

Belastung des Baumes durch den Wind

Bodo Ruck
Laboratorium für Gebäude- und Umweltaerodynamik
Institut für Hydromechanik
Karlsruhe Institute of Technology KIT

Was verursacht „Wind“ ?

Die Lufthülle um unseren Planeten wird als Atmosphäre bezeichnet. In ihr finden klein- bis großräumige Luftbewegungen statt. Diese Luftbewegungen werden von Druckunterschieden getrieben.

Ursache für den Aufbau von Druckunterschieden in der Atmosphäre ist die unterschiedliche Erwärmung der Erdoberfläche in Abhängigkeit von:



- ➔ Unterschiedliche Albedo verschiedener Oberflächen
- ➔ Geographische Lage (Breitengrad)
- ➔ Tag- und Nachtzyklus
- ➔ Abschattung durch Wolken/Wasserdampf/Luftverunreinigungen



Extremwinde entstehen durch Wirbel-systeme, die sich durch ihre Größen-skalen unterscheiden

Gefährliche Starkwinde

Bezeichnung	Durchmesser	Windgeschwindigkeit	Bemerkung
Windhose, Sand- oder Staubteufel (Klein-Trombe)	einige Meter	100-200 km/h	Entsteht durch aufsteigende bodennahe Warmluft, meist nur über ausgedehnten ebenen Flächen.
Tornado (Groß-Trombe)	100-1000 m	mehrere hundert km/h	Entsteht beim Aufeinandertreffen von trocken/kalter und feucht/warmer Luft
Tropische Wirbelstürme	einige hundert Kilometer	über 200 km/h	Entsteht immer über dem Meer, 26-27°C Wassertemperatur
Orkane (Aussertropische Zyklone)	1000-2000 km	bis 180 km/h	typ. für Nordeuropa, Intensität kann auch über Land zunehmen

Orkane in Europa

(Beispiele, Liste nicht vollständig)

Name	Datum	Auftreten	Spitzen- geschwindigkeit in km/h	Tote	volksw. Schäden in Mio €
Emma	01.03-02.03.08	Mitteleuropa	222 (WS)	14	1000
Gernot	02.03-04.03.07	Westeuropa	107(KA), 172(WS)	o.A.	
Kyrrill	18.01-19.01.07	Westeuropa	146 (FL), 202 (WS)	47	4500
Franz	10.01-12.01.07	Westeuropa	185 (WS)	o.A.	
Karla	30.12-31.12.06	Westeuropa	176 (HD)	o.A.	
Gero	11.-12.01.05	Nordeuropa	215	o.A.	
Erwin	08.01.2005	Nordeuropa	181 (SY)	14	
Quimburga	19.11.2005	Osteuropa	170	o.A.	
Gerda	12.01.2005	Westeuropa	170 (FB) 205 (WS)		
Jeanett	27.10.2002	Westeuropa	150 (FL)	27	80
Anna	26.02.2002	Westeuropa	160 (FL)	3	300
Jeniffer	28.01.2002	Westeuropa	156 (KÜ)		
Ginger	28.-29.05.2000	Westeuropa	112 (FL)	5	
Kerstin	29.01.2000	Nordeuropa	150 (FL)		
Liane	31.01.2000	Westeuropa	150 (FL)		
Martin	27.12.1999	Westeuropa	160 (FL)	30	4000
Lothar	26.12.1999	Westeuropa	155(S), 151(KA), 215(FB)	110	11500
Anatol	03.12.1999	Europa	150 (FL), 180 (SY)	20	2900
Wanda	02.12.1999	Nordeuropa	140 (FL)		
Verena	13.01.1993	Mittel-/Westeuropa	150 (FL)	55	
Winnie	24.10.1998	Mittel-/Westeuropa		3	500
Winterstürme	25.01.1990	Westeuropa		230	14800
Vivian	26.02.1990	Westeuropa	150 (FL), 224 (ZS)		4000
Daria	25.01.1990	Westeuropa			5700
Wiebke	01.03.1990	Westeuropa	150 (FL)		2250
Herta	Feb. 1990	Westeuropa			1950
W-Europa-O.	16.10.1987	Westeuropa	200	29	3000
Capella	03.01.1976	Nordwesteuropa	145 (FL)	27	450
Nieders.-O.	13.11.1972	Nordeuropa	156 (FL)	47	700

FL: Flachland

SY: Sylt

WS: Wendelstein

FB: Feldberg

ZS: Zugspitze

KÜ: Küste

HD: Hiddensee-D.

© B. Rück

Windstärken

Beaufort-Windskala		10 min-Mittel !		met. Bezeichnung	Auswirkungen	Böen [km/h]	
Windstärke	m/sec	km/h	Knoten			von	bis
0	0,0 - < 0,3	0,0 - < 1,1	0	Windstille	keine Luftbewegung. Rauch steigt senkrecht empor	<1,6	
1	0,3 - < 1,6	1,1 - < 5,8	1 - <4	leiser Zug	leichte Verwehung von aufsteigendem Rauch	1,6 - < 8,6	
2	1,6 - < 3,4	5,8 - < 12,2	4 - <7	leichter Wind	Wind im Gesicht fühlbar; Blätter säuseln	8,6 - < 18,4	
3	3,4 - < 5,5	12,2 - < 19,8	7 - <11	schwacher Wind	Blätter und Zweige in dauernder Bewegung	18,4 - < 29,7	
4	5,5 - < 8,0	19,8 - < 28,8	11 - <17	mäßiger Wind	Wind hebt Staub und lose Blätter	29,7 - < 43,2	
5	8,0 - < 10,8	28,8 - < 38,9	17 - <22	frischer Wind	Baumzweige werden bewegt	43,2 - < 58,3	
6	10,8 - < 13,9	38,9 - < 50,0	22 - <28	starker Wind	Starke Äste werden bewegt, Wind "singt" an Überlanddrähten	58,3 - < 75,1	
7	13,9 - < 17,2	50,0 - < 61,9	28 - <34	steifer Wind	Bäume geraten in Bewegung, Böigkeit des Windes beim Gehen deutlich spürbar	75,1 - < 92,9	
8	17,2 - < 20,8	61,9 - < 74,9	34 - <41	stürmischer Wind	Verformung der Baumkronen; Baumzweige werden abgebrochen.	92,9 - < 112,3	
9	20,8 - < 24,5	74,9 - < 88,2	41 - <48	Sturm	Erste Schäden an Dächern treten auf	112,3 - < 132,3	
10	24,5 - < 28,5	88,2 - < 102,6	48 - <56	starker Sturm	Beginn der Entwurzelung von Bäumen, Häuser werden beschädigt.	132,3 - < 153,9	
11	28,5 - < 32,7	102,6 - < 117,7	56 - <64	orkanartiger Sturm	Bäume werden geworfen/gebrochen; starke Sturmschäden an Bauwerken	153,9 - < 176,6	
12	32,7 - < 37,0	117,7 - < 133,2	64 - <73	Orkan	katastrophenartige Schäden	176,6 - < 199,8	
13	37,0 - < 41,5	133,2 - < 149,4	73 - <81			199,8 - < 224,1	
14	41,5 - < 46,2	149,4 - < 166,3	81 - <91			224,1 - < 249,5	
15	46,2 - < 51,0	166,3 - < 183,6	91 - <100			249,5 - < 275,4	
16	51,0 - < 56,0	183,6 - < 201,6	100 - <110			275,4 - < 302,4	
17	>56,0	>201,6	> 110			>302,4	

Unterschied 10 min/3sec Mittel ➡

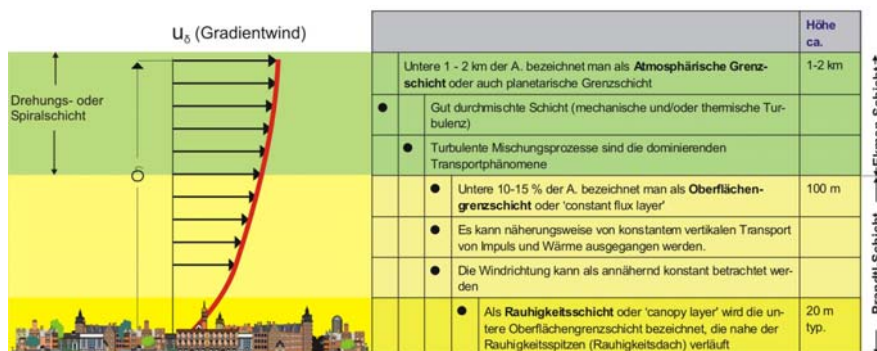
Tornados in Deutschland 2004 (Januar bis Oktober 2004)

Nr.	Datum	Ort	Bundesland	Stärke	Nr.	Datum	Ort	Bundesland	Stärke
1	13.01.2004	Assel	Niedersachsen	F2	19	27.06.2004	Markt Inders	Bayern	F1
2	05.05.2004	Kreinitz	Sachsen	F1	20	01.07.2004	Celle	Niedersachsen	F0
3	10.05.2004	Kamenz	Sachsen	F0	21	08.07.2004	Münzdorf	Baden-Württemberg	
4	10.05.2004	Tauscha	Sachsen	F1-F2	22	17.07.2004	Hünxe	Nordrhein-Westfalen	F1-F2
5	11.05.2004	Heiligenthal	Sachsen-Anhalt	F1-F2	23	17.07.2004	Kempen	Nordrhein-Westfalen	F1
6	04.06.2004	Lavesum	Nordrhein-Westfalen	F1	24	18.07.2004	Tönisvorst	Nordrhein-Westfalen	F2-F3
7	04.06.2004	Recke	Nordrhein-Westfalen	F1	25	18.07.2004	Strassfeld	Nordrhein-Westfalen	F1
8	09.06.2004	Kummerfeld	Schleswig-Holstein	F1	26	20.07.2004	Gröditz	Sachsen	F1
9	09.06.2004	Wasserkrug	Niedersachsen	F1-F2	27	27.07.2004	Cuxhaven	Niedersachsen	
10	10.06.2004	Friedrichsdorf	Hessen/Baden-Württ.		28	18.08.2004	Mehren	Rheinland-Pfalz	F2
11	10.06.2004	Guntersblum	Rheinland-Pfalz		29	18.08.2004	Frechen	Nordrhein-Westfalen	
12	12.06.2004	Seeburg	Sachsen-Anhalt	F0	30	21.08.2004	Sassnitz	Mecklenburg-Vorp.	
13	12.06.2004	Düsseldorf	Nordrhein-Westfalen	F0	31	25.08.2004	Rockshausen	Hessen	F1
14	12.06.2004	Monheim	Nordrhein-Westfalen	F1	32	26.08.2004	Worpswede	Niedersachsen	F1
15	17.06.2004	Klinken	Mecklenburg-Vorpommern	F2	33	12.09.2004	Aufkirchen	Bayern	F0
16	23.06.2004	Micheln	Sachsen-Anhalt	F3	34	25.09.2004	Püchersreuth	Bayern	F0
17	23.06.2004	Marne	Schleswig-Holstein	F2	35	05.10.2004	Kalldorf/Buch	NRW/Niedersachsen	F2?
18	23.06.2004	div. Orte	Nord- und Ostdeutschland						
(Zusammenstellung der Daten: T. Sävert)									
Stärke		km/h							
F 0		68-121							
F 1		122-189							
F 2		190-264							
F 3		265-348							

Gegenwärtiger Erkenntnisstand zur globalen Windaktivität:

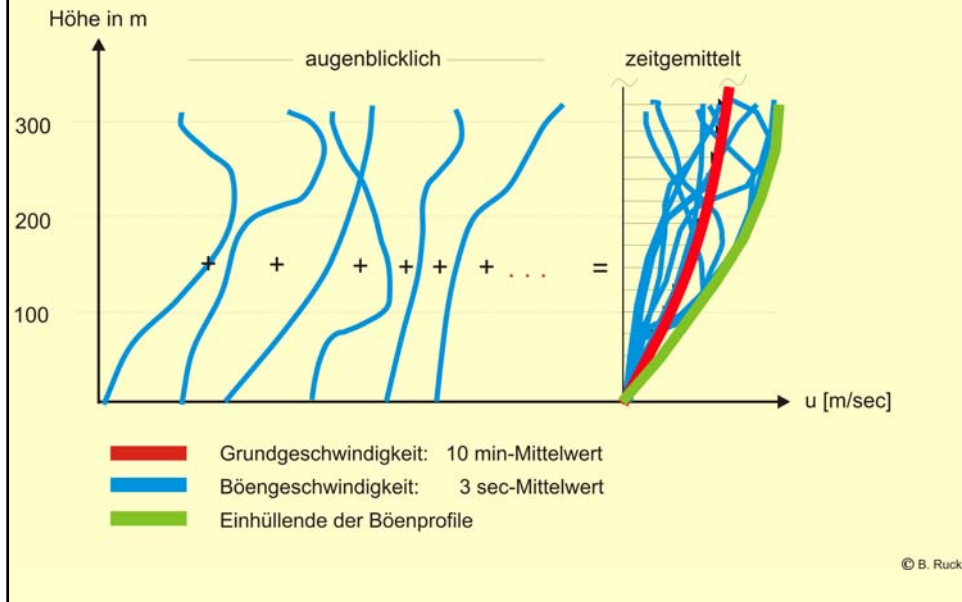
- ➔ Zunahme von Winterstürmen in Europa und von Sommerstürmen in Übersee und Asien wird registriert
(80-90 Wirbelstürme pro Jahr)
- ➔ Die Mitteltemperatur auf der Erde nimmt zu.
(bislang 0,95°C in Europa, weltweit 0,6 °C; bis Ende dieses Jahrhundert 5-6°C)
- ➔ Der Temperatur- und Druckunterschied zwischen Islandtief und Azorenhoch nimmt zu
- ➔ Kohlendioxid- und Treibgas-Emissionen nehmen zu
(bis 2012 Anstieg um 9%)
- ➔ 9 von 12 Klima-Simulationsmodellen zeigen über dem Nordatlantik und Europa zunehmende Sturmaktivitäten

Atmosphärische Grenzschicht



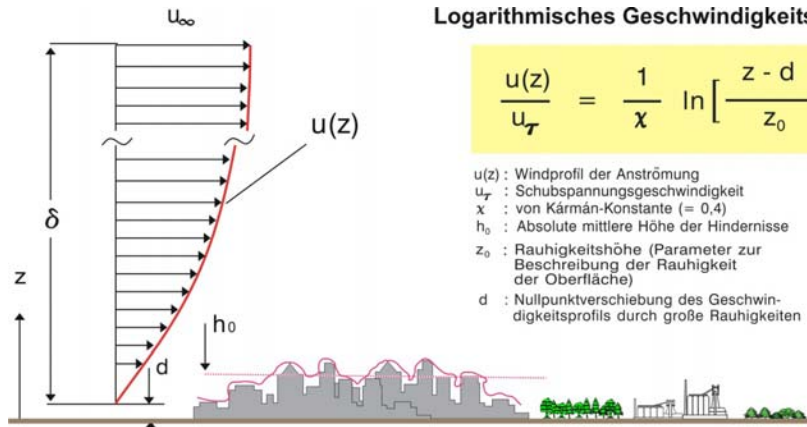
Prandtl-Schicht: Sie besteht aus den unteren 10% der atmosphärischen Grenzschicht und in ihr herrschen stark turbulente Verhältnisse. Durch die Turbulenz werden physikalische Eigenschaften wie Impuls, Wärme und Feuchte übertragen. Die Windrichtung ist konstant und das Windgeschwindigkeitsprofil ist annähernd logarithmisch.

Unterschiedliche Windprofile



Logarithmisches Geschwindigkeitsgesetz

$$\frac{u(z)}{u_T} = \frac{1}{\chi} \ln \left[\frac{z-d}{z_0} \right]$$

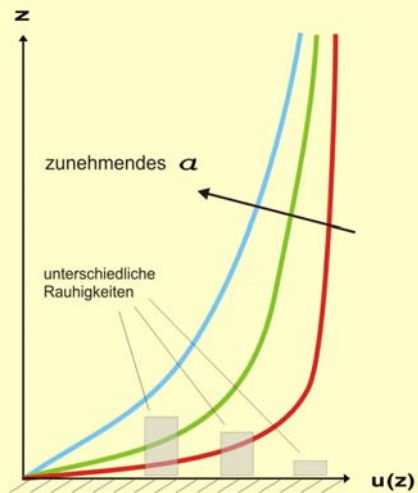


- $u(z)$: Windprofil der Anströmung
- u_T : Schubspannungsgeschwindigkeit
- χ : von Kármán-Konstante (= 0,4)
- h_0 : Absolute mittlere Höhe der Hindernisse
- z_0 : Rauigkeitshöhe (Parameter zur Beschreibung der Rauigkeit der Oberfläche)
- d : Nullpunktverschiebung des Geschwindigkeitsprofils durch große Rauigkeiten

Oberflächenklassen (Davenport)

Beschreibung	z_0 [m]	Erklärung
Offene See,	0,0002	freie Anströmung > 1 km
schneebedeckte, ebene Flächen	0,005	Wattgebiete, Flächen ohne Vegetation
offenes Weideland	0,03	flaches Gelände, Landebahnen
landwirtschaftlich genutzte Flächen	0,1	niederer Bestand
landwirtschaftlich genutzte Flächen	0,25	hoher Bestand
Parklandschaften	0,5	Büsche und Bäume im losen Abstand
Vororte, Wälder	1	regelmäßig mit Hindernissen belegtes Gebiet
Stadt, Innenstadt	2	städtische Zentren mit dichter Bebauung

Exponentialgesetz des Windgeschwindigkeitsverlaufes mit der Höhe



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

Typische Werte:

Oberflächentyp	α
Innenstadtgebiet	0,4
Vorstadtgebiet	0,3
Landw. Flächen	0,25
Waldflächen	0,28
Über See	0,16

© B. Ruck

Turbulenzspektrum des Windes

(aufgenommen über sehr lange Beobachtungszeiten)



Natürliche und technische Strukturen werden fast ausschließlich durch kurzzeitige Belastungsspitzen (Böenspektrum) übermäßig belastet.

Frage:

Mit welcher maximalen Windgeschwindigkeit ist an einem beliebigen Ort in Deutschland in freier Anströmung zu rechnen?

"Normwindverhältnisse" in Deutschland

- Europäische Vornormen der Reihe ENV 1991

Eurocode 1: Basis of Design and Actions on Structures, Part 2.4: Wind Actions

- Normen der Reihe DIN 1055 (Fassung März 2005)

Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 4: Windlasten

Informationen liefern näherungsweise die einschlägigen Baunormen. Aber Vorsicht, die Angaben gelten immer nur für freies Gelände

Einteilung Deutschlands in 4 Windzonen

In der Windzonenkarte sind zeitlich gemittelte Windgeschwindigkeiten (früher: „Grundgeschwindigkeiten“) und zugehörige Geschwindigkeitsdrücke angegeben. Die Werte gelten für eine Mittelung über 10 min mit einer Überschreitungswahrscheinlichkeit von 0,02 (50-Jahreswind). Die Geschwindigkeiten gelten für eine Höhe von 10 m in ebenem, offenem Gelände.



10-min-Mittelwerte

Windzone	$v_{ref,0}$ [m/sec]	$q_{ref,0}$ [kN/m ²]
WZ I	22,5	0,32
WZ II	25,0	0,39
WZ III	27,5	0,47
WZ IV	30,0	0,56



Bei Strukturen bis zu einer Höhe von 25 m darf der Geschwindigkeitsdruck zur Vereinfachung als konstant über die gesamte Höhe angesetzt werden.

- Europäische Vornormen der Reihe ENV 1991
Eurocode 1: Basis of Design and Actions on Structures, Part 2.4: Wind Actions

- Normen der Reihe DIN 1055 (Fassung März 2005)
Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 4: Windlasten

Vereinfachte Bemessung für Strukturen bis 25 m Höhe		Gebäudehöhe					
		h < 10 m		10 m < h < 18 m		18 m < h < 25 m	
Windzone	Geländekategorie	u [m/sec]	q [kN/m ²]	u [m/sec]	q [kN/m ²]	u [m/sec]	q [kN/m ²]
1	Binnenland	28,3	0,50	32,2	0,65	34,6	0,75
2	Binnenland	32,2	0,65	35,8	0,80	37,9	0,90
2	Küste und Inseln der Ostsee	36,9	0,85	40,0	1,00	42,0	1,10
3	Binnenland	35,8	0,80	39,0	0,95	42,0	1,10
3	Küste und Inseln der Ostsee	41,0	1,05	43,8	1,20	45,6	1,30
4	Binnenland	39,0	0,95	42,9	1,15	45,6	1,30
4	Küste Nordsee	44,7	1,25	47,3	1,40	49,8	1,55
4	Küste und Inseln der Ostsee	44,7	1,25	47,3	1,40	49,8	1,55
4	Inseln der Nordsee	47,3	1,40				

u: Böengeschwindigkeit
q: Böengeschwindigkeitsdruck

Die Bodenrauigkeit bleibt bei dieser vereinfachten Bemessung außer acht.

© B. Ruck

In den unterschiedlichen Windzonen finden sich unterschiedliche Geländekategorien (Oberflächenrauigkeiten)



Felder



Städte



Wälder



Wiesen

Einfluss der Geländerauhigkeit und Topographie

Die Profile der mittleren Windgeschwindigkeit und Turbulenz-Intensität hängen von der Bodenrauhigkeit und der Topographie in der Umgebung des Standorts ab. Es ist deshalb sinnvoll, diese Verhältnisse in **Geländekategorien** zusammenzufassen.



Geländekategorie	Beschreibung
I	Offene See; Seen mit mindestens 5 km freier Fläche in Windrichtung; glattes, flaches Land ohne Hindernisse
II	Gelände mit Hecken, einzelnen Gehöften, Häusern und Bäumen, z.B. landwirtschaftliches Gebiet
III	Vorstädte, Industrie- oder Gewerbegebiete; Wälder
IV	Stadtgebiete, bei denen mindestens 15% der Fläche mit Gebäuden bebaut ist, deren mittlere Höhe 15 m überschreitet.

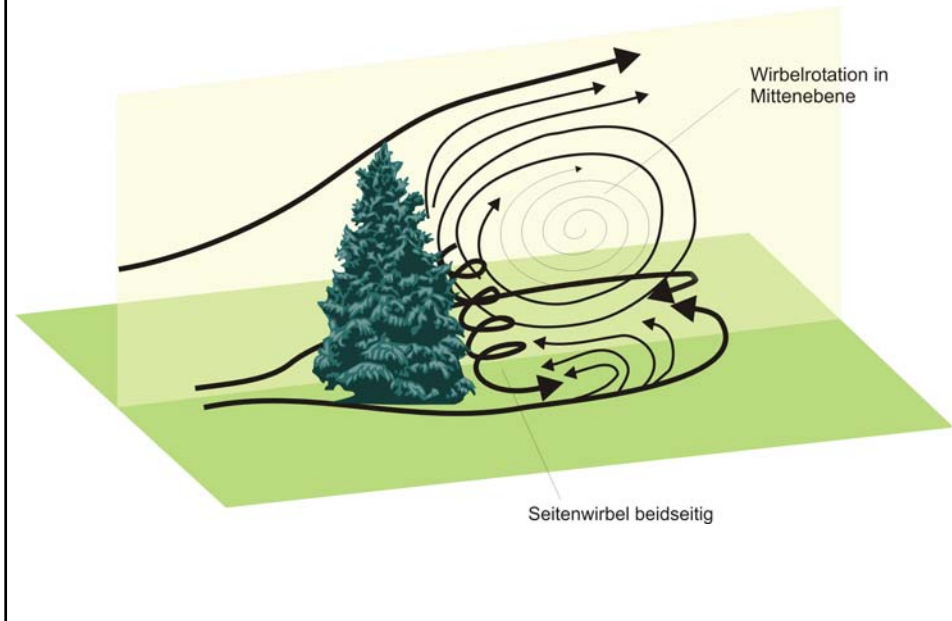
Geländekategorie I ist der Regelfall in den küstennahen Gebieten bzw. für die Nord- und Ostseeinseln. In den übrigen Gebieten ist der Regelfall Geländekategorie II.

Für Strukturen über 25 m Höhe muss der Wind wie folgt erfasst werden, außerdem ist nun die Bodenrauhigkeit mit zu berücksichtigen:

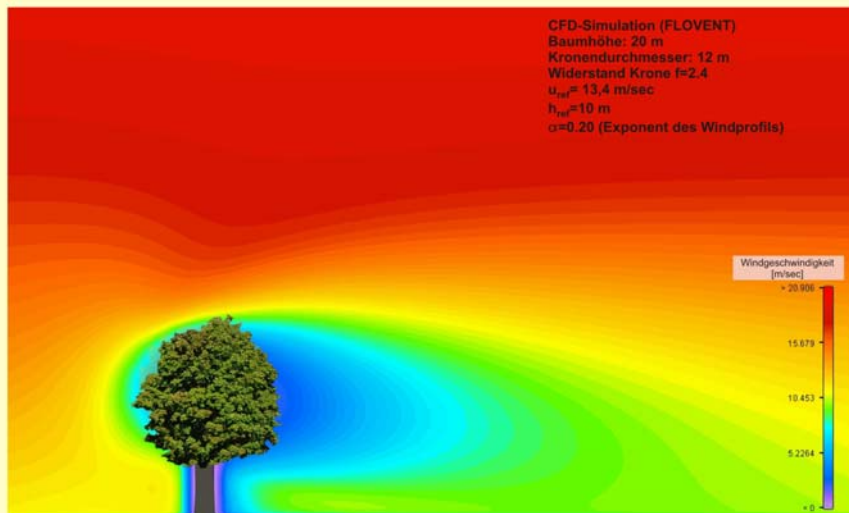
Verlaufsprofile in ebenem, offenem (unendlich ausgedehntem) Gelände				Tabelle B.2/DIN 1055	
Mittlere Windgeschwindigkeit, Turbulenzintensität, Böengeschwindigkeitsdruck, Böengeschwindigkeit					
Geländekategorie		I	II	III	IV
Mindesthöhe $z_{\min}$	[m]	2,00	4,00	8,00	16,00
Mittlere Windgeschwindigkeit	[m/sec]				
v_m für $z > z_{\min}$		$1,18 \cdot v_{\text{ref}} \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^{0,12}$	$1,0 \cdot v_{\text{ref}} \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^{0,16}$	$0,77 \cdot v_{\text{ref}} \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^{0,22}$	$0,56 \cdot v_{\text{ref}} \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^{0,30}$
v_m / v_{ref} für $z < z_{\min}$		0,97	0,86	0,73	0,64
Turbulenzintensität					
I_v für $z > z_{\min}$		$0,14 \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^{-0,12}$	$0,19 \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^{-0,16}$	$0,28 \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^{-0,22}$	$0,43 \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^{-0,30}$
I_v für $z < z_{\min}$		0,17	0,22	0,29	0,37
Böengeschwindigkeitsdruck	[kN/m²]				
q für $z > z_{\min}$		$2,6 \cdot q_{\text{ref}} \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^{0,19}$	$2,1 \cdot q_{\text{ref}} \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^{0,24}$	$1,6 \cdot q_{\text{ref}} \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^{0,31}$	$1,1 \cdot q_{\text{ref}} \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^{0,40}$
q / q_{ref} für $z < z_{\min}$		1,9	1,7	1,5	1,3
Böengeschwindigkeit	[m/sec]				
v für $z > z_{\min}$		$1,61 \cdot v_{\text{ref}} \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^{0,095}$	$1,45 \cdot v_{\text{ref}} \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^{0,12}$	$1,27 \cdot v_{\text{ref}} \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^{0,155}$	$1,05 \cdot v_{\text{ref}} \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^{0,20}$
v / v_{ref} für $z < z_{\min}$		1,38	1,3	1,23	1,15

Hierbei muss in die Formeln die Referenzgeschwindigkeit/der Referenzgeschwindigkeitsdruck der jeweiligen Windzone eingesetzt werden.

Bei sehr dichter Krone:



Die Umströmung des Einzelbaumes



© B. Ruck

Schleppe reduzierter Windgeschwindigkeit im Lee



Die Umströmung des Einzelbaums



Strömungsphysikalisch betrachtet, sind Bäume eine Art von porösen Haufwerken - eine Ansammlung von organischem Material, das locker, d.h. frei durchströmbar, im Raum verteilt vorliegt.

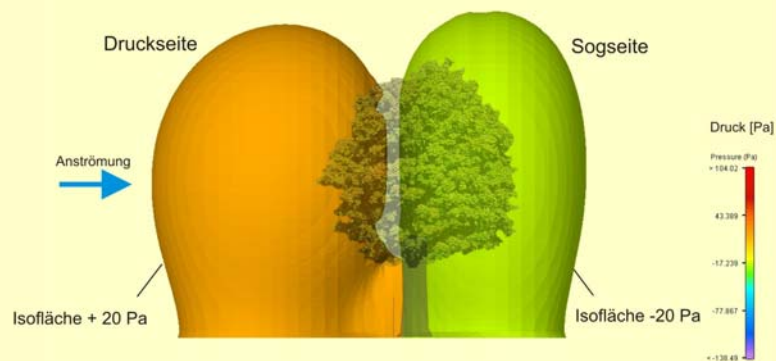
Wird ein solches Haufwerk von Wind beaufschlagt, so erfährt es eine Kraft. Diese Kraft überträgt das Haufwerk auf sein Gerippe (Äste und Baumstamm).

Aufgrund der Umströmung bilden sich aerodynamische Phänomene aus, die uns aus der Fahrzeug- und Flugzeugaerodynamik bekannt sind. So erfährt der Baum auf der windzugewandten Seite (Luvseite) aufgrund des Aufstauens der Windströmung einen Windruck (Überdruck), wohingegen sich auf der Leeseite ein Unterdruckgebiet ausbildet (Ausbilden eines Wirbelsystems, das aus mehreren kleinen/großen Wirbeln bestehen kann).



© B. Ruck

Druckverhältnisse bei der Umströmung eines Baumes



CFD-Simulation (FLOVENT), Baumhöhe: 20 m, Kronendurchmesser: 12 m, Widerstand Krone $f=2.4$
 $u_{ref}=13.4$ m/sec in $h_{ref}=10$ m, $\alpha=0.20$ (Exponent des Windprofils)

© B. Ruck

Luftwiderstand des Baumes

Der Luftwiderstand eines umströmten Körpers setzt sich i.a. aus zwei Komponenten zusammen.

Druckwiderstand (= Widerstandskraft, die sich aus der Aufsummation der Druckkräfte um den Körper und seine Bestandteile herum ergibt)

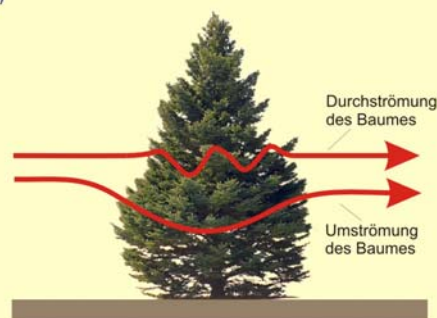
+

Reibungswiderstand (= Widerstandskraft, die sich aus der Aufsummation der Reibungskräfte, die am Körper und seinen Bestandteilen wirken, ergibt)

=

Gesamtwiderstand(skraft) F_w des Körpers
 (= Gesamtkraft in Strömungsrichtung, die auf den Körper wirkt)

Durch die Umströmung eines Baumes bildet sich ein spezifisches Druckfeld aus. Gleichzeitig wird die Außenhaut des Baumes auch durchströmt. Es treten somit zusätzlich Reibungskräfte an den Blättern, Nadeln und Ästen auf, die zusammen den Reibungswiderstand bilden. Der Reibungswiderstand spielt bei stumpfen, undurchlässigen Körpern meist keine Rolle, da er im Verhältnis zum Druckwiderstand sehr klein ist. Letzteres gilt aber nicht für Bäume, die normalerweise eine große überströmte Oberfläche aufweisen.



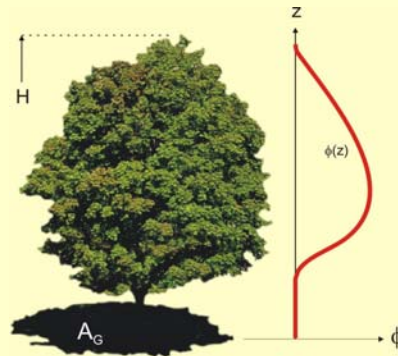
© B. Ruck

Anmerkung zum Reibungswiderstand

Blattflächenindex (einseitig)

Baumart	Index
Fichte (picea abies)	11,00
Weißtanne (abies alba)	8,50
Douglasie (pseudotsuga menziesii caesia)	11,50
Rotbuche (fagus silvatica)	6,50
Sandbirke (betula pendula)	5,40
Roteiche (quercus rubra)	4,40
Europäische Lärche (larix europaea)	3,00
Waldkiefer (pinus silvestris)	4,00
Japanische Lärche (larix leptolepis)	4,70
Roßkastanie (aesculus hippocastanum)	5,00
Stieleiche (quercus robur)	3,70
Spitzblättriger Ahorn (acer platanoides)	5,00
Hainbuche (carpinus betulus)	6,50

Der Reibungswiderstand eines flächigen Hindernisses kommt durch die Überströmung und die damit verbundene Übertragung einer Wandschubspannung zustande. Ein Baum hat eine Blattfläche, die einem Mehrfachen seiner Grundfläche entspricht. Zudem ist diese Blatt- oder Nadelfläche beim Baum nicht gleichmäßig über die Höhe verteilt.



Blattfläche des Baumes:

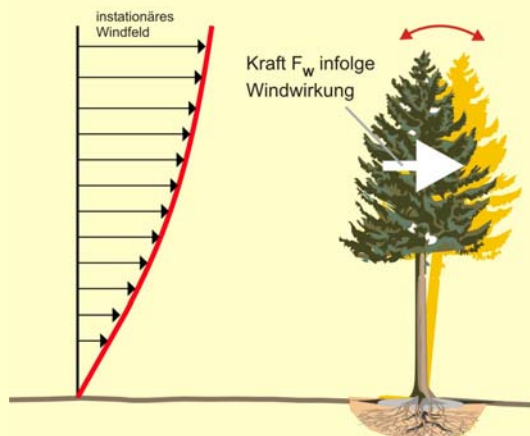
$$A_{\text{gesamt}} = A_G \cdot \phi \cdot 2 \quad \phi = \int_{z=0}^{z=H} \phi(z) \cdot dz$$

mit ϕ = Blattflächenindex

$\phi(z)$: Verteilung des Blattflächenindex mit der Höhe

© B. Ruck

Windkraft am Baum

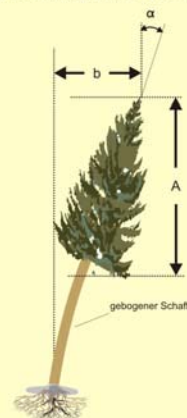


Der Baum erfährt aufgrund der Umströmung eine Kraftwirkung (Windlast). Die Windlast führt zu:

- Auslenkung des Baumes
- Verformung der Krone
- Biegung des Stammes
- Hin- und Herschwingen des Baumes

Mögliche Folgen:

- Wurzelteller lockert sich durch Hin- und Herschwingen und Baum kippt (Windwurf)
- Baumstamm bricht (Windbruch)



© B. Ruck

Bestimmung der Windkraft auf den umströmten Baum durch Messung (Windkanal)



© B. Ruck

Größenordnung der Windkraft

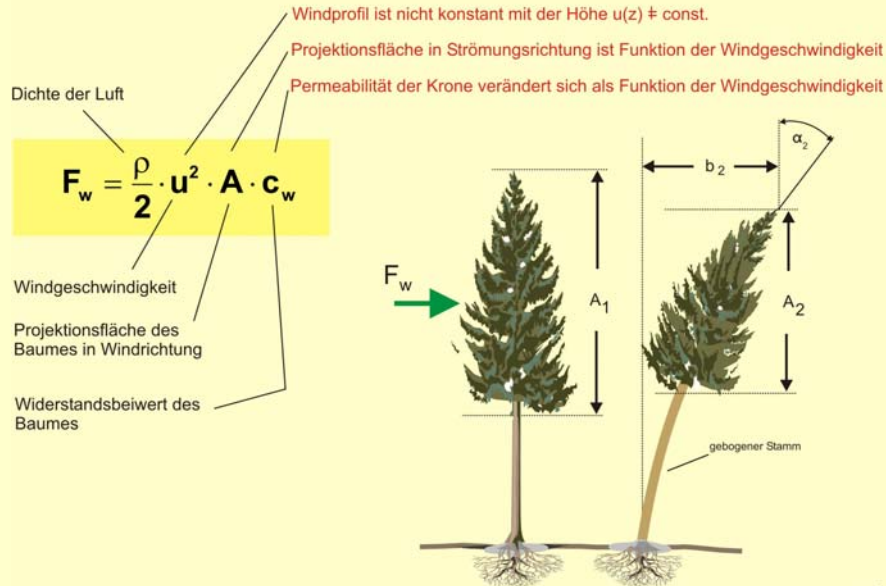
Windgeschwindigkeit

$$F_w = \frac{\rho}{2} \cdot u^2 \cdot A \cdot c_w$$

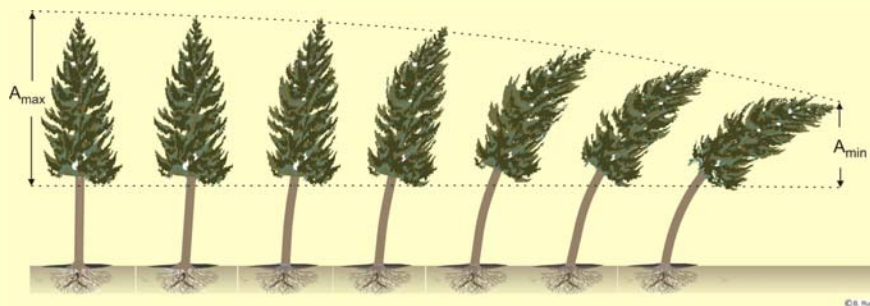
Der Luftwiderstand ist proportional zum Quadrat der Windgeschwindigkeit. Doppelte Windgeschwindigkeit bedeutet vierfache Windlast !

Geschw.	Geschw.	Dichte	pdyn	Pa	hPa	mbar	N/m ²	mmWS	Kp/m ²
[m/sec]	[km/h]	[Kg/m ³]	[Kg/(m*s ²)]	[kg/(m*s ²)]					
10,00	36,00	1,25	62,50	62,50	0,63	0,63	62,50	6,25	6,38
20,00	72,00	1,25	250,00	250,00	2,50	2,50	250,00	25,00	25,50
30,00	108,00	1,25	562,50	562,50	5,63	5,63	562,50	56,25	57,38
40,00	144,00	1,25	1000,00	1000,00	10,00	10,00	1000,00	100,00	102,00
50,00	180,00	1,25	1562,50	1562,50	15,63	15,63	1562,50	156,25	159,38
60,00	216,00	1,25	2250,00	2250,00	22,50	22,50	2250,00	225,00	229,50
70,00	252,00	1,25	3062,50	3062,50	30,63	30,63	3062,50	306,25	312,38
80,00	288,00	1,25	4000,00	4000,00	40,00	40,00	4000,00	400,00	408,00
90,00	324,00	1,25	5062,50	5062,50	50,63	50,63	5062,50	506,25	516,38
100,00	360,00	1,25	6250,00	6250,00	62,50	62,50	6250,00	625,00	637,50

Aerodynamische Besonderheiten bei der Baumumströmung

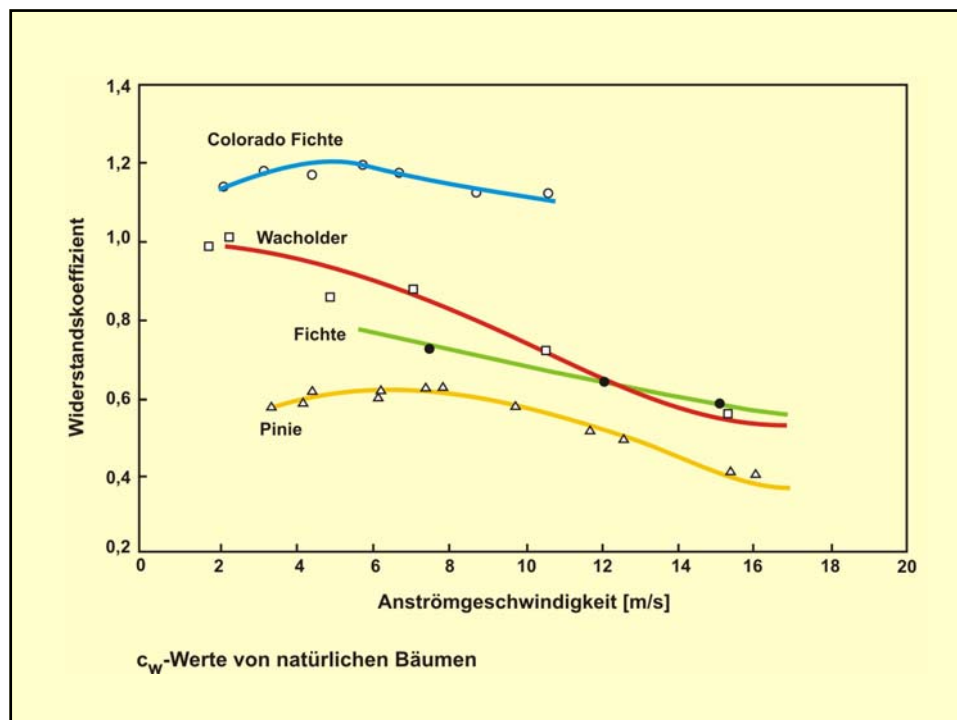
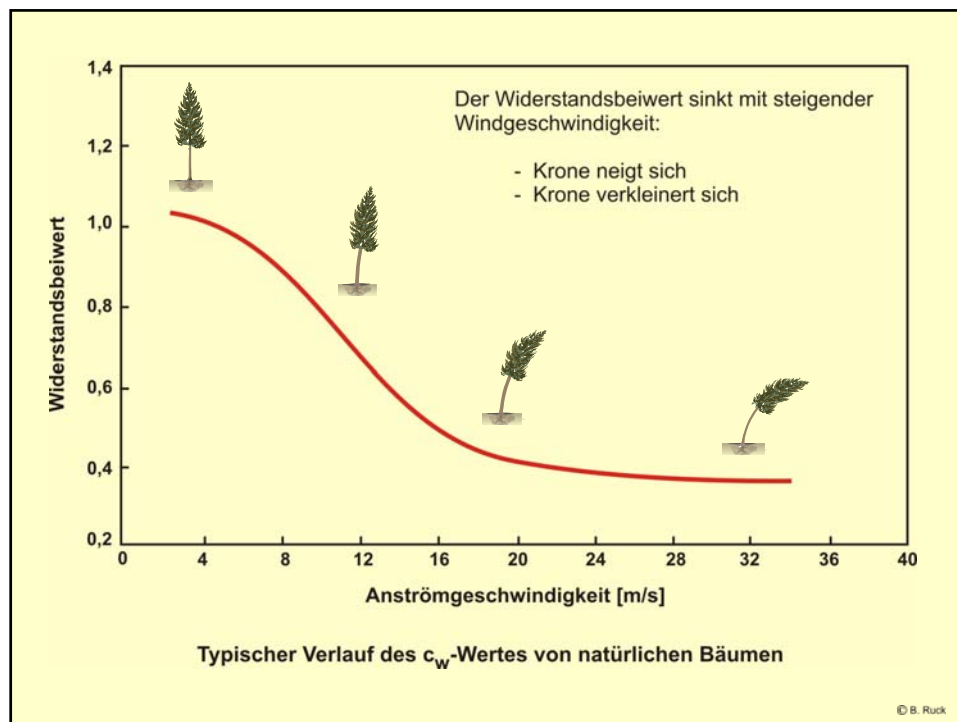


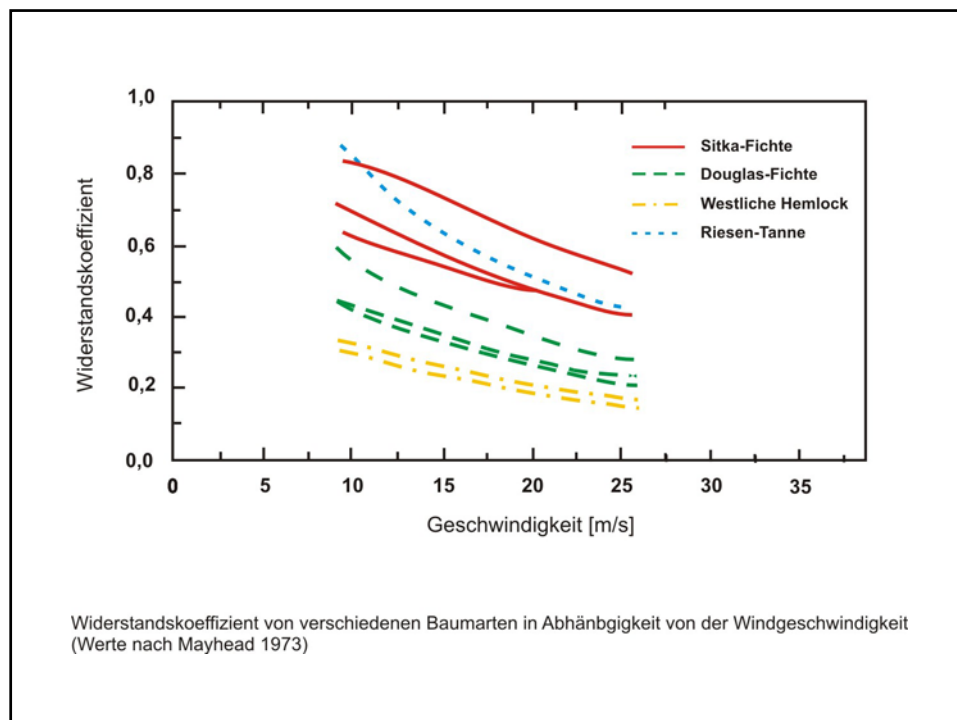
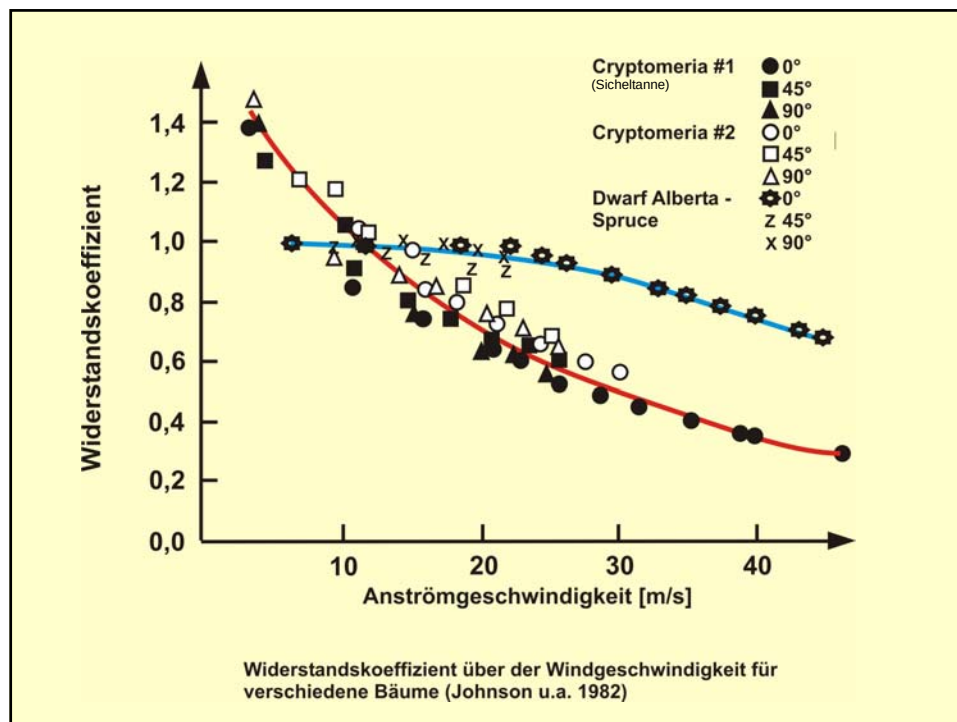
Windbedingte Neigung des Baumes und Verformung der Krone



Ablauf:

1. Neigung des Baumes
 - Beginn der Biegung des Stammes und der Krone
2. Verformung der Krone
 - Verkleinerung der Stirnfläche zum Wind
 - Verkleinerung des Kronenvolumens
 - Abnahme der Porosität (Verdichtung)
 - Absinken des Kronenschwerpunkts





Literatur (c_w -Wert von Bäumen)

- Baumgartner, A.:** "Baum und Wald im Windfeld". In: *Allgemeine Forstzeitschrift* 16 (1961), S. 228-229
- Yosida, Z.; Kuroiwa, D.:** "Wind Force on a Conifer Tree and the Quantity of Fog Water Thereby Captured". In: *Studies on fogs in relation to fog-preventing forest, Sapporo* (1953), S. 261-278
- Mayhead, G.J.:** "Some Drag Coefficients for British Forest Trees Derived from Wind Tunnel Studies". In: *Agric. Meteorol.* 12 (1973), S. 123-130
- Fraser, A.I.:** "Wind Tunnel and Other Related Studies on Coniferous Trees and Tree Crops". In: *Scottish Forestry* 18 (1963), Nr. 2, S. 84-92
- Norton, D.A.:** "Tree Windthrow and Forest Soil Turnover". In: *Canadian J. of Forest Research* (1989), S. 386-389
- Linde, J. v.d.:** "Trees outside the Forest". In: *Forest Influence* FAO, Rome (1962), S. 141-208
- Horn, H.S.:** "The Adaptive Geometry of Trees". In: *Princeton University Press, New Jersey* (1971), S. 144 S.
- Fraser, A.I.:** "Wind Tunnel and Other Related Studies on Coniferous Trees and Tree Crops".. In: *Scottish Forestry* 18 (1964), Nr. 2, S. 84-92
- Johnson Jr., R.C.; Ramey, G.E.; O'Hagen, D.S.:** "Wind Induced Forces on Trees". In: *J. of Fluids Engineering* 104 (1982), S. 25-30
- King, D.A.:** "Tree Form, Height Growth, and Susceptibility to Wind Damage in *Acer Saccharum*". In: *Ecology* 67 (1986), Nr. 4, S. 980-990
- Amtmann, R.:** "Dynamische Windbelastung von Nadelbäumen (Auszug). In: *Forstliche Forschungsberichte München*
- Laitakari, E.:** "Über die Fähigkeit der Bäume sich gegen Sturmgefahr zu schützen". In: *Acta Forestalia Fennica* 34 (1929), S. 1-29
- Holbo, H.R., Corbett, T.C., Horton, P.J., 1980:** Aeromechanical behavior of a selected Douglas-fir, *Agricultural Meteorology* 21, pp. 81-91
- Hsi, G., Nath, J.H., 1968:** A laboratory stud. on the drag force within model forest canopies in turbulent shear flow, Fluid Mechanics Program College of England, Colorado State University, Fort Collins
- Johnson, R.C., Ramey, G.E., O'Hagen, D.S., 1982:** Wind induced forces on trees, *Transactions of the ASME, Journal of Fluids Engineering*, March 1982, Vol. 104, pp. 25-30
- Raymer, W.G., 1962:** Wind resistance of conifers, National Physical Laboratory, Aeronaut. Report. 1008

Welche Leistung entzieht ein Baum der Windströmung?

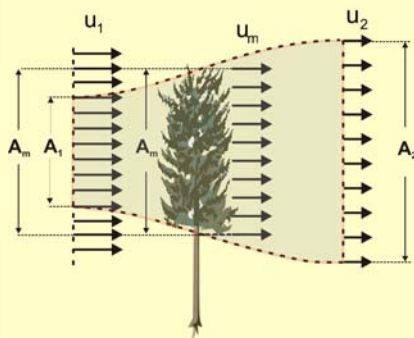
(Näherungsbetrachtung: Stationäre Strömung; konstantes Windprofil mit der Höhe; ideale Strömung; kein nennenswerter vertikaler Austausch)

Die kinetische Energie einer bewegten Luftmasse m ergibt sich zu:

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot u_1^2$$

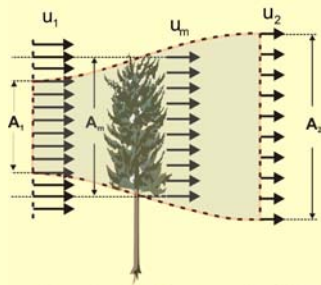
Die Leistung, die bewegte Luft, die durch eine Fläche A_m strömt, maximal abgeben könnte, entspricht ihrer gesamten kinetischen Energie pro Zeit

$$P_{V,max} = \frac{E_1}{t} = \frac{1}{2} \cdot \frac{m}{t} \cdot u_1^2 = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot u_1^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \dot{V} \cdot u_1^2 = \frac{\rho}{2} \cdot u_1^3 \cdot A_m$$



Diese Leistung wird aber nicht vollständig bei der Kronendurchströmung entzogen, weil dies bedeuten würde, dass die Luft hinter der Krone keine Geschwindigkeit mehr aufweisen würde. Damit käme aber überhaupt keine Durchströmung der Krone zustande und die entzogene Leistung wäre gleich Null. In Wirklichkeit wird durch den Leistungsentzug die Geschwindigkeit der durchströmenden Luft kleiner aber nicht Null. Da der Volumenstrom aber konstant bleiben muss, weitet sich das Gebiet kleinerer Geschwindigkeit in Strömungsrichtung auf.

© B. Ruck



Die bei der Kronendurchströmung entzogene Leistung berechnet sich in erster Näherung aus der Differenz der kinetischen Energien pro Zeit weit vor und weit hinter dem Baum (Druck ist dort gleich):

$$P_V = \frac{\rho}{2} \cdot A_1 \cdot u_1^3 - \frac{\rho}{2} \cdot A_2 \cdot u_2^3 = \frac{\rho}{2} \cdot A_1 \cdot u_1^3 \cdot \left(1 - \frac{A_2}{A_1} \cdot \frac{u_2^3}{u_1^3}\right)$$

mit der Kontinuität folgt $u_1 \cdot A_1 = u_2 \cdot A_2$

$$P_V = \frac{\rho}{2} \cdot A_1 \cdot u_1^3 \cdot \left(1 - \frac{u_2^2}{u_1^2}\right)$$

Nun wird das Ganze noch auf den Kronenquerschnitt A_m (den man kennt) bezogen, wobei gilt

$$u_1 \cdot A_1 = u_m \cdot A_m \quad u_m = \frac{u_1 + u_2}{2}$$

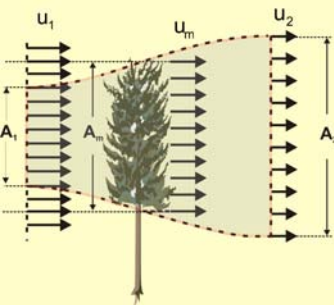
$$P_V = \frac{\rho}{2} \cdot \frac{u_m}{u_1} \cdot A_m \cdot u_1^3 \cdot \left(1 - \frac{u_2^2}{u_1^2}\right) = \frac{\rho}{2} \cdot \frac{(u_1 + u_2)}{2 \cdot u_1} \cdot A_m \cdot u_1^3 \cdot \left(1 - \frac{u_2^2}{u_1^2}\right)$$

bzw.

$$P_V = \frac{\rho}{2} \cdot A_m \cdot u_1^3 \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{u_2}{u_1}\right) \left(1 - \frac{u_2^2}{u_1^2}\right)$$

In dieser Gleichung ist nur u_2 bzw. das Verhältnis aus u_2/u_1 unbekannt.

© B. Ruck



Der Strömung entzogene Leistung:

$$P_V = \frac{\rho}{2} \cdot A_m \cdot u_1^3 \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{u_2}{u_1}\right) \left(1 - \frac{u_2^2}{u_1^2}\right)$$

Maximal mögliche Leistung, die entzogen werden könnte:

$$P_{V,max} = \frac{\rho}{2} \cdot A_m \cdot u_1^3$$

Das Verhältnis aus von der Baumkrone entzogener Leistung zur theoretischen Maximalleistung im selben Querschnitt (Betzscher Leistungsbeiwert):

$$c_L = \frac{P_V}{P_{V,max}} = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{u_2}{u_1}\right) \left(1 - \frac{u_2^2}{u_1^2}\right) \quad \text{bzw. mit } x = \frac{u_2}{u_1} \text{ folgt}$$

Die Ableitung zeigt, dass diese Funktion bei $x=1/3$ eine Nullstelle bzw. ein Maximum besitzt.

$$c_L = \frac{1}{2} \cdot (1+x)(1-x^2)$$

$$c_{L,max} = c_L(x = 1/3) \approx 0,593$$

D.h. es können bestenfalls 59,3 % der kinetischen Energie pro Zeit des Windes entzogen werden !

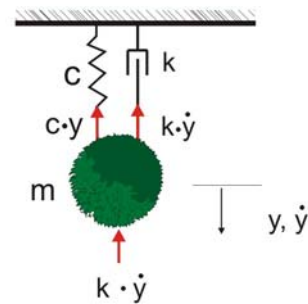
© B. Ruck



Freie, gedämpfte Schwingung

$$m \cdot \ddot{y} + (k + k_a) \cdot \dot{y} + c \cdot y = 0$$

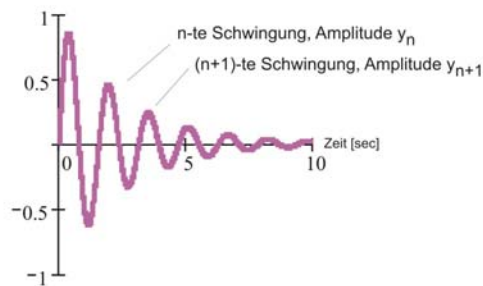
Modellvorstellung:



Bäume werden insbesondere durch Hochgeschwindigkeitsböen gefährdet. Diese Böen treten kurzzeitig auf (Böendauer: 1-3 Sekunden, Böenlänge: 20-50 m). In der Schwingungsgleichung kann deshalb $F(t)=0$ gesetzt werden, da keine periodische äußere, d.h. länger andauernde Kraft einwirkt. Vielmehr kann man sich den Auslenkungsvorgang einmalig vorstellen und betrachtet dann ohne weiteres Einwirken einer Kraft das Auspendeln des Baumes. Man spricht deshalb von einer freien, gedämpften Schwingung.



gedämpfte Schwingung



Dämpfungsverhältnis

$$D = \frac{y_n}{y_{n+1}}$$

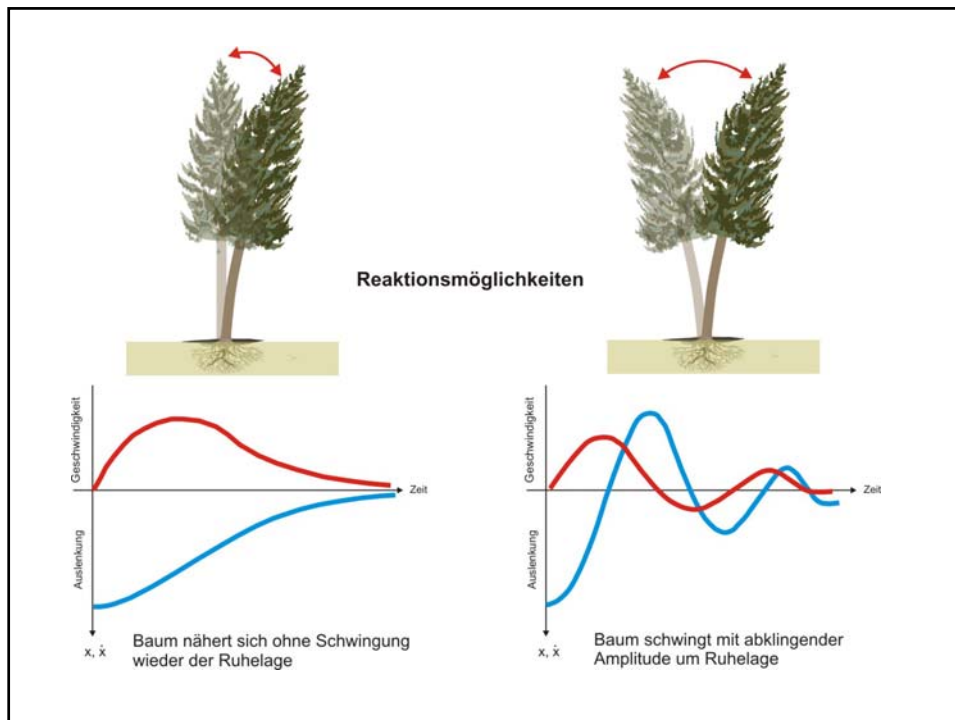
logarithmisches Dekrement

$$\delta = \ln D$$

Wird ein Baum durch eine Windböe angestoßen, so kann er Schwingungen ausführen, deren Amplitude von Periode zu Periode wieder abnimmt. Man spricht hierbei von Dämpfung. Das Verhältnis zweier gleichsinnig aufeinander folgender Maximalausschläge y_n und y_{n+1} wird als Dämpfungsverhältnis D bezeichnet. Der natürliche Logarithmus des Dämpfungsverhältnisses D wird als logarithmisches Dekrement $\delta = \ln D$ bezeichnet und dient zur Klassifizierung des Dämpfungsverhaltens.

$$\text{oder } \delta = \frac{1}{k} \cdot \ln \frac{y_n}{y_{n+k}} \quad \text{mit } k: \text{Anzahl der Perioden}$$

© B. Ruck



Charakteristika der freien gedämpften Baumschwingung (abgeleitet am Einmassenschwinger-Modell)

Gedämpfte Eigenfrequenz:

$$f_{e,D} = \frac{\omega_{e,D}}{2\pi} = \frac{\omega_e}{2\pi} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{k + k_a}{2 \cdot \sqrt{c \cdot m}}\right)^2} \quad \text{mit} \quad \omega_e = \sqrt{\frac{c}{m}} = 2 \cdot \pi \cdot f_e$$

Lehr'sches Dämpfungsmaß:

$$D_L = \frac{k + k_a}{2 \cdot \sqrt{c \cdot m}}$$

Zusammenhang mit ungedämpfter Eigenfrequenz:

(d.h. die gedämpfte Eigenfrequenz ergibt sich stets als geringer als die ungedämpfte)

$$\omega_{e,D} = \omega_e \cdot \sqrt{1 - D_L^2}$$

Kritische Dämpfung:

(d.h. wenn die Dämpfung so gewählt wird, liefert der Wurzelausdruck in den Gleichungen den Wert Null. Es findet keine Schwingung mehr statt)

$$k_{krit} = k + k_a = 2 \cdot \sqrt{c \cdot m}$$

Zusammenhang Log. Dekrement-Dämpfungsmaß und Lehr'sches Dämpfungsmaß:

$$\delta = \ln\left(\frac{y_1}{y_2}\right) = \frac{2\pi \cdot D_L}{\sqrt{1 - D_L^2}}$$

log. Dekrement Dämpfungsmaß

$f_{e,D}$: Gedämpfte Eigenfrequenz

ω_e : Ungedämpfte Eigenkreisfrequenz

$\omega_{e,D}$: Gedämpfte Eigenkreisfrequenz

k : Dämpfung des Baumes und des Bodens

k_a : Aerodynamische Dämpfung

D_L : Lehr'sches Dämpfungsmaß

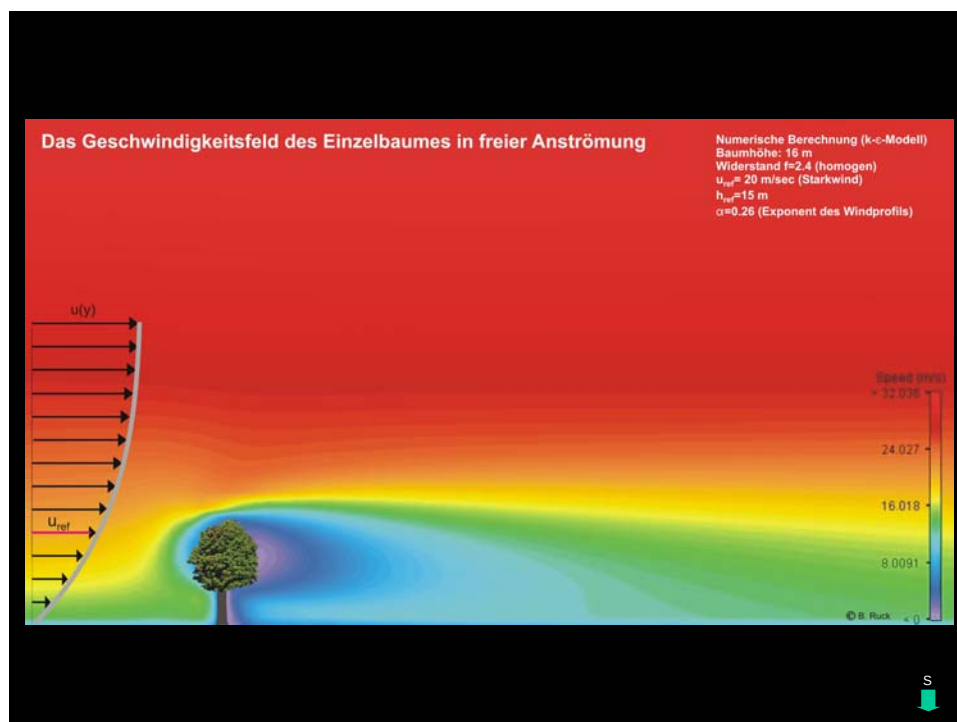
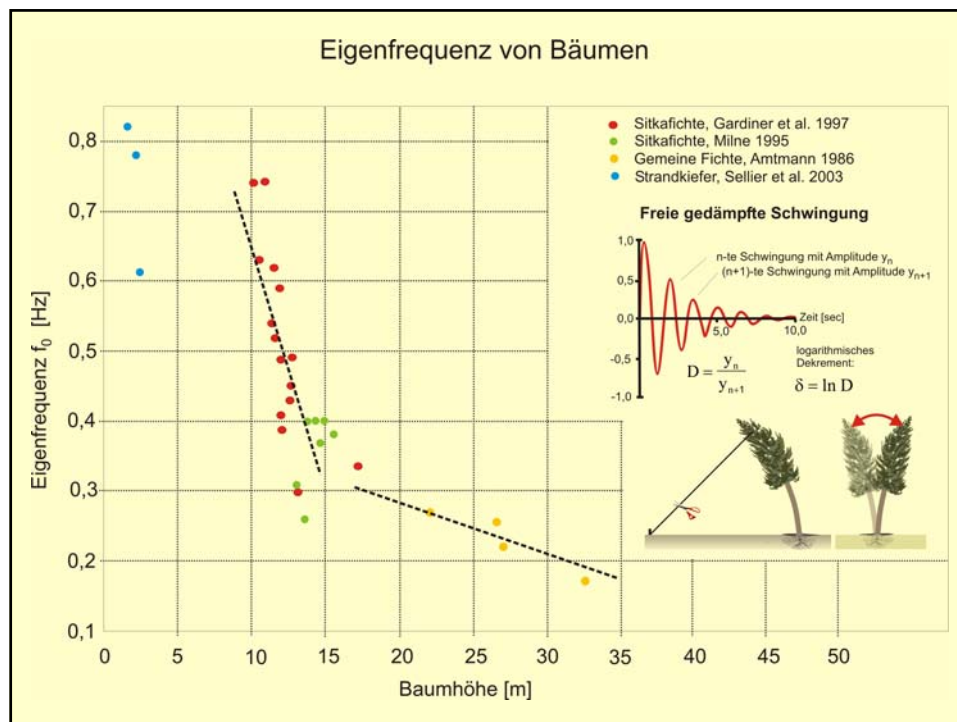
c : Federsteifigkeit des Holzes

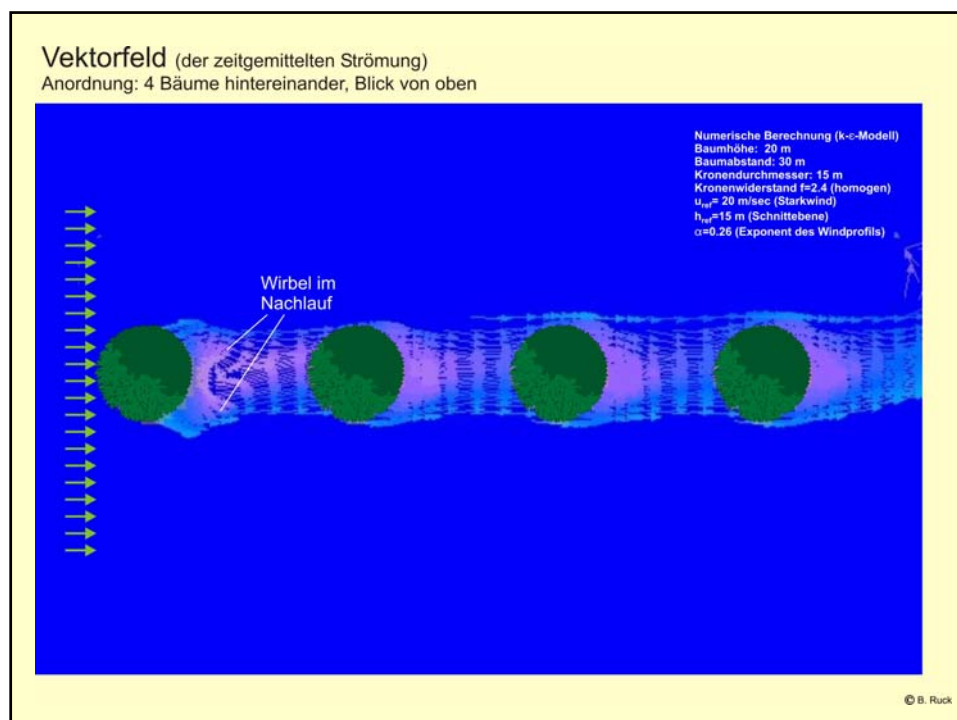
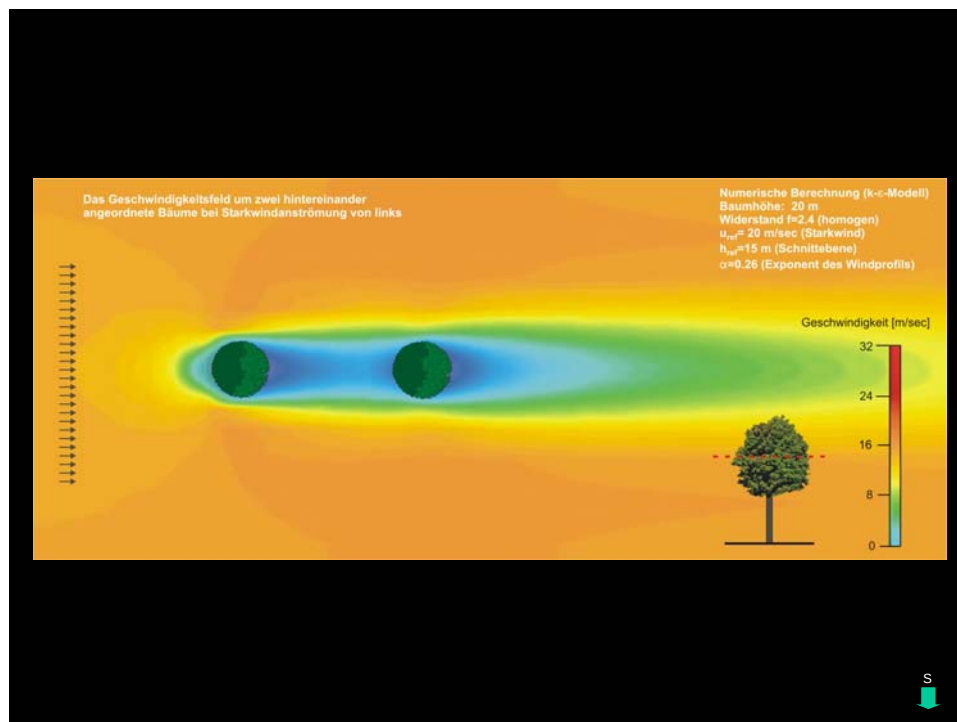
m : Masse des Baumes

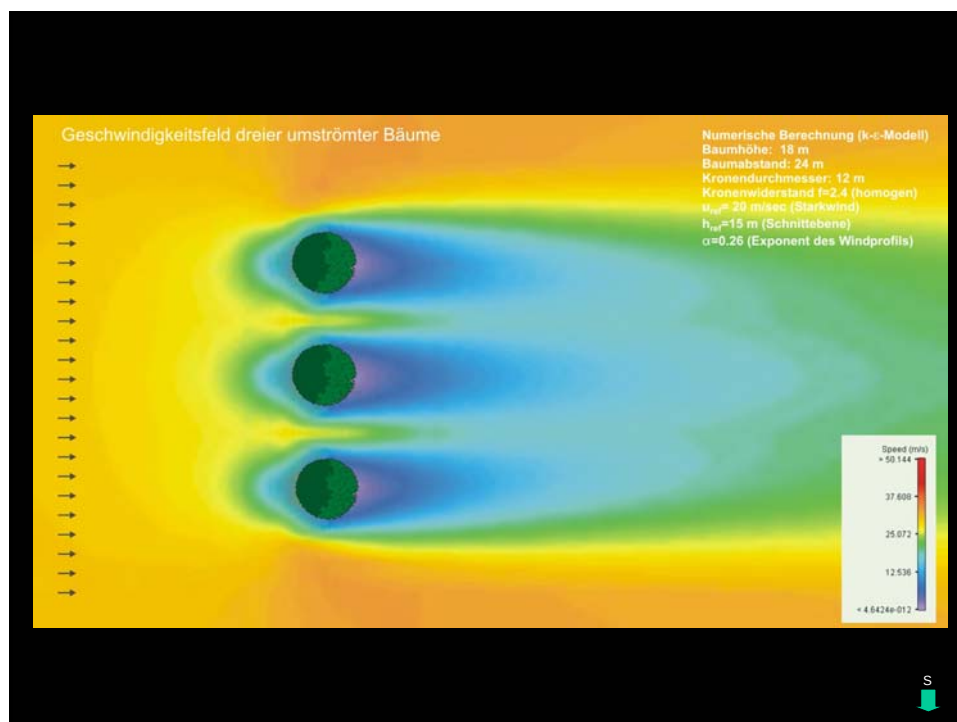
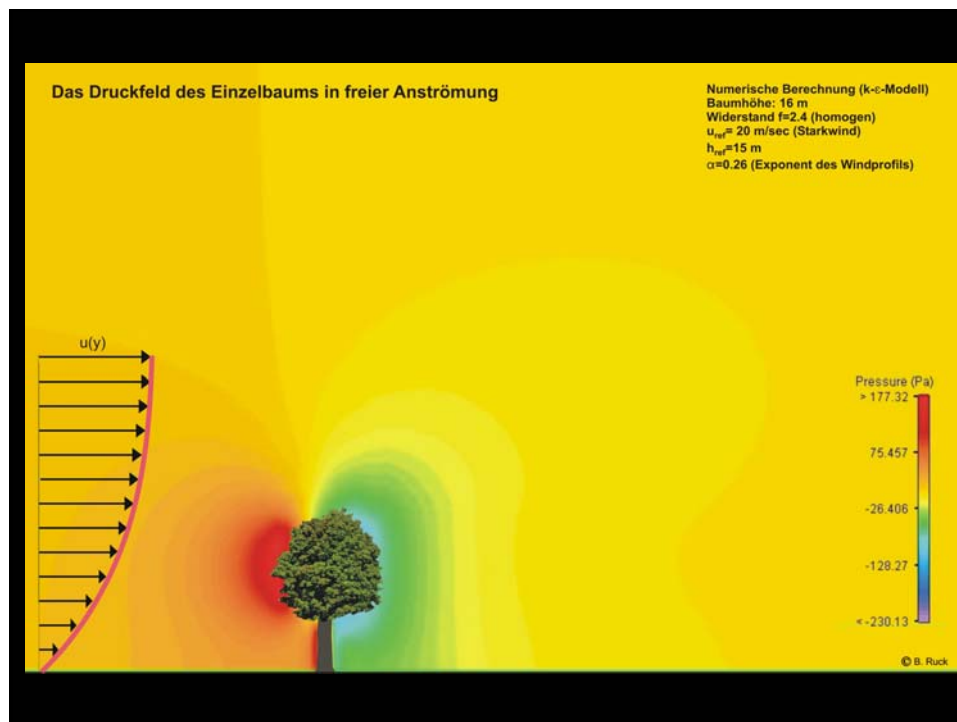
δ : Logarithmisches Dekrement

$y_{1,2}$: Amplitude der Auslenkung

k_{krit} : Kritische Dämpfung

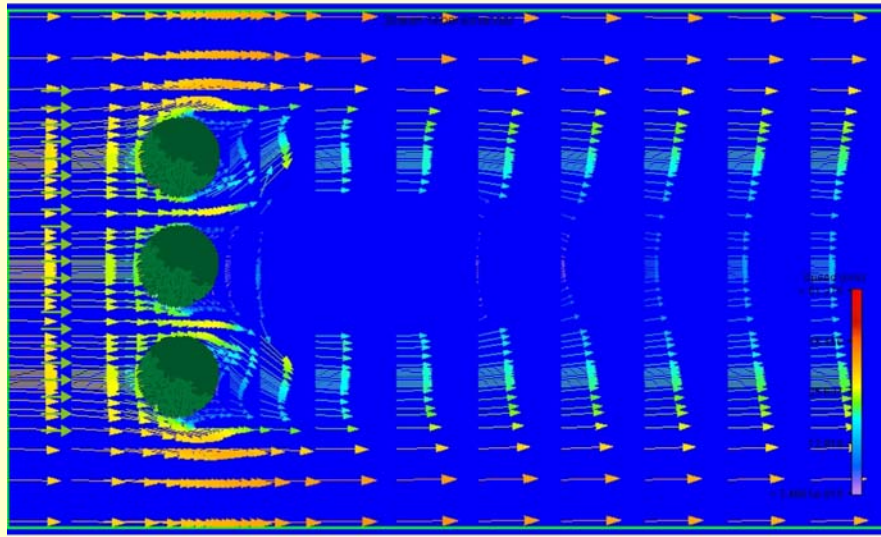






Vektorfeld (der zeitgemittelten Strömung) Anordnung: 4 Bäume nebeneinander, Blick von oben

Numerische Berechnung (k- ϵ -Modell)
Baumhöhe: 20 m
Baumabstand: 30 m
Kronendurchmesser: 15 m
Kronenwiderstand $f=2.4$ (homogen)
 $u_{ref}=20$ m/sec (Starkwind)
 $h_{ref}=15$ m (Schnittebene)
 $\alpha=0.26$ (Exponent des Windprofils)



© B. Ruck

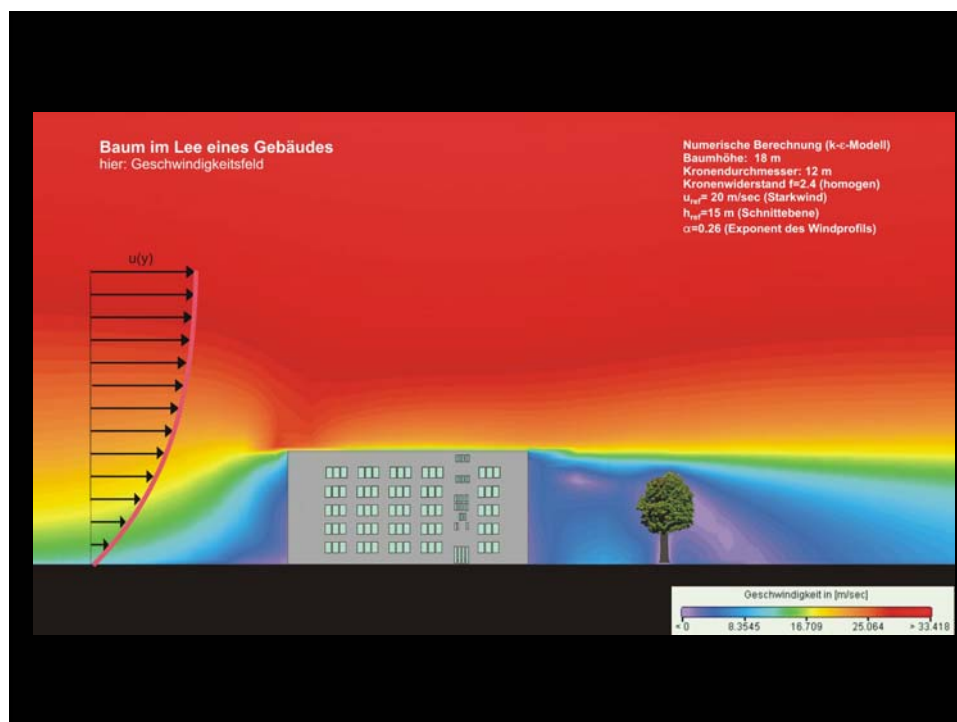
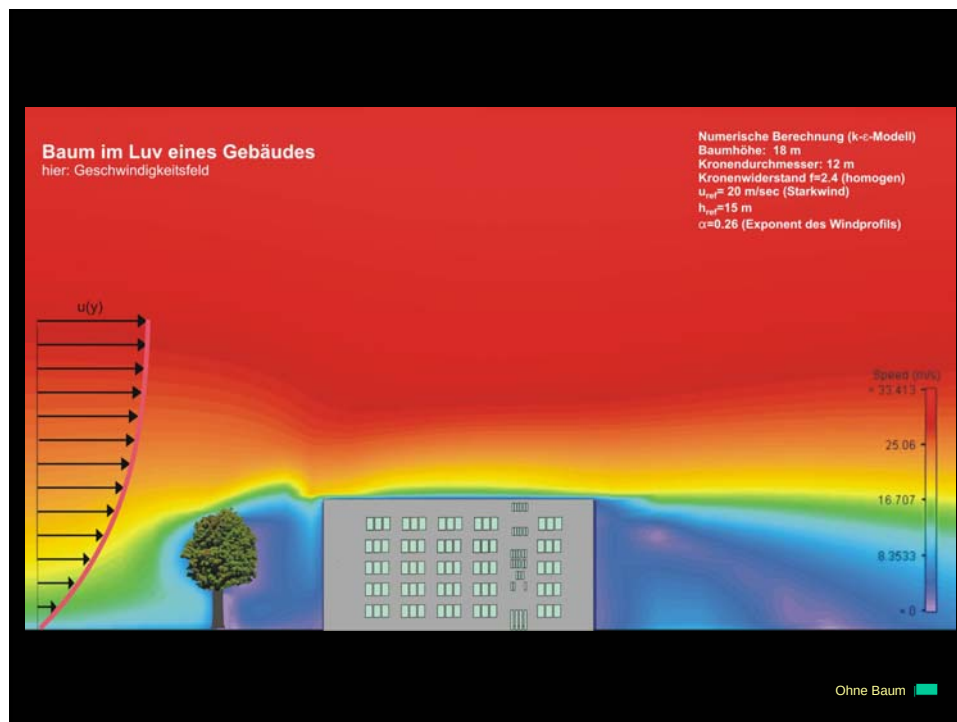
Kopplung der Nachläufe dreier Bäume zu einer windberuhigten Zone



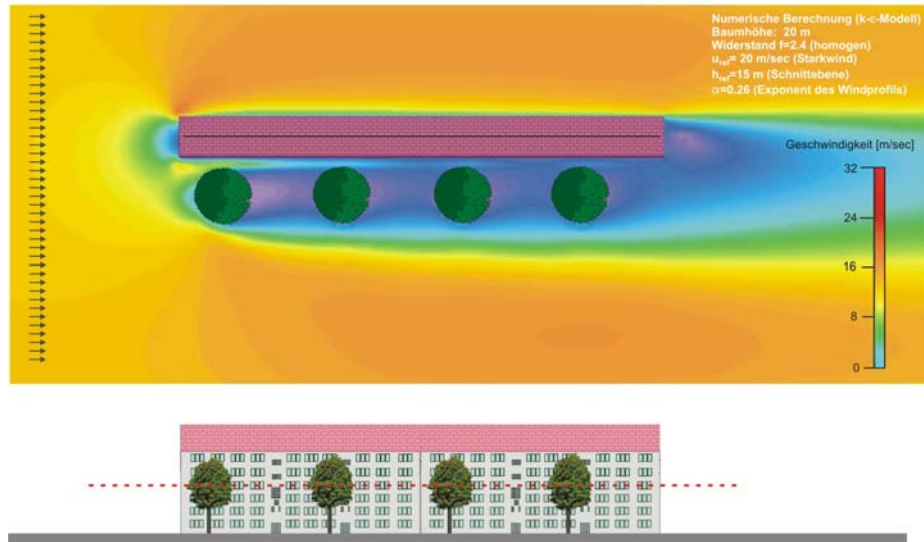
Die grüne Isofläche begrenzt das Gebiet mit Windgeschwindigkeiten kleiner 10 m/sec

CFD-Simulation (FLOVENT), Baumhöhen: 20 m, Kronendurchmesser: 12 m, Widerstand Krone $f=2.4$, $u_{ref}=13.4$ m/sec in $h_{ref}=10$ m, $\alpha=0.20$ (Exponent des Windprofils)

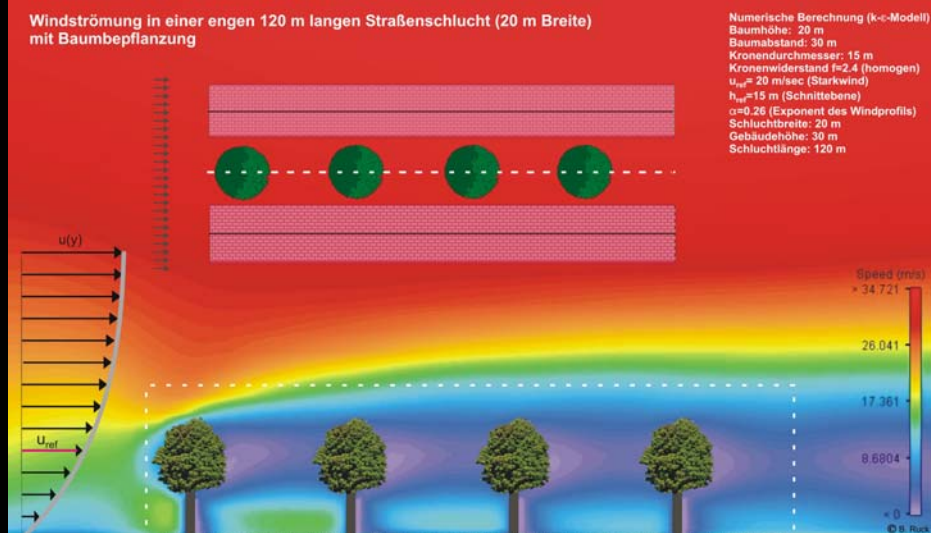
© B. Ruck



Das Geschwindigkeitsfeld entlang einer baumbepflanzten Gebäudefront

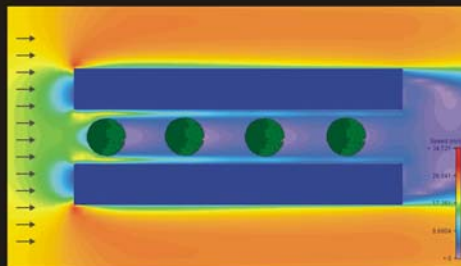
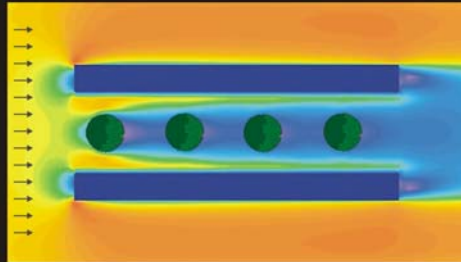


Windströmung in einer engen 120 m langen Straßenschlucht (20 m Breite) mit Baumbepflanzung

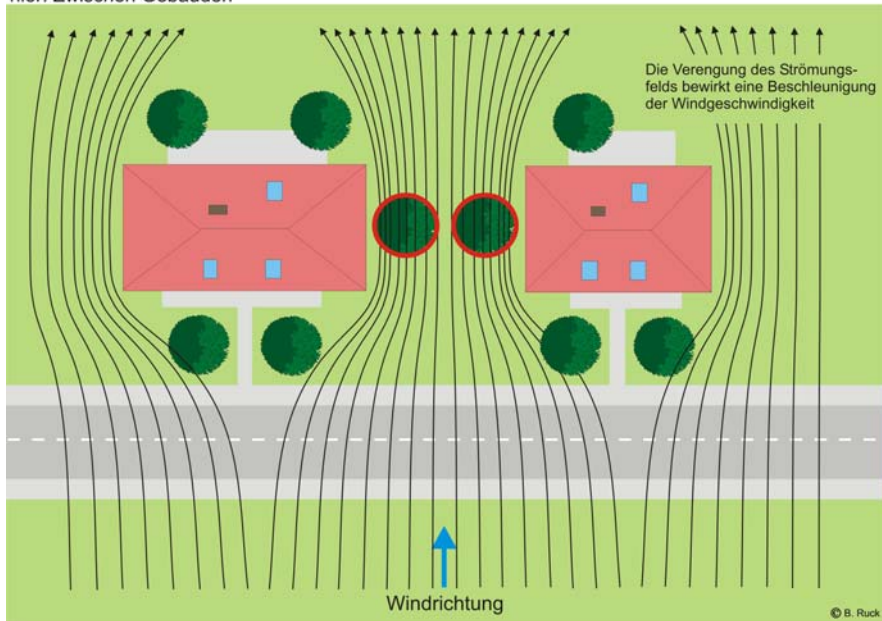


Straßenschluchtbreite

Die Schluchtbreite übt einen entscheidenden Einfluss auf die Windverhältnisse aus. Sie entscheidet z.B. bei schluchtparalleler Anströmung wie weit die höhere Windgeschwindigkeit in die Schlucht vordringen kann.

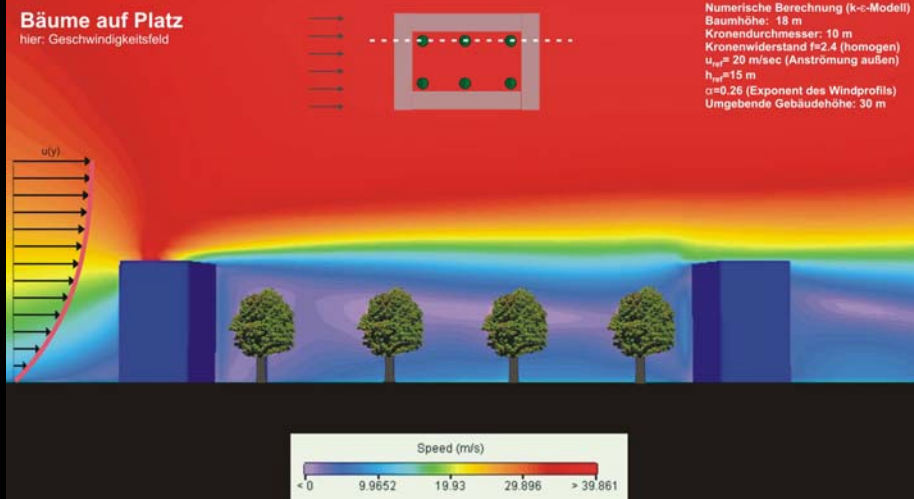


Gefahrenstelle hier: Zwischen Gebäuden

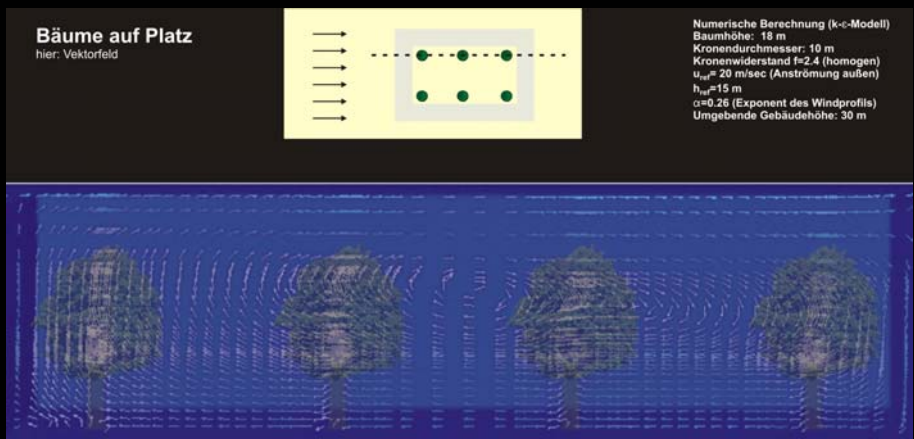


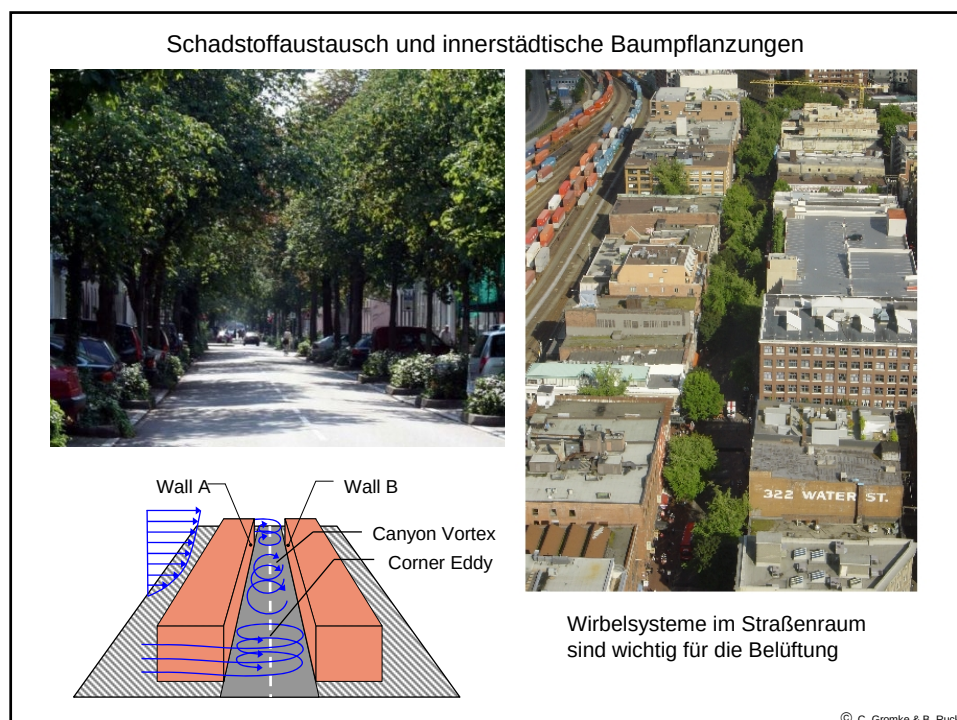
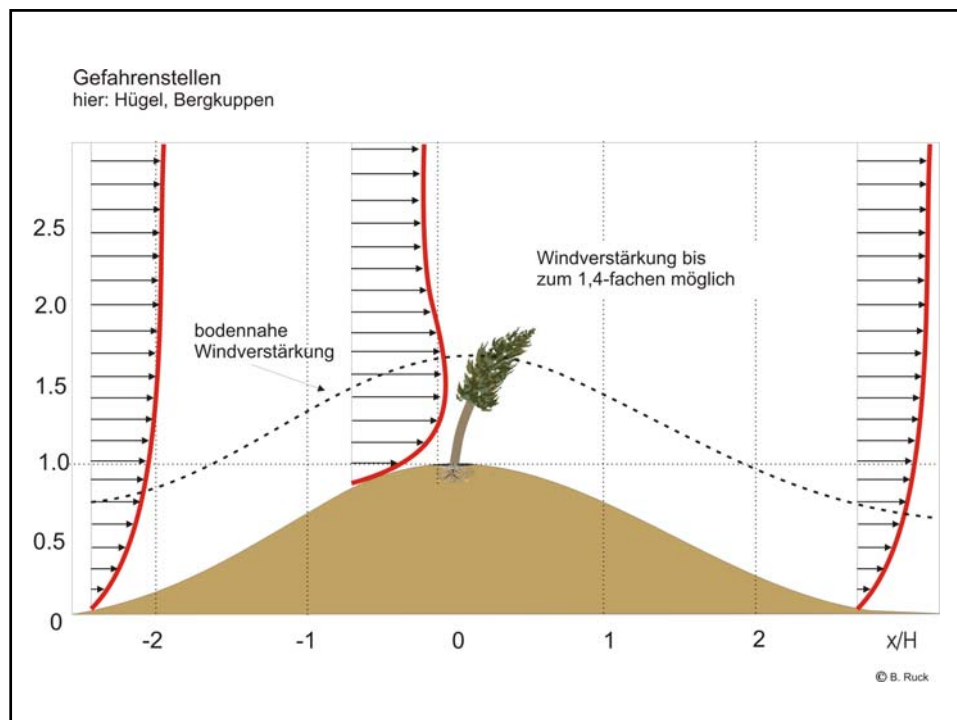
Allseits geschlossener Platz

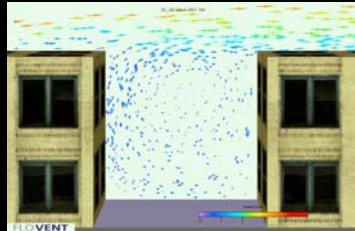
Bäume auf Platz hier: Geschwindigkeitsfeld



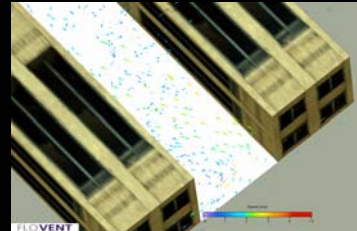
Bäume auf Platz hier: Vektorfeld







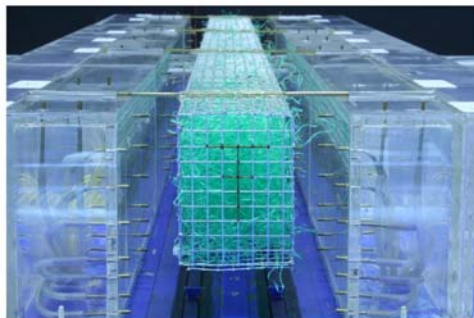
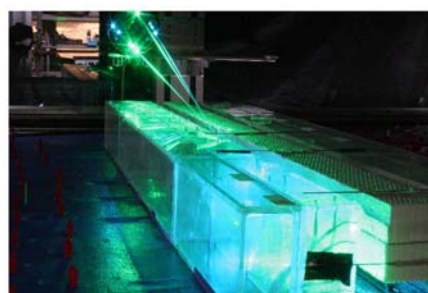
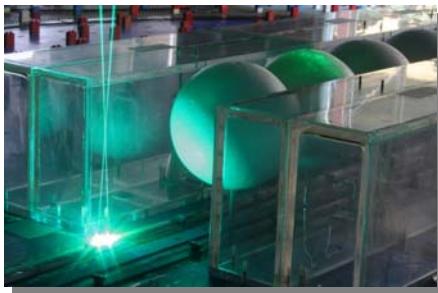
Canyon Vortex



Corner Eddy

Straßenschlucht ■

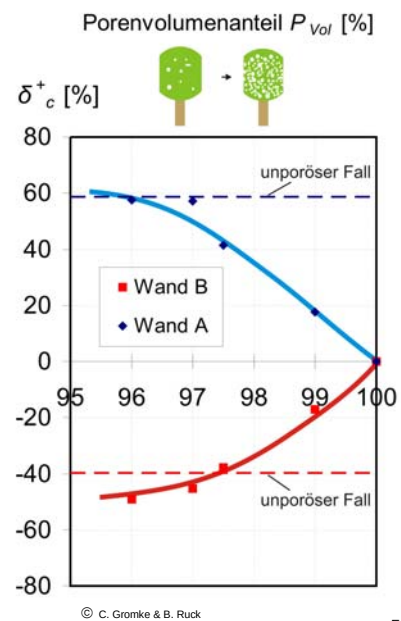
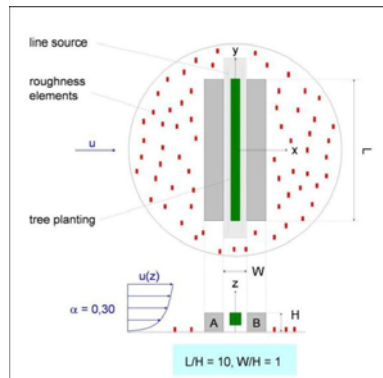
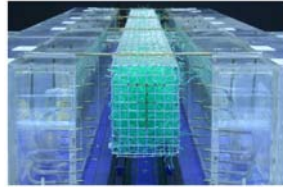
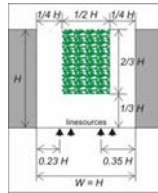
Messung des Strömungsfelds in der Straßenschlucht mit laseroptischen Messverfahren (LDA)



Forschungsprojekt DFG Ru 345/28

© C. Gromke & B. Ruck

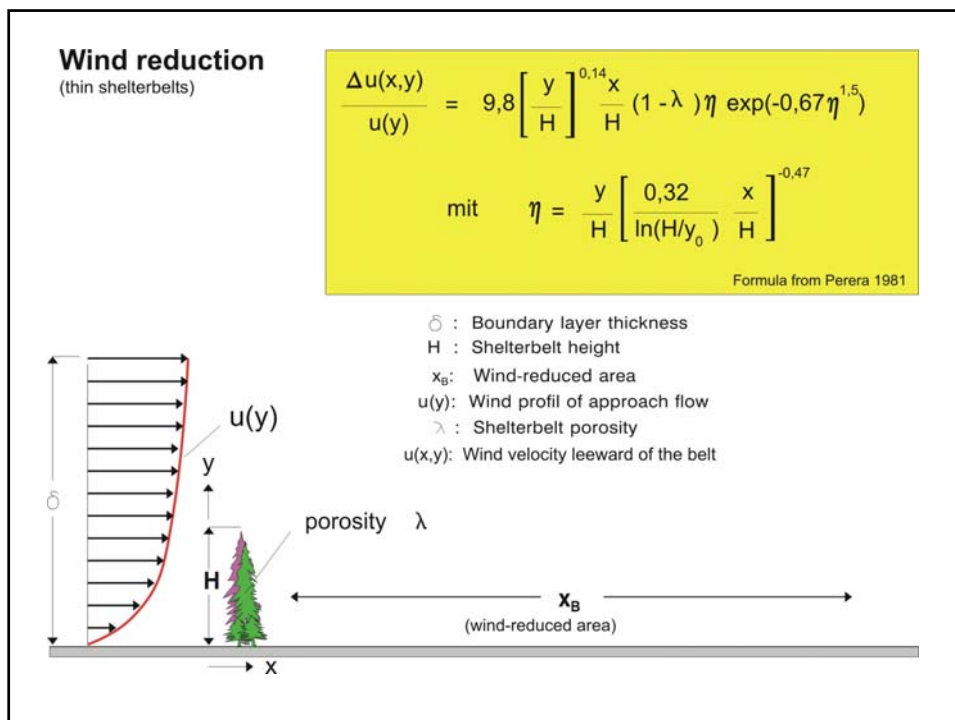
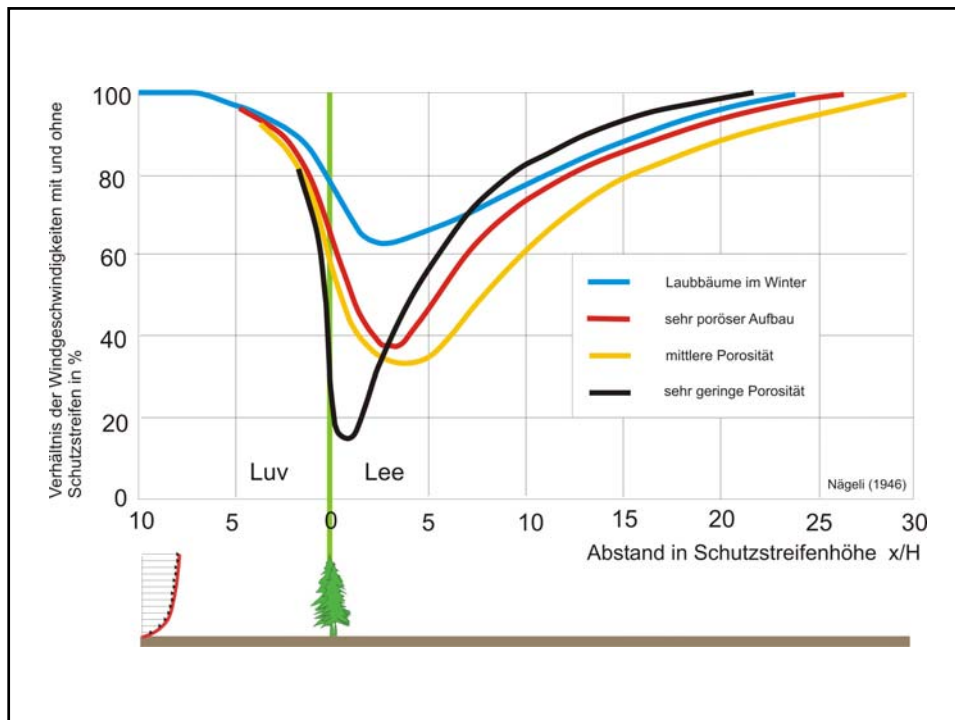
Einfluss der Porosität der Baumkronen auf die wandmittigen Konzentrationen



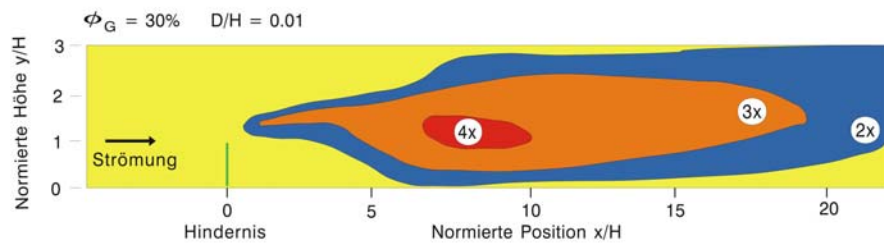
Kopplung der Nachläufe dreier Bäume zu einer windberuhigten Zone



© B. Ruck

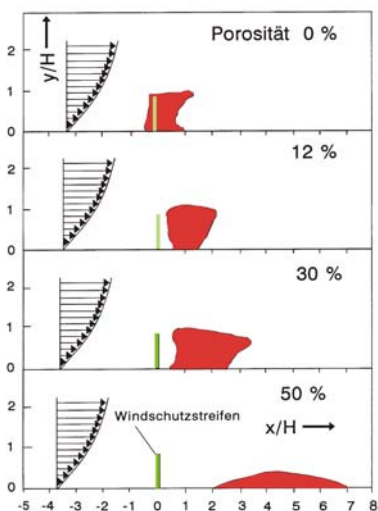


X-fache Zunahme der turbulenten kinetischen Energie der Grenzschichtströmung hinter einem dünnen 30%-porösen Windschutzstreifen; zeitgemittelte Darstellung



© B. Ruck

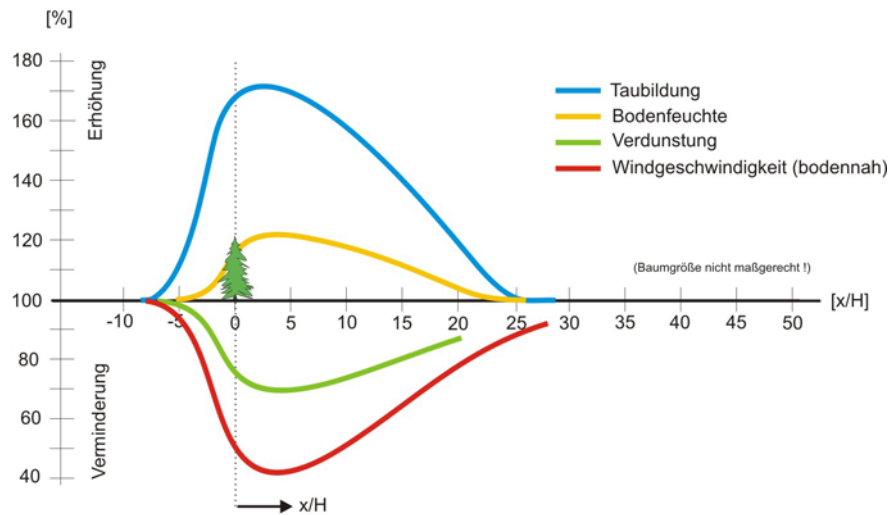
Gebiete maximalen Schutzes (Schutzfaktor 3.0 gemäß unten angegebener Schutzfaktordefinition) hinter dünnen Schutzstreifen verschiedener Porosität



Sheltering factor: $f = \frac{|u_{\text{non-sheltered}}| + \sigma_{u,\text{non-sheltered}}}{|u_{\text{sheltered}}| + \sigma_{u,\text{sheltered}}}$

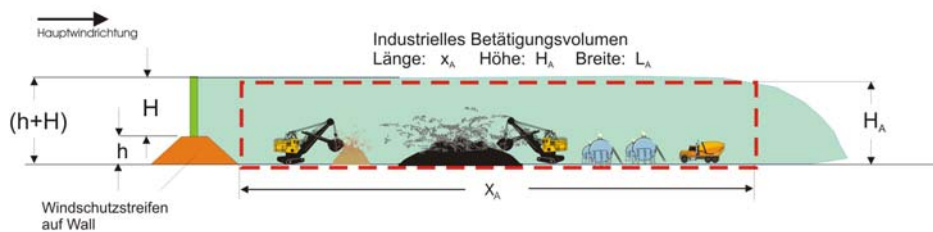
© B. Ruck

Wirkungen einer einreihigen Schutzpflanzung auf den Boden



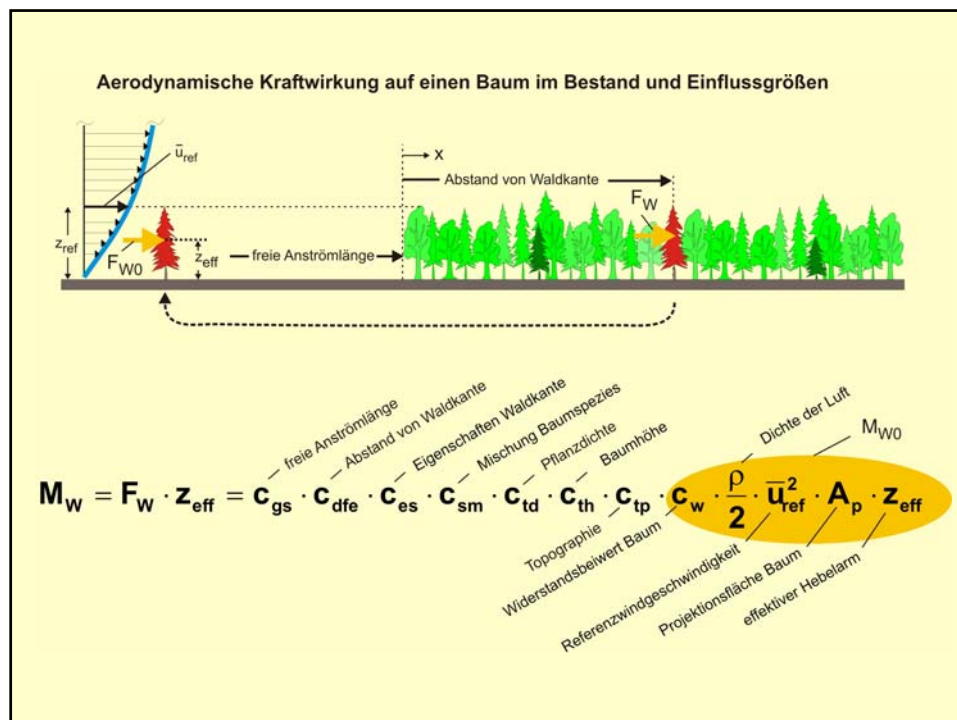
Spezifische Problemstellung

Frage: Wie müssen Windschutzstreifen mit Wall ausgelegt werden, so daß eine möglichst optimale Windberuhigung im Schutzgebiet erzielt wird?

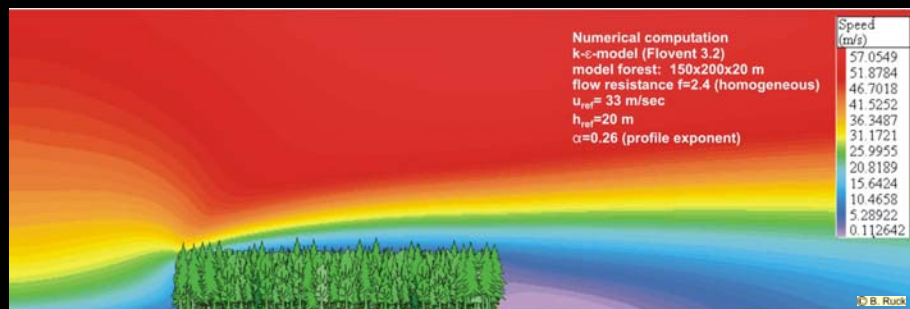


Wichtige Einflußparameter:

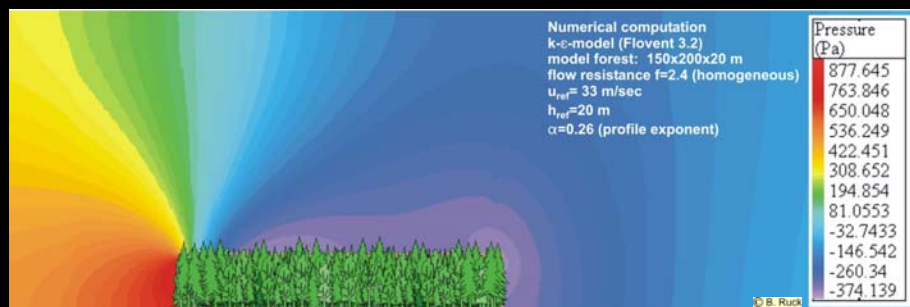
- Höhe der Windschutzanordnung
- Verhältnis aus Bewuchs- zur Wallhöhe
- Porosität des Bewuchs
- Wallgeometrie mit Böschungswinkel
- Kenngößen des atmos. Grenzschichtprofils

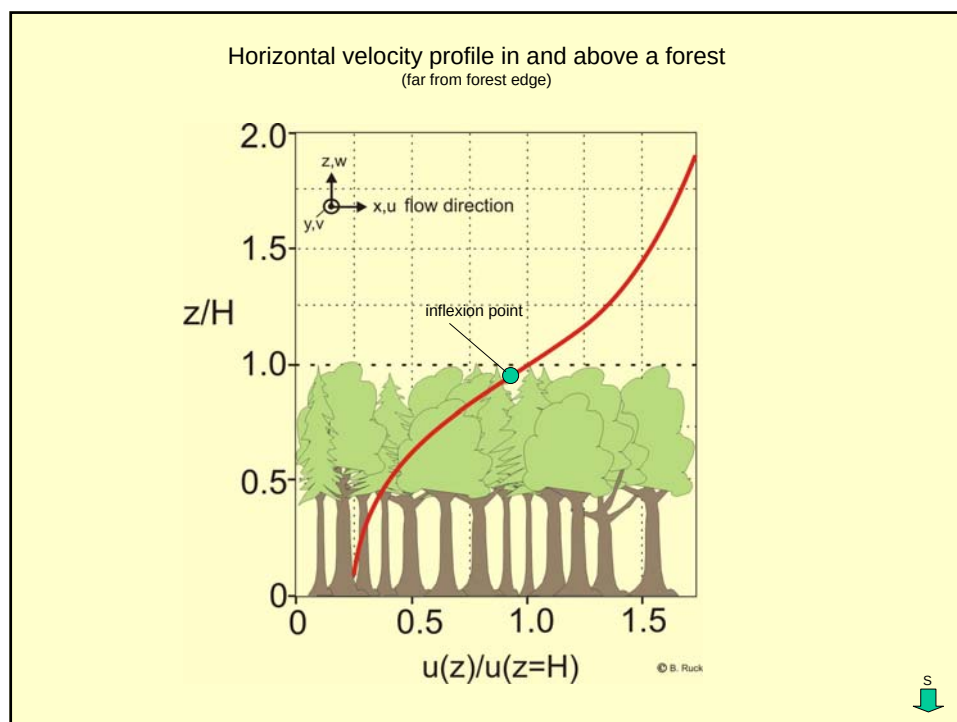
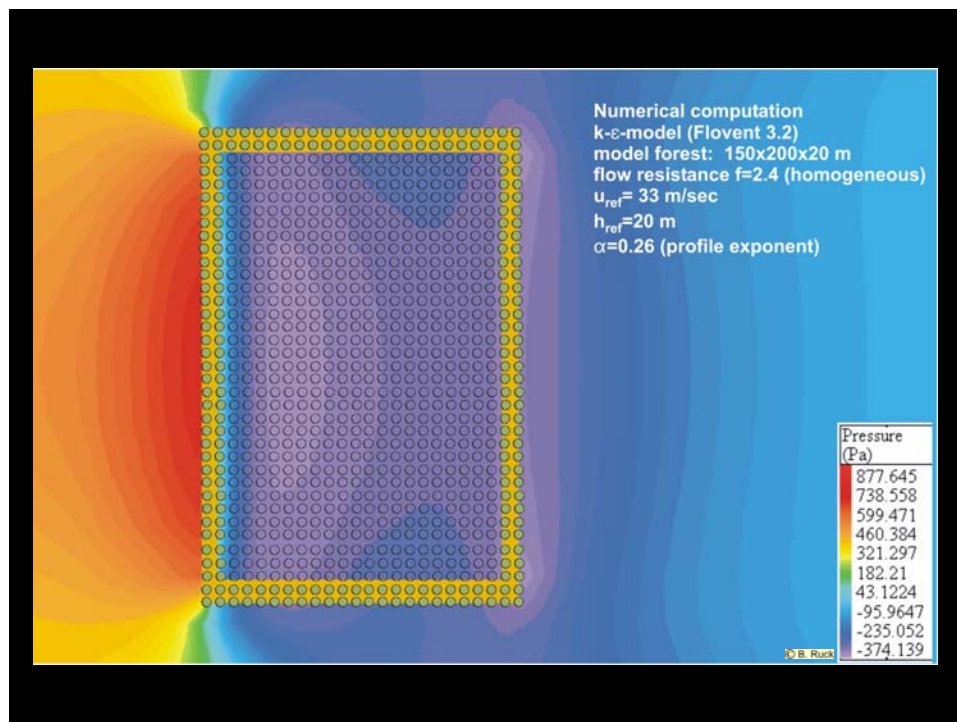


Windgeschwindigkeitsfeld bei der Umströmung eines geschlossenen Bestandes

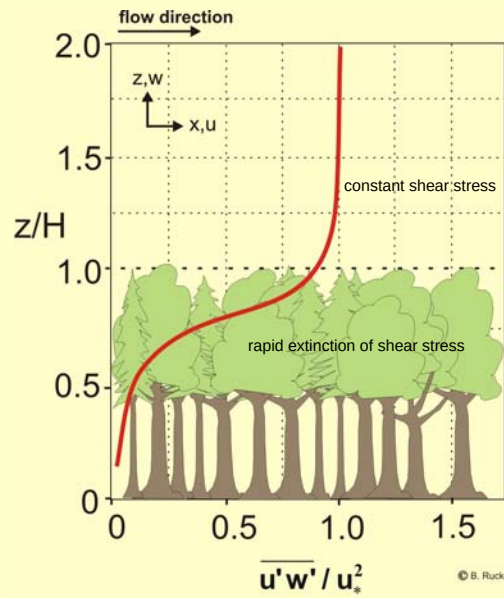


Druckverhältnisse bei der Umströmung eines geschlossenen Bestandes

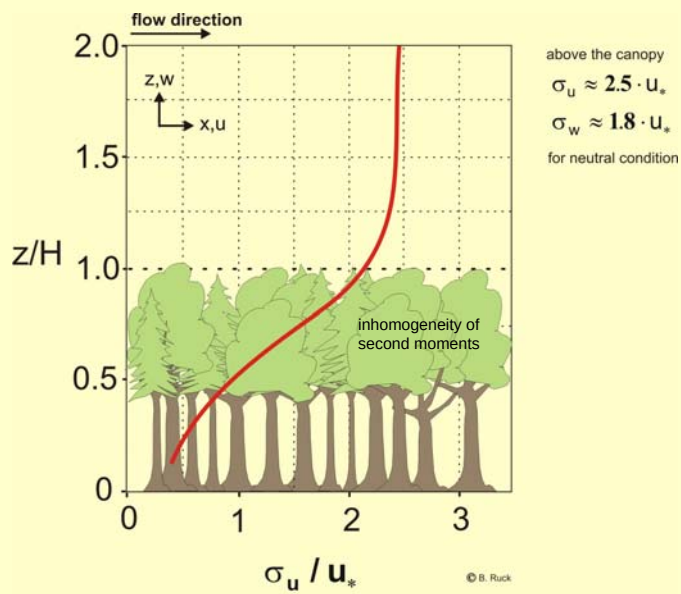




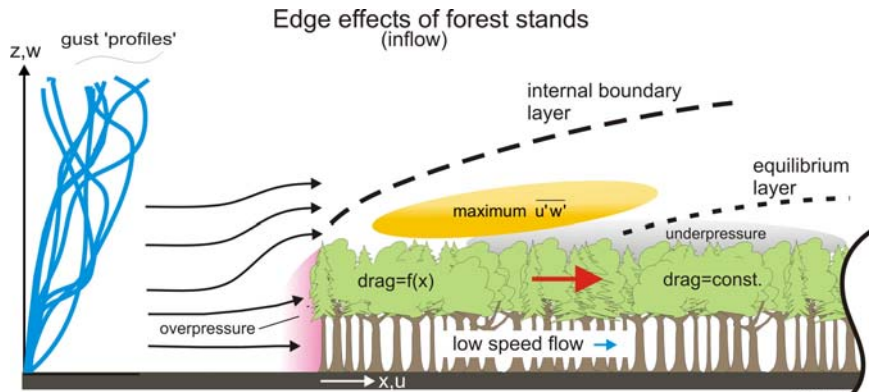
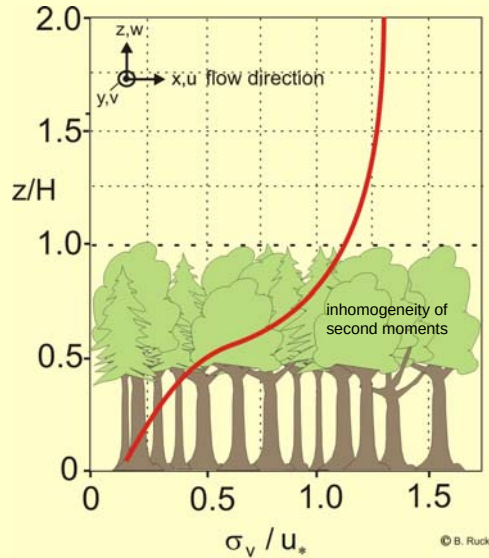
Shear stress within and above a forest (far from the forest edge)



Standard deviation of horizontal velocity fluctuations (far from the forest edge)

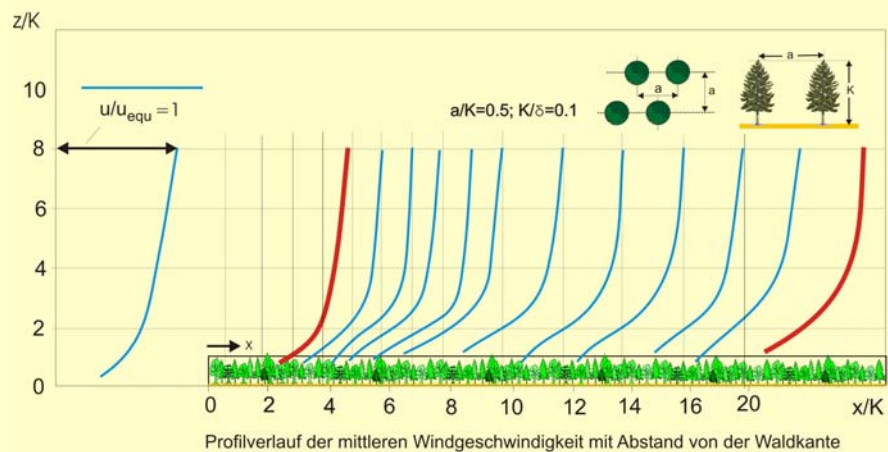


Standard deviation of lateral velocity fluctuations (far from the forest edge)



- 1986: Neckelmann, J.: Choice in tree species, topping and high pruning as means to prevent windthrow in permanent or recent stand edges. Pp. 42-45. Proceedings of the workshop „Minimizing wind damage to coniferous stands“. Denmark, March 3-7
- 1986: Hütte, P.: Die Absicherung sturmgefährdeter Fichtenbestandesränder durch die Kronenentwipfelung. Pp. 46-48. Proceedings of the workshop „Minimizing wind damage to coniferous stands“. Denmark, March 3-7, 1986.
- 1989: Adams, E.W., Ruck, B.: "Air Pollutant Deposition and Flow Structure near the Leading Edge of a Forest", Proc. of TSF 7, Turb. Shear Flow-Symp. Stanford Univ., USA, 2, 16-2
- 1990: Li, Z.; Lin, J.D.; Miller, D.R.: "Air Flow Over and Through a Forest Edge: A Steady-State Numerical Simulation", Boundary-Layer Meteorology 51, S. 179-197
- 1991: Ruck, B., Adams, E.: "Fluid Mechanical Aspects of the Pollutant Transport to Coniferous Trees", Boundary Layer Meteorology, 56, 163-195
- 1992: Bieder, U.; Schatz, A.; Schöppler, T.: "Modelling the Heat and Mass Transport to Forest Edges - A Contribution to the EUROTRAC subproject BIATEX", BIATEX-Jahresbericht
- 1995: Kruijt, B., Klaassen, W., Huijjes, R.W.A.: "Edge Effects on Diffusivity in the Roughness Layer over a Forest", in Coutts and Grace (eds.), Proc. of the IUFRO Conference on Wind and Wind Related Damages to Trees, Edinburgh, pp. 60-70, Cambridge University Press
- 1996: Gardiner, B., Stacey, G.: Designing Forest Edges to Improve Wind Stability, Forestry Commission, Technical Paper 16, 8 pages
- 1996: Liu, J.; Chen, J.M.; Black, T.A.; Novak, M.D.: Modelling of Turbulent Air Flow Downwind of a Model Forest Edge", Boundary-Layer Meteorology 77, S. 21-44
- 1997: Irvine, M.R. and Gardiner, B.A. and Hill, M.K.: The evolution of turbulence across a forest edge. In: Boundary layer meteorology: an international journal of physical and biological processes in the atmospheric boundary layer 84, S. 467-496
- 2002: Morse, A.P., Gardiner, B.A., Marshall, B.J.: "Mechanisms controlling turbulence development across a Forest Edge", Boundary Layer Meteorol., 103 (2002) 227-251.
- 2006: B. Yang, R.H. Shaw, K.T. Paw U: "Wind loading on trees across a forest edge: A large eddy simulation", Agric. Forest Meteorol., 141 (2006), 133-146
- 2007: Zashke, M., Ruck, B.: "A wind tunnel investigation of the flow across a forest edge", Proc. of the Twelfth Int. Conference on Wind Engineering, Cairns, Australia, August 2007
- 2008: Frank, C., Ruck, B.: "Numerical Study of the Airflow over Forest Clearings", Forestry 81(3), 259-277
- 2008: Dupont, S., Brunet, Y.: Impact of Forest Edge Shape on Tree Stability: A Large-Eddy Simulation Study, Forestry 81(3), 299-316.

Umformung des Windprofils stromab der Waldkante 'step change in surface roughness'



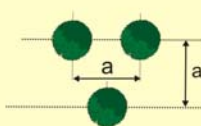
from: Ruck, B. Adams, E. 1991: 'Fluid mechanical effects of the pollutant transport to coniferous trees', Boundary-Layer Meteorology 56, 163-195

© B. Ruck

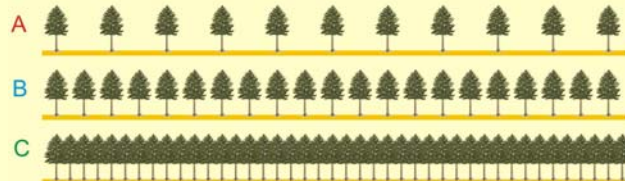
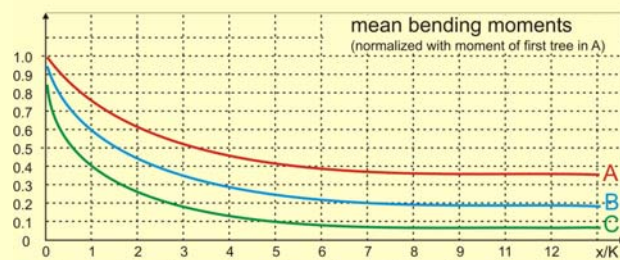
bending moment



tree spacing

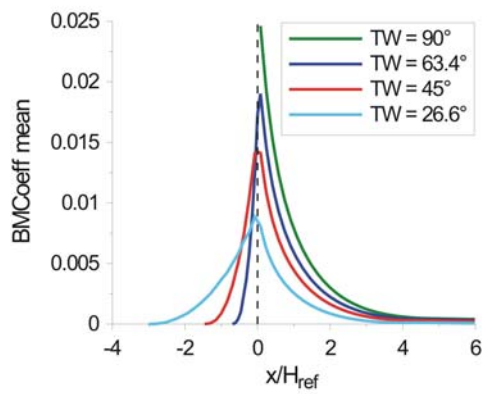


tree aspect

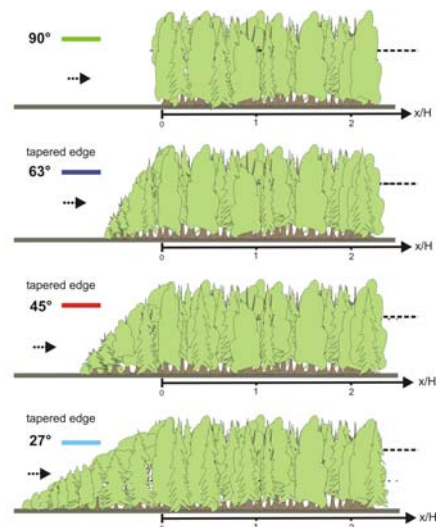


© B. Ruck

Influence of forest edge shape on the distribution of stem bending moments

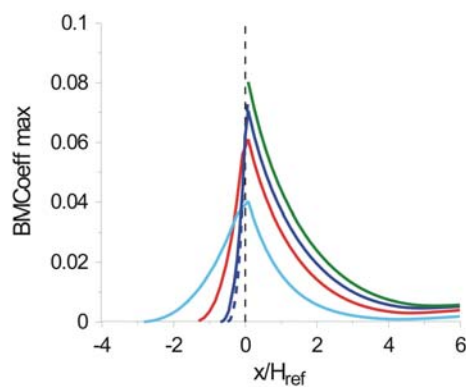


$$BM_{Coeff} = \frac{BM}{0.5 \cdot \rho \cdot u_{ref}^2 \cdot H_{ref}^3}$$

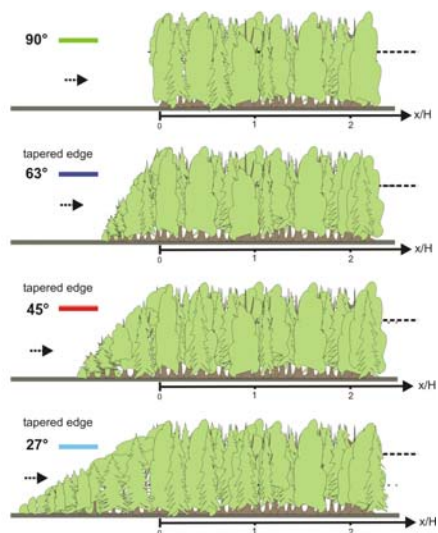


dense stand; $kr=0,8/m$
 $L=412$ m; $H=23$ m; $H_{ref}=15$ m; $u_{ref}=6,7$ m/sec (43,7m)

Influence of forest edge shape on the distribution of stem bending moments

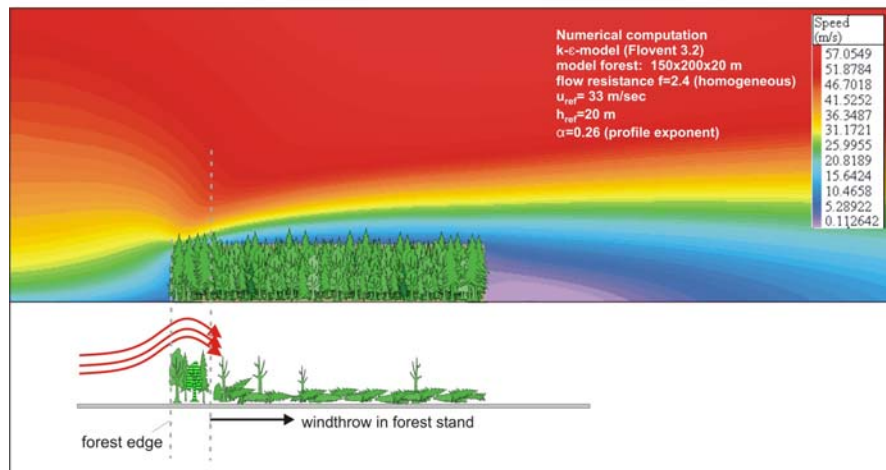


$$BM_{Coeff} = \frac{BM}{0.5 \cdot \rho \cdot u_{ref}^2 \cdot H_{ref}^3}$$



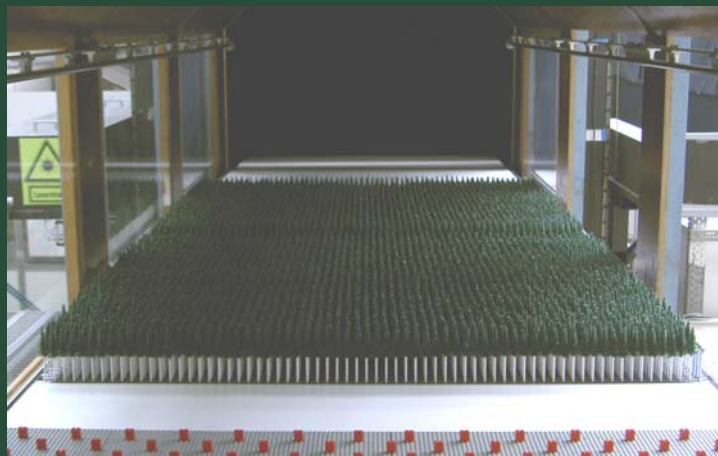
dense stand; $kr=0,8/m$
 $L=412$ m; $H=23$ m; $H_{ref}=15$ m; $u_{ref}=6,7$ m/sec (43,7m)

Phenomenology of windthrow in an extended forest stand



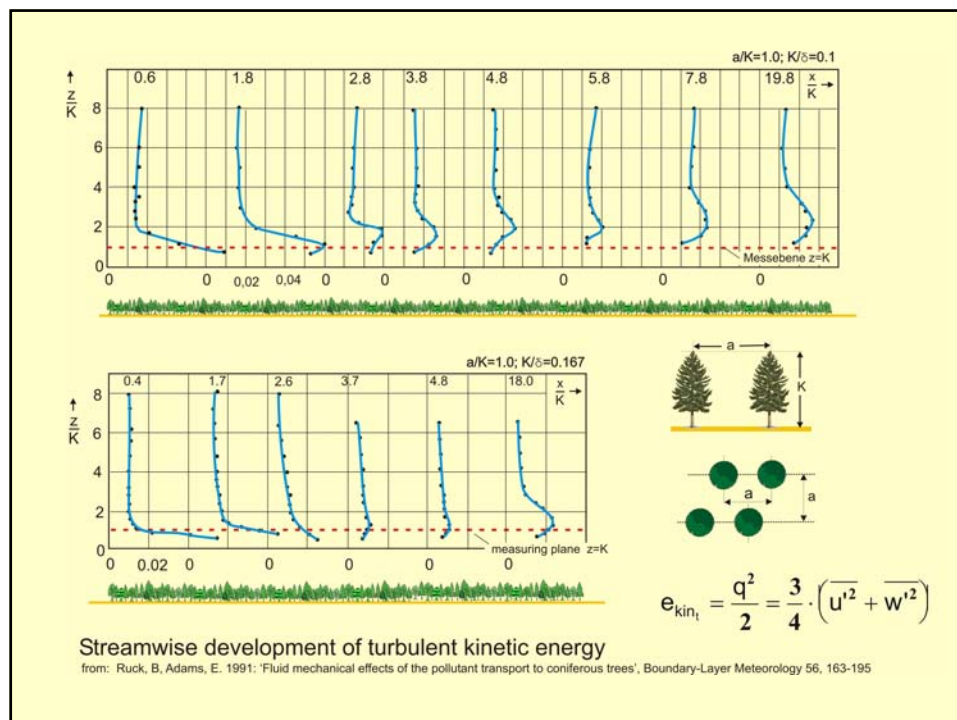
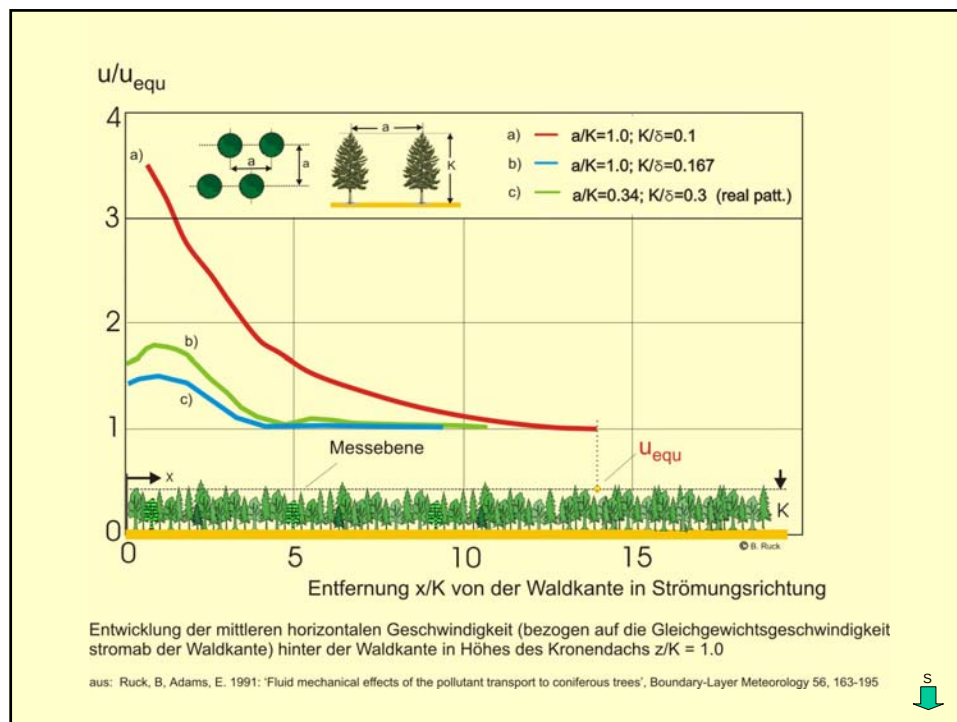
© B. Ruck

Waldmodell im Windkanal

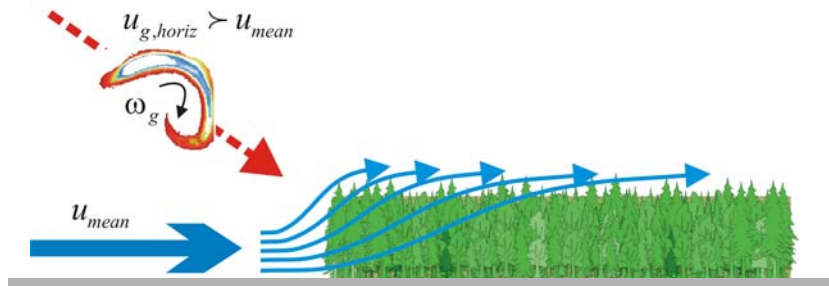


- ❖ 6 700 Modelltannen (100 Reihen à 67 Bäume)
- ❖ Modellmaßstab 1:200
- ❖ $H = 11.5$ cm (23 m Natur), $L = 17.9 \cdot H$, $B = 11.9 \cdot H$
- ❖ Bestandsdichte: 2 400 Bäume / m^2 (Natur: 600 Bäume / ha)
- ❖ Strukturiertes, geschlossenes Kronendach

Forschungsvorhaben „Reduzierung der Sturmanfälligkeit von Wäldern“ RESTER, Programm „Herausforderung Klimawandel“, LUBW Baden-Württemberg



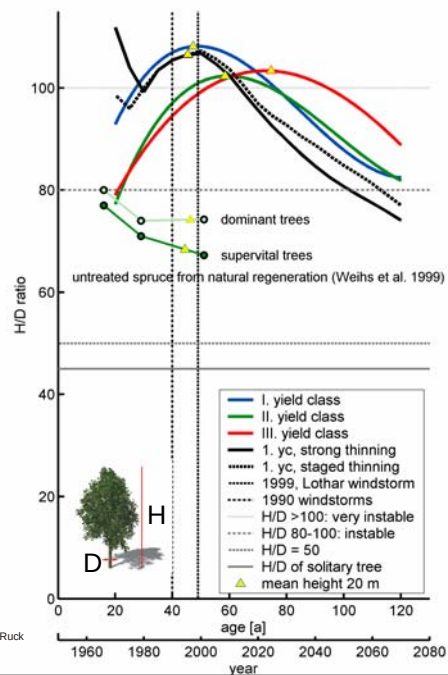
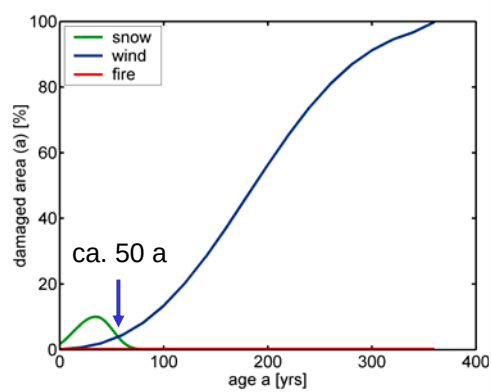
Wechselwirkung einer Böe mit der Grundströmung



DFG-Forschungsvorhaben Ru 345/30 „Die hochstationäre Wechselwirkung von Windböen und Waldkanten“



Einfluss des Alters des Bestandes



Agster & Ruck

Ende