

Forschungsprogramm „Herausforderung Klimawandel“

Teilforschungsprojekt

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

Unterprojekt

Verbesserung der Sturmstabilität von Waldbeständen

3. Interner RESTER – Workshop

13. März 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 Juni 2007 – März 2008

Windkanaluntersuchungen

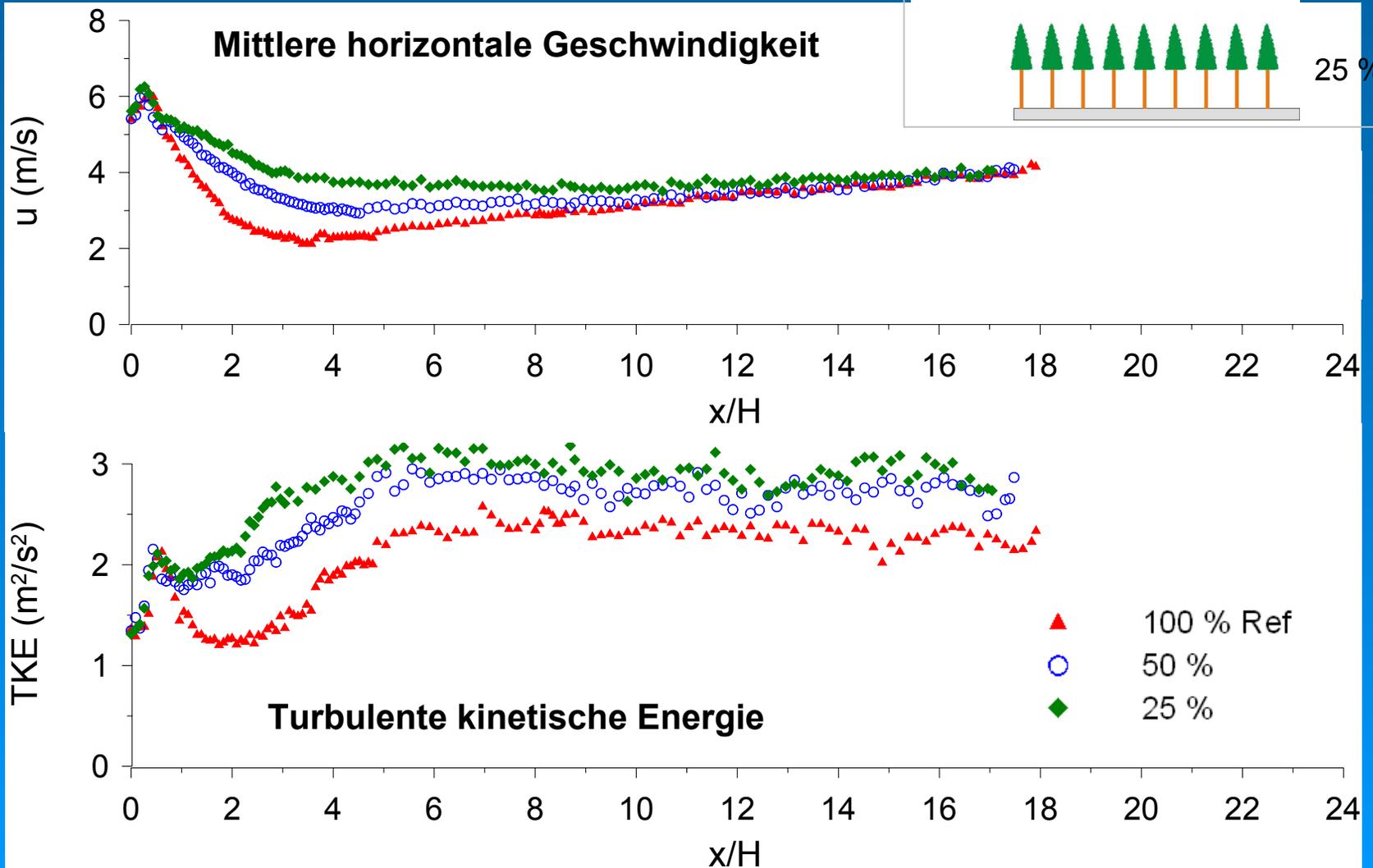
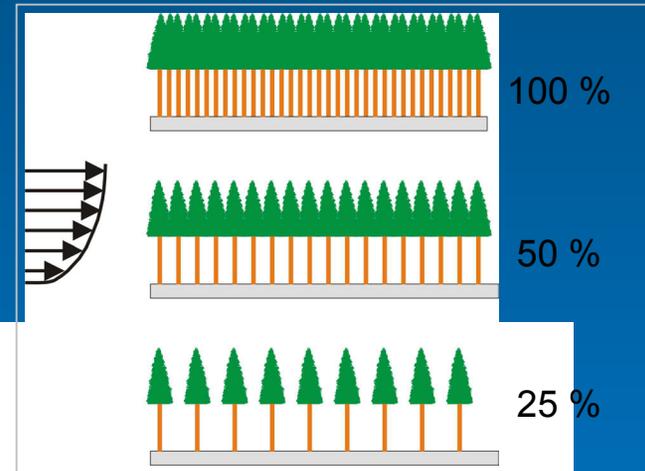
- Variation der Bestandsdichte
- Permeabilität der luvseitigen Waldkante im Bereich des Stammraums (Ergebnisse siehe Zwischenbericht Dezember 2007)

Numerische Berechnungen

- Einfluss der Lichtungsbreite
- Einfluss der Lichtungsform (rechteckig – rund) bei kleinen Lichtungen. (Ergebnisse siehe Forestry - Artikel → Draft-Version auf HK-Homepage)
- Bestimmung von Stammbiegemomenten aus numerisch berechneten Strömungsgrößen

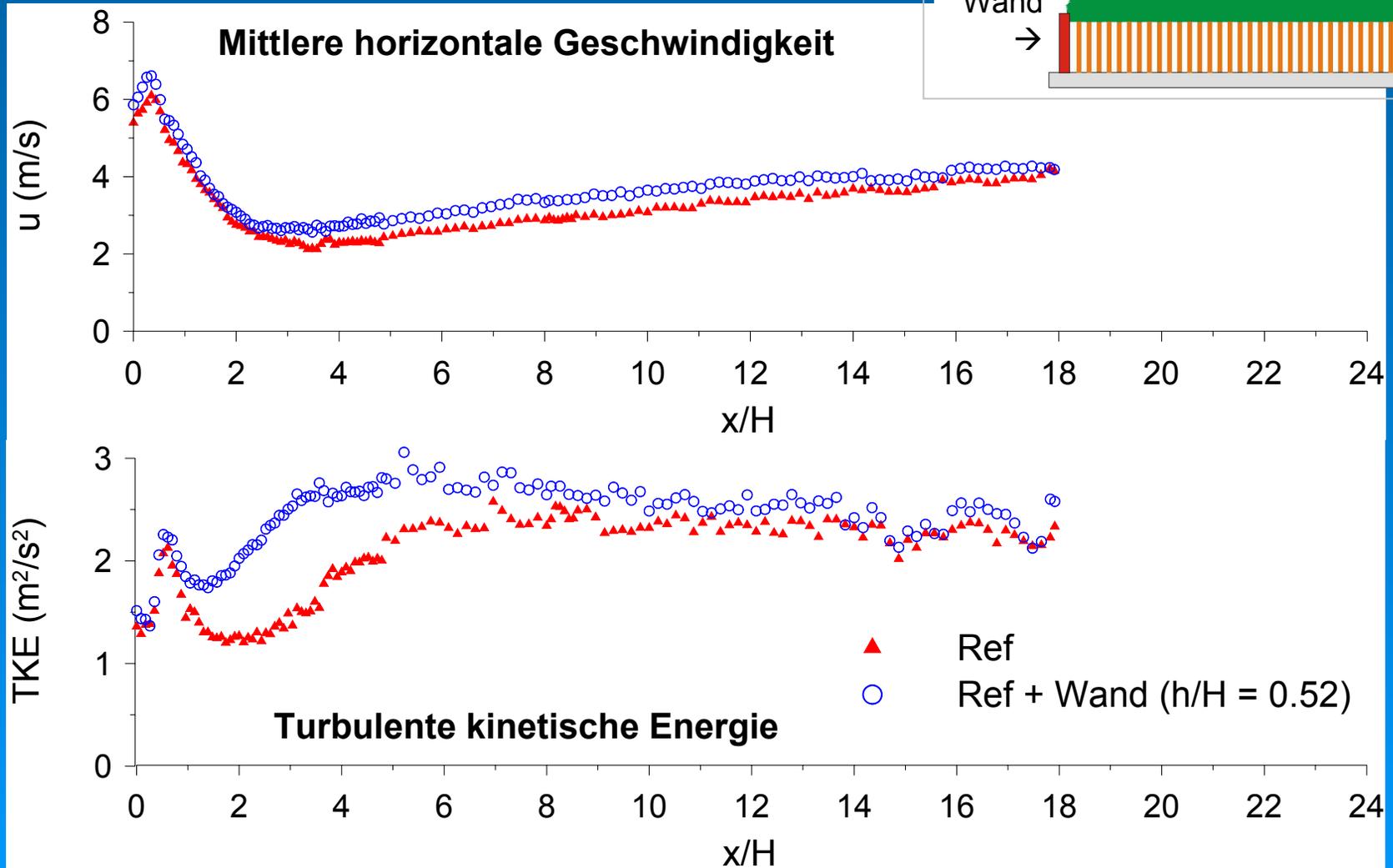
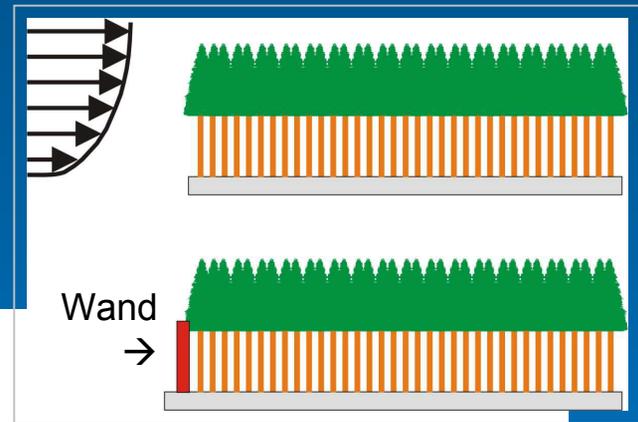
Windkanal: Bestandsdichte

Unmittelbare Kronendachnähe ($z/H = 1.13$)



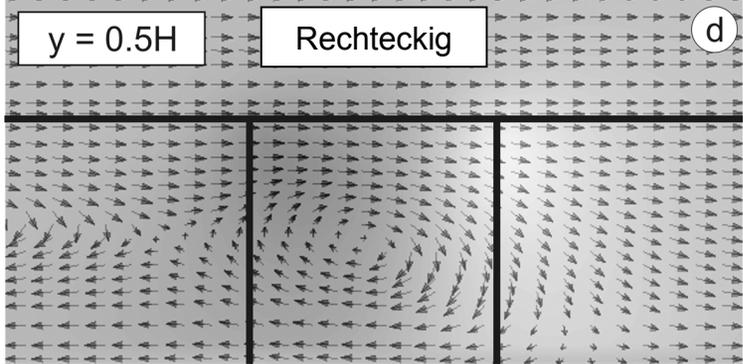
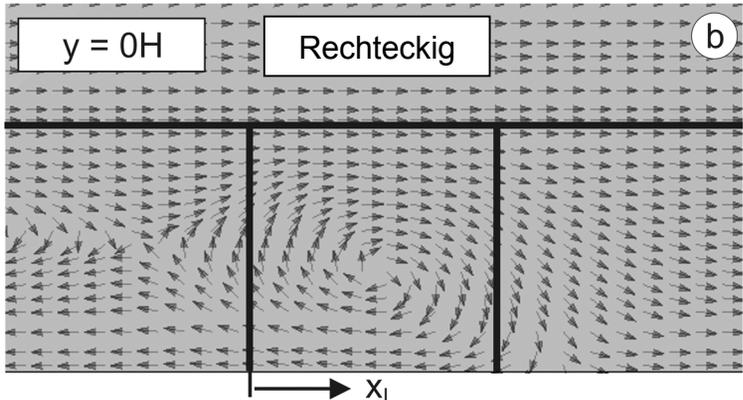
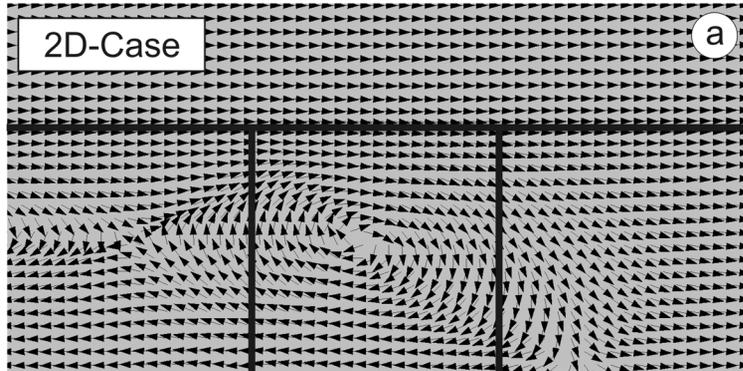
Windkanal: Permeabilität der luvseitigen Waldkante

Unmittelbare Kronendachnähe ($z/H = 1.13$)

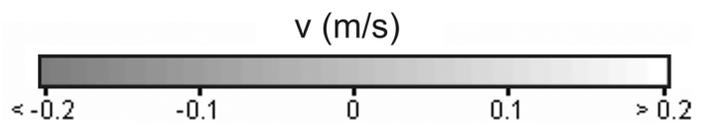
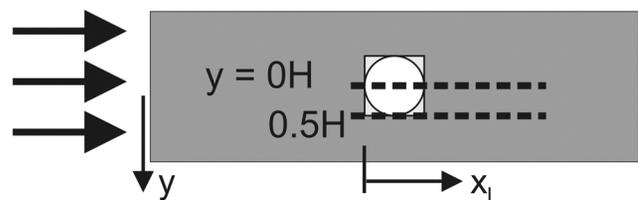
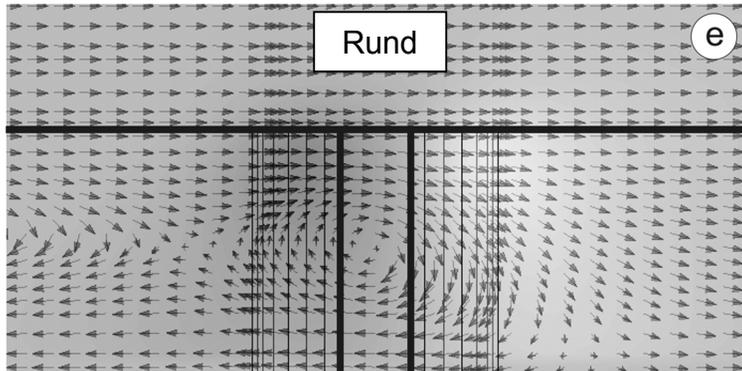
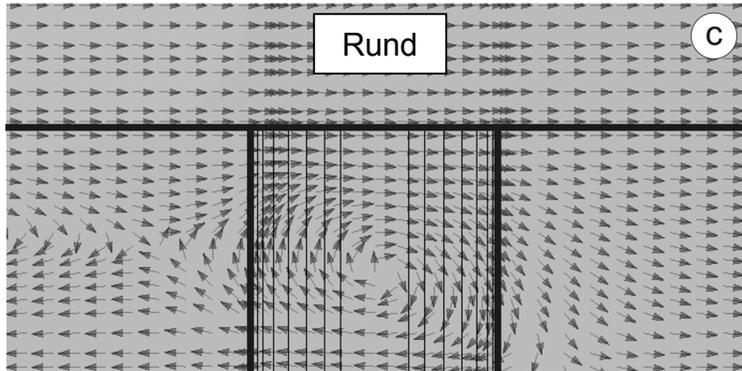


CFD: Lichtungs- form

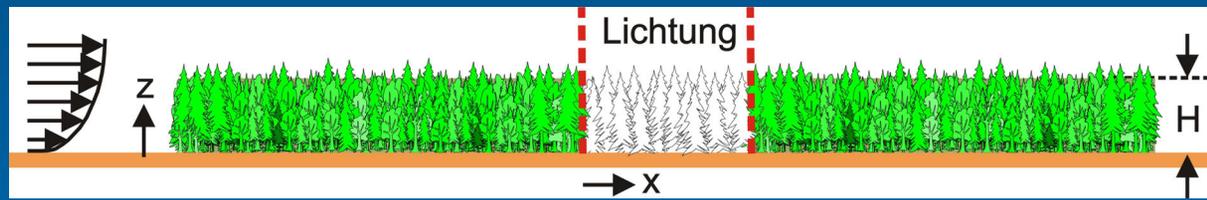
Lichtungs-
breite:
 $a/H = 1$



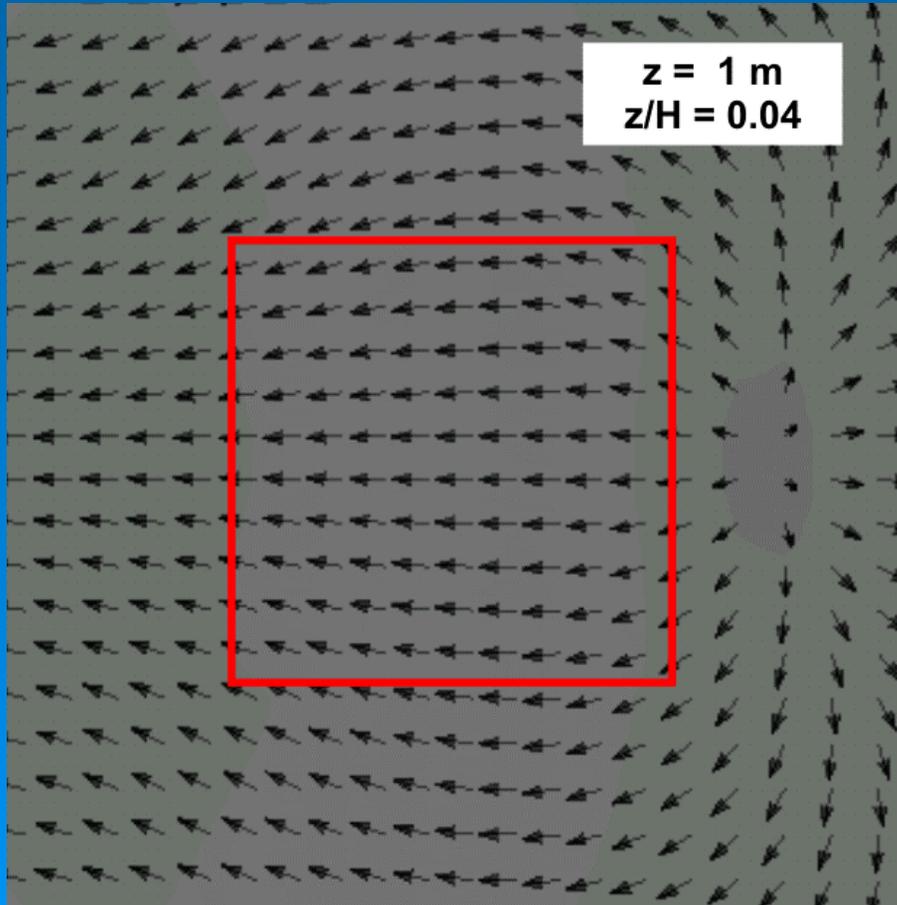
Centre of recirculation zone			
		x_L/H	z/H
2D	a	0.43	0.53
3D: $y/H = 0$	Rectangular	b	0.52
	Round	c	0.40
3D: $y/H = 0.5$	Rectangular	d	0.48
	Round	e	0.50



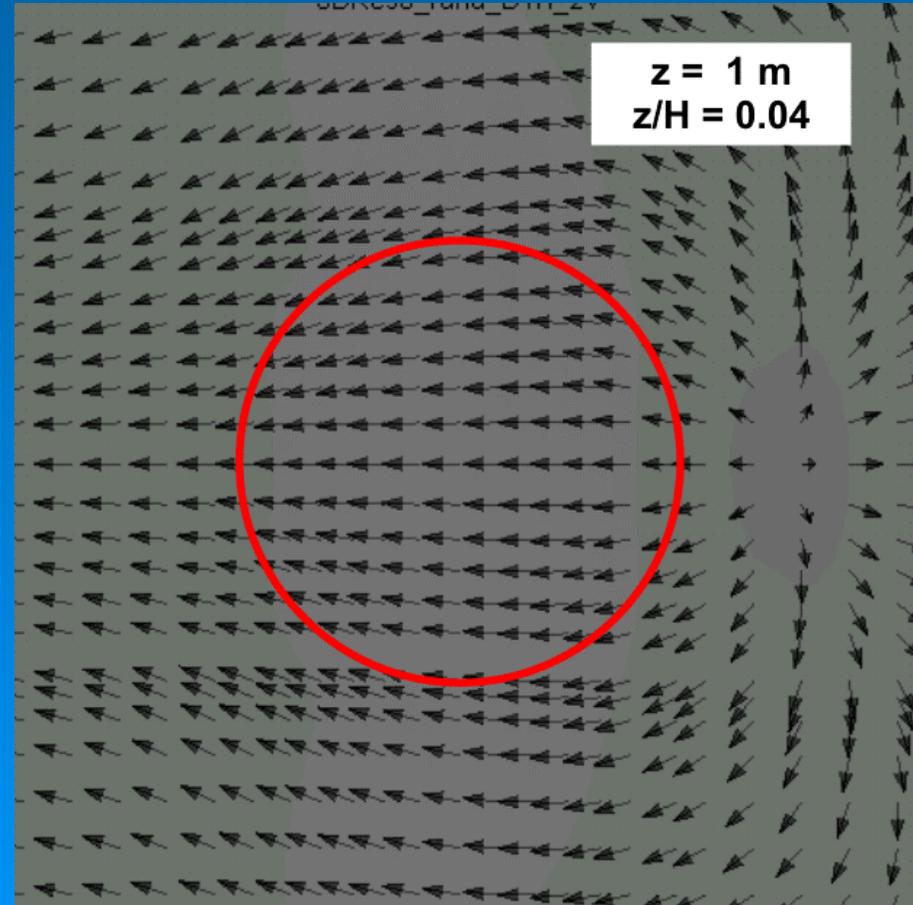
CFD: Lichtungsform



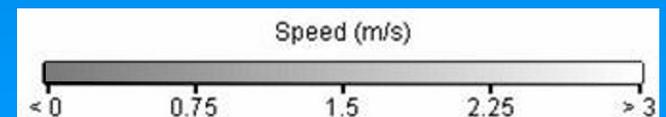
Quadratisch (1H x 1H)



Rund (D = 1H)



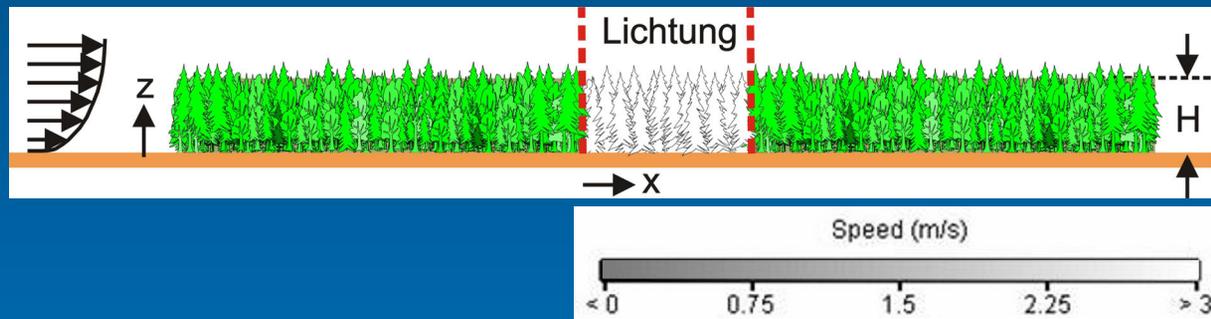
Horizontalebene (xy-Ebene)
Bewegung in z-Richtung



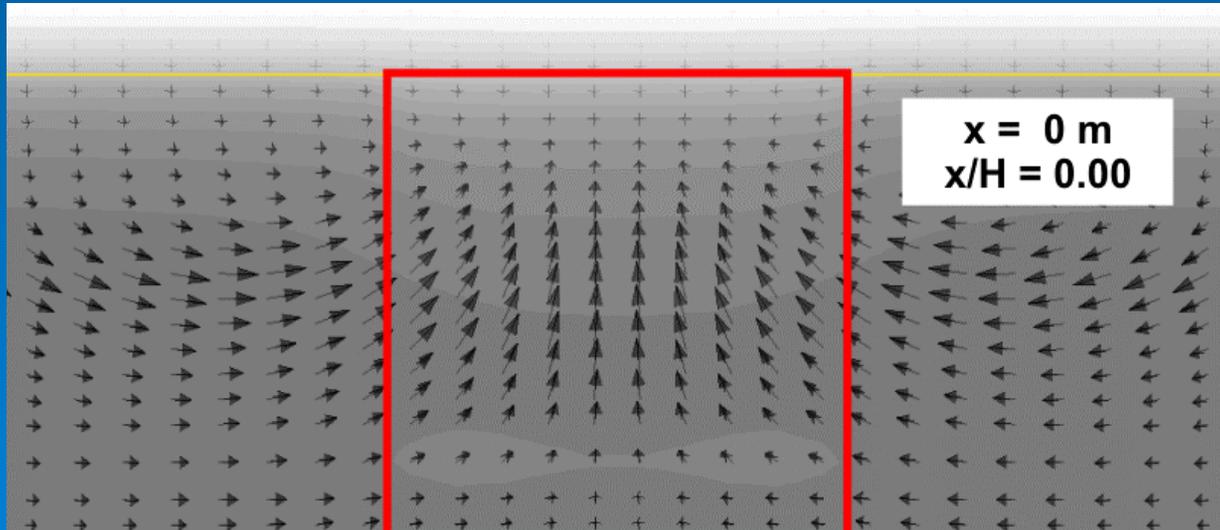
CFD: Lichtungsform

Vertikalebene (yz-Ebene)

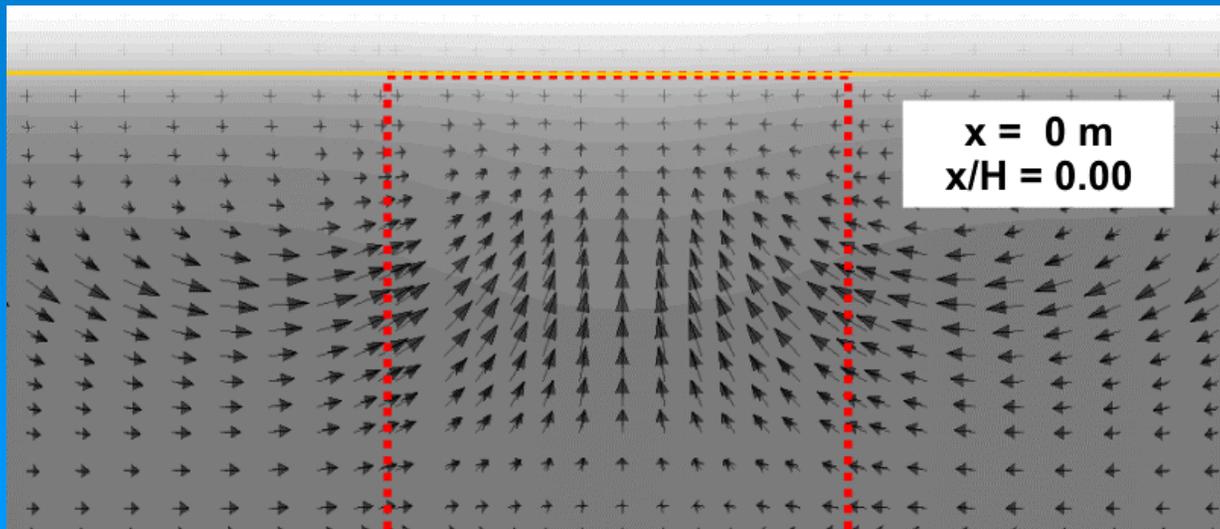
Bewegung in x-Richtung



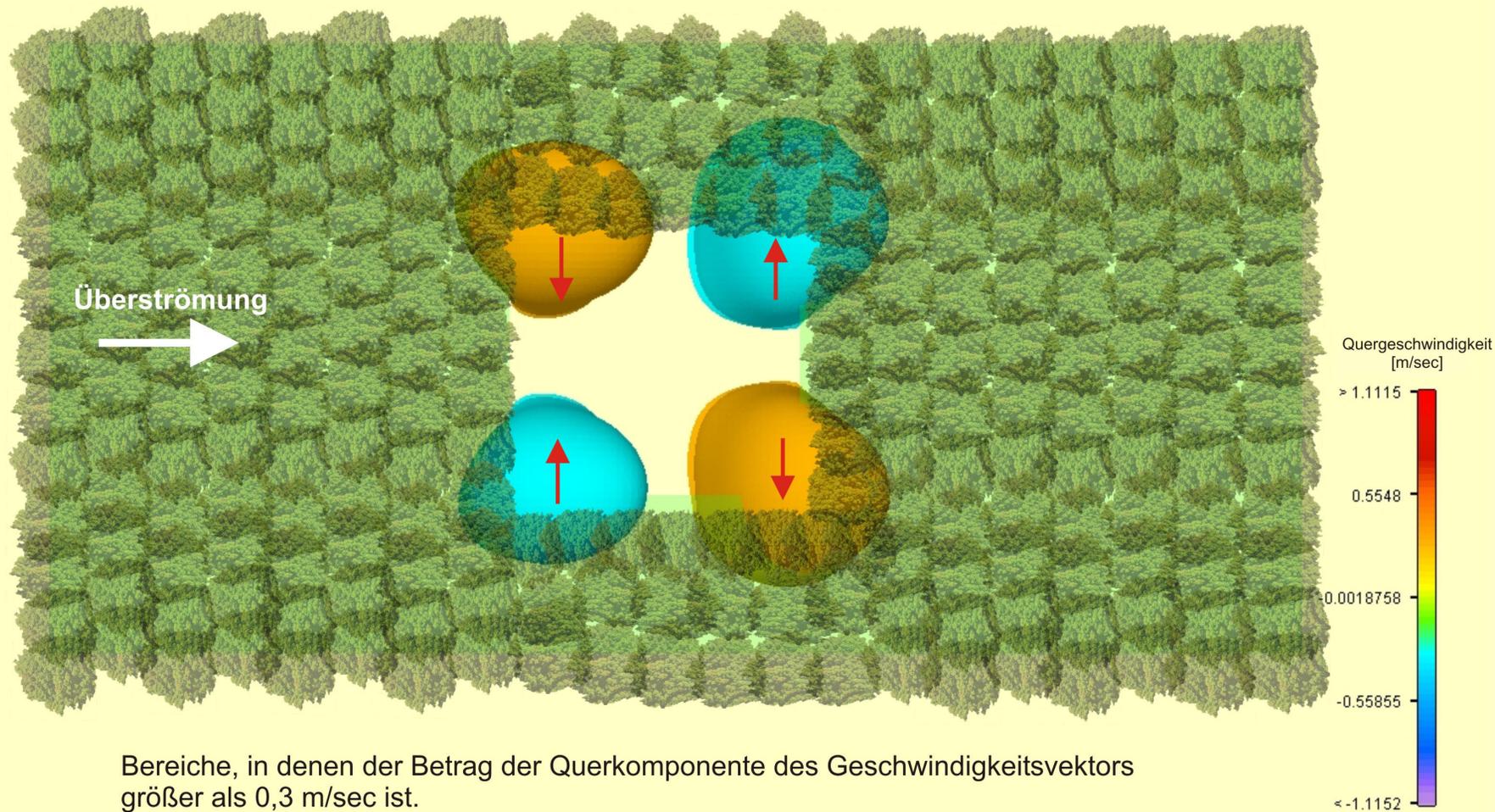
Quadratisch
($1H \times 1H$)



Rund
($D = 1H$)



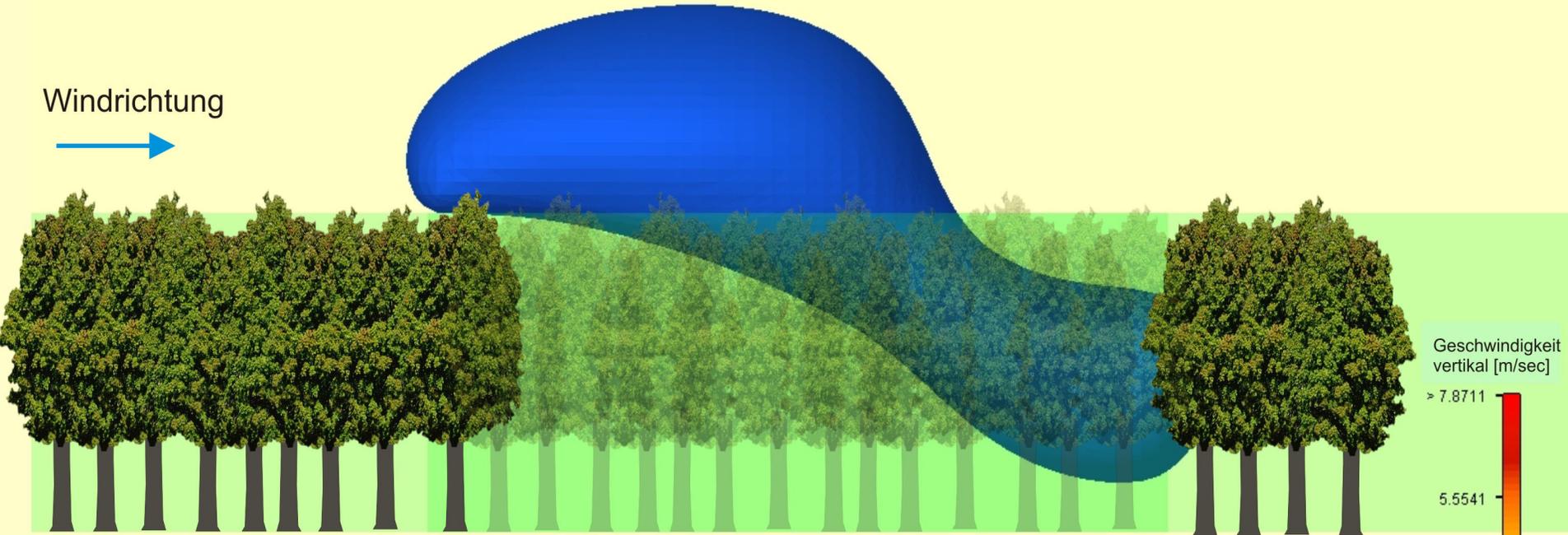
Querströmungen in einer Lichtung (Blick von oben)



Bereiche, in denen der Betrag der Querkomponente des Geschwindigkeitsvektors größer als 0,3 m/sec ist.

Raumbereiche absinkender Luftmassen in einer Lichtung

Windrichtung



Im Volumen, das durch die blaue Isofläche umhüllt wird, beträgt die nach unten gerichtete Geschwindigkeitskomponente mehr als 0,4 m/sec

CFD-Simulation (FLOVENT), Bestandhöhe: 20 m, $u_{ref} = 13,4$ m/sec in $h_{ref} = 10$ m ,
 $\alpha = 0.20$ (Exponent des Windprofils der Anströmung);

Geschwindigkeit
vertikal [m/sec]

> 7.8711

5.5541

3.2371

0.92011

< -1.3969

Bestimmung Stammbiegemomente

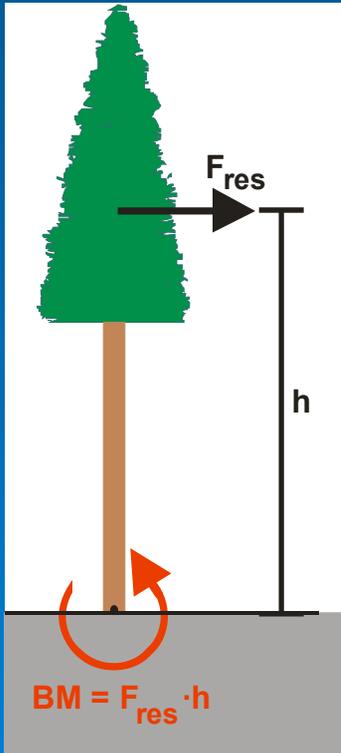
Mittlere und maximale Biegemomente BM werden aus den numerisch (mit dem Programmpaket FLOVENT) berechneten Strömungsgrößen abgeleitet

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

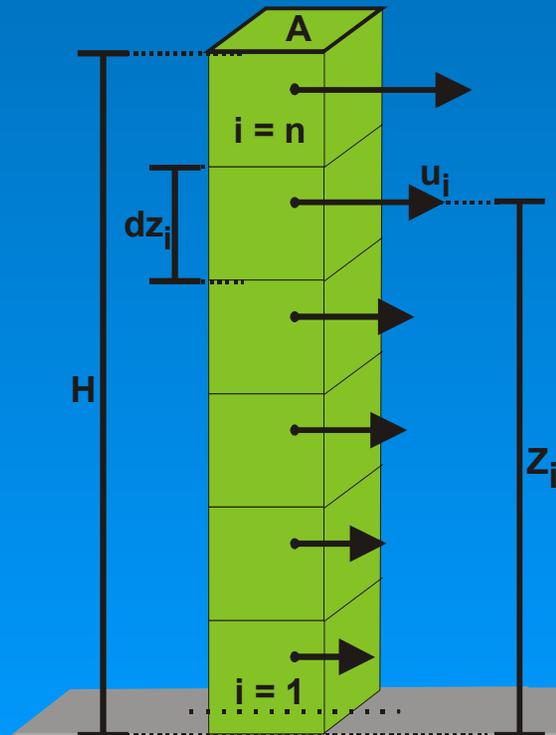
$$BM_{\text{max}} = \sum_{i=1}^n 0.5 \cdot \rho \cdot (u_i + g u'_i) \cdot (|u_i| + g u'_i) \cdot c_d \cdot a \cdot A(z_i) \cdot dz_i \cdot z_i$$

und in Form dimensionsloser Biegemomentenkoeffizienten dargestellt

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

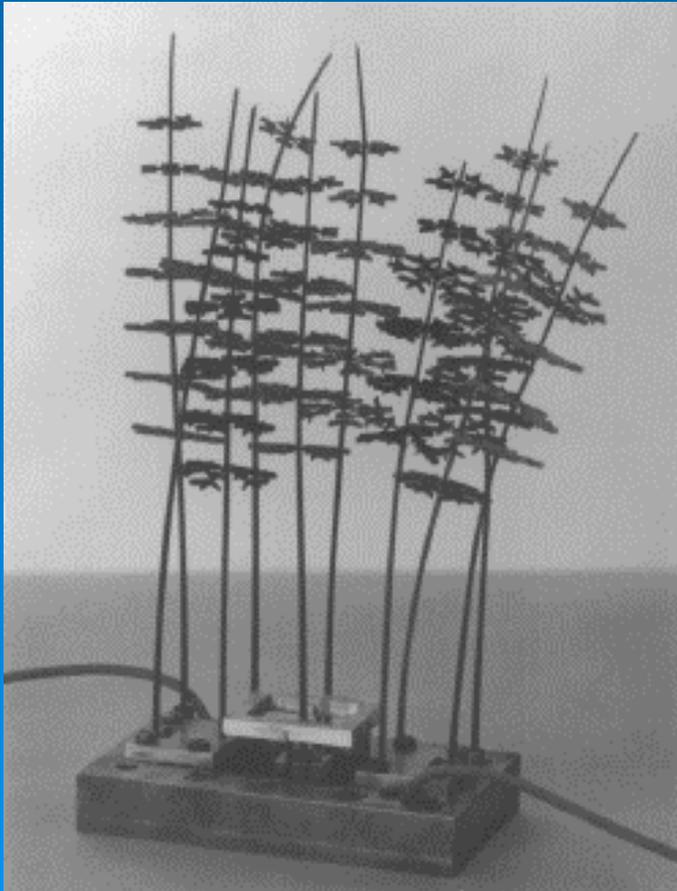


- u_i = mittlere horizontale Geschwindigkeit
- g = Böenfaktor ($g = 1.5$)
- u'_i = Standardabweichung der horizontalen Geschwindigkeit
Ann.: Isotrope Turbulenz ($u' = 0.82 \cdot TKE^{0.5}$)
- $A(z_i)$ = Grundfläche eines Baums,
Ann.: Vertikal homogener Aufbau ($A = 1.73 \times 1.73 \text{ m}^2$)
- ρ = 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
- $u_{\text{ref}} = 6.7 \text{ m/s}$ in $z_{\text{ref}} = 43.7 \text{ m}$
- H = Bestandshöhe



Literatur: Biegemomente

Messungen mittlerer und extremer Biegemomente im Windkanal an aeroelastischen Waldmodellen mit einer Biegemomentenwaage: Gardiner et al. 2005, Gardiner und Stacey 1996, Gardiner et al. 1997, Marshall 1998 und Stacey et al. 1994.

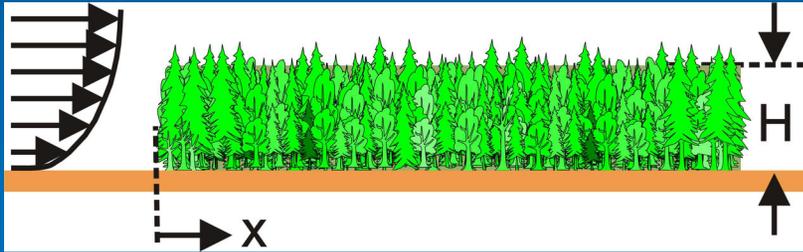


Extreme BM wurden mittels Extremwertanalyse aus den Zeitreihen der gemessenen Biegemomente bestimmt.

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

- Flexible Modellbäume
- Modellbaumeigenschaften typisch für Sitkafichten
- Maßstab 1:75
- 2 verschiedene Anströmungen:
 - Mid-forest: $z_0 = 0.5 \text{ m}$
 - Waldkante: $z_0 = 0.1 \text{ m}$ (Ackerland)
- Modellwald: $2.4 \times 2.4 \text{ m}^2$ ($180 \times 180 \text{ m}^2$)
- Bestandsdichte BD = 100 %: 3332 Bäume/ha
- Baumabstand bei BD = 100 %: 1.73 m

Verlauf des Biegemoments bei einem homogenen Waldbestand: Vergleich mit Literaturdaten

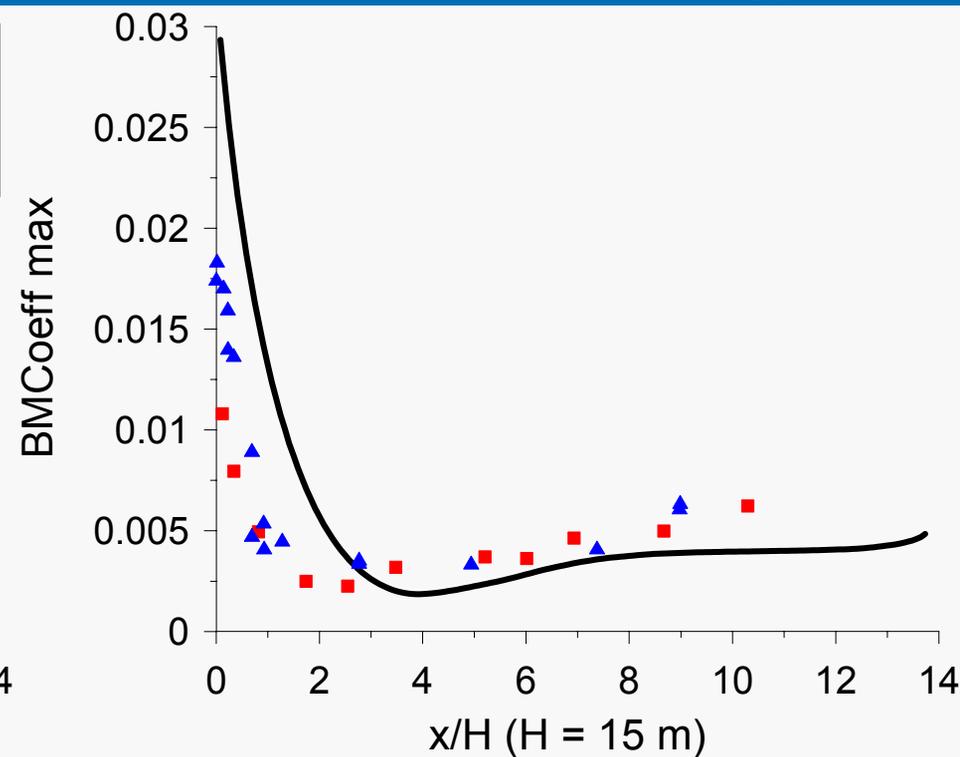
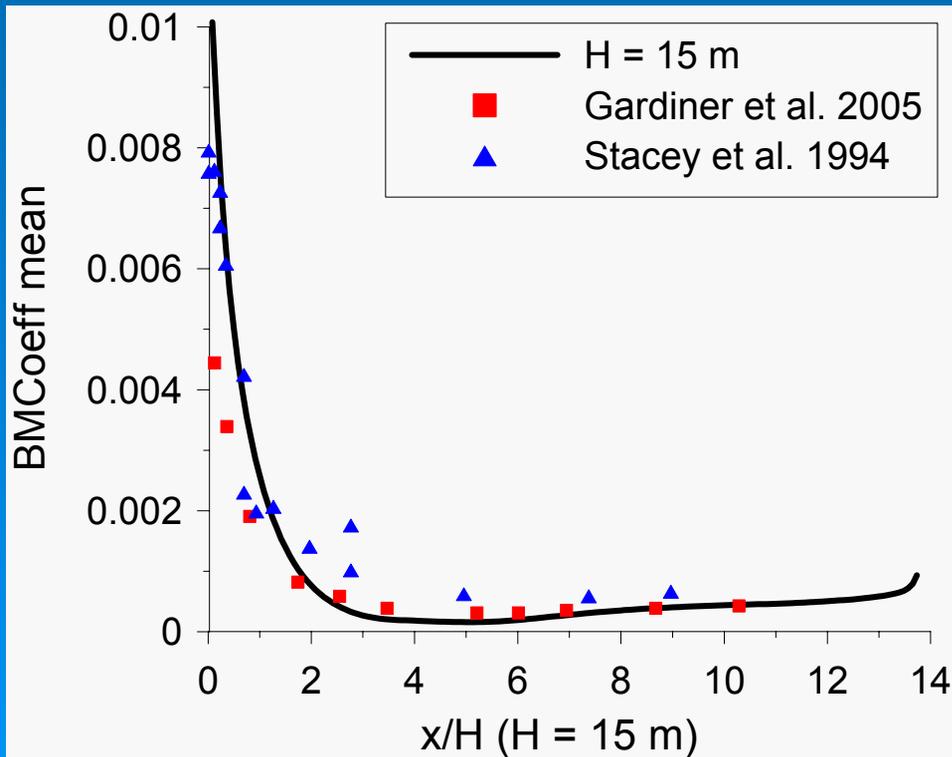


$$\text{BMCoeff} = \frac{\text{BM}}{0.5 \cdot \rho \cdot u_{\text{ref}}^2 \cdot H_{\text{ref}}^3}$$

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

$$L = 206 \text{ m}$$

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



Es gibt Unterschiede in der Anströmung und beim Bestandsaufbau;
 extremes BM \leftrightarrow maximales BM, flexible Bäume \leftrightarrow starre Bäume

Einfluss der Bestandshöhe H auf den Verlauf des Biegemoments

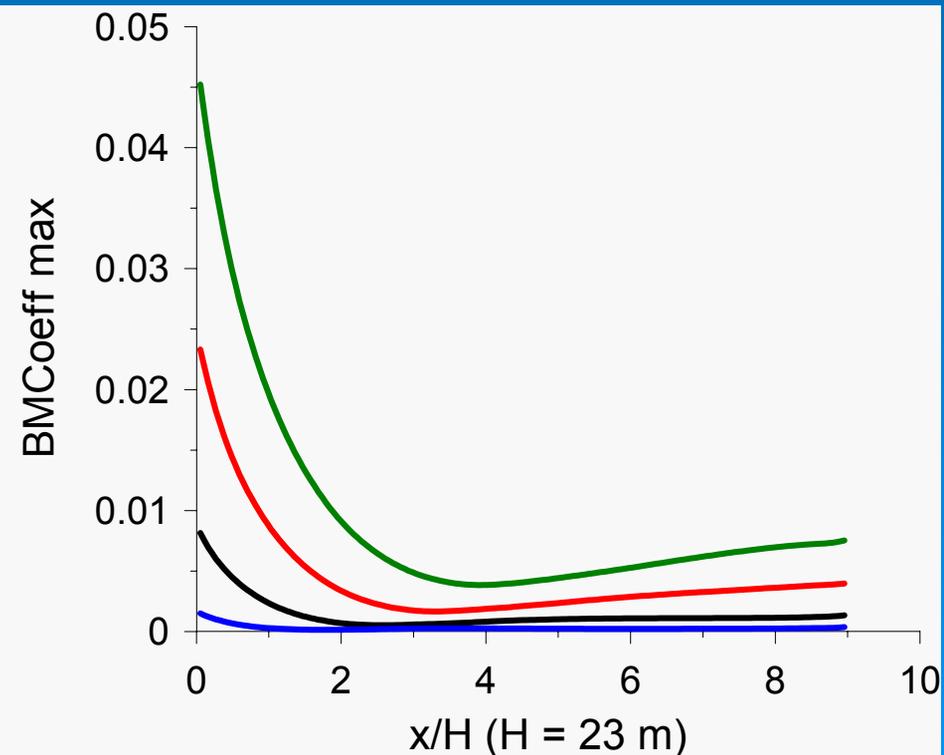
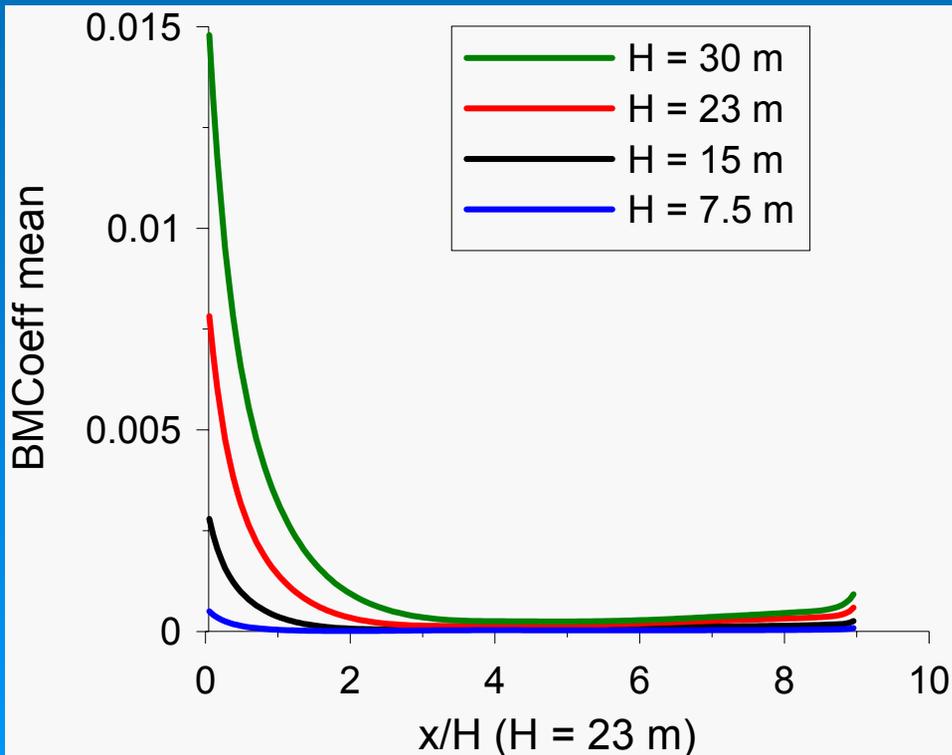
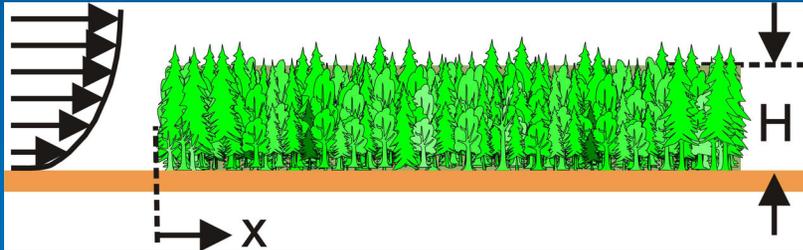
$$\text{BMCoeff} = \frac{\text{BM}}{0.5 \cdot \rho \cdot u_{\text{ref}}^2 \cdot H_{\text{ref}}^3}$$

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

$L = 206 \text{ m}$

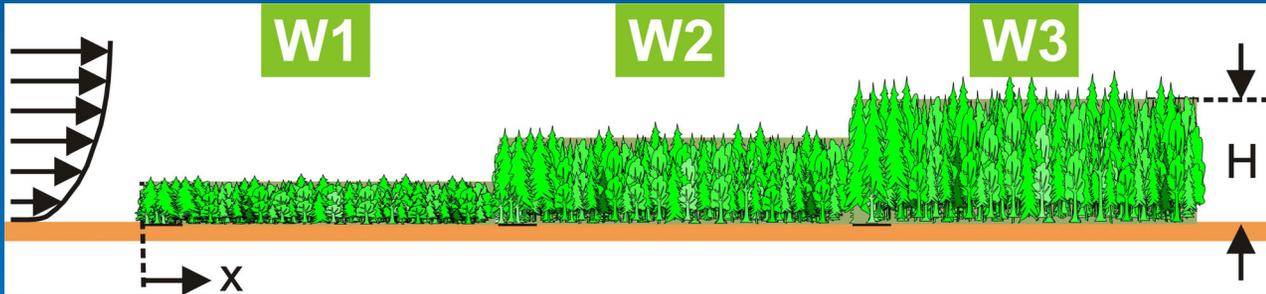
$H = 30 / 23 / 15 / 7.5 \text{ m}$

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



Verlauf des Biegemoments bei einer Streifenanordnung

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

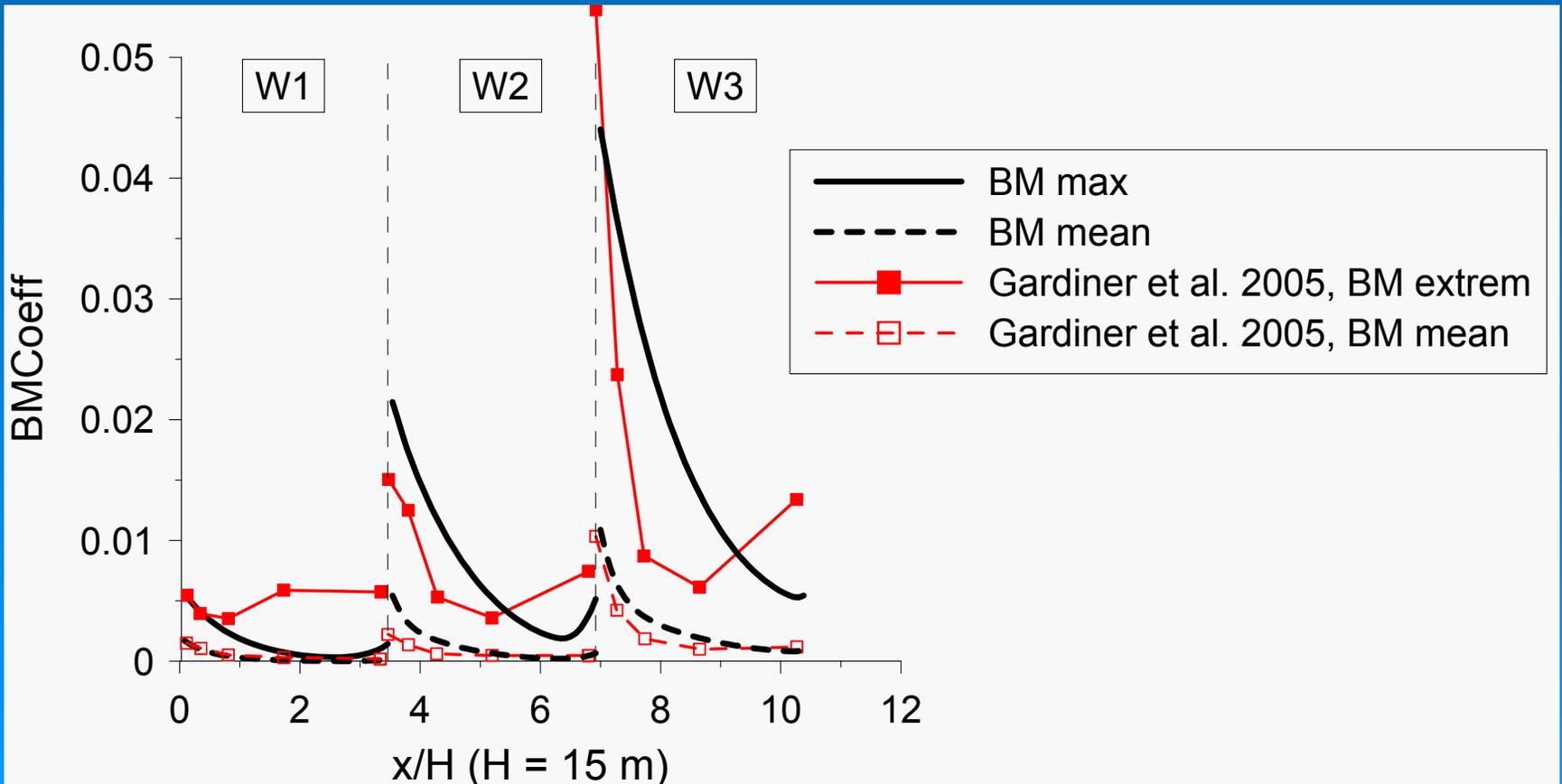


$u_{\text{ref}} = 6.7 \text{ m/s}$

$L1 = L2 = L3 = 51.9 \text{ m}$

$H1 = 7.5 \text{ m}, H2 = 15 \text{ m}$

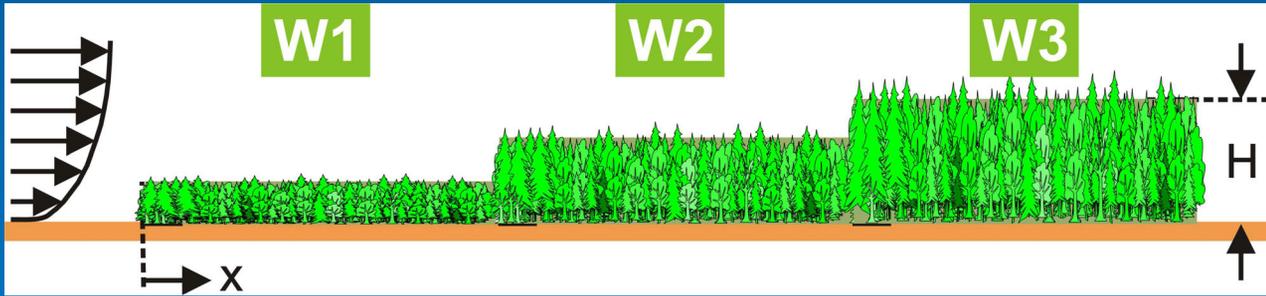
$H3 = 22.5 \text{ m}, H_{\text{ref}} = 15 \text{ m}$



Streifenanordnung

Schützen niedrige Waldbestände unmittelbar stromab angeordnete (höhere) Waldbestände?

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



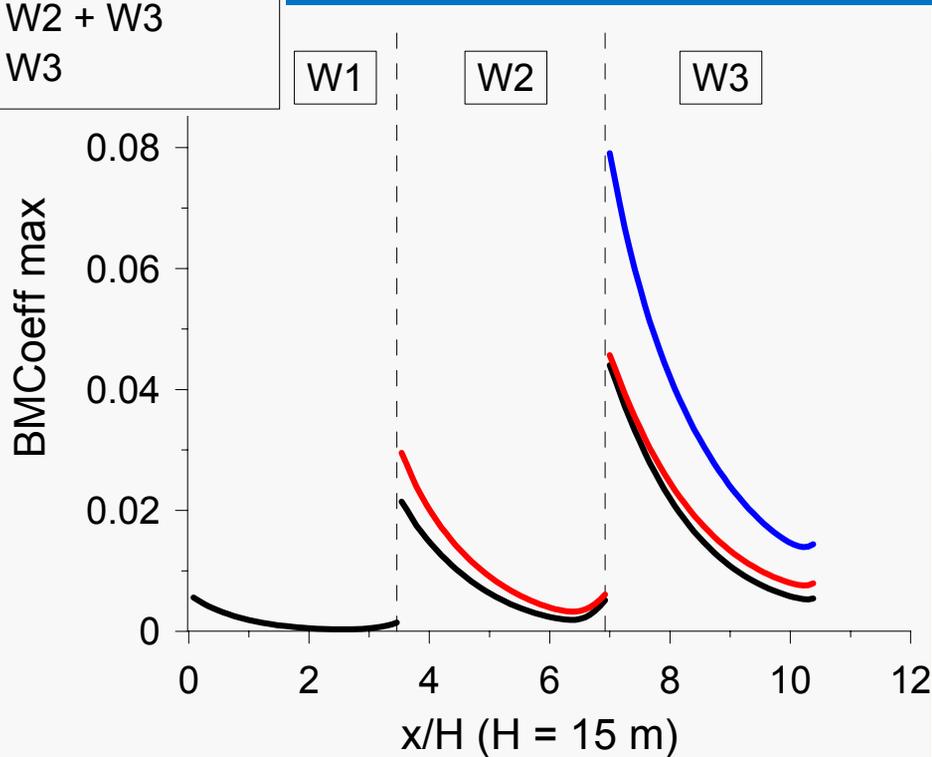
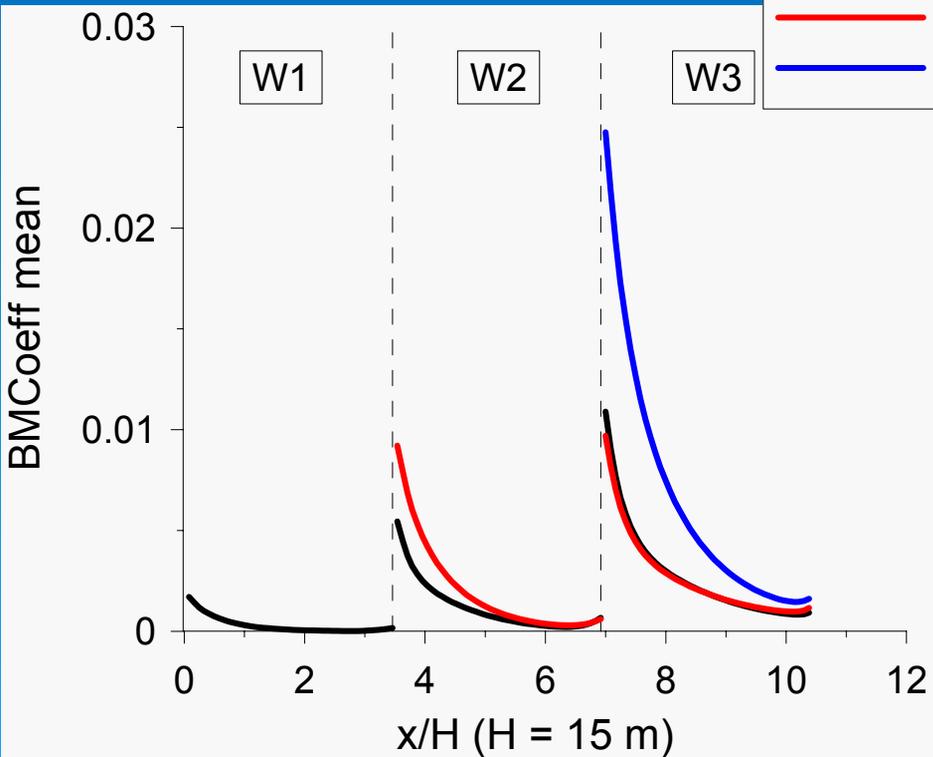
$$u_{\text{ref}} = 6.7 \text{ m/s}$$

$$L1 = L2 = L3 = 51.9 \text{ m}$$

$$H1 = 7.5 \text{ m}, H2 = 15 \text{ m}$$

$$H3 = 22.5 \text{ m}, H_{\text{ref}} = 15 \text{ m}$$

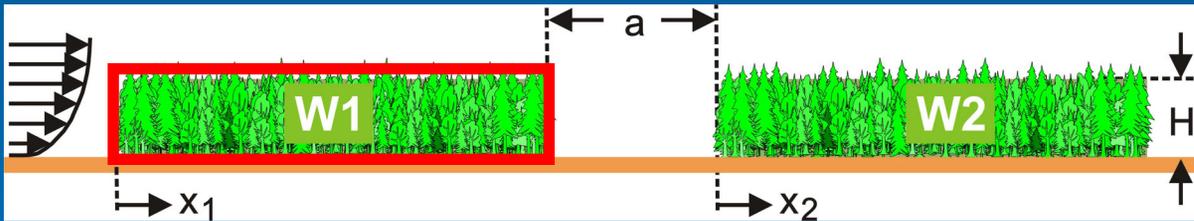
- W1 + W2 + W3
- W2 + W3
- W3



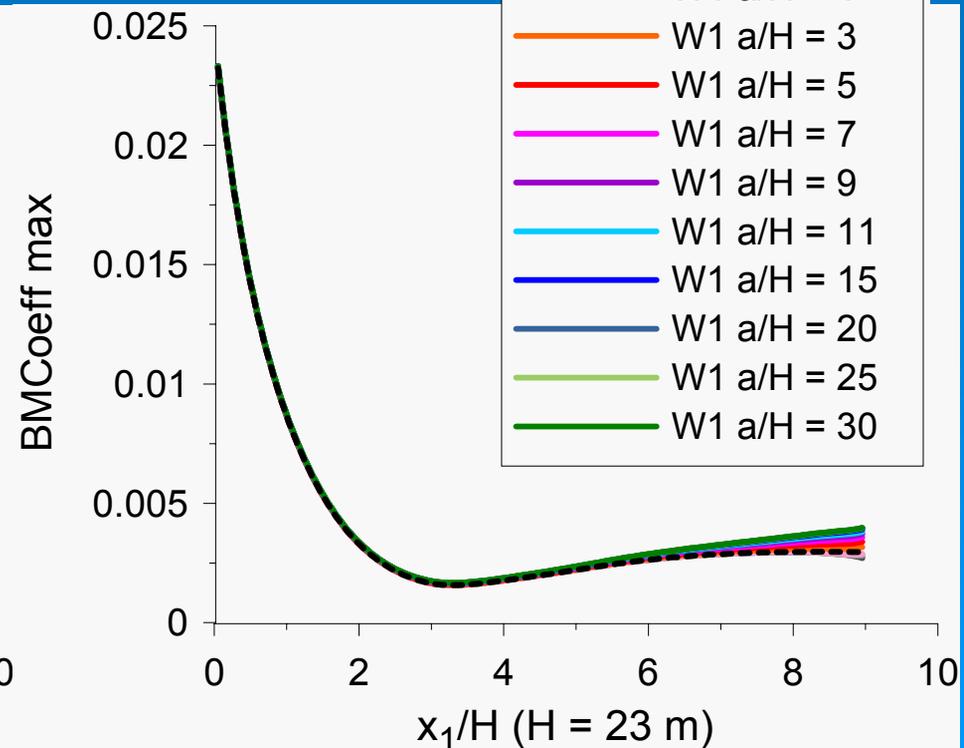
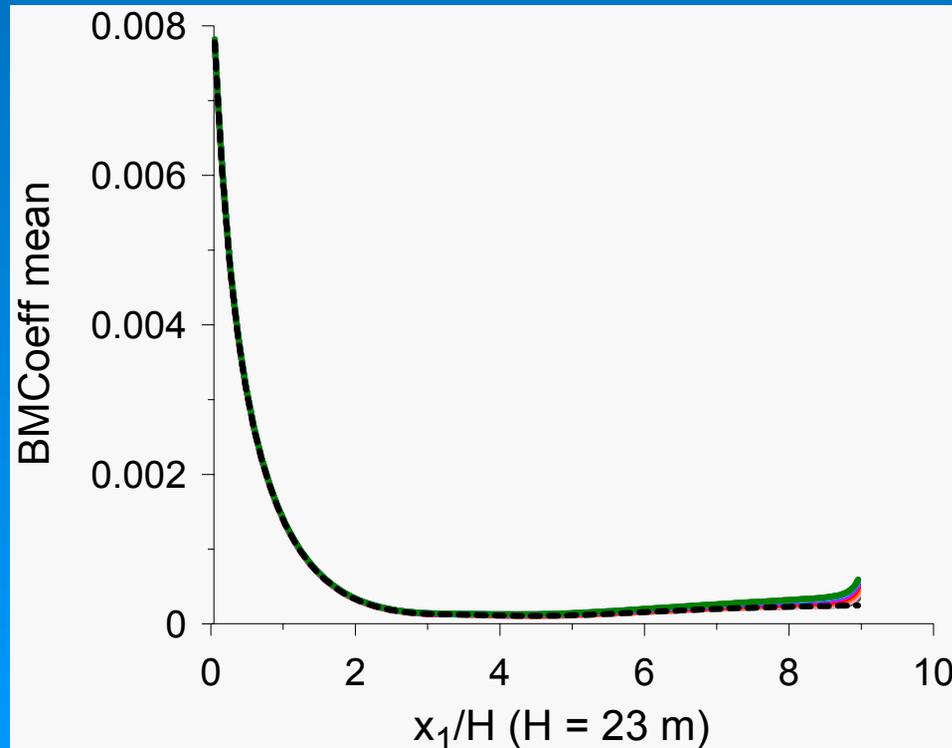
Einfluss der Lichtungsbreite a auf den Verlauf des Biegemoments

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

$u_{\text{ref}} = 6.7 \text{ m/s}$, $L1 = L2 = 206 \text{ m}$
 $H = H_{\text{ref}} = 23 \text{ m}$

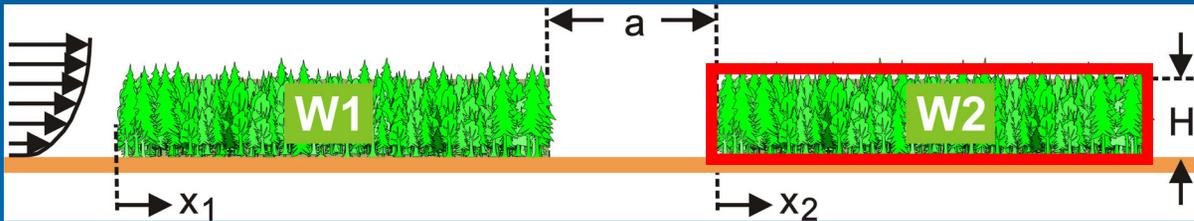


- nur W1
- - - W1 a/H = 0
- W1 a/H = 0.25
- W1 a/H = 0.5
- W1 a/H = 0.75
- W1 a/H = 1
- W1 a/H = 3
- W1 a/H = 5
- W1 a/H = 7
- W1 a/H = 9
- W1 a/H = 11
- W1 a/H = 15
- W1 a/H = 20
- W1 a/H = 25
- W1 a/H = 30



Einfluss der Lichtungsbreite a auf den Verlauf des Biegemoments

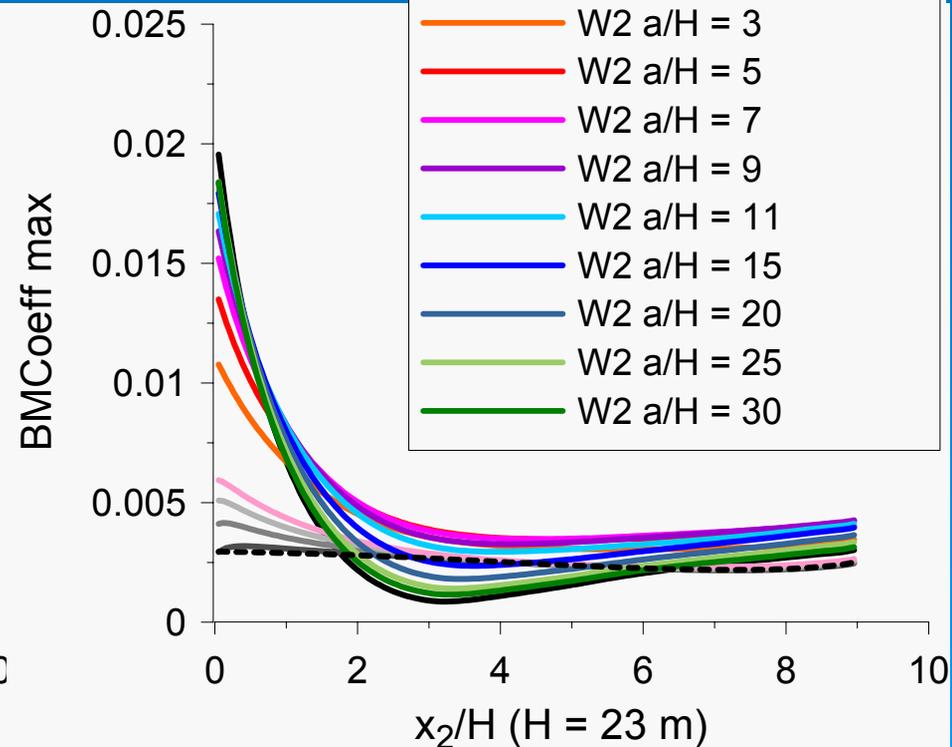
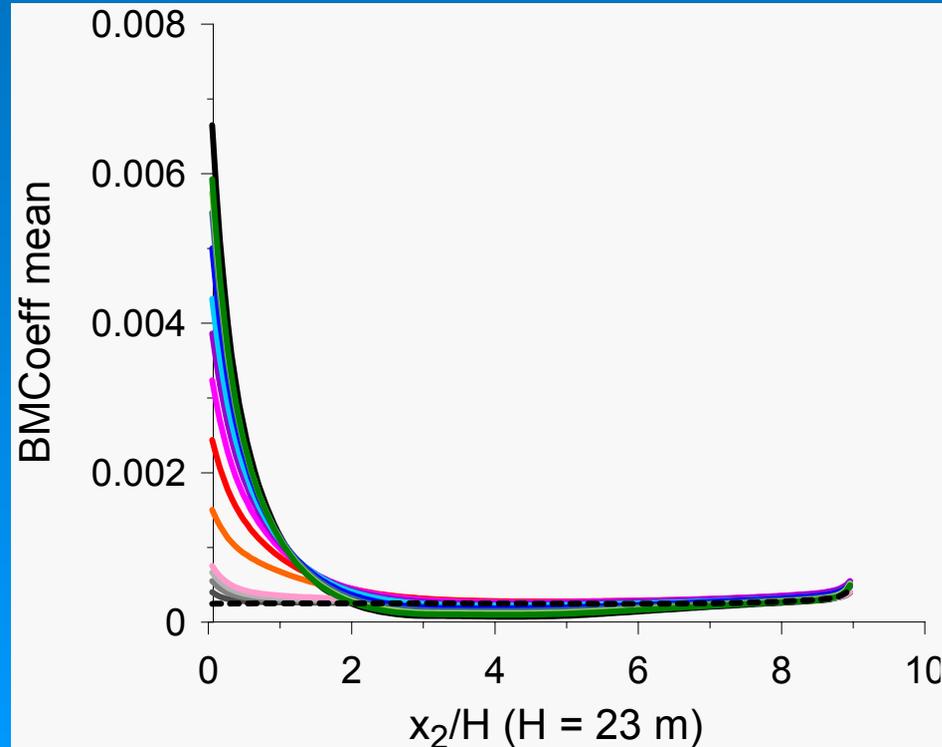
$$\text{BMCoeff} = \frac{\text{BM}}{0.5 \cdot \rho \cdot u_{\text{ref}}^2 \cdot H_{\text{ref}}^3}$$



$$u_{\text{ref}} = 6.7 \text{ m/s}, L1 = L2 = 206 \text{ m}$$

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

- 1W (Pos W2 $a/H = 0$)
- - - W2 $a/H = 0$
- W2 $a/H = 0.25$
- W2 $a/H = 0.5$
- W2 $a/H = 0.75$
- W2 $a/H = 1$
- W2 $a/H = 3$
- W2 $a/H = 5$
- W2 $a/H = 7$
- W2 $a/H = 9$
- W2 $a/H = 11$
- W2 $a/H = 15$
- W2 $a/H = 20$
- W2 $a/H = 25$
- W2 $a/H = 30$

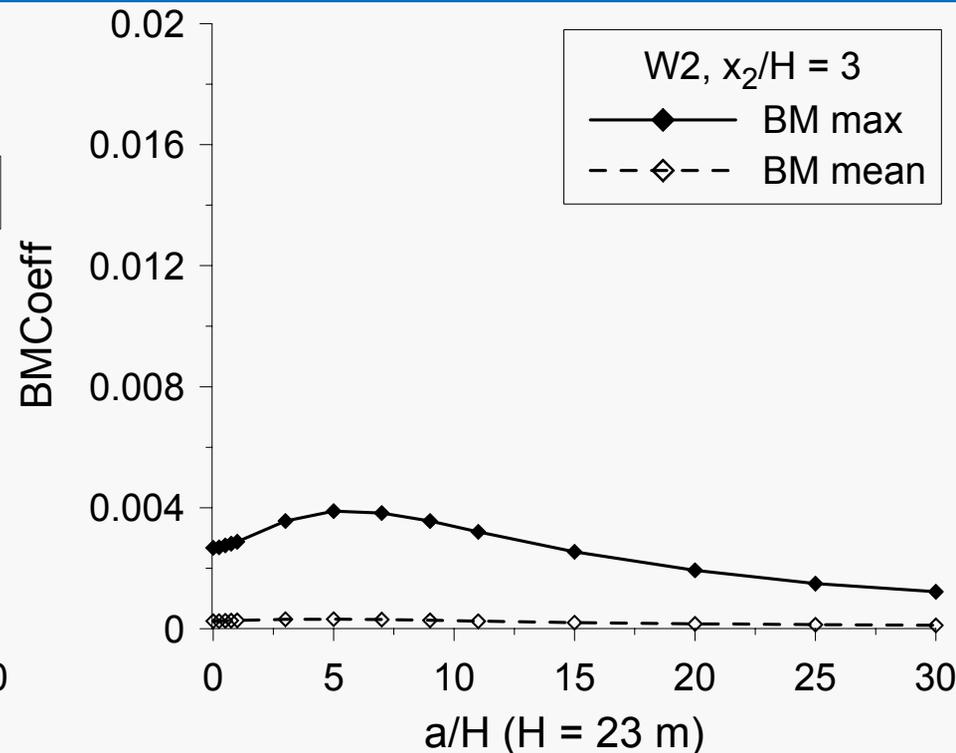
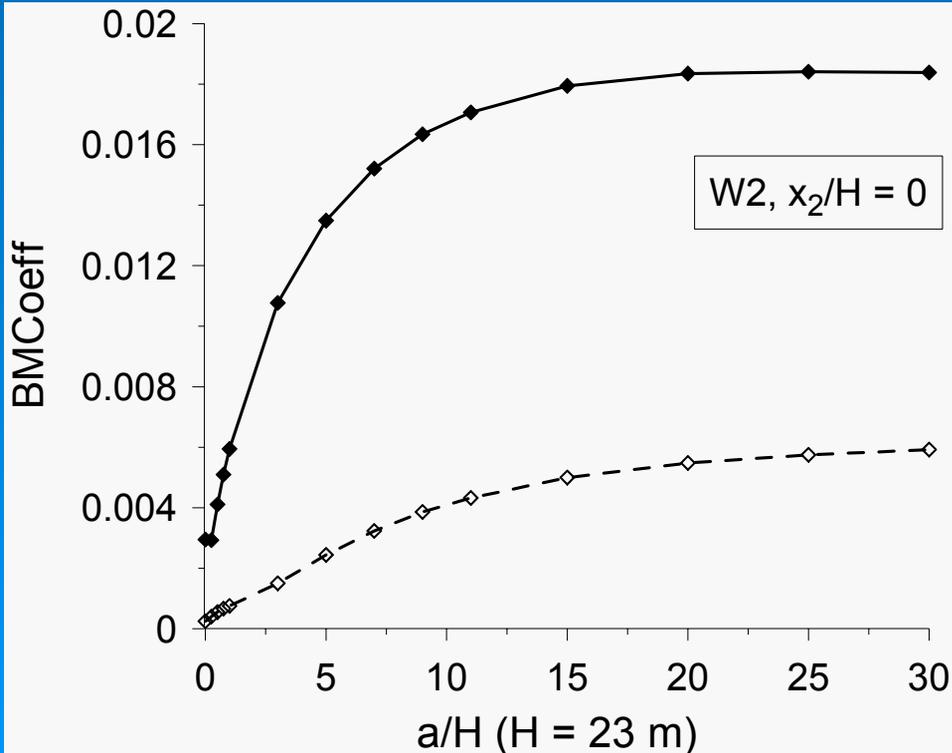
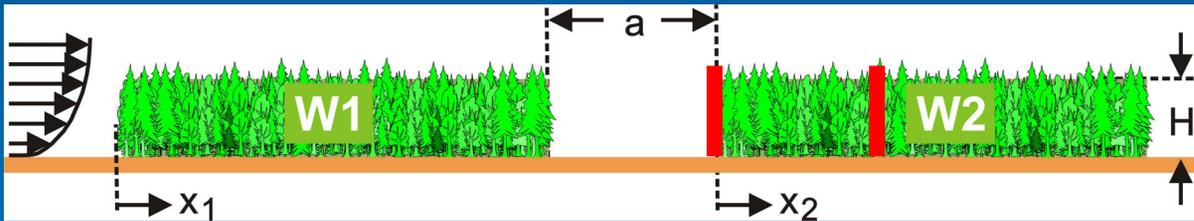


Einfluss der Lichtungsbreite a auf den Verlauf des Biegemoments

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

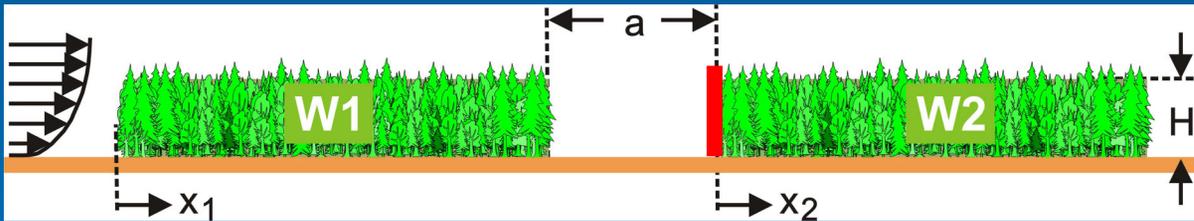
$$u_{\text{ref}} = 6.7 \text{ m/s}, L1 = L2 = 206 \text{ m}$$

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

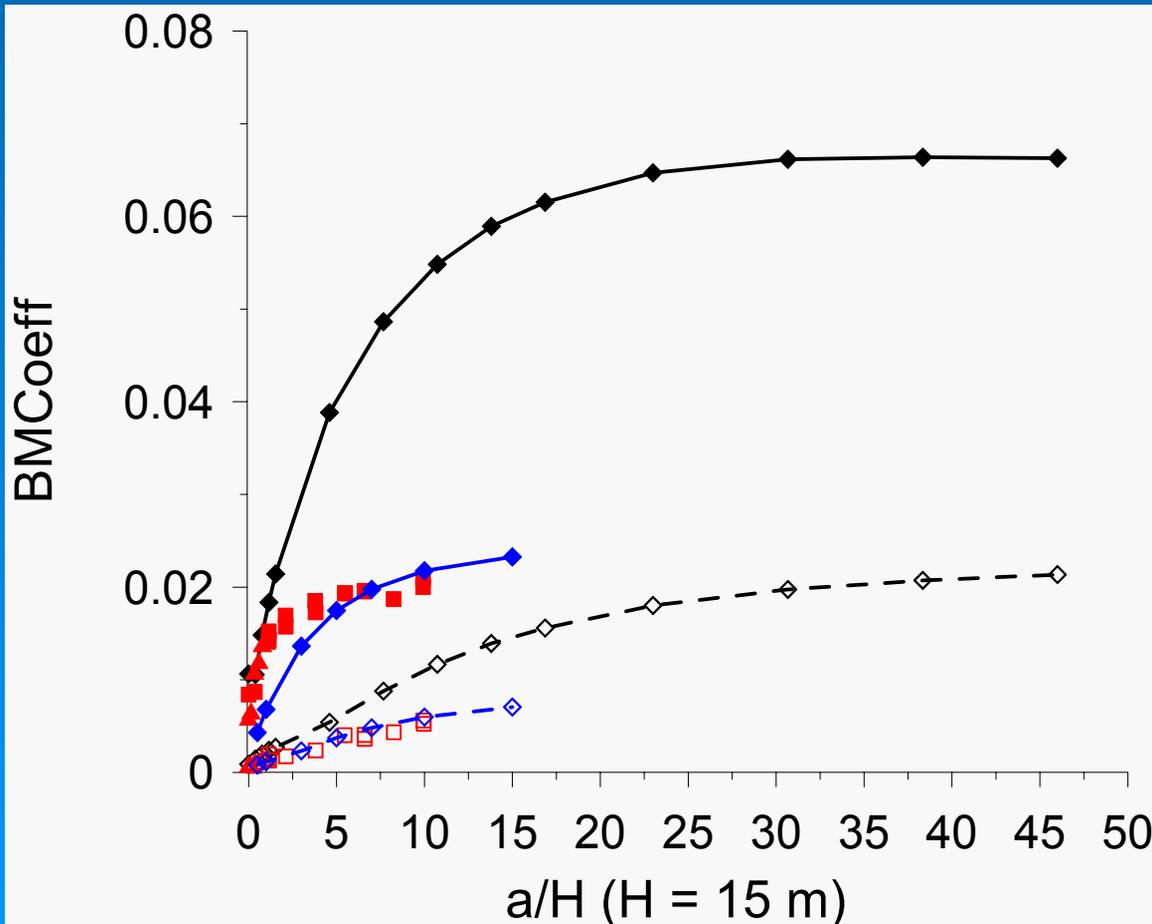


Einfluss der Lichtungsbreite a auf den Verlauf des Biegemoments

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



$u_{\text{ref}} = 6.7 \text{ m/s}$, $L1 = L2 = 206 \text{ m}$
 $H = 15 \text{ m} / 23 \text{ m}$
 $H_{\text{ref}} = 15 \text{ m}$



$W2, x_2/H = 0$

- ◆— BM max, $H = 23 \text{ m}$
- ◆— BM max, $H = 15 \text{ m}$
- - ◆ - - BM mean, $H = 23 \text{ m}$
- - ◆ - - BM mean, $H = 15 \text{ m}$

Stacey et al. 1994
 ($H = 15 \text{ m}$, $L1 = L2 = 90 \text{ m}$)

- ▲ BM max_Hole
- BM max_Gap
- BM mean_Gap
- △ BM mean_Hole

Zusammenfassung

Mittlere und maximale Stammbiegemomente wurden aus den numerisch berechneten Strömungsgrößen bestimmt und, sofern möglich, mit Literaturdaten verglichen.

Die Übereinstimmung mit den Literaturdaten ist bei den mittleren Biegemomenten insgesamt gut. Quantitative Abweichungen sind bei den maximalen Biegemomenten – insbesondere in Kantennähe - zu beobachten; Tendenzielle Verläufe scheinen prinzipiell jedoch richtig wiedergegeben zu werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass

- die Biegemomente mit zunehmender Waldhöhe deutlich ansteigen.
- bei einer Streifenanordnung niedrige Waldbestände unmittelbar stromab angeordnete, höhere Bestände schützen.
- die Lichtungsbreite den Biegemomentenverlauf über der stromauf gelegenen Waldfläche nur wenig beeinflusst. Im Gegensatz hierzu ist der Einfluss der Lichtungsbreite auf den Biegemomentenverlauf bei der stromab gelegenen Waldfläche groß: Unmittelbar an der luvseitigen Waldkante nehmen mit zunehmender Lichtungsbreite die Biegemomente merklich zu.

Ausblick

- Weitere Berechnung von Biegemomenten (Bestandsdichte, Kantenform, Hangneigung...)
- Durchführen weiterer Windkanaluntersuchungen
- Konzeption und Bau eines dynamischen Bestandsmodells

Einordnung der Ergebnisse

Die experimentellen und numerischen Ergebnisse und Detailstudien werden dazu benutzt, die auftretenden Wurf-/Bruchkräfte auf Bäume im Bestand zu erfassen bzw. zu systematisieren (→Aufstellen eines Leitfadens in Zusammenarbeit mit den Projekten RESTER-UniFR-1 und RESTER-UniKA-2).

Wurf-/Bruchkraft auf einen Bestandsbaum

$$F_B = C_{gs} \cdot C_{dfe} \cdot C_{es} \cdot C_{cd} \cdot C_{sl} \cdot C_{cm} \cdot C_{td} \cdot C_{sp} \cdot C_{th} \cdot C_{tw} \cdot C_{wp} \cdot C_{tp} \cdot C_{st} \cdot C_{sd} \cdot C_{rd} \cdot C_{rw} \cdot C_w \cdot \frac{\rho}{2} \cdot (\bar{u}^2 + 2 \cdot \bar{u} \cdot u'(t) + u'^2(t)) \cdot A_p$$

The equation is annotated with various parameters and their corresponding physical quantities:

- C_{gs} : upwind gap size
- C_{dfe} : distance from edge
- C_{es} : edge properties
- C_{cd} : crown depth
- C_{sl} : snow load
- C_{cm} : crown mixture
- C_{td} : tree density
- C_{sp} : species
- C_{th} : tree height
- C_{tw} : tree weight
- C_{wp} : wood properties
- C_{tp} : topography
- C_{st} : soil type
- C_{sd} : stem diameter
- C_{rd} : rooting depth
- C_{rw} : rooting width
- C_w : tree aerodynamics
- $\frac{\rho}{2}$: mean wind speed
- \bar{u}^2 : wind speed fluctuation
- $2 \cdot \bar{u} \cdot u'(t)$: wind speed fluctuation
- $u'^2(t)$: cross section
- A_p : cross section

The terms \bar{u}^2 , $2 \cdot \bar{u} \cdot u'(t)$, and $u'^2(t)$ are highlighted in yellow, green, and blue circles respectively. Dashed lines connect these circles to labels A, B, and C above them.

Einfluss der Bestandshöhe H auf den Verlauf des Biegemoments

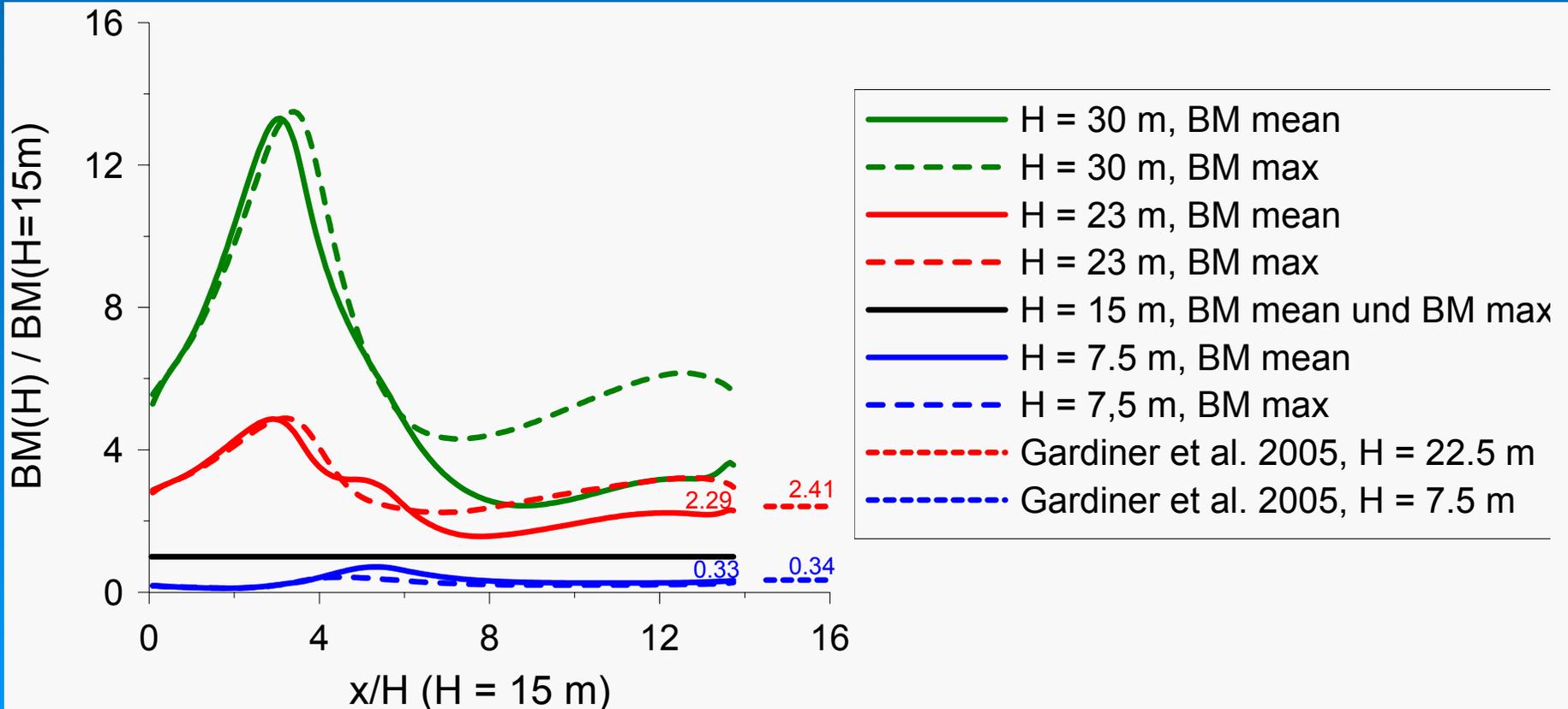
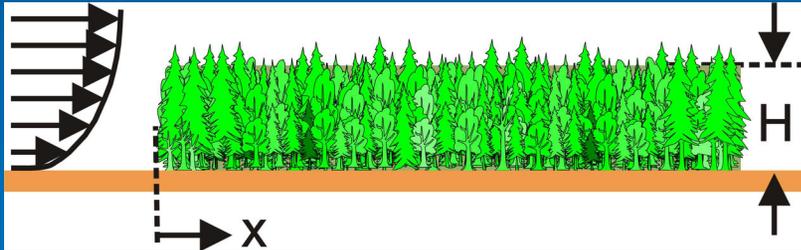
$$\text{BMCoeff} = \frac{\text{BM}}{0.5 \cdot \rho \cdot u_{\text{ref}}^2 \cdot H_{\text{ref}}^3}$$

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

$L = 206 \text{ m}$

$H = 30 / 23 / 15 / 7.5 \text{ m}$

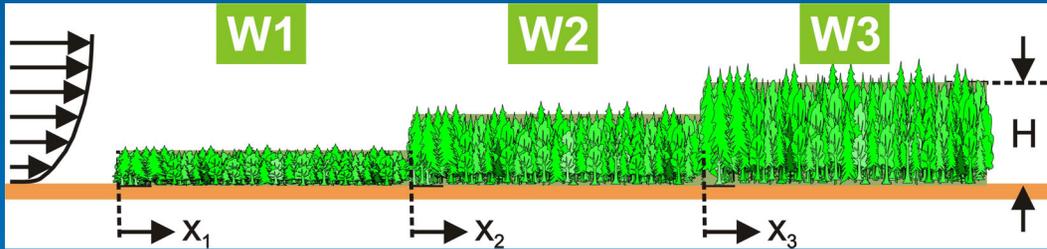
$H_{\text{ref}} = 15 \text{ m}$



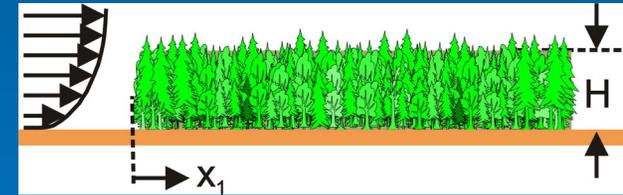
Vergleich Biegemomentenverlauf Streifenanordnung – homogener Bestand

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

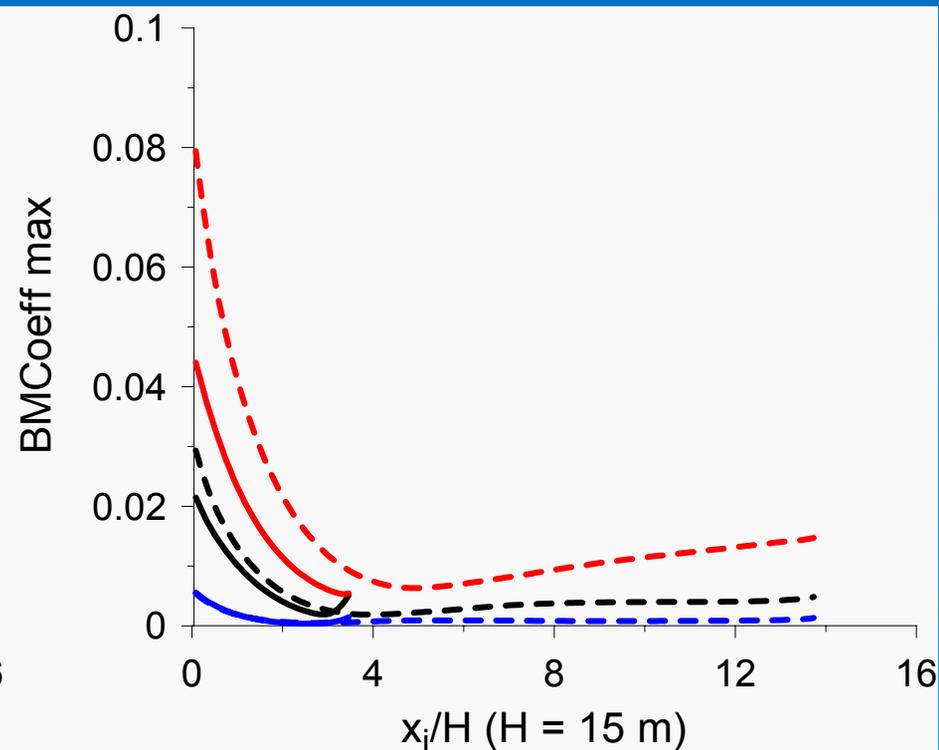
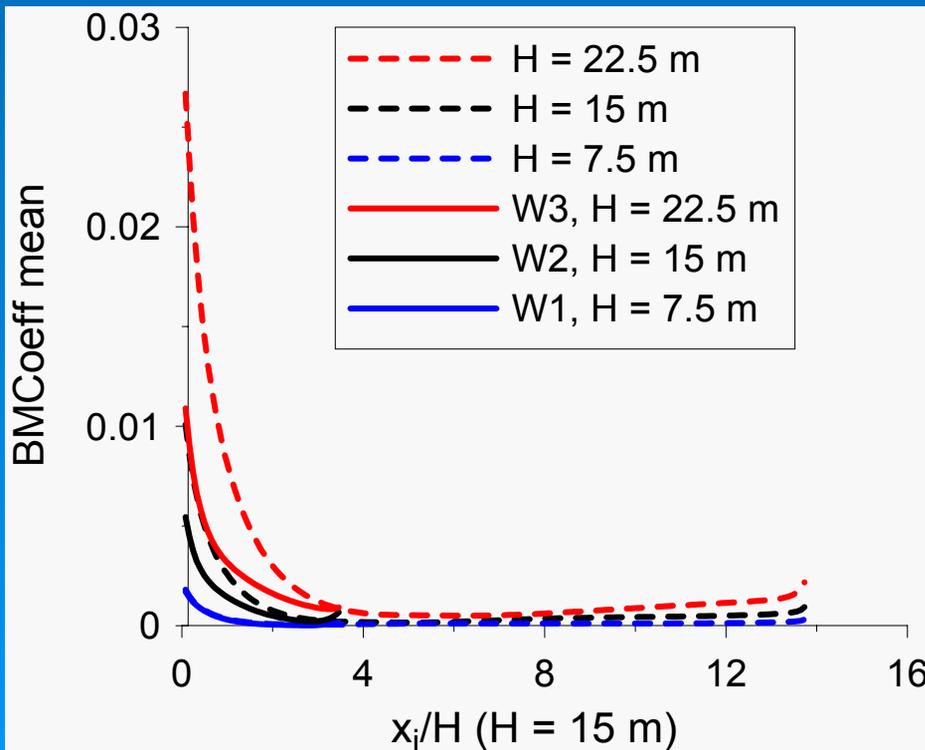
$$u_{\text{ref}} = 6.7 \text{ m/s}, H_{\text{ref}} = 15 \text{ m}$$



$L_1 = L_2 = L_3 = 51.9 \text{ m}, H_1 = 7.5 \text{ m}, H_2 = 15 \text{ m}, H_3 = 22.5 \text{ m}$



$L = 206 \text{ m}, H = 7.5 / 15 / 22.5 \text{ m}$

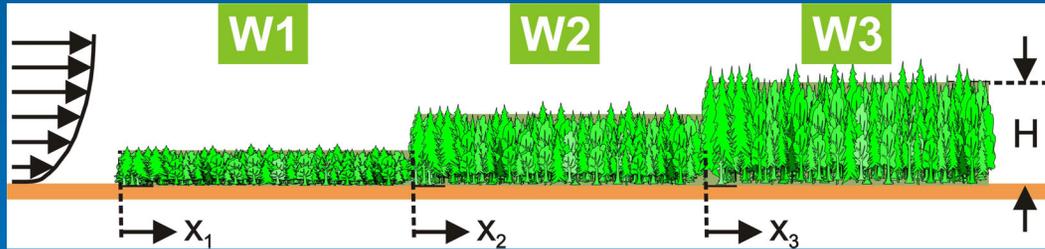


Vergleich Biegemomentenverlauf Streifenanordnung (WS) – Teilstreifen allein

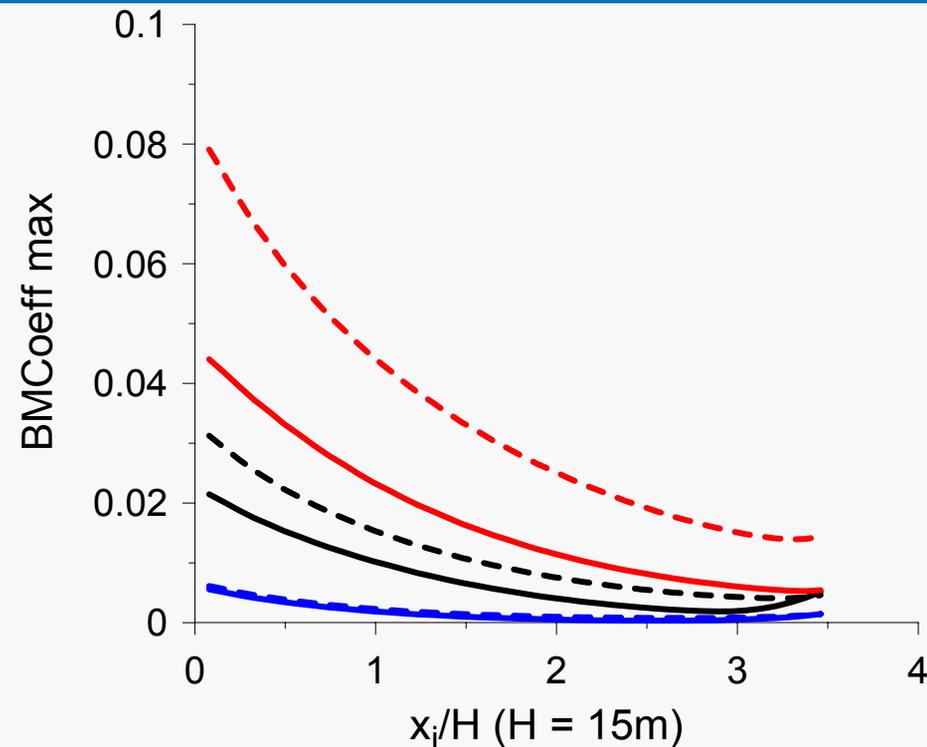
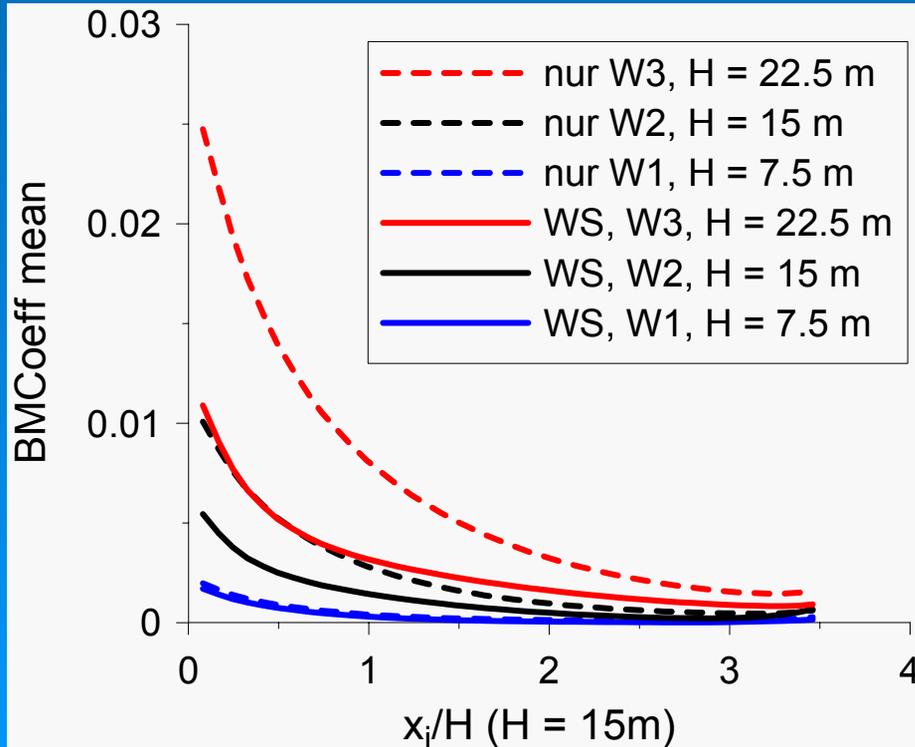
$$\text{BMCoeff} = \frac{\text{BM}}{0.5 \cdot \rho \cdot u_{\text{ref}}^2 \cdot H_{\text{ref}}^3}$$

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

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

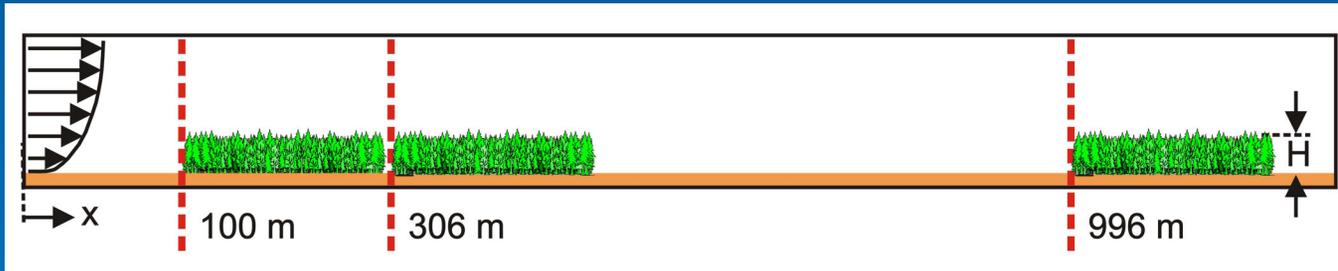


$L1 = L2 = L3 = 51.9 \text{ m}$, $H1 = 7.5 \text{ m}$, $H2 = 15 \text{ m}$, $H3 = 22.5 \text{ m}$



Einfluss der x - Position eines Bestands auf den Verlauf des Biegemoments

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



$$u_{\text{ref}} = 6.7 \text{ m/s}, L = 206 \text{ m}$$

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

Die Strömung im leeren Kanal verändert sich in Hauptströmungsrichtung leicht → Biegemomente hängen auch von der Lage des Waldes innerhalb des Rechenraums ab.

