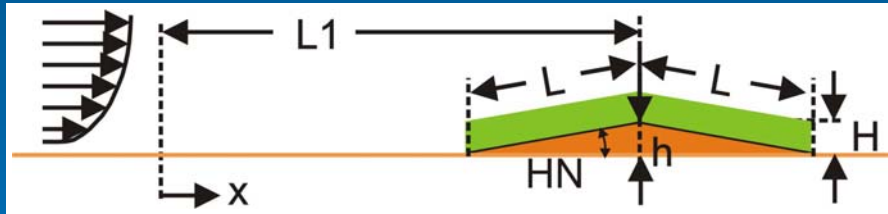


CFD: Hügel unterschiedlicher Neigung (h = 20 m, L variabel)

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

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

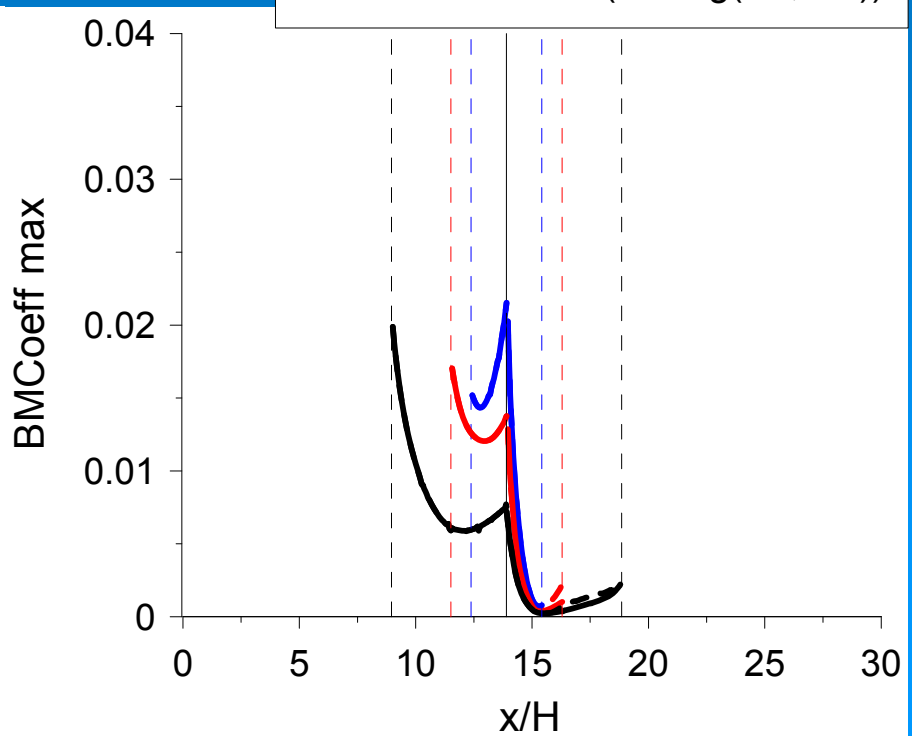
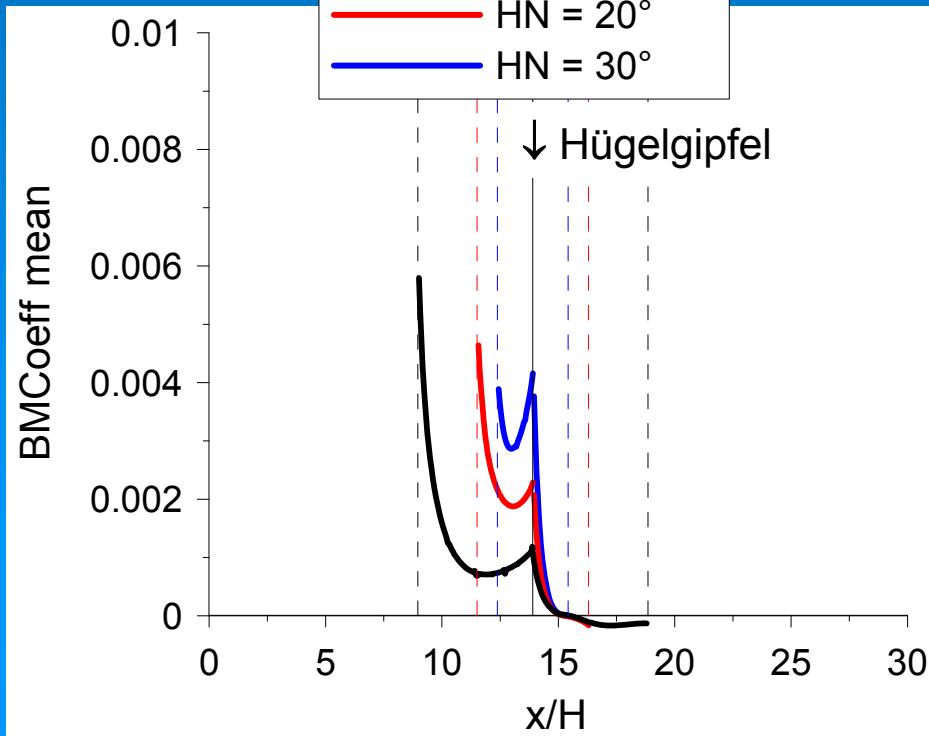
$H = H_{ref} = 23 \text{ m}$



Bewaldeter Hügel
(h = 20m, L1 = 320 m)

- HN = 10°
- HN = 20°
- HN = 30°

- B1: $u' > 0$
- B2: Vorzeichen u' wie u
- - - B3: $\text{Max}(\text{Betrag}(B1, B2))$

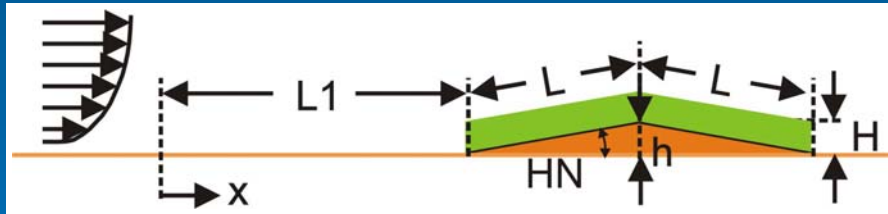


CFD: Hügel unterschiedlicher Neigung (L = 115 m, h variabel)

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

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

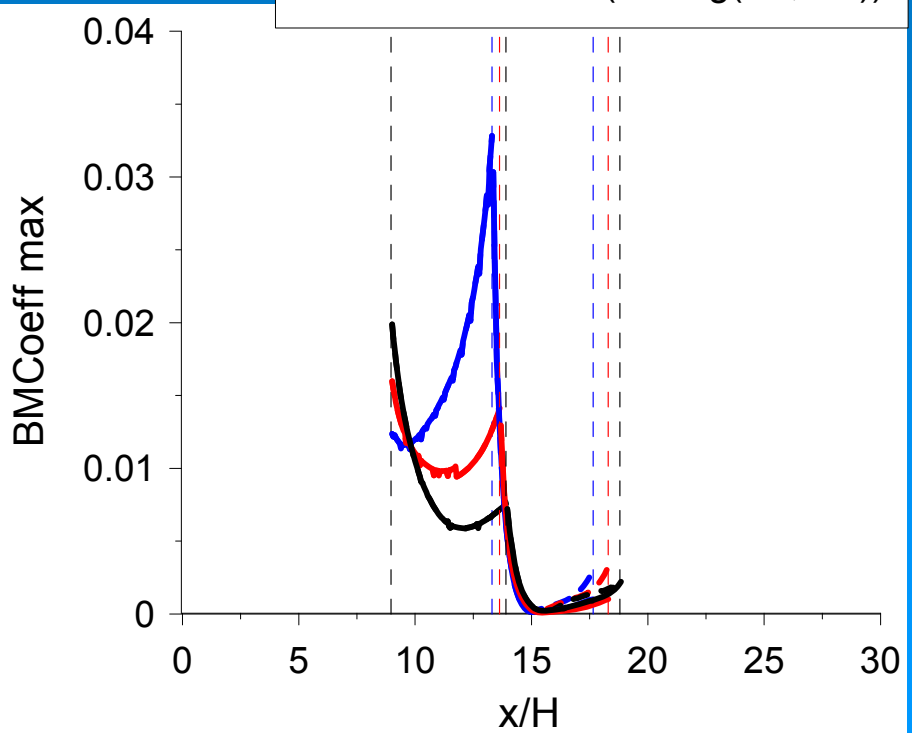
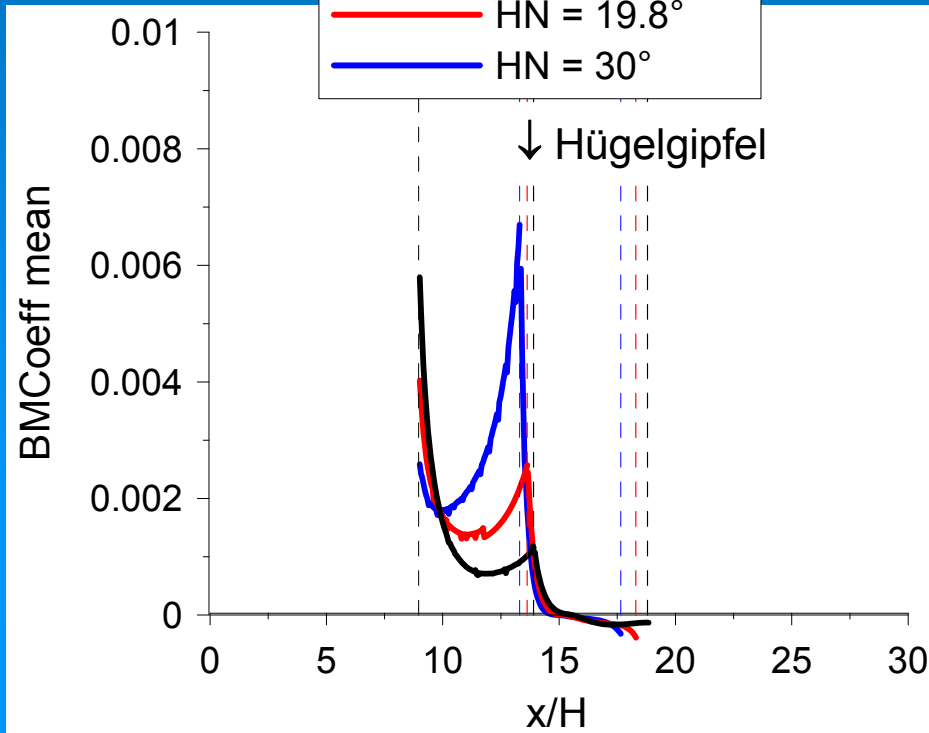
$H = H_{ref} = 23 \text{ m}$



Bewaldeter Hügel
(L1 = 206 m, L = 115 m)

- HN = 10°
- HN = 19.8°
- HN = 30°

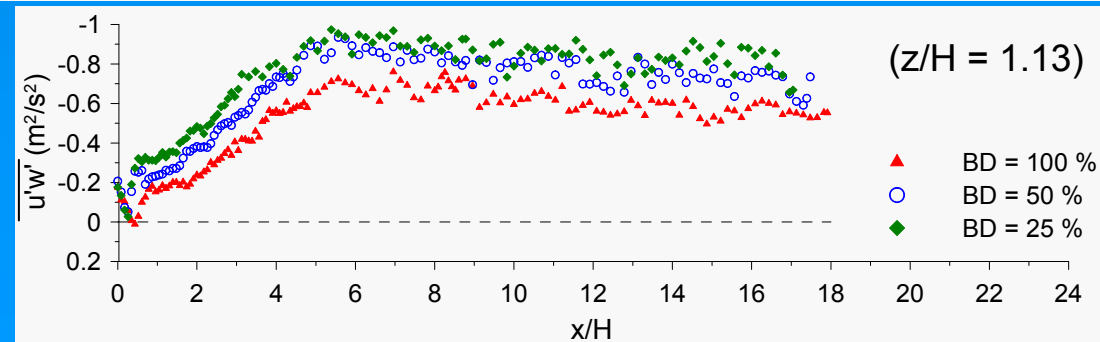
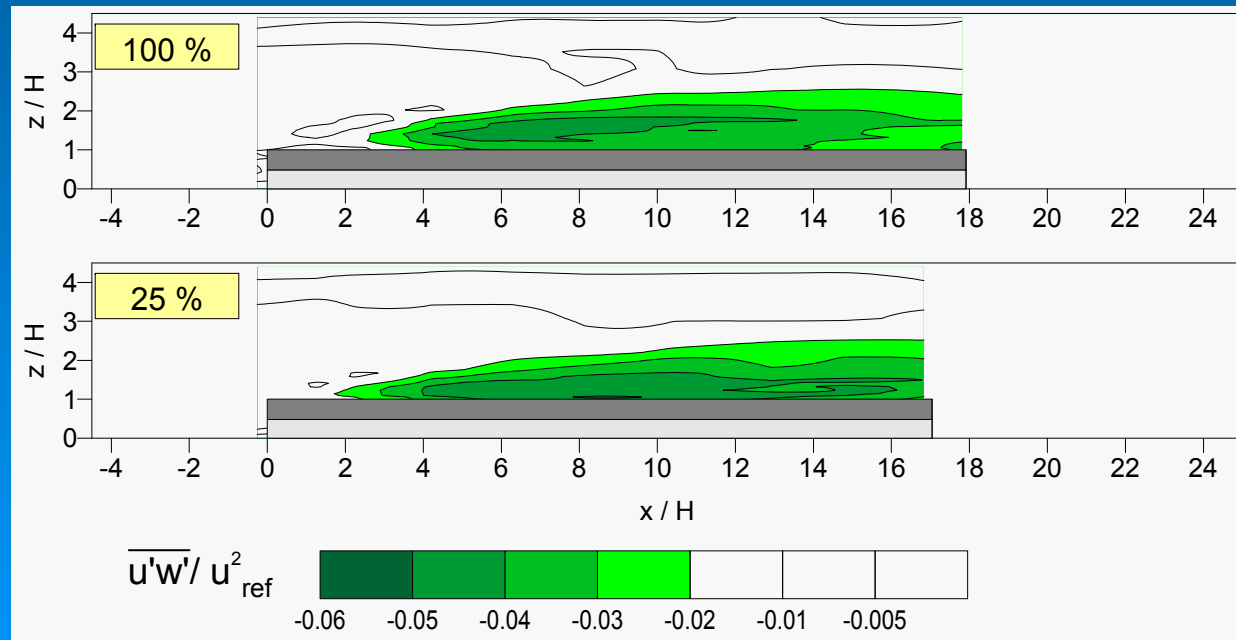
- B1: $u' > 0$
- B2: Vorzeichen u' wie u
- - - B3: Max(Betrag(B1, B2))



Turbulenter Impulsaustausch

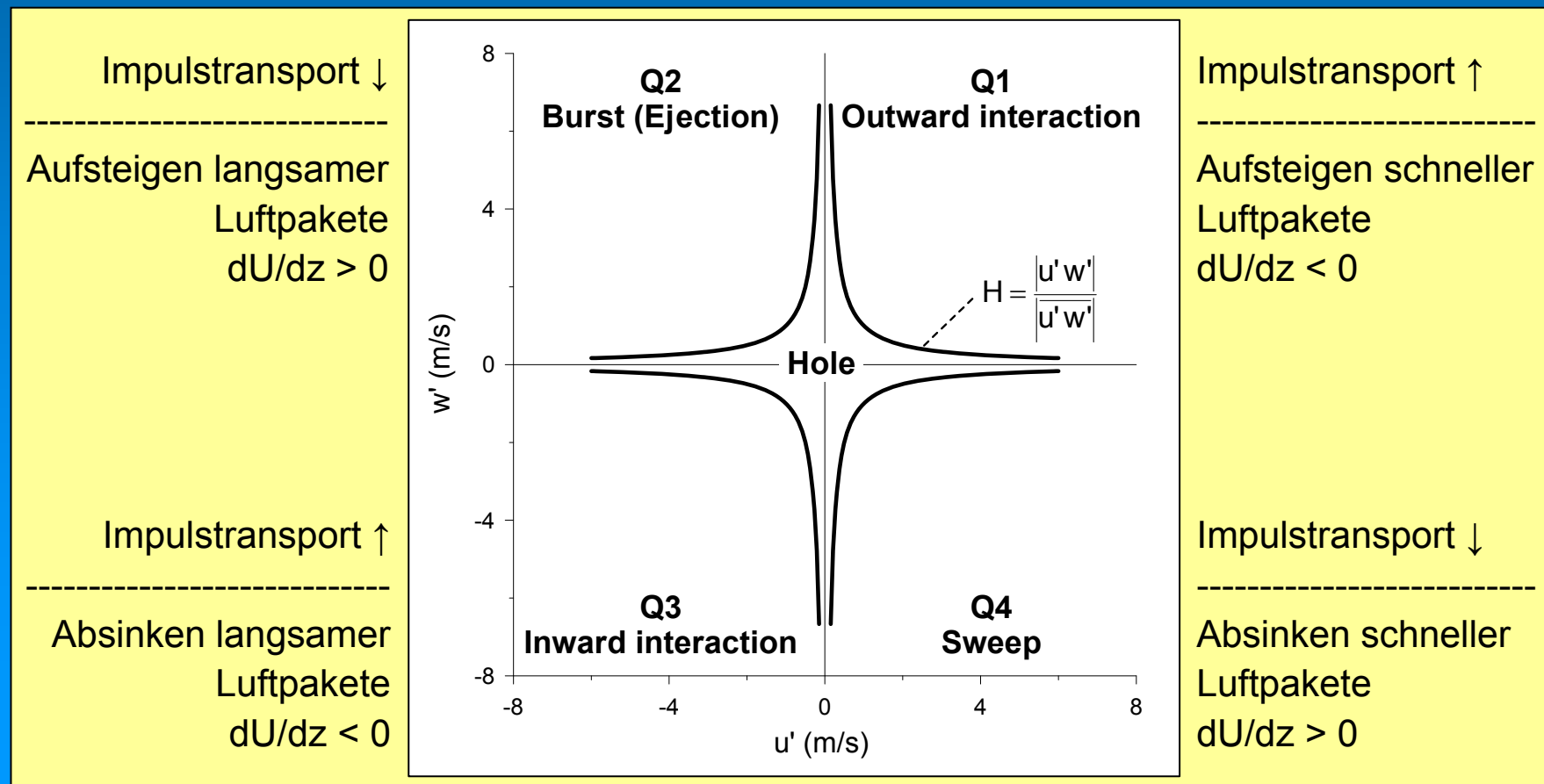
Hypothese: Windwurf wird durch Böen verursacht, die von oben kommend auf das Kronendach auftreffen.

Die zeitlich gemittelte Korrelation der Geschwindigkeitsschwankungen $\overline{u'w'}$ beschreibt die mittlere Intensität des turbulenten Impulsaustausches in vertikaler Richtung.



Quadrantenanalyse: Allgemein

Die zeitlich gemittelte Korrelation der Geschwindigkeitsschwankungen $\overline{u'w'}$ beschreibt die mittlere Intensität des turbulenten Impulsaustausches in vertikaler Richtung. Die Quadrantenanalyse ermöglicht eine genauere Beschreibung der zeitlichen Struktur dieses Impulsaustausches.



Quadrantenanalyse: Allgemein

Normierte Impulsaustauschanteile:

$$S_{i,H} = \frac{\langle u'w' \rangle_{i,H}}{\overline{u'w'}}$$

mit i = Quadrantennummer

H = Lochgröße.

Eckige Klammern sind konditionale Mittelwerte:

$$\langle u'w' \rangle_{i,H} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T u'(t) \cdot w'(t) \cdot I_{i,H}(t) dt$$

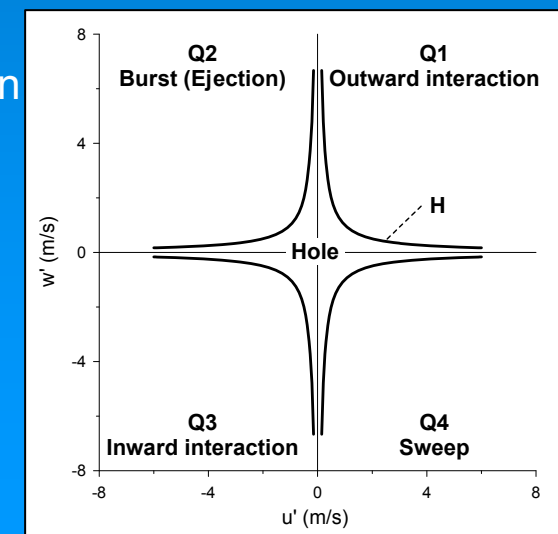
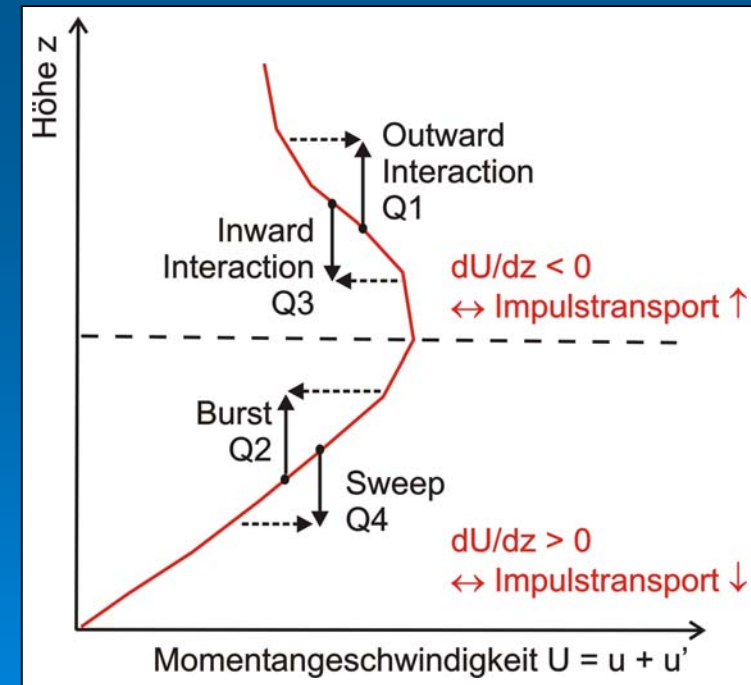
mit T = Abtastzeitraum

$I_{i,H}$ = konditionale Funktion

$$I_{i,H} = \begin{cases} 1, & \text{wenn der Punkt } (u', w') \text{ im } i\text{-ten Quadranten} \\ & \text{liegt und } |u'w'| > H \cdot \overline{|u'w'|} \\ 0, & \text{andernfalls} \end{cases}$$

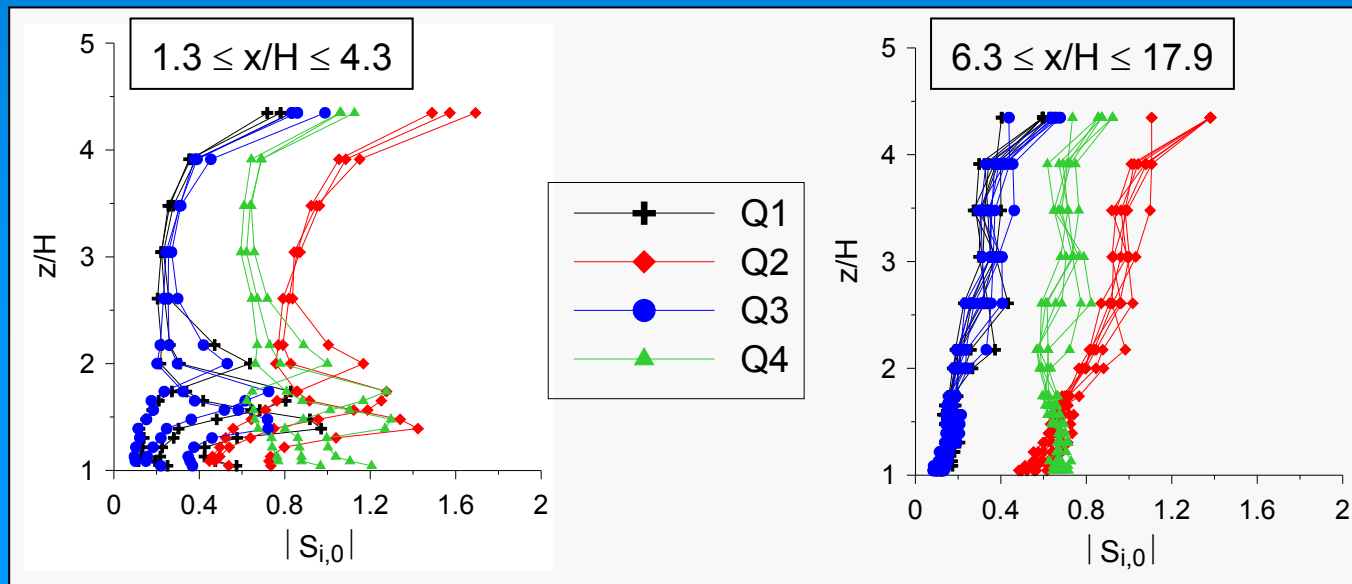
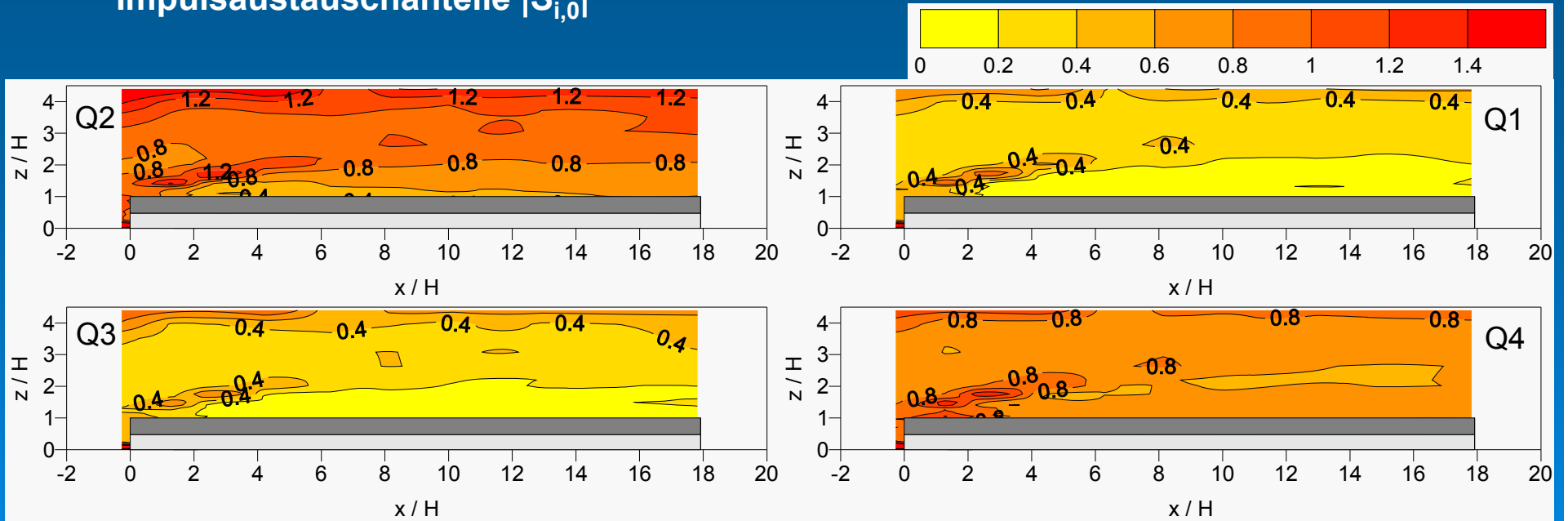
Zeitanteile: $t_{i,H} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T I_{i,H}(t) dt$

Es gilt: $\sum_{i=1}^4 S_{i,0} = 1$ $\sum_{i=1}^4 \langle u'w' \rangle_{i,H} = \overline{u'w'}$ $\sum_{i=1}^4 t_{i,0} = 1$



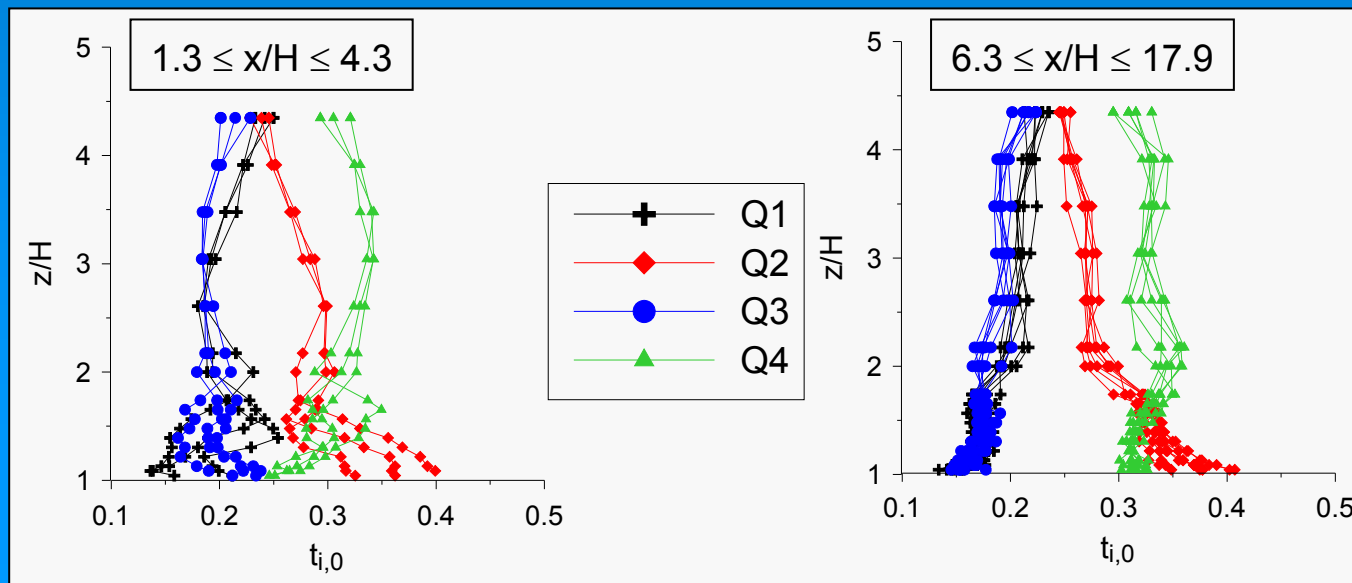
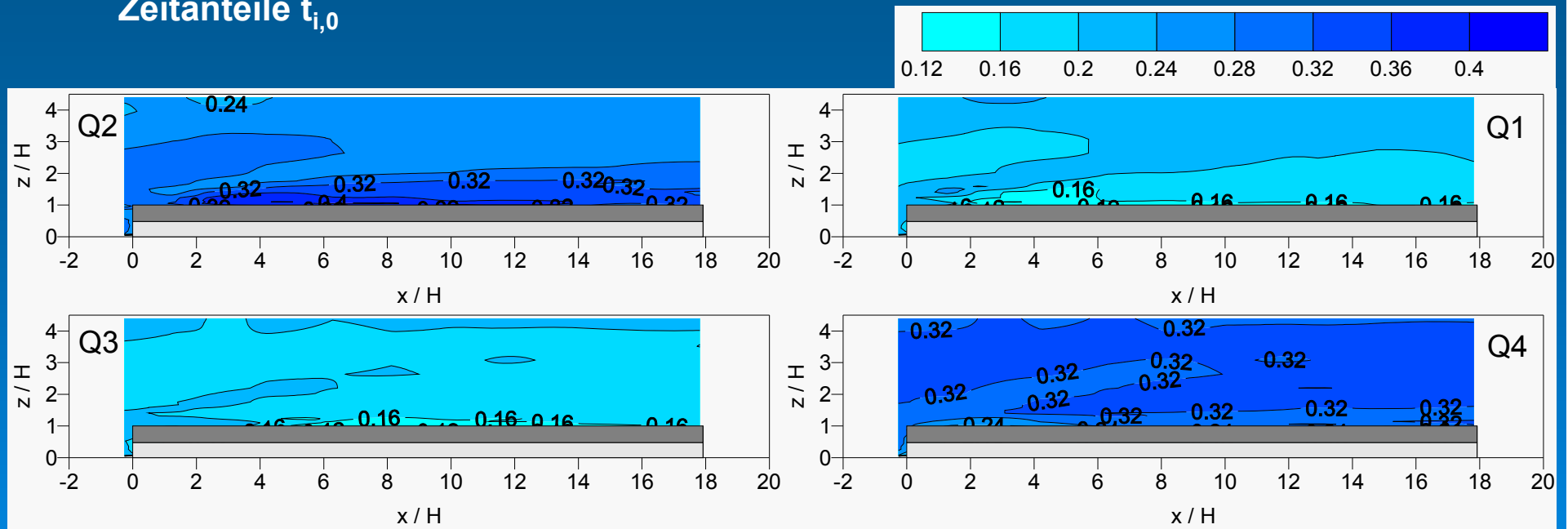
Einheitlich dichter Waldbestand: Quadrantenanalyse ($H = 0$)

Impulsaustauschanteile $|S_{i,0}|$



Einheitlich dichter Waldbestand: Quadrantenanalyse ($H = 0$)

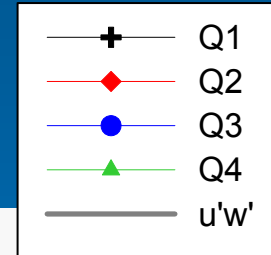
Zeitanteile $t_{i,0}$



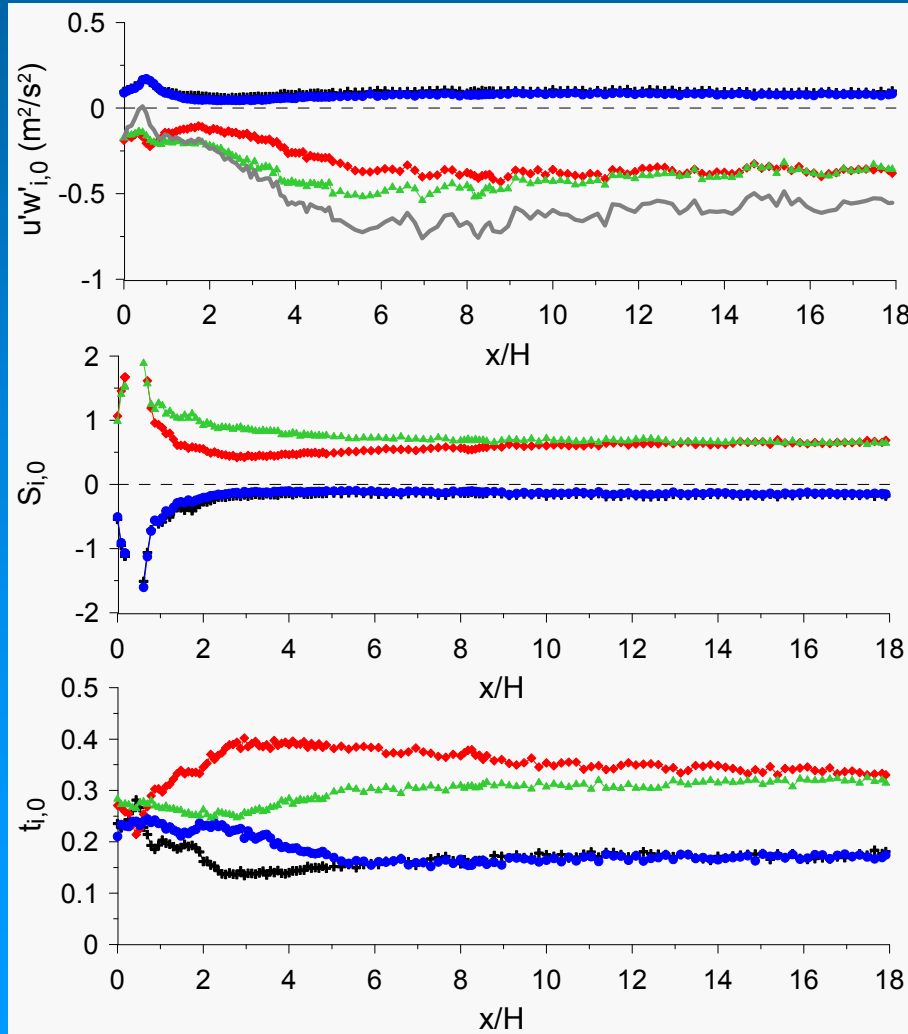
Einheitlich dichte Waldbestände: Quadrantenanalyse (H = 0)

Impulsaustauschanteile $u'w'_{i,0}$ und $S_{i,0}$ sowie Zeitanteile $t_{i,0}$

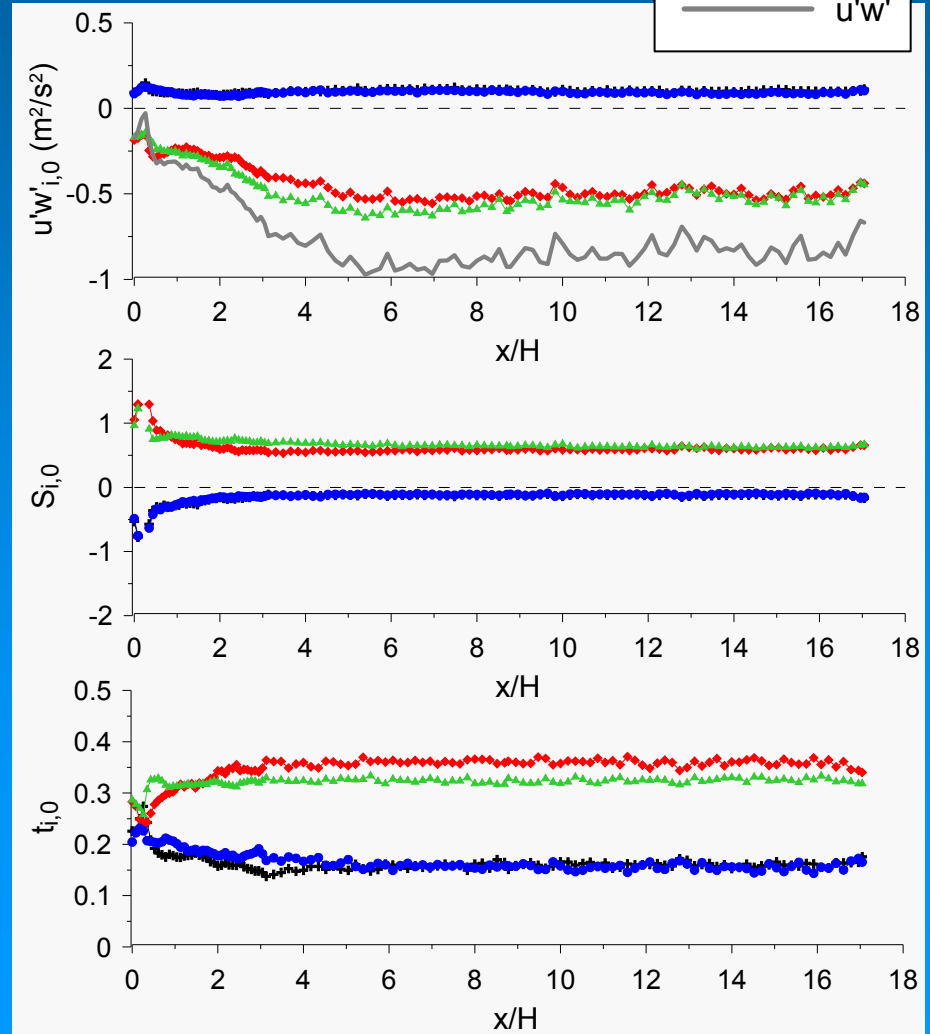
(z/H = 1.13)



Dichter Bestand (BD = 100 %)



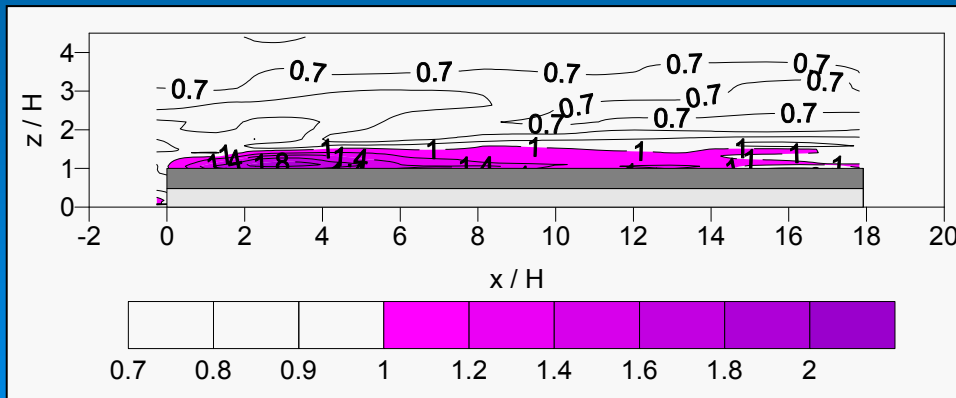
Lichter Bestand (BD = 25 %)



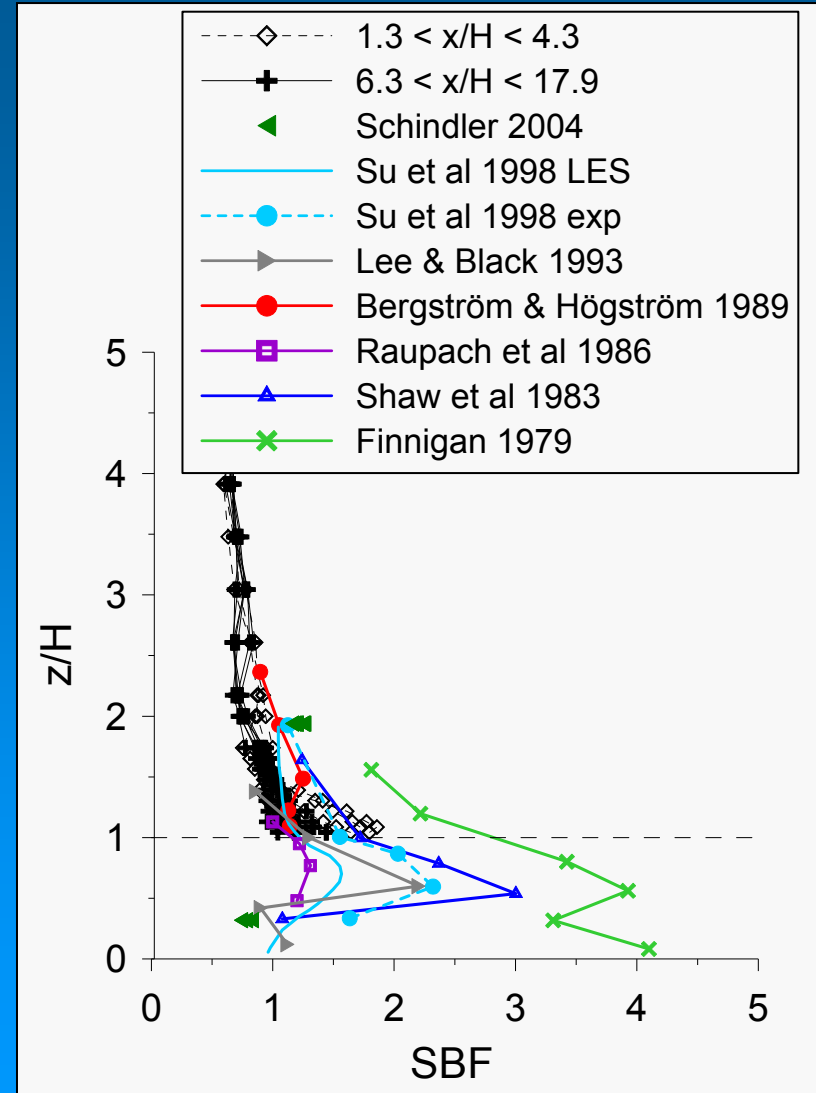
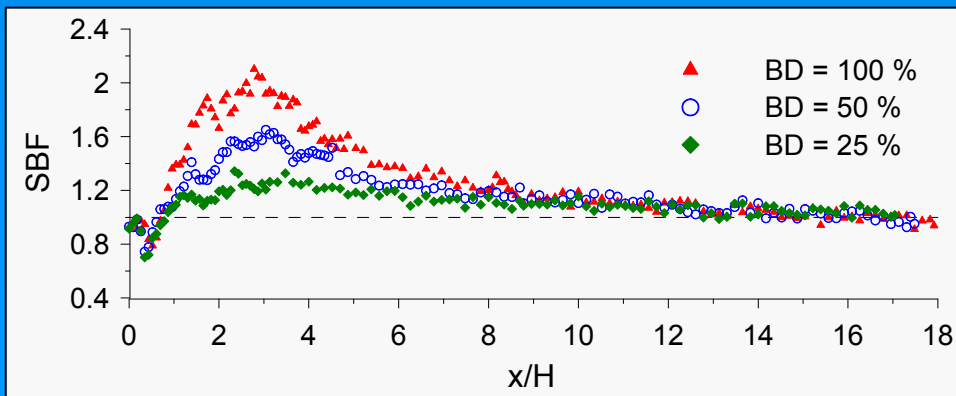
Einheitlich dichte Waldbestände: Quadrantenanalyse (H = 0)

$$\text{Sweep-Burst-Faktor } \text{SBF} = \frac{u' w'_{4,0}}{u' w'_{2,0}}$$

Dichter Bestand (BD = 100 %):



Einfluss Bestandsdichte (z/H = 1.13):

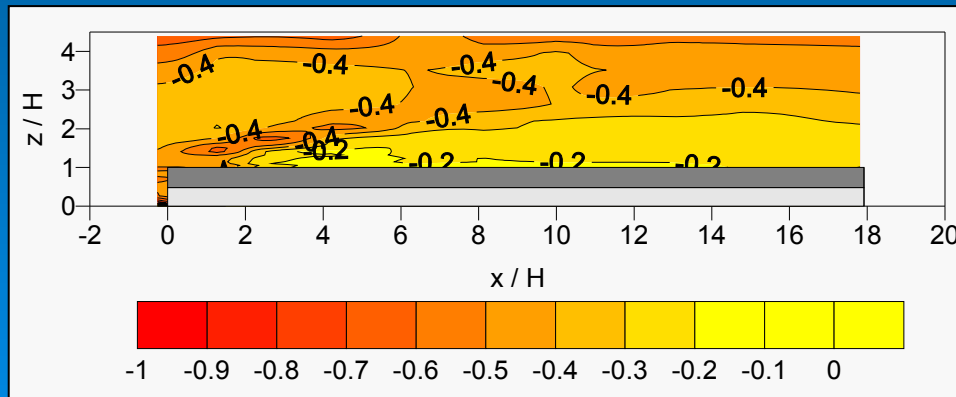


Vergleich dichter Bestand mit Literaturdaten

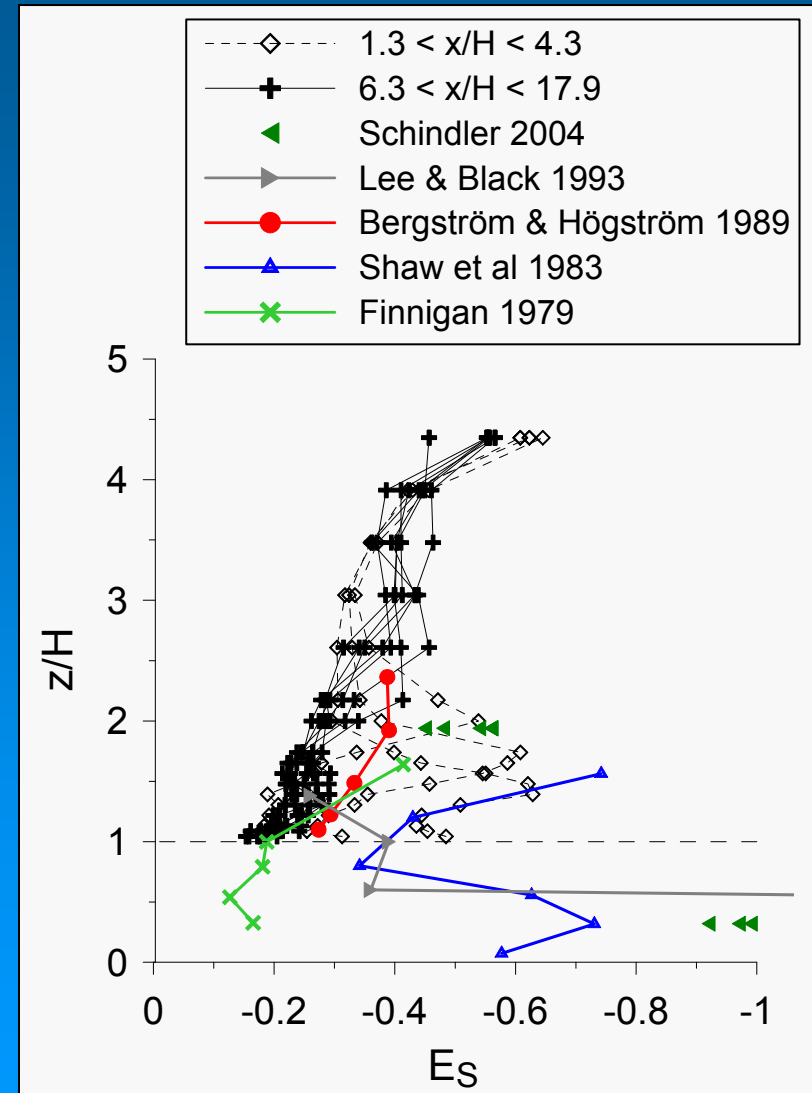
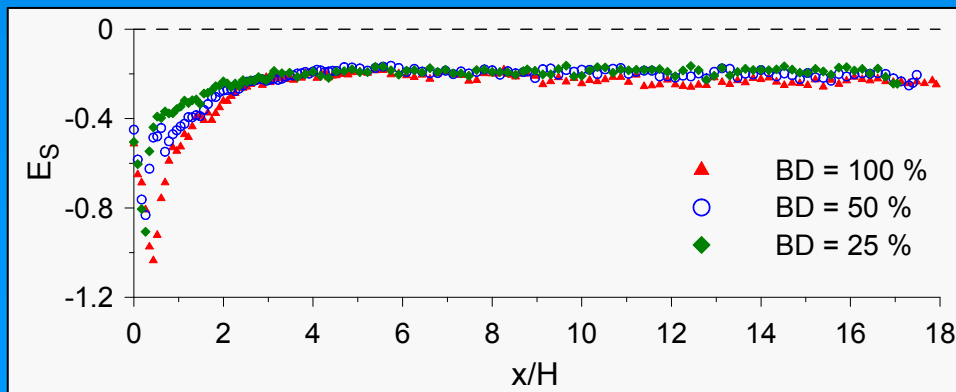
Einheitlich dichte Waldbestände: Quadrantenanalyse (H = 0)

Exuberanz-Faktor $E_s = \frac{u'w'_{1,0} + u'w'_{3,0}}{u'w'_{2,0} + u'w'_{4,0}}$

Dichter Bestand (BD = 100 %):



Einfluss Bestandsdichte (z/H = 1.13):

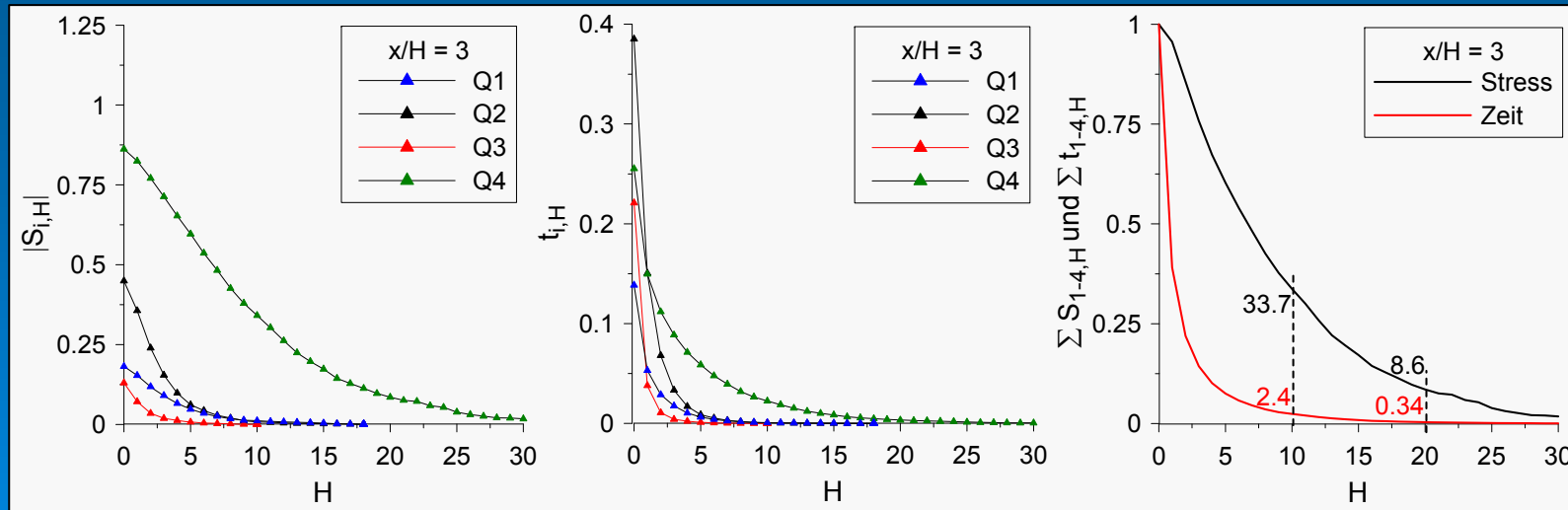


Vergleich dichter Bestand mit Literaturdaten

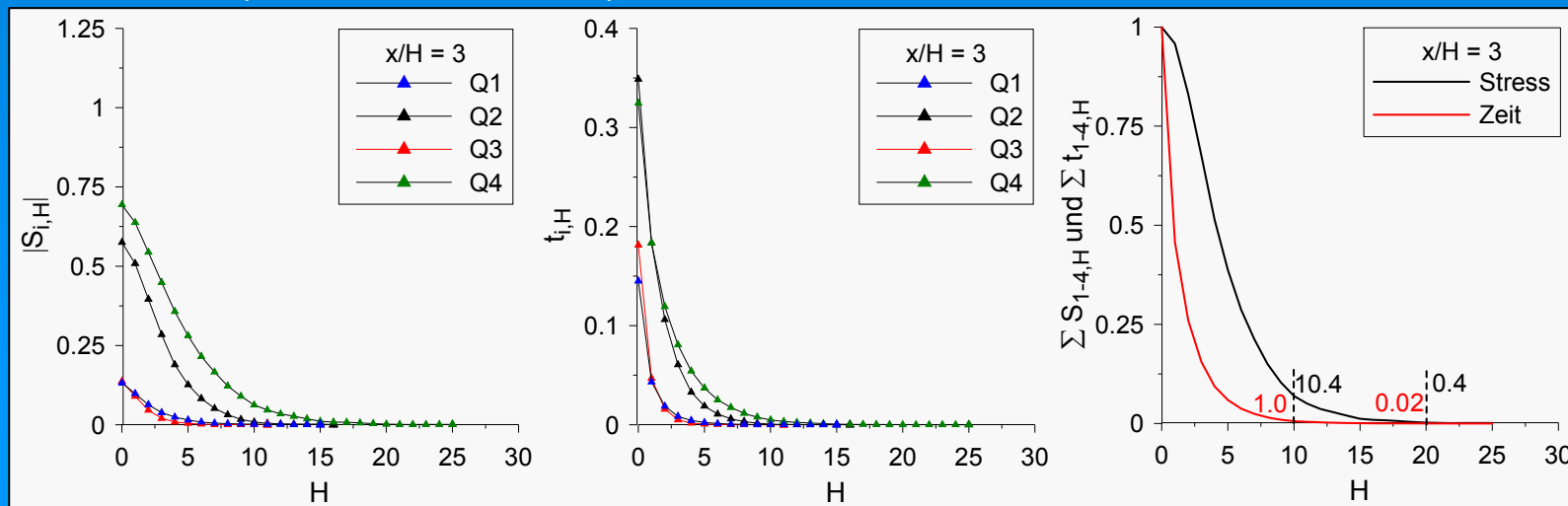
Einheitlich dichte Waldbestände: Quadrant-Hole-Analyse

($z/H = 1.13$)

Dichter Bestand ($\overline{u'w'} = -0.36 \text{ m}^2/\text{s}^2$)

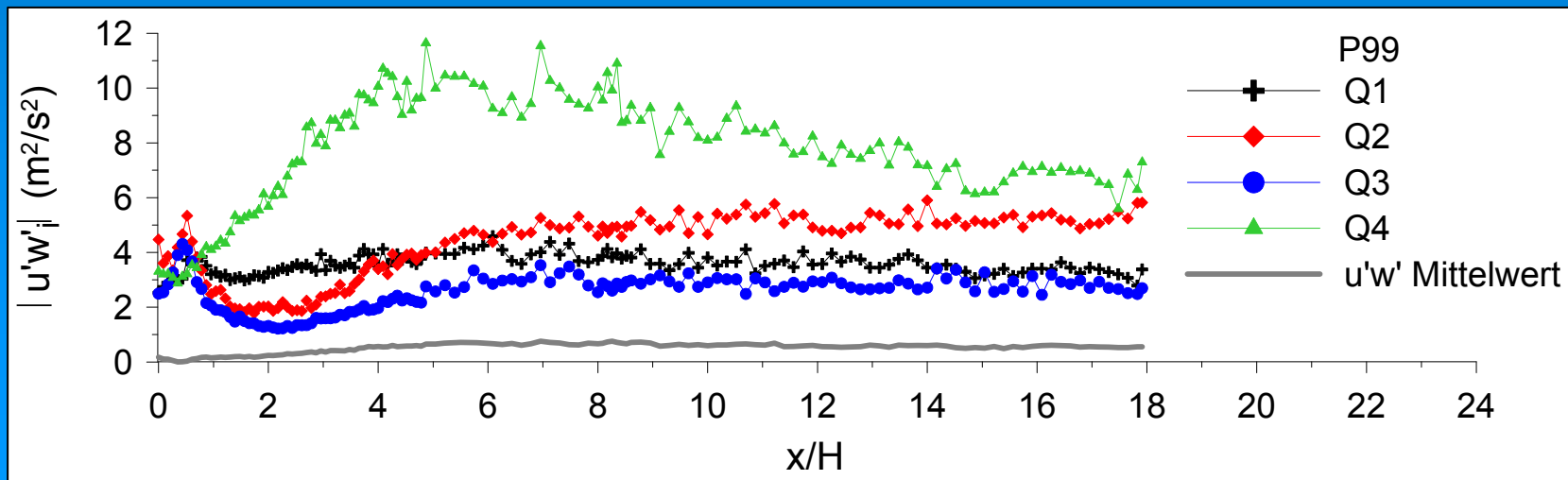
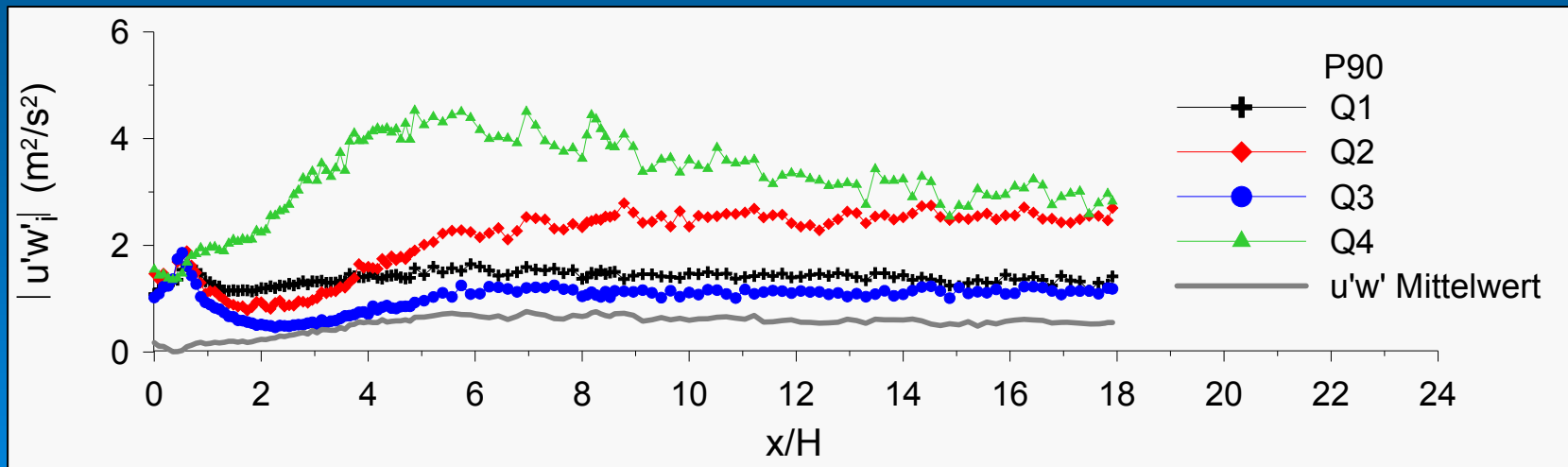


Lichter Bestand ($\overline{u'w'} = -0.67 \text{ m}^2/\text{s}^2$)



Einheitlich dichter Waldbestand: Quantilwerte von $|u'w'|$

($z/H = 1.13$)



Zusammenfassung

Der Einfluss der Traufkantenausbildung wurde experimentell untersucht. Die Kantenausbildung beeinflusst die Strömungsgrößen in unmittelbarer Kronendachnähe insbesondere über der luvseitigen Bestandshälfte. Die Horizontalprofile der Windbelastung über dichten und lichten Beständen werden ähnlicher, wenn im Luv der Bestände Waldkanten identischer Struktur angeordnet werden.

Bewaldete Hügelanordnungen unterschiedlicher Hangneigung wurden untersucht und Biegemomentverläufe bestimmt. Mit zunehmender Hangneigung und zunehmender Hügelhöhe geht ein Anstieg der Biegemomente am Hügelgipfel einher.

Der turbulente Impulsaustausch über Beständen unterschiedlicher Bestandsdichte wurde mit Hilfe der Quadrantenanalyse genauer analysiert. Der turbulente Impulsaustausch ist stark intermittierend. In Kronendachnähe dominieren im Allgemeinen Sweeps, deren Intensität teilweise höher ist als das 30fache des mittleren Nettoimpulsaustausches.